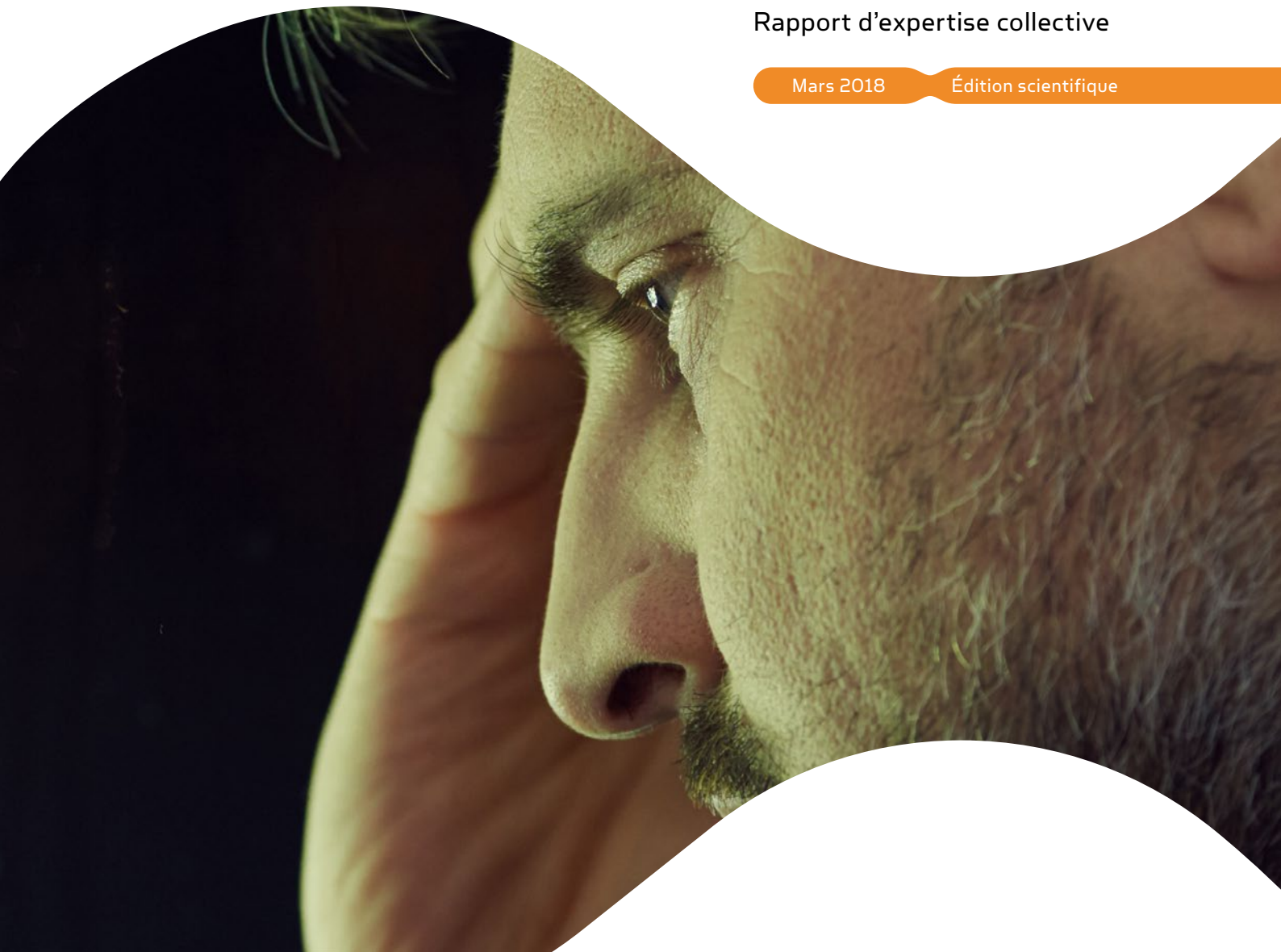


Hypersensibilité électromagnétique ou intolérance environnementale idiopathique attribuée aux champs électromagnétiques

Avis de l'Anses
Rapport d'expertise collective

Mars 2018

Édition scientifique



Hypersensibilité électromagnétique ou intolérance environnementale idiopathique attribuée aux champs électromagnétiques

Avis de l'Anses
Rapport d'expertise collective

Mars 2018

Édition scientifique

Le directeur général

Maisons-Alfort, le 13 mars 2018

AVIS **de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation,** **de l'environnement et du travail**

**relatif à l'expertise sur « l'hypersensibilité électromagnétique (EHS) ou intolérance
environnementale idiopathique attribuée aux champs électromagnétiques (IEI-CEM) »**

L'Anses met en œuvre une expertise scientifique indépendante et pluraliste.

L'Anses contribue principalement à assurer la sécurité sanitaire dans les domaines de l'environnement, du travail et de l'alimentation et à évaluer les risques sanitaires qu'ils peuvent comporter.

Elle contribue également à assurer d'une part la protection de la santé et du bien-être des animaux et de la santé des végétaux et d'autre part à l'évaluation des propriétés nutritionnelles des aliments.

Elle fournit aux autorités compétentes toutes les informations sur ces risques ainsi que l'expertise et l'appui scientifique technique nécessaires à l'élaboration des dispositions législatives et réglementaires et à la mise en œuvre des mesures de gestion du risque (article L.1313-1 du code de la santé publique).

Ses avis sont publiés sur son site internet.

Dans un contexte de controverse, aussi bien dans les milieux scientifiques que dans le débat public, l'Anses a décidé d'accorder à la question de l'hypersensibilité électromagnétique (EHS) ou intolérance environnementale idiopathique attribuée aux champs électromagnétiques (IEI-CEM) - les deux expressions désignent le même sujet -, toute l'attention qu'elle mérite en lui consacrant une expertise spécifique et approfondie. Pour mémoire, dans le rapport d'expertise consacré aux effets des radiofréquences sur la santé publié par l'Afsset en 2009, la question de l'EHS avait fait l'objet d'un chapitre particulier. En revanche, l'examen de ce sujet avait été volontairement différé au moment de la mise à jour de l'expertise sur le sujet des radiofréquences publiée par l'Anses en 2013 (auto-saisine du 14 juin 2011). Le groupe d'experts avait en effet estimé que la question de l'EHS nécessitait, d'une part, un recueil de données complémentaires et, d'autre part, de lui consacrer l'attention nécessaire par une expertise collective spécifique, objet du présent avis.

1. CONTEXTE ET OBJET DE LA SAISINE

Depuis le début des années 1980, la littérature scientifique rapporte de façon continue le cas de personnes se plaignant de troubles fonctionnels¹ divers (troubles cutanés attribués à une exposition aux écrans cathodiques, puis troubles plus variés attribués à des expositions aux champs émis par les appareils électroménagers et les installations électriques) qu'elles attribuent à une exposition à des champs électromagnétiques. Ce « tableau clinique » a reçu plusieurs appellations successives, traduisant une évolution des concepts comme on en observe fréquemment dans l'histoire de la médecine, surtout dans les situations d'incertitude.

¹ Le terme de « trouble fonctionnel » regroupe l'ensemble des symptômes et affections sans support lésionnel ni dysfonctionnement d'organe identifiable, par opposition aux maladies organiques.

L'une des spécificités de l'EHS est que les symptômes dont se plaignent les personnes se déclarant EHS sont attribués à des expositions aussi bien aux radiofréquences (le plus souvent pour des sources autour de quelques centaines de MégaHertz à quelques GigaHertz) qu'aux extrêmement basses fréquences (principalement 50 Hz en Europe), ce qui rend l'étude du sujet plus complexe. Après avoir débattu de cette difficulté en son sein, le groupe de travail a choisi de s'intéresser à toutes les personnes se déclarant EHS, quelles que soient les sources de champs incriminées.

L'objectif de cette expertise était de chercher à comprendre l'EHS dans sa complexité, de la caractériser, et d'étudier la plausibilité des différentes hypothèses avancées pour expliquer l'origine des troubles déclarés.

2. ORGANISATION DE L'EXPERTISE

La présente expertise relève du domaine de compétences du comité d'experts spécialisé (CES) « Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements ». L'Anses a confié la réalisation de l'expertise au groupe de travail « radiofréquences et santé ». Celui-ci avait été constitué à la suite d'un appel public à candidatures d'experts lancé le 1^{er} décembre 2010. Les experts ont été recrutés pour leurs compétences scientifiques et techniques dans les domaines de l'épidémiologie, de la médecine, de la biologie, de la métrologie et de la dosimétrie des champs électromagnétiques, ainsi que des sciences humaines et sociales. Au total, seize experts indépendants ont été nommés le 30 juin 2011 pour une durée de 3 ans. Ce groupe a notamment produit une mise à jour de l'évaluation des risques pour la santé liés à l'exposition aux radiofréquences en octobre 2013. La composition du groupe de travail a ensuite été en partie renouvelée et complétée le 9 juillet 2014 pour réaliser l'expertise relative à l'EHS, puis le mandat de ce groupe a été prolongé jusqu'au 31 décembre 2017, afin de finaliser les travaux. Ces travaux d'expertise sont donc issus de collectifs d'experts aux compétences complémentaires.

Les liens d'intérêts déclarés par les experts ont été analysés par l'Anses avant leur nomination et tout au long des travaux, afin d'éviter les risques de conflits d'intérêts au regard des points traités dans le cadre de l'expertise. Les déclarations d'intérêts des experts sont rendues publiques *via* le site internet de l'Anses (www.anses.fr).

Veille bibliographique et recueil d'informations

Comme toutes les expertises de l'Anses, celle-ci est principalement basée sur l'analyse de la littérature scientifique disponible. La période de référence pour la veille bibliographique s'étend d'avril 2009² à juillet 2016³. Toutefois, pour compléter l'historique de certaines questions et suite à la consultation publique, des références sortant du cadre de cette période ont ponctuellement pu être ajoutées au rapport. Les documents expertisés sont de natures diverses (articles scientifiques publiés dans des journaux à comité de lecture indépendant, rapports d'expertise d'organismes européens et internationaux, rapports de recherches financées par l'Anses, etc.). En décembre 2014, le Comité de dialogue « Radiofréquences et santé »⁴ de l'Agence a également été invité à compléter la liste des références bibliographiques analysées par le groupe de travail.

² fin de la période d'analyse de la bibliographie prise en compte dans le dernier rapport de l'Agence s'intéressant à la question de l'EHS, publié en octobre 2009.

³ date de fin de la revue bibliographique correspondant au moment de la mise en consultation publique du rapport pré-définitif.

⁴ Le Comité de dialogue « Radiofréquences et santé » de l'Anses est un lieu d'échanges, de réflexion et d'information sur les questions scientifiques relatives aux effets potentiels sur la santé des radiofréquences et à leur évaluation. Sa mise en place en juin 2011 s'inscrit dans le prolongement de l'expérience acquise dans le cadre de la Fondation « Santé et Radiofréquences ». Il réunit des représentants d'associations et de syndicats, des opérateurs de téléphonie mobile et

En complément des documents ainsi recensés, des contributions écrites ont été sollicitées auprès de médecins et sociologues, sur des aspects précis concernant l'expertise. De plus, des études ont fait l'objet de contrats de recherche et développement (CRD) avec le Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB) et l'unité mixte de recherche épidémiologique et de surveillance transport-travail-environnement (UMRESTTE, Ifsttar et Université Claude Bernard Lyon 1), afin d'obtenir de nouvelles données.

En outre, compte tenu de la complexité du sujet, des limites méthodologiques de nombreux articles scientifiques, de l'absence d'études portant sur certaines questions, ainsi que des controverses qui résultent parfois de ces difficultés, le groupe de travail s'est également intéressé aux expériences de terrain. Il s'est ainsi penché, à travers une vingtaine d'auditions, sur les témoignages de différentes parties prenantes (médecins hospitaliers et médecins généralistes, associations et collectifs de citoyens, élus, chercheurs, etc.). Ces témoignages ont nourri les réflexions du groupe de travail et parfois proposé des hypothèses explicatives de l'EHS, qui ont ensuite été analysées au cours de l'expertise.

Déroulement de l'expertise

Entre juillet 2014 et octobre 2017, le groupe de travail s'est réuni 29 fois en séances plénières afin, notamment, de procéder aux auditions, à l'analyse des articles et d'étudier et débattre de la plausibilité des différentes hypothèses avancées pour expliquer l'origine des troubles.

La qualité des publications scientifiques (études cliniques et études épidémiologiques principalement) a été évaluée en s'appuyant sur différents critères (rigueur du protocole, caractérisation des expositions, etc.), quels que soient leurs résultats et conclusions.

Les travaux d'expertise ont été présentés au CES à plusieurs reprises entre septembre 2014 et novembre 2017, tant sur les aspects méthodologiques que scientifiques. Les commentaires du CES ont été pris en compte par le groupe de travail tout au long de l'expertise.

Celle-ci a été réalisée dans le respect de la norme NF X 50-110 « Qualité en expertise – Prescriptions générales de compétence pour une expertise (Mai 2003) ».

Consultation publique

Considérant l'importance, la complexité et la sensibilité du sujet, l'Agence a souhaité porter le rapport « Hypersensibilité électromagnétique ou intolérance environnementale idiopathique attribuée aux champs électromagnétiques » dans un état pré-définitif, c'est-à-dire sans conclusion ni recommandation, à la connaissance des membres de la communauté scientifique et des parties prenantes intéressées au cours d'une consultation publique.

Celle-ci a été ouverte du 27 juillet au 15 octobre 2016. Elle était destinée à recueillir des données et commentaires scientifiques susceptibles d'être pris en compte dans l'élaboration finale du rapport d'expertise. Au total, plus de 500 commentaires ont été déposés par l'intermédiaire d'un formulaire en ligne disponible sur le site internet de l'Agence. Chacun d'entre eux a été analysé par plusieurs experts rapporteurs et fait l'objet d'une réponse, ce qui a nécessité de nombreuses réunions en sous-groupes. Chaque réponse a ensuite été validée par l'ensemble du groupe de travail (cf. tableau de réponse aux commentaires en ligne sur le site de l'Anses). Près de 150 commentaires ont entraîné une modification, un ajout ou une reformulation du rapport d'expertise.

des radiodiffuseurs, des institutions, des collectivités territoriales et des élus dans un souci d'équilibre des groupes d'intérêts.

Validation des travaux d'expertise

Les travaux d'expertise ont été validés par le CES « Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements » le 15 décembre 2017.

3. ANALYSE ET CONCLUSIONS DU CES

Comment définir l'EHS ? (cette question est abordée au chapitre 3 du rapport d'expertise)

Le groupe de travail a adopté la définition de l'OMS, qui a retenu trois critères pour caractériser l'« intolérance environnementale idiopathique aux champs électromagnétiques (IEI-CEM) », également appelée EHS, à savoir :

- 1) la perception par les sujets de symptômes fonctionnels divers non spécifiques⁵ (troubles du sommeil, maux de tête, symptômes cutanés, etc.) ;
- 2) l'absence d'évidences clinique et biologique permettant d'expliquer ces symptômes ;
- 3) l'attribution, par les sujets eux-mêmes, de ces symptômes à une exposition à des champs électromagnétiques, eux-mêmes diversifiés.

Il faut préciser que, pour l'OMS, « l'IEI est un descripteur n'impliquant aucune étiologie chimique ou aucune sensibilité de type immunologique ou électromagnétique. Ce terme regroupe un certain nombre de troubles ayant en commun des symptômes non spécifiques similaires, qui restent non expliqués sur le plan médical et dont les effets sont préjudiciables pour la santé des personnes. »

En ce qui concerne les symptômes, les plus fréquemment rapportés dans la plupart des études descriptives, ainsi qu'à travers les témoignages, sont la fatigue et les troubles du sommeil. Cependant, les symptômes décrits sont multiples, communs à de nombreuses autres affections et hétérogènes, avec des descriptions variables (les questionnaires utilisés, le recrutement des personnes ne sont pas comparables d'une étude à l'autre, etc.). Les différents témoignages rapportés lors des auditions et de la consultation publique sont également hétérogènes (cf. premier critère de l'OMS). Quoi qu'il en soit, les plaintes (douleurs, souffrance⁶) formulées par les personnes se déclarant EHS correspondent à une réalité vécue.

En ce qui concerne la recherche de bases cliniques, biologiques et / ou physiologiques, les quelques travaux qui ont essayé de décrire les caractéristiques de l'EHS n'ont pas permis de mettre en évidence de critères de diagnostic qui puissent être utilisables pour les études cliniques, ni de critères de classification pour la recherche qui fassent l'objet d'un consensus suffisant pour pouvoir être proposés en pratique (cf. deuxième critère de l'OMS). Il en résulte une grande imprécision dans l'organisation des recherches et dans l'interprétation de leurs résultats.

Enfin, les expositions aux champs électromagnétiques incriminées dans les études ou à travers les témoignages sont également très hétérogènes (cf. troisième critère de l'OMS) : les ondes radiofréquences sont principalement citées (téléphone mobile, Wi-Fi, antennes relais, etc.) ainsi

⁵ Un signe clinique est dit « non spécifique » lorsqu'il peut être l'expression clinique de plusieurs maladies différentes. Au contraire, un signe clinique est dit « spécifique » lorsqu'il permet d'orienter le diagnostic vers une ou un groupe de pathologies.

⁶ « C'est à des signes, donc à la sémiologie, que psychiatrie et phénoménologie s'adressent d'un commun accord pour justifier leur emploi distinct des termes douleur et souffrance : on s'accordera donc pour réserver le terme douleur à des affects ressentis comme localisés dans des organes particuliers du corps ou dans le corps tout entier, et le terme souffrance à des affects ouverts sur la réflexivité, le langage, le rapport à soi, le rapport à autrui, le rapport au sens, au questionnement, etc. Mais la douleur pure, purement physique, reste un cas limité, comme l'est peut-être la souffrance supposée purement psychique, laquelle va rarement sans quelques degrés de somatisation. Ce chevauchement explique les hésitations du langage ordinaire » (Ricœur 1994).

que, parfois, les extrêmement basses fréquences (lignes et installations électriques), dont les modes d'interactions avec le corps humain sont cependant très différents.

Actuellement, la seule possibilité pour définir l'EHS repose donc sur l'auto-déclaration des personnes. En conséquence, cela peut entraîner un manque de sensibilité dans toutes les études sur le sujet, puisque des personnes se déclarant EHS très différentes peuvent être recrutées sans distinction.

Ainsi, une évaluation de la prévalence de l'EHS reste très difficile à faire ; les données scientifiques sur le pourcentage de personnes se déclarant EHS dans la population en France et à l'international ne sont pas fiables, elles sont comprises entre 0,7 et 13,3 %. Toutefois, les données les plus récentes (sept articles publiés entre 2008 et 2013) donnent des résultats plus resserrés, autour de 5 % (entre 1,2 % et 8,8 %) et ne semblent pas confirmer la perspective d'une augmentation progressive de la prévalence de l'EHS qui avait été suggérée par certaines études plus anciennes.

Les études descriptives mettent en évidence le fait que les personnes se déclarant EHS ont un moins bon niveau de bien-être et sont, en moyenne, plus anxieuses et déprimées que les témoins. Cependant, cette observation est difficile à interpréter, car telles que les études ont été conçues, il n'est pas possible de déterminer si cette anxiété et / ou cette dépression sont la cause ou la conséquence des symptômes ressentis par ces personnes. L'anxiété et la dépression sont en effet des réactions communes à la plupart des maladies graves ou rares. Dans le cas des personnes se déclarant EHS, les difficultés de prise en charge médicale et la persistance des symptômes pourraient contribuer à générer de l'anxiété et / ou un état dépressif. Il n'est pas possible de conclure que cette composante psychique est plus ou moins fréquente chez les personnes se déclarant EHS que chez celles présentant une maladie grave ou rare.

À noter qu'il existe des associations entre l'EHS et plusieurs syndromes ou troubles, le plus souvent le syndrome d'intolérance aux odeurs chimiques (SIOC, *multiple chemical sensitivity*), la fibromyalgie, les migraines et les acouphènes.

L'être humain est-il capable de percevoir les champs électromagnétiques ? (cette question est abordée au chapitre 5 du rapport d'expertise)

Aucune étude n'a mis en évidence une capacité des personnes se déclarant EHS à percevoir des champs électromagnétiques radiofréquences dans des conditions d'exposition environnementale.

Cependant, quelques études très disparates (qu'il s'agisse des techniques d'exposition ou des critères d'évaluation) et de qualité scientifique très inégale ont permis d'observer :

- des potentiels évoqués⁷ sur des enregistrements de l'électroencéphalogramme (EEG) chez des personnes non-EHS lors d'une exposition à un signal magnétique 60 Hz (2 études d'une seule et même équipe) ;
- des différences entre des personnes se déclarant EHS et des témoins exposés à des champs électromagnétiques basses fréquences 50 Hz dans leur capacité à distinguer les expositions réelles des expositions factices (2 études d'une seule et même équipe) ;

⁷ Les potentiels évoqués (PE) sont définis comme des modifications de l'activité électrique du système nerveux en réponse à une stimulation externe (visuelle, auditive, somesthésique ou motrice) ou endogène (PE cognitif). La stimulation doit être répétée un grand nombre de fois pour extraire, par moyennage de l'activité électrique de base, une réponse spécifique de la voie nerveuse stimulée.

- un abaissement du seuil de perception du courant électrique basses fréquences chez certaines personnes se déclarant EHS (3 études d'une seule équipe). On peut alors, dans ce cas, parler d'électrosensibilité ou d'hypersensibilité au courant électrique.

Toutefois, les résultats de ces études doivent être interprétés avec précaution et mériteraient de faire l'objet d'études de réplication, à condition toutefois qu'une attention particulière soit accordée aux critères d'inclusion des participants et aux résultats individuels. De plus, en l'absence de recueil de la symptomatologie fonctionnelle des participants, ces études ne permettent pas d'établir de lien entre ces observations et l'EHS.

Existe-t-il une relation causale entre l'exposition aux champs électromagnétiques et les symptômes des personnes se déclarant EHS ? (cette question est principalement abordée au chapitre 6 du rapport d'expertise)

Les études de provocation sont souvent considérées comme le meilleur moyen de démontrer, en laboratoire, l'existence d'un lien de causalité entre les expositions aux champs électromagnétiques d'une part, et la survenue et la persistance des symptômes d'autre part.

Les études de provocation analysées (une quarantaine) n'ont pas permis de mettre en évidence, de manière fiable et reproductible, l'apparition de symptômes ou d'anomalies biologiques ou physiologiques spécifiques à l'EHS pendant ou après une exposition (aux basses fréquences ou aux radiofréquences). Ceci suggère deux hypothèses :

- soit les symptômes ressentis par les personnes se déclarant EHS ne seraient pas dus aux expositions aux champs électromagnétiques et il n'existerait pas d'anomalie biologique et / ou physiologique objectivable lorsqu'elles sont exposées aux champs électromagnétiques (hypothèse 1) ;
- soit l'absence de résultat serait due aux limites méthodologiques des études de provocation (sélection des sujets, taille des échantillons, nature des expositions, etc.) (hypothèse 2). Ces limites méthodologiques ne permettraient ainsi pas d'exclure avec certitude que :
 - certaines personnes sensibles aux champs électromagnétiques et présentant des effets biologiques et / ou physiologiques en condition d'exposition, n'aient pas été détectées jusqu'à présent en raison de l'imprécision des critères d'inclusion et d'exclusion des participants à ces études de provocation ;
 - des effets biologiques et / ou physiologiques puissent se manifester uniquement dans certaines conditions d'exposition (non encore testées) ;
 - les champs électromagnétiques aient certains effets biologiques et / ou physiologiques non encore analysés dans les études de provocation (cf. effets sur l'électroencéphalogramme (EEG) du sommeil décrits dans le rapport publié par l'Anses en 2013 sur les radiofréquences et la santé).

Par ailleurs, les résultats de plusieurs études de provocation ont conduit leurs auteurs à proposer l'hypothèse d'un rôle de l'effet *nocebo*⁸ dans l'apparition et / ou la persistance de l'EHS (compatible à la fois avec les hypothèses 1 et 2 ci-dessus). Toutefois, ces études de provocation ont été réalisées chez des personnes se déclarant EHS depuis un certain temps et ne renseignent

⁸ L'effet *nocebo* se définit comme l'ensemble des symptômes « négatifs » ressentis par une personne soumise à l'exposition à un médicament, une thérapeutique non médicamenteuse ou à des facteurs environnementaux. Il est causé par la suggestion, la croyance ou la crainte que cette exposition est nuisible. Comme il sera montré ci-dessous, il s'agit d'un phénomène psychophysiologique normal.

donc pas sur les modalités de la première apparition des symptômes et leur attribution à une exposition à des champs électromagnétiques. Il n'en reste pas moins qu'une quinzaine d'articles présentent des résultats concordants pour montrer que, soumises à des expositions factices, les personnes se déclarant EHS expriment un nombre de fausses reconnaissances et de symptômes ressentis nettement plus élevé que les témoins, ce qui ne peut être expliqué que par un effet *nocebo*. L'effet *nocebo* joue donc certainement un rôle non négligeable dans la persistance de l'EHS. Si les mécanismes qui sous-tendent cet effet sont encore, pour certains, mal connus, il est bien établi que ce phénomène, comme l'effet *placebo*, intervient souvent dans la relation soignants-soignés, et qu'il s'agit d'une réponse cognitivo-affective normale. De plus, sa survenue n'exclut pas la présence d'une affection organique non identifiée.

Au final, aucune preuve expérimentale solide ne permet actuellement d'établir un lien de causalité entre l'exposition aux champs électromagnétiques et les symptômes décrits par les personnes se déclarant EHS.

Quelles hypothèses sont avancées pour interpréter les symptômes des personnes se déclarant EHS ? (cette question est principalement abordée au chapitre 7 du rapport d'expertise)

Pour essayer d'expliquer les différents symptômes des personnes se déclarant EHS, les experts du groupe de travail de l'Anses ont recensé différentes hypothèses à travers l'analyse de la littérature scientifique. En outre, compte tenu des limites de nombreux articles scientifiques et de l'absence d'études sur certaines questions, le groupe de travail s'est aussi intéressé aux expériences de terrain et aux hypothèses émises par différents médecins et associations. Il a ensuite étudié l'ensemble de ces hypothèses.

Dans un premier temps, le groupe de travail a cherché à savoir s'il existait des biomarqueurs caractéristiques de l'EHS (différences biologiques ou modifications physico-chimiques, stress oxydant chronique ou intoxication chimique). Les pistes génétique et immunitaire ont également été examinées pour essayer d'expliquer l'EHS. Cependant, il n'existe aucune donnée scientifique concluante en faveur de ces hypothèses.

Le groupe de travail s'est ensuite intéressé à l'activité du système nerveux autonome (SNA) des personnes se déclarant EHS. Certaines études semblent mettre en évidence un phénotype différent en ce qui concerne l'activité du SNA au niveau basal (c'est-à-dire en l'absence d'exposition) entre les personnes se déclarant EHS et les témoins. L'origine de cette différence serait un déséquilibre de la balance ortho/parasympathique, qui se manifesterait, selon les études, par une augmentation de la composante orthosympathique, une tachycardie et / ou une augmentation de la conductance cutanée. Cependant, ces modifications pourraient aussi traduire un effet du stress lié aux conditions expérimentales. L'hétérogénéité des résultats peut s'expliquer par plusieurs limites, que l'on retrouve dans la plupart de ces études : taille trop faible des échantillons, méthodologies inadaptées, etc. Ainsi, les données disponibles ne permettent pas de mettre en évidence un impact des champs électromagnétiques sur le système nerveux autonome des personnes se déclarant EHS (ni sur celui des témoins). En l'état actuel des connaissances, l'hypothèse selon laquelle les personnes se déclarant EHS souffriraient d'un dysfonctionnement basal du système nerveux autonome ne peut être ni validée ni exclue.

Le groupe de travail a par ailleurs étudié plusieurs hypothèses concernant le système nerveux central (SNC) pour expliquer tout ou partie de la survenue de l'EHS. Selon la première de ces hypothèses, l'exposition à des champs électromagnétiques amplifierait les altérations de la barrière hémato-encéphalique (BHE) provoquées par d'autres facteurs et serait à l'origine de l'extravasation de molécules du sang vers le liquide cébrospinal. L'extravasation des molécules serait ensuite susceptible d'entraîner des troubles neurologiques chez les personnes se déclarant EHS. Le groupe de travail a étudié les articles scientifiques disponibles sur le sujet et a conclu que cette hypothèse ne pouvait pas être validée à ce jour.

Une autre hypothèse concernant le système nerveux central a été analysée, selon laquelle des perturbations dans la production de neurotransmetteurs (catécholamines, sérotonine) pourraient expliquer la survenue de l'EHS. Cependant, il existe trop peu de données scientifiques pour conclure sur le sujet.

L'hypothèse de l'existence d'un terrain migraineux chez les personnes se déclarant EHS a davantage retenu l'attention du groupe de travail. En effet, les maux de tête sont l'un des symptômes les plus fréquemment rapportés par celles-ci et les résultats obtenus par un médecin chez certaines d'entre elles, qu'il a traitées comme des migraineux, sont apparus intéressants. Les données de la littérature scientifique, si elles sont trop rares et disparates pour conclure sur le sujet, justifient néanmoins que des recherches centrées sur ce problème soient réalisées.

D'autres hypothèses, étudiées dans des articles concernant le système nerveux central, ont été analysées par le groupe de travail. Elles se sont intéressées à un éventuel dysfonctionnement de l'activité électrique cérébrale, du métabolisme ou du débit sanguin cérébral. En l'état actuel des connaissances, il n'est pas possible de mettre en évidence un quelconque dysfonctionnement de cette nature, spécifique aux personnes se déclarant EHS. Par ailleurs, les données disponibles ne permettent pas de savoir si l'effet d'une exposition aux radiofréquences sur l'activité électrique cérébrale observé chez des personnes non-EHS (cf. Anses, 2013) s'inscrit ou non dans les limites des variations physiologiques, ni s'il pourrait entraîner un effet sanitaire favorable ou défavorable à long terme.

Une éventuelle dysrégulation du cycle veille-sommeil ou de l'horloge circadienne chez les personnes se déclarant EHS a également été étudiée par le groupe de travail. Deux études comportant des enregistrements polysomnographiques du sommeil après une exposition de longue durée à un signal GSM chez des personnes se déclarant EHS ont confirmé⁹ que cette exposition provoquait une augmentation de la puissance spectrale de l'EEG dans la fréquence des fuseaux de sommeil¹⁰. Cependant, ces deux études n'ayant pas comparé les résultats obtenus chez les personnes se déclarant EHS à ceux de témoins, elles ne permettent pas de conclure quant à l'existence d'un éventuel dysfonctionnement propre aux personnes se déclarant EHS. En revanche, une autre étude a mis en évidence une augmentation de l'énergie de la bande des hautes fréquences (HF)¹¹ des EEG, significativement plus faible chez des personnes se déclarant EHS que chez des témoins, à la fois durant l'induction du sommeil et durant la nuit. Cette observation est à rapprocher des constatations faites sur les effets d'une exposition aux radiofréquences sur l'EEG du sommeil chez les personnes non-EHS. Même si les conséquences de ces modifications du sommeil sur l'organisme n'ont pas été caractérisées selon des critères précis¹² et restent inconnues, ces observations suggèrent que l'hypothèse d'un dysfonctionnement de l'horloge circadienne reste crédible et mérite d'être étudiée pour tenter d'expliquer la symptomatologie de ces personnes (troubles du sommeil, de la concentration et de la mémoire fréquents d'après les études descriptives par questionnaires).

Pour finir, le concept d'« hypersensibilité », comme trait de caractère, a retenu l'attention du groupe de travail. L'« hypersensibilité » désigne une sensibilité plus haute que la moyenne,

⁹ Résultat déjà décrit par plusieurs auteurs et souligné dans le rapport publié par l'Anses sur les effets des radiofréquences en 2013.

¹⁰ Le fait que les fuseaux soient un marqueur de stabilisation du sommeil semblerait être en contradiction avec les troubles du sommeil décrits par les personnes se déclarant EHS. Cette contradiction apparente soulève la question de la grande différence entre les analyses subjectives du ressenti de la qualité du sommeil et celles objectivées par une polysomnographie incluant un enregistrement EEG et permettant de diagnostiquer diverses pathologies ou troubles du sommeil (apnées du sommeil, narcolepsie, syndrome des jambes sans repos, insomnies, etc.).

¹¹ La bande HF évalue l'activité parasympathique. Durant le sommeil et son induction, l'énergie de la bande HF du signal cardiaque augmente.

¹² selon les critères définis par l'Académie américaine de médecine du sommeil.

provisoire ou durable, pouvant être vécue avec difficulté par la personne elle-même, ou perçue comme « exagérée » voire « extrême » par l'entourage. Les « hypersensibles » percevraient leur environnement avec une acuité et une sensibilité particulière. Ce concept est d'abord apparu en psychologie pour être étayé ensuite par des études éthologiques (chez plus de 100 espèces animales), neurobiologiques et génétiques. Il fournit une piste de réflexion sur un possible facteur commun à plusieurs syndromes (syndrome d'intolérance aux odeurs chimiques et fibromyalgie principalement), qui mériterait d'être approfondie.

Recommandations de l'expertise collective

1. Recommandations aux pouvoirs publics

Considérant :

- les incertitudes liées aux données scientifiques disponibles (ou non) sur l'EHS ;
- l'absence de modèle animal pertinent pour étudier l'EHS ;
- que malgré les nombreux témoignages de personnes se déclarant EHS et rapportant la fin de leurs symptômes avec la fin de l'exposition aux ondes, les données scientifiques disponibles à l'heure actuelle ne plaident ni en faveur ni en défaveur d'une amélioration de leur état de santé à la suite d'un abaissement des niveaux d'exposition ;
- que la loi n° 2015-136 du 9 février 2015 relative à la sobriété (dite « loi Abeille ») confie à l'Agence nationale des fréquences (Anfr) « les modalités de traitement et la trajectoire de résorption des points atypiques¹³ », afin de réduire le niveau de champs émis dans les lieux en cause, tout en garantissant la couverture et la qualité des services rendus ;
- qu'aucune donnée scientifique ne permet d'objectiver l'efficacité de zones blanches ou d'immeubles « blanchis », ni de chambres d'hôpital spécifiques, sur la réduction des symptômes rapportés par les personnes se déclarant EHS ;

le CES recommande aux pouvoirs publics de :

- pérenniser le financement de l'effort de recherche, notamment fondamentale, sur les effets sanitaires des radiofréquences, et sur l'EHS en particulier ;
- soutenir notamment la mise en place d'infrastructures de recherche adaptées à l'EHS (pour effectuer des études de provocation, etc.) ;

De plus, le CES renouvelle¹⁴ ses recommandations en matière de réduction des niveaux d'exposition pour la population générale, et souligne notamment l'importance :

- de peser avec soin les conséquences d'un éventuel abaissement des niveaux d'exposition induits par les antennes-relais de téléphonie mobile ;
- d'étudier le lien entre la multiplication du nombre d'antennes et l'augmentation parallèle possible de la valeur moyenne de l'exposition ;

Enfin, dans l'éventualité de la création de zones blanches, le CES recommande d'en évaluer rigoureusement les bénéfices potentiels sur la symptomatologie des personnes se déclarant EHS.

¹³ Les points atypiques sont définis comme les lieux où le niveau d'exposition du public aux champs électromagnétiques dépasse substantiellement celui généralement observé à l'échelle nationale, conformément aux critères déterminés par l'Anfr et révisés régulièrement en fonction des résultats des mesures qui lui sont communiquées. Un recensement national des points atypiques du territoire est établi chaque année par l'Anfr.

¹⁴ Cf. § 13.3, p 346 du rapport publié par l'Anses en 2013.

2. Recommandations à destination des institutions et organismes de recherche

2.1. Amélioration des connaissances sur l'EHS

2.1.1. Études de provocation

Considérant que :

- les études de provocation sont celles qui ont le meilleur niveau de preuve pour démontrer un éventuel lien de causalité entre l'exposition aux champs électromagnétiques et les symptômes décrits par les personnes se déclarant EHS, mais ont été, jusqu'à présent, entachées de limites méthodologiques (cf. § 6.2.3) et n'ont pas permis d'aboutir à un consensus scientifique (cf. § 6.2.4) ;
- des personnes se déclarant EHS rapportent être plus sensibles à certains types de signaux (ou variations de signaux) qu'à d'autres¹⁵ ;

le CES recommande de mener des études de provocation (avec des groupes de personnes bien caractérisés en âge, genre, nature des symptômes, etc.) sur les effets :

- de signaux les plus proches possibles de ceux rencontrés dans l'environnement ;
- des expositions aux champs électromagnétiques en concevant de nouveaux protocoles (différents modes d'exposition, effets différés, etc.).

2.1.2. Caractérisation des symptômes de l'EHS

Troubles du sommeil et des rythmes circadiens

Considérant que :

- les troubles du sommeil figurent parmi les symptômes les plus fréquemment rapportés par les personnes se déclarant EHS, mais restent mal objectivés ;
- des anomalies de l'EEG de sommeil ont été décrites, chez des personnes non-EHS, après exposition aux radiofréquences (cf. Anses, 2013), et que ces anomalies semblent avoir été retrouvées chez des personnes se déclarant EHS, sans toutefois avoir fait l'objet d'une comparaison avec celles observées chez des personnes non-EHS (cf. § 6.2.1.2.5) ;
- de très récents travaux expérimentaux ont montré, pour la première fois, que des rats étaient capables de choisir un environnement où leur exposition aux radiofréquences était la plus faible durant la période de repos (jour) et que ce choix était associé à une augmentation de la durée du sommeil paradoxal (cf. § 5.3.1)) ;
- la symptomatologie des personnes se déclarant EHS (troubles du sommeil notamment) rend possible l'hypothèse d'un dysfonctionnement de l'horloge circadienne ;

le CES recommande :

- d'étudier à la fois la prévalence, l'intensité et les caractéristiques des troubles subjectifs ou auto-rapportés du sommeil (avec des échelles d'intensité notamment) et les rythmes circadiens chez des personnes se déclarant EHS et chez des témoins ;

¹⁵ Des travaux récents conduits aux Pays-Bas (Van Moorselaar *et al.*, 2016) ont montré la faisabilité et l'intérêt de réaliser une étude de provocation rigoureuse tout en étant spécifique à chaque participant se déclarant EHS.

- d'étudier les troubles associés aux perturbations du sommeil chez des personnes se déclarant EHS, comme la somnolence diurne, les troubles de la mémoire, de l'attention, de la concentration, de l'humeur et la modification de l'activité physique comparés avec ceux d'une population témoin ;
- que des études de provocation utilisant la polysomnographie soient réalisées, afin d'analyser de manière objective la qualité du sommeil lors d'expositions aux champs électromagnétiques chez des personnes se déclarant EHS.

Migraines et céphalées

Considérant que :

- les maux de tête sont un des symptômes les plus fréquemment rapportés par les personnes se déclarant EHS, mais que, jusqu'à présent, les recherches sur ce thème ont rarement été conduites en utilisant la classification internationale des céphalées ;
- les rares études ayant fait la distinction entre migraines et autres céphalées ont mis en évidence une fréquence non négligeable de crises ou d'antécédents migraineux chez les personnes se déclarant EHS, sans qu'il soit possible de dire si cette fréquence est plus élevée que dans la population générale ;
- l'expérience d'un médecin (cf. § 7.5.3.2) concernant l'utilisation de médicaments antimigraineux chez des personnes se déclarant EHS soulève des hypothèses intéressantes, dont la vérification pourrait déboucher sur un traitement efficace par des médicaments antimigraineux de personnes se déclarant EHS ;

le CES recommande :

- d'étudier les différents types de céphalées présentées par les personnes se déclarant EHS sur la base de la classification internationale, pour préciser les relations entre migraine et EHS. Il s'agit de définir si les maux de tête de ces personnes sont, en tout ou partie, des migraines, et si ces personnes ont plus de migraines que les personnes non-EHS ;
- en fonction des résultats des recherches précédentes, de réaliser des essais cliniques, afin d'étudier l'efficacité des traitements antimigraineux chez des personnes se déclarant EHS.

Hypersensibilité comme trait de caractère

Considérant que :

- l'hypersensibilité (cf. § 3.8.4) a été décrite comme un trait de caractère et de comportement qui commence à être documenté, à la fois d'un point de vue psychologique et neurobiologique ;
- l'étude du profil psychologique n'a utilisé jusqu'à présent chez les personnes se déclarant EHS que des tests n'explorant qu'un petit nombre de composantes (anxiété, dépression, somatisation) ;

le CES recommande d'étudier :

- les relations qui pourraient exister entre l'hypersensibilité comme trait de caractère et l'EHS, dans un but exploratoire, afin d'évaluer l'intérêt de poursuivre les investigations avec des marqueurs d'imagerie fonctionnelle cérébrale ;

- le profil psychologique des personnes se déclarant EHS avec des tests¹⁶ qui en explorent plus largement les diverses composantes.

EHS et syndromes ou troubles associés

Considérant :

- qu'il existe de nombreuses associations entre l'EHS et / ou plusieurs syndromes ou troubles (le plus souvent syndrome d'intolérance aux odeurs chimiques -SIOC-, fibromyalgie, acouphènes, etc.) ;
- que les troubles cutanés sont fréquents au cours de l'EHS et que des anomalies des petites fibres nerveuses de la peau ont été mises en évidence dans la fibromyalgie ;

le CES recommande :

- de comparer les aspects cliniques et éventuellement physiopathologiques de l'EHS d'une part, et du SIOC, de la fibromyalgie, des acouphènes idiopathiques d'autre part ;
- d'étudier les anomalies des petites fibres nerveuses de la peau lors des comparaisons entre EHS et fibromyalgie.

2.1.3. Autres propositions de recherche

Considérant que :

- les différentes tentatives pour mettre au point un questionnaire standardisé et spécifique de l'EHS utilisable en recherche n'ont pas abouti jusqu'à présent ;
- les très rares études de suivi sur le long-terme des personnes se déclarant EHS ne dépassent pas un an ;
- quelques études, ainsi que les auditions et les témoignages mettent l'accent sur l'errance médicale des personnes se déclarant EHS ;
- l'isolement (social, professionnel, familial) des personnes se déclarant EHS est systématiquement souligné ;
- la prise en charge et les représentations des personnes se déclarant EHS peuvent varier d'un pays à l'autre ;

le CES recommande :

- de développer et valider un questionnaire standardisé et spécifique de l'EHS, comme il en existe pour la plupart des syndromes (SIOC et fibromyalgie par exemple) ;
- de réaliser des études prospectives pour le suivi à long-terme de personnes se déclarant EHS ;
- d'étudier la complexité de la relation soignant-soigné pour les personnes se déclarant EHS ;
- de rechercher les différents facteurs qui contribuent à l'isolement psycho-social de ces personnes ;
- de mener des études comparatives sur la problématique de l'EHS (sur le vécu, les représentations des EHS, la prise en charge, etc.) dans plusieurs pays.

¹⁶ comme le *Minnesota Multiphasic Personality Inventory* (MMPI).

2.2. Évaluation des moyens empiriques actuellement utilisés pour établir un « diagnostic » d'EHS ou pour le « traitement » des personnes se déclarant EHS

Considérant :

- qu'il n'existe pas de critères de diagnostic de l'EHS validés à ce jour ;
- que certains auteurs ou praticiens ont néanmoins proposé des méthodes empiriques de « diagnostic » et / ou de « traitement » des personnes se déclarant EHS ;
- qu'il y a très peu d'études sur l'efficacité de celles-ci ;

le CES recommande d'évaluer l'efficacité des méthodes empiriques de « diagnostic » et / ou de « traitement » utilisées, en particulier :

- la balance ortho/para-sympathique (dynamique du système nerveux autonome), notamment la variabilité de la fréquence cardiaque ;
- les méthodes tridimensionnelles de référence¹⁷, la circulation sanguine et le métabolisme énergétique du cerveau chez les personnes se déclarant EHS, afin de vérifier l'hypothèse d'une ischémie cérébrale en rapport avec l'EHS ;
- les questionnaires sur l'EHS ;
- les différents traitements de l'EHS proposés de manière empirique, pour lesquels doivent être réalisés des essais cliniques.

Enfin, d'une manière générale, le CES souligne l'importance de renforcer les interactions entre scientifiques et associations de personnes se déclarant EHS.

3. Recommandations à destination des acteurs sanitaires et sociaux

En attendant une meilleure compréhension de l'EHS, et notamment des composantes physiologiques, psychiques et / ou biologiques pouvant expliquer les symptômes décrits, il est évident que de nombreuses personnes se déclarant EHS présentent un état de souffrance (physique et / ou psychique) plus ou moins important. Ceci nécessite et justifie une prise en charge adaptée par le système de soins. Une telle prise en charge est par ailleurs une condition nécessaire à la réalisation de travaux de recherches de qualité.

Pour améliorer la prise en charge des personnes se déclarant EHS, il est avant tout indispensable d'établir et de préserver un climat de confiance entre les personnes se déclarant EHS d'une part et les acteurs sanitaires et sociaux d'autre part. Pour cela, le CES recommande à l'autorité sanitaire, en priorité, de :

- développer la formation des médecins sur la problématique des effets des radiofréquences sur la santé et mettre à leur disposition des informations leur permettant de répondre aux attentes des personnes se déclarant EHS ;
- demander à la Société française de médecine du travail d'étudier la faisabilité d'un guide de bonnes pratiques de prise en charge des personnes se déclarant EHS en milieu professionnel¹⁸ ;

¹⁷ TEP (Tomographie par Émission de Positrons) scan par exemple.

- demander à la Haute autorité de santé (HAS) d'examiner, à l'instar des recommandations qu'elle a formulées au sujet de la fibromyalgie¹⁹, la pertinence de formuler des recommandations de prise en charge adaptées aux personnes se déclarant EHS ;
- favoriser le rapprochement et la coordination des acteurs impliqués dans la prise en charge des personnes se déclarant EHS (médecins, centres de consultation de pathologies professionnelles et environnementales -CCPP-, Maisons départementales des personnes handicapées -MDPH-, etc.).

4. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS DE L'ANSES

En préambule, et concernant l'exposition des personnes aux champs électromagnétiques, l'Anses rappelle sa recommandation formulée dans son avis d'octobre 2013 relative aux expositions des personnes aux champs électromagnétiques : « Considérant le déploiement en cours ou à venir de nouvelles technologies de communications mobiles [...], qui se juxtaposent à des services déjà existants, et les incertitudes sur les effets à long terme de l'exposition aux radiofréquences, l'Agence souligne la nécessité que ces développements technologiques s'accompagnent d'une maîtrise de l'exposition des personnes (qu'il s'agisse de l'exposition environnementale ou liée aux terminaux). »

Concernant la nécessité de conduire une expertise collective sur la question de l'EHS, l'Anses rappelle qu'elle avait indiqué dans son avis d'octobre 2013 : « compte tenu, d'une part du nombre de publications récentes et de l'attente de résultats d'études en cours de réalisation, et d'autre part de la nécessité d'accorder une attention toute particulière à l'hypersensibilité aux ondes électromagnétiques, l'Anses a décidé de reporter l'examen de cette question à la publication d'un rapport spécifique du GT [groupe de travail] ».

S'agissant de la présente expertise, l'Agence reprend les conclusions et recommandations de son Comité d'experts spécialisé « Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements » exposées précédemment (cf. paragraphe 3 de l'avis).

Elle rappelle que cette expertise a été réalisée entre 2014 et 2017 par un groupe de travail pluridisciplinaire dédié, en lien avec le Comité d'experts spécialisé « agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements ». Ce travail d'expertise s'est appuyé sur l'ensemble de la littérature scientifique disponible, ainsi que sur un grand nombre d'auditions de médecins hospitaliers et généralistes, chercheurs et associations en lien avec des personnes se déclarant électrohypersensibles (EHS). L'Agence souligne le fait que le rapport d'expertise a été mis en consultation publique entre juillet et octobre 2016 et qu'il tient compte des nombreux commentaires (plus de 500) recueillis. Cette disposition a notamment permis de compléter la bibliographie et d'enrichir la rédaction de plusieurs parties du rapport (cf. Annexe 17 sur le bilan de la consultation et les principales modifications apportées au rapport, ainsi que le tableau détaillant les réponses aux commentaires en annexe électronique).

L'expertise met en évidence la grande complexité de la question de l'électrohypersensibilité. Tout d'abord, il n'existe pas, à ce jour, de critères de diagnostic de l'EHS validés, et il résulte de

¹⁸ Ce guide pourrait s'appuyer sur des données scientifiques validées et sur une enquête auprès des médecins du travail prenant en charge ces personnes. Il pourrait définir les modalités d'utilisation des mesures de champs électromagnétiques en milieu professionnel quand une source de champs électromagnétiques est mise en cause par une personne se déclarant EHS et, en collaboration avec les structures hospitalières de pathologie professionnelle, les modalités de recours à ces structures.

¹⁹ cf. le « rapport d'orientation sur le syndrome fibromyalgique de l'adulte » de juillet 2010 et le guide « Fibromyalgie de l'adulte : favoriser une prise en charge précoce et graduée » de juin 2011.

l'expertise que la seule possibilité pour définir l'EHS repose sur l'auto-déclaration des personnes. Au final, en l'état actuel des connaissances, il n'existe pas de preuve expérimentale solide permettant d'établir un lien de causalité entre l'exposition aux champs électromagnétiques et les symptômes décrits par les personnes se déclarant EHS. Cependant, l'Agence souligne que les plaintes (douleurs, souffrance) exprimées par les personnes se déclarant EHS correspondent à une réalité vécue et que ces personnes ont besoin d'adapter leur quotidien pour y faire face.

Les symptômes ressentis par les personnes se déclarant EHS, ainsi que l'isolement psycho-social subi par certaines d'entre elles, nécessitent et justifient une prise en charge adaptée par les acteurs des domaines sanitaire et social (cf. recommandations du CES à destination des acteurs sanitaires et sociaux). À ce titre, l'Agence souligne la pertinence de demander à la Haute autorité de santé de mettre à l'étude des orientations destinées aux professionnels de santé pour prendre en charge les personnes se déclarant EHS. L'Agence recommande en particulier de développer la formation des professionnels de santé et des acteurs sociaux à l'accueil et à l'écoute des personnes se déclarant électrohypersensibles, ainsi qu'à la prise en compte, dans leurs pratiques, des questions et attentes de ces personnes notamment en ce qui concerne leur qualité de vie.

Au-delà, l'Agence souligne la nécessité de poursuivre les travaux de recherche sur l'EHS, en s'appuyant sur les recommandations suivantes :

- renforcer les interactions entre scientifiques et associations de personnes se déclarant EHS (cf. recommandations à destination des institutions et organismes de recherche) ;
- soutenir la mise en place d'infrastructures de recherche adaptées à l'EHS, pour réaliser notamment des études de suivi à long-terme, et en veillant à ce que les conditions expérimentales soient contrôlées et prennent en compte les conditions de vie des personnes se déclarant EHS ;
- pérenniser le financement de l'effort de recherche, notamment fondamentale, sur les effets sanitaires des radiofréquences (cf. recommandations aux pouvoirs publics).

Dr Roger Genet

MOTS-CLES

Hypersensibilité électromagnétique (EHS), intolérance environnementale idiopathique attribuée aux champs électromagnétiques (IEI-CEM), champs électromagnétiques, radiofréquences, basses fréquences.

Electromagnetic Hypersensitivity (EHS), Idiopathic Environmental Intolerance attributed to Electromagnetic Fields (IEI-EMF), Electromagnetic Fields, Radiofrequencies, Low Frequencies.

Hypersensibilité électromagnétique ou intolérance environnementale idiopathique attribuée aux champs électromagnétiques

Auto-saisine n° 2011-SA-0150

RAPPORT d'expertise collective

**Comité d'experts spécialisé
« Agents Physiques, nouvelles technologies et grands aménagements »**

**Groupe de travail
« Radiofréquences et santé 2 »**

Décembre 2017

Mots clés

Hypersensibilité électromagnétique (EHS), intolérance environnementale idiopathique attribuée aux champs électromagnétiques (IEI-CEM), champs électromagnétiques, radiofréquences, basses fréquences.

Electromagnetic Hypersensitivity (EHS), Idiopathic Environmental Intolerance attributed to Electromagnetic Fields (IEI-EMF), Electromagnetic Fields, Radiofrequencies, Low Frequencies.

Présentation des intervenants

PRÉAMBULE : Les experts externes, membres de comités d'experts spécialisés, de groupes de travail ou désignés rapporteurs sont tous nommés à titre personnel, *intuitu personae*, et ne représentent pas leur organisme d'appartenance.

GROUPE DE TRAVAIL

Président

Jean-Pierre MARC-VERGNES – Directeur de recherche émérite à l'Institut national de la santé et de la recherche médicale (Inserm) – Médecin neurologue : neurosciences cliniques, imagerie cérébrale et électrohypersensibilité.

Vice-président

Jean-François DORÉ – Directeur de recherche émérite à l'Institut national de la santé et de la recherche médicale (Inserm) - Épidémiologie et radiofréquences.

Membres

Jean-Benoît AGNANI – Responsable du Département Études sur l'Exposition du Public aux ondes électromagnétiques (ANFR) – Physique, champs électromagnétiques, exposition du public aux radiofréquences.

Pierre BRUGUIÈRE – Ingénieur chercheur, Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) – Bioélectromagnétisme, électronique et métrologie.

David CROUZIER – Chef d'unité à l'Institut de recherches biomédicales des armées (IRBA) – Risques Technologiques Emergents et Rayonnements non ionisants et biophysique (jusqu'au 31 décembre 2016).

Josquin DEBAZ – Ingénieur de recherche du Groupe de sociologie pragmatique et réflexive (GSPR) de l'École des hautes études en sciences sociales (EHESS) – Histoire des sciences, sociologie.

Brigitte DEBUIRE – Professeur émérite des universités – Praticien hospitalier émérite, Faculté de médecine Paris-sud / Hôpital Paul Brousse (Villejuif) – Médecine, biochimie et biologie moléculaire.

Isabelle DELTOUR – Chercheuse au Centre international de recherche sur le cancer (Circ) – Épidémiologie et radiofréquences.

Jean DEMARQUOY – Professeur des universités à l'Université de Bourgogne – Physiologie de la nutrition, métabolisme énergétique.

Yves LE DRÉAN – Maître de conférences à l'Université de Rennes 1 – Biologie, génétique et bioélectromagnétisme.

Gérard LEDOIGT – Professeur émérite à l'Université Clermont Auvergne (UCA) – Biologie, génétique, microbiologie et écophysiologie.

Thierry LETERTRE – Enseignant-chercheur à Supélec – Physique, champs électromagnétiques et métrologie.

Jean-Pierre LIBERT – Professeur émérite à l'Université de Picardie Jules Verne à Amiens – Physiologie humaine, neurosciences.

Amélie MASSARDIER-PILONCHÉRY – Médecin en santé au travail, Unité Mixte Ifsttar/UCBL de recherche épidémiologique et de surveillance transport travail environnement (UMRESTTE) – Épidémiologie et radiofréquences.

Anne PEREIRA DE VASCONCELOS – Chargée de recherche, Institut national de la santé et de la recherche médicale (Inserm), Laboratoire de neurosciences cognitives et adaptatives – UMR 7364, CNRS – Université de Strasbourg – Neurobiologie, neurosciences cognitives.

Jean-Michel SENARD – Professeur des universités (Toulouse III) - Praticien hospitalier - Médecine, dysautonomies, neuropsychiatrie et pharmacologie clinique (jusqu'au 31 décembre 2016).

RAPPORTEURS ET CONTRIBUTIONS EXTÉRIEURES AU COLLECTIF

Les rapporteurs ci-après ont contribué à la rédaction d'une partie du rapport (rédaction de synthèses bibliographiques, mise à disposition de données, etc.). Les informations transmises dans ce cadre ont été analysées par les experts du groupe de travail et prises en compte lors de l'élaboration du rapport.

Avertissement : la mention des rapporteurs dans la liste ci-après ne signifie pas qu'ils endossent les conclusions de l'intégralité du présent rapport.

Yannick BARTHE – Sociologue – École des hautes études en sciences sociales (EHESS) – « Travail exploratoire à partir d'un corpus de lettres de personnes « électrohypersensibles » - a contribué au § 3.1 du rapport.

D^r Christine MIRABEL-SARRON – Médecin psychiatre – Centre hospitalier Sainte Anne, Paris – « Composantes psychiques de l'EHS et des thérapies cognitives comportementales » a contribué au § 8.1 du rapport.

D^r Catherine HENNAUX – Oto-rhino-laryngologiste (ORL) au CHRU de Lille – « EHS et acouphènes » - a contribué au § 3.8.3.3 du rapport.

François GAUDAIRE et Pierre BOULENGUEZ, ingénieurs d'étude et de recherche – Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB) – « Évaluation de l'efficacité des dispositifs de protection contre les champs électromagnétiques » - ont contribué au § 8.3.1 du rapport.

COMITÉ D'EXPERTS SPÉCIALISÉ

Les travaux, objets du présent rapport ont été suivis et adoptés par le CES « Évaluation des risques liés aux agents physiques, aux nouvelles technologies et aux grands aménagements » :

Présidente

Martine HOURS – Médecin épidémiologiste, Directeur de recherche à l'Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (Ifsttar).

Membres ayant participé à l'expertise

Alexandre BOUNOUH – Chef de projet / Ingénieur de recherche au Laboratoire national d'essais (LNE).

Brigitte DEBUIRE – Professeur émérite des universités – Praticien hospitalier émérite, Faculté de médecine Paris-sud / Hôpital Paul Brousse (Villejuif).

Jean-François DORÉ – Directeur de recherche émérite à l'Institut national de la santé et de la recherche médicale (Inserm).

Thierry DOUKI – Chef de laboratoire / Ingénieur docteur en chimie, Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA).

Pierre DUCIMETIÈRE – Directeur de recherche honoraire à l'Institut national de la santé et de la recherche médicale (Inserm).

Nicolas FELTIN – Responsable de mission au Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE).

Emmanuel FLAHAUT – Directeur de recherche au Centre national de la recherche scientifique (CNRS).

Murielle LAFAYE – Ingénieur, Coordinatrice applications au Centre national d'études spatiales (Cnes).

Joël LELONG – Directeur adjoint de laboratoire / Docteur en physique, Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (Ifsttar).

Frédérique MOATI – Maître de conférences en biophysique et médecine nucléaire, Université Paris Sud XI / Praticien hospitalier / Radiopharmacienne / Biologiste, AP-HP Hôpital Bicêtre.

Catherine MOUNEYRAC – Directrice de l'Institut de biologie et d'écologie appliquée et Professeur en écotoxicologie aquatique à l'Université catholique de l'Ouest (UCO).

Fabien NDAGIJIMANA – Professeur des universités, Université Joseph Fourier, Grenoble.

Alain SOYEZ – Responsable de laboratoires, Ingénieur conseil, Caisse d'assurance retraite et de santé au travail Nord Picardie.

Esko TOPPILA – Professeur, Directeur de recherche à l'Institut finlandais de santé au travail.

Catherine YARDIN – Professeur, chef de service, médecin biologiste à l'Hôpital Dupuytren, CHU de Limoges.

PARTICIPATION ANSES

Coordination scientifique

Johanna FITE – Chef de projets scientifiques – Unité Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements – Anses.

Contribution scientifique

Léa BAUDAS – Chargée de projets scientifiques – Unité Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements – Anses.

Johanna FITE – Chef de projets scientifiques – Unité Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements – Anses.

Olivier MERCKEL – Chef de l'unité Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements – Anses.

Jean-Nicolas ORMSBY – Directeur adjoint de la Direction de l'évaluation des risques.

Olivia ROTH-DELGADO – Chargée de projets scientifiques – Unité Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements – Anses.

Benoît VERGRIETTE – Chef de l'unité Risques et société – Anses.

Marine VIET – Stagiaire AgroParisTech de mars à septembre 2015 – « Electrohypersensibilité, zones blanches et prise en charge des sujets EHS ».

Organisation des auditions de personnalités extérieures

Johanna FITE – Chef de projets scientifiques – Unité Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements – Anses.

Clémence VARRET – Chargée de projets scientifiques – Unité Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements – Anses.

Secrétariat administratif

Sophia SADDOKI – Assistante de l'unité Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements - Anses.

Séverine BOIX – Assistante de l'unité Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements - Anses.

AUDITION DE PERSONNALITÉS EXTÉRIEURES

Les personnes mentionnées dans le tableau ci-dessous ont été consultées par le groupe de travail (sous la forme d'auditions ou sollicitations écrites). Le verbatim des auditions est disponible sous forme d'annexes à télécharger sur le site internet de l'Agence (www.anses.fr) en complément du rapport d'expertise.

Les experts du groupe de travail remercient l'ensemble des personnes consultées pour les échanges fructueux qui ont eu lieu dans le cadre des auditions ou par écrit. Les informations transmises dans ce cadre ont été analysées par les experts du groupe de travail et prises en compte lors de l'élaboration du rapport.

Avertissement : la mention des personnes dans le tableau ci-dessous ne signifie pas qu'elles endossent les conclusions du présent rapport.

Tableau 1 : liste des personnes auditionnées et sollicitées par écrit

Médecins

Nom	Fonction et spécialité	Lieu d'exercice	Date
Pr Pascal Cathébras	Professeur de médecine interne, PU-PH, chef de service hospitalier	Université et CHU de Saint-Etienne	Audition le 13/03/2014
D ^r Dominique Dupas	Maître de conférences des universités – praticien hospitalier (MCU-PH)	Consultation de Pathologie professionnelle et environnementale - CHU de Nantes	Audition le 13/03/2014
D ^r Pascale Choucroun	Médecin généraliste	Centre de pathologies environnementales et professionnelles - CH de Brest	Audition le 12/06/2014
D ^r Lynda Bensefa-Colas	PH en médecine du travail - service des pathologies professionnelles	Assistance publique-Hôpitaux de Paris (AP-HP)	Audition le 12/06/2014
Pr Dominique Choudat	PU-PH de médecine du travail - Faculté de médecine	Université Paris Descartes	
D ^r Philippe Tournesac	Médecin généraliste - pathologies neurofonctionnelles- ostéopathie	Médecin libéral à Paris	Audition le 10/07/2014
D ^r Bernard Rosa	Médecin - Diplôme Universitaire de médecine manuelle - ostéopathie	Médecin libéral à Annemasse	
D ^r Mirabel-Sarron	Médecin psychiatre	Centre hospitalier Ste Anne - Paris	Audition le 29/01/2015
D ^r Laurent Chevallier	Praticien attaché - Unité nutrition, médecine environnementale	CHRU de Montpellier (Médecine Interne)	Réponse écrite le 01/06 et entretien le 04/06/2015

Nom	Fonction et spécialité	Lieu d'exercice	Date
D ^r Eric Ben-Brick	Unité de Consultations de Pathologies Professionnelles et Environnementales (UCPPE) -	CHU de Poitiers	Réponse écrite le 18/08/2015
D ^r Vincent Loche	Oto-rhino-laryngologiste (ORL) spécialiste des acouphènes	CHRU de Lille	Audition le 10/09/2015
D ^r Catherine Hennaux	Oto-rhino-laryngologiste (ORL) spécialiste des acouphènes	CHRU de Lille	

Scientifiques

Nom	Affiliation	Date
D ^r Yannick Barthe	École des hautes études en sciences sociales (EHESS)	Audition le 29/04/2014
Maël Dieudonné	Centre Max Weber – UM 5283 – CNRS / Université Lyon 2	Audition le 29/04/2014
D ^r Anke Huss	<i>Institute for Risk Assessment Sciences, Utrecht University, The Netherlands</i>	Audition le 26/02/2015
P ^r Zwamborn	<i>Technische Universiteit Eindhoven - Department of Electrical Engineering, The Netherlands</i>	Réponse écrite le 20/03/2015

Élus et institutions publiques

Nom	Affiliation	Date
Michèle Rivasi	Députée européenne, membre d'Europe Écologie Les Verts	Audition le 30/09/14

Associations type loi de 1901

Nom	Association représentée	Date
Sophie Pelletier	Électrosensibles de France/Priartem	Audition le 06/11/2014
Janine Le Calvez	Pour rassembler, informer et agir sur les risques liés aux technologies électromagnétiques (Priartem)	
Philippe Tribaudeau	Une terre pour les EHS	Audition le 06/11/2014
Pierre Le Ruz	Centre de recherche et d'information indépendant sur les rayonnements électromagnétiques non ionisants (Criirem)	
Agnès Fontana	Robin des Toits	Audition le 20/01/2015
Madeleine Madoré	Le Lien	Audition le 29/01/2015
José Cambou	France Nature Environnement	

Nom	Association représentée	Date
Laurent Le Guyader	Génération futures	Réponse écrite le 16/02/2015
Jacqueline Collard	Santé Environnement Rhône-Alpes (SERA), Zone blanche	Audition le 31/03/2015

Remarques : Toutes ces associations, à l'exception de « Zone blanche », sont membres du Comité de dialogue¹ de l'Anses. Plusieurs de ces associations se sont regroupées dans l'AM2E : Alliance Maladies Environnementales Émergentes, créée en octobre 2014, pour coordonner et renforcer leurs actions.

¹ Le Comité de dialogue « Radiofréquences et santé » de l'Anses est un lieu d'échanges, de réflexion et d'information sur les questions scientifiques relatives aux effets potentiels sur la santé des radiofréquences et à leur évaluation. Sa mise en place en juin 2011 s'inscrit dans le prolongement de l'expérience acquise dans le cadre de la Fondation Santé et Radiofréquences. Il réunit des représentants d'associations et de syndicats, des opérateurs de téléphonie mobile et des radiodiffuseurs, des institutions, des collectivités territoriales et des élus, dans un souci d'équilibre des groupes d'intérêts.

SOMMAIRE

Présentation des intervenants	3
SOMMAIRE	9
Expertise collective : synthèse de l'argumentaire et conclusions	17
Troubles du sommeil et des rythmes circadiens	26
Migraines et céphalées	26
Hypersensibilité comme trait de caractère	27
EHS et syndromes ou troubles associés.....	27
Sigles et abréviations	30
Liste des tableaux.....	33
Liste des figures	33
Liste des encadrés.....	34
Liste des hypothèses avancées pour expliquer tout ou partie de la survenue de l'EHS.....	34
 1 Contexte, objet et modalités de traitement de la saisine.....	 36
1.1 Contexte.....	36
1.2 Historique de la problématique et vocabulaire	38
1.3 Objet du rapport d'expertise	39
1.4 Modalités de traitement de l'expertise.....	40
1.5 Prévention des risques de conflits d'intérêts	41
 2 Méthode	 42
2.1 Recensement des articles scientifiques.....	42
2.1.1 Période de référence	42
2.1.2 Moteurs de recherche	42
2.1.3 Typologie des documents expertisés	42
2.1.4 Les mots-clés utilisés.....	43
2.1.5 Limites du champ d'expertise	43
2.1.5.1 Bandes de fréquence considérées	43
2.1.5.2 Les articles analysés	45
2.1.5.3 Les technologies prises en compte	45
2.1.6 Les références bibliographiques proposées par le Comité de dialogue.....	47
2.2 Analyse des articles scientifiques	47
2.3 Les auditions	47
2.3.1 Objectif des auditions.....	47
2.3.2 Préparation et déroulement des auditions	48
2.3.3 Traitement et utilisation des informations obtenues	48
2.3.4 Personnes auditionnées	48
2.4 Recherche et prise en compte de témoignages de personnes se déclarant EHS et autres points de vue sur le sujet.....	48
2.4.1 Témoignages à travers un <i>corpus</i> de lettres de personnes se déclarant EHS	49
2.4.2 Enquête auprès de personnes se déclarant EHS favorables à l'établissement d'une zone blanche ..	49
2.4.3 Témoignages de personnes se déclarant EHS choisis sur internet ou dans la presse	50

2.5 La consultation publique	50
2.5.1 Objectif	50
2.5.2 Procédure	51
2.5.3 Calendrier.....	51
2.5.4 Modalités de prise en compte des commentaires reçus	51
3 Qu'est-ce que l'EHS ? Peut-on la définir ?	52
3.1 Lecture sociologique d'un <i>corpus</i> de lettres de personnes se déclarant EHS.....	52
3.1.1 Constitution d'un <i>corpus</i> de lettres de personnes se déclarant EHS	52
3.1.1.1 Le <i>corpus</i> de lettres et son cadre	53
3.1.1.2 Travail exploratoire réalisé à partir du <i>corpus</i>	53
3.1.2 Objectif de ces témoignages	54
3.1.2.1 Un contre-discours	55
3.1.2.2 Un témoignage.....	55
3.1.3 Les symptômes rapportés.....	56
3.1.4 La découverte de l'EHS	57
3.1.4.1 La découverte d'une cause <i>a posteriori</i> : l'EHS comme « point d'arrivée ».....	57
3.1.4.2 L'EHS comme « point de départ ».....	58
3.1.5 Vivre avec les symptômes de l'EHS	58
3.1.6 Besoin de reconnaissance.....	59
3.1.6.1 Le rapport aux professionnels de santé	59
3.1.6.2 Le rapport au statut de « victime »	59
3.2 Description des caractéristiques socio-démographiques des personnes se déclarant EHS.....	60
3.3 Sources de champs électromagnétiques et EHS.....	61
3.3.1 Les sources classiquement considérées comme cause de leurs symptômes fonctionnels par les personnes se déclarant EHS	61
3.3.2 Imagerie par résonance magnétique (IRM) et EHS	63
3.4 Un diagnostic à établir : liste de symptômes et questionnaires utilisés.....	64
3.4.1 Les critères de diagnostic	64
3.4.1.1 Propositions de diagnostic sur la base de techniques d'exploration fonctionnelle.....	65
3.4.1.2 Propositions de diagnostic sur la base de tests biologiques	65
3.4.1.3 Autres propositions de diagnostic empirique.....	65
3.4.2 Les critères de classification	68
3.5 Estimations des pourcentages de personnes déclarant une sensibilité aux champs électromagnétiques dans différents pays.....	69
3.5.1 Données françaises	69
3.5.2 Données internationales	70
3.5.3 Discussion et conclusion sur les estimations du nombre de personnes se déclarant EHS	72
3.6 Histoire naturelle de l'EHS.....	73
3.6.1 Modalités d'installation de l'EHS.....	73
3.6.2 Notion de durée et d'évolution : vers une chronicité ou une fin de l'EHS ?.....	74
3.7 L'EHS chez les enfants	76
3.8 Relations possibles entre l'EHS et les différents syndromes d'intolérances environnementales et autres maladies médicalement inexpliquées	77
3.8.1 Rappels historiques : de la naissance à la fin d'une hypothèse purement psychogène pour expliquer les différents syndromes médicalement inexpliqués.....	77
3.8.2 Associations observées entre l'EHS et d'autres affections	78
3.8.3 Analogies	81

3.8.3.1	Avec le syndrome d'intolérance aux odeurs chimiques	81
3.8.3.2	Avec la fibromyalgie	82
3.8.3.3	Avec les acouphènes	83
3.8.3.1	Avec les troubles psychosociaux.....	84
3.8.4	Le concept d'hypersensibilité.....	84
3.8.4.1	Personnalité hypersensible	84
3.8.4.2	Endophénotypes neurobiologiques	85
3.8.4.1	Prédispositions génétiques.....	86
3.8.4.2	Hypersensibilité et syndromes ou symptômes en lien avec l'environnement ?	86
3.8.5	Conclusion	87

4 Contexte général sociétal 88

4.1 Soins primaires et patients EHS 88

4.1.1	Les médecins.....	88
4.1.1.1	Sources d'informations et connaissances des médecins généralistes sur les effets des champs électromagnétiques	88
4.1.1.2	Perception des risques liés aux champs électromagnétiques par les médecins	89
4.1.1.3	Positionnement des médecins par rapport à l'EHS	89
4.1.2	Les consultations médicales pour patients attribuant leurs troubles aux champs électromagnétiques.....	90
4.1.2.1	Les consultations en médecine générale	91
4.1.2.1	Les consultations des services de pathologie professionnelle et environnementale	91
4.1.2.2	Les autres consultations accueillant des patients se plaignant de troubles qu'ils attribuent aux champs électromagnétiques	92
4.1.3	L'Académie nationale de médecine.....	92

4.2 L'approche de la question de l'EHS par les pouvoirs publics 93

4.3 Associations généralistes et spécialisées sur la question de l'EHS 95

4.3.1	Mission des associations	95
4.3.1.1	Leurs actions	95
4.3.1.2	Représentation et revendications	96
4.3.1.3	Participation à des études et enquêtes citoyennes	96
4.3.2	Diagnostics et mécanismes proposés par les associations	97
4.3.2.1	Diversité individuelle, mais attribution causale identique.....	97
4.3.2.2	Mécanismes explicatifs proposés.....	98
4.3.2.3	Soin et protection	99
4.3.3	Attentes des associations	99
4.3.3.1	Reconnaissance du handicap et de l'EHS	99
4.3.3.2	Réduction de l'exposition	99
4.3.3.3	Zones à faibles niveaux d'exposition aux champs électromagnétiques	100
4.3.3.4	Protocoles de recherche et interprétation des résultats	100
4.3.3.5	Sujets de recherche proposés par des personnes se déclarant EHS candidates à l'établissement d'une zone blanche	101
4.3.3.6	Information des professionnels de santé.....	103

4.4 L'EHS dans les médias 103

4.4.1	Analyse du traitement médiatique du concept d'EHS	103
4.4.2	Des premières mentions à la dénomination d'un trouble	105
4.4.3	Médiatisation de cas individuels et expression de plaintes collectives (2006-2009).....	105
4.4.4	La constitution d'une représentation médiatique de l'EHS (2010-2014)	106
4.4.5	L'information médiatique a-t-elle une influence sur la perception des risques par la population ?	107

5 Mécanismes d'interaction avec les champs électromagnétiques dans le monde vivant 110

5.1 Cas particulier de la magnétoperception.....110

5.1.1 Les systèmes de magnétoperception	111
5.1.1.1 La magnétilite.....	111
5.1.1.2 Les cryptochromes	113
5.1.2 L'être humain est-il sensible au champ magnétique terrestre ?	114
5.2 Réflexions sur un lien éventuel entre les réponses biologiques ou physiologiques du corps humain aux radiofréquences et celles induites par les champs extrêmement basses fréquences	116
5.3 Est-il possible de percevoir les champs électromagnétiques ?	119
5.3.1 Études chez l'animal	119
5.3.2 Études chez l'être humain.....	120
5.3.2.1 Remarque préliminaire	120
5.3.2.2 Analyse des études sur un éventuel système de perception des champs électromagnétiques chez l'être humain	121
5.3.2.3 Rappel des études de provocation concernant la capacité à distinguer les expositions réelles des expositions simulées aux champs magnétiques basse fréquence	121
5.3.2.4 Analyse des études de provocation sur le seuil de perception cutanée d'un courant électrique	122
5.3.2.5 Conclusion sur l'électrosensibilité.....	124
5.4 Conclusion sur la capacité de l'être humain à percevoir les champs électromagnétiques	125
6 Analyse des articles scientifiques impliquant des personnes se déclarant EHS	127
6.1 Études sans exposition expérimentale aux champs électromagnétiques	127
6.1.1 Études descriptives sur les symptômes déclarés par les personnes se déclarant EHS	127
6.1.1.1 Études sans groupe témoin (chez des personnes se déclarant EHS uniquement)	127
6.1.1.2 Études comportant des groupes témoins (en population générale)	132
6.1.1.3 Conclusion sur la prévalence des symptômes ressentis par les personnes se déclarant EHS	145
6.1.2 Études descriptives sur les caractéristiques psychiques des personnes se déclarant EHS.....	148
6.1.3 Études cliniques comportant des mesures biologiques et / ou physiologiques.....	152
6.2 Études de provocation (avec exposition expérimentale aux champs électromagnétiques) chez des personnes se déclarant EHS.....	156
6.2.1 Analyse des études de provocation	156
6.2.1.1 Études de provocation sans mesure biologique ou physiologique	156
6.2.1.2 Études de provocation avec mesures biologiques ou physiologiques.....	162
6.2.1.2.1 Études de provocation avec stimulation magnétique transcrânienne.....	162
6.2.1.2.2 Études de provocation mesurant plusieurs paramètres physiologiques et / ou biologiques.....	164
6.2.1.2.3 Études de provocation s'intéressant spécifiquement au système nerveux autonome.....	172
6.2.1.2.4 Études de provocation s'intéressant spécifiquement aux fonctions cognitives.....	176
6.2.1.2.5 Études de provocation avec enregistrement EEG du sommeil.....	179
6.2.1.2.6 Études de provocation centrées sur la place de l'effet nocebo dans l'EHS.....	180
6.2.1.2.7 Étude de provocation de symptômes attribués à l'EHS par d'autres facteurs que les champs électromagnétiques.....	186
6.2.1.2.8 Étude de provocation couplant le paradigme de provocation par champs électromagnétiques et le paradigme d'activation cérébrale.....	187
6.2.2 Discussion sur les études déclarant s'intéresser au « bien-être » chez les personnes se déclarant EHS.....	189
6.2.2.1 Introduction sur le « bien-être ».....	189
6.2.2.2 Réflexion au sujet des études déclarant s'intéresser au « bien-être » chez les personnes se déclarant EHS.....	190
6.2.3 Réflexion sur les limites des études de provocation.....	190
6.2.4 Conclusion des études de provocation.....	195
7 Recherche des raisons pour expliquer les symptômes des personnes se déclarant EHS	198

7.1 Les biomarqueurs	198
7.1.1 Études phénotypiques sur les différences biologiques entre personnes se déclarant EHS et population générale	199
7.1.1.1 Rappel des conclusions des rapports précédents	199
7.1.1.2 Personnes se déclarant EHS : synthèse des données et conclusion	199
7.1.2 Étude du stress oxydant chez les personnes se déclarant EHS	200
7.1.2.1 Personnes non-EHS : rappel des conclusions des précédents rapports	200
7.1.2.2 Personnes se déclarant EHS : synthèse des données et conclusion	201
7.1.3 Étude des concentrations en métaux lourds et autres polluants chez les personnes se déclarant EHS	202
7.1.3.1 Introduction	202
7.1.3.2 Analyse des articles chez des personnes se déclarant EHS	202
7.1.3.3 Conclusion	203
7.2 Marqueurs génétiques ou épigénétiques	204
7.2.1 Prédisposition génétique et EHS	204
7.2.1.1 Introduction	204
7.2.1.2 Personnes se déclarant EHS : synthèse des données et conclusion	205
7.2.2 Une composante épigénétique pour expliquer l'EHS ?	205
7.2.2.1 Introduction	205
7.2.2.2 Personnes se déclarant EHS : synthèse des données et conclusion	206
7.3 Système immunitaire	206
7.3.1 Sujets non-EHS : rappel des conclusions des rapports précédents	208
7.3.2 Personnes se déclarant EHS : synthèse des données et conclusion	208
7.4 Système nerveux autonome	208
7.4.1 Introduction	208
7.4.1.1 L'organisation anatomo-fonctionnelle du système nerveux autonome	208
7.4.1.2 Les méthodes d'étude du fonctionnement du SNA	210
7.4.2 Personnes non-EHS	210
7.4.3 Études phénotypiques	212
7.4.4 Personnes se déclarant EHS : synthèse des données et conclusion	213
7.5 Système nerveux central	214
7.5.1 La barrière hémato-encéphalique (BHE)	214
7.5.1.1 Introduction	214
7.5.1.2 Modèles et personnes non-EHS : rappel des conclusions des expertises précédentes	214
7.5.1.3 Personnes se déclarant EHS : synthèse des données et conclusion	217
7.5.2 La neurotransmission monoaminergique	218
7.5.2.1 Des perturbations de la production de catécholamines ?	218
7.5.2.1.1 Introduction	218
7.5.2.1.2 Modèles et personnes non-EHS : rappel des données des précédents rapports	218
7.5.2.2 Des perturbations de la production de sérotonine ?	219
7.5.2.2.1 Introduction	219
7.5.2.2.2 Modèles et personnes non-EHS	220
7.5.2.3 Personnes se déclarant EHS : synthèse des données et conclusion	220
7.5.3 Migraines	220
7.5.3.1 Introduction	220
7.5.3.2 Retour d'expérience	222
7.5.3.3 Personnes se déclarant EHS : synthèse des données et conclusion	222
7.5.4 Activité électrique cérébrale	223
7.5.4.1 Introduction	223
7.5.4.2 Personnes non-EHS : rappel des conclusions des précédents rapports	224
7.5.4.3 Personnes se déclarant EHS : synthèse des données et conclusion	225
7.5.5 Métabolisme et débit sanguin cérébral	225
7.5.5.1 Introduction	225
7.5.5.2 Personnes non-EHS : rappel des conclusions des précédents rapports	226
7.5.5.3 Personnes se déclarant EHS : synthèse des données et conclusion	227

7.5.6	Sommeil et rythmes circadiens	227
7.5.6.1	Introduction.....	228
7.5.6.2	Personnes non-EHS : rappel des conclusions des précédents rapports	231
7.5.6.3	Personnes se déclarant EHS : synthèse des données et conclusion.....	231
7.5.6.4	Éléments de réflexions sur un possible dérèglement des rythmes circadiens chez les personnes se déclarant EHS	233
7.6	Composantes psychiques	234
7.6.1	Introduction sur le concept de troubles psychosomatiques	234
7.6.2	Rappel des conclusions des rapports précédents	237
7.6.3	Analyse des nouvelles études	237
7.6.4	Synthèse des données et conclusion	240
7.7	Effet <i>nocebo</i>	241
7.7.1	Généralités sur l'effet <i>nocebo</i>	241
7.7.2	L'effet <i>nocebo</i> en recherche clinique	243
7.7.3	L'effet <i>nocebo</i> en pratique clinique	243
7.7.4	Qu'en est-il chez les personnes se déclarant EHS ?	244
7.7.4.1	Apport des études de provocation.....	244
7.7.4.2	Autres contributions sur l'effet <i>nocebo</i>	247
7.7.4.3	Synthèse des données et conclusion	248
7.8	Autre hypothèse : un effet cocktail	249
8	Prise en charge médicale des personnes EHS et stratégies d'évitement mises en œuvre par celles-ci.....	251
8.1	Études sur l'efficacité des thérapies comportementales et cognitives (TCC) et autres thérapies sur les symptômes ou troubles présentés par les personnes se déclarant EHS.....	252
8.1.1	Rappel des conclusions du rapport précédent	252
8.1.2	Analyse des articles sur les effets des thérapies comportementales et cognitives chez des personnes se déclarant EHS	253
8.1.3	Autres données sur les traitements de l'EHS	258
8.1.4	Synthèse et discussion sur les traitements de l'EHS	259
8.2	Prise en charge des personnes se déclarant EHS à l'étranger par les autorités publiques.....	260
8.2.1	Enquête internationale sur l'hypersensibilité aux champs électromagnétiques (EHS) et sa prise en charge	260
8.2.1.1	Présentation de l'enquête de l'Anses	261
8.2.1.2	Résultats de l'enquête	261
8.2.1.3	Principales limites de l'enquête	263
8.2.2	Exemple de prise en charge individualisée : le réseau de médecine environnementale en Suisse	263
8.2.2.1	Description du réseau de médecine environnementale en Suisse et de l'étude menée sur les premiers patients inclus dans le réseau	263
8.2.2.2	Résultats de l'étude sur les premiers patients inclus dans le réseau	263
8.2.2.3	Réflexions du réseau de médecins suisses sur la question de l'origine des troubles des patients se déclarant EHS	264
8.3	Les stratégies d'évitement utilisées	265
8.3.1	Dispositifs de protection contre les champs électromagnétiques	265
8.3.1.1	Protections utilisées par les personnes se déclarant EHS	266
8.3.1.2	Efficacité des dispositifs de protection contre les champs électromagnétiques utilisés par les personnes se déclarant EHS	266
8.3.1.3	Conclusion sur les stratégies d'évitement mises en œuvre par les personnes se déclarant EHS.....	269
8.3.2	Les zones blanches et immeubles collectifs dédiés aux personnes se déclarant EHS	269
8.3.2.1	Les zones blanches ou de faible niveau d'exposition	269

8.3.2.2	Les espaces « blanchis »	270
8.3.2.3	Conclusion sur les zones blanches	271

9 Conclusions du groupe de travail 273

10 Recommandations du groupe de travail..... 276

10.1 Amélioration de la prise en charge des personnes se déclarant EHS par les professionnels de santé 276

10.2 Évaluation des moyens empiriques actuellement utilisés pour poser un « diagnostic » ou pour le « traitement » des personnes se déclarant EHS.....277

10.3 Approfondissement des connaissances sur l'EHS 277

10.3.1 Études de provocation.....278

10.3.2 Recherches sur les principaux symptômes de l'EHS.....278

10.3.2.1 Troubles du sommeil et des rythmes circadiens..... 278

10.3.2.2 Migraines et céphalées 279

10.3.2.3 Fonctions cognitives..... 279

10.3.2.4 Hypersensibilité et étude globale de la personnalité 280

10.3.2.5 EHS et autres troubles ou syndromes associés 280

10.3.3 Autres propositions de recherche.....281

10.4 Exposition aux champs électromagnétiques 281

11 Bibliographie..... 282

11.1 Publications.....282

11.2 Références citées mais non publiées à ce jour.....307

11.3 Normes.....307

11.4 Législation et réglementation.....307

ANNEXES 308

Annexe 1 : L'IRM utilise trois types de champs magnétiques ou électromagnétiques 309

Annexe 2 : Comparaison des symptômes utilisés pour le diagnostic de l'EHS dans cinq questionnaires différents.....310

Annexe 3 : Questions adressées par l'Anses au P^r Belpomme le 26 juin 2014.....315

Annexe 4 : Analyse de l'article Belpomme *et al.* (2015) par le GT « RF et santé » 317

Annexe 5 : Échelle de mesure des personnes hypersensibles « *Highly Sensitive Person Scale* » ou HSP par Aron et Aron (1997).....324

Annexe 6 : Valeurs limites d'exposition, recommandations et lignes directrices pour la limitation de l'exposition aux champs électromagnétiques.....325

Annexe 7 : Questionnaires et échelles de somatisation utilisés dans les publications analysées pour recueillir les symptômes subjectifs des personnes se déclarant EHS 333

Annexe 8 : Les questionnaires/questions d'évaluation subjective des troubles du sommeil 334

Annexe 9 : Questionnaires explorant la notion de bien-être 336

Annexe 10 : Les maladies du système nerveux autonome (SNA) et leurs symptômes.....337

Annexe 11 : Quelques techniques de mesure de l'activité du système nerveux autonome (SNA) 339

Annexe 12 : Les tests d'évaluation des fonctions cognitives chez l'être humain.....	341
Annexe 13 : Instruments ou tests psychométriques validés et utilisés dans l'étude des composantes psychiques de l'EHS	343
Annexe 14 : Les mécanismes de l'effet <i>nocebo</i> : stress, conditionnement et attribution causale.....	349
Annexe 15 : Courrier de l'enquête internationale sur l'hypersensibilité aux champs électromagnétiques (EHS).....	352
Annexe 16 : verbatim des auditions	354
Annexe 17 : Bilan de la consultation publique et principales modifications du rapport suite à la consultation.....	355
Annexe 18 : Annexe aux recommandations concernant les protocoles expérimentaux....	358

Expertise collective : synthèse de l'argumentaire et conclusions

EXPERTISE COLLECTIVE : SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS

**relatives à l'expertise sur « l'hypersensibilité électromagnétique (EHS) ou
intolérance environnementale idiopathique attribuée aux champs
électromagnétiques (IEI-CEM) »**

Ce document synthétise les travaux du comité d'experts spécialisé « Agents Physiques, nouvelles technologies et grands aménagements » et du groupe de travail « radiofréquences et santé ».

Présentation de la question posée

Dans un contexte de controverse, aussi bien dans les milieux scientifiques que dans le débat public, l'Anses a décidé d'accorder à la question de l'hypersensibilité électromagnétique (EHS) ou intolérance environnementale idiopathique attribuée aux champs électromagnétiques (IEI-CEM) - les deux expressions désignent le même phénomène -, toute l'attention qu'elle mérite en lui consacrant une expertise spécifique et approfondie. Ce choix atteste de l'importance que l'Anses accorde à ce sujet, et en particulier aux personnes se déclarant EHS. Pour mémoire, dans le rapport d'expertise consacré aux effets des radiofréquences sur la santé publié par l'Afsset en 2009, la question de l'EHS avait fait l'objet d'un chapitre particulier. En revanche, ce sujet avait été volontairement écarté de la mise à jour de l'expertise sur le même sujet publiée par l'Anses en 2013. Le groupe d'experts avait alors estimé que la complexité de la question de l'EHS nécessitait de lui consacrer une expertise collective spécifique, objet de la présente synthèse.

L'objectif de cette expertise était de chercher à comprendre l'EHS dans sa complexité, de la caractériser, et d'étudier la plausibilité des différentes hypothèses avancées pour expliquer l'origine des troubles.

Contexte scientifique

Depuis le début des années 1980, la littérature scientifique rapporte de façon continue le cas de personnes se plaignant de troubles fonctionnels² divers (troubles cutanés attribués à une exposition aux écrans cathodiques, puis troubles plus variés attribués à des expositions aux champs émis par les appareils électroménagers et les installations électriques) qu'elles attribuent à une exposition à des champs électromagnétiques. Ce « tableau clinique » a reçu plusieurs appellations successives, traduisant une évolution des concepts comme on en observe fréquemment dans l'histoire de la médecine, surtout dans les situations d'incertitude.

L'une des originalités (et difficultés) de l'EHS est que les symptômes dont se plaignent les personnes se déclarant EHS sont attribués à des expositions aussi bien aux radiofréquences (le plus souvent pour des sources autour de quelques centaines de MégaHertz à quelques GigaHertz)

² Le terme de « trouble fonctionnel » regroupe l'ensemble des symptômes et affections sans support lésionnel ni dysfonctionnement d'organe identifiable, par opposition aux maladies organiques.

qu'aux extrêmement basses fréquences (principalement 50 Hz en Europe), ce qui complexifie le problème. Après avoir débattu de cette difficulté en son sein, le groupe de travail a choisi de s'intéresser à toutes les personnes se déclarant EHS, quelles que soient les sources de champs incriminées.

Organisation de l'expertise et description de la méthode

La présente expertise relève du domaine de compétences du comité d'experts spécialisé (CES) « Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements ». L'Anses a confié la réalisation de l'expertise au groupe de travail « radiofréquences et santé ». Celui-ci avait été constitué à la suite d'un appel public à candidatures d'experts lancé le 1^{er} décembre 2010. Les experts ont été recrutés pour leurs compétences scientifiques et techniques dans les domaines de l'épidémiologie, de la médecine, de la biologie, de la métrologie et de la dosimétrie des champs électromagnétiques, ainsi que des sciences humaines et sociales. Au total, seize experts indépendants ont été nommés le 30 juin 2011 pour une durée de 3 ans. Ce groupe a notamment produit une mise à jour de l'évaluation des risques pour la santé liés à l'exposition aux radiofréquences en octobre 2013. La composition du groupe de travail a ensuite été en partie renouvelée et complétée le 9 juillet 2014 pour réaliser l'expertise relative à l'EHS, puis le mandat de ce groupe a été prolongé jusqu'au 31 décembre 2017, afin de finaliser les travaux. Ces travaux d'expertise sont donc issus de collectifs d'experts aux compétences complémentaires.

Les liens d'intérêts déclarés par les experts ont été analysés par l'Anses avant leur nomination et tout au long des travaux, afin d'éviter les risques de conflits d'intérêts au regard des points traités dans le cadre de l'expertise. Les déclarations d'intérêts des experts sont rendues publiques *via* le site internet : <https://www.anses.fr>.

Veille bibliographique et recueil d'informations

Comme toutes les expertises de l'Anses, celle-ci est principalement basée sur l'analyse de la littérature scientifique disponible. La période de référence pour la veille bibliographique s'étend d'avril 2009³ à juillet 2016⁴. Toutefois, pour compléter l'historique de certaines questions et suite à la consultation publique, des références sortant du cadre de cette période ont ponctuellement pu être ajoutées au rapport. Les documents expertisés sont de natures diverses (articles scientifiques publiés dans des journaux à comité de lecture indépendant, rapports d'expertise d'organismes européens et internationaux, rapports de recherches financées par l'Anses, etc.). En décembre 2014, le Comité de dialogue « Radiofréquences et santé »⁵ de l'Agence a également été invité à compléter la liste des références bibliographiques analysées par le groupe de travail.

En complément des documents ainsi recensés, des contributions écrites ont été sollicitées auprès de médecins et sociologues, sur des aspects précis concernant l'expertise. De plus, des études ont fait l'objet de contrats de recherche et développement (CRD) avec le Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB) et l'Unité mixte de recherche épidémiologique et de surveillance transport-travail-environnement (UMRESTTE, Ifsttar et Université Claude Bernard Lyon 1), afin d'obtenir de nouvelles données.

³ fin de la période d'analyse de la bibliographie prise en compte dans le dernier rapport de l'Agence s'intéressant à la question de l'EHS, publié en octobre 2009.

⁴ date de fin de la revue bibliographique correspondant au moment de la mise en consultation publique du rapport pré-définitif.

⁵ Le Comité de dialogue « Radiofréquences et santé » de l'Anses est un lieu d'échanges, de réflexion et d'information sur les questions scientifiques relatives aux effets potentiels sur la santé des radiofréquences et à leur évaluation. Sa mise en place en juin 2011 s'inscrit dans le prolongement de l'expérience acquise dans le cadre de la Fondation « Santé et Radiofréquences ». Il réunit des représentants d'associations et de syndicats, des opérateurs de téléphonie mobile et des radiodiffuseurs, des institutions, des collectivités territoriales et des élus dans un souci d'équilibre des groupes d'intérêts.

En outre, compte tenu de la complexité du sujet, des limites méthodologiques de nombreux articles scientifiques, de l'absence d'études portant sur certaines questions, ainsi que des controverses qui résultent parfois de ces difficultés, le groupe de travail s'est également intéressé aux expériences de terrain. Il s'est ainsi penché, à travers une vingtaine d'auditions, sur les témoignages de différentes parties prenantes (médecins hospitaliers et médecins généralistes, associations et collectifs de citoyens, élus, chercheurs, etc.). Ces témoignages ont nourri les réflexions du groupe de travail et parfois proposé des hypothèses explicatives de l'EHS, qui ont ensuite été analysées au cours de l'expertise.

Déroulement de l'expertise

Entre juillet 2014 et octobre 2017, le groupe de travail s'est réuni 29 fois en séances plénières afin, notamment, de procéder aux auditions, à l'analyse des articles et d'étudier et débattre de la plausibilité des différentes hypothèses avancées pour expliquer l'origine des troubles.

La qualité des publications scientifiques (études cliniques et études épidémiologiques principalement) a été évaluée en s'appuyant sur différents critères (rigueur du protocole, caractérisation des expositions, etc.), quels que soient leurs résultats et conclusions.

Les travaux d'expertise ont été présentés au CES à plusieurs reprises entre septembre 2014 et novembre 2017, tant sur les aspects méthodologiques que scientifiques. Les commentaires du CES ont été pris en compte par le groupe de travail tout au long de l'expertise.

Celle-ci a été réalisée dans le respect de la norme NF X 50-110 « Qualité en expertise – Prescriptions générales de compétence pour une expertise (Mai 2003) ».

Consultation publique

Considérant l'importance, la complexité et la sensibilité du sujet, l'Agence a souhaité porter le rapport « Hypersensibilité électromagnétique ou intolérance environnementale idiopathique attribuée aux champs électromagnétiques » dans un état pré-définitif, c'est-à-dire sans conclusion ni recommandation, à la connaissance des membres de la communauté scientifique et des parties prenantes intéressées au cours d'une consultation publique.

Celle-ci a été ouverte du 27 juillet au 15 octobre 2016. Elle était destinée à recueillir des données et commentaires scientifiques susceptibles d'être pris en compte dans l'élaboration finale du rapport d'expertise. Au total, plus de 500 commentaires ont été déposés par l'intermédiaire d'un formulaire en ligne disponible sur le site internet de l'Agence. Chacun d'entre eux a été analysé par plusieurs experts rapporteurs et fait l'objet d'une réponse, ce qui a nécessité de nombreuses réunions en sous-groupes. Chaque réponse a ensuite été validée par l'ensemble du groupe de travail (cf. tableau de réponse aux commentaires en ligne sur le site de l'Anses). Près de 150 commentaires ont entraîné une modification, un ajout ou une reformulation du rapport d'expertise.

Validation du rapport définitif

Le rapport d'expertise définitif a été validé par le groupe de travail le 23 octobre 2017.

Résultats et conclusions de l'expertise collective

Le comité d'experts spécialisé « Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements » a adopté les travaux d'expertise collective, ainsi que ses conclusions et recommandations, objets de la présente synthèse, lors de sa séance du 15 décembre 2017 et a fait part de cette adoption à la direction générale de l'Anses.

Comment définir l'EHS ? (cette question est abordée au chapitre 3 du rapport d'expertise)

Le groupe de travail a adopté la définition de l'OMS, qui a retenu trois critères pour caractériser l'« intolérance environnementale idiopathique aux champs électromagnétiques (IEI-CEM) », également appelée EHS, à savoir :

- 1) la perception par les sujets de symptômes fonctionnels divers non spécifiques⁶ (troubles du sommeil, maux de tête, symptômes cutanés, etc.) ;
- 2) l'absence d'évidences clinique et biologique permettant d'expliquer ces symptômes ;
- 3) l'attribution, par les sujets eux-mêmes, de ces symptômes à une exposition à des champs électromagnétiques, eux-mêmes diversifiés.

Il faut préciser que, pour l'OMS, « l'IEI est un descripteur n'impliquant aucune étiologie chimique ou aucune sensibilité de type immunologique ou électromagnétique. Ce terme regroupe un certain nombre de troubles ayant en commun des symptômes non spécifiques similaires, qui restent non expliqués sur le plan médical et dont les effets sont préjudiciables pour la santé des personnes. »

En ce qui concerne les symptômes, les plus fréquemment rapportés dans la plupart des études descriptives, ainsi qu'à travers les témoignages, sont la fatigue et les troubles du sommeil. Cependant, les symptômes décrits sont multiples, communs à de nombreuses autres affections et hétérogènes, avec des descriptions variables (les questionnaires utilisés, le recrutement des personnes ne sont pas comparables d'une étude à l'autre, etc.). Les différents témoignages rapportés lors des auditions et de la consultation publique sont également hétérogènes (cf. premier critère de l'OMS). Quoi qu'il en soit, les plaintes (douleurs, souffrance⁷) formulées par les personnes se déclarant EHS correspondent à une réalité vécue.

En ce qui concerne la recherche de bases cliniques, biologiques et / ou physiologiques, les quelques travaux qui ont essayé de décrire les caractéristiques de l'EHS n'ont pas permis de mettre en évidence de critères de diagnostic qui puissent être utilisables pour les études cliniques, ni de critères de classification pour la recherche qui fassent l'objet d'un consensus suffisant pour pouvoir être proposés en pratique (cf. deuxième critère de l'OMS). Il en résulte une grande imprécision dans l'organisation des recherches et dans l'interprétation de leurs résultats.

Enfin, les expositions aux champs électromagnétiques incriminées dans les études ou à travers les témoignages sont également très hétérogènes (cf. troisième critère de l'OMS) : les ondes radiofréquences sont principalement citées (téléphone mobile, Wi-Fi, antennes relais, etc.) ainsi que, parfois, les extrêmement basses fréquences (lignes et installations électriques), dont les modes d'interactions avec le corps humain sont cependant très différents.

Actuellement, la seule possibilité pour définir l'EHS repose donc sur l'auto-déclaration des personnes. En conséquence, cela peut entraîner un manque de sensibilité dans toutes les études sur le sujet, puisque des personnes se déclarant EHS très différentes peuvent être recrutées sans distinction.

Ainsi, une évaluation de la prévalence de l'EHS reste très difficile à faire ; les données scientifiques sur le pourcentage de personnes se déclarant EHS dans la population en France et à l'international ne sont pas fiables, elles sont comprises entre 0,7 et 13,3 %. Toutefois, les données

⁶ Un signe clinique est dit « non spécifique » lorsqu'il peut être l'expression clinique de plusieurs maladies différentes. Au contraire, un signe clinique est dit « spécifique » lorsqu'il permet d'orienter le diagnostic vers une ou un groupe de pathologies.

⁷ « C'est à des signes, donc à la sémiologie, que psychiatrie et phénoménologie s'adressent d'un commun accord pour justifier leur emploi distinct des termes douleur et souffrance : on s'accordera donc pour réserver le terme douleur à des affects ressentis comme localisés dans des organes particuliers du corps ou dans le corps tout entier, et le terme souffrance à des affects ouverts sur la réflexivité, le langage, le rapport à soi, le rapport à autrui, le rapport au sens, au questionnement, etc. Mais la douleur pure, purement physique, reste un cas limité, comme l'est peut-être la souffrance supposée purement psychique, laquelle va rarement sans quelques degrés de somatisation. Ce chevauchement explique les hésitations du langage ordinaire » (Ricoeur 1994).

les plus récentes (sept articles publiés entre 2008 et 2013) donnent des résultats plus resserrés, autour de 5 % (entre 1,2 % et 8,8 %) et ne semblent pas confirmer la perspective d'une augmentation progressive de la prévalence de l'EHS qui avait été suggérée par certaines études plus anciennes.

Les études descriptives mettent en évidence le fait que les personnes se déclarant EHS ont un moins bon niveau de bien-être et sont, en moyenne, plus anxieuses et déprimées que les témoins. Cependant, cette observation est difficile à interpréter, car telles que les études ont été conçues, il n'est pas possible de déterminer si cette anxiété et / ou cette dépression sont la cause ou la conséquence des symptômes ressentis par ces personnes. L'anxiété et la dépression sont en effet des réactions communes à la plupart des maladies graves ou rares. Dans le cas des personnes se déclarant EHS, les difficultés de prise en charge médicale et la persistance des symptômes pourraient contribuer à générer de l'anxiété et / ou un état dépressif. Il n'est pas possible de conclure que cette composante psychique est plus ou moins fréquente chez les personnes se déclarant EHS que chez celles présentant une maladie grave ou rare.

À noter qu'il existe des associations entre l'EHS et plusieurs syndromes ou troubles, le plus souvent le syndrome d'intolérance aux odeurs chimiques (SIOC, *multiple chemical sensitivity*), la fibromyalgie, les migraines et les acouphènes.

L'être humain est-il capable de percevoir les champs électromagnétiques ? (cette question est abordée au chapitre 5 du rapport d'expertise)

Aucune étude n'a mis en évidence une capacité des personnes se déclarant EHS à percevoir des champs électromagnétiques radiofréquences dans des conditions d'exposition environnementale.

Cependant, quelques études très disparates (qu'il s'agisse des techniques d'exposition ou des critères d'évaluation) et de qualité scientifique très inégale ont permis d'observer :

- des potentiels évoqués⁸ sur des enregistrements de l'électroencéphalogramme (EEG) chez des personnes non-EHS lors d'une exposition à un signal magnétique 60 Hz (2 études d'une seule et même équipe) ;
- des différences entre des personnes se déclarant EHS et des témoins exposés à des champs électromagnétiques basses fréquences 50 Hz dans leur capacité à distinguer les expositions réelles des expositions factices (2 études d'une seule et même équipe) ;
- un abaissement du seuil de perception du courant électrique basses fréquences chez certaines personnes se déclarant EHS (3 études d'une seule équipe). On peut alors, dans ce cas, parler d'électrosensibilité ou d'hypersensibilité au courant électrique.

Toutefois, les résultats de ces études doivent être interprétés avec précaution et mériteraient de faire l'objet d'études de réplication, à condition toutefois qu'une attention particulière soit accordée aux critères d'inclusion des participants et aux résultats individuels. De plus, en l'absence de recueil de la symptomatologie fonctionnelle des participants, ces études ne permettent pas d'établir de lien entre ces observations et l'EHS.

⁸ Les potentiels évoqués (PE) sont définis comme des modifications de l'activité électrique du système nerveux en réponse à une stimulation externe (visuelle, auditive, somesthésique ou motrice) ou endogène (PE cognitif). La stimulation doit être répétée un grand nombre de fois pour extraire, par moyennage de l'activité électrique de base, une réponse spécifique de la voie nerveuse stimulée.

Existe-t-il une relation causale entre l'exposition aux champs électromagnétiques et les symptômes des personnes se déclarant EHS ? (cette question est principalement abordée au chapitre 6 du rapport d'expertise)

Les études de provocation sont souvent considérées comme le meilleur moyen de démontrer, en laboratoire, l'existence d'un lien de causalité entre les expositions aux champs électromagnétiques d'une part, et la survenue et la persistance des symptômes d'autre part.

Les études de provocation analysées (une quarantaine) n'ont pas permis de mettre en évidence, de manière fiable et reproductible, l'apparition de symptômes ou d'anomalies biologiques ou physiologiques spécifiques à l'EHS pendant ou après une exposition (aux basses fréquences ou aux radiofréquences). Ceci suggère deux hypothèses :

- soit les symptômes ressentis par les personnes se déclarant EHS ne seraient pas dus aux expositions aux champs électromagnétiques et il n'existerait pas d'anomalie biologique et / ou physiologique objectivable lorsqu'elles sont exposées aux champs électromagnétiques (hypothèse 1) ;
- soit l'absence de résultat serait due aux limites méthodologiques des études de provocation (sélection des sujets, taille des échantillons, nature des expositions, etc.) (hypothèse 2). Ces limites méthodologiques ne permettraient ainsi pas d'exclure avec certitude que :
 - certaines personnes sensibles aux champs électromagnétiques et présentant des effets biologiques et / ou physiologiques en condition d'exposition, n'aient pas été détectées jusqu'à présent en raison de l'imprécision des critères d'inclusion et d'exclusion des participants à ces études de provocation ;
 - des effets biologiques et / ou physiologiques puissent se manifester uniquement dans certaines conditions d'exposition (non encore testées) ;
 - les champs électromagnétiques aient certains effets biologiques et / ou physiologiques non encore analysés dans les études de provocation (cf. effets sur l'électroencéphalogramme (EEG) du sommeil décrits dans le rapport publié par l'Anses en 2013 sur les radiofréquences et la santé).

Par ailleurs, les résultats de plusieurs études de provocation ont conduit leurs auteurs à proposer l'hypothèse d'un rôle de l'effet *nocebo* dans l'apparition et / ou la persistance de l'EHS (compatible à la fois avec les hypothèses 1 et 2 ci-dessus). Toutefois, ces études de provocation ont été réalisées chez des personnes se déclarant EHS depuis un certain temps et ne renseignent donc pas sur les modalités de la première apparition des symptômes et leur attribution à une exposition à des champs électromagnétiques. Il n'en reste pas moins qu'une quinzaine d'articles présentent des résultats concordants pour montrer que, soumises à des expositions factices, les personnes se déclarant EHS expriment un nombre de fausses reconnaissances et de symptômes ressentis nettement plus élevé que les témoins, ce qui ne peut être expliqué que par un effet *nocebo*. L'effet *nocebo* joue donc certainement un rôle non négligeable dans la persistance de l'EHS. Si les mécanismes qui sous-tendent cet effet sont encore, pour certains, mal connus, il est bien établi que ce phénomène, comme l'effet *placebo*, intervient souvent dans la relation soignants-soignés, et qu'il s'agit d'une réponse cognitivo-affective normale. De plus, sa survenue n'exclut pas la présence d'une affection organique non identifiée.

Au final, aucune preuve expérimentale solide ne permet actuellement d'établir un lien entre les champs électromagnétiques et les symptômes décrits par les personnes se déclarant EHS.

Quelles hypothèses sont avancées pour interpréter les symptômes des personnes se déclarant EHS ? (cette question est principalement abordée au chapitre 7 du rapport d'expertise)

Pour essayer d'expliquer les différents symptômes des personnes se déclarant EHS, les experts du groupe de travail de l'Anses ont recensé différentes hypothèses à travers l'analyse de la littérature scientifique. En outre, compte tenu des limites de nombreux articles scientifiques et de l'absence d'études sur certaines questions, le groupe de travail s'est aussi intéressé aux

expériences de terrain et aux hypothèses émises par différents médecins et associations. Il a ensuite étudié l'ensemble de ces hypothèses.

Dans un premier temps, le groupe de travail a cherché à savoir s'il existait des biomarqueurs caractéristiques de l'EHS (différences biologiques ou modifications physico-chimiques, stress oxydant chronique ou intoxication chimique). Les pistes génétique et immunitaire ont également été examinées pour essayer d'expliquer l'EHS. Cependant, il n'existe aucune donnée scientifique concluante en faveur de ces hypothèses.

Le groupe de travail s'est ensuite intéressé à l'activité du système nerveux autonome (SNA) des personnes se déclarant EHS. Certaines études semblent mettre en évidence un phénotype différent en ce qui concerne l'activité du SNA au niveau basal (c'est-à-dire en l'absence d'exposition) entre les personnes se déclarant EHS et les témoins. L'origine de cette différence serait un déséquilibre de la balance ortho/parasymphatique, qui se manifesterait, selon les études, par une augmentation de la composante orthosymphatique, une tachycardie et / ou une augmentation de la conductance cutanée. Cependant, ces modifications pourraient aussi traduire un effet du stress lié aux conditions expérimentales. L'hétérogénéité des résultats peut s'expliquer par plusieurs limites, que l'on retrouve dans la plupart de ces études : taille trop faible des échantillons, méthodologies inadaptées, etc. Ainsi, les données disponibles ne permettent pas de mettre en évidence un impact des champs électromagnétiques sur le système nerveux autonome des personnes se déclarant EHS (ni sur celui des témoins). En l'état actuel des connaissances, l'hypothèse selon laquelle les personnes se déclarant EHS souffriraient d'un dysfonctionnement basal du système nerveux autonome ne peut être ni validée ni exclue.

Le groupe de travail a par ailleurs étudié plusieurs hypothèses concernant le système nerveux central (SNC) pour expliquer tout ou partie de la survenue de l'EHS. Selon la première de ces hypothèses, l'exposition à des champs électromagnétiques amplifierait les altérations de la barrière hémato-encéphalique (BHE) provoquées par d'autres facteurs et serait à l'origine de l'extravasation de molécules du sang vers le liquide cébrospinal. L'extravasation des molécules serait ensuite susceptible d'entraîner des troubles neurologiques chez les personnes se déclarant EHS. Le groupe de travail a étudié les articles scientifiques disponibles sur le sujet et a conclu que cette hypothèse ne pouvait pas être validée à ce jour.

Une autre hypothèse concernant le système nerveux central a été analysée, selon laquelle des perturbations dans la production de neurotransmetteurs (catécholamines, sérotonine) pourraient expliquer la survenue de l'EHS. Cependant, il existe trop peu de données scientifiques pour conclure sur le sujet.

L'hypothèse de l'existence d'un terrain migraineux chez les personnes se déclarant EHS a davantage retenu l'attention du groupe de travail. En effet, les maux de tête sont l'un des symptômes les plus fréquemment rapportés par celles-ci et les résultats obtenus par un médecin chez certaines d'entre elles, qu'il a traitées comme des migraineux, sont apparus intéressants. Les données de la littérature scientifique, si elles sont trop rares et disparates pour conclure sur le sujet, justifient néanmoins que des recherches centrées sur ce problème soient réalisées.

D'autres hypothèses, étudiées dans des articles concernant le système nerveux central, ont été analysées par le groupe de travail. Elles se sont intéressées à un éventuel dysfonctionnement de l'activité électrique cérébrale, du métabolisme ou du débit sanguin cérébral. En l'état actuel des connaissances, il n'est pas possible de mettre en évidence un quelconque dysfonctionnement de cette nature, spécifique aux personnes se déclarant EHS. Par ailleurs, les données disponibles ne permettent pas de savoir si l'effet d'une exposition aux radiofréquences sur l'activité électrique cérébrale observé chez des personnes non-EHS (cf. Anses, 2013) s'inscrit ou non dans les limites des variations physiologiques, ni s'il pourrait entraîner un effet sanitaire favorable ou défavorable à long terme.

Une éventuelle dysrégulation du cycle veille-sommeil ou de l'horloge circadienne chez les personnes se déclarant EHS a également été étudiée par le groupe de travail. Deux études

comportant des enregistrements polysomnographiques du sommeil après une exposition de longue durée à un signal GSM chez des personnes se déclarant EHS ont confirmé⁹ que cette exposition provoquait une augmentation de la puissance spectrale de l'EEG dans la fréquence des fuseaux de sommeil¹⁰. Cependant, ces deux études n'ayant pas comparé les résultats obtenus chez les personnes se déclarant EHS à ceux de témoins, elles ne permettent pas de conclure quant à l'existence d'un éventuel dysfonctionnement propre aux personnes se déclarant EHS. En revanche, une autre étude a mis en évidence une augmentation de l'énergie de la bande des hautes fréquences (HF)¹¹ des EEG, significativement plus faible chez des personnes se déclarant EHS que chez des témoins, à la fois durant l'induction du sommeil et durant la nuit. Cette observation est à rapprocher des constatations faites sur les effets d'une exposition aux radiofréquences sur l'EEG du sommeil chez les personnes non-EHS. Même si les conséquences de ces modifications du sommeil sur l'organisme n'ont pas été caractérisées selon des critères précis¹² et restent inconnues, ces observations suggèrent que l'hypothèse d'un dysfonctionnement de l'horloge circadienne reste crédible et mérite d'être étudiée pour tenter d'expliquer la symptomatologie de ces personnes (troubles du sommeil, de la concentration et de la mémoire fréquents d'après les études descriptives par questionnaires).

Pour finir, le concept d'« hypersensibilité », comme trait de caractère, a retenu l'attention du groupe de travail. L'« hypersensibilité » désigne une sensibilité plus haute que la moyenne, provisoire ou durable, pouvant être vécue avec difficulté par la personne elle-même, ou perçue comme « exagérée » voire « extrême » par l'entourage. Les « hypersensibles » percevraient leur environnement avec une acuité et une sensibilité particulière. Ce concept est d'abord apparu en psychologie pour être étayé ensuite par des études éthologiques (chez plus de 100 espèces animales), neurobiologiques et génétiques. Il fournit une piste de réflexion sur un possible facteur commun à plusieurs syndromes (syndrome d'intolérance aux odeurs chimiques et fibromyalgie principalement), qui mériterait d'être approfondie.

Recommandations de l'expertise collective

Recommandations aux pouvoirs publics

Considérant :

- les incertitudes liées aux données scientifiques disponibles (ou non) sur l'EHS ;
- l'absence de modèle animal pertinent pour étudier l'EHS ;
- que malgré les nombreux témoignages de personnes se déclarant EHS et rapportant la fin de leurs symptômes avec la fin de l'exposition aux ondes, les données scientifiques disponibles à l'heure actuelle ne plaident ni en faveur ni en défaveur d'une amélioration de leur état de santé à la suite d'un abaissement des niveaux d'exposition ;
- que la loi n° 2015-136 du 9 février 2015 relative à la sobriété (dite « loi Abeille ») confie à l'Agence nationale des fréquences (Anfr) « les modalités de traitement et la trajectoire de

⁹ Résultat déjà décrit par plusieurs auteurs et souligné dans le rapport publié par l'Anses sur les effets des radiofréquences en 2013.

¹⁰ Le fait que les fuseaux soient un marqueur de stabilisation du sommeil semblerait être en contradiction avec les troubles du sommeil décrits par les personnes se déclarant EHS. Cette contradiction apparente soulève la question de la grande différence entre les analyses subjectives du ressenti de la qualité du sommeil et celles objectivées par une polysomnographie incluant un enregistrement EEG et permettant de diagnostiquer diverses pathologies ou troubles du sommeil (apnées du sommeil, narcolepsie, syndrome des jambes sans repos, insomnies, etc.).

¹¹ La bande HF évalue l'activité parasympathique. Durant le sommeil et son induction, l'énergie de la bande HF du signal cardiaque augmente.

¹² selon les critères définis par l'Académie américaine de médecine du sommeil.

résorption des points atypiques¹³ », afin de réduire le niveau de champs émis dans les lieux en cause, tout en garantissant la couverture et la qualité des services rendus ;

- qu'aucune donnée scientifique ne permet d'objectiver l'efficacité de zones blanches ou d'immeubles « blanchis », ni de chambres d'hôpital spécifiques, sur la réduction des symptômes rapportés par les personnes se déclarant EHS ;

le CES recommande aux pouvoirs publics de :

- pérenniser le financement de l'effort de recherche, notamment fondamentale, sur les effets sanitaires des radiofréquences, et sur l'EHS en particulier ;
- soutenir notamment la mise en place d'infrastructures de recherche adaptées à l'EHS (pour effectuer des études de provocation, etc.) ;

De plus, le CES renouvelle¹⁴ ses recommandations en matière de réduction des niveaux d'exposition pour la population générale, et souligne notamment l'importance :

- de peser avec soin les conséquences d'un éventuel abaissement des niveaux d'exposition induits par les antennes-relais de téléphonie mobile ;
- d'étudier le lien entre la multiplication du nombre d'antennes et l'augmentation parallèle possible de la valeur moyenne de l'exposition ;

Enfin, dans l'éventualité de la création de zones blanches, le CES recommande d'en évaluer rigoureusement les bénéfices potentiels sur la symptomatologie des personnes se déclarant EHS.

Recommandations à destination des institutions et organismes de recherche

Amélioration des connaissances sur l'EHS

Études de provocation

Considérant que :

- les études de provocation sont celles qui ont le meilleur niveau de preuve pour démontrer un éventuel lien de causalité entre l'exposition aux champs électromagnétiques et les symptômes décrits par les personnes se déclarant EHS, mais ont été, jusqu'à présent, entachées de limites méthodologiques (cf. § 6.2.3) et n'ont pas permis d'aboutir à un consensus scientifique (cf. § 6.2.4) ;
- des personnes se déclarant EHS rapportent être plus sensibles à certains types de signaux (ou variations de signaux) qu'à d'autres¹⁵ ;

le CES recommande de mener des études de provocation (avec des groupes de personnes bien caractérisés en âge, genre, nature des symptômes, etc.) sur les effets :

- de signaux les plus proches possibles de ceux rencontrés dans l'environnement ;
- des expositions aux champs électromagnétiques en concevant de nouveaux protocoles (différents modes d'exposition, effets différés, etc.).

¹³ Les points atypiques sont définis comme les lieux où le niveau d'exposition du public aux champs électromagnétiques dépasse substantiellement celui généralement observé à l'échelle nationale, conformément aux critères déterminés par l'Anfr et révisés régulièrement en fonction des résultats des mesures qui lui sont communiquées. Un recensement national des points atypiques du territoire est établi chaque année par l'Anfr.

¹⁴ Cf. § 13.3, p 346 du rapport publié par l'Anses en 2013.

¹⁵ Des travaux récents conduits aux Pays-Bas (Van Moorselaar *et al.*, 2016) ont montré la faisabilité et l'intérêt de réaliser une étude de provocation rigoureuse tout en étant spécifique à chaque participant se déclarant EHS.

Caractérisation des symptômes de l'EHS

Troubles du sommeil et des rythmes circadiens

Considérant que :

- les troubles du sommeil figurent parmi les symptômes les plus fréquemment rapportés par les personnes se déclarant EHS, mais restent mal objectivés ;
- des anomalies de l'EEG de sommeil ont été décrites, chez des personnes non-EHS, après exposition aux radiofréquences (cf. Anses, 2013), et que ces anomalies semblent avoir été retrouvées chez des personnes se déclarant EHS, sans toutefois avoir fait l'objet d'une comparaison avec celles observées chez des personnes non-EHS (cf. § 6.2.1.2.5) ;
- de très récents travaux expérimentaux ont montré, pour la première fois, que des rats étaient capables de choisir un environnement où leur exposition aux radiofréquences était la plus faible durant la période de repos (jour) et que ce choix était associé à une augmentation de la durée du sommeil paradoxal (cf. § 5.3.1)) ;
- la symptomatologie des personnes se déclarant EHS (troubles du sommeil notamment) rend possible l'hypothèse d'un dysfonctionnement de l'horloge circadienne ;

le CES recommande :

- d'étudier à la fois la prévalence, l'intensité et les caractéristiques des troubles subjectifs ou auto-rapportés du sommeil (avec des échelles d'intensité notamment) et les rythmes circadiens chez des personnes se déclarant EHS et chez des témoins ;
- d'étudier les troubles associés aux perturbations du sommeil chez des personnes se déclarant EHS, comme la somnolence diurne, les troubles de la mémoire, de l'attention, de la concentration, de l'humeur et la modification de l'activité physique comparés avec ceux d'une population témoin ;
- que des études de provocation utilisant la polysomnographie soient réalisées, afin d'analyser de manière objective la qualité du sommeil lors d'expositions aux champs électromagnétiques chez des personnes se déclarant EHS.

Migraines et céphalées

Considérant que :

- les maux de tête sont un des symptômes les plus fréquemment rapportés par les personnes se déclarant EHS, mais que, jusqu'à présent, les recherches sur ce thème ont rarement été conduites en utilisant la classification internationale des céphalées ;
- les rares études ayant fait la distinction entre migraines et autres céphalées ont mis en évidence une fréquence non négligeable de crises ou d'antécédents migraineux chez les personnes se déclarant EHS, sans qu'il soit possible de dire si cette fréquence est plus élevée que dans la population générale ;
- l'expérience d'un médecin (cf. § 7.5.3.2) concernant l'utilisation de médicaments antimigraineux chez des personnes se déclarant EHS soulève des hypothèses intéressantes, dont la vérification pourrait déboucher sur un traitement efficace par des médicaments antimigraineux de personnes se déclarant EHS ;

le CES recommande :

- d'étudier les différents types de céphalées présentées par les personnes se déclarant EHS sur la base de la classification internationale, pour préciser les relations entre migraine et EHS. Il s'agit de définir si les maux de tête de ces personnes sont, en tout ou partie, des migraines, et si ces personnes ont plus de migraines que les personnes non-EHS ;
- en fonction des résultats des recherches précédentes, de réaliser des essais cliniques, afin d'étudier l'efficacité des traitements antimigraineux chez des personnes se déclarant EHS.

Hypersensibilité comme trait de caractère

Considérant que :

- l'hypersensibilité (cf. § 3.8.4) a été décrite comme un trait de caractère et de comportement qui commence à être documenté, à la fois d'un point de vue psychologique et neurobiologique ;
- l'étude du profil psychologique n'a utilisé jusqu'à présent chez les personnes se déclarant EHS que des tests n'explorant qu'un petit nombre de composantes (anxiété, dépression, somatisation) ;

le CES recommande d'étudier :

- les relations qui pourraient exister entre l'hypersensibilité comme trait de caractère et l'EHS, dans un but exploratoire, afin d'évaluer l'intérêt de poursuivre les investigations avec des marqueurs d'imagerie fonctionnelle cérébrale ;
- le profil psychologique des personnes se déclarant EHS avec des tests¹⁶ qui en explorent plus largement les diverses composantes.

EHS et syndromes ou troubles associés

Considérant :

- qu'il existe de nombreuses associations entre l'EHS et / ou plusieurs syndromes ou troubles (le plus souvent syndrome d'intolérance aux odeurs chimiques -SIOC-, fibromyalgie, acouphènes, etc.) ;
- que les troubles cutanés sont fréquents au cours de l'EHS et que des anomalies des petites fibres nerveuses de la peau ont été mises en évidence dans la fibromyalgie ;

le CES recommande :

- de comparer les aspects cliniques et éventuellement physiopathologiques de l'EHS d'une part, et du SIOC, de la fibromyalgie, des acouphènes idiopathiques d'autre part ;
- d'étudier les anomalies des petites fibres nerveuses de la peau lors des comparaisons entre EHS et fibromyalgie.

Autres propositions de recherche

Considérant que :

- les différentes tentatives pour mettre au point un questionnaire standardisé et spécifique de l'EHS utilisable en recherche n'ont pas abouti jusqu'à présent ;
- les très rares études de suivi sur le long-terme des personnes se déclarant EHS ne dépassent pas un an ;
- quelques études, ainsi que les auditions et les témoignages mettent l'accent sur l'errance médicale des personnes se déclarant EHS ;
- l'isolement (social, professionnel, familial) des personnes se déclarant EHS est systématiquement souligné ;
- la prise en charge et les représentations des personnes se déclarant EHS peuvent varier d'un pays à l'autre ;

le CES recommande :

- de développer et valider un questionnaire standardisé et spécifique de l'EHS, comme il en existe pour la plupart des syndromes (SIOC et fibromyalgie par exemple) ;

¹⁶ comme le *Minnesota Multiphasic Personality Inventory* (MMPI).

- de réaliser des études prospectives pour le suivi à long-terme de personnes se déclarant EHS ;
- d'étudier la complexité de la relation soignant-soigné pour les personnes se déclarant EHS ;
- de rechercher les différents facteurs qui contribuent à l'isolement psycho-social de ces personnes ;
- de mener des études comparatives sur la problématique de l'EHS (sur le vécu, les représentations des EHS, la prise en charge, etc.) dans plusieurs pays.

Évaluation des moyens empiriques actuellement utilisés pour établir un « diagnostic » d'EHS ou pour le « traitement » des personnes se déclarant EHS

Considérant :

- qu'il n'existe pas de critères de diagnostic de l'EHS validés à ce jour ;
- que certains auteurs ou praticiens ont néanmoins proposé des méthodes empiriques de « diagnostic » et / ou de « traitement » des personnes se déclarant EHS ;
- qu'il y a très peu d'études sur l'efficacité de celles-ci ;

le CES recommande d'évaluer l'efficacité des méthodes empiriques de « diagnostic » et / ou de « traitement » utilisées, en particulier :

- la balance ortho/para-sympathique (dynamique du système nerveux autonome), notamment la variabilité de la fréquence cardiaque ;
- les méthodes tridimensionnelles de référence¹⁷, la circulation sanguine et le métabolisme énergétique du cerveau chez les personnes se déclarant EHS, afin de vérifier l'hypothèse d'une ischémie cérébrale en rapport avec l'EHS ;
- les questionnaires sur l'EHS ;
- les différents traitements de l'EHS proposés de manière empirique, pour lesquels doivent être réalisés des essais cliniques.

Enfin, d'une manière générale, le CES souligne l'importance de renforcer les interactions entre scientifiques et associations de personnes se déclarant EHS.

Recommandations à destination des acteurs sanitaires et sociaux

En attendant une meilleure compréhension de l'EHS, et notamment des composantes physiologiques, psychiques et / ou biologiques pouvant expliquer les symptômes décrits, il est évident que de nombreuses personnes se déclarant EHS présentent un état de souffrance (physique et / ou psychique) plus ou moins important. Ceci nécessite et justifie une prise en charge adaptée par le système de soins. Une telle prise en charge est par ailleurs une condition nécessaire à la réalisation de travaux de recherches de qualité.

Pour améliorer la prise en charge des personnes se déclarant EHS, il est avant tout indispensable d'établir et de préserver un climat de confiance entre les personnes se déclarant EHS d'une part et les acteurs sanitaires et sociaux d'autre part. Pour cela, le CES recommande à l'autorité sanitaire, en priorité, de :

¹⁷ TEP (Tomographie par Émission de Positrons) scan par exemple.

- développer la formation des médecins sur la problématique des effets des radiofréquences sur la santé et mettre à leur disposition des informations leur permettant de répondre aux attentes des personnes se déclarant EHS ;
- demander à la Société française de médecine du travail d'étudier la faisabilité d'un guide de bonnes pratiques de prise en charge des personnes se déclarant EHS en milieu professionnel¹⁸ ;
- demander à la Haute autorité de santé (HAS) d'examiner, à l'instar des recommandations qu'elle a formulées au sujet de la fibromyalgie¹⁹, la pertinence de formuler des recommandations de prise en charge adaptées aux personnes se déclarant EHS ;
- favoriser le rapprochement et la coordination des acteurs impliqués dans la prise en charge des personnes se déclarant EHS (médecins, centres de consultation de pathologies professionnelles et environnementales -CCPP-, Maisons départementales des personnes handicapées -MDPH-, etc.).

Date de validation de la synthèse par le comité d'experts spécialisé : 15 décembre 2017.

¹⁸ Ce guide pourrait s'appuyer sur les données validées de la science et sur une enquête auprès des médecins de travail prenant en charge ces personnes. Il pourrait définir les modalités d'utilisation des mesures de champs électromagnétiques en milieu professionnel quand une source de champs électromagnétiques est mise en cause par une personne se déclarant EHS et, en collaboration avec les structures hospitalières de pathologie professionnelle, les modalités de recours à ces structures.

¹⁹ cf. le « rapport d'orientation sur le syndrome fibromyalgique de l'adulte » de juillet 2010 et le guide « Fibromyalgie de l'adulte : favoriser une prise en charge précoce et graduée » de juin 2011.

Sigles et abréviations

4-DSQ : *Four-Dimensional Symptom Questionnaire*

5-HIAA : Acide 5-hydroxyindolacétique

ADN : Acide désoxyribonucléique

AFP : Appareil à faible portée

Afrepa : Association française des équipes pluridisciplinaires en acouphénologie

Afsset : Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail

ALARA: *As Low As Reasonably Achievable* - aussi bas que raisonnablement possible

Anfr : Agence nationale des fréquences

Anses : Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail

Arcep : Autorité de régulation des communications électroniques et des postes

ARNm : Acide ribonucléique messager

ARPANSA: *Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency* - Agence australienne de protection contre les radiations et de sécurité nucléaire

ARS : Agence régionale de santé

BDI: *Beck depression inventory* - inventaire de dépression de Beck

BF : Basses fréquences

BfS: *Bundesamt für Strahlenschutz* - Office fédéral allemand de protection contre les radiations

BOLD: *Blood Oxygen Level Dependent* - dépendant du niveau d'oxygène sanguin

Carsat : Caisse d'assurance retraite et de la santé au travail

CCPP : Centre de consultation de pathologie professionnelle et environnementale

CDMA: *Code Division Multiple Access* - accès multiple par répartition en code

CEA : Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives

CEM : Compatibilité électromagnétique

CES : Comité d'experts spécialisé

CESF : Collectif des Électrosensibles de France

CHU : Centre Hospitalier Universitaire

CIDI-SF: *Composite International Diagnostic Interview (short form)* - entretien diagnostique structuré international (version courte)

CIM : Classification statistique internationale des maladies et des problèmes de santé connexes (cf. ICD)

Circ : Centre international de recherche sur le cancer

CNRS : Centre national de la recherche scientifique

Cofrac : Comité français d'accréditation

CPL : Courant porteur en ligne

Cram : Caisse Régionale d'Assurance Maladie

CRI: *Coping Resources Inventory* – inventaire des ressources adaptatives

Criirad : Commission de recherche et d'information indépendantes sur la radioactivité

Criirem : Centre de recherche et d'information indépendant sur les rayonnements électromagnétiques non ionisants.

CRT: *Two-Choice Reaction Time Task* - tests de temps de réaction à deux choix

CSS: *Chemical Sensitivity Scale* - échelle de sensibilité aux odeurs chimiques

CSTB : Centre scientifique et technique du bâtiment

CW: *Continuous wave* - onde continue

DAS : Débit d'absorption spécifique

DCS : *Digital Cellular System* – système cellulaire numérique

DECT: *Digital Enhanced Cordless Telecommunications* – téléphone sans-fil numérique amélioré

DGS : Direction générale de la santé

DS : déviation standard

DSM: *Diagnostic and Statistical Manual of mental disorders* - Manuel diagnostique et statistique des troubles mentaux

DSST: *Digital Symbol Substitution Test* - test de substitution de code

EBF : Extrêmement basses fréquences

EBM: *Evidence based medicine* - médecine fondée sur des niveaux de preuve (ou médecine factuelle)

ECG : Électrocardiogramme

EEG : Électroencéphalogramme

EFT: *Emotional Freedom Technique* - Technique de liberté émotionnelle

EHESP : École des hautes études en santé publique

EHIS: *European Health Interview Survey* - enquête européenne par entretien sur la santé

EHS: *Electromagnetic hypersensitivity* - hypersensibilité aux champs électromagnétiques

EM : Électromagnétique

EMDR: *Eye Movement Desensitization and Reprocessing*

EMG : Électromyographie

EOG : Électro-oculographie

ERG : Électrorétinogramme

ESQ: *Eysenck Personality Questionnaire* - test de personnalité d'Eysenck

ESS: *Epworth Sleepiness Scale* (échelle de somnolence d'Epworth)

EVA-G : Échelle visuelle analogique de gêne

EVA-I : Échelle visuelle analogique d'intensité

FAD : Flavine adénine dinucléotide

FDMA: *Frequency Division multiple Access* - accès multiple par division de fréquence

FFT: *Fast Fourier Transform* - transformée de Fourier rapide

FM: *Frequency modulation* - modulation de Fréquence

GHQ: *General Health Questionnaire*

GHz : gigaHertz

GPRS: *Global Packet Radio Services* - services de radio global par paquet

GPS: *Global Positioning System* - système global de positionnement

GSM: *Global System for Mobile communications* – système global de communications mobiles

GT : Groupe de travail

HAD: *Hospital Anxiety and Depression scale* - échelle d'anxiété et de dépression

HIT: *Headache Impact Test* - échelle d'évaluation d'impact de la migraine

HPA : Hypothalamo-hypophysio-surrénalien

HRV: *Heart Rate Variability* - variabilité de la fréquence cardiaque

ICD: *International statistical Classification of Diseases and related health problems* (cf. CIM)

ICHD: *International Classification of Headache Disorders*

Icnirp : *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection* – Commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants

Idate : Institut de l'audiovisuel et des télécommunications en Europe

IDCL-P: *International Diagnostic Checklist for Personality disorder*

IEI-CEM : Intolérance environnementale idiopathique attribuée aux champs électromagnétiques

IEI-EMF: *Idiopathic environmental intolerance attributed to electromagnetic fields*

IFER : Imposition forfaitaire sur les entreprises de réseaux

IgG : Immunoglobulines de type G

IHS : *International Headache Society* - Société internationale des céphalées

IMC : Indice de masse corporelle

INA : Institut national de l'audiovisuel

INRS : Institut national de recherche et de sécurité

INSV : Institut national du sommeil et de la vigilance

IRM : Imagerie par résonance magnétique

IRM-DCE: *Dynamic Contrast-Enhanced - Magnetic resonance imaging*

IRMf : Imagerie par résonance magnétique fonctionnelle

kHz : kiloHertz

KSD: *Karolinska sleep diary*

KSP: *Karolinska scales of personality*

KSS: *Karolinska sleepiness scale*

LCT: *Letter Cancellation Task*

LOT-R: *Life Orientation Test-Revisited*

LTE: *Long Term Evolution* (évolution à long terme - évolution des normes UMTS)

MA: *Mental Arithmetic*

MAC : Médecines alternatives et complémentaires

MAO : Monoamines oxydases

MCS: *Multiple chemical sensitivities* (hypersensibilité chimique multiple) (cf. SIOC)

MCT : Mémoire à court terme

MCU : Maître de conférences des universités

MDPH : Maison départementale des personnes handicapées

MHW: *Modern Health Worries*

MIBG : métaiodobenzylguanidine

MINI: *Mini-International Neuropsychiatric Interview*

MMPI: *Minnesota Multiphasic Personality Inventory*

MNI: *Montreal Neurological Institute*

MPRS: *Mobile Phone Related Symptoms*

NEOFFI: *NEO-Five Factors Inventory*

NGO: *Non-governmental organization* (cf. ONG)

NHIS: *National Center for Health Interview survey*

NIRS: *Near-infrared spectrophotometry*

NN50: Number of pairs of successive NNs that differ by more than 50 ms

NSS: Noise Sensitivity Scale

NTT : Nitrotyrosine

OMS : Organisation mondiale de la santé

ONG : Organisation non gouvernementale

OPD: Operationalized Psychodynamic Diagnostic - diagnostic psychodynamique opérationnalisé

OR: odds ratios - rapport des cotes

ORL : Oto-rhino-laryngologie

OSPAN: Operation Span task - test de la mémoire de travail

PCRT: Precued choice reaction time task

PE : Potentiel évoqué

PH : Praticien-hospitalier

PHQ-15: Patient Health Questionnaire Somatic Symptom Severity Scale

PHRC : Programme hospitalier de recherche clinique

PIRE : puissance isotrope rayonnée équivalente

pNN50: proportion of NN50 divided by total number of NNs (nombre d'intervalles RR successifs et supérieurs à 50ms divisé par le nombre d'intervalles total)

PNR : Programme national de recherche

PNSE : Plan national santé-environnement

POEM : Prévention Ondes Électromagnétiques Drôme (association)

POMS: Profile of Mood States

PSQI : Pittsburgh Sleep Quality Index - index de qualité du sommeil de Pittsburgh

QCD: Questionnaire on Current Disposition

QEESI: Quick Environmental Exposure and Sensitivity Inventory

QOF: Questionnaire to include other factors

RF : Radiofréquences

RMSSD: Root mean square of successive differences

ROS : Reactive Oxygen Species

RSC : Réponse sympathique cutanée

SASB: Structural Analysis of Social Behaviour

SD : Standard deviation - déviation standard

SDNN : Standard deviation of NN intervals - déviation standard de la moyenne des intervalles RR du signal cardiaque

SHS: Swiss Health Survey

SIG : Systèmes d'informations géographiques

SIOC : Syndrome d'intolérance aux odeurs chimiques (cf. MCS)

SMT : Stimulation magnétique transcrânienne

SNA : Système nerveux autonome

SNC : Système nerveux central

SNP: Single nucleotide polymorphism

SOMS: Screening Instrument for Somatoform Symptoms - interview standardisé de détection des troubles somatoformes

SRT: Simple Reaction Time Task

SSAS: Somatosensory Amplification Scale

STAI: State-Trait Anxiety Inventory

TCC : Thérapie comportementale et cognitive

TCI : Tribunal du contentieux de l'incapacité

TCI: Temperament and Character Inventory

TDI : Tensor imaging diffusion

TDMA: Time Division Multiple Access

TEP : Tomographie par émission de positons

TETRA : Terrestrial Trunked Radio - système radio numérique

THI : Tinnitus handicap inventory - questionnaire du handicap acouphénique

TTR : Transthyréine

UCPPE : Unité de consultation des pathologies professionnelles et environnementales

UIT : Union internationale des télécommunications

UMTS: Universal Mobile Telecommunication System - système universel de télécommunications mobiles (3G).

UWB : Ultra-Wide Band

VDT: Visual display terminal - terminal à écran de visualisation

VDU: Visual display unit - écran de visualisation

VERSUSAT: Visual Selective Attention Task - épreuve de l'attention visuelle selective

WCDMA: Wideband Code Division Multiple Access - multiplexage par code large bande

WHO: World Health Organization (cf. OMS)

Wi-Fi: Wireless Fidelity

Liste des tableaux

Tableau 1 : liste des personnes auditionnées et sollicitées par écrit	6
Tableau 2 : mots-clés utilisés pour la recherche bibliographique	43
Tableau 3 : symptômes ou pathologies rapportés dans les lettres	57
Tableau 4 : sources de champs électromagnétiques (en %) considérées comme causes de symptômes fonctionnels par les personnes se déclarant EHS	61
Tableau 5 : estimations des pourcentages de personnes se déclarant hypersensibles aux champs électromagnétiques dans différents pays	71
Tableau 6 : intention de participer à des études cliniques	101
Tableau 7 : principaux symptômes rapportés par des personnes se déclarant EHS au Japon (n = 75)	131
Tableau 8 : pourcentages de participants rapportant différents symptômes (survenant au moins une fois par semaine) parmi des personnes ayant des symptômes qu'elles attribuent au téléphone mobile (groupe MP), se déclarant EHS (groupe EHS), issues de la population générale (groupe PB) et des témoins (groupe C)	138
Tableau 9 : nombre moyen et intensité des symptômes ressentis par les différents groupes (sensibles aux champs électromagnétiques recrutés via des associations, recrutés en population générale et sensibles ou non aux champs électromagnétiques)	141
Tableau 10 : fréquence (en %) des symptômes rapportés par les personnes se déclarant EHS	147
Tableau 11 : liste des symptômes utilisés dans les principaux questionnaires servant à décrire l'EHS	311
Tableau 12 : interactions des champs électromagnétiques avec le corps humain	327
Tableau 13 : classification des principales maladies du système nerveux autonome	337

Liste des figures

Figure 1 : nombre annuel de personnes ayant consulté un CCPP depuis 2009 et ayant été codées sous la terminologie « IEI-CEM » dans la base du RNV3P	70
Figure 2 : pourcentage (%) de personnes se déclarant EHS ou assimilés dans les études référencées dans le Tableau 5	72
Figure 3 : hypothèse d'un éventuel cercle vicieux de l'EHS	75
Figure 4 : pistes de recherches jugées prioritaires par des personnes se déclarant EHS et par ordre décroissant d'occurrence	102
Figure 5 : magnétosome	112
Figure 6 : la magnétite	113
Figure 7 : A) protéine cryptochrome avec ses trois résidus tryptophane conservés (en jaune) et son co-facteur, le FAD (en rouge). B) version simplifiée des réactions radicalaires impliquées dans l'activation/désactivation du cryptochrome. C) modélisation de la perception visuelle du champ magnétique chez les oiseaux migrateurs	114
Figure 8 : exemple de paquets ou « bursts » dans un signal électromagnétique	117
Figure 9 : exemple de signal rayonné par un téléphone DECT	119
Figure 10 : distribution des seuils de perception au courant électrique chez un échantillon de personnes .	123
Figure 11 : nombre de réponses des participants du groupe 1 aux questions 13 et 16 par niveau d'usage du téléphone mobile (question 8)	130
Figure 12 : nombre de réponses des participants du groupe 2 aux questions 13 et 16 par niveau d'utilisation d'un ordinateur au travail (question 11)	130
Figure 13 : fréquence des différents problèmes de santé dans les trois groupes étudiés entre 2008 et 2009	137

Figure 14 : pourcentages de symptômes auto-déclarés parmi les participants de la population générale (NS), les personnes se déclarant EHS (GP) recrutées en population générale, et celles recrutées via des associations (ONG).....	142
Figure 15 : comparaison entre les capacités à différencier le signal réel ou factice de personnes se déclarant EHS et non-EHS	163
Figure 16 : organisation anatomique du système nerveux autonome	209
Figure 17 : dispositions prises pour fournir une réponse aux personnes se déclarant EHS	260
Figure 18 : coefficient d'atténuation en champ diffus – exemple de résultats de mesures.....	267
Figure 19 : coefficient d'atténuation en champ diffus – résultats des essais : influence de la mise à la terre	268
Figure 20 : un bâtiment conçu pour minimiser les pollutions dans les pièces à vivre	271
Figure 21 : absorption sélective du corps humain (ou effet de peau) selon la fréquence.....	326
Figure 22 : restrictions de base pour la population générale et les travailleurs en fonction de la fréquence	332
Figure 23 : origine des contributions à la consultation publique pour l'ensemble des contributeurs – et pour les ONG	355
Figure 24 : répartition des commentaires en fonction du chapitre du rapport.....	356

Liste des encadrés

<i>Encadré 1 : thèmes pouvant être abordés dans les lettres du corpus</i>	<i>52</i>
<i>Encadré 2 : une échelle de mesure de l'hypersensibilité</i>	<i>85</i>
<i>Encadré 3 : la neuroépigénétique : cognition, mémoire et plasticité cérébrale - Effets du milieu enrichi</i>	<i>206</i>
<i>Encadré 4 : le système immunitaire</i>	<i>207</i>
<i>Encadré 5 : critères de diagnostic de la migraine définis par l'IHS</i>	<i>221</i>
<i>Encadré 6 : techniques de mesure du débit sanguin et / ou du métabolisme énergétique cérébral</i>	<i>226</i>
<i>Encadré 7 : l'insomnie</i>	<i>228</i>
<i>Encadré 8 : les tests d'évaluation du sommeil et des rythmes circadiens chez l'être humain</i>	<i>230</i>
<i>Encadré 9 : définition des troubles du sommeil liés à un facteur de l'environnement</i>	<i>231</i>
<i>Encadré 10 : les thérapies comportementales et cognitives (TCC)</i>	<i>254</i>
<i>Encadré 11 : l'EMDR (Eye Movement Desensitization and Reprocessing) et l'EFT (Emotionnal Freedom Technique)</i>	<i>259</i>
<i>Encadré 12 : restrictions de base et niveaux de référence selon l'Icnirp (Icnirp Guidelines 1998 et 2010) .</i>	<i>330</i>

Liste des hypothèses avancées pour expliquer tout ou partie de la survenue de l'EHS

Le groupe de travail de l'Anses a analysé les hypothèses ci-après à la lumière des données scientifiques disponibles au moment de la rédaction du rapport. Certaines d'entre elles, soulevées par des parties prenantes (médecins, associations) lors des auditions, ont été prises en considération, bien qu'étant très peu ou pas documentées dans la littérature scientifique.

En aucun cas, la mention de ces hypothèses dans la liste ci-dessous ne signifie qu'elles sont soutenues par le groupe de travail de l'Anses.

Hypothèse 1 pour expliquer tout ou partie de la survenue de l'EHS : l'hypersensibilité comme trait de personnalité ?	87

Hypothèse 2 pour expliquer tout ou partie de la survenue de l'EHS : existe-t-il un système magnéto-sensible chez l'être humain ?	114
Hypothèse 3 pour expliquer tout ou partie de la survenue de l'EHS : l'existence d'une sensibilité particulière aux champs électromagnétiques basses fréquences ? ou d'un seuil faible de perception cutanée du courant électrique ?	121
Hypothèse 4 pour expliquer tout ou partie de la survenue de l'EHS : une différence biologique ou des modifications physico-chimiques ?	199
Hypothèse 5 pour expliquer tout ou partie de la survenue de l'EHS : un stress oxydant chronique ?	200
Hypothèse 6 pour expliquer tout ou partie de la survenue de l'EHS : une intoxication chimique (métaux lourds, etc.) ?	202
Hypothèse 7 pour expliquer tout ou partie de la survenue de l'EHS : un génotype ou phénotype prédisposant ?	204
Hypothèse 8 pour expliquer tout ou partie de la survenue de l'EHS : des phénomènes auto-immuns et un état pro-inflammatoire chronique ?	207
Hypothèse 9 pour expliquer tout ou partie de la survenue de l'EHS : un dysfonctionnement du système nerveux autonome ?	208
Hypothèse 10 pour expliquer tout ou partie de la survenue de l'EHS : une altération de l'intégrité de la barrière hématoencéphalique (BHE) ?	214
Hypothèse 11 pour expliquer tout ou partie de la survenue de l'EHS : des perturbations dans la production de neurotransmetteurs ?	218
Hypothèse 12 pour expliquer tout ou partie de la survenue de l'EHS : les personnes se déclarant EHS, ou certaines d'entre elles, auraient-elles un terrain migraineux ?	220
Hypothèse 13 pour expliquer tout ou partie de la survenue de l'EHS : un dysfonctionnement de l'activité électrique cérébrale ?	223
Hypothèse 14 pour expliquer tout ou partie de la survenue de l'EHS : un dysfonctionnement du métabolisme ou du débit sanguin cérébral ?	225
Hypothèse 15 pour expliquer tout ou partie de la survenue de l'EHS : une dysrégulation du cycle veille-sommeil (ou de l'horloge circadienne) ?	227
Hypothèse 16 pour expliquer tout ou partie de la survenue et / ou de l'évolution de l'EHS : une origine psychosomatique ?	234
Hypothèse 17 pour expliquer tout ou partie de la survenue et / ou de l'évolution de l'EHS : un effet <i>nocebo</i> ?	241
Hypothèse 18 pour expliquer tout ou partie de la survenue et / ou de l'évolution de l'EHS : l'EHS serait due à un stimulus environnemental complexe (produits chimiques, pesticides, sources multiples de champs électromagnétiques, bruit, etc.) potentialisé par les champs électromagnétiques, ou « effet cocktail ».	249

1 Contexte, objet et modalités de traitement de la saisine

Les radiofréquences²⁰ constituent un objet de préoccupations sanitaires, environnementales et sociétales important depuis plusieurs années en France et à l'étranger, ce qui a conduit l'Agence, en réponse aux demandes de ses ministères de tutelle, à publier des avis et rapports d'expertise collective en 2003, 2005, 2009, 2013 et, le dernier en date concernant les radiofréquences et la santé des enfants, en 2016.

1.1 Contexte

Dans un contexte de controverse, aussi bien dans les milieux scientifiques que dans le débat public, l'Anses a décidé d'accorder à la question de l'hypersensibilité aux champs électromagnétiques (EHS), ou intolérance environnementale idiopathique²¹ attribuée aux champs électromagnétiques (IEI-CEM), toute l'attention qu'elle mérite en lui consacrant une expertise spécifique et approfondie. Ce choix atteste de l'importance que l'Anses accorde à ce sujet, et en particulier aux personnes se déclarant EHS, que les symptômes soient désignés sous le terme d'hypersensibilité électromagnétique, d'électro(hyper)sensibilité, d'intolérance environnementale idiopathique attribuée aux champs électromagnétiques ou de sensibilité aux dispositifs et / ou appareils de communication sans fil. Pour mémoire, dans le rapport d'expertise sur les effets des radiofréquences sur la santé publié par l'Afsset en 2009, la question de l'EHS avait fait l'objet d'un chapitre particulier (pp 278-304). Ce sujet a été évoqué plus récemment dans la mise à jour de l'expertise sur les effets sanitaires des radiofréquences publiée par l'Anses en 2013²² (Anses 2013). Cependant, le groupe d'experts avait alors jugé que la complexité de la question de l'hypersensibilité aux champs électromagnétiques ou intolérance environnementale idiopathique attribuée aux champs électromagnétiques²³ nécessitait de lui consacrer une expertise collective spécifique, objet du présent rapport.

Avec le développement et le déploiement depuis une vingtaine d'années des nouvelles technologies de communication et d'interconnexions entre objets, un nombre croissant de systèmes et d'applications utilisent les ondes électromagnétiques dans le domaine des radiofréquences (de 8,3 kHz à 300 GHz), et l'usage de ces technologies (téléphones mobiles, tablettes, objets communicants, etc.) s'est largement répandu dans la société. En France, le taux de pénétration²⁴ du téléphone mobile a atteint 109,5 % en décembre 2016²⁵. En parallèle, l'État se

²⁰ Radiofréquence (RF) : rayonnement électromagnétique utilisé en télécommunications, dont la longueur d'onde dans le spectre électromagnétique est supérieure à celle du rayonnement infrarouge.

²¹ Idiopathique : se dit d'une maladie ou d'un symptôme dont la cause est inconnue (définition du dictionnaire Larousse).

²² Le rapport Anses (2013) sur les radiofréquences n'avait pas abordé la question de l'EHS ; seules les études concernant des témoins volontaires ne présentant pas de symptômes particuliers en lien avec les radiofréquences avaient été considérées.

²³ Les termes « hypersensibilité aux champs électromagnétiques (EHS) » et « intolérance environnementale idiopathique attribuée aux champs électromagnétiques (IEI-CEM) » désignent les mêmes troubles et les mêmes personnes. Par commodité, le terme le plus populaire (EHS) sera davantage utilisé dans la suite du rapport.

²⁴ calculé comme le ratio de l'ensemble des cartes SIM en service sur la population.

²⁵ Source : Arcep, Observatoires / Services mobiles - <https://www.arcep.fr/index.php?id=13486>.

donne pour ambition d'assurer une couverture réseau²⁶ totale du territoire français. L'Autorité de régulation des communications électroniques et des postes (Arcep) fixe les calendriers de déploiements des réseaux (2G, 3G et 4G) aux opérateurs et leur impose de réduire les zones non couvertes, dites « zones blanches ».

Pour répondre aux attentes et interrogations de la société liées au développement des systèmes de communication sans fil, une table ronde « radiofréquences, santé, environnement » a été organisée en 2009 par le Gouvernement. Dix orientations ont été retenues, parmi lesquelles ont été formulés les principes de « transparence de l'information et des financements, attention aux inquiétudes formulées, précaution et concertation entre les acteurs » (Bachelot-Narquin, Kosciusko-Morizet, and Jouanno 2009). En application du principe de transparence des financements, l'Imposition forfaitaire sur les entreprises de réseaux (Ifer) a été mise en place par la loi de finances 2011 ; prélevée chez les opérateurs, elle sert à financer la recherche sur les effets sanitaires potentiels des radiofréquences et les mesures de l'exposition réalisées à leur demande chez les citoyens.

Chaque année, un grand nombre de mesures est réalisé dans ce cadre selon le protocole défini par l'Agence nationale des fréquences (Anfr), afin de caractériser l'exposition environnementale de la population aux radiofréquences (cf. site internet www.cartoradio.fr où sont recensés les résultats des mesures envoyés par les laboratoires accrédités Cofrac à l'Anfr). Le dernier bilan de l'Anfr (2017) portant sur l'analyse près de 3 000 mesures réalisées en France en 2016, dans le cadre du dispositif national de surveillance de l'exposition du public aux ondes électromagnétiques, indiquait que le niveau de champ médian était de 0,38 V/m et que 90 % des niveaux mesurés à la sonde large bande²⁷ étaient inférieurs à 1,4 V/m²⁸ (ANFR 2017). Les valeurs limites d'exposition du public aux champs électromagnétiques, fixées par le décret n°2002-775 du 3 mai 2002, étaient respectées sur tous les sites ayant fait l'objet d'une mesure en 2016. La téléphonie mobile était la principale source d'exposition dans près de 60 % des cas mesurés. En milieu rural, cette tendance était toutefois moins marquée avec seulement 41 % des cas mesurés pour lesquels la téléphonie mobile était le principal contributeur de l'exposition. Par rapport aux résultats qui avaient été obtenus les deux années précédentes sur près de 3 000 mesures réalisées en 2014 et plus de 3 500 mesures réalisées en 2015, on peut noter que la typologie des mesures demandées et les niveaux d'exposition relevés sont globalement stables depuis 2014.

La loi du 9 février 2015 relative à la sobriété, à la transparence, à l'information et à la concertation en matière d'exposition aux ondes électromagnétiques, dite « loi Abeille », vise, entre autre, à modérer l'exposition du public aux ondes électromagnétiques. Le texte interdit notamment l'utilisation du Wi-Fi dans les locaux destinés à accueillir des enfants de moins de trois ans.

Malgré les dispositifs mis en place pour encadrer et surveiller les niveaux d'exposition aux champs électromagnétiques, un certain nombre de personnes se plaignent de troubles qu'elles attribuent à une exposition à ces champs. Il est donc légitime et nécessaire de chercher à comprendre leurs troubles.

²⁶ La couverture réseau s'entend comme la possibilité de passer un appel téléphonique et de le maintenir durant une minute, à l'extérieur des bâtiments et en usage piéton.

²⁷ C'est-à-dire avec un dispositif intégrant l'ensemble des contributions du spectre électromagnétique prévu par le protocole de mesure.

²⁸ À titre indicatif, les valeurs limites réglementaires pour l'exposition du public au champ électrique dans l'environnement sont comprises entre environ 36 et 61 V/m pour les fréquences utilisées par la téléphonie mobile.

1.2 Historique de la problématique et vocabulaire

Depuis le début des années 1980²⁹, la littérature scientifique rapporte de façon continue le cas de personnes se plaignant de troubles fonctionnels³⁰ divers qu'elles attribuent à une exposition à des champs électromagnétiques (EM) (Knave *et al.* 1985, Hillert *et al.* 1999). Ce « tableau » clinique a reçu plusieurs appellations successives, traduisant une évolution des concepts comme on en observe fréquemment dans l'histoire de la médecine, surtout dans les situations d'incertitude. Dans les années 1980, il s'agissait essentiellement de troubles cutanés, prédominants au niveau de la face, attribués à une exposition aux écrans cathodiques, terminaux d'ordinateurs ou écrans de télévision (*visual display terminal* (VDT) ou *visual display unit* (VDU) des anglo-saxons). Dans les années 1990, des symptômes plus variés ont été attribués, sous le terme d'électrosensibilité, à des expositions aux champs émis par les appareils électroménagers et par les installations électriques défectueuses, les plus fréquents de ces symptômes étant, d'après Seitz *et al.* (2005), les troubles du sommeil, la fatigue, les troubles de l'équilibre, les céphalées, les symptômes cutanés, les difficultés de concentration, les pertes de mémoire et la nervosité (Seitz *et al.*, 2005).

En 1997, à l'issue d'un programme de recherche financé par la Commission européenne, les experts ayant participé à ce programme ont été réunis pour faire la synthèse de leurs travaux et ont proposé de rassembler ces deux situations en une seule entité, dénommée hypersensibilité électromagnétique (*electromagnetic hypersensitivity*, EHS des anglo-saxons), reposant uniquement sur les déclarations des personnes en l'absence d'explication biomédicale des symptômes fonctionnels (Bergqvist and Vogel 1997). Selon la définition de la Commission européenne (1997), le terme d'hypersensibilité aux champs électromagnétiques (EHS) est utilisé pour « désigner un phénomène où les individus ressentent des effets nocifs lorsqu'ils utilisent ou se trouvent à proximité d'appareils rayonnant un champ électrique, magnétique ou électromagnétique. L'emploi du terme « EHS », en lui-même, ne présuppose pas et n'indique en rien une cause pouvant expliquer les effets nocifs observés ». En d'autres termes, il ne signifie pas qu'il existe un lien de causalité établi entre les champs électromagnétiques et les effets déclarés.

Les premières descriptions de troubles fonctionnels attribués aux ondes électromagnétiques radiofréquences de la téléphonie mobile datent de 1998, en ce qui concerne l'usage des combinés (Hocking 1998) et de 2002, en ce qui concerne la proximité des antennes relais (Santini *et al.*, 2002, 2003).

Dans les années suivantes, tous ces termes ont continué à être utilisés dans le titre des publications consacrées au problème de ces symptômes fonctionnels attribués aux champs électromagnétiques : les termes initiaux (*visual display terminals*, *electrohypersensitivity*) étant de moins en moins utilisés et ne persistant que jusqu'en 2004 pour le premier et jusqu'en 2008 pour le second, laissant la place aux termes plus récents (hypersensibilité électromagnétique ou équivalents, symptômes attribués à l'utilisation de téléphones mobiles ou à la proximité des antennes-relais).

²⁹ Certains situent les premières descriptions de l'EHS dans les années 1960 et les attribuent soit à un auteur français ((Miro 1960), dont le rapport interne à l'Armée de l'air n'est plus accessible sur internet), soit à des auteurs russes (Sadchikova, 1960 et Klimkova-Deutschova, 1973) cités dans plusieurs rapports institutionnels (Presman 1970, Zorach 1971, Raines 1981, Hech 1997) et dans un article (Genuis and Lipp 2012). Ces documents, qui décrivaient des symptômes observés chez des travailleurs exposés à des radars ou à des équipements électriques, ont eu une diffusion limitée et n'ont pas été cités dans les deux expertises collectives internationales qui ont donné une consistance au concept d'hypersensibilité électromagnétique (Bergqvist and Vogel 1997) ou d'intolérance environnementale idiopathique attribuée aux champs électromagnétiques (Mild *et al.* 2006). Les mêmes remarques d'absence d'audience et de citation dans les deux expertises collectives internationales peuvent être faites à propos de la description par Schliephake (Schliephake 1932) de l'apparition de symptômes neurasthéniques sous l'effet des ondes courtes, surtout pour des longueurs d'onde d'environ 4 à 5 mètres.

³⁰ Le terme de « trouble fonctionnel » regroupe l'ensemble des symptômes et affections sans support lésionnel ni dysfonctionnement d'organe identifiable, par opposition aux maladies organiques.

En 2004, un groupe d'experts de l'OMS a proposé le terme « intolérance environnementale idiopathique attribuée aux champs électromagnétiques (IEI-CEM) » (OMS 2006). Cette nouvelle terminologie, qui soulignait l'absence de preuve expérimentale en faveur d'une relation de causalité entre l'exposition aux champs électromagnétiques et les symptômes décrits par les personnes, n'a guère été suivie par les auteurs qui ont continué à travailler sur la question. Finalement, les deux expressions proposées (EHS et IEI-CEM), désignent un même état et doivent être considérées comme synonymes.

En 2015, le terme « électrosensibilité » a fait son apparition dans le dictionnaire Larousse, avec la définition suivante : « *ensemble des troubles physiques dus, selon la description des personnes atteintes, à une sensibilité excessive aux ondes et aux champs électromagnétiques ambiants* ».

1.3 Objet du rapport d'expertise

L'objet du présent rapport est de réaliser une expertise collective consacrée aux personnes se déclarant EHS (quelle que soit la manière dont on les désigne). Cette expertise collective a été confiée au groupe d'experts « radiofréquences et santé » de l'Anses. Comme toutes les expertises de l'Anses, elle est principalement basée sur la littérature scientifique. Compte tenu de la complexité du sujet, des limites de nombreux articles scientifiques, de l'absence d'études sur certaines questions, ainsi que des controverses qui résultent de ces difficultés, le groupe de travail a décidé de remonter également aux expériences de terrain. Il s'est ainsi intéressé, au travers d'auditions, aux témoignages de différentes parties prenantes (médecins hospitaliers et médecins généralistes, associations et collectifs de citoyens, élus, chercheurs, etc.) et en a auditionné plus d'une vingtaine.

Le groupe de travail a donc adopté une démarche originale d'expertise consistant, en plus de la revue et de l'analyse de la littérature, à examiner un certain nombre de questions et observations issues d'un grand nombre de témoignages, notamment :

- Comment définir l'EHS ? Quels sont les symptômes dont souffrent les personnes se déclarant EHS ? Quels sont les éléments caractéristiques de leur parcours ? Quels en sont les critères diagnostiques et quelles ont été les tentatives pour les préciser et / ou les valider ? Une meilleure caractérisation clinique des symptômes est-elle possible ? Le cas échéant, quels critères diagnostiques pourraient être proposés ? L'inclusion de l'intolérance environnementale idiopathique attribuée aux champs électromagnétiques (IEI-CEM) et de celle attribuée aux odeurs chimiques (IEI-MCS) définies par l'OMS dans le cadre des syndromes médicalement inexpliqués attribués à l'environnement est-elle justifiée (Chapitre 3) ?
- Comment la question de l'EHS est-elle traitée par les différentes parties prenantes (professionnels de santé, pouvoirs publics, associations et médias) (Chapitre 4) ?
- Quelles sont les interactions connues entre les champs électromagnétiques et l'être humain ? L'organisme humain dispose-t-il de détecteurs ou de récepteurs spécifiques aux champs électromagnétiques (Chapitre 5) ?
- Les données scientifiques disponibles permettent-elles de mettre en évidence le fait que les symptômes décrits sont spécifiques aux personnes se déclarant EHS ? L'exposition aux champs électromagnétiques provoque-t-elle les symptômes fonctionnels de l'EHS et / ou des modifications biologiques, physiologiques, cognitives et / ou psychosomatiques mesurables (études de provocation) ? Les données issues de la littérature scientifique permettent-elles d'établir un lien de causalité entre les symptômes ressentis et les expositions aux champs électromagnétiques (Chapitre 6) ?
- Quelles sont les hypothèses susceptibles d'expliquer l'origine des troubles ressentis par les personnes se déclarant EHS (Chapitre 7) ?
- Que peut-on dire des modes de prise en charge médicale de ces personnes et de leur efficacité ? Y a-t-il des traitements validés de l'EHS ? Que peut-on dire scientifiquement

des protections anti-ondes mises en œuvre par les personnes se déclarant EHS et de leur efficacité (Chapitre 0) ?

En auditionnant une vingtaine de partie-prenantes (cf. liste détaillée p 6), l'idée du groupe de travail était de chercher à comprendre l'EHS dans sa complexité, de la caractériser, afin de comprendre les mécanismes à l'origine des différents symptômes ressentis par les personnes se déclarant EHS. À cette fin, il est nécessaire, au-delà des témoignages qui fournissent un grand nombre de pistes de réflexion et proposent diverses hypothèses explicatives, d'analyser les données scientifiques (études cliniques et études épidémiologiques) et de les interpréter de manière objective, en essayant d'identifier leurs limites méthodologiques, afin de se prononcer sur la plausibilité des différentes hypothèses avancées pour expliquer l'origine des troubles.

De plus, ce rapport d'expertise propose également des pistes de recherches à développer (Chapitre 10), afin d'investiguer davantage ces différentes questions, notamment celles soulevées par les associations de malades et les médecins, car il est évident que tout n'a pas été abordé dans les études scientifiques disponibles et qu'il reste de nombreuses pistes à explorer.

1.4 Modalités de traitement de l'expertise

À la suite d'un appel public à candidatures d'experts lancé le 28 mai 2014, un groupe de travail intitulé « Radiofréquences et santé 2 » a été constitué. Les experts de ce groupe ont été recrutés pour leurs compétences scientifiques et techniques dans les domaines de la métrologie et l'exposimétrie des champs électromagnétiques, de l'épidémiologie, de la médecine, de la biologie, de la physiologie et des sciences humaines et sociales. Ces seize experts indépendants ont ainsi été nommés par l'Anses pour réaliser l'expertise sur l'hypersensibilité électromagnétique (EHS) ou intolérance environnementale idiopathique attribuée aux champs électromagnétiques et rédiger le présent rapport. La composition détaillée de ce groupe figure au début de ce rapport.

Afin d'instruire la présente expertise sur l'EHS, le groupe de travail s'est réuni, dans un premier temps, 18 fois en séances plénières (19 jours) entre juillet 2014 et juillet 2016. Lors de ces réunions, ou lors de séances supplémentaires, une vingtaine d'auditions de partie-prenantes (médecins, scientifiques, associations, etc.) ont également été réalisées (cf. liste des personnes auditionnées dans la présentation des intervenants en p. 3). En complément de ces auditions, des contributions écrites ont été sollicitées auprès de rapporteurs (cf. liste des rapporteurs dans la présentation des intervenants p. 3), et des informations complémentaires ont été sollicitées par courriers à différents acteurs du domaine.

À l'issue de cette première phase de l'expertise, l'Anses a publié un rapport pré-définitif le 27 juillet 2016, en appelant les personnes intéressées à commenter ces travaux, dans le cadre d'une consultation publique ouverte du 27 juillet au 15 octobre 2017.

Dans un second temps, le groupe de travail s'est à nouveau réuni 11 fois entre septembre 2016 et octobre 2017 pour analyser et prendre en compte les commentaires recueillis lors de la consultation publique, puis rédiger les conclusions de l'expertise et les recommandations associées.

Cette expertise relève du domaine de compétences du comité d'experts spécialisé (CES) « Évaluation des risques liés aux agents physiques, aux grands aménagements et aux nouvelles technologies ». Les travaux du groupe de travail ont été soumis régulièrement à ce CES pour discussion (tant sur les aspects méthodologiques que scientifiques). Le rapport produit par le groupe de travail tient compte des observations émises par les membres du CES ayant pris part aux délibérations. Ces travaux sont ainsi issus d'un collectif d'experts aux compétences pluridisciplinaires et complémentaires.

Par ailleurs, des points d'information et d'échange ont également été organisés avec le Comité de dialogue « Radiofréquences et santé »³¹, afin de présenter la liste des références bibliographiques

³¹ Voir note de bas de page n°1, p8.

et le plan du rapport. Les propositions (références bibliographiques et personnes à auditionner notamment) et compléments d'information du Comité de dialogue ont été pris en compte par le groupe de travail.

Les travaux d'expertise du groupe de travail ont été adoptés par le CES le 15 décembre 2017.

L'expertise a été réalisée dans le respect de la norme NF X 50-110 « Qualité en expertise – prescriptions générales de compétence pour une expertise (Mai 2003) », avec pour objectif le respect des points suivants : compétence, indépendance, transparence, traçabilité.

1.5 Prévention des risques de conflits d'intérêts

L'Anses analyse les déclarations publiques d'intérêts (DPI) des experts préalablement à leur nomination et tout au long des travaux d'expertise, afin d'éviter les risques de conflits d'intérêts au regard des points traités dans le cadre de l'expertise.

Un expert du CES « Agents Physiques, nouvelles technologies et grands aménagements » qui présentait un lien d'intérêt susceptible de mener à un conflit n'a pas été invité à participer aux réunions au cours desquelles le rapport a été examiné.

Un expert du CES « Agents Physiques, nouvelles technologies et grands aménagements », au cours de son mandat, a informé l'Anses d'un nouveau lien d'intérêt qui pouvait mener à conflit. Dès que ce lien a été identifié par l'Agence, l'expert n'a pas participé aux réunions de CES lors desquelles ces travaux d'expertise ont été abordés.

Les déclarations d'intérêts des experts sont rendues publiques *via* le site internet de l'Agence : <http://www.anses.fr>.

2 Méthode

Ce chapitre s'intéresse à la méthodologie mise en œuvre dans le cadre de la présente expertise sur l'EHS pour : la veille bibliographique, l'analyse des articles scientifiques, la recherche de témoignages de personnes se déclarant EHS et d'autres points de vue sur le sujet, ainsi que pour la mise en consultation publique du rapport.

2.1 Recensement des articles scientifiques

L'équipe de coordination et les experts du groupe de travail « radiofréquences et santé 2 » ont réalisé une recherche bibliographique la plus exhaustive possible de la littérature scientifique internationale sur le thème de l'EHS à travers, notamment, la recherche de données cliniques et épidémiologiques.

Actuellement, il n'existe pas de modèle animal applicable à l'être humain pour l'EHS. Néanmoins, un certain nombre d'hypothèses, chez l'être humain, font appel à l'expérimentation animale qui permet une approche plus « mécanistique ». Le groupe d'experts n'a donc pas complètement négligé l'approche animale pour, notamment, l'étude de certains mécanismes (magnétoperception, stress oxydant ou perméabilité de la barrière hémato-encéphalique, par exemple).

2.1.1 Période de référence

La mise à jour de l'expertise a été réalisée pour la période qui s'étend du 1^{er} avril 2009 (fin de la période d'analyse de la bibliographie prise en compte pour le dernier rapport de l'Agence s'intéressant à la question de l'EHS, publié en octobre 2009) à juillet 2016 (date de fin de la revue bibliographique correspondant au moment de la mise en consultation publique du rapport).

Par souci de cohérence ou en raison de l'intérêt porté à certains sujets, des références plus anciennes ou plus récentes ont ponctuellement pu être ajoutées au rapport.

2.1.2 Moteurs de recherche

Des moteurs de recherche et bases de données recensant spécifiquement les études dans le domaine de la santé ont été consultés :

- PubMed : <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed>
- Scopus : <http://www.scopus.com/home.url>

2.1.3 Typologie des documents expertisés

Les documents pris en compte dans l'expertise sont de natures diverses :

- articles scientifiques publiés dans des journaux à comité de lecture indépendant, sans préjuger de leur facteur d'impact ;
- rapports d'expertise d'organismes européens et internationaux (Commission européenne, etc.) ;
- les verbatim des auditions ;
- les rapports de recherches financées par l'Anses (contrats de recherche et développement, projets issus de l'appel à projets de recherche de l'Anses).

Seuls les articles originaux publiés dans des journaux à Comité de lecture indépendant en langue française ou anglaise ont été systématiquement analysés par le groupe de travail. Les actes ou comptes-rendus de conférences et articles publiés dans d'autres langues n'ont pas été pris en compte.

Le groupe de travail a également pris connaissance des principales revues³² et méta-analyses³³ relatives à l'EHS.

En complément de ces documents, des contributions écrites ont été sollicitées auprès de médecins et sociologues, sur des aspects précis concernant l'expertise. De plus, des contrats de recherche et développement (CRD) ont été commandés auprès du Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB) et de l'Unité mixte de recherche épidémiologique et de surveillance transport travail environnement (UMRESTTE, Ifsttar et Université Claude Bernard Lyon 1), afin d'obtenir des données complémentaires :

- 1) pour évaluer l'efficacité des dispositifs de protections mis en œuvre par les personnes se déclarant EHS pour réduire leur exposition aux champs électromagnétiques (vêtements, « moustiquaires », peintures, etc.) (CSTB 2015) (réf : n° 2015-CRD-07) ;
- 2) pour réaliser une enquête sur l'EHS auprès de médecins généralistes de la région Rhône-Alpes en 2015-2016 (réf : n° 2015-CRD-14) (UMRESTTE 2016).

2.1.4 Les mots-clés utilisés

Pour la recherche d'articles scientifiques, le groupe de travail a principalement utilisé les mots-clés présentés dans le Tableau 2.

Tableau 2 : mots-clés utilisés pour la recherche bibliographique

Terme anglais	Terme équivalent français
<i>Electromagnetic hypersensitivity, EHS, electro hyper sensitivity, hypersensitivity to electromagnetic fields, electromagnetic hypersensitivity, electrosensitivity, ES, electric hypersensitivity, electrical hypersensitivity,</i>	Hypersensibilité électromagnétique ou aux champs électromagnétiques, HSEM, EHS, Électro(hyper)sensibilité, sensibilité aux dispositifs et / ou appareils de communication sans fil, sensibilité aux champs électriques,
<i>Idiopathic environmental intolerance attributed to electromagnetic fields (IEI-EMF)</i>	Intolérance (environnementale idiopathique attribuée) aux champs électromagnétiques (IEI-CEM)
<i>Subjective symptom and electromagnetic fields, Provocation study and electromagnetic fields</i>	Symptôme subjectif et champs électromagnétiques, Étude de provocation et champs électromagnétiques

2.1.5 Limites du champ d'expertise

2.1.5.1 Bandes de fréquence considérées

L'une des originalités (ou difficultés) de l'EHS est que les symptômes sont attribués par les personnes qui en souffrent à des expositions aussi bien aux radiofréquences (RF) qu'aux basses fréquences (BF) (principalement 50 Hz en Europe). Après avoir débattu de cette difficulté en son sein, le groupe de travail a décidé de considérer les articles scientifiques mentionnant uniquement des personnes se déclarant EHS exposées aux champs électromagnétiques, qu'il s'agisse de radiofréquences ou de basses fréquences. Déjà, en 1997, dans un rapport de la commission européenne « *Possible health implications of subjective symptoms and electromagnetic fields* », l'annexe 3 analysait les causes possibles de l'hypersensibilité aux champs électromagnétiques et étudiait dans un même ensemble les BF et les RF, sans donner d'argument scientifique à ce regroupement.

³² Les revues consistent à synthétiser l'ensemble des études publiées sur un problème donné.

³³ Les méta-analyses et les analyses poolées consistent à regrouper respectivement soit les résultats soit les données brutes d'études antérieures (et semblables) afin d'obtenir une puissance plus importante. Elles sont particulièrement adaptées à l'épidémiologie étiologique.

Le paragraphe 5.2 du présent rapport sera consacré à la question du lien entre les deux types d'expositions (BF et RF).

Les fréquences (f) des champs BF sont comprises entre 0 et quelques kiloHertz³⁴ (kHz).

Les fréquences des radiofréquences vont d'une dizaine de kiloHertz à quelques centaines de gigaHertz (GHz) (soit des longueurs d'onde de l'ordre du kilomètre à un millimètre).

Plus précisément, le terme « fréquence(s) radio » est utilisé par l'Union internationale des télécommunications (UIT) pour désigner, de façon générique, les fréquences correspondant aux ondes radio (*radio-frequency spectrum*), c'est-à-dire littéralement celles qui « rayonnent » dans l'environnement. On peut lire dans le règlement des radiocommunications³⁵ de l'UIT la définition suivante : « Ondes radioélectriques ou ondes hertziennes : « *Ondes électromagnétiques dont la fréquence est par convention inférieure à 3 000 GHz, se propageant dans l'espace sans guide artificiel* » ». Cependant, il est d'usage de considérer la valeur de 300 GHz, limite de l'infrarouge, comme limite haute des radiofréquences (les bandes de fréquences au-delà de 275 GHz étant sans attribution de service).

La limite basse de 8,3 kHz des radiofréquences est issue de la classification de l'UIT, article 5, section 4 (UIT 2012).

Les réseaux radioélectriques déployés actuellement en France (radiodiffusion, télédiffusion, réseaux professionnels, téléphonie mobile, réseaux locaux sans fil, etc.) utilisent principalement des fréquences situées entre 9 kHz et 3 GHz. Compte tenu de la forte utilisation de cette portion du spectre radioélectrique par les systèmes déjà existants, la tendance générale de l'évolution des technologies et des applications sans fil est d'utiliser des fréquences plus élevées, au-delà de 3 GHz.

Caractérisation des expositions

Dans l'environnement actuel, le public est exposé en permanence à un ensemble de rayonnements électromagnétiques (radio FM, GSM, DCS, UMTS, Wi-Fi, RFID, etc.) générant chacun des ondes qui interagissent avec l'environnement. Il se crée ainsi des hétérogénéités dans la distribution spatiale du champ, en raison notamment de phénomènes de résonances ou d'interférences.

Les nouvelles technologies de télécommunications qui se développent utilisent des formes de signaux toujours plus innovantes (4G – LTE, 5G), ainsi que différentes normes de modulations et d'accès tels que FDMA (*Frequency Division Multiple Access*), TDMA (*Time Division Multiple Access*), CDMA (*Code Division Multiple Access*) et UWB (*Ultra-Wide Band*). La nature des signaux contribuant à l'exposition à mesurer est extrêmement complexe (cf. Annexe 1 du rapport Anses 2013).

Pour les mesures *in situ*, lorsque la téléphonie mobile est le contributeur principal, le niveau d'exposition le plus important est, dans plus de 60% des cas observés, dans la bande 900 MHz de la téléphonie mobile où il existe actuellement deux technologies : 2G (GSM) et 3G (UMTS). Les nouveaux usages des dispositifs de télécommunications (ex : réseaux 4G) rendent également complexe la comparaison avec l'exposition engendrée par les technologies précédentes. Une campagne de l'Etat menée en 2014 avait montré que le déploiement de la 4G augmentait l'exposition créée par les antennes relais de 11 % (MEDDE 2014). Connaître l'impact de ces nouveaux signaux sur l'exposition nécessite de définir de nouveaux paramètres d'exposition des

³⁴ Hertz (Hz) : unité de la fréquence, qui correspond à un cycle par seconde.

³⁵ Le Règlement des radiocommunications, texte ayant valeur de traité international, est révisé et adopté par les Conférences mondiales des radiocommunications environ tous les quatre ans. Il contient le texte complet du règlement des radiocommunications tel qu'il a été adopté par la Conférence mondiale des radiocommunications (Genève, 1995) (CMR-95), puis révisé et adopté par les Conférences mondiales des radiocommunications, y compris tous les Appendices, Résolutions, Recommandations et les Recommandations UIT-R incorporées par référence.

personnes aux champs électromagnétiques, prenant en compte à la fois l'exposition au téléphone et aux antennes-relais.

En effet, il ne faudrait plus se limiter à une mesure en fréquence « enveloppe moyenne du signal » sur un intervalle donné, mais s'intéresser aussi à d'autres caractéristiques (modulations, bandes de fréquences, formes, niveaux de puissance, etc.).

Pour en savoir plus sur les réseaux radioélectriques et les nouvelles applications, se reporter au chapitre 3 du rapport « radiofréquences et santé » (Anses, 2013). À titre indicatif, des valeurs de champs mesurées à proximité de différents appareils (téléphones, tablettes, etc.) sont fournies au chapitre 4 de ce même rapport.

2.1.5.2 Les articles analysés

Une caractéristique (ou difficulté) de l'EHS est que, contrairement à ce que l'on observe dans la plupart des maladies, aucun modèle animal de l'EHS n'a, à notre connaissance, été proposé à ce jour. En tout état de cause, aucun article mentionnant un tel modèle n'a été trouvé dans la littérature scientifique. Ceci s'explique par la nature purement fonctionnelle des symptômes de l'EHS, qui sont difficiles à objectiver chez l'animal.

En conséquence, les articles portant sur des modèles non pertinents pour l'étude de l'EHS (plantes, larves de Xénopie, poulet, etc.) n'ont pas été analysés dans le présent rapport. De même, les articles *in vitro* ou *in vivo* ne traitant pas de mécanismes évoqués dans le cadre des hypothèses émises pour expliquer tout ou partie de la survenue de l'EHS n'ont pas été analysés.

Des données expérimentales obtenues chez l'animal ont parfois été utilisées dans la présente expertise, pour essayer de comprendre les mécanismes pouvant expliquer les hypothèses avancées par certains scientifiques ou certaines partie-prenantes (médecins et associations notamment) pour expliquer tout ou partie de la survenue de l'EHS. Il faut souligner que le groupe de travail n'a eu recours à l'analyse d'études *in vitro* ou *in vivo*, que dans le cadre de la recherche de mécanismes d'interaction entre les ondes et la matière vivante. Les conclusions formulées à partir de l'analyse des articles étudiés dans les rapports Afsset (2009) et Anses (2013) ont été rappelées en préambule de chaque paragraphe du chapitre 7.

Les publications scientifiques analysées dans le présent rapport sont principalement des études s'intéressant à des personnes se déclarant EHS :

- études cliniques, portant sur des groupes restreints de personnes sélectionnées en vue, soit de décrire la symptomatologie fonctionnelle, soit de rechercher des marqueurs, soit d'identifier des mécanismes physiopathologiques. Ce type d'étude ne permet pas de savoir si ces personnes sont représentatives de l'ensemble de celles se déclarant EHS ;
- études épidémiologiques, portant sur des échantillons de la population générale et / ou se déclarant EHS ;
- études utilisant les concepts et méthodes des sciences humaines et sociales.

2.1.5.3 Les technologies prises en compte

L'économie numérique entame une nouvelle phase de son évolution, notamment avec le développement de l'Internet des objets³⁶ et la future 5G. Dans les études concernant les

³⁶ En 2025, l'Institut de l'audiovisuel et des télécommunications en Europe (IDATE) prévoit qu'il y aura 155 milliards d'objets connectés. Le domaine potentiellement couvert par les objets connectés est très vaste, on peut citer des domaines d'application comme celui de la santé, des villes intelligentes, du transport avec en particulier les voitures connectées, ou encore celui des objets connectés à l'intérieur d'un domicile. Dans ce dernier cas et à titre d'exemple, il existe des objets que l'on peut contrôler à distance (contrôle d'une chaudière par exemple) ou encore des objets fournissant des informations (température à l'intérieur d'une pièce, capteurs de présence), il existe aussi des connections possibles entre machines (contrôle automatique de la température en fonction de la présence de personnes par exemple et d'un cycle de température souhaité).

personnes se déclarant EHS, l'impact des objets connectés sur les nouveaux usages et sur l'évolution des expositions n'a pas été étudié à ce jour. Faute de données, les expositions dues à ces nouvelles technologies n'ont pas pu être prises en compte dans le cadre de la présente expertise. Les éléments d'information ci-après sont néanmoins fournis pour apporter un éclairage sur le sujet.

Techniquement, les exigences de l'Internet des objets sont très différentes de celles des services traditionnels, en matière de flux de trafic (principalement basé sur la liaison montante), de débit des données (seulement quelques kilobits par seconde sont suffisants) et de qualité de service (comme la garantie de service et de latence pour certaines applications). Pour les objets connectés autonomes en énergie, l'une de leurs limites est leur faible capacité à stocker l'énergie suffisante pour garantir leur autonomie de fonctionnement. Pour cette raison, les puissances émises sont le plus souvent très faibles (typiquement autour de 10 et 25 mW en dessous de 1 GHz) combinées avec des durées d'émission également faibles, du fait des mécanismes de partage de la ressource fréquentielle, qui sont adaptés à la faible quantité des données envoyées par objet. Par conséquent, les niveaux d'exposition sont également très faibles.

La réglementation des objets radioélectriques actuels s'appuie sur la réglementation des équipements de type appareils à faible portée (AFP)³⁷.

Il existe aussi des possibilités de transmission radioélectrique avec des fréquences soumises à autorisation basées sur des technologies existantes, comme celles utilisées pour la téléphonie mobile en GPRS ou UMTS (3G), ainsi que d'autres perspectives intégrant des spécifications dédiées dans les versions de développement LTE actuels (LTE-M et le prochain NB-LTE).

Enfin, d'autres systèmes utilisent le courant porteur en ligne (CPL), comme pour certaines commandes de volets, les compteurs communicants (compteurs *Linky* par exemple) mis en œuvre pour la télé-relève de la consommation électrique ou des « veilles-bébés », pour lesquels l'autonomie électrique n'est pas un aspect critique et les puissances mises en jeu sont également très faibles³⁸. Les compteurs communicants, basés sur des communications radio et CPL, sont en cours de déploiement au niveau national. Bien que souvent cités par les personnes se déclarant EHS comme source de problèmes, ils ne seront pas abordés en tant que tels dans le présent rapport. L'Anses a publié un avis et un rapport relatif à l'évaluation de l'exposition de la population aux champs électromagnétiques émis par les « compteurs communicants » en 2017 (Anses 2017).

Les réseaux mobiles actuels sont essentiellement constitués d'équipements radio à longue portée déployés pour assurer la couverture dans toutes les configurations de terrain, qu'il s'agisse de zones urbaines denses ou de territoires ruraux. À l'avenir, notamment avec l'arrivée de la 5G, cette couverture sera complétée par des petites antennes de moyenne portée pour améliorer la couverture et la connectivité pour tous dans les zones les plus denses, à l'heure où la population utilise de plus en plus les réseaux mobiles.

³⁷ La Recommandation ERC 70-03 (disponible sur <http://www.cept.org/ecc/deliverables>) de la *Conférence européenne des administrations des postes et des télécommunications* préconise divers paramètres d'utilisation des fréquences radio pour appareils à faible portée (AFP) en Europe. Les éventuelles restrictions de mise en œuvre nationale sont précisées en annexe 3 de cette recommandation. Les bandes de fréquences disponibles en France pour les équipements radio de type AFP sont données en Annexe 7 (disponible sur <http://www.anfr.fr/gestion-des-frequences-sites/le-tnrbf/>) du Tableau National de Répartition des Bandes de Fréquences (TNRBF). Ces informations sont, le cas échéant, à compléter par les décisions réglementaires de l'ARCEP (cf. en particulier la décision ARCEP 2014-1263) fixant les conditions d'utilisation de ces bandes de fréquences.

³⁸ La norme EN 50065-1 : 2011 (transmission de signaux sur les réseaux électriques basse tension dans la bande de fréquences de 3 kHz à 148,5 kHz - Partie 1 : Règles générales, bandes de fréquences et perturbations électromagnétiques) prévoit notamment au tableau 1 une émission maximale de 120 à 134 dBμV pour les appareils monophasés.

2.1.6 Les références bibliographiques proposées par le Comité de dialogue

En complément de la veille bibliographique active réalisée par l'Anses, la liste des publications recensées a été diffusée le 8 décembre 2014 au sein du comité de dialogue « radiofréquences et santé » mis en place par l'Agence en 2011, afin de recueillir d'éventuelles références complémentaires. Les publications relatives à la question de l'EHS, communiquées en retour à l'Agence par des membres du comité de dialogue ont été ajoutées au *corpus* initial et ont été analysées par le groupe de travail lorsqu'elles répondaient aux critères de sélection cités précédemment (cf. § 2.1.1 à 2.1.5).

Les principales raisons d'exclusion des publications ont été les suivantes : articles antérieurs à 2009 (même si sur certains sujets, des références du rapport sont antérieures à cette date, le rapport ne cherche pas à être exhaustif au-delà de celle-ci), articles sur les effets biologiques des radiofréquences ou des extrêmement basses fréquences ne concernant pas directement des personnes se déclarant EHS (parfois déjà analysés dans un précédent rapport de l'Agence), types de publications non pris en compte de manière exhaustive (acte de conférence, revue, thèse, etc. de tels documents ont parfois été cités pour illustrer certains points du rapport, mais tous n'ont pas fait l'objet d'une analyse systématique), études portant sur des modèles non pertinents pour l'EHS, etc.

2.2 Analyse des articles scientifiques

Une analyse systématique et objective de la qualité de tous les articles scientifiques originaux recensés selon les critères de recherche définis précédemment (§ 2.1) a été réalisée par le groupe de travail, selon les modalités définies dans le rapport Anses publié en 2013 (§ 6.2.2, pp108-121).

Les experts du groupe de travail ont mis leurs compétences complémentaires en commun pour analyser collectivement les articles concernant des personnes se déclarant EHS.

Deux sous-groupes ont été formés au sein du groupe de travail « radiofréquences et santé 2 », afin d'analyser les études épidémiologiques, d'une part, et les études cliniques, d'autre part.

Chaque étude épidémiologique a été analysée par deux épidémiologistes, chaque étude clinique a été analysée par un physicien et deux biologistes (ou un médecin et un biologiste).

En pratique, chaque article a donc été analysé dans un premier temps, en détail, par un ou plusieurs experts (jusqu'à 3), qui ont rempli une grille d'analyse. Les experts du groupe de travail, comme tous les scientifiques, doivent avoir une lecture critique des articles scientifiques, prenant en compte les forces et les limites des études, qu'elles aient été discutées par leurs auteurs ou non.

Dans un second temps, ces analyses ont été discutées en réunions de sous-groupe, afin d'apprécier collectivement la qualité de la publication sur le plan méthodologique, en ajoutant une justification et des commentaires à la grille d'analyse des articles.

Le résultat de l'analyse des publications scientifiques est présenté au chapitre 6 du présent rapport.

2.3 Les auditions

Pour réaliser l'expertise, le groupe de travail « Radiofréquences et santé » s'est appuyé sur de nombreuses auditions de médecins, de scientifiques, d'associations et d'élus.

2.3.1 Objectif des auditions

Le principal objectif d'une audition est de donner aux experts du groupe de travail l'opportunité de mieux connaître les opinions des différentes parties prenantes sur la thématique de

l'électrohypersensibilité. L'audition permet également d'obtenir des données, des informations complémentaires de celles issues de la veille bibliographique.

En effet, pour élargir sa vision du sujet, le groupe de travail a souhaité entendre différentes parties prenantes concernées par la question de l'EHS et en a auditionné plus d'une vingtaine, afin notamment :

- de mieux connaître les phénomènes de terrain (parcours et prise en charge des personnes se déclarant EHS par exemple) grâce à des auditions d'associations et de médecins ;
- d'obtenir des compléments scientifiques ;
- d'identifier les attentes des différents acteurs (en matière de prise en charge médicale, de reconnaissance, de recherche, etc.).

2.3.2 Préparation et déroulement des auditions

En vue de préparer l'audition, la personne auditionnée recevait un questionnaire écrit rédigé par l'Anses et les experts du groupe de travail au moins une semaine avant l'audition.

L'audition débutait par une présentation de la personne auditionnée, suivie d'une séance de questions-réponses et d'échanges avec les experts du groupe de travail. Elle durait généralement 1h30 environ.

Dans un souci de transparence et de traçabilité, toutes les auditions ont fait l'objet d'une prise de notes et d'un enregistrement professionnel par un prestataire mandaté par l'Anses (à l'exception des deux premières, celles du Pr Cathébras et du D^r Dupas, qui ont eu lieu avant la mise en place de cette prestation et qui ont fait l'objet d'un simple compte-rendu).

Les verbatim ainsi réalisés ont ensuite été envoyés aux personnes auditionnées pour relecture de leur contenu et d'éventuelles corrections de forme.

En complément de ces auditions (*de visu* ou par téléphone), des contributions écrites ont également été sollicitées sur des questions plus précises du groupe de travail.

2.3.3 Traitement et utilisation des informations obtenues

Tous les verbatim des auditions, après relecture par leurs auteurs, sont publiés en version intégrale en annexe du présent rapport (en version électronique uniquement). Les propos retranscrits appartiennent exclusivement à leurs auteurs.

En parallèle, les experts du groupe de travail ont réalisé un travail d'analyse du contenu de ces auditions. Ils en ont tiré les éléments d'information qui, selon eux, étaient importants et les ont utilisés pour alimenter certaines parties du rapport. Cette restitution, qui appartient aux experts du groupe de travail, n'engage aucune des personnes auditionnées, bien qu'elle s'appuie évidemment sur les entretiens conduits.

2.3.4 Personnes auditionnées

Le groupe de travail de l'Anses a auditionné plus d'une dizaine de médecins (cliniciens, généralistes ou autres spécialités), une scientifique et un sociologue.

Il a également pris connaissance d'éléments de vie des personnes se déclarant EHS à travers les auditions d'associations, notamment celles représentant ces personnes, et celles impliquées dans la thématique « radiofréquences et santé ».

La liste des personnes auditionnées (et celles ayant refusé de l'être) figure dans le Tableau 1 (p 6).

2.4 Recherche et prise en compte de témoignages de personnes se déclarant EHS et autres points de vue sur le sujet

Le groupe de travail de l'Anses a pris connaissance de certains parcours de personnes se déclarant EHS, à travers :

- les travaux de Yannick Barthe, sociologue au Centre national de recherche scientifique (CNRS), à qui l'Anses a demandé d'exploiter un *corpus* de lettres de personnes se déclarant EHS (les résultats des travaux sont présentés au § 3.1 et le verbatim de son audition est disponible en annexe électronique téléchargeable sur le site de l'Anses) ;
- les auditions d'associations et de médecins recevant ces personnes en consultation ;
- la lecture de témoignages individuels sur internet ou dans la presse (cf. § 2.4.3).

Il est nécessaire de garder en mémoire que tout témoignage, pris individuellement, est soumis au biais de sélection de celui-ci (par les médias, par les associations, etc.). La question de la représentativité des témoignages, qui peuvent s'avérer très hétérogène, doit être posée. Pour éviter de tomber dans cet écueil, le groupe de travail a essayé de multiplier et de diversifier les sources, les supports et le nombre de témoignages de personnes se déclarant EHS dont il a pris connaissance.

2.4.1 Témoignages à travers un *corpus* de lettres de personnes se déclarant EHS

Le 22 février 2012, le Collectif des électrosensibles de France lançait une opération destinée à « interpeller directement les autorités sanitaires sur les conséquences des expositions aux radiofréquences et sur l'existence et les conditions de vie des personnes victimes du syndrome d'intolérance aux champs électromagnétiques ». Baptisée « opération visibilité », l'action consistait à inviter les personnes se déclarant EHS à témoigner, sous la forme de courriers adressés aux autorités sanitaires, de leur maladie et de leurs conditions de vie. Au cours des mois qui ont suivi, l'Agence a ainsi constitué un *corpus* de lettres de personnes se déclarant EHS. Les mêmes lettres étaient parallèlement adressées à la Direction générale de la santé³⁹.

Le *corpus* de lettres de personnes se déclarant EHS ainsi constitué comprend 64 lettres, qui ont été exploitées au § 3.1.

2.4.2 Enquête auprès de personnes se déclarant EHS favorables à l'établissement d'une zone blanche

Dans le cadre de la sollicitation de l'Anses sur la faisabilité d'un projet de zone blanche à Saint-Julien-en-Beauchêne⁴⁰ (dans les Hautes-Alpes) envisagé comme un lieu de recherche sur l'EHS, une enquête par questionnaire a été réalisée en collaboration avec les associations porteuses du projet.

Les résultats de cette enquête sont à prendre en compte avec précautions et sont uniquement déclaratifs, concernant une population non représentative de l'ensemble des personnes se déclarant EHS (sans critère de sélection).

L'enquête a été menée de janvier à avril 2015 auprès de personnes se déclarant EHS candidates à l'établissement d'une zone blanche. Le questionnaire comportait cinq questions visant à interroger ces personnes sur :

1. leur intention de séjourner en zone blanche (oui, peut-être, ne sait pas, non) ;
2. la ou les sources auxquelles elles attribuent ces troubles (radiofréquences (RF), basses fréquences (BF), produits chimiques ou autres) ;

³⁹ Depuis, l'opération a été renouvelée et d'autres témoignages ont été produits et mis en ligne à l'adresse Internet suivante : <http://www.electrosensible.org/temoignages/>.

⁴⁰ Ce projet est porté par l'association Zones Blanches qui a été créée dans ce but fin 2014. Michèle Rivasi, députée européenne d'Europe Écologie les Verts, en est la présidente. L'objectif de ce projet serait de créer un lieu d'accueil et de repos pour les personnes se déclarant EHS et de monter sur le site un centre de recherche scientifique. De manière plus générale, l'association se donne pour objet « d'expérimenter, de créer et gérer des sites sans champs électromagnétiques artificiels ».

3. le niveau de sévérité de leurs troubles, en utilisant une échelle à six niveaux allant d'une gêne physique très légère (n'entraînant ni limitation de cette utilisation, ni évitement de cet émetteur ou de cette odeur chimique, et disparaissant avec l'arrêt de l'utilisation ou de la proximité de cet émetteur ou de l'exposition à ces odeurs chimiques) à une intolérance absolue et permanente aux ondes électromagnétiques et / ou aux odeurs chimiques, entraînant une vie quasi recluse dans un lieu protégé et une exclusion sociale ;
4. les thèmes de recherche qu'ils jugent prioritaires ;
5. leur disposition à participer aux projets de recherches sur le site de zone blanche (oui, oui selon les caractéristiques du projet, ne sait pas, non).

Le questionnaire a été relayé auprès de personnes se déclarant EHS par l'intermédiaire de quatre associations : le Collectif des Électrosensibles de France (CESF) (nombre de répondants, n = 167), Une Terre pour les EHS (n = 151), Prévention Ondes Électromagnétiques Drôme (POEM26) (n = 25), et l'association Zones Blanches (n = 9).

Le questionnaire a été diffusé par les associations auprès de leurs membres par voie électronique ou papier. Le nombre total de personnes ayant reçu le questionnaire n'est pas connu. Au total, 352 questionnaires ont pu être recueillis et analysés. Seules les réponses aux questions 4 et 5 sont présentées dans le rapport (cf. § 4.3.3.5), dans la mesure où elles fournissent des informations non documentées par ailleurs. Les résultats de ce questionnaire n'ont pas été publiés à ce jour.

2.4.3 Témoignages de personnes se déclarant EHS choisis sur internet ou dans la presse

Le groupe de travail a pris connaissance, de manière indirecte, de nombreux témoignages de personnes se déclarant EHS à travers la presse et des sites internet, tels que :

- le *blog* d'Alexandre Pieroni, qui étudie la sociologie à l'EHESS et travaille sur le thème de l'hypersensibilité aux ondes électromagnétiques⁴¹ ;
- le portail des électrosensibles de France, qui rassemble plus d'une centaine (125 le 21/12/2014) de témoignages de personnes électrohypersensibles⁴² ;
- le *blog* d'un électrosensible, qui raconte son parcours personnel⁴³ ;
- les livres « Schproum » (Actes Sud, 2013) de Jean-Yves Cendrey et « Sous l'ondée » (Inadvertance, 2012) de Marine Richard.

2.5 La consultation publique

2.5.1 Objectif

Considérant l'importance, la complexité et la sensibilité du sujet, l'Agence a souhaité porter le rapport d'expertise dans un état pré-définitif, c'est-à-dire sans conclusion ni recommandation, à la connaissance des membres de la communauté scientifique et des parties prenantes intéressées, afin de recueillir leurs commentaires éventuels. La consultation publique visait à recueillir des données et commentaires scientifiques susceptibles d'être pris en compte dans l'élaboration finale du rapport d'expertise.

⁴¹ <http://quelques-cas-isoles.blogspot.fr/2014/08/sadapter-agnes.html>

⁴² <http://www.electrosensible.org/temoignages/index.php>

⁴³ <https://electroallergique.wordpress.com/>

2.5.2 Procédure

L'information de la mise en place de la consultation publique a été rendue publique sur le site internet de l'Anses, et diffusée auprès des directions générales des ministères concernés (Direction générale de la santé, Direction générale de la prévention des risques), de personnalités scientifiques et de parties prenantes. Le recueil des commentaires a été effectué par l'intermédiaire d'un formulaire en ligne disponible sur le site internet de l'Agence.

2.5.3 Calendrier

La consultation publique du rapport pré-définitif « Hypersensibilité électromagnétique ou intolérance environnementale idiopathique attribuée aux champs électromagnétiques » a été ouverte du 27 juillet au 15 octobre 2016.

2.5.4 Modalités de prise en compte des commentaires reçus

Les commentaires et données scientifiques recueillis dans le cadre de la consultation publique ont été pris en considération aux conditions suivantes :

- qu'ils aient été soumis avant la date limite fixée pour la période de consultation ;
- qu'ils aient fait explicitement référence aux paragraphes, pages et lignes précis du rapport faisant l'objet de la consultation ;
- qu'ils ne concernent pas des recommandations en matière de gestion des risques ;
- qu'ils ne comportent pas de plaintes contre des institutions, d'accusations personnelles ou de déclarations injurieuses ;
- qu'ils soient accompagnés des références bibliographiques des sources citées.

Tous les commentaires ont été analysés un à un avec des experts rapporteurs et une réponse a été rédigée pour chacun. Chaque réponse a ensuite été validée par l'ensemble du groupe de travail.

Un bilan des commentaires reçus lors de la consultation publique ainsi que des réponses apportées est publié en Annexe 17 du rapport d'expertise.

L'intégralité des commentaires reçus ainsi que les réponses associées ont été rassemblés dans un tableau disponible sur le site internet de l'Anses (<http://www.anses.fr>).

3 Qu'est-ce que l'EHS ? Peut-on la définir ?

Comme cela a été précisé dans l'introduction (cf. § 1.2), le terme d'« hypersensibilité électromagnétique » (EHS) désigne le même phénomène que celui d'« intolérance environnementale idiopathique attribuée aux champs électromagnétiques » (IEI). Lors de sa conférence de 2004 consacrée à cette question, l'OMS a retenu trois critères pour caractériser l'intolérance environnementale idiopathique aux champs électromagnétiques (IEI-CEM), à savoir :

- la perception par les sujets de symptômes fonctionnels divers non spécifiques⁴⁴ (troubles du sommeil, maux de tête, symptômes cutanés, etc.) ;
- l'absence d'évidence clinique et biologique permettant d'expliquer ces symptômes ;
- l'attribution, par les sujets eux-mêmes, de ces symptômes à une exposition à des champs électromagnétiques, eux-mêmes diversifiés (OMS, 2006).

Il faut préciser que, pour l'OMS, « l'IEI est un descripteur n'impliquant aucune étiologie chimique ou aucune sensibilité de type immunologique ou électromagnétique. Ce terme regroupe un certain nombre de troubles ayant en commun des symptômes non spécifiques similaires, qui restent non expliqués sur le plan médical et dont les effets sont préjudiciables pour la santé des personnes. »

3.1 Lecture sociologique d'un *corpus* de lettres de personnes se déclarant EHS

3.1.1 Constitution d'un *corpus* de lettres de personnes se déclarant EHS

Le *corpus* de lettres que des personnes se déclarant EHS ont adressé à l'Anses suite à une opération du Collectif des électrosensibles de France lancée le 22 février 2012 (cf. § 2.4.1) comprend 64 lettres.

Afin de faciliter la rédaction des courriers, le collectif avait diffusé au préalable un guide composé de thèmes pouvant être abordés, chacun de ces thèmes regroupant une série de questions (cf. Encadré 1).

Encadré 1 : thèmes pouvant être abordés dans les lettres du corpus

L'historique de votre intolérance ou de votre maladie : comment avez-vous découvert votre intolérance aux champs électromagnétiques ? Quand et comment avez-vous fait le lien avec l'exposition aux champs électromagnétiques ? etc.

Le tableau clinique : quels sont les symptômes qui vous touchent ? À quel niveau de gravité ?

Les sources d'émission qui vous sont nuisibles : quelles sources déclenchent les symptômes ? Avez-vous réalisé des mesures d'exposition ?

Les actions que vous avez mises en œuvre : avez-vous dû déménager ? Avez-vous entrepris des actions auprès de votre employeur ? Auprès des opérateurs ? etc.

La nature de la prise en charge médicale et les difficultés rencontrées : êtes-vous suivi médicalement ? Votre médecin a-t-il suffisamment d'informations pour vous prendre en charge efficacement ? etc.

La situation administrative dans laquelle vous vous trouvez et les difficultés rencontrées : quelles ont été les conséquences sur votre activité professionnelle ? Travaillez-vous toujours ? etc.

⁴⁴ Un signe clinique est dit non spécifique lorsqu'il peut être l'expression clinique de plusieurs maladies différentes. Au contraire, un signe clinique est dit spécifique lorsqu'il permet d'orienter le diagnostic vers une ou un groupe de pathologies.

Les conséquences sur votre vie : votre entourage comprend-il votre problème ? Quelles sont les conséquences sur votre vie sociale ? etc.

Par ailleurs, le collectif invitait les personnes à apporter leur témoignage en étant « le plus concis et courtois possible pour un meilleur impact », précisant même qu'« un courrier d'une seule page allant à l'essentiel peut être suffisant ». Il leur demandait également de rester centré sur leur témoignage et d'éviter « de faire des revendications, car cela nécessit[ait] réflexion et débat entre toutes les associations ».

3.1.1.1 Le corpus de lettres et son cadre

Le *corpus* de lettres de personnes se déclarant EHS ainsi constitué comprend 64 lettres, dont 20 manuscrites.

Les courriers sont de longueur très inégale : certains témoignages sont très succincts (une page) tandis que d'autres sont plus détaillés et parfois accompagnés de documents (coupures de presse, rapports d'expertise et certificats médicaux).

Ce *corpus* présente plusieurs limites qui obligent à faire rester prudent à l'égard des généralisations. Bien qu'il permette d'avoir accès à l'expérience de personnes se déclarant EHS, rien ne permet d'affirmer que les témoignages recueillis dans le cadre de cette opération soient représentatifs de l'ensemble de la population concernée. En effet, les « biais de recrutement », pour utiliser le vocabulaire des épidémiologistes, sont ici évidents. Tout d'abord, ces témoignages sont le fait de personnes dont on peut supposer qu'elles sont plutôt proches des associations engagées dans ce domaine, et notamment du Collectif des électrosensibles de France. En second lieu, même si cela peut paraître trivial de le rappeler, la rédaction d'un témoignage suppose une certaine maîtrise de l'écriture. Enfin, et surtout, ces témoignages sont portés par des personnes ayant acquis la conviction qu'elles sont EHS, ce qui écarte celles qui sont davantage dans le doute ou dans un processus de questionnement, ou qui ne s'estiment pas suffisamment affectées pour se reconnaître en tant qu'EHS.

Au-delà de ces « biais de recrutement », une autre limite du *corpus* tient au fait que ces témoignages ne sont pas complètement « ouverts », puisque le collectif avait diffusé au préalable un guide de rédaction (cf. Encadré 1).

Enfin, une analyse statistique des données serait peu fiable compte tenu du nombre restreint de personnes qui témoignent et de « biais » liés aux différences d'âge, de genre, de localisation géographique, etc.

Il est vraisemblable que ce guide ait facilité l'écriture des témoignages, qu'il ait influencé les réponses, notamment en contribuant à limiter certains développements qui auraient été intéressants pour l'analyse. Il en résulte le plus souvent des histoires « à trous » qui ne vont pas sans procurer un sentiment de frustration chez le lecteur : certains raccourcis suscitent en effet des questions condamnées à rester sans réponse, notamment en ce qui concerne la manière dont ces personnes ont établi un rapprochement entre certains symptômes et les champs électromagnétiques auxquels elles étaient exposées. Il s'agit d'une limite que la situation d'entretien, en donnant à l'enquêteur la possibilité d'une relance, permettrait sans nul doute de dépasser.

Enfin, tous ces courriers étaient orientés vers un but précis : convaincre de la réalité de la maladie, ce qui a conduit le plus souvent les auteurs à insister sur certains aspects plutôt que d'autres (les symptômes au détriment de leurs conséquences sur la vie sociale par exemple) et à afficher des certitudes au sujet de l'origine de leurs problèmes de santé, passant sous silence le cheminement, les doutes ou les tâtonnements qui ont pu éventuellement marquer le processus de découverte de l'EHS. Cela étant, les lettres montrent directement le ressenti et le vécu de leurs auteurs.

3.1.1.2 Travail exploratoire réalisé à partir du corpus

Il convient de préciser au préalable qu'il ne s'agit pas ici de présenter les résultats d'une recherche sociologique aboutie sur les personnes se déclarant EHS, laquelle nécessiterait de déployer des techniques d'enquête appropriées comme la conduite d'entretiens approfondis. Ce travail s'inscrit

plutôt dans une démarche exploratoire : compte tenu des limites du *corpus* (cf. paragraphe précédent), sa seule ambition était de dégager quelques thèmes et hypothèses de recherche qui pourraient nourrir, le cas échéant, des investigations plus poussées sur le sujet.

Avant d'aller plus loin, une autre précision mérite d'être apportée. Elle concerne le rôle des sciences sociales dans ces domaines. Quand elles prennent pour objet des maladies inexpliquées ou controversées, les sciences sociales sont souvent enrôlées dans une entreprise de « déréalisation » de ces maladies (c'est-à-dire pour justifier leur caractère irréel, dénué de sens ou de cohérence). Elles entrent alors, parfois de plein gré, mais le plus souvent à leur corps défendant, dans un débat sur l'étiologie des maladies en question. Or, à nos yeux, tel n'est pas le rôle des sciences sociales, lesquelles n'ont pas les compétences pour ce faire⁴⁵. Tout au plus peuvent-elles prendre pour objet les efforts entrepris par les acteurs qu'elles étudient, qu'il s'agisse de « profanes » ou de « spécialistes », pour construire des hypothèses causales et les doter d'une certaine robustesse. Par ailleurs, des études de neurosciences pourraient aider à montrer les circuits neurosensoriels impliqués dans le développement des maladies inexpliquées.

Après avoir évoqué les symptômes rapportés dans les témoignages, les éléments sur lesquels les personnes se déclarant EHS s'appuient pour attester de la réalité de la maladie et réfuter l'hypothèse de son origine psychologique seront présentés. Dans la suite du texte, nous tenterons de distinguer, en dépit de la singularité de chaque témoignage et donc de l'hétérogénéité des situations, deux grands modes de découverte de l'EHS (cf. § 3.1.4). La manière dont ces personnes cherchent à convaincre les autorités sanitaires de la réalité de leur maladie sera également abordée à l'occasion de ce travail. Enfin, l'ambivalence qui caractérise parfois leur rapport à la médecine (entre critique des médecins et désir de médicalisation), ainsi qu'à leur propre statut de malade (entre victime des ondes et sentiment d'appartenance à une avant-garde) sera étudiée.

À la lecture du *corpus* de ces lettres, la principale impression qui se dégage est celle d'une grande hétérogénéité de situations, de parcours, et de manières de vivre la maladie. Cependant, dans le même temps, se dégage aussi un sentiment de répétition comme si, au-delà de la diversité des expériences, il était possible de repérer des thèmes récurrents ou des points communs. C'est précisément ce que nous avons cherché à faire dans le cadre du travail présenté ci-après.

Les auteur(e)s des lettres qui composent le *corpus* étaient le plus souvent des femmes (54 sur 64). Leur âge n'est pas toujours précisé mais il était souvent supérieur à 45 ans.

3.1.2 Objectif de ces témoignages

Tous les témoignages du *corpus* interviennent dans le cadre d'une opération visant à *convaincre* les autorités sanitaires de la réalité d'une maladie émergente, l'EHS, jugée mal comprise et insuffisamment reconnue. Cette opération intervient également en réaction à la consultation psychiatrique mise en place dans le cadre d'un Programme Hospitalier de Recherche Clinique (PHRC)⁴⁶ dirigé par le Professeur Choudat de l'hôpital Cochin, et visant à proposer une aide pour

⁴⁵ D'autres auteurs, par exemple Greco (2012), ont néanmoins une position différente sur ce rôle (Greco 2012).

⁴⁶ L'étude porte sur la sensibilité des patients vis-à-vis de leur exposition, ainsi que sur leur état de santé et leur qualité de vie. Il était prévu d'inclure une centaine de personnes présentant un syndrome d'intolérance environnementale idiopathique attribuée aux champs électromagnétiques. Le recueil de données de cette étude pilote, nationale, multicentrique s'est achevé en 2015.

« Il s'agit [...] d'évaluer l'efficacité de cette prise en charge médicale individualisée reposant sur l'amélioration de leur état de santé, de leur qualité de vie et de leur sensibilité exprimée, au moyen de questionnaires vis-à-vis des expositions. Les critères d'inclusion, ont été très larges. Ils reposaient [...] sur la déclaration par les patients eux-mêmes de leur intolérance. Il n'y avait pas de questionnaire permettant de spécifier si les personnes étaient réellement intolérantes ou pas » [Audition du Dr Lynda Bensefa-Colas et du Pr Choudat le 12 juin 2014].

les personnes se déclarant EHS qui étaient en souffrance. Le projet a été accusé par les associations de n'avoir pour seul objectif que celui de conforter la thèse de l'origine psychosomatique de la maladie⁴⁷.

3.1.2.1 Un contre-discours

Aussi, à travers le *corpus* de lettres étudié, le discours des personnes se déclarant EHS apparaît d'abord comme un contre-discours, dans la mesure où il cherche à mettre en évidence un nouveau syndrome. Il est orienté vers l'anticipation de ce qui apparaît à leurs yeux comme un déni de réalité, à savoir l'imputation des symptômes à une cause d'ordre psychologique. Afin d'écarter la thèse psychogène, les auteurs des lettres s'attachent notamment à montrer que la maladie n'a rien à voir avec un état dépressif préalable et que, de manière générale, rien ne les prédisposait à souffrir de tels symptômes. Les témoignages sont ainsi fondés sur un fort contraste entre un « avant » et un « après » et décrivent souvent une vie saine et équilibrée avant que « tout bascule » : « j'étais sportive », « je bénéficiais jusque-là d'une bonne santé », « je faisais du sport et attention à mon alimentation », « je ne suis pas un technophobe », « je suis quelqu'un de travailleur et de positif », « mariée, deux enfants et un grand nombre d'amis et de connaissance », « je réfute d'emblée l'idée que les personnes se disant EHS seraient des individus faibles, isolés, peu qualifiés, et se sentant dépassés par les évolutions technologiques ». « J'appréciais les dimensions pratiques du téléphone portable. J'avais une santé excellente, un sommeil de qualité supérieure. Je n'étais pas hypocondriaque ».

Le rejet de la thèse psychogène s'exprime également lorsque sont relatées des expériences malheureuses avec certains médecins, à qui il est souvent reproché un manque d'écoute et un *a priori* marqué pour l'explication psychologisante. Ces réactions du corps médical sont jugées incompréhensibles et dommageables, *a fortiori* lorsque les psychologues consultés par les patients eux-mêmes ont déjà écarté ce type d'explication psychologisante ou bien n'ont en rien contribué à l'amélioration de l'état physique de leurs patients.

3.1.2.2 Un témoignage

Pour convaincre de la réalité d'une maladie liée aux ondes, il ne suffit pas de réfuter les hypothèses psychologisantes ; il s'agit également de faire état d'un certain nombre d'éléments factuels qui, aux yeux des personnes se déclarant EHS, valent comme autant de preuves du phénomène d'intolérance aux champs électromagnétiques. Ces preuves, ce sont d'abord les souffrances du corps et les douleurs⁴⁸ parfois insupportables ressenties au contact des ondes : « Venez me voir et vous verrez les conséquences de 42 Wi-Fi et au moins autant de DECT dans mon logement d'un grand immeuble d'habitation collectif ! » écrit par exemple une personne tandis que d'autres, en raison de ces douleurs, affirment avoir développé une capacité de détection de champs électromagnétiques : « je suis devenue un détecteur d'antennes ».

Par ailleurs, les témoignages s'appuient souvent sur le constat d'une proximité temporelle entre l'apparition des symptômes et l'exposition à une source électromagnétique pour renforcer l'hypothèse d'un lien de causalité entre les deux événements. Quand les douleurs sont

⁴⁷ « Etude de Cochin sur l'électrosensibilité ou chronique d'un résultat annoncé », Communiqué de presse Collectif des électrosensibles de France - Priartem – Le Lien, 16 février 2012 : http://www.priartem.fr/IMG/pdf/Communique_de_presse_-_Priartem_et_Collectif_EHS_160212_pour_site.pdf.

⁴⁸ « C'est à des signes, donc à la sémiologie, que psychiatrie et phénoménologie s'adressent d'un commun accord pour justifier leur emploi distinct des termes douleur et souffrance : on s'accordera donc pour réserver le terme douleur à des affects ressentis comme localisés dans des organes particuliers du corps ou dans le corps tout entier, et le terme souffrance à des affects ouverts sur la réflexivité, le langage, le rapport à soi, le rapport à autrui, le rapport au sens, au questionnement, etc. Mais la douleur pure, purement physique, reste un cas limité, comme l'est peut-être la souffrance supposée purement psychique, laquelle va rarement sans quelques degrés de somatisation. Ce chevauchement explique les hésitations du langage ordinaire » (Ricoeur 1994).

« soudaines et brutales » au contact d'une source, il est considéré comme évident que cette dernière en est la cause.

Ce qui fait preuve, à travers les témoignages du *corpus* de lettres, ce sont également les expériences que ces personnes sont amenées à conduire dans leur vie quotidienne qui viennent renforcer leur conviction. Il peut s'agir du constat que les symptômes diminuent voire disparaissent avec l'éloignement d'une source électromagnétique jugée nuisible, à l'occasion par exemple d'un déménagement, d'un changement de travail, ou d'une semaine de vacances. D'autres témoignages évoquent les améliorations en matière de bien-être apportées par l'aménagement du domicile ou du poste de travail, qui consiste le plus souvent à supprimer autant que faire se peut les sources électromagnétiques. C'est enfin le « soulagement immédiat » provoqué par l'utilisation de protections anti-ondes, comme le port d'un voile, qui est présenté comme une autre preuve du phénomène de l'EHS.

En outre, bien que les témoignages relatent des expériences personnelles, le caractère collectif du phénomène constitue souvent pour ces personnes la confirmation de la réalité de la maladie. Ainsi, c'est grâce à la comparaison avec les symptômes rapportés par des personnes se déclarant EHS (dans les associations ou sur les sites internet) que des individus en viennent à se reconnaître eux aussi comme EHS. La mention récurrente de symptômes partagés par d'autres permet de « désingulariser » son cas personnel et d'avancer un autre type de preuve, la « preuve par le nombre ».

Enfin, la mise en avant d'un savoir pratique et « profane » au sujet des effets des ondes n'empêche pas que l'autorité médicale soit mobilisée pour attester de la réalité du phénomène. Nombreuses sont les personnes qui précisent que l'hypothèse d'une intolérance aux champs électromagnétiques a été proposée par un médecin.

3.1.3 Les symptômes rapportés

Le thème du « tableau clinique » est systématiquement abordé dans les témoignages. Sans proposer de statistiques qui n'auraient guère de sens sur un échantillon de cette taille, les symptômes rapportés sont regroupés en trois catégories dans le Tableau 3 ci-dessous :

Tableau 3 : symptômes ou pathologies rapportés dans les lettres

Symptômes ou pathologies les plus fréquents	• troubles du sommeil, parfois insomnies totales, réveils soudains et douloureux • maux de tête violents • vertiges, nausées • problème de concentration et perte de mémoire • démangeaisons, eczéma, fourmillements dans les doigts • irritabilité, crise d'angoisse • acouphènes, sifflement dans l'oreille • douleurs cervicales • sensations d'échauffement ou de perforation de l'oreille • sensations de brûlure aux extrémités
Symptômes ou pathologies moins fréquents mais récurrents (moins mentionnés mais qui apparaissent à plusieurs reprises)	• malaises • saignements de nez • douleurs abdominales • troubles intestinaux • troubles cardiaques (palpitations) • dyslexie, aphasie, problème d'élocution • tension nerveuse et douleurs à la mâchoire
Symptômes ou pathologies plus rares (mentionnés dans un ou deux témoignages seulement)	• diabète • troubles de la vue • inflammation de la thyroïde • troubles de l'équilibre • crampes • intolérance à la chaleur • intolérance à la lumière naturelle • décharges électriques dans les bras et les jambes • confusion mentale • infarctus • hématomes • perte de cheveux

Remarque : les symptômes ou pathologies à l'intérieur de chacune des trois catégories ne sont hiérarchisés ni par fréquence, ni par gravité.

3.1.4 La découverte de l'EHS

En dépit de la singularité de chaque témoignage, et donc de l'hétérogénéité des situations, on peut distinguer deux grands modes de découverte de l'EHS. Dans un premier type de situation, l'EHS arrive au terme d'un questionnaire déjà ancien relatif à des maladies qui étaient jusque-là demeurées inexpliquées. Dans un deuxième type de situations, des symptômes apparaissent brutalement et sont immédiatement reliés à une exposition aux ondes.

3.1.4.1 La découverte d'une cause *a posteriori* : l'EHS comme « point d'arrivée »

Si nous avons évoqué plus haut le contraste entre un « avant » et un « après » l'EHS, cette rupture n'est cependant pas toujours nette selon les personnes. Beaucoup d'entre elles ne se déclarent EHS qu'après un long parcours de problèmes de santé inexpliqués et dont la prise en charge médicale n'a pas été jugée efficace. La découverte d'une possible intolérance aux champs électromagnétiques est alors l'aboutissement d'un long cheminement, marqué par de nombreuses consultations médicales, des traitements inefficaces, et un questionnaire permanent sur les causes énigmatiques des symptômes présentés par la personne malade (cf. liste de symptômes évoqués dans le Tableau 3).

Dans ce type de situation, la découverte de l'EHS n'est donc pas immédiate, ni évidente. Elle est le fruit d'un travail de déduction, de recoupements d'indices, d'expériences personnelles

accumulées. Elle résulte également de recherches et de lectures diverses sur le sujet qui fournissent d'abord une piste considérée comme plausible par les personnes, et qui finissent par emporter leur conviction sur le lien de causalité. Les différentes affaires évoquées dans la presse au sujet des antennes sont souvent l'occasion de prendre connaissance de l'EHS, de découvrir l'existence d'associations de personnes se déclarant EHS et la littérature produite sur le sujet.

Se reconnaître comme EHS apparaît alors parfois, dans certains témoignages, comme un soulagement. C'est une sorte de point d'arrivée. Ce diagnostic ne fait certes pas disparaître les symptômes, mais d'une certaine manière, il peut mettre fin à une incertitude parfois devenue insupportable.

3.1.4.2 L'EHS comme « point de départ »

Dans ce second type de trajectoire, la découverte de l'EHS est quasiment concomitante à l'apparition des symptômes. C'est un événement soudain, un choc brutal qui frappe des personnes qui déclarent ne pas présenter jusque-là de problèmes de santé particuliers. L'apparition de douleurs violentes est immédiatement reliée à une source d'exposition et, dans l'esprit de ceux qui en sont victimes, le lien de causalité ne fait guère de doute.

Par la suite, l'aggravation des symptômes, de même que les lectures sur le sujet, ne font que confirmer cette conviction initiale, tandis que la connaissance de cas similaires apporte un peu de soulagement : « [cela m'a fait] un bien fou de voir que je ne suis pas la seule et tout ça pouvait être déjà vécu par d'autres ».

Contrairement au cas précédent, l'EHS est ici un point de départ. C'est un basculement, le début d'une nouvelle vie. Loin d'apporter le moindre soulagement, le diagnostic posé par certains des médecins consultés suscite davantage de questions qu'il n'apporte de réponses, d'autant plus quand les examens médicaux relient l'EHS à d'autres formes d'intolérances (aux odeurs chimiques ou aux amalgames dentaires par exemple) (cf. § 3.8). Dans les témoignages, l'angoisse et le désarroi s'expriment alors sur la manière dont vont évoluer les symptômes et sur la façon d'y faire face au quotidien.

3.1.5 Vivre avec les symptômes de l'EHS

L'attitude des personnes se déclarant EHS vis-à-vis des symptômes et les « stratégies » mises en œuvre (notamment individuellement par les personnes) pour en amoindrir les effets sur la qualité de vie sont, bien entendu, fonction de leur gravité. D'une manière générale, la plupart des témoignages font état d'un quotidien marqué par de multiples stratégies d'évitement. Il peut s'agir, dans certains cas, de simplement limiter l'utilisation du téléphone mobile, dans d'autres de bannir complètement son usage ainsi que celui d'autres appareils (téléphones DECT, Wi-Fi). Cette stratégie d'évitement peut conduire certaines personnes à déménager pour élire domicile dans des zones rurales jugées moins exposées ou, à défaut, à multiplier les séjours en milieu non urbanisé dès que la possibilité se présente (une personne parle même de « fuite à la campagne »). Dans ces cas extrêmes, elle peut les conduire également à changer de travail, ou à quitter le marché du travail. L'évitement, ici, s'apparente à l'éloignement : éloignement des zones urbaines, des antennes, des endroits peuplés, des transports en commun, du lieu de travail, etc.

Dans les situations moins extrêmes, la gestion de l'EHS passe alors par des tentatives visant à réduire autant que possible les sources d'exposition, tant sur le lieu de vie que sur le lieu de travail. Certaines de ces personnes font l'objet de nombreux arrêts maladie et, parfois, entreprennent des démarches qui ne sont pas toujours couronnées de succès auprès de la famille, l'employeur, des collègues, des voisins, afin de les convaincre de remplacer les téléphones sans fil ou de couper le Wi-Fi.

Une troisième stratégie vise moins à s'éloigner des sources d'exposition ou les réduire qu'à s'en protéger, par exemple en entreprenant des travaux d'aménagement du domicile, d'ailleurs souvent jugés très coûteux, comme l'installation de rideaux anti-ondes ou l'achat de cages de Faraday. Cela passe aussi par le port de divers tissus anti-ondes ou d'autres accessoires plus atypiques tel qu'un « médaillon individuel *Méga-protect* ».

Enfin, pour diminuer les symptômes, ces personnes entreprennent très régulièrement de changer leurs habitudes alimentaires et, souvent sur recommandations médicales, d'y associer des compléments alimentaires (vitamine C, oméga 3, *Ginkgo biloba*, etc.). Par ailleurs, certaines d'entre elles expérimentent des médecines alternatives et complémentaires comme l'acupuncture. Les résultats de ces divers traitements ne sont pas décrits de manière très claire dans les courriers, même si un mieux-être provisoire est parfois évoqué.

3.1.6 Besoin de reconnaissance

Quels que soient les trajectoires et les modes de découverte de la maladie, la plupart des témoignages font apparaître un besoin de reconnaissance, tout d'abord vis-à-vis des professionnels de santé, ensuite à l'égard du statut de personne EHS.

3.1.6.1 Le rapport aux professionnels de santé

Dans la plupart des courriers étudiés, les médecins sont dénoncés pour leur méconnaissance de la maladie, leur incapacité explicative, et surtout leur tendance à privilégier une approche psychologisante du problème, laquelle s'accompagne parfois d'un certain mépris à l'égard des plaintes exprimées par les personnes se déclarant EHS.

Cela n'empêche pas que certains médecins soient considérés comme de véritables « héros » ou « résistants », et cela en dépit de traitements dont l'efficacité à long terme n'est jamais avérée dans les témoignages. Ces médecins sont alors les seuls à être qualifiés de « médecins indépendants ».

Par ailleurs, la critique des médecins s'accompagne souvent d'un désir de médicalisation. La plupart des personnes se déclarant EHS expriment ainsi le désir d'être « pris au sérieux » par le corps médical, et elles ne désespèrent pas d'obtenir grâce à la recherche scientifique et médicale, ainsi que grâce à un dialogue plus compréhensif avec les médecins, un traitement adapté à leurs problèmes de santé.

3.1.6.2 Le rapport au statut de « victime »

Ces personnes se considèrent comme victimes, mais essaient d'améliorer leur état en faisant appel à des solutions diverses.

D'un côté, ce que réclament la plupart du temps les personnes se déclarant EHS dans leurs témoignages, c'est la reconnaissance officielle d'un statut de victime. Cette reconnaissance serait à leurs yeux un premier pas, qui permettrait de nourrir l'espoir de bénéficier un jour de traitements adaptés et dans l'immédiat d'obtenir une prise en charge financière. Les difficultés financières engendrées par la maladie (consultations, traitements, travaux d'aménagement, perte d'emploi, etc.) sont d'ailleurs omniprésentes dans les témoignages. Les personnes se vivent donc comme des victimes, et tous les courriers évoquent une « détresse », un sentiment d'« impasse », un « cauchemar », un « isolement », une « incompréhension », etc.

Dans le même temps, les courriers font parfois apparaître d'autres manières, plus positives, de vivre en tant qu'EHS. D'une part, on l'a dit, la découverte de l'EHS apparaît dans certains cas comme une forme de soulagement : une personne évoque ainsi le « grand réconfort de mettre enfin un mot sur mes maux : l'EHS ». Le diagnostic met fin à une incertitude souvent devenue insupportable mais peut donner une réalité plus grande à la maladie. Une fois le diagnostic posé, c'est, au contraire, un sentiment de certitude qui est affiché par les personnes se déclarant EHS, quelles que soient les épreuves ultérieures (par exemple un déménagement qui ne résout en rien le problème ou des traitements qui se révèlent rapidement sans effet).

D'autre part, si la maladie est vécue comme un stigmate, ce dernier est parfois retourné et c'est alors le sentiment d'appartenir à une « avant-garde » qui s'exprime, comme dans ces quatre extraits :

« Aujourd'hui j'ai grandi, la vie m'a appris à ne pas en avoir honte [de l'EHS] et même au contraire je suis heureuse de le dire haut et fort car je fais partie de cette communauté de gens qui a envie que les choses bougent, qui n'a pas envie de se laisser diriger par les lobbies qui ne connaissent même pas le mot "prévention" ou "empathie" ».

« Nous sommes les premiers témoins et précurseurs d'une pathologie à venir. »

« Globalement je me heurte rarement au scepticisme quant à la relation de causalité posée entre mes symptômes et une exposition aux champs électromagnétiques. J'ajoute que j'ai appris à considérer l'incrédulité avec fatalisme puisque je sais que l'avenir me donnera raison. »

« J'ai constamment l'impression d'avoir deux ans d'avance sur des personnes qui en ont trois de retard. »

L'existence d'associations de personnes se déclarant EHS, en rompant l'isolement social de ces personnes, est sans doute pour beaucoup dans cette possibilité de retournement de la stigmatisation et ce sentiment d'être « en avance » sur le reste de la société. Beaucoup de témoignages mentionnent ainsi le courage des associations et les auteurs des courriers reconnaissent la chance qu'ils ont eu, grâce à elles, d'« écouter des personnes extraordinaires comme Étienne Cendrier⁴⁹ et Michèle Rivasi⁵⁰ ». Toutefois, si le rôle des associations est unanimement reconnu, c'est surtout qu'elles permettent d'avoir accès à l'information, qu'elles permettent à certaines personnes de comprendre ce qui leur arrive et, comme le dit l'une d'entre elles, de « faire avancer la machine ». Mais il n'est pas attendu des associations qu'elles fournissent des pistes de traitement, ni qu'elles aident à gérer au quotidien la maladie. C'est pourquoi, en définitive, c'est à l'État et à la recherche médicale que ces courriers ont été adressés.

3.2 Description des caractéristiques socio-démographiques des personnes se déclarant EHS

Le groupe de travail de l'Anses n'a pas eu connaissance d'étude spécifiquement consacrée aux caractéristiques socio-démographiques des personnes se déclarant EHS. Toutefois, il a pu collecter quelques données sur le sujet (notamment sur le genre, l'âge et le niveau éducatif des personnes se déclarant EHS) dans des études épidémiologiques qui les mentionnaient.

Le plus souvent des femmes

Les personnes se déclarant EHS recrutées dans les études sont en majorité des femmes. En effet, il y a 57 % de femmes dans l'article de Rössli *et al.* (2004), 73 % de femmes dans celui de Bergdahl *et al.* (2004), 54,5 % dans celui de Schreier *et al.* (2006), 68 % dans celui de Schooneveld et Kuiper (2007), 58,5 % dans celui de Landgrebe *et al.* (2008b), 72,3 % dans celui de Rössli *et al.* (2010), 80,9 % dans celui de Hagström *et al.* (2013) et 72,5 % dans celui de Dieudonné (2016).

On retrouve également cette tendance dans le corpus de lettres étudiées par Barthe au § 3.1 : cinquante-quatre des soixante-quatre lettres (soit 84,4 %) ont été écrites par des femmes.

Un âge moyen souvent supérieur à 45-50 ans

Dans la majorité des études, l'âge moyen des personnes se déclarant EHS est supérieur à 50 ans au moment de l'étude : 51 ans dans l'article de Rössli *et al.* (2004), 50,5 ans dans celui de Landgrebe *et al.* (2008b), 55,4 ans dans celui de Hagström *et al.* (2013), 58,5 ans dans celui de Baliatsas *et al.* (2014) et 51 ans dans celui de Dieudonné (2016).

Lorsque l'âge des auteurs des lettres du corpus (cf. § 3.1) est précisé, il est souvent supérieur à 45 ans.

Un niveau éducatif généralement supérieur

Dans les études, les personnes se déclarant EHS sont généralement de niveau éducatif supérieur à celui de la population générale. Dans l'article de Rössli *et al.* (2004), 40 % des personnes se déclarant EHS ont fait des études supérieures, contre 17 % des témoins ($p < 0,001$). Dans l'article de Van Dongen *et al.* (2014), 52,7 % des personnes appartenant à une association d'EHS ont fait

⁴⁹ Etienne Cendrier est membre fondateur et porte-parole de l'association Robin des Toits.

⁵⁰ Michèle Rivasi est députée européenne, membre d'Europe Écologie Les Verts (EELV).

des études supérieures ; ce pourcentage est significativement différent ($p < 0,05$) de celui des autres groupes, à savoir 22,2 % parmi les personnes se déclarant EHS mais n'appartenant pas à une association et 26 % parmi les témoins. De même, dans l'article de Schröttner et Leitgeb (2008), 12,0 % des personnes se déclarant EHS ont fait des études universitaires, mais seulement 9,5 % des témoins.

Seul l'article de Rösli *et al.* (2010) fait figure d'exception, avec 37,7 % des personnes du groupe se déclarant EHS ayant fait des études supérieures, contre 48,5 % chez les témoins ($p < 0,01$).

Des résultats divergents et peu documentés concernant le statut marital

Dans l'article de Rösli *et al.* (2004), les personnes se déclarant EHS étaient moins fréquemment mariées (52 %) que les témoins (58 %, $p < 0,005$). Dans celui de Dieudonné (2016), 50 % de ces personnes vivaient en couple (marié ou non).

À notre connaissance, aucune étude ne s'est intéressée spécifiquement aux caractéristiques socio-économiques des personnes se déclarant EHS, ni aux événements déclenchant ou aux antécédents personnels ou familiaux. Les données présentées ci-dessus donnent des tendances convergentes (âge, genre et niveau d'études), mais cela n'a pas été conforté par des analyses statistiques approfondies.

Professions

Des membres du Comité de dialogue « Radiofréquences et santé » de l'Anses ont évoqué un éventuel risque pour certaines professions (« *comme le journalisme* ») d'être particulièrement exposées aux champs électromagnétiques des moyens de communication sans fil.

Il n'y a aucune information au sujet d'un éventuel lien entre certaines professions et l'EHS dans les articles analysés par le groupe de travail.

3.3 Sources de champs électromagnétiques et EHS

3.3.1 Les sources classiquement considérées comme cause de leurs symptômes fonctionnels par les personnes se déclarant EHS

L'enquête européenne de 1997 (Bergqvist et Vogel, 1997) avait mis en évidence des différences prononcées entre pays dans l'attribution des symptômes à une source spécifique. Deux enquêtes par questionnaire réalisées en Suède, en 2002, et en Suisse, en 2004, illustrent bien ce phénomène. Les principales sources d'exposition étaient, dans la première, les *visual display unit* (VDU) (ou écran de visualisation [d'ordinateur]) (62 %), les écrans de télévision (54 %), les lumières fluorescentes (70 %) et les ampoules électriques (24 %) et, dans la seconde, les stations de base (74 %), les téléphones mobiles (36 %), les téléphones sans fil (29 %) et les lignes électriques (27 %).

Le Tableau 4 rassemble quelques données publiées depuis. Comme pour les symptômes fonctionnels (*cf.* Tableau 10), on note une grande hétérogénéité entre les résultats des différentes études. Les études sont difficilement comparables d'un pays à l'autre, en raison de leurs méthodologies différentes (les questions posées sont différentes), de l'évolution des technologies au cours du temps (par exemple, les écrans cathodiques qui ont été à l'origine de la description de l'EHS ont quasiment disparu). De plus, les relations entre les symptômes et les sources d'exposition n'ont pas été étudiées.

Tableau 4 : sources de champs électromagnétiques (en %) considérées comme causes de symptômes fonctionnels par les personnes se déclarant EHS

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
	Suède, 2002	Suisse		Autriche, 2008	Pays-Bas, 2008	Finlande, 2013	France, 2016
		2004	2006				
Écrans d'ordinateur	62		20,8	50		61,3	15
Écrans TV, TV	54			35	55	53,6	
Lampes fluorescentes	70			6	32	54,6	22,5

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
	Suède, 2002	Suisse		Autriche, 2008	Pays-Bas, 2008	Finlande, 2013	France, 2016
		2004	2006				
Lampes électriques	24						
Stations de base		74	12,9	77		42,3	70
Téléphones mobiles		36	24,8	46		63,4	60
Téléphones DECT		29		11	27		50
Lignes électriques		27	28,4	79		52,6	
Relais TV-radio			15,0	11			
Ordinateurs				41	40	47,9	20
Fours micro-ondes				34		39,7	
Installation électrique				21			
Radio-réveil				14			
Appareillage ménager				9			45
Veille bébé				5			
Lampes halogènes				3	33		
Techno. GSM/UMTS					42		
Bluetooth					16		
Wi-Fi					15		85
Ventilateur plafond					9		
Ecrans LCD					14		
Répondeurs téléphon.					12		
Plusieurs sources			20,0		49		
Voitures						39,7	10
Autres							17,5

Légende : les valeurs en **gras** sont celles correspondant à la source la plus citée de l'étude.

Source : D'après les articles de : (1) (Stenberg *et al.* 2002) ; (2) (Röösli *et al.* 2004) ; (3) (Schreier, Huss, and Röösli 2006) ; (4) (Schröttner and Leitgeb 2008) ; (5) (Schooneveld 2007) ; (6) (Hagström, Auranen, and Ekman 2013) ; (7) (Dieudonné 2016).

Lors de son audition, le Dr Choucroun a déclaré que les sources de champs électromagnétiques les plus fréquemment rapportées par les patients qui disent mal les supporter sont principalement le Wi-Fi, les téléphones DECT, la téléphonie mobile et que, quand les troubles s'aggravent, les patients se plaignent également du réseau d'alimentation électrique (extrêmement basses fréquences).

Récemment, Hagström *et al.* (2013) ont interrogé par voie postale 395 personnes se déclarant EHS. Le protocole général de l'étude est décrit au § 6.1.1.1. Le questionnaire a porté sur les symptômes, les sources incriminées dans leur apparition et les divers traitements et mesures essayés pour améliorer leur état de santé. Parmi les sources d'exposition, les auteurs ont distingué (1) celles qui ont été perçues par ces personnes comme étant à l'origine de leurs premiers symptômes, (2) celles qui ont été incriminées pendant la phase aiguë et (3) celles incriminées après cette phase. Cent quatre-vingt-cinq personnes ont répondu à ces questions (soit un taux de participation de 46,8 %).

- À l'origine des premiers symptômes, les sources les plus fréquemment incriminées ont été : les ordinateurs personnels (50,8 %), les téléphones mobiles (47,0 %), les sources lumineuses (21,1 %), les télévisions (14,6 %) et les antennes de téléphonie mobile (7,0 %) ;
- pendant la phase aiguë, ont été incriminées : les téléphones mobiles GSM (63,4 %), les écrans d'ordinateur personnel (61,3 %), les lumières fluorescentes (54,6 %), les télévisions (53,6 %) et les lignes haute tension (52,6 %) ;
- après la phase aiguë, ont été incriminées : les téléphones mobiles GSM (66,5 %), les lumières fluorescentes (58,2 %), les ordinateurs de bureau (50,0 %), les écrans d'ordinateur personnel (49,5 %), les lignes haute tension (46,4 %) et les unités centrales d'ordinateur personnel (44,8 %).

Malgré ses limites méthodologiques (questionnaires envoyés et retournés par voie postale, taux de réponse de 46,8 %), cette étude montre que les sources perçues comme étant à l'origine des premiers symptômes ne sont pas toujours les mêmes que celles qui sont incriminées pendant et après la phase aiguë, alors que les sources incriminées pendant ces deux phases ne diffèrent que légèrement.

3.3.2 Imagerie par résonance magnétique (IRM) et EHS

Aucun des articles ou contributions évoqués au paragraphe précédent (§ 3.3) ne mentionne l'imagerie par résonance magnétique (IRM) parmi les sources considérées comme cause de leurs symptômes par les personnes se déclarant EHS. Toutefois, le groupe de travail a relevé que cette technique posait problème à de nombreuses personnes se déclarant EHS et que certaines d'entre elles refusaient a priori de s'y prêter. Il a donc considéré utile de s'y intéresser.

Mise au point dans les années 1970, l'IRM a connu, au cours des trente dernières années, des améliorations techniques considérables, qui ont permis le développement d'une large gamme de techniques d'imagerie médicale. Ces techniques sont aujourd'hui irremplaçables, car elles sont les seules à permettre l'obtention d'images morphologiques et fonctionnelles du système nerveux central (cerveau et moelle épinière), des muscles, du cœur et des tumeurs. Il est donc important de savoir quelles sont précisément les éventuelles précautions à prendre et contre-indications à respecter chez les personnes se déclarant EHS, afin de ne pas les priver de ces examens performants.

L'IRM utilise trois types de champs électromagnétiques (cf. Annexe 1) :

- des champs magnétiques statiques intenses ;
- des gradients de champs magnétiques compris entre 100 et 1 000 Hz (utilisés pour sélectionner l'épaisseur et le plan de coupe et déterminer la localisation des signaux dans ce plan, ils sont à l'origine des bruits qui constituent l'effet indésirable le mieux établi des examens IRM) ;
- des champs électromagnétiques radiofréquences compris entre 10 et 400 MHz.

À noter que ces appareils sont extrêmement sensibles aux champs électromagnétiques externes et ne peuvent fonctionner correctement que s'ils sont placés dans des cages de Faraday. De ce fait, les personnes qui se prêtent à ces examens et celles qui les réalisent sont exposées, pendant toute la durée de la procédure, à un environnement électromagnétique entièrement différent de l'environnement habituel.

Un premier bilan de ses effets biologiques et des mesures de sécurité proposées pour éviter les effets nocifs de l'IRM a été fait après une vingtaine d'années d'usage (Shellock & Cruess, 2004). Les auteurs de ce bilan ont créé un site Web (*MRISafety.com*) pour poursuivre cette question avec des mises à jour régulières. Ni cet article, ni ce site ne donnent la moindre information sur les effets de l'IRM chez les personnes se déclarant EHS. Sur ces bases, des listes de contre-indications à la réalisation d'IRM à peu près identiques ont été adoptées dans la plupart des centres d'imagerie⁵¹. Aucune de ces recommandations ne mentionne l'EHS parmi ces contre-indications.

⁵¹ Ces listes comprennent la présence de métaux dans le corps (clips vasculaires cérébraux, corps étrangers ferro-magnétiques, valves cardiaques non compatibles – les clips caves inférieurs, les clips de trompe de Fallope, les stents coronaires demandent des précautions), les dispositifs biomédicaux (stimulateurs cardiaques et défibrillateurs, pompes à insuline, neurostimulateurs, certains patchs contenant de l'aluminium) et, en ce qui concerne l'état du patient, l'impossibilité à rester allongé (insuffisance cardiaque ou respiratoire), l'impossibilité à rester immobile (mais les examens peuvent être réalisés sous sédation ou anesthésie générale avec un matériel spécial IRM), la claustrophobie (même remarque que dans le cas précédent) et, si utilisation de produit de contraste (gadolinium), allergie au produit, insuffisance rénale sévère, grossesse et allaitement.

Une enquête multicentrique récente, portant sur 66 professionnels travaillant avec ou autour d'un appareil IRM de 7 Tesla (23 femmes et 43 hommes, âge moyen : 31 ± 7 ans) a montré que 98,5 % d'entre eux avaient un sentiment positif ou neutre en ce qui concernait la sécurité du travail avec ces appareils (Fatahi, Demenescu, and Speck 2016). Toutefois, ces professionnels ont rapporté des symptômes (sur une liste de 20) dont les plus fréquents ont été les vertiges (41 sujets, dont 4 s'en plaignant de façon permanente) et un goût métallique (34 sujets, dont 3 s'en plaignant de façon permanente).

Aucun article scientifique ne s'est intéressé directement aux effets des IRM chez les personnes se déclarant EHS. Cependant, on sait que plusieurs études font état d'IRM réalisées chez ces personnes et ne signalent pas la survenue d'effets indésirables (Landgrebe *et al.*, 2008a ; McCarty *et al.*, 2011 ; Belpomme *et al.*, 2015).

3.4 Un diagnostic à établir : liste de symptômes et questionnaires utilisés

Pour la plupart des maladies bien individualisées, la médecine basée sur les preuves (*evidence based medicine*, EBM) distingue, d'une part, les critères de diagnostic, destinés à la pratique clinique courante, et d'autre part, des critères de classification, destinés à la recherche clinique (Aggarwal *et al.* 2015).

Les premiers sont un ensemble de signes, de symptômes et de tests mis au point pour orienter et guider les soins délivrés à une personne malade, alors que les seconds sont des définitions standardisées, dont le but principal est de permettre aux recherches cliniques de porter sur des cohortes de sujets homogènes (Aggarwal *et al.*, 2015). Les premiers doivent avoir une spécificité et une sensibilité les plus élevées possibles, alors que les seconds doivent avoir une spécificité très élevée, aux dépens éventuellement de la sensibilité (Aggarwal *et al.*, 2015).

En ce qui concerne l'EHS ou IEI-CEM, quelle que soit la terminologie utilisée et quelles que soient les caractéristiques des expositions mises en cause, les descriptions cliniques continuent à relater de nombreux symptômes, d'une grande diversité, mais courants et non-spécifiques et qui ne se recoupent que partiellement (*cf.* comparaison des symptômes utilisés pour le diagnostic de l'EHS dans quatre questionnaires différents en Annexe 1). En conséquence, il n'a pas été possible de décrire un ou plusieurs tableau(x) caractéristique(s), soit pour l'ensemble des expositions, soit pour certaines d'entre elles. Ces descriptions ne mentionnent pas d'anomalie caractéristique aux examens cliniques physiques, biologiques et d'imagerie médicale. Enfin, l'EHS revêt des degrés de gravité très différents mais, à la connaissance du groupe de travail « Radiofréquences et santé », très peu d'articles publiés, analysés dans la présente expertise, en ont tenu compte.

Il n'existe donc actuellement aucun questionnaire scientifiquement validé pour faire un diagnostic médical fiable ou permettant de recruter des personnes se déclarant EHS pour les études cliniques ou épidémiologiques, comme il en existe pour le syndrome d'intolérance aux odeurs chimiques (SIOC) et pour la plupart des syndromes médicalement inexpliqués (*cf.* § 3.8 sur le lien entre les différents syndromes d'intolérances environnementales et d'autres maladies médicalement inexpliquées). Cela pose la question de la représentativité des populations étudiées et de l'interprétation de ces études (*cf.* réflexion sur les limites des études de provocation au § 6.2.3). Cette observation, notée dans le rapport Afsset (2009), vaut aujourd'hui encore au regard des publications scientifiques, sans porter un jugement sur les efforts accomplis pour tenter de répondre à ce défi de la connaissance.

3.4.1 Les critères de diagnostic

Concernant les critères de diagnostic (pour la pratique médicale courante), les références restent celles des rapports d'experts : « un phénomène au cours duquel des personnes ressentent des effets néfastes pour leur santé quand ils utilisent ou sont à proximité d'appareils émettant des champs électriques, magnétiques ou électromagnétiques » (Bergqvist et Vogel, 1997) ; « un trouble acquis caractérisé par de nombreux symptômes récurrents, attribués à une exposition à

des champs électromagnétiques tolérés par la majorité des gens et non expliqués par aucune affection médicale, psychiatrique ou psychologique connue. » (Mild et al. 2006).

3.4.1.1 Propositions de diagnostic sur la base de techniques d'exploration fonctionnelle

Récemment, deux propositions (Tuengler and von Klitzing 2013, Belpomme, Campagnac, and Irigaray 2015) ont été faites pour porter le diagnostic d'EHS sur la base de techniques d'exploration fonctionnelle, qui pourraient servir de critères d'inclusion dans les études :

- Tuengler et von Klitzing (2013) ont émis l'hypothèse que des modifications du système nerveux autonome se produisant sous l'effet d'une exposition à des radiofréquences pourraient être spécifiques des personnes se déclarant EHS et permettraient de les distinguer des sujets attribuant leurs symptômes à une telle exposition, mais ayant en fait une autre cause à leur symptomatologie. Sur la base de leur expérience, les auteurs ont proposé d'enregistrer simultanément trois paramètres : la variabilité de la fréquence cardiaque (*heart rate variability*, HRV), la circulation sanguine capillaire et les potentiels électriques de la peau de l'avant-bras. Si ces auteurs ont décrit succinctement leurs techniques et ont présenté quelques enregistrements typiques, ils n'ont donné aucune information sur les sujets qu'ils ont explorés et n'ont fourni aucun résultat détaillé. Les auteurs discutent les résultats négatifs obtenus par d'autres auteurs, formulent une hypothèse et proposent des critères phénotypiques sensés permettre d'identifier les personnes se déclarant EHS, mais ne produisent pas de nouveaux résultats (*cf.* analyse détaillée de l'article au § 6.2.1.2.3). Si l'on se réfère aux autres études des effets des radiofréquences sur le système nerveux autonome (*cf.* § 7.4), leur hypothèse paraît à ce jour non étayée et non vérifiée.
- Belpomme *et al.* (2015) ont déclaré avoir observé des anomalies de la tomosphygmographie ultrasonore pulsée (ou « encéphaloscan ») chez toutes les personnes se déclarant EHS, MCS (*multiple chemical sensitivities*, équivalent du terme SIOC en français) et EHS / MCS retenues dans leur étude. Cependant, la technique, le protocole de mesure et les valeurs de référence utilisés par les auteurs n'ont pas, à ce jour, fait l'objet d'une publication dans un journal scientifique à comité de lecture. Par ailleurs, cette technique et ce protocole ne sont pas décrits suffisamment dans l'article lui-même pour que l'étude puisse être répliquée indépendamment par d'autres équipes de recherche (*cf.* analyse détaillée de l'article au § 6.1.2 et en Annexe 4). Il est dès lors impossible, à ce stade, de considérer les résultats de cette technique comme permettant un diagnostic médical de l'EHS.

Le groupe de travail de l'Anses regrette que ni le Pr. von Klitzing, ni le Pr. Belpomme n'aient accepté d'être auditionnés pour répondre aux questions qu'il souhaitait leur poser au sujet de l'EHS et de son diagnostic (*cf.* précisions à ce sujet au § 4.1.2.2).

3.4.1.2 Propositions de diagnostic sur la base de tests biologiques

Belpomme *et al.* (2015) ont dosé jusqu'à 11 biomarqueurs chez 727 patients se déclarant EHS, mais reconnaissent qu'aucun d'entre eux n'est spécifique de l'EHS (voir p. 259 de l'article) (*cf.* analyse détaillée de l'article au § 6.1.3 et en Annexe 4).

Belayev *et al.* (EUROPAEM, 2016) ont également proposé de caractériser l'EHS en concentrant les analyses, entre autres, sur 71 marqueurs sanguins, urinaires et salivaires (cette revue est présentée au § 3.4.1.3) (Belayev *et al.* 2016), mais sans donner de justification au choix de ces marqueurs.

À la connaissance du groupe de travail, aucune mesure des constantes physiologiques ni aucun test biologique n'est apparu à ce jour comme pouvant entrer dans la constitution d'un ensemble de critères permettant un diagnostic fiable.

3.4.1.3 Autres propositions de diagnostic empirique

Face à ces difficultés, le groupe de travail s'est aussi intéressé aux critères et / ou procédures de diagnostic (non validés scientifiquement) utilisés par des praticiens médicaux prenant en charge

des patients se déclarant EHS et auditionnés au cours de l'expertise. Ces critères et procédures pourraient suggérer quelques pistes de recherche :

- Le Docteur Dominique Dupas est Maître de conférences des universités (MCU) à la Faculté de médecine de Nantes et responsable de la Consultation de pathologie professionnelle et environnementale du CHU de Nantes. Elle y reçoit surtout des patients se plaignant du syndrome d'intolérance aux odeurs chimiques (SIOC), ainsi que quelques personnes se déclarant EHS. Elle rapporte ne pas avoir observé de différence de symptomatologie entre ces deux groupes de patients. Pour elle, la différence fondamentale entre SIOC et EHS est que le médecin doit faire le diagnostic de SIOC (les patients ayant rarement fait le lien entre les odeurs et les symptômes), alors que les personnes se déclarant EHS proposent d'emblée leur diagnostic. Dans les deux cas, les examens cliniques et complémentaires sont habituellement normaux et elle constate très souvent des traits de caractère favorisant, tels que anxiété, phobies, préjugé négatif vis-à-vis des produits chimiques et sympathie pour l'écologie, mais il n'y a pas de pathologie mentale. Elle prend soin d'éliminer un asthme, un syndrome du bâtiment malsain, un syndrome d'hyperventilation ou des crises d'attaque panique. Elle confirme le diagnostic de SIOC au moyen de l'auto-questionnaire « *Quick Environmental Exposure and Sensitivity Inventory* »⁵² (QEESI, Miller & Prohida, 1999). Cependant, elle n'a pas de questionnaire équivalent pour l'EHS [cf. Audition du D^r Dupas].
- Le Docteur Pascale Choucroun, praticien-hospitalier (PH) au Centre de ressources des maladies professionnelles et environnementales du CHU de Brest déclare avoir adopté une prise en charge globale des personnes se déclarant EHS qui consiste, lorsqu'elle est contactée par un(e) patient(e), à faire d'abord un bilan comprenant trois volets [cf. Audition du D^r Choucroun] :
 - 1) trois questionnaires portant (a) sur l'histoire de la maladie, y compris les facteurs de variation de la symptomatologie, et les antécédents, (b) sur l'alimentation et (c) sur l'habitat ;
 - 2) l'analyse des copies des résultats de biologie et des comptes-rendus des consultations médicales spécialisées, y compris ceux qui sont bien antérieurs à l'apparition de l'EHS ;
 - 3) la prescription de bilans sanguin et urinaire, ainsi que des prélèvements de bouche et de selles pour une recherche microbiologique (analyse cytot bactériologique, recherche de *Candida albicans* et autres levures et recherche de parasites uniquement dans les selles).

Puis, le D^r Choucroun fait une synthèse de l'ensemble de ces données, auxquelles vient s'ajouter un examen clinique si le patient habite assez près de Brest pour venir en consultation. Cette synthèse est ensuite adressée au patient, accompagnée d'une liste de recommandations personnalisées pour améliorer la qualité de son environnement (réduction des expositions), de son alimentation et de son hygiène de vie. Une prescription thérapeutique, limitée aux déterminants spécifiques de l'EHS chez ce patient, peut être associée si besoin, « *sans jamais empiéter sur les prérogatives du médecin traitant* ».

Ces deux démarches (celles des D^{rs} Dupas et Choucroun) sont celles que tout médecin, confronté à une situation d'incertitude, adopte pour maintenir une relation de confiance. Elles ont le mérite d'investiguer différents déterminants de pathologies ou de symptômes fonctionnels aspécifiques.

- Les Docteurs Tournesac et Rosa, médecins généralistes, ostéopathes, ont décrit un certain nombre de points sensibles, ainsi qu'un « *talonnement des deux côtés* », d'après eux, caractéristiques des personnes se déclarant EHS. Ils ont aussi observé qu'une dermalgie para-ombilicale apparaît en présence d'un téléphone mobile chez ces mêmes personnes. Ces constatations empiriques ouvrent une perspective intéressante à explorer.

⁵² Voir note de bas de page n°67, p. 62.

Une autre démarche qui a retenu l'attention du groupe de travail est celle proposée dans les lignes directrices pour le diagnostic des maladies liées aux champs électromagnétiques, adoptées le 3 mars 2012 par l'Association des médecins régionaux et un groupe de travail de l'Association des médecins d'Autriche (Austrian Medical Association 2012). Ce guide propose au praticien une démarche pour permettre le diagnostic et le traitement des problèmes de santé et des maladies liées aux champs électromagnétiques en éliminant d'abord les autres causes possibles pouvant expliquer les symptômes ressentis. Le guide recommande une approche diagnostique en 5 étapes :

1. antécédents de santé et historique des expositions aux champs électromagnétiques. Cette étape consiste en un questionnaire composé de trois séries de questions (a, b et c) :
 - a. la liste des symptômes, avec une évaluation de la fréquence (5 niveaux : de jamais à très souvent) et de l'ancienneté de 24 symptômes ;
 - b. la variation des problèmes de santé dans le temps et l'espace ;
 - c. l'évaluation de l'exposition aux champs électromagnétiques au domicile et au travail (sur l'usage du téléphone mobile, du téléphone sans fil DECT, du *bluetooth*, etc.) ;
2. examen et conclusions (tests du système cardiovasculaire, analyse sanguine, etc.) ;
3. mesure de l'exposition aux champs électromagnétiques (RF et BF) ;
4. prévention ou réduction de l'exposition aux champs électromagnétiques ;
5. diagnostic.

Selon ce guide, le « diagnostic » de l'EHS est essentiellement basé sur l'histoire du patient et en particulier sur les corrélations entre les problèmes de santé et les moments et les lieux d'exposition aux champs électromagnétiques, et sur la progression des symptômes dans le temps. Les mesures d'exposition aux champs électromagnétiques et les résultats de tests diagnostiques (tests biologiques, système cardiovasculaire) servent en outre à soutenir le « diagnostic ». Ce guide propose ensuite une prise en charge du patient, des conseils pour réduire son exposition dans son environnement quotidien, et des suggestions de traitements, sans justification ni évaluation scientifique. Ce document, même s'il ne s'agit pas d'une publication scientifique, est vraisemblablement le plus élaboré concernant l'approche diagnostique des personnes se déclarant EHS. Ce type d'approche n'a fait l'objet, jusqu'à présent, que d'une ébauche de validation (Brand *et al.* 2009) et mériterait de faire l'objet d'études cliniques.

Suivant le même type de démarche, un groupe dénommé « EUROPAEM – EMF » a également proposé un diagnostic de l'EHS essentiellement basé sur l'histoire médicale du patient (Belyaev *et al.* 2016)⁵³, en s'intéressant à tous les symptômes et leurs occurrences spatio-temporelles, ainsi qu'au contexte des expositions aux champs électromagnétiques. Les auteurs ont proposé une approche diagnostique en plusieurs étapes :

- un bilan médical comprenant de nombreux tests (6 tests fonctionnels, 71 marqueurs sanguins, urinaires, salivaires et 6 tests de provocation utilisant des stimulations diverses de durées variables) ;
- des tests de sensibilité individuelle basés sur des marqueurs enzymatiques de détoxification, d'intégrité mitochondriale et de stress ;
- la réalisation de mesures des expositions (au domicile et au travail) (Belyaev *et al.* 2016).

Le choix de ces différents marqueurs et tests n'est pas argumenté. Par ailleurs, les auteurs ont également proposé un traitement des patients incluant seize actions, qui sont chacune des hypothèses car leur efficacité n'a pas été démontrée (Belyaev *et al.* 2016).

⁵³ Belyaev *et al.* ont d'abord publié une première version de leur revue (Belyaev *et al.* 2015a). Cependant, l'article a été retiré par l'éditeur du fait d'erreurs de références dans le texte (Belyaev *et al.* 2015b). C'est donc la version de 2016 qui est commentée ici.

3.4.2 Les critères de classification

Concernant les critères de classification (pour la recherche), plusieurs tentatives ont été faites pour tenir compte, soit des différentes sources d'exposition, soit des différences de terminologie ou de mode de recrutement, soit de la sévérité de la symptomatologie. Cependant, aucune de ces tentatives n'a abouti à l'élaboration d'un protocole appliqué par des équipes autres que celles qui les ont conçues. Parmi les sources d'exposition, seuls les écrans cathodiques (qui ont pratiquement disparu aujourd'hui) ont été mis en relation avec des symptômes caractéristiques (symptômes cutanés de la face) (Linden and Rolfsen 1981, Nilsen 1982, Tjonn 1984). Plusieurs études ont été conduites sur des personnes se déclarant sensibles à la téléphonie mobile, soit prises isolément, soit en comparaison avec des personnes également sensibles aux extrêmement basses fréquences.

Par ailleurs, seule l'équipe de Rösli *et al.* (2010) (*cf.* analyse de l'article au § 6.1.1.2) a utilisé la terminologie comme critère de classification, comparant des personnes se déclarant EHS à d'autres se déclarant gênées par les champs électromagnétiques, mais ne se qualifiant pas d'EHS. Une autre équipe (van Dongen *et al.*, 2014, *cf.* analyse de l'article au § 6.1.1.2) a comparé deux groupes de personnes se déclarant EHS recrutées les unes directement dans la population générale (*via* un panel de consommateurs) et les autres par l'intermédiaire d'une association. Toutefois, il n'existe pas, à notre connaissance, de publication ayant étudié les relations éventuelles entre les modalités de recrutement (par l'intermédiaire d'une association ou pas) et la terminologie employée par les personnes pour désigner leurs troubles.

Enfin, pour tenir compte de la sévérité de la symptomatologie, Frick *et al.* (2006) et Eltiti *et al.* (2007a) ont proposé d'ajouter aux critères de diagnostic classiques (*cf.* § 3.4.1 ci-dessus) un critère quantitatif calculé en faisant la somme des notes attribuées à des symptômes figurant sur une liste préétablie. Frick *et al.* (2006) ont utilisé une liste de 36 symptômes notés de 1 à 4 sur une échelle à 4 niveaux (0 = pas du tout ; 1 = un peu ; 2 = modérément ; 3 = fortement) en fonction de leur sévérité au cours des 4 semaines précédentes, et choisi comme critère d'inclusion un score global d'au moins 19, correspondant au tiers supérieur observé dans la population générale (*cf.* présentation de l'échelle de Ratisbonne en Annexe 7) (Frick *et al.* 2006a, Frick *et al.* 2006b). Eltiti *et al.* (2007a) ont utilisé une liste de 57 items notés de 0 à 4 sur une échelle à 5 niveaux (0 = pas du tout ; 1 = un peu ; 2 = modérément ; 3 = moyennement ; 4 = beaucoup) en fonction de leur sévérité pendant une période indéterminée, et choisi comme critère d'inclusion un score global d'au moins 26, correspondant au quart supérieur des notes observées dans la population générale. Ce type de procédure permet de ne pas recruter les personnes ne présentant qu'une symptomatologie très faible et, ainsi, d'améliorer en partie l'homogénéité des groupes étudiés, sans toutefois résoudre entièrement cette question. De plus, cette méthode repose sur des questionnaires fermés, souvent adressés par la poste ou soumis par téléphone et a pour effet d'obtenir un taux de réponse assez faible (Eltiti *et al.* 2007a).

À la connaissance du groupe de travail de l'Anses, Tseng *et al.* (2011) ont été les seuls auteurs à interroger directement les personnes se déclarant EHS (n = 170) sur leur état de santé global et à les classer en quatre groupes selon la sévérité de leurs symptômes : légers (n = 16), modérés (n = 97), sévères (n = 41) et extrêmement sévères (n = 16). Ces auteurs ont ainsi pu montrer l'existence de différences de morbidité psychiatrique entre les 4 groupes de sujets (*cf.* présentation de l'article au § 3.5 et analyse au § 7.6).

Perspectives

Les approches méthodologiques développées par Frick *et al.* (2006), Eltiti *et al.* (2007a) et Tseng *et al.* (2011) méritent d'être approfondies et peuvent constituer une base utile pour la mise au point d'un protocole visant à mieux décrire et améliorer la prise en compte de la sévérité de la symptomatologie de l'EHS.

Par ailleurs, fin 2017, l'Anses mettra en œuvre un projet d'investigation exploratoire visant à « améliorer le recueil des données cliniques pour l'étude de l'hypersensibilité aux champs électromagnétiques » selon une méthodologie en partie comparable à celle de Dieudonné (2016)

(cf. présentation de l'article au § 6.1.1.1). Ce projet devrait, entre autre, permettre d'aboutir à une meilleure caractérisation clinique des symptômes fonctionnels des EHS.

3.5 Estimations des pourcentages de personnes déclarant une sensibilité aux champs électromagnétiques dans différents pays

3.5.1 Données françaises

Le groupe de travail de l'Anses n'a pas eu connaissance d'études sur la prévalence⁵⁴ de l'EHS en France en population générale. Cependant, des évaluations indirectes existent.

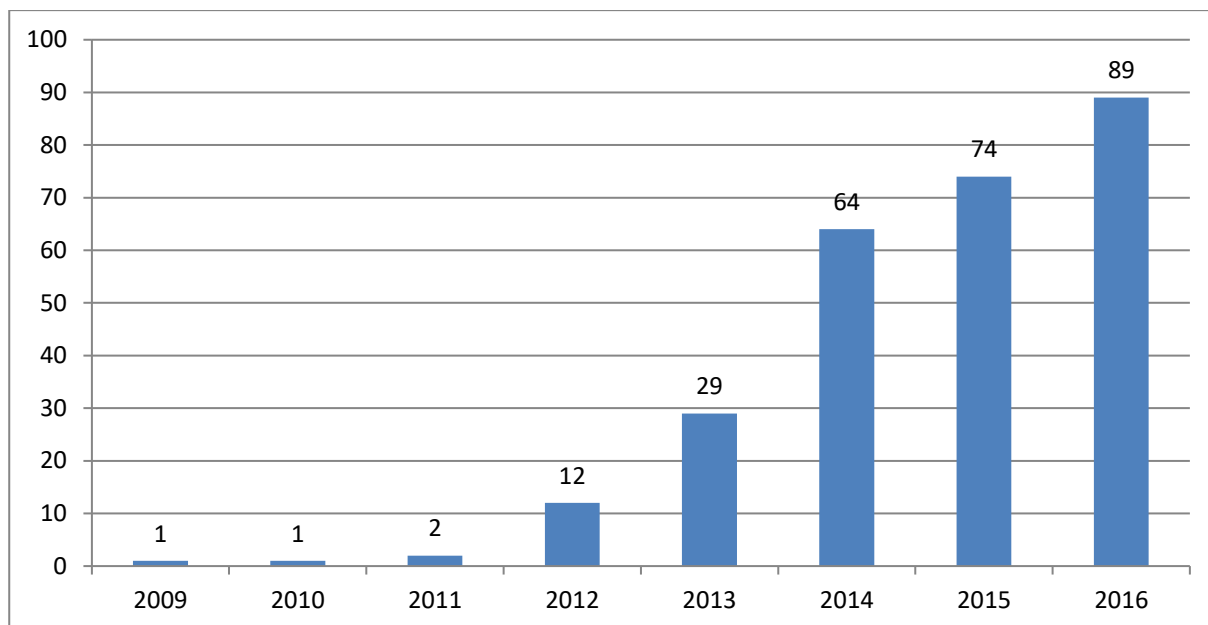
Par exemple, le collectif « Une terre pour les EHS » a mis en ligne sur son site Internet un questionnaire permettant aux personnes de s'auto-déclarer EHS. Le 18 juillet 2016, 1 355 personnes se déclarant EHS s'étaient ainsi recensées.

Belpomme *et al.* (2015) ont étudié 1 216 personnes se déclarant EHS et / ou SIOC et réalisé des analyses biologiques sur 521 personnes se déclarant EHS et 154 personnes à la fois EHS et SIOC (Belpomme, 2015) (cf. analyse de l'article au § 6.1.3 et en Annexe 4).

Une extraction des données du réseau national de vigilance et de prévention des pathologies professionnelles (RNV3P⁵⁵) de l'Anses a été réalisée sur 7 années de collecte consécutives (du 1^{er} janvier 2009 au 31 décembre 2016) pour étudier l'IEI-CEM. Ont été retenus uniquement les cas pour lesquels le code « U09 » (spécifiquement créé pour identifier les personnes se déclarant EHS) a été utilisé. Les personnes venues consulter pour des symptômes qu'elles relient à leurs expositions aux ondes électromagnétiques, mais pour lesquelles le code « U09 » n'a pas été retenu en consultation, ont été exclues. Cette requête a permis d'identifier 272 personnes se déclarant EHS (180 femmes et 92 hommes) ayant été dans un centre de consultation de pathologies professionnelles (CCPP) depuis 2009 (dont 92 à Paris (Hôpital Cochin) et 83 à Nantes). Le nombre annuel de personnes codées « U09 » ayant consulté un CCPP est représenté sur la Figure 1.

⁵⁴ Prévalence : nombre de cas nouveaux et / ou anciens d'une maladie, au sein d'une population donnée, à un moment donné, soit à un instant, soit dans un intervalle de temps. Ce n'est pas un taux mais une proportion. La prévalence est le rapport entre le nombre de personnes atteintes d'une maladie et l'effectif de la population concernée susceptible d'être atteinte par cette maladie.

⁵⁵ Le Réseau national de vigilance et de prévention des pathologies professionnelles (RNV3P) est un réseau de vigilance et de prévention pour la santé au travail qui regroupe en 2017 les 30 centres de consultation de pathologie professionnelle (CCPP) de France et 6 services de santé au travail (SST). Ce réseau a pour vocation de rassembler les données de chaque consultation au sein d'une base de données nationale (données démographiques du patient, pathologies, expositions, secteur d'activité, profession). La pathologie est codée par le médecin en fonction de la CIM 10 (classification internationale des maladies, dixième révision).



Source : Données du RNV3P (extraction réalisée en 2017)

Figure 1 : nombre annuel de personnes ayant consulté un CCPP depuis 2009 et ayant été codées sous la terminologie « IEI-CEM » dans la base du RNV3P

Le nombre de cas augmente chaque année depuis 2009. Cela peut s'expliquer par plusieurs hypothèses compatibles les unes avec les autres : 1) le nombre de personnes se déclarant EHS est en augmentation ; 2) ces personnes sont de plus en plus orientées vers les CCPP pour être prises en charge⁵⁶ ; 3) le code « U09 » est de plus en plus utilisé.

À noter que l'augmentation a été plus particulièrement prononcée en 2014, ce qui peut en partie s'expliquer par le recrutement de personnes se déclarant EHS dans le cadre du PHRC⁵⁷ du Pr Choudat.

3.5.2 Données internationales

Le groupe de travail a recensé quatorze études publiées dans la littérature scientifique qui évaluent la prévalence des personnes se déclarant EHS (à des degrés divers) dans différents pays (cf. Tableau 5 et Figure 2).

Ces études sont de comparaison difficile, car en l'absence de critères diagnostiques stricts de l'EHS, elles n'évaluent pas les mêmes choses. Toutes les études se basent sur un autodiagnostic de la personne interrogée (questionnaire généralement auto-administré). Le recensement des cas ne repose pas sur des critères cliniques bien définis, validés et comparables entre les différentes études. Le diagnostic est fait par la réponse positive à une question donnée. Or, toutes les questions ne sont pas comparables, par exemple, dans les études les plus récentes :

- Tseng *et al.* (2011) : « Êtes-vous allergique à / ou très sensible au fait d'être à proximité de champs électromagnétiques ? » ;
- Van Dongen *et al.* (2014) : « Croyez-vous que vous êtes sensible aux champs électromagnétiques ? » ;

⁵⁶ Cf. Note d'information DGS/EA1 n° 2014-171 du 26 mai 2014 relative à la gestion des risques liés aux radiofréquences, publiée au BO Santé du 15 juillet 2014, indiquant que les personnes se déclarant EHS qui faisaient appel aux services des ARS pouvaient être dirigées pour une prise en charge vers l'un des 24 centres de consultation de pathologies professionnelles (CCPP).

⁵⁷ Voir note de bas de page n° 46, p 42.

- Baliatsas *et al.* (2014) : « Je suis sensible aux stations de base et éléments de communications » et « Je suis sensible aux appareils électriques » ;
- Palmquist *et al.* (2014) : « Avez-vous des symptômes venant de différents appareils électriques en marche pour lesquels vous pensez que la majorité des personnes n'en ont pas ? ».

De plus, les taux de participation sont très variables selon les études (de 11,5 % dans l'étude de Tseng *et al.* (2011) à 88 % dans celle de Schröttner & Leitgeb (2008)).

Tableau 5 : estimations des pourcentages de personnes se déclarant hypersensibles aux champs électromagnétiques dans différents pays

Référence	Pays	Période d'étude	Taille de l'échantillon	Taux de participation (%)	% de personnes se déclarant EHS ou assimilés EHS
(Hillert <i>et al.</i> 2002a)	Suède	1997	n°=°15°000, de 19 à 80 ans	73	1,5
Levallois <i>et al.</i> , 2002	Californie	1998	2 072	58,3	3,2
Schreier <i>et al.</i> , 2006	Suisse	2004	n = 2 048, âge >14 ans	55,1	5 IC ₉₅ % = [4-6 %]
Korpinen <i>et al.</i> , 2009b	Finlande	2002	6 121	40,8	0,7
(Blettner <i>et al.</i> 2009)	Allemagne	2004	30 047	58,6	10,3
Kowall <i>et al.</i> , 2012		2004 et 2006		58,4	8,7 (2004), 7,2 (2006)
Eltiti <i>et al.</i> , 2007b	Royaume-Uni	av. 2007	3 633	18,2	4,0
Tseng <i>et al.</i> , 2011	Taiwan	2007	1 251	11,5	13,3
Schröttner & Leitgeb, 2008	Autriche	av. 2008	460	88	3,5
Furubayashi <i>et al.</i> , 2009	Japon	av. 2009	2 472	62,3	1,2
Röösli <i>et al.</i> , 2010	Suisse	2008 et 2009	n°=°1 122 de 30 à 60 ans	37	8,6 (2008), 7,7 (2009)
Palmquist <i>et al.</i> , 2014	Suède	2010	3 406	40	2,7
Van Dongen <i>et al.</i> , 2014	Pays-Bas	av. 2013	1 009	60	7
Baliatsas <i>et al.</i> , 2014	Pays-Bas	2011	5 789	39,6	3,5

av. = avant

Parmi les quatorze études évaluant la prévalence des personnes sensibles aux champs électromagnétiques recensées dans le Tableau 5 :

- neuf mettent en évidence une prévalence inférieure ou égale à 5 % (par ordre de prévalence croissante) : Korpinen *et al.* (2009b) en Finlande, Furubayashi *et al.* (2009) au Japon, Hillert *et al.* (2002a) et Palmquist *et al.* (2014) en Suède, Levallois *et al.* (2002) en Californie, Schröttner & Leitgeb (2008) en Autriche, Baliatsas *et al.* (2014) aux Pays-Bas, Eltiti *et al.* (2007b) au Royaume-Uni et Schreier *et al.* (2006) en Suisse ;
- cinq mettent en évidence une prévalence supérieure à 5 % : Van Dongen *et al.* (2014) aux Pays-Bas, Blettner *et al.* (2009) et Kowall *et al.* (2012) en Allemagne, Röösli *et al.* (2010) en Suisse, Tseng *et al.* (2011) à Taiwan.

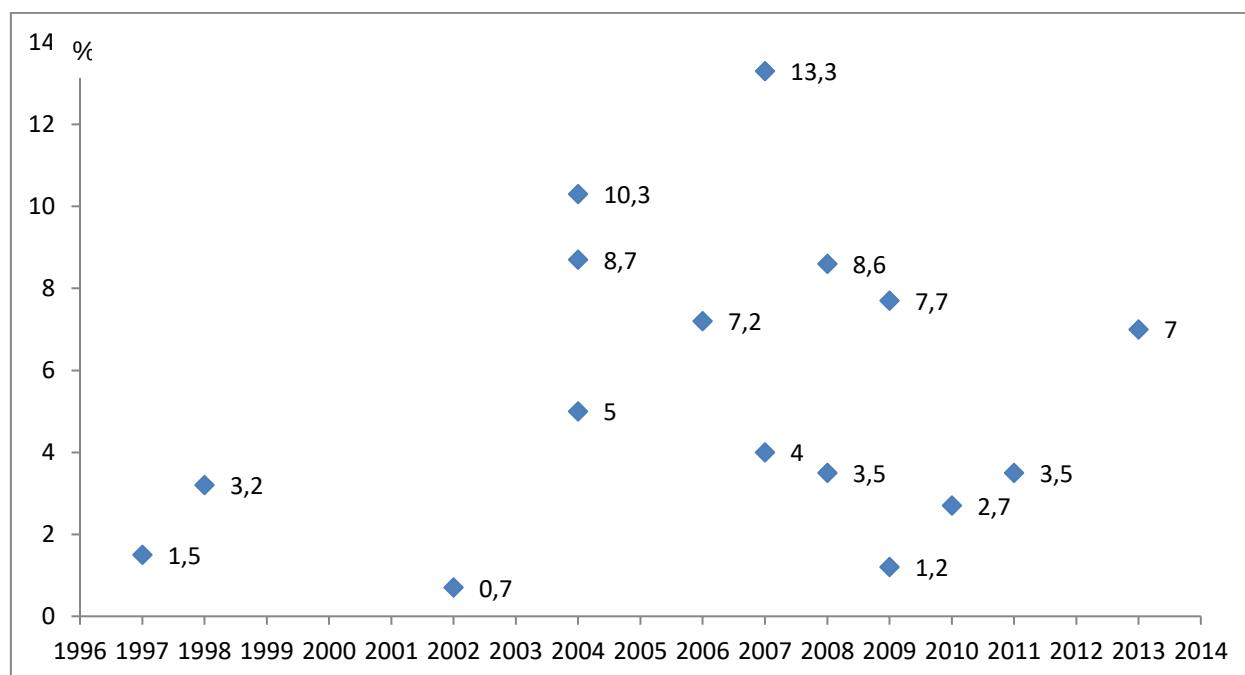


Figure 2 : pourcentage (%) de personnes se déclarant EHS ou assimilés dans les études référencées dans le Tableau 5

Les résultats varient énormément, de 0,7% (Korpinen *et al.*, 2009) à 13,3 % (Tseng *et al.*, 2011). Cependant, la tendance à l'augmentation de ce pourcentage qui, par le passé, avait fait craindre une aggravation de la situation (Hallberg et Oberfeld, 2006), n'a pas été confirmée par les sept études portant sur la période 2008-2013 (cf. Figure 2). Malgré les réserves imposées par la persistance de variations importantes (probablement dues à la méthodologie) - entre 1,2 % (Furubayashi *et al.*, 2009) et 8,6 % (Röögli *et al.*, 2010) -, il semble que ce pourcentage se situe autour d'une valeur moyenne de l'ordre de 5 %.

3.5.3 Discussion et conclusion sur les estimations du nombre de personnes se déclarant EHS

Les résultats des quatorze études présentées (cf. Tableau 5) sont à analyser et à comparer avec prudence. En effet, ils varient selon la question posée, les pays ou les régions et l'année de l'étude. De plus, les modalités d'études, l'échantillonnage et les populations étudiées sont peu comparables. Le « repérage », le diagnostic des cas de personnes se déclarant EHS, le nombre et le type de critères d'identification utilisés, la gravité des symptômes recherchés sont variables.

En pratique, une étude de prévalence est une enquête descriptive, la représentativité de l'échantillon⁵⁸ est donc capitale. Or, dans ces différentes études, la méthodologie de sélection des échantillons de population est hétérogène. La généralisation des résultats à la population considérée comme cible est parfois inadéquate. Par exemple, l'étude de Röögli *et al.* (2010) est représentative de la région de Bâle (troisième ville de Suisse), celle de Palmquist *et al.* (2014) du Västerbotten (province de Botnie-Occidentale⁵⁹) en Suède. Or, ces populations ne sont représentatives de l'ensemble des habitants de la Suisse ou de la Suède.

⁵⁸ La capacité de généraliser les résultats dépend de la représentativité de l'échantillon. Un échantillon est représentatif d'une population si tous les individus de cette population ont la même probabilité (même chance) d'être dans l'échantillon. Si ce n'est pas le cas, on a une erreur systématique (un biais).

⁵⁹ Il s'agit de la région de Suède où travaille également l'équipe de Hardell.

De même, pour l'étude de Baliatsas *et al.* (2014), la population est celle enregistrée auprès d'un médecin généraliste ; cet enregistrement étant obligatoire, une certaine exhaustivité semble respectée. Cependant, vingt-et-un médecins généralistes pour lesquels leurs patients sont interrogés ont été sélectionnés, en fonction du nombre de patients qu'ils suivent et de leur environnement (degré d'urbanisation). La méthode des quotas n'a pas été appliquée. En conséquence, les médecins sélectionnés ne sont pas représentatifs de l'ensemble des habitants des Pays-Bas.

L'analyse de ces études de prévalence doit aussi tenir compte de la grande disparité des taux de participation, qui influencent la représentativité des échantillons. Celui-ci est faible dans l'étude de Tseng *et al.* (2011) (11,5 %) et plus élevé dans celles de Rösli *et al.* (2010) (37 %) ; Baliatas *et al.* (2014) (39,6 %), Palmquist *et al.* (2014) (46 %), ainsi que celle de Levallois et Blettner *et al.* (2002) (58 %). L'étude de Van Dongen *et al.* (2014) atteint un taux de participation de 60 %, en faisant appel à un panel de consommateurs et à des cadeaux en contrepartie de leur participation. Le taux de participation est également très important (73 %) dans l'étude de Hillert *et al.* (2002a).

Enfin, les études récentes portant sur la période 2008-2013 semblent indiquer que le pourcentage de personnes se déclarant EHS s'est stabilisé autour d'une valeur médiane de l'ordre de 5 %.

3.6 Histoire naturelle de l'EHS

L'une des questions essentielles lorsque l'on aborde une pathologie est l'histoire naturelle⁶⁰ de celle-ci. Comprendre l'histoire naturelle de l'EHS et sa répartition (abordée au § 3.5) dans la population permet d'élaborer notamment des méthodes et les degrés nécessaires de prévention de celle-ci.

3.6.1 Modalités d'installation de l'EHS

À l'issue de l'analyse du corpus de lettres de personnes se déclarant EHS, Y. Barthe a décrit deux modalités d'installation de l'EHS (cf. § 3.1.4) :

- 1) la découverte d'une cause *a posteriori* : l'EHS comme « point d'arrivée » ;
- 2) l'EHS comme « point de départ ».

La première de ces deux modalités, l'installation progressive de l'EHS, est soutenue par Dieudonné (2016) (cf. analyse de l'article au § 6.1.1.1). L'auteur a réalisé une analyse subjective (pas d'analyse phénoménologique, pas de questionnaire, il s'agit d'un traitement empirique) de 40 enregistrements de personnes se déclarant EHS (n = 40, 11 hommes, moyenne d'âge = 51 ± 11 ans) ayant adapté leur mode de vie en conséquence (par exemple en ayant supprimé les appareils électriques dans leur logement). Les participants à l'étude ont été recrutés à l'aide d'avis publiés en France dans des groupes d'entraide en matière d'EHS et dans d'autres réseaux concernés par les champs électromagnétiques. Les entretiens ont été effectués en des lieux choisis par les participants, à l'aide d'une méthode qualitative standardisée. L'auteur décrit une trajectoire cognitive spécifique et cohérente d'après lui, car elle se retrouve chez tous les participants : (1) apparition des maux, (2) pas d'explication ni de solution (médicales), (3) découverte de l'EHS, (4) collecte d'informations au sujet de l'EHS, (5) apparition implicite de la conviction, (6) expérimentations (réalisation de petites expériences sur soi), (7) l'EHS propre au sujet est acceptée. D'après lui, il y a un travail de mise en cohérence de l'expérience qui caractérise l'EHS. Ainsi, l'évidence des liens entre les symptômes et l'environnement électromagnétique serait construite *a posteriori* (avec un temps de latence parfois très long), l'apparition des symptômes précéderait le lien fait par la personne d'une relation de cause à effet. D'après l'auteur, le fait que l'association entre les symptômes et l'environnement

⁶⁰ En médecine, comme dans d'autres disciplines, le terme « histoire naturelle » est le terme consacré pour désigner la description des manifestations observables d'une maladie et de leur évolution dans le temps (sans s'intéresser ni à ses causes, ni aux mécanismes physiopathologiques sous-jacents).

électromagnétique soit établie rétrospectivement indique que l'effet *nocebo* (cf. définition au § 7.7) ne constitue pas une explication satisfaisante. De plus, il considère qu'il est difficile de caractériser la symptomatologie des personnes se déclarant EHS, car d'après les déclarations faites à l'auteur, ce ne sont pas les propriétés des rayonnements qui déterminent l'apparition de certains symptômes. Comme il a été dit souvent à la personne qui faisait passer les entretiens « *il y a autant de types de sensibilités que de personnes se déclarant EHS* » (Dieudonné 2016).

De Graaff et Bröer (2012) ont réalisé une enquête qualitative aux Pays-Bas en 2008-2009 sur 18 personnes se déclarant EHS. Ils ont également conclu que l'auto-diagnostic de l'EHS était un point d'arrivée, après un long parcours médical (de Graaff and Bröer 2012).

Hagström *et al.* (2013) ont décrit une phase aiguë de l'EHS au cours de laquelle les patients ont rapporté une augmentation du nombre de symptômes par rapport à la période antérieure. En fait, cette notion de phase aiguë a été introduite par les auteurs eux-mêmes dans le questionnaire adressé aux patients, pour tenir compte des pratiques de groupes d'aide, et, bien qu'ils aient interrogé les personnes sur les symptômes « persistant actuellement », ils ne disent rien sur ce qui permettrait de distinguer cette phase d'une phase chronique. L'analyse complète de l'article est faite au § 6.1.1.1.

Cette notion de phase aiguë de l'EHS qui, certes, est en accord avec plusieurs témoignages de personnes se déclarant EHS, demande à être mieux caractérisée.

3.6.2 Notion de durée et d'évolution : vers une chronicité ou une fin de l'EHS ?

Les experts du groupe de travail n'ont pas connaissance d'articles scientifiques abordant la question de la durée de l'état EHS. Il manque des études de suivi sur le long-terme des personnes se déclarant EHS.

Seuls deux articles reviennent sur l'évolution individuelle de l'EHS (Kowall *et al.* 2012, Rösli, Mohler, and Frei 2010a). Dans ces deux travaux, l'autodiagnostic par les personnes se déclarant EHS évolue dans le temps :

- dans l'étude de Rösli *et al.* (2010) (présentée au § 6.1.1.2), qui a suivi une cohorte pendant un an :
 - au total sur les deux enquêtes, 219 individus différents attribuent leurs symptômes (auto-déclaration) aux radiofréquences (« attributants »⁶¹) et 130 se déclarent EHS soit en 2008, soit en 2009. Il y a des personnes se déclarant EHS et des « attributants » dans les 3 tranches d'âge entre 30 et 60 ans ;
 - 40 % de la population se déclarant EHS et 27 % des « attributants » se déclarent respectivement EHS et « attributants » les deux années. Leur état n'a donc pas varié d'une année à l'autre ; ce qui n'est pas le cas de 60 % des personnes se déclarant EHS (dont 54 % deviennent non sensibles l'année suivante) et de 73 % des « attributants » (dont 51 % deviennent non sensibles l'année suivante) ;
 - 2,61 % des personnes non-EHS le deviennent ;
 - 68,9 % des personnes ne se considèrent pas EHS ou n'attribuent pas leurs symptômes aux radiofréquences, lors de chacune des deux enquêtes, à un an d'intervalle ;

⁶¹ Le terme « attributants » impliquerait un moindre préjudice de l'exposition aux champs électromagnétiques sur la santé du sujet comparativement aux EHS.

- de même, dans l'étude de Kowall *et al.* (2012) :
 - 31,3 % des personnes qui attribuent leurs problèmes de santé aux ondes électromagnétiques des stations de base de téléphonie mobile (le terme EHS n'est pas utilisé) le restent deux ans plus tard, 31,0 % restent préoccupés par la question des champs électromagnétiques et 37,7 % ne se sentent plus concernées par le sujet ;
 - 3,3 % des personnes non-EHS le deviennent.

Ces études sembleraient indiquer la possibilité d'une évolution favorable de l'état de certaines personnes s'étant déclarées EHS à un moment donné.

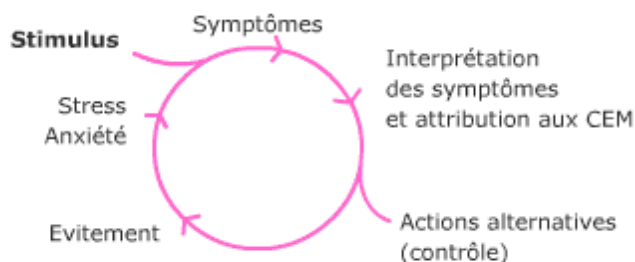
Par ailleurs, dans la mesure où il n'y a pas de critère de diagnostic, il n'y a pas non plus de critère de suivi de la maladie. Cela reste de l'autodiagnostic du patient et il semblerait, d'après ces deux études, que les personnes interrogées puissent changer de catégorie selon leurs propres critères.

L'aggravation au cours du temps des signes cliniques, souvent rapportés par les témoignages individuels, n'est pas retrouvée dans les études analysées. Cependant, aucune donnée n'existe sur l'évolution à long terme de l'EHS.

Des témoignages d'associations et de personnes se déclarant EHS suggèrent que les symptômes de l'EHS s'accompagnent d'autres maux :

- souffrances physiques et psychologiques (occupation des pensées, anxiété, état dépressif, stress, etc.), altération de l'état de santé général ;
- comportements d'évitement de l'exposition ;
- organisation de la vie du patient autour de ce problème ;
- absentéisme, incapacité de travail ;
- augmentation de l'utilisation des services de soin de santé ;
- difficultés financières dues aux déménagements et aménagements électriques de la maison ;
- isolement social ;
- une incompréhension de l'entourage professionnel et familial et l'absence de reconnaissance de la part des professionnels de santé contribuent parfois à aggraver l'isolement des personnes se déclarant EHS, etc.

Plusieurs auteurs ont émis l'hypothèse d'un cercle vicieux (cf. Figure 3) où symptômes, associations de ces derniers à une (des) source(s) électromagnétique(s) et comportements d'évitement se succèdent, s'amplifient et s'auto-entretiennent.



Voir par exemple Andersson *et coll.*, 1996 ou Hillert *et coll.*, 2002

Figure 3 : hypothèse d'un éventuel cercle vicieux de l'EHS

Par ailleurs, aucune donnée n'est disponible quant à la prise en charge médicale éventuelle des ex EHS. En effet, aucune information n'est donnée dans les articles de Kowall *et al.* (2012) et Rösli *et al.* (2010) sur la prise en charge thérapeutique et la « guérison » des personnes avec une évolution favorable ou défavorable. L'évolution de l'EHS est-elle spontanée ou associée à des actions d'évitement, des traitements ? Peut-on parler de rémission passagère ou définitive ? Les

changements éventuellement intervenus dans la vie des personnes qui s'étaient déclarées EHS entre avant et après mériteraient d'être documentés.

Certains auteurs (Johansson *et al.* 2010) avancent l'hypothèse selon laquelle il existerait plusieurs stades de l'EHS et / ou qu'il existerait des formes spécifiques et généralisées de l'EHS. Toutefois, les experts du groupe de travail n'ont pas connaissance d'articles scientifiques abordant la question de la sévérité des symptômes des personnes se déclarant EHS en fonction de l'évolution de la maladie. Peut-on parler de différents degrés ou stades de la maladie en fonction de l'intensité des symptômes ? Là encore, des études de suivi sur le long-terme de ces personnes seraient utiles à la compréhension de l'évolution des symptômes.

3.7 L'EHS chez les enfants

La question de l'existence de l'EHS chez les enfants est posée par certaines associations :

« *En début d'année 2014, nous avons mis en place un recensement. En quelques mois, 1 200 personnes électrohypersensibles se sont auto-recensées. Dans ce grand nombre de personnes, il y a de plus en plus d'enfants* » [extrait de l'audition de Une Terre pour les EHS].

L'association Électrosensibles de France / Priartem a, elle aussi, lancé un appel à témoignages « Enfants électrosensibles » en juillet 2015.

Cependant, il existe très peu de publications scientifiques sur le sujet.

Buchner *et al.* (2011), en Allemagne, signalent le cas d'un enfant de 9 ans se déclarant EHS (Buchner 2011) (*cf.* analyse de l'article au § 7.5.2.1.2).

Hedendahl *et al.* (2015), en Autriche, décrivent également deux cas de garçons se déclarant EHS, âgés de 15 ans, et présentant divers symptômes sans explication médicale (maux de tête, fatigue, problèmes de concentration, etc.) (Hedendahl, Carlberg, and Hardell 2015).

Par ailleurs, les études investiguant les conséquences d'une exposition chronique aux radiofréquences sur des enfants et des adolescents ont été analysées dans le rapport « Radiofréquences et santé des enfants » (Anses 2016) et ne montrent pas de relation d'association. Concernant les effets aigus, seule la *German MobilEe-study* recherche les effets d'une exposition aux radiofréquences, les autres études n'explorant que l'usage du téléphone mobile sans étudier la relation effet/dose. En fonction de la méthode d'évaluation de l'exposition (mesurée ou auto-rapportée), les résultats ne sont pas cohérents.

En revanche, lorsque l'on s'intéresse à l'usage des téléphones mobiles par les adolescents, certaines études analysées dans le rapport « Radiofréquences et santé des enfants » (Anses, 2016) s'accordent sur une relation possible entre l'usage du téléphone mobile (modalités, durée, fréquence d'utilisation, etc.) et des symptômes aspécifiques d'altération du bien-être, tels que les céphalées et les symptômes d'irritabilité, les perturbations du sommeil, la fatigue, tant en exposition aiguë qu'en exposition chronique (Heinrich *et al.* 2010, 2011, Kühnlein *et al.* 2009, Redmayne, Smith, and Abramson 2013, Van Den Bulck 2007). Au vu de ces éléments, une association entre l'usage du téléphone mobile (indépendamment de l'exposition aux ondes électromagnétiques) et l'altération du bien-être chez les adolescents pourrait exister et mérite d'être approfondie. De plus, Schoeni *et al.* (2015) ont montré que des adolescents réveillés par leur téléphone mobile pendant la nuit présentaient le jour, une fatigue, une fatigabilité, des maux de tête et un malaise physique plus marqués que ceux n'utilisant pas leur téléphone la nuit (Schoeni, Roser, and Roosli 2015).

3.8 Relations possibles entre l'EHS et les différents syndromes d'intolérances environnementales et autres maladies médicalement inexpliquées

Les personnes qui se déclarent EHS ne sont pas les seules à ressentir des symptômes nombreux et très diversifiés, sans qu'aucune anomalie caractéristique ne soit décelée aux examens cliniques, biologiques et d'imagerie.

3.8.1 Rappels historiques : de la naissance à la fin d'une hypothèse purement psychogène pour expliquer les différents syndromes médicalement inexpliqués

La question des troubles fonctionnels sans substrat organique décelable est ancienne, bien antérieure aux premières attributions de symptômes à des expositions à des champs électromagnétiques. Elle est apparue au XIX^{ème} siècle, avec le développement de la médecine anatomo-clinique de Laënnec, puis de la médecine biologique de Claude Bernard. Le premier à l'avoir clairement posée est le psychiatre américain G. Beard. Pour y répondre, celui-ci a proposé un concept désigné sous le terme de neurasthénie⁶² (Beard GM., 1869). Pour cet auteur, ce terme s'appliquait à une maladie exclusivement organique. Le basculement vers une conception psychogénique est dû à ses successeurs, et s'est accompagné d'un fort déclin de son diagnostic (Wessely 1990).

D'autres concepts, pas tout à fait superposables, mais toujours inspirés par une hypothèse psychogène, ont été proposés pour décrire les patients souffrant de symptômes médicalement inexpliqués. Citons ceux de « symptômes fonctionnels », de « somatisation », « troubles somatoformes » ou de « maladie psychosomatique ». Ces concepts, qui ont été élaborés par des psychiatres pour prendre en compte la fréquence des plaintes somatiques inexpliquées chez de nombreux patients venant les consulter, ont été acceptés pendant longtemps et restent encore largement répandus chez les médecins.

Cependant, il est apparu peu à peu qu'il n'était pas possible d'attribuer une cause psychique à des symptômes somatiques fonctionnels médicalement inexpliqués en l'absence de toute symptomatologie psychiatrique. Dès lors, des recherches purement cliniques ont été entreprises pour identifier, au delà de la grande diversité symptomatique des cas individuels, des syndromes suffisamment caractéristiques pour permettre la constitution de groupes de patients le plus homogène possible, avec lesquels des recherches physiopathologiques approfondies ont été réalisées.

Le modèle inspirant ces recherches est celui de la migraine, affection bien connue pour ne comporter que des symptômes fonctionnels, à l'exclusion de toute anomalie clinique et biologique. Cette affection mérite une attention particulière, car l'un des médecins contactés dans le cadre de l'expertise (le D^r Chevallier), qui reçoit des personnes se déclarant EHS dans une consultation de pathologie environnementale, estime qu'une partie d'entre elles est constituée de migraineux, dont l'état est nettement amélioré par les traitements antimigraineux qu'il leur prescrit (cf. § 7.5.3).

⁶² Neurasthénie : « un malaise général, un dépérissement de toutes les fonctions, un appétit médiocre, une faiblesse durable du dos, des douleurs névralgiques fugaces, de l'insomnie, de l'hypochondrie, une aversion pour le travail mental suivi, des attaques de céphalées sévères et affaiblissantes, et d'autres symptômes analogues » (Beard 1869). Dans sa signification psychogénique, ce terme a été largement utilisé à la fin du XIX^{ème} siècle et au début du XX^{ème}. Puis, pour avoir inclus un trop grand nombre de symptômes, il est tombé peu à peu en désuétude, mais il figure toujours dans la classification internationale des maladies de l'OMS (cf. version 2011 de la 10^{ème} Classification) avec la description suivante : « fatigue, faiblesse, épuisement après un effort minime, avec irritabilité, insomnie ou hypersomnie, concentration de piètre qualité, et symptômes physiques variés » (sous la référence F48 au chapitre 5 (Troubles mentaux et du comportement) et au sous-chapitre « Troubles névrotiques, troubles liés à des facteurs de stress et troubles somatoformes » (réf. F40-F48)).

Rappelons seulement ici qu'il existe aujourd'hui pour cette maladie des critères de diagnostic simples pour la pratique courante et des critères de classification pour la recherche, qui sont universellement admis, des conceptions physiopathologiques solides, bien qu'encore incomplètes, et des traitements efficaces.

D'autres tentatives de caractérisation ont été moins fructueuses : certaines sont abandonnées, comme celle concernant la spasmophilie, d'autres sont encore controversées, comme celles concernant la fibromyalgie, le syndrome de fatigue chronique, le syndrome de l'intestin irritable et, plus récemment, le « *burn-out* » ou syndrome d'épuisement professionnel, pour ne citer que les plus connues.

Parallèlement, sous l'influence de Randolph, fondateur de l'écologie clinique, et sur la base de déclarations de patients, des causes environnementales ont été attribuées à des groupements de symptômes très variés : les plus anciennement connues sont l'intolérance au bruit, à la lumière et la sensibilité aux amalgames dentaires auxquels se sont ajoutés le syndrome des bâtiments malsains, le syndrome d'intolérance aux odeurs chimiques (SIOC), le « syndrome éolien » (ou *Wind turbin syndrom*)⁶³ et l'EHS. Tous ces syndromes ont été rassemblés sous le terme d'intolérance idiopathique environnementale (IEI), créé en 1996, pour remplacer celui de sensibilité chimique multiple, mais considéré comme un simple descripteur applicable à « *un trouble acquis, comportant des symptômes récurrents multiples, associé à divers facteurs environnementaux tolérés par la majorité des gens et n'étant expliqué par aucune affection médicale, psychiatrique ou psychologique connue* » (IPCS/WHO 1996). Cette définition a permis à l'OMS d'inclure l'EHS dans ce cadre.

Professeur de médecine interne et anthropologue, Cathébras a rassemblé les différents concepts et descriptions associés aux symptômes médicalement inexpliqués et en a fait une analyse détaillée (Cathébras 2006). Dans le cadre de son audition par le groupe de travail, P^r Cathébras a tenu à récuser tout dualisme, à savoir les explications purement somatiques ou purement psychiques. Pour lui, les symptômes somatiques inexpliqués ne sont pas « *tout dans la tête* », ni ne relèvent de pathologies organiques méconnues. Il pense que des situations de somatisation chroniques et invalidantes peuvent « *se construire* » à partir de pathologies mineures, lorsque le stress, l'anxiété ou la dépression, les explications médicales discordantes, les jugements des proches et des organismes sociaux s'en mêlent ; d'où la richesse et la grande diversité symptomatique des descriptions cliniques [cf. audition du P^r Cathébras]. Dans l'état des connaissances actuelles, il reconnaît à ces diverses affections trois caractéristiques communes :

- 1) l'autodiagnostic, après un long itinéraire médical et l'aide d'internet ;
- 2) la non reconnaissance par une large majorité du corps médical ;
- 3) et, par voie de conséquence, les mauvaises relations avec ce dernier, mal formé à la prise en charge de ces patients, mal à l'aise face à eux et leur tenant parfois des propos jugés blessants.

Comme l'a montré l'analyse du corpus de lettres de personnes se déclarant EHS (§ 3.1), ces dernières partagent ces trois caractéristiques avec diverses affections (syndrome des bâtiments malsains, SIOC, etc.) fréquemment associées.

3.8.2 Associations observées entre l'EHS et d'autres affections

À notre connaissance, la première mention d'une association de l'EHS avec une autre affection est celle de Flodin *et al.* (2000). Ces auteurs ont relevé une comorbidité élevée dans un groupe de quinze personnes se déclarant EHS, recrutées pour une étude de provocation (cf. § 6.1.1) :

- quatre personnes se plaignaient de sensibilité chimique multiple (26,7 %) ;
- dix personnes avaient fait remplacer leurs amalgames dentaires ;

⁶³ Le « syndrome éolien » est étudié dans l'expertise publiée par l'Anses en mars 2017 : « Évaluation des effets sanitaires des basses fréquences sonores et infrasons dus aux parcs éoliens ».

- deux personnes prenaient des traitements pour la thyroïde ;
- une personne était atteinte de fibromyalgie ;
- un autre d'arthrite rhumatoïde (Flodin, Seneby, and Tegenfeldt 2000).

Par la suite, Levallois *et al.* (2002) ont profité d'une enquête téléphonique mensuelle sur la consommation de tabac en Californie pour réaliser une étude de la prévalence de l'EHS et de la sensibilité chimique multiple, ainsi que de la fréquence de leur association. Pour cela, ils ont ajouté aux questionnaires habituels les trois questions suivantes : (1) êtes-vous « allergique ou très sensibles à proximité d'appareils électriques, d'ordinateurs ou de lignes haute-tension ? », (2) êtes-vous « allergique ou anormalement sensible aux produits chimiques quotidiens » et (3) « un médecin ou un autre professionnel de santé vous a dit que vous aviez une maladie environnementale ou un SIOC ? ». Sur les 2 029 personnes ayant répondu à ces 3 questions (sur 2 072 interrogées) :

- 27 (1,3 %) ont déclaré être uniquement sensibles aux champs électromagnétiques ;
- 446 (22,0 %) uniquement sensibles aux odeurs chimiques ;
- 40 aux deux (2 % de la population totale, mais 59,7 % des 67 sujets sensibles aux champs électromagnétiques et 9,0 % des sujets sensibles aux odeurs chimiques) (Levallois *et al.* 2002).

Paradoxalement, le diagnostic de SIOC a été porté par un médecin plus fréquemment chez les personnes se déclarant EHS que chez celles se déclarant sensibles seulement aux odeurs chimiques : 13/68 (19,1 %) *versus* 37/445 (8,3 %), ($p = 0,013$).

Eltiti *et al.* (2007b) ont réalisé une étude complexe, essentiellement destinée au développement et à l'évaluation d'un questionnaire pour le recrutement de personnes se déclarant EHS. Cette étude a été composée de trois phases ; une phase pilote au cours de laquelle les auteurs ont comparé les symptômes de 50 personnes se déclarant EHS à ceux de 261 témoins ; une phase 1 au cours de laquelle ils ont recueilli et traité les symptômes présentés par 3 633 sujets issus de la population générale ; et une phase 2 qui a porté sur les symptômes rapportés par 88 personnes se déclarant EHS. En outre, à chaque phase, tous les participants étaient interrogés sur leur état de santé général et sur leurs éventuelles maladies chroniques. Les résultats fournis sur ce dernier point sont très succincts. Lors de la phase pilote, la proportion de maladies chroniques a été significativement plus élevée ($\chi^2 = 8,39$, $p < 0,01$) chez les personnes se déclarant EHS (32,0 %) que chez les témoins (14,6 %). Lors de la phase 1, chez les 3 633 personnes issus de la population générale, seuls 19,7 % présentaient une maladie chronique. Lors de la phase 2, chez les 88 sujets se déclarant EHS, la proportion de maladies chroniques a été du même ordre que lors de la phase pilote (37,5 %) et les maladies les plus fréquemment citées étaient le syndrome de fatigue chronique (9,1 %), le diabète (8,0 %), les maladies ostéo-articulaires (6,8 %) et l'hypo- ou l'hyperthyroïdie (4,5 %) (Eltiti *et al.* 2007b).

Schooneveld et Kuiper (2007) ont rédigé un rapport sur une enquête réalisée aux Pays-Bas à l'aide de questionnaires adressés aux adhérents de la Fondation EHS néerlandaise⁶⁴. Cette enquête s'est, entre autre, intéressée aux maladies qui contribueraient, selon les personnes se déclarant EHS interrogées, à leur état, à savoir :

- un *burnout* dans 35,1 % des cas ;
- un SIOC dans 34,2 % des cas ;
- une fibromyalgie dans 29,8 % des cas ;
- un syndrome de fatigue chronique dans 28,9 % des cas ;
- une lésion de contrainte répétitive dans 16,7 % des cas ;
- une mononucléose dans 12,3 % des cas ;

⁶⁴ La Fondation EHS néerlandaise ou *Dutch EHS Foundation* est une organisation non gouvernementale de soutien aux personnes EHS (www.stichtingehs.nl).

- des maladies métaboliques dans 11,4 % des cas ;
- un syndrome des bâtiments malsains dans 7,9 % ;
- un syndrome post-traumatique dans 7,0 % des cas ;
- une algodystrophie⁶⁵ dans 4,4 % des cas ;
- une maladie de Lyme⁶⁶ dans 4,4 % des cas (Schooneveld et Kuiper, 2007).

Plus récemment, De Luca *et al.* (2014) ont mené une recherche systématique d'une sensibilité chimique multiple à l'aide du questionnaire de référence *QEESI*⁶⁷, dans une population de 153 personnes se déclarant EHS, comparées à 147 personnes sensibles aux odeurs chimiques (SIOC) ne se plaignant d'aucune sensibilité aux champs électromagnétiques et à 123 témoins en bonne santé (les résultats biologiques et les limites méthodologiques en ce qui concerne le recrutement des patients sont exposés au § 7.2). Ce travail a montré que l'EHS était associée à :

- la présence d'une symptomatologie caractéristique du SIOC dans 52,7 % des cas et d'une symptomatologie « suspecte » dans 42,0 % ;
- une fibromyalgie dans 4,7 % des cas ;
- un syndrome de fatigue chronique dans 2,7 %.

Dans l'étude de Baliatsas *et al.* (2014), l'association de l'EHS avec d'autres syndromes d'intolérance environnementale est aussi fréquente (Baliatsas *et al.* 2014a) :

- 38 % des participants se déclarant EHS répondent aux critères d'inclusion pour la sensibilité environnementale généralisée, définis par les auteurs et adaptés du questionnaire de Stansfeld *et al.* (Stansfeld *et al.* 1985)

Une association significative entre EHS, intolérance aux odeurs chimiques, syndrome du bâtiment malsain, et intolérance aux bruits est également mise en évidence dans l'étude de Palmquist *et al.* (2014) qui porte sur les 3 406 réponses reçues après envoi d'un questionnaire adressé à un échantillon représentatif (n = 8 520) de la population d'un comté du nord de la Suède. Plus de la moitié des personnes se déclarant EHS ont rapporté au moins un autre syndrome (58,2 % [48,0-67,8]) : l'EHS est ainsi associée à une intolérance aux odeurs chimiques chez 30 personnes sur 91 (33,0 %), à une intolérance aux bruits chez 28 personnes (30,8 %) et à un syndrome du bâtiment malsain chez 26 (28,6 %). À noter que 6 personnes ont rapporté une intolérance à ces quatre facteurs environnementaux (Palmquist *et al.* 2014).

En Suède, Nordin *et al.* (2014) se sont également intéressés à la prévalence de l'intolérance aux odeurs chimiques et au bruit chez 113 personnes se déclarant EHS. Ces auteurs ont utilisé des échelles de sensibilité aux odeurs chimiques (*Chemical Sensitivity Scale, CSS*) et au bruit (*Noise Sensitivity Scale, NSS*). Ils ont montré que l'intolérance aux odeurs chimiques et au bruit était plus répandue chez les personnes se déclarant EHS que chez les témoins issus de la population générale, avec une prévalence de l'intolérance au bruit supérieure à celle des odeurs chez les personnes se déclarant EHS. Les auteurs suggèrent que le lien entre EHS et intolérance au bruit pourrait se faire *via* les acouphènes. La prévalence des acouphènes rapportés au cours d'une semaine était de 35 % chez les personnes se déclarant EHS et nulle chez les témoins (Nordin *et al.* 2014).

L'ensemble de ces résultats suggère qu'il existe un large recoupement entre les prévalences aux différentes hypersensibilités environnementales en général.

⁶⁵ L'algodystrophie ou « syndrome épaule-main » est un syndrome douloureux, qui se développe après une blessure, parfois minime, et qui se caractérise par une douleur de tout un membre sans explication.

⁶⁶ voir note de bas de page n° 173, p195 au paragraphe 7.3, sur la maladie de Lyme.

⁶⁷ Le *Quick Environmental Exposure and Sensitivity Inventory (QEESI)* est un questionnaire comprenant 40 symptômes, validé internationalement. C'est le questionnaire le plus répandu pour le diagnostic du SIOC.

3.8.3 Analogies

Les associations observées au § 3.8.2 entre l'EHS et d'autres affections et leur fréquence font ressortir une double image : celle de la diversité de ces syndromes et celle de leurs ressemblances. Certains auteurs ont inclus l'EHS parmi l'ensemble des affections liées à l'environnement (Brand *et al.* 2009), d'autres classent l'EHS au côté d'autres troubles médicalement inexpliqués, tels que le SIOC (Bartha *et al.* 1999), ou encore de la fibromyalgie, la maladie des « amalgames dentaires », les syndromes de fatigue chronique, des vétérans de la guerre du golfe, des bâtiments malsains ou de l'intestin irritable (de Luca *et al.* 2011). Il en résulte un débat qui reste ouvert sur la question de l'existence de plusieurs syndromes fonctionnels ou, au contraire, de l'expression multiple d'une même configuration pathologique. Cette question avait déjà été posée dans le rapport publié par l'Afsset en 2009 sur les effets sanitaires des radiofréquences.

3.8.3.1 Avec le syndrome d'intolérance aux odeurs chimiques

En 2004, un groupe d'experts de l'OMS a proposé le terme « intolérance idiopathique environnementale attribuée aux champs électromagnétiques (IEI-CEM) » pour tenir compte de l'absence de tableau clinique caractéristique de l'EHS (OMS 2006). Ce groupe d'experts reprenait le terme d'intolérance idiopathique environnementale (IEI), créé en 1996 à Berlin par le Programme international pour la sécurité chimique de l'OMS, pour désigner le syndrome d'intolérance aux odeurs chimiques (SIOC) et l'étendait aux états cliniques attribués aux champs électromagnétiques. Le SIOC avait été défini comme « une affection acquise caractérisée par la répétition de symptômes touchant de multiples organes qui surviennent lors de l'exposition à diverses substances chimiques à des concentrations bien inférieures à celles connues pour entraîner des effets dans la population » (Cullen 1987), définition applicable à l'EHS par simple substitution de l'agent supposé être causal, « diverses substances chimiques », par « divers champs électromagnétiques ». Pour le groupe d'experts, « *IEI était un descripteur sans aucune implication étiologique, qu'elle soit chimique, immunologique ou électromagnétique. Il était décrit comme (1) une affection acquise comportant de multiples symptômes récurrents, (2) associée à divers facteurs environnementaux tolérés par la plupart des gens et (3) non expliquée par aucune affection médicale, psychiatrique ou psychologique connue* ». Le rapprochement entre ces deux « hypersensibilités » était par ailleurs justifié par leur fréquente association chez un même individu.

Le rapprochement par l'OMS de ces deux tableaux cliniques sous le terme d'« intolérance idiopathique environnementale », la fréquence de leur association chez une même personne, décrite précédemment⁶⁸ et rapportée par les patients et certaines associations, le fait que des lieux d'accueil (immeuble de Zurich) ou des projets de zone blanche (à Saint-Julien-en-Beauchêne par exemple) s'adressent aux deux catégories de patients, crée une situation qui mérite d'être étudiée de manière plus précise et plus approfondie que cela n'a été fait jusqu'ici.

Dès à présent, toutefois, on peut comparer les données de la littérature sur les symptômes (cf. tableau de comparaison en Annexe 1). La comparaison des 40 symptômes du QEES⁶⁹ avec les 85 répertoriés dans l'EHS montre que 27 (67,5 %) d'entre eux figurent dans l'une des quatre listes de symptômes utilisées pour l'EHS (à savoir celles de Frick *et al.* (2002), Irvine *et al.* (2005), Eltiti *et al.* (2007a) et du PHRC Cochin, cf. Annexe 1), dont :

- six symptômes qui sont également présents dans les quatre listes de symptômes de l'EHS (« maux de tête », « troubles de la mémoire », « difficultés de concentration », « anxiété-stress », « essoufflement », « palpitations »), le seul symptôme manquant étant « fatigue, épuisement » ;

⁶⁸ 59,7 % pour Levallois *et al.* (2002), 17,2 % pour Schooneveld et Kuiper (2007), 52,7 % de façon certaine pour de Luca *et al.* (2014), 38 % pour Baliatsias *et al.* (2014), 33 % pour Palmquist *et al.* (2014), 21,2 % pour Belpomme *et al.* (2015) (cf. § 3.8.2).

⁶⁹ cf. note de bas de page n°67, p68.

- six symptômes à nouveau qui se retrouvent dans trois des listes de l'EHS (« douleurs, tension musculaire », « douleurs articulaires », « nausées », « sensation de tête lourde », « peau sèche », « rash, éruption »). Parmi les six symptômes qui figurent dans trois des quatre listes EHS, mais pas dans le *QEESI*, on note « troubles du sommeil » et « sensations d'instabilité, vertiges » qui sont souvent évoqués par les personnes se déclarant EHS ;
- sept symptômes qui figurent dans deux listes de l'EHS (« faiblesse musculaire », « toux », « douleurs ou crampes abdominales », « ballonnements abdominaux », « irritabilité, crises de colères », « dépression, crise de larmes », « enflure cutanée, urticaire ») ;
- huit symptômes qui figurent dans une seule liste de l'EHS (« crampes musculaires », « brûlures ou irritation des yeux », « rythme cardiaque accéléré », « rythme irrégulier, extrasystoles », « gêne dans la poitrine/douleurs cardiaques », « impression de déconnexion », « engourdissement ou picotement », « troubles des règles »).

Il reste donc 13 symptômes (sur 40, soit 32,5 %) qui ne figurent que dans le *QEESI* (« raideurs musculaires », « raideurs articulaires », « mucosités », « écoulement nasal postérieur », « infections respiratoires », « diarrhée », « constipation », « difficultés à prendre des décisions », « désintérêt pour les activités habituelles », « difficulté d'accommodation oculaire », « visage congestionné », « douleurs pelviennes », « besoin d'uriner fréquemment »). Il n'est pas impossible qu'ils soient également présents chez les personnes se déclarant EHS (ils sont d'ailleurs rapportés par certains témoignages), mais la question ne leur a pas été posée dans les études. De même, trois des symptômes les plus fréquemment mentionnés dans les questionnaires sur l'EHS (« fatigue, épuisement », « troubles du sommeil » et « sensations d'instabilité, vertiges ») ne figurent pas dans le *QEESI*. Ces deux constatations suggèrent que les deux variétés d'intolérance environnementale idiopathique pourraient ne pas avoir le même tableau clinique. En fait, la réponse à cette hypothèse ne peut être apportée que par une étude comparative de ces deux situations cliniques explorant la fréquence et la sévérité des 98 symptômes identifiés dans des populations aux effectifs suffisamment élevés, supérieurs à 500 selon Eltiti *et al.* (2007b).

À l'opposé, on constate que les six symptômes présents à la fois dans le *QEESI* et les quatre questionnaires sur l'EHS (« maux de tête », « troubles de la mémoire », « difficultés de concentration », « anxiété-stress », « essoufflement », « palpitations ») sont couramment observés chez les sujets anxieux, ce qui suggère que ce serait la réaction à l'anxiété, en tant que cause ou conséquence, qui ferait l'unité des deux tableaux cliniques.

3.8.3.2 Avec la fibromyalgie

Les données suggèrent que l'EHS pourrait avoir deux caractéristiques communes avec la fibromyalgie, affection reconnue dans la Classification mondiale des maladies de l'OMS : ces caractéristiques sont, pour l'une, de nature purement clinique et, pour l'autre, de nature physiopathologique.

L'analogie clinique est suggérée par la présence de points sensibles (*tender points*), de localisation précise à la surface du corps dont la pression provoque une douleur ou une sensibilité accrue. Dans la fibromyalgie, l'un des critères de classification retenus par l'*American College of Rheumatology* est la présence d'au moins 11 des 18 points répertoriés (Wolfe *et al.* 1990). Dans l'EHS, les D^{rs} Tournesac et Rosa ont présenté, lors de leur audition par le groupe de travail, des documents d'après lesquels ils auraient identifié 14 points, différents de ceux observés dans la fibromyalgie, deux d'entre eux, para-ombilicaux, étant particulièrement importants.

L'analogie physiopathologique est fournie par les données des techniques d'imagerie (IRM, IRMf et TEP) qui montrent l'existence d'activations anormales des aires corticales⁷⁰ (cortex

⁷⁰ On admet actuellement (Melzack 1999) que la perception de la douleur est sous la dépendance d'un système qui filtre, sélectionne et module les influx nociceptifs engendrés à tous les niveaux de l'organisme. Ce système, appelé « *pain neuromatrix* » (c'est le terme classique et il est également employé par Landgrebe *et al.* 2008a) a des composantes somato-sensorielles, limbiques et thalamo-corticales. Parmi ces

Suite de la note de bas de page en page suivante.

singuliers antérieurs et insulaires) impliquées dans la perception de la douleur chez des fibromyalgiques (Jensen *et al.* 2012, Napadow *et al.* 2012, Robinson *et al.* 2011) et chez des personnes se déclarant EHS (Landgrebe *et al.* 2008a) (cf. analyse de l'article au § 6.2.1.2.8).

3.8.3.3 Avec les acouphènes

Les acouphènes⁷¹ sont des perceptions subjectives d'un son ou d'un bruit en l'absence de stimulus externe sonore et non perçues par l'entourage. Les acouphènes sont constitués de sons très divers (sifflement, tintement, bourdonnement, vrombissement, etc.) et doivent être distingués des hallucinations auditives qui sont des perceptions illusoire de paroles (dans certains cas de dépression ou de psychose par exemple), souvent chargées de sens.

Les acouphènes représentent une plainte (symptôme) fréquente : 10 % de la population adulte européenne, japonaise ou nord américaine aurait des acouphènes de temps en temps (Baguley, McFerran, and Hall 2013). En France, 3,7 millions de personnes souffriraient d'acouphènes fréquents⁷².

Les acouphènes peuvent, entre autre, résulter d'une anomalie de la transmission du son au cerveau. Diverses pathologies peuvent générer des acouphènes : pathologies périphériques de l'oreille externe, de l'oreille moyenne, du système somatosensoriel péri-auriculaire, de l'oreille interne, ou pathologies centrales sur les voies auditives. Les acouphènes sont généralement multifactoriels et modulés par le type de personnalité, le contexte psychosocial du patient, voire le stress.

Dans une grande majorité des cas d'acouphènes, on retrouve un trouble auditif associé. L'acouphénométrie oriente alors le clinicien : si l'acouphène se situe sur une zone de fréquence où l'audition est déficiente, son origine pourra être identifiée. Dans ce cas, la prise en charge thérapeutique adaptée diminue significativement la perception de l'acouphène. Restent au moins 10 % des cas pour lesquels aucune altération clinique ou biologique n'est retrouvée.

L'examen clinique d'une personne souffrant d'acouphènes⁷³ doit comprendre une anamnèse complète, une évaluation des facteurs émotionnels aggravants, du type de personnalité du patient, du vécu professionnel, etc. Des pathologies annexes, telles que les troubles du sommeil, les troubles du système ostéoarticulaire mandibulaire et cervical, les troubles cardiovasculaires,

dernières, figurent les cortex insulaires et cingulaires antérieurs dont l'activation peut être visualisée par les techniques d'IRMf.

⁷¹ Les mécanismes physiopathologiques sous-jacents des acouphènes sont étudiés sur des modèles animaux (P^r S. Shore, *University of Michigan*) et chez l'Homme, dans des populations concernées par les traumatismes sonores (D^r A. Job, GIN, Toulon). En 1993, le P^r Jastreboff a fait un parallèle avec les « douleurs du membre fantôme » et démontré la grande complexité du traitement du signal auditif, modulé par le système limbique (responsable du poids des émotions), bien avant le traitement du signal par le cortex auditif (Jastreboff and azell 1993).

⁷² Données de l'association Journée Nationale de l'Audition (2014).

⁷³ Évaluation clinique des acouphènes : les acouphènes sont évaluables par des échelles internationalement validées (inventaire du handicap acouphénique *THI*, échelle anxiété et dépression *HAD*) permettant d'établir des scores qui mesurent la gêne ressentie par le patient. L'échelle visuelle analogique d'intensité (EVA-I) et de gêne (EVA-G) de l'acouphène sont évaluées par les échelles visuelles analogiques. Une étude menée en 2013 par l'AFREPA (Association française des équipes pluridisciplinaires en acouphénologie) montre une bonne corrélation entre les scores obtenus à l'EVA, la gêne et le THI.

Cependant, comme c'est le patient qui s'auto-évalue, on peut observer des « surévaluations » : en recoupant les informations des scores obtenus aux échelles d'anxiétés et de dépressions, ce biais peut être quantifié.

L'examen clinique minutieux de la sphère « tête et cou » et des mesures de l'audition (objectives telles que les réflexes stapédiens, oto-émissions, potentiels évoqués et subjectives audiométrie tonale et vocale) sont indispensables à l'évaluation du patient acouphénique.

métaboliques et psychiatriques doivent être recherchés à l'anamnèse. Leur prise en charge thérapeutique peut permettre de diminuer ou de faire disparaître les acouphènes.

Landgrebe *et al.* (2009) (*cf.* § 6.1.1.2) et Hutter *et al.* (2010) (article analysé dans le rapport Anses de 2013 sur les radiofréquences) soulignent le fait que les acouphènes sont plus fréquents chez les personnes se déclarant EHS que chez les témoins (Hutter *et al.* 2010, Landgrebe *et al.* 2009). L'interprétation donnée à cette prévalence diffère nettement selon les auteurs. Hutter *et al.* suggèrent de considérer l'exposition aux radiofréquences comme une cause d'acouphènes possibles, alors que Landgrebe *et al.* évoquent l'hypothèse d'un mécanisme physiopathologique commun entre l'EHS et les acouphènes non symptomatiques.

3.8.3.1 Avec les troubles psychosociaux

Les troubles psychosociaux sont des troubles de la santé qui concernent les dimensions psychologiques, physiques, comportementales et sociales. Ils sont provoqués par l'exposition aux risques environnementaux, en particulier professionnels (notamment organisationnels et relationnels) et sociaux qui mettent en jeu l'intégrité physique et mentale des personnes. L'altération de l'état de santé général de ces dernières présente diverses formes bien connues et décrites dans la littérature (Theorell *et al.* 1988, Johnson and Hall 1988, Akerstedt 2006, Bonde 2008) et qui présentent de nombreuses similitudes avec les symptômes décrits par les personnes se déclarant EHS (*cf.* Tableau 3, p57). Le stress fait partie de ces conséquences. Il correspond à un déséquilibre entre les contraintes de l'environnement et la perception des ressources qu'a la personne pour y faire face. Ainsi, les symptômes les plus fréquents caractérisant les troubles psychosociaux sont les troubles du sommeil, l'asthénie, les douleurs musculaires accompagnées de raideur, les difficultés de concentration, l'irritabilité, l'anxiété, la dépression, les manifestations ORL et respiratoires, les dermatoses, le psoriasis, les allergies cutanées. Parmi les autres troubles, on retrouve les maux de tête, les palpitations cardiaques, l'hypertension artérielle et les troubles digestifs (coliques, gastralgies, gastrites, colopathies). Ces symptômes sont accompagnés d'un sentiment de mal-être et de souffrance. On observe également un isolement social pouvant conduire à une désinsertion et à une cessation d'activité.

3.8.4 Le concept d'hypersensibilité

L'hypersensibilité désigne une sensibilité plus haute que la moyenne, provisoire ou durable, pouvant être vécue avec difficulté par la personne elle-même, ou perçue comme « exagérée » voire « extrême » par l'entourage. Les hypersensibles percevraient leur environnement avec une acuité et une sensibilité particulière. Ce concept est d'abord apparu en psychologie pour être étayer ensuite par des bases neurobiologiques et génétiques.

3.8.4.1 Personnalité hypersensible

Chez l'être humain, la notion d'hypersensibilité⁷⁴, ou SPS pour *Sensory Processing Sensitivity*, a été décrite il y a environ 20 ans par Elaine Aron, chercheur en psychologie et psychothérapeute, et ses collaborateurs à New York (Aron and Aron 1997) (*cf.* Annexe 5).

L'hypersensibilité est présentée par ces auteurs comme associée à un trait de personnalité, un tempérament qui pourrait concerner 20 % de la population.

⁷⁴ La notion de types de « personnalité » est née d'une recherche en biologie sur plus de 100 espèces animales, des insectes aux mammifères, qui a clairement démontré différents comportements, tempéraments ou encore traits de caractères impliquant le fait d'être plus ou moins réactif, flexible, ou sensible à l'environnement (Wolf, van Doorn, and Weissing 2008). Pour Wolf *et al.*, « *un des facteurs fondamentaux structurant les différences de personnalités [animales] est le degré avec lequel le comportement individuel est guidé par les stimuli de l'environnement* ».

Encadré 2 : une échelle de mesure de l'hypersensibilité

Aron et Aron (1997) ont développé une échelle de mesure de l'hypersensibilité des personnes « *Highly Sensitive Person* » ou HSP (cf. Annexe 5).

Cette échelle contient 27 items comme : avoir une vie intérieure riche et complexe, être consciencieux et très touché par les arts et la musique, être plus affecté que les autres par les changements de vie, avoir plus de difficulté à réaliser une tâche lorsqu'on est observé, sursauter plus facilement, être plus sensible à la douleur, à la sensation de faim et à la caféine, etc. Cette échelle contient 7 graduations de 1 = « pas du tout » à 7 = « extrêmement ».

L'hypersensibilité se constitue pendant la vie intra-utérine, se développe dès la naissance, et se manifeste de différentes façons chez les individus. Son degré d'intensité et son évolution, de l'enfance à l'âge adulte, dépendent en grande partie de l'environnement dans lequel la personne grandit.

Si la notion d'environnement n'est pas toujours définie dans la littérature consacrée à l'hypersensibilité, il apparaît que, le plus souvent, il s'agit de l'environnement social. Cependant, l'hypersensibilité impliquerait également une réactivité particulière à des stimuli de l'environnement externe, tels que le bruit ou la lumière (cf. ci-dessous). De nombreuses études sur l'impact de l'environnement social, en particulier chez l'enfant, ont montré que la combinaison d'un environnement précoce non favorable et d'une réactivité émotionnelle exacerbée est associée à des affects négatifs (neurotisme). Cependant, les enfants hypersensibles sont aussi très réactifs aux environnements positifs et semblent même en bénéficier plus que les enfants non hypersensibles (Aron, Aron, and Jagiellowicz 2012).

L'hypersensibilité peut se résumer en quatre facettes principales de sensibilité augmentée (Aron et al., 2012) :

- 1- Réactions émotionnelles, biologiques et au stress exacerbées (incluant l'empathie) ;
- 2- Traitement plus approfondi de l'information sensorielle de manière consciente ou non (*Depth of processing*) : il concerne la sphère cognitive ainsi que le système immunitaire, ou la douleur ;
- 3- Sensibilité aux stimuli subtils de l'environnement ;
- 4- Sensibilité accrue à une sur-stimulation lorsque les stimuli sont trop intenses.

Les personnalités hypersensibles sont davantage gênées par les stimuli intenses de l'environnement, comme le bruit ou la lumière, qui peuvent vite devenir insupportables. Elles sont plus sensibles ou affectées par la caféine, la douleur, réagissent plus fortement aux médicaments, souffrent plus d'allergies. De plus, elles détestent être pressées, sursautent plus facilement, et sont particulièrement sensibles à l'humeur des autres. Les personnes hypersensibles sont décrites comme des êtres à fleur de peau, empathiques, mais aussi créatifs et intuitifs. Ce trait de personnalité est notamment retrouvé chez les artistes et a été largement associé au fait d'avoir des dons.

Cependant, être hypersensible est aussi un défi, dans la mesure où ces personnes sont facilement débordées par les stimuli de l'environnement en absence de lieux avec moins de stimulations ou de lieux pour se retirer ou se reposer. Quand cela devient chronique, un risque de *burn-out* ou de dépression apparaît. Ainsi, chez le sujet hypersensible, l'environnement a un effet plus important que chez ceux qui ne le sont pas.

3.8.4.2 Endophénotypes neurobiologiques

L'échelle de mesure de l'hypersensibilité de Aron et Aron (1997) (cf. Annexe 5) a été associée à des différences d'activation cérébrale en imagerie fonctionnelle par résonance magnétique nucléaire (IRMf). La réactivité et la sensibilité à l'environnement chez les personnes hypersensibles était associée à une réactivité neurobiologique spécifique. Celle-ci est caractérisée par des activations cérébrales plus importantes en réponse à des changements subtils lors de tâches visuelles, notamment dans les régions associées à l'attention et au traitement des

informations visuelles (claustrum, régions occipito-temporales gauches, régions temporales et pariétales bilatérales et cervelet droit) (Jagiellowicz *et al.* 2011).

Acevedo *et al.* (2014) ont montré que l'échelle d'hypersensibilité (HSP) était corrélée avec une plus grande réaction face à des photos de visages heureux ou tristes en comparaison avec des visages neutres dont celles des époux(ses) des personnes hypersensibles testées. Les aires cérébrales d'activation les plus intenses sont celles associées à la conscience, l'intégration des informations sensorielles, l'empathie et la planification d'actions (insula, gyrus temporal médian, gyrus frontal inférieur, cortex cingulaire) (Acevedo *et al.* 2014).

3.8.4.1 Prédispositions génétiques

Si l'environnement dans l'enfance a un impact important sur l'expression de l'hypersensibilité, ce trait de personnalité est considéré comme inné, génétiquement déterminé. Dans une revue récente, Homberg *et al.* (2016) ont comparé les caractéristiques de l'hypersensibilité et celles du polymorphisme sur un gène impliqué dans la neurotransmission sérotoninergique associé également à une sensibilité augmentée aux stimuli de l'environnement (Homberg *et al.* 2016). Ainsi, le polymorphisme génétique sur le transporteur de la sérotonine (5-HTT, allèle 's' [*short*] du gène 5-HTTLPR codant pour le récepteur) était associé avec une émotivité et une sensibilité au stress augmentées en comparaison à l'allèle 'l' [*long*] de ce gène. Ce polymorphisme génétique était également associé à un phénotype anxieux, au neurotisme (un des 5 facteurs de personnalité proposés par le *Big five model of personality* (Goldberg 1990)) et à un risque augmenté de pathologies affectives et de dépression, en interaction avec les facteurs de l'environnement (Caspi *et al.* 2003, Caspi *et al.* 2010, Homberg and Lesch 2011). Ainsi, la présence de l'allèle 's' est associée à des différences individuelles au plan comportemental, clinique et de la morphologie (réduction du volume de l'amygdale et du cortex préfrontal médian) et de l'activité cérébrale (hyperactivation de l'amygdale et du cortex préfrontal médian [cortex cingulaire antérieur] en réponse à des stimuli négatifs). De plus, une augmentation de certaines fonctions cognitives (mémoire visuelle épisodique, flexibilité, apprentissage de récompenses probabilistes, attention) en lien avec l'activité cérébrale a été démontrée chez les porteurs de l'allèle 's'. L'hyperactivité de l'amygdale serait en lien avec un éveil émotionnel, une hyper-vigilance et une réponse augmentée aux stimuli sociaux émotionnellement positifs ou négatifs (Belsky *et al.* 2009). Des caractéristiques similaires ont été observées chez le primate non humain porteur de l'allèle 's' sur le même transporteur (rh5-HTTLPR) et chez la souris ou le rat *knockout* avec une délétion du gène 5-HTT (Homberg and Lesch 2011). Pour Homberg *et al.* (2016), les similitudes importantes entre les personnes hypersensibles et celles porteuses de l'allèle 's' [*short*] sur le 5-HTT confortent l'hypothèse d'une composante génétique forte dans l'hypersensibilité, avec des pistes de recherche qui restent à explorer. De même, la nature exacte des effets fonctionnels de l'allèle 's' [*short*] versus 'l' [*long*] n'est pas encore clairement établie (Moore and Depue, 2016).

Enfin, d'autres systèmes de neurotransmission et neuromodulation pourraient être impliqués dans la sensibilité et la réactivité à l'environnement ou l'hypersensibilité, comme le système dopaminergique, le GABA, la noradrénaline ou encore les neuropeptides comme l'ocytocine, les opiacés ou l'hormone de libération de la corticotropine (Chen *et al.* 2011, Moore and Depue 2016).

3.8.4.2 Hypersensibilité et syndromes ou symptômes en lien avec l'environnement ?

À notre connaissance, aucune étude n'a été réalisée sur l'existence d'un lien entre ce trait de personnalité, l'hypersensibilité, et la survenue de syndromes ou symptômes en lien avec l'environnement, ou les intolérances environnementales idiopathiques telles que l'EHS ou la sensibilité chimique multiple (SIOC).

On peut noter cependant l'étude de Sandström *et al.* (1997) sur les réponses neurophysiologiques (électrorétinogramme [ERG] et potentiels évoqués⁷⁵ visuels [PEV]) pendant une stimulation lumineuse chez des sujets se déclarant sensibles aux équipements électriques (écrans, lampes fluorescentes, appareils électroménagers, etc.) et chez des témoins non sensibles aux écrans et à la stimulation lumineuse. Les auteurs montrent que les sujets hypersensibles à la lumière présentent une augmentation de l'amplitude de la réponse corticale (PEV) avec les différentes fréquences de stimulations lumineuses utilisées (20-75 Hz), mais pas d'effet sur l'ERG (*cf.* détails de l'article au § 6.2.1.2.7) (Sandström *et al.* 1997).

3.8.5 Conclusion

Ces associations et analogies multiples entre l'EHS et autres troubles ou syndromes médicalement inexpliqués posent la question, débattue depuis longtemps, de savoir si ces divers tableaux cliniques ne représentent que des variantes d'un même état pathologique ou s'ils constituent chacun une entité propre. En tout état de cause, la proximité avec la sensibilité chimique multiple, d'une part, et la fibromyalgie, d'autre part, incitent à accorder une priorité à des études comparatives entre l'EHS et ces deux entités.

De plus, l'existence d'un trait de personnalité, l'hypersensibilité, et, en partie tout au moins, de ses bases biologiques, fournit une piste de réflexion sur un facteur possible commun à l'EHS et à d'autres troubles ou syndromes médicalement inexpliqués, qui mérite d'être étudié.

Hypothèse 1 pour expliquer tout ou partie de la survenue de l'EHS : l'hypersensibilité comme trait de personnalité ?

Cette hypothèse n'a fait l'objet d'aucune étude à ce jour.

⁷⁵ Les potentiels évoqués (PE) sont définis comme des modifications de l'activité électrique du système nerveux en réponse à une stimulation externe (visuelle, auditive, somesthésique ou motrice) ou endogène (PE cognitif). La stimulation doit être répétée un grand nombre de fois pour extraire, par moyennage de l'activité électrique de base, une réponse spécifique de la voie nerveuse stimulée.

4 Contexte général sociétal

Ce chapitre s'intéresse à la manière dont la question de l'EHS est traitée par le corps médical, les pouvoirs publics, les associations et les médias.

4.1 Soins primaires et patients EHS

Ce paragraphe porte sur la prise en charge des personnes se déclarant EHS par les médecins, en examinant les réponses apportées aujourd'hui à la question de l'EHS par le dispositif de soins primaires en France.

4.1.1 Les médecins

De manière générale, les questions relatives aux effets des expositions à des agents présents dans l'environnement (agents biologiques, physiques, chimiques, etc.) sur la santé des personnes s'imposent de toute évidence à l'ensemble de la communauté médicale (les médecins généralistes⁷⁶ ou d'autres disciplines, comme les médecins du travail) en tant qu'acteurs de prévention et médiateurs auprès de la population et de leurs patients. Certains facteurs sont bien connus des médecins (plomb et saturnisme, amiante et mésothéliome par exemple), d'autres le sont moins, voire pas du tout par un grand nombre d'entre eux, ce qui soulève, en premier lieu, des questions sur l'accès des médecins aux informations et aux formations, basées sur les preuves scientifiques.

4.1.1.1 Sources d'informations et connaissances des médecins généralistes sur les effets des champs électromagnétiques

Les quelques études publiées (en Allemagne, en Autriche et en France) concernant le rapport des médecins à l'EHS décrivent en premier lieu un manque d'information et de connaissance des médecins généralistes sur le sujet des ondes électromagnétiques.

En France, pour une majorité d'entre eux (74 %), les médias grand public (presse écrite généraliste, télévision, internet, radio) sont la principale source documentaire ; seuls 26 % déclarent s'informer en lisant des articles scientifiques (Lambrozo *et al.* 2013b).

Cette situation, décrite depuis environ 10 ans, se retrouve dans d'autres pays (Autriche, Allemagne) que la France et semble perdurer (Berg-Beckhoff *et al.* 2010b, Leitgeb, Schröttner, and Bohm 2005). En Allemagne par exemple, une étude sur les connaissances des médecins au sujet des champs électromagnétiques a mis en évidence qu'au moins 30 % d'entre eux ne savaient pas répondre, quelle que soit la question posée (jusqu'à 64 % pour une question sur le DAS) (Berg-Beckhoff *et al.* 2010b, Berg-Beckhoff *et al.* 2014).

La connaissance des sources d'exposition aux radiofréquences les plus courantes semble cependant assez bien maîtrisée par les médecins généralistes français (90 % citent les antennes relais, 86 % les téléphones mobiles, 79 % les fours à micro-ondes). Cependant, d'autres sources sont peu connues (le veille-bébé par exemple, cité par 33 % des médecins seulement) ou reconnues à tort (les GPS⁷⁷ sont cités par 41 % des médecins) (Lambrozo *et al.* 2013b).

⁷⁶ Depuis 2007, en termes juridiques, la médecine générale est une spécialité, au même titre que l'ORL, l'ophtalmologie ou la cardiologie, mais la nature même de sa pratique n'a pas changé.

⁷⁷ Les GPS traditionnels sont des équipements qui n'émettent pas d'ondes radiofréquences. Ils ne sont que de simples récepteurs.

De plus, comme dans la population générale⁷⁸, le niveau de connaissances sur les effets des champs électromagnétiques et sur les ondes électromagnétiques en général semble faible chez les médecins. En effet, la connaissance plus fine des effets sanitaires possibles liés aux champs électromagnétiques est très hétérogène. Par exemple, à la question « Est-ce que les personnes peuvent percevoir les champs électromagnétiques ? », un tiers des médecins généralistes français répondent « oui », un tiers « non » et un tiers « ne sait pas » (Lambrozo *et al.*, 2013).

Cela étant, les enseignements sur les risques environnementaux sont très peu présents dans les programmes de formation médicale initiale et rares dans les formations complémentaires (Diplômes Universitaires, formations en Hygiène, Sécurité et Environnement par exemple).

4.1.1.2 Perception des risques liés aux champs électromagnétiques par les médecins

Plusieurs études (en France (Lambrozo *et al.* 2013a, UMRESTTE 2016), en Suisse (Huss and Rössli 2006), en Allemagne (Kowall *et al.* 2010) ou en Autriche (Leitgeb, Schröttner, and Bohm 2005)), ont montré que la perception du risque lié aux champs électromagnétiques par les médecins dépendait de plusieurs facteurs (âge, genre, mode d'exercice, au fait qu'ils se déclarent suffisamment informés ou pensent que les pouvoirs publics sont attentifs aux préoccupations de la population, etc.).

Le fait de pratiquer des médecines alternatives et complémentaires est également associé à une perception d'un risque plus grand et à une moins bonne connaissance des effets des champs électromagnétiques (qu'ils soient avérés ou peu probables) (Lambrozo, *et al.*, 2013). Cette tendance est retrouvée dans d'autres études sur des populations de médecins généralistes de nationalités différentes (Huss and Rössli 2006, Kowall *et al.* 2010).

Enfin, la perception des risques environnementaux des médecins serait également corrélée à leur niveau d'information ressenti sur les champs électromagnétiques. Les médecins qui se considèrent suffisamment informés sur les champs électromagnétiques seraient significativement moins nombreux à considérer la proximité d'une centrale nucléaire (54 % [p < 0,01] contre 65 % pour l'échantillon global) ou d'une antenne relais (36 % [p < 0,05] contre 48 %) comme un danger potentiel que les autres. En revanche, ils seraient plus nombreux à citer le fait d'habiter à proximité d'une autoroute comme un danger potentiel (66 % [p < 0,01] contre 44 % pour l'échantillon global) (Lambrozo, *et al.*, 2013).

4.1.1.3 Positionnement des médecins par rapport à l'EHS

Dans la situation d'incertitude qui prévaut actuellement au sujet de l'EHS, les médecins peuvent avoir des positions très diverses, qui semblent dépendre de leur spécialité ou de leur propre sensibilité. Par exemple, certains médecins acceptent d'établir des certificats attestant d'une EHS, alors que d'autres refusent.

Lors de son audition, le P^r Cathébras a évoqué le rôle de certains professionnels de santé dans l'établissement de la conviction de l'EHS : « *l'attitude du patient est habituellement modifiée d'une manière considérable pendant et par les examens physiques. Ces changements, qui peuvent influencer profondément le cours d'une maladie chronique ne sont pas pris au sérieux ... (et) n'ont jamais fait l'objet d'une véritable investigation scientifique* »⁷⁹.

Le nombre de médecins généralistes estimant qu'une association entre certains symptômes et les champs électromagnétiques est plausible varie selon les études (méthodologie, question posée, année de l'enquête, pays d'origine, etc.) : 54,3 % des praticiens allemands (Kowall *et al.* 2010), 54 % en Suisse (Huss and Rössli 2006).

En France, une enquête sur l'EHS a été réalisée auprès de médecins généralistes en 2015-2016 (956 réponses, soit un taux de réponse de 11,4 %). À la question « Pensez-vous que les ondes

⁷⁸ L'Eurobaromètre 2010 indiquait que 81 % de la population estime manquer d'information sur ce sujet ou ne la juge pas fiable.

⁷⁹ Il existe cependant quelques travaux sur le sujet, tels que : (Ring *et al.* 2005).

électromagnétiques peuvent être la cause de tout ou partie des symptômes observés ? », 46,2 % des médecins ayant reçu en consultation une personne se déclarant EHS ont répondu positivement (regroupement des réponses « oui et plutôt oui ») (UMRESTTE 2016).

Les praticiens en médecines alternatives et complémentaires (notamment chez les médecins homéopathes) sont davantage convaincus d'un effet possible des ondes en dessous des valeurs limites d'exposition et ont moins confiance dans les organismes scientifiques, avec des disparités selon la spécialité, que les autres généralistes (Huss and Rössli 2006, Lambrozo *et al.* 2013a, Kowall, Breckenkamp, and Berg-Beckhoff 2015). Cependant, les résultats de ces études sont très hétérogènes. Les échantillons de médecins généralistes interrogés et les méthodologies utilisées sont très différents selon les études, leurs résultats sont donc difficilement comparables.

Par ailleurs, les auditions [cf. Auditions du P^r Cathébras, et du D^r Choucroun] ont également souligné la complexité de la relation médecin-patient lorsque le praticien ne peut exclure ou affirmer le lien de causalité entre les symptômes décrits par le patient et l'exposition aux champs électromagnétiques. La difficulté à analyser et interpréter les symptômes des personnes se déclarant EHS est liée, notamment, à la difficulté d'accès des médecins généralistes aux données scientifiques probantes sur les effets des champs électromagnétiques sur la santé humaine. L'absence de consensus médical sur les pratiques de soin adaptées aux besoins exprimés par les personnes se déclarant EHS constitue un écueil dans la relation médecin-patient. En outre, la position ambiguë des pouvoirs publics et des acteurs institutionnels eu égard à l'EHS, constitue une autre difficulté pour les praticiens médicaux pour fournir aux personnes se déclarant EHS vues en consultation des pistes de réponse adaptées.

La relation médecin-patient est particulièrement déroutante pour le praticien lorsque le patient consulte, alors que ce dernier a déjà établi son propre diagnostic et attend qu'il soit confirmé par le médecin.

4.1.2 Les consultations médicales pour patients attribuant leurs troubles aux champs électromagnétiques

Les personnes se déclarant EHS recherchent, comme tous les patients, une prise en charge adaptée de la part des professionnels de santé et, notamment, une écoute, de l'empathie et de la compassion.

D'après les témoignages rapportés au cours des auditions de médecins (voir liste dans le Tableau 1), la confrontation du médecin avec les patients souffrant de maladies que l'on peut regrouper sous le terme « médicalement inexpliquées » (syndrome fonctionnel sans physiopathologie communément acquise) est déroutante pour le soignant, et bien éloignée de sa formation. C'est le cas de la fibromyalgie pour le rhumatologue, du syndrome du côlon irritable pour le gastro-entérologue, des acouphènes pour l'oto-rhino-laryngologiste, de la pelade décalvante totale pour le dermatologue, du syndrome de fatigue chronique pour l'interniste, du syndrome d'hyperventilation ou spasmophilie et des douleurs thoraciques non cardiaques pour les pneumologues et les cardiologues, des céphalées pour le neurologue, etc.

« La difficulté de l'EHS, c'est qu'on a des gens qui arrivent déjà avec un diagnostic et les médecins sont dépourvus de moyens. D'habitude, les malades arrivent avec des symptômes, on leur fait des examens et on leur fait un diagnostic. Là, on ne sait pas quel examen faire pour confirmer le diagnostic. C'est déroutant ». Emilie Comte (médecin), 28.02.2014, Lyon (voir rapport (Ouillon 2014)).

Dans cette configuration particulière, où le patient arrive le plus souvent avec son propre diagnostic déjà établi (ou « auto-diagnostic ») et n'attend qu'une confirmation du professionnel, le modèle fonctionnaliste de la relation médecin-malade se trouve modifié. Parallèlement, le médecin, qui a souvent un manque d'expérience et d'information sur le sujet, ne peut exclure ou affirmer le lien avec certitude (Berg-Beckhoff *et al.* 2010a) [voir aussi l'audition de P^r Cathébras].

4.1.2.1 Les consultations en médecine générale

En France, les médecins généralistes sont, dans le système de santé, les praticiens cliniciens de premier recours face à une demande de soin de la population générale.

Des études concernant les personnes se déclarant EHS ont montré que la relation avec la médecine conventionnelle était souvent difficile et non satisfaisante, avec une quête souvent infructueuse de soulagement auprès de ces professionnels de santé et un recours aux médecines alternatives et complémentaires (MAC) fréquent (Baliatsas et al. 2014b, Eek et al. 2009). Le P^r Cathébras a, par exemple, évoqué un « long itinéraire médical [et des...] malentendus avec les médecins » [Audition P^r Cathébras].

La prévalence de l'EHS est difficile à estimer compte tenu de la difficulté à la caractériser (cf. § 3.5). Pour évaluer l'importance de ce problème de santé, il est intéressant d'étudier le nombre de consultations médicales pour des troubles liés aux expositions environnementales aux champs électromagnétiques. Des études conduites en Allemagne et au Danemark ont indiqué une augmentation du nombre de consultations concernant des troubles ou inquiétudes sur l'ensemble des expositions environnementales (Bailer, Witthöft, and Rist 2008, Andersen and Jensen 2012). D'après l'étude de Lambrozo *et al.* (2013), les médecins généralistes français ont déjà été interrogés par leurs patients sur les risques éventuels liés aux champs électromagnétiques dans 74 % des cas (3 % souvent interrogés, 28 % de temps en temps et 43 % rarement). Ils ont été consultés pour des symptômes reliés à l'EHS dans les 12 derniers mois précédant l'enquête dans 30 % des cas. Dans la dernière enquête sur l'EHS réalisée, en France, auprès de médecins généralistes, ce pourcentage était de 26,2 % (UMRESTTE 2016). Le pourcentage de médecins confrontés à l'EHS était moindre que dans d'autres pays : 85 % en Autriche (Leitgeb, Schröttner, and Bohm 2005), 69 % en Suisse (Huss and Rösli 2006), et 73,1 % en Allemagne (Berg-Beckhoff *et al.* 2010a).

Là aussi, les résultats varient selon les conditions de sélection des médecins interrogés et la question posée (selon qu'on leur demande, par exemple, s'ils ont été consultés par des personnes se déclarant EHS l'année précédant l'étude ou s'ils l'ont déjà été de manière générale). Ces données étant peu comparables, il est difficile d'avoir une idée précise du nombre de consultations à l'échelle nationale et de leur évolution dans le temps.

Les études réalisées en Suisse et en Allemagne mettent en évidence plus de consultations en lien avec l'EHS chez les praticiens ayant un mode d'exercice particulier (homéopathie, acupuncture, médecines alternatives, etc.) (Huss and Rösli 2006, Kowall, Breckenkamp, and Berg-Beckhoff 2015). Ceci peut s'expliquer, en partie, par le fait que le positionnement vis-à-vis de l'EHS et la sensibilité des praticiens en médecines alternatives et complémentaires semblent différents de ceux de leurs collègues (voir § 4.1.1).

4.1.2.1 Les consultations des services de pathologie professionnelle et environnementale

L'idée de permettre aux personnes se déclarant EHS de consulter les centres de consultation de pathologies professionnelles et environnementales (CCPP) s'est concrétisée à la suite du Grenelle des ondes (2009) (voir § 4.2).

Le groupe de travail a auditionné deux des médecins qui, dans le cadre des consultations des CCPP, sont connus pour prendre en charge des personnes se déclarant EHS et / ou sensibles aux odeurs chimiques [auditions des D^{rs} Dupas et Choucroun]. Ces auditions sont des témoignages de praticiens, sans exposé de données scientifiques. Un certain nombre d'hypothèses concernant l'origine de l'EHS ont été discutées (voir § 7). Par exemple, le D^r Choucroun a soulevé la question de la composante infectieuse et des pathologies dentaires (sensibilité aux amalgames dentaires, etc.) qui pourraient jouer un rôle dans l'EHS [voir audition D^r Choucroun].

Il n'existe pas de données sur la confrontation des médecins du travail aux problèmes de travailleurs EHS. Le groupe de travail de l'Anses a eu connaissance de demandes d'adaptation au poste de travail sans ondes, mais il n'existe pas de données publiées sur le sujet.

L'Institut national de recherche et de sécurité (INRS), qui est un organisme référent pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles en collaboration avec les Caisses d'assurance retraite et de la santé au travail (Carsat) et les Caisses régionales d'assurance maladie (Cram), effectue actuellement des études sur les résultats des mesures effectuées en milieu de travail et près de machines et installations particulièrement rayonnantes. Les premiers résultats sont présentés dans l'outil simplifié d'évaluation des risques électromagnétiques (OSERAY) dans les rubriques spécifiques à ces machines et installations. Le but est de concevoir des solutions techniques pour réduire les niveaux d'exposition aux ondes électromagnétiques conformément à la directive européenne 2013/35/UE⁸⁰, qui rend obligatoire pour les entreprises l'évaluation de ces expositions. Il s'agit des premières études réalisées en France pour établir un bilan des expositions industrielles.

4.1.2.2 Les autres consultations accueillant des patients se plaignant de troubles qu'ils attribuent aux champs électromagnétiques

Le groupe de travail a tenu à auditionner plusieurs médecins accueillant des patients se déclarant EHS en consultations [voir auditions des D^{rs} Tournesac et Rosa] ou à échanger avec eux par courriel et par téléphone (cas du D^r Chevallier et du D^r Ben Brick).

Ces auditions ont fourni au groupe de travail des témoignages et ont porté à sa connaissance des pratiques empiriques. Elles ne sont pas représentatives de l'ensemble des pratiques médicales et ne constituent pas des éléments scientifiques. Néanmoins, elles ont permis de recenser un certain nombre d'hypothèses pour expliquer tout ou partie de l'EHS (voir § 7), par exemple, celle selon laquelle les personnes se déclarant « *EHS auraient un terrain migraineux* » [cf. Audition du D^r Chevallier].

Par ailleurs, le P^r Belpomme, qui a mis en place une consultation de médecine environnementale dans une clinique privée en septembre 2009, où sont pris en charge notamment des malades qui s'interrogent sur leur éventuelle EHS, a été invité à plusieurs reprises par l'Anses pour être auditionné (le 10 juillet, le 30 septembre, puis le 6 novembre 2014). À chaque fois, le P^r Belpomme a reporté puis décliné l'invitation. Il n'a pas non plus souhaité répondre par écrit aux questions qui lui ont été adressées par le groupe de travail (cf. liste de questions en Annexe 3).

Les experts du groupe de travail déplorent de ne pas avoir pu s'entretenir avec le P^r Belpomme au sujet de l'EHS. Ils ont néanmoins analysé les résultats qu'il a publiés fin 2015 (Belpomme, 2015) (voir analyse détaillée de l'article au § 6.1.2 et Annexe 4).

Le groupe de travail a également pris contact avec le P^r Von Klitzing, qui a reçu des personnes se déclarant EHS en consultation en Allemagne, dès le 23 juillet 2014. Dans l'une de ses publications (Tuengler *et al.*, 2013), le P^r Von Klitzing évoquait un trouble fonctionnel du système nerveux autonome (voir analyse détaillée de l'article au § 6.2.1.2.3). Après avoir accepté, dans un premier temps, l'invitation de l'Anses pour une audition initialement prévue le 6 novembre 2014, le P^r Von Klitzing a annulé sa participation et n'a dès lors plus souhaité être auditionné par le groupe.

4.1.3 L'Académie nationale de médecine

L'Académie nationale de médecine, par la voix de son président, a exprimé à deux reprises (en 2012 et 2014) sa position sur les effets sanitaires des radiofréquences. Dans chacune de ses

⁸⁰ La directive européenne 2013/35/UE concernant les prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux agents physiques (champs électromagnétiques) a été transposée en France par le décret n° 2016-1074 du 3 août 2016 relatif à la protection des travailleurs contre les risques dus aux champs électromagnétiques. Elle impose des limites d'exposition des travailleurs aux champs électromagnétiques fondées sur les effets avérés des champs électromagnétiques sur l'humain (les effets de stimulations des tissus excitables et les courants induits pour les basses fréquences, et les effets thermiques dus à l'échauffement pour les radiofréquences).

communications⁸¹ et dans une « information », l'Académie mentionne que le seul effet biophysique avéré des radiofréquences est un effet thermique et qu'« aucun système sensoriel humain permettant de percevoir de tels champs dans cette gamme de fréquence et de puissance [émises par les antennes-relais] n'a été identifié »⁸².

S'agissant de l'hypersensibilité aux champs électromagnétiques, l'Académie nationale de médecine reconnaît les souffrances des personnes se déclarant EHS, mais, se fondant notamment sur l'absence de lien de causalité avéré, elle a constamment réfuté toute relation entre l'électrohypersensibilité et une exposition aux champs électromagnétiques.

Elle reconnaît notamment que les personnes électrohypersensibles éprouvent une réelle souffrance qui peut « *entraîner un lourd handicap, qui doit être pris en charge comme une affection à part entière, sans tromperie sur son origine et non en arguant d'une sensibilité aux ondes dont le traitement relèverait de « dispositifs anti-ondes » ou de « zones blanches »* » (Communiqué de Presse du 5 mai 2014)⁸³.

Réagissant à la médiatisation de l'octroi par la Maison départementale des personnes handicapées (MDPH) de l'Essonne d'une aide à une personne se déclarant EHS début 2014, l'Académie nationale de médecine a désapprouvé le financement sur fonds publics de dispositifs « anti-ondes », estimant que ceci revenait à « *conforter une croyance dans la réalité de l'effet des ondes sur l'organisme* » et à légitimer des dispositifs dont aucune étude n'a montré l'efficacité sur la santé⁸⁴. Une « Note d'actualité » du 8 septembre 2015 écrite suite à la reconnaissance de l'incapacité d'une personne électrohypersensible par le Tribunal du contentieux de l'incapacité (TCI) de Toulouse reprend les mêmes arguments.

4.2 L'approche de la question de l'EHS par les pouvoirs publics

En 2009, à l'issue du Grenelle des ondes et des travaux de la table ronde « Radiofréquences, Santé, Environnement », le Gouvernement avait retenu dix orientations reposant sur quatre principes : 1) transparence de l'information et des financements, 2) attention aux inquiétudes formulées, 3) précaution et 4) concertation entre les acteurs. Une de ces orientations concernait l'électrohypersensibilité⁸⁵ : « Une prise en charge adaptée pour les personnes hypersensibles ». Elle prévoyait de poursuivre la collaboration avec les équipes de l'hôpital Cochin dans la perspective d'élaborer un protocole d'accueil et de prise en charge de ces patients, et de soutenir la recherche sur les causes de ces symptômes. Ceci a été réalisé avec la mise en place début 2012 d'une étude financée par le Programme hospitalier de recherche clinique (PHRC)⁸⁶, dont les résultats ne sont pas encore connus à ce jour, ainsi que par les appels d'offres spécifiques « hypersensibilité » du Programme national de recherche (PNR) « Environnement, Santé, Travail » géré par l'Anses.

Dans une note du 26 mai 2014 relative à la gestion des risques liés aux radiofréquences à destination des Directeurs généraux des Agences régionales de santé⁸⁷ (ARS), la Direction générale de la santé (DGS) a précisé les éléments de réponse à apporter aux sollicitations des personnes indiquant être hypersensibles aux champs électromagnétiques.

⁸¹ Les « communiqués » font état de positions officielles de l'Académie, alors que les « informations » sont de la seule responsabilité de leurs auteurs.

⁸² <http://www.academie-medecine.fr/publication100100257/>

⁸³ <http://www.academie-medecine.fr/le-5-mai-2014-communique-de-presse-electrosensibilite/>

⁸⁴ <http://www.academie-medecine.fr/electrosensibilite-une-indemnisation-ne-constitue-pas-une-preuve-scientifique/>

⁸⁵ http://www.radiofrequences.gouv.fr/IMG/pdf/Dix_orientations_Gouvernement_RF.pdf

⁸⁶ Voir présentation de l'étude dans la note-de-bas de page n°47, p43.

⁸⁷ Note d'information DGS/EA1 n° 2014-171 du 26 mai 2014 relative à la gestion des risques liés aux radiofréquences, publiée au BO Santé du 15 juillet 2014.

Cette note rappelait que, dans un rapport publié en 2009, l'Afsset avait conclu notamment qu'en l'état actuel des connaissances, « aucune preuve scientifique d'une relation de causalité entre l'exposition aux radiofréquences et l'hypersensibilité électromagnétique n'avait pu être apportée jusqu'à présent ».

Elle indiquait également que les personnes se déclarant EHS qui faisaient appel aux services des ARS pouvaient être dirigées pour une prise en charge vers l'un des 24 centres de consultation de pathologies professionnelles (CCPP) et que, lorsque des personnes formulaient « des demandes spécifiques lors d'une hospitalisation, comme par exemple de disposer d'une chambre ou d'un bloc opératoire exempt de champs électromagnétiques, [...] la prise en charge de la personne [devait] concilier la demande avec les contraintes liées à l'urgence, l'organisation de l'établissement, la délivrance et la sécurité des soins ».

À propos des demandes de création de zones blanches, « les expertises de l'Anses ne [suggérant] pas la nécessité de créer de tels lieux, [...] la DGS n'a pas émis de recommandations au sujet des zones blanches. Les initiatives privées en ce sens ressortent de la liberté individuelle ».

S'agissant des certificats médicaux attestant de l'hypersensibilité aux champs électromagnétiques, la DGS laissait toute latitude aux médecins qui « seront à même d'apprécier au cas par cas l'opportunité de rédiger un certificat médical et de décider du contenu approprié ».

Plusieurs MDPH (Essonne, Ardèche, Ariège) ont reconnu un statut de travailleur handicapé à des personnes se déclarant EHS, sans qu'il soit possible de savoir précisément leur nombre. C'est le cas, par exemple, de la MDPH de l'Essonne qui avait accordé ce statut à ces personnes, et octroyé, pour la première fois en 2014, une subvention à l'une d'entre elles pour financer l'aménagement de son logement (tissus et baldaquin anti-ondes) (voir § 8.3.1.2 sur l'efficacité des dispositifs de protection contre les champs électromagnétiques).

L'Anses a demandé par courrier (envoyés en 2014 et 2015) des précisions aux MDPH de l'Essonne et de l'Ardèche pour connaître les motivations de ces décisions et le nombre d'allocataires qui en bénéficiaient. Aucun courrier de réponse ne lui est parvenu pendant la durée de l'expertise.

Par ailleurs, une personne se déclarant EHS qui avait déposé un recours en avril 2014 contre une décision de la commission des droits et de l'autonomie des personnes en situation de handicap de l'Ariège a obtenu une décision favorable du Tribunal du contentieux de l'incapacité (TCI) de Toulouse le 8 juillet 2015. L'expert désigné par le TCI, médecin généraliste, avait porté le diagnostic de syndrome d'hypersensibilité aux ondes électromagnétiques, assorti d'un pronostic de réversibilité possible (au bout de trois ans), évalué la déficience fonctionnelle de l'intéressée à 85 % et précisé qu'elle ne pouvait pas se procurer d'emploi compte-tenu de son handicap⁸⁸. Dans sa décision, le TCI n'avait pas mentionné de diagnostic et avait simplement « *dit qu'à la date du 01/04/2013, Madame X présent[ait] un taux d'incapacité de 85 % et rempli[ssait] les conditions médicales pour prétendre à l'allocation aux adultes handicapés à compter du 01/04/2013 pour une durée de deux ans.* »

La loi n° 2015-136 du 9 février 2015 relative à « la sobriété, à la transparence, à l'information et à la concertation en matière d'exposition aux ondes électromagnétiques » (dite « loi Abeille ») demande (article 8), que le Gouvernement remette au Parlement un rapport sur l'électrohypersensibilité dans un délai d'un an à compter de la date de promulgation de la loi.

⁸⁸ Est considérée comme travailleur handicapé « toute personne dont les possibilités d'obtenir ou de conserver un emploi sont effectivement réduites par suite de l'altération d'une ou plusieurs fonctions physique, sensorielle, mentale ou psychique » (<http://travail-emploi.gouv.fr/>).

4.3 Associations généralistes et spécialisées sur la question de l'EHS

Des associations ont commencé à s'intéresser à la problématique des implantations d'antennes-relais vers la fin des années 1990. Elles relayaient alors à la fois des interrogations et des revendications de riverains concernant des dossiers locaux, ainsi qu'un point de vue plus général sur les politiques publiques quant à ces implantations, à la réglementation et à l'évaluation des effets sanitaires des radiofréquences (Borraz O 2004). Ces associations ont ensuite évolué pour s'intéresser à la question de l'EHS.

Plus récemment, des personnes se déclarant EHS se sont regroupées dans des associations spécialisées, par exemple « le Collectif des électrosensibles de France » en 2008⁸⁹ ou « Une Terre pour les EHS » en 2011, pour répondre plus spécifiquement à leurs attentes.

Pour échanger et recueillir leurs avis, leurs expériences et leurs revendications, le groupe de travail de l'Anses a auditionné près d'une dizaine de représentants d'associations (voir liste détaillée dans le Tableau 1). Le groupe a pu ainsi approfondir sa compréhension des rôles joués par ces collectifs, de leurs connaissances de l'EHS, ainsi que de leurs attentes.

4.3.1 Mission des associations

Certaines associations ont été spécifiquement créées pour et / ou par des personnes se déclarant EHS (associations « spécialisées »), constituant des collectifs de malades, et sont porteuses d'une expérience ou d'un vécu direct du sujet. D'autres, plus « généralistes », se donnent pour mission de transmettre leur sélection d'informations, accompagnent et / ou fédèrent d'autres structures associatives dans leurs actions. Enfin, le Criirem par exemple, se positionne en tant qu'organisme d'expertise pour la mesure des champs électromagnétique et se déclare « indépendant ».

Ces catégories ne sont pas hermétiques ; des associations peuvent porter plusieurs de ces rôles et les échanges et partages entre elles peuvent être multiples, d'autant que leurs expériences se complètent.

4.3.1.1 Leurs actions

Les associations qui militent spécifiquement sur la question des ondes électromagnétiques sont fréquemment contactées par des personnes ou des institutions cherchant des renseignements sur la question des ondes électromagnétiques, de leurs effets sanitaires et de la législation concernant les dispositifs émetteurs. Elles sont appelées à participer à différents débats et conférences de toutes natures (locaux, télévisés, participatifs, etc.), et / ou organisent régulièrement des rencontres.

La plupart de ces associations rassemblent, organisent et diffusent les informations qu'elles considèrent pertinentes⁹⁰ selon leurs propres critères et en fonction de leurs objectifs. Selon leur structure, elles renseignent le public directement (par exemple par des permanences téléphoniques) et par le moyen de sites Internet. Ces sites, proposés par certaines associations, constituent une source d'information très visible dans le domaine des radiofréquences, en particulier sur les questions relatives aux effets sanitaires et aux procédures d'installation d'antennes relais.

En ce qui concerne la problématique de l'EHS, elles peuvent remplir une mission d'accueil et d'information, ainsi que d'écoute et d'aide à l'hébergement. Les associations sont contactées par des personnes cherchant des informations ou des conseils sur le sujet, et parfois par des personnes en détresse, ayant dû abandonner leur domicile et vivant dans des lieux insalubres, ou cherchant des solutions de repos temporaire. Les associations « généralistes » sur les ondes

⁸⁹ Le « Collectif des électrosensibles de France » et l'association « Priartem » ont fusionné en 2014 pour devenir « Électrosensibles de France/Priartem ».

⁹⁰ Les informations émanant des rapports des autorités sanitaires y sont généralement traitées de manière très critique.

diffusent leur vision de l'existence de l'EHS et contribuent à l'autodiagnostic, mais elles renvoient généralement vers les associations « spécialisées » quand la demande devient spécifique [Voir par exemple les auditions de Janine Le Calvez, Priartem, et de Jacqueline Collard, Zone blanche].

Des associations plus « spécialisées », en particulier les associations d'EHS, fournissent des informations et une aide plus spécifiques. Certaines proposent, quand elles le peuvent, d'aider à trouver des solutions d'hébergement qui correspondent à leurs critères (en matière d'évitement des champs électromagnétiques, notamment). Les difficultés rencontrées par les personnes se déclarant EHS pour utiliser Internet accroissent l'importance pour ces associations d'organiser des rencontres individuelles et collectives dans des lieux où ces personnes se sentent protégées des sources de champs électromagnétiques [voir en particulier l'audition de Philippe Tribaudeau, Une terre pour les EHS].

Ces associations constituent des collectifs d'échange, de partage et d'accompagnement. De par l'importante diffusion des dispositifs mettant en œuvre des ondes électromagnétiques sur le territoire, les personnes qui cherchent à les éviter peuvent être amenées à mettre en œuvre des stratégies d'évitement et d'éloignement considérables. De plus, la souffrance qu'elles expriment est difficilement partageable avec un entourage qui ne l'a pas expérimentée, ce qui peut conduire à une incompréhension, voire à un rejet, qui participe à leur désocialisation. Les associations peuvent permettre de conserver ou de retrouver un lien social dans un collectif où la personne se déclarant EHS se trouve reconnue et comprise [voir l'audition de Philippe Tribaudeau, Une terre pour les EHS].

Elles constituent des réseaux de personnes se déclarant EHS. Par le partage d'expériences, ces associations proposent des réponses empiriques qui cherchent à prévenir ou à réduire la souffrance et la gêne matérielle de ces personnes. Les associations peuvent constituer une forme de soutien moral et informatif dans un long parcours de recherche de soins adaptés et de demandes pour faire reconnaître une souffrance et un handicap. Elles aident ces personnes dans leur recherche d'institutions et de personnels soignants les plus à l'écoute de la problématique EHS, ainsi qu'à la constitution de dossiers, tant du point de vue médical que du point de vue administratif.

Pour autant, l'adhésion d'une personne à l'une de ces associations ne garantit pas nécessairement une amélioration durable de son état. Il a été mentionné, à plusieurs reprises, au cours d'auditions de professionnels de santé, que sur le long terme, la question d'un « entre soi » pouvait se poser, diminuant potentiellement pour certaines personnes la création de nouveaux liens sociaux et l'accès à de nouvelles ressources : l'adhésion à une association d'EHS est « souvent, et paradoxalement, un facteur de pérennisation de la maladie », voire « un facteur aggravant », qu'une fois qu'« ils sont enfermés dedans, ... ils ont très peur de ressortir et de se retrouver face à l'incompréhension... ça devient difficile de les traiter » [Voir auditions du P^r Cathébras et du D^r Choucroun par exemple].

4.3.1.2 Représentation et revendications

Les associations auditionnées jouent un rôle de représentation de leurs adhérents (bien que leur nombre ne soit pas toujours communiqué) et de défense de leurs revendications auprès des institutions, des instances politiques, des agences sanitaires, des organismes de recherche, etc. [Voir par exemple l'audition de Jacqueline Collard, Zone blanche].

Elles portent la problématique de l'EHS et soulèvent des questions sanitaires, politiques et technologiques dans la sphère publique, sur la scène médiatique et dans l'agenda politique, soit spécifiquement, soit comme composante d'une perspective plus globale sur la santé, l'environnement et la biodiversité [voir auditions de José Cambou, FNE, et Madeleine Madoré, Le Lien].

4.3.1.3 Participation à des études et enquêtes citoyennes

Si certains membres actifs d'associations ont des compétences scientifiques, d'autres se revendiquent comme non-scientifiques, mais se considèrent comme des citoyens éclairés. D'une manière générale, les associations participent de près ou de loin à diverses formes d'expériences

dans le domaine de l'EHS (en mettant en œuvre des enquêtes, en essayant de recenser les personnes se déclarant EHS, en réalisant leurs propres mesures, etc.).

Certaines associations effectuent une veille documentaire de la littérature scientifique. Elles considèrent que les études montrant un effet des champs électromagnétiques ne sont pas assez prises en compte par les organismes d'évaluation et de régulation [Voir en particulier l'audition de Sophie Pelletier, Électrosensibles de France/Priartem]. Elles établissent des liens avec leurs homologues au niveau international pour établir, entre elles, une comparaison des témoignages qu'elles enregistrent et des mesures prises par les autorités publiques. Elles peuvent être amenées à participer à l'élaboration et au déroulement de certaines recherches et sont auditionnées dans le cadre de processus d'évaluation.

Certaines associations organisent ou participent à des études et enquêtes citoyennes. Elles ont, par exemple, réalisé auprès de leurs membres et sympathisants des recensements et des appels à témoignages, afin de procéder à un recensement des troubles de l'EHS et à l'estimation de la taille de la population concernée [voir l'audition de Philippe Tribaudeau, Une terre pour les EHS]. Des membres du groupe de travail « radiofréquences et santé » ont également pu constater le développement au sein de l'association Électrosensibles de France/Priartem de procédures expérimentales destinées à étudier les effets ressentis par des personnes se déclarant EHS au regard de leur exposition mesurée en continu par un exposimètre et couplée à une géolocalisation. En effet, certaines associations réalisent des mesures d'exposition. En particulier, le Criirem, fondé sur le modèle de la Commission de recherche et d'information indépendantes sur la radioactivité (Criirad), se positionne en tant qu'organisme d'expertise qui se déclare « indépendant » [Voir l'audition de Pierre Le Ruz, Criirem ou courrier de Générations futures]. On notera cependant que le Criirem n'est pas enregistré dans la liste des laboratoires indépendants accrédités par le Comité français d'accréditation (Cofrac) pour la mesure des expositions aux champs électromagnétiques dans l'environnement⁹¹.

4.3.2 Diagnostics et mécanismes proposés par les associations

Pour la personne se déclarant EHS, l'attribution de ses symptômes aux radiofréquences est souvent un processus long, accompagné d'une errance médicale (cf. § 3.1.4 et article de Dieudonné (2016) présenté au § 6.1.1.1). Le parcours de soin est caractérisé par une multiplication des consultations chez des praticiens de spécialités différentes, ainsi que par une recherche personnelle pour parvenir à préciser les causes de la souffrance et les facteurs qui influent sur son intensité et sa durée, ainsi que son contexte d'apparition et de rémission. Les représentants d'associations auditionnés ont confirmé cet aspect, soulignant la difficulté pour les personnes se déclarant EHS d'obtenir une reconnaissance : certains réclament la reconnaissance de leur souffrance, d'autres de leur statut de handicapé, voire, pour certains, la reconnaissance d'un lien de causalité entre les symptômes ressentis et les champs électromagnétiques. Si certaines de ces personnes ont obtenu une certaine forme de reconnaissance par un statut ou une aide pour handicap, cet octroi se fait sans prise de position quant à la nature de l'EHS elle-même [Voir notamment les auditions de Sophie Pelletier, Électrosensibles de France/Priartem et de Philippe Tribaudeau, Une terre pour les EHS].

4.3.2.1 Diversité individuelle, mais attribution causale identique

Interrogés sur les mécanismes pouvant être à la base de l'EHS, les collectifs de malades ont insisté sur la diversité des sources mises en cause, la très grande multiplicité des effets associés et l'importance des variabilités individuelles [Voir l'audition de Sophie Pelletier, Électrosensibles de France/Priartem].

⁹¹ Cette accréditation est une obligation réglementaire pour effectuer des mesures de l'exposition dans le cadre du dispositif national de surveillance et de mesure de l'exposition du public aux ondes électromagnétiques, par lequel tout particulier peut solliciter gratuitement l'évaluation de l'exposition, par exemple à son domicile.

Selon certaines associations, chaque cas individuel serait une combinaison de sensibilités particulières aux ondes électromagnétiques incriminées (des basses fréquences aux radiofréquences, d'intensités fortes à très faibles, de signaux de natures variées) et de symptômes rapportés. Elles estiment que cette diversité serait d'autant plus importante que les niveaux de sensibilité à ces ondes seraient multiples et dépendraient du contexte, allant de la gêne à l'hypersensibilité, que la réponse à l'exposition pourrait être immédiate ou différée et que l'affection et ses spécificités évolueraient dans le temps.

Par-delà ces dissemblances, les associations estiment que ces tableaux convergent sur de nombreux points et que, ce qui relierait tous les cas serait le constat, par la personne se déclarant EHS elle-même, d'une aggravation de ses symptômes à proximité d'une source de champs électromagnétiques et d'une amélioration quand il y a éloignement ou protection vis-à-vis de la source.

4.3.2.2 Mécanismes explicatifs proposés

Pour certaines associations, les autorités publiques n'accordent pas assez d'importance aux études qui montrent des résultats positifs, ce qui les détourne de la recherche de mécanismes physiques et / ou biologiques à l'origine de l'EHS.

Les associations ont adopté plusieurs pistes d'exploration quant aux mécanismes possibles de l'EHS, depuis les magnétosomes jusqu'à la perméabilité de la barrière hémato-encéphalique en passant par le stress oxydant [cf. auditions de Sophie Pelletier et Janine Le Calvez, Électrosensibles de France/Priartem, de Philippe Tribaudeau, Une terre pour les EHS, de Pierre Le Ruz, Criirem, de Agnès Fontana, Robin des Toits]. La plupart de ces propositions se retrouvent dans la littérature scientifique à disposition du groupe de travail. Pour les associations, la réduction de la problématique à une dimension psychologique constitue un biais important, qui freine la recherche de troubles organiques et nuit à la prise en charge des personnes.

Selon elles, l'idée générale qui se dégage serait qu'une réaction biologique du corps humain aux champs électromagnétiques, dont le mécanisme n'est pas encore identifié, existerait pour un faible niveau d'exposition. Cette réaction serait sans effet sanitaire dans la vaste majorité des cas, mais serait à l'origine d'un trouble chez les personnes se déclarant EHS. Ce trouble pourrait être lié à l'intensité, la durée ou la diversité des signaux [auditions de Sophie Pelletier et Janine Le Calvez, Électrosensibles de France/Priartem, de Philippe Tribaudeau, Une terre pour les EHS, de Pierre Le Ruz, CRIIREM].

Lors des auditions, il a également été fortement souligné la possibilité d'un lien entre l'EHS et d'autres affections, en particulier les « maladies environnementales émergentes » (telles que le SIOC⁹²) ou d'autres pathologies (telles que la fibromyalgie⁹², le syndrome de fatigue chronique ou la maladie de Lyme⁹³). Selon elles, ce lien pourrait être le signe de réactions différentes à un même problème (par exemple, un « burn-out environnemental ») ou d'un « effet cocktail » lié soit à une co-exposition (co-morbidité) soit à une relation séquentielle (l'EHS pourrait alors être la conséquence d'une première atteinte qui ne serait pas causée par une onde électromagnétique).

⁹² Cf. § 3.8.3 sur les analogies entre le SIOC, la fibromyalgie, les acouphènes et l'EHS.

⁹³ Cf. note de bas de page n° 173, p196 au paragraphe 7.3 sur la maladie de Lyme.

4.3.2.3 Soin et protection

Au cours des auditions, les associations ont confirmé qu'en matière de soin médical, devant le manque de réponse spécifique trouvée auprès des praticiens « conventionnels », les personnes se déclarant EHS ont recours aux « médecines alternatives ». Les associations diffusent parfois quelques conseils de l'ordre de l'hygiène de vie ou de l'alimentation, sans intervenir dans le domaine de la pratique médicale [Voir les auditions de Sophie Pelletier, Électrosensibles de France/Priartem et de Philippe Tribaudeau, Une terre pour les EHS].

Les prescriptions des associations sont plus affirmées à l'encontre des dispositifs destinés à diminuer les expositions aux ondes⁹⁴. En effet, le marché de tels dispositifs s'est développé à destination des personnes se déclarant EHS et celles soucieuses des effets sanitaires des champs électromagnétiques en général. Certaines associations soulignent que la teneur frauduleuse, potentielle ou avérée, de nombreuses offres commerciales représente « un vrai problème » [Sophie Pelletier, Électrosensibles de France/Priartem]. Elles font œuvre de mise en garde dans ce domaine et préconisent l'usage de dispositifs pour lesquels (rideaux, papiers peints, etc.) une diminution de l'exposition est mesurable (voir évaluation de leur efficacité au § 8.3.1.2)⁹⁵.

4.3.3 Attentes des associations

D'une manière générale, les associations auditionnées mettent en avant l'importance de leurs attentes vis-à-vis du développement d'une approche ouverte de l'EHS de la part des autorités sanitaires. Si elles expriment un manque de confiance vis-à-vis des autorités publiques, elles souhaitent néanmoins la mise en place de relations de confiance mutuelle sur le long terme. Elles appellent au développement de mesures de prévention primaire et de recherches permettant de mettre en évidence de manière objective les troubles des personnes se déclarant EHS.

4.3.3.1 Reconnaissance du handicap et de l'EHS

Certaines associations militent pour la reconnaissance de l'EHS en tant que maladie causée par les champs électromagnétiques et la reconnaissance du handicap qu'elle constitue pour les personnes qui en sont atteintes (pour voir ce qu'il en est dans les autres pays, se reporter au § 8.2). Elles souhaitent que celles-ci puissent se voir octroyer une aide pour des équipements de protection et l'aménagement de postes adaptés en milieu professionnel.

Les associations relèvent l'existence de prises en charges partielles (exemples des allocations par les MDPH) ou à l'étranger et plaident pour des « soins centrés sur la personne » [Madeleine Madoré, Le Lien] ou une « prise en charge globale » [Agnès Fontana, Robin des toits]. Elles appellent à une reconnaissance collective et générale.

Le manque d'information des médecins sur l'EHS a également été souligné [Philippe Tribaudeau, Une terre pour les EHS, Sophie Pelletier, Électrosensibles de France/Priartem].

4.3.3.2 Réduction de l'exposition

Les associations auditionnées plaident pour l'application du principe ALARA (*As Low As Reasonably Achievable*) pour les valeurs limites d'exposition et / ou d'émission, demandant que les valeurs limites d'exposition soient abaissées [Agnès Fontana, Robin des toits, Pierre Le Ruz, Criirem, Janine Le Calvez, Priartem]. Plutôt que de multiplier en conséquence le nombre

⁹⁴ Exemple de dispositifs destinés à diminuer les expositions aux ondes : patchs, étuis de téléphone, pendentifs, pierres « minérales » ou encore rideaux et papiers peints.

⁹⁵ Alertée par la Criirad fin 2015, la DGCCRF a réalisé une enquête sur des pendentifs anti-onde susceptibles d'être radioactifs présents sur le marché national. Cette enquête a conduit à suspendre la commercialisation de ces produits, puis à les retirer du marché.

d'antennes pour maintenir la qualité du service en intérieur⁹⁶, certaines associations plaident pour une modération des usages.

Certaines associations appellent également à ce que dans les cas où une alternative filaire existe, celle-ci soit systématiquement substituée à son équivalent sans-fil [Agnès Fontana, Robin des toits].

4.3.3.3 Zones à faibles niveaux d'exposition aux champs électromagnétiques

De nombreuses associations militent pour la mise en place de zones où les émissions d'ondes mesurées seraient minimales ou les plus proches de zéro (le seuil d'acceptabilité reste à définir, notamment en fonction de la fréquence, une approche de type le plus proche de zéro ne permettant pas une mise en place opérationnelle). Il s'agit soit de protéger certains lieux dans lesquels les personnes se déclarant EHS sont amenées à se rendre, comme les établissements recevant du public (hôpitaux, etc.) ou les transports en commun, soit de constituer des zones dites « blanches » [Voir en particulier les auditions de Jacqueline Collard, Zone Blanche et de Philippe Tribaudeau, Une terre pour les EHS].

Ces « zones blanches » concernent des espaces de refuge, soit temporaires dans lesquels ces personnes pourraient venir se « ressourcer », soit pour une plus longue durée (lieux de vie ou habitations spécialement aménagées).

Les associations identifient de nombreux obstacles à de telles réalisations, tant en ce qui concerne la maîtrise technique (ne serait-ce qu'au vu de la diversité des sources de rayonnement), que réglementaire (puisque les opérateurs ont une obligation légale de couverture nationale). Quelques associations soulignent une autre difficulté d'ordre social avec, d'un côté, l'épreuve que constitue la sortie de ces zones dans le cas où la disposition serait temporaire et, de l'autre, le risque de dérive vers l'isolement et / ou le repli sur soi [notamment Agnès Fontana, Robin des toits, Philippe Tribaudeau, Une terre pour les EHS].

Est parfois proposée, comme dans le cadre des discussions⁹⁷ relatives au projet de « zone blanche »⁹⁸ à Saint-Julien-en-Beauchêne (dans les Hautes-Alpes), la mise en place de recherches médicales avec des volontaires parmi les résidents de ces zones lorsqu'elles seront mises en place [Michèle Rivasi, Présidente, et Jacqueline Collard Trésorière de l'association Zone Blanche].

4.3.3.4 Protocoles de recherche et interprétation des résultats

Des représentants d'association auditionnés ont critiqué certains protocoles de recherche (type d'ondes étudié, critère de non-recrutement d'EHS, etc.) et / ou l'interprétation des résultats dans les articles qui en sont issus [voir les auditions de Sophie Pelletier, Électrosensibles de France/Priartem, Jacqueline Collard, SERA]. Ils plaident pour que les protocoles des projets de recherche soient plus axés sur la mise en évidence de marqueurs biologiques de l'EHS [Pierre Le Ruz, Criirem, Sophie Pelletier, Électrosensibles de France/Priartem]. Ils plaident également pour que, « *d'une part, les études montrant des effets ne soient pas expertisées selon des critères plus sévères que celles n'en montrant pas et d'autre part, que les critères de méthodologie et de faisabilité des projets de recherche ne contribuent pas à créer une situation de prédominance d'une école de pensée ou de vision dogmatique* » [Audition Électrosensibles de France/Priartem].

Selon ces représentants associatifs, il existe une tendance *a priori* à l'attribution des symptômes des personnes se déclarant EHS à des aspects psychiatriques ou pour le moins subjectifs. D'après eux, certains articles scientifiques éviteraient de proposer des pistes de recherche ou des conclusions à partir des données qu'ils exploitent, ce qui ralentirait la recherche d'une objectivation

⁹⁶ Cf. les travaux du Comité de pilotage mis en place pour étudier la faisabilité d'un abaissement de l'exposition aux ondes électromagnétiques émises par les antennes relais (COPIC 2013).

⁹⁷ voir présentation de l'enquête et du projet au § 2.4.2.

⁹⁸ Voir la définition de « zone blanche » au § 8.3.2.1.

des troubles organiques de l'EHS [voir auditions de Madeleine Madoré, Le Lien, Sophie Pelletier, Électrosensibles de France/Priartem, Pierre Le Ruz, Criirem].

Les associations indiquent que de nombreuses personnes se déclarant EHS seraient prêtes à participer aux études médicales, à condition de mettre en place un contexte de confiance mutuelle et de collaboration entre sujets et chercheurs. C'est d'ailleurs ce qu'indique le résultat du questionnaire « zone blanche » présenté au § 2.4.2 : sur les 352 personnes interrogées, 29 se sont déclarées prêtes à participer à des études cliniques sans condition et 221 en fonction des conditions de l'étude (cf. Tableau 6).

Tableau 6 : intention de participer à des études cliniques

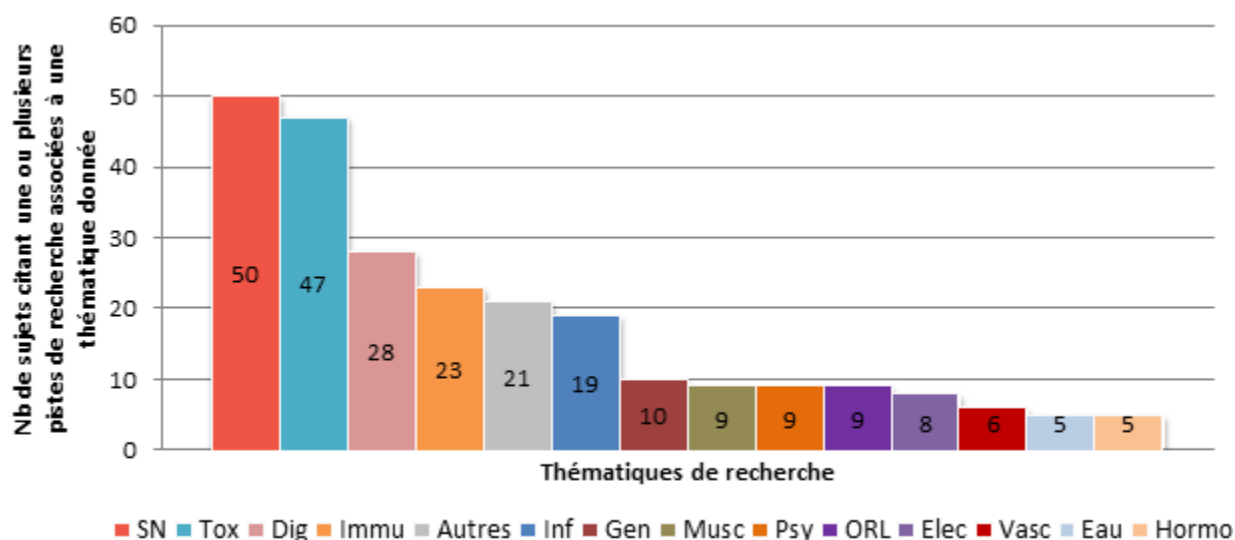
Recherche		Effectifs	%
	Oui sans condition	29	8,2
	Oui selon conditions	221	62,8
	Ne se prononce pas	60	17
	Non	38	10,8
	Absence de réponse	4	1,1
	Total	352	100

Source : Questionnaire « zone blanche » - 2015

4.3.3.5 Sujets de recherche proposés par des personnes se déclarant EHS candidates à l'établissement d'une zone blanche

Sur 352 réponses de personnes se déclarant EHS dans le cadre d'une enquête réalisée auprès de personnes intéressées par le projet de « zone blanche » à Saint-Julien-en-Beauchêne (voir présentation du questionnaire au § 2.4.2), 120 faisaient au moins une suggestion en ce qui concerne les pistes de recherche jugées prioritaires.

Une personne pouvait suggérer plusieurs pistes d'une même thématique (alors comptabilisée une seule fois) ou de plusieurs thématiques (comptabilisées une fois chacune). Les 120 suggestions ont été classées par thématiques et comptabilisées afin de faire émerger des pistes de recherche jugées prioritaires. La Figure 4 présente la répartition des pistes de recherche proposées.



Légende, détails sur les thématiques	Abréviations
Syst. nerveux : cerveau, sommeil/fatigue, barrière hématoencéphalique, encéphaloscanner...	SN
Toxicité des métaux lourds et produits chimiques : amalgames dentaires, intoxication chimique	Tox
Syst. digestif et alimentation : compléments alimentaires...	Dig
Syst. Immunitaire : allergies, dysfonctionnement immunitaire, histamine...	Immu
Autres : effet cocktail, comorbidités, canaux ioniques, réactions cutanées, stress cellulaire	Autres
Infection : Lyme, autre agent infectieux...	Inf
Génétique : profils de patients, facteurs de prédisposition...	Gen
Troubles musculo-squelettiques : douleurs musculo-articulaires, tremblements...	Musc
Psychisme : psychologie, troubles du comportement, émotions...	Psy
ORL : vertiges, acouphènes, système auditif	ORL
Électricité corporelle : conductivité organisme, électricité cellulaire, mise à la terre du corps...	Elec
Cardiovasculaire : activité électrique du cœur, tachycardie...	Vasc
Influence de l'eau : humidité, mémoire de l'eau	Eau
Syst. hormonal : dysfonctionnement du système endocrinien, de la thyroïde...	Hormo

Source : Questionnaire « zone blanche » - 2015

Figure 4 : pistes de recherches jugées prioritaires par des personnes se déclarant EHS et par ordre décroissant d'occurrence

Ainsi, les pistes de recherche évoquées par ces personnes relèvent majoritairement de deux grandes catégories : le système nerveux (50 sujets), et la toxicité des métaux lourds ou produits chimiques (47 sujets).

La thématique « système nerveux » regroupait plusieurs symptômes (fatigue, troubles du sommeil, maux de tête, etc.). Les suggestions ont été de précision inégale. Certaines étaient formulées de manière assez générale (« effet sur les capacités cognitives : mémoire apprentissage créativité », ou encore « effets des ondes sur le sommeil des personnes se déclarant EHS »). D'autres, au contraire, étaient décrites avec un certain niveau de détails scientifiques, voire proposaient des mécanismes à approfondir : « recherche sur le traitement par les anti-histaminiques, anti-inflammatoires permettant l'amélioration de la vascularisation du cerveau », ou bien « modulation de l'horloge circadienne », « désynchronisation de l'expression des gènes du rythme circadien [...], des cryptochromes CRY1 CRY2 qui s'expriment de façon rythmique dans le noyau suprachiasmatique pour maintenir un rythme circadien activité-repos qui semble perturbé [chez les personnes se déclarant EHS] » (voir notamment un courrier du D^r Ben-Brick de l'unité de consultation des pathologies professionnelles et environnementales (UCPPE) de Poitiers, datant du 13 décembre 2013).

La thématique « toxicité » était, quant à elle, plus homogène. Parmi celle-ci, la question sur le rôle des métaux lourds dans l'EHS a été reprise 40 fois (sur 47 occurrences de la thématique). Les personnes s'interrogeaient en particulier sur les méthodes de détoxification de l'organisme.

Les thématiques « alimentation » et « système immunitaire » étaient citées également plus de 20 fois chacune. Elles sont représentatives de troubles ressentis par les personnes se déclarant EHS (intolérance ou allergies, alimentaires ou non, fatigue), et des pistes de traitement explorées par de nombreux sujets (compléments alimentaires notamment).

La thématique « infection » a été citée par 19 personnes. Au sein de cette catégorie, la question d'un lien possible entre l'électrohypersensibilité et la maladie de Lyme (voir note de bas de page n° 173, p207 à ce sujet) a été soulevée par 12 personnes différentes.

Enfin, 9 personnes s'interrogeaient sur l'impact des champs électromagnétiques sur le psychisme.

4.3.3.6 Information des professionnels de santé

Lors des auditions, les associations ont, de manière générale, souligné le manque de connaissance de la problématique EHS par les professionnels de santé. Les associations insistent sur l'importance de la mise en place d'une information et de formations à destination des professionnels de santé (notamment médecins généralistes) et, par ailleurs, des Agences régionales de santé (ARS) (voir à ce sujet le § 4.1.1).

4.4 L'EHS dans les médias

Durant la décennie 1990, les médias ont traité de nombreux scandales sanitaires qui se sont succédé (amiante, sang contaminé, affaire de la clinique du sport, etc.). Après la loi du 1^{er} juillet 1998 relative à la veille sanitaire et au cours des années 2000, la régulation en santé-environnement a évolué avec la création et le développement des agences nationales de sécurité sanitaire. Pour autant, l'existence publique d'objets d'alerte, plus ou moins engagés dans des controverses scientifiques et des polémiques publiques, n'a eu de cesse d'occuper une place importante dans les médias. L'essor de la téléphonie mobile, et notamment le déploiement des antennes relais sur le territoire national, a développé et maintenu un questionnement public autour de leurs effets sur le plan sanitaire et social⁹⁹. Dans ce contexte, la question des effets sanitaires des ondes électromagnétiques s'est établie durablement dans les médias français et la place médiatique accordée aux personnes se déclarant EHS a évolué, tant du point de vue de l'espace et du temps qui leur sont accordés, que dans les modalités de ce traitement médiatique.

4.4.1 Analyse du traitement médiatique du concept d'EHS

L'analyse du traitement médiatique du concept d'EHS a été réalisée à partir des informations issues des bases de données d'actualité de la presse écrite et d'émissions télédiffusées. Les émissions radiophoniques et les diffusions occasionnelles de documentaires dans les salles de cinéma n'ont pas été prises en compte.

Un *corpus* de textes sur la problématique des effets sanitaires des ondes électromagnétiques a été constitué à partir de la presse francophone pour la période 1989-juin 2014. Ce *corpus* de 5 437 textes de la presse est issu des bases de données de presse écrite (Lexis-Nexis, Factiva et

⁹⁹ O. Borraz, M. Devigne, D. Salomon, *Controverses et mobilisations autour des antennes relais de téléphonie mobile*, rapport du CSO/FNSP, 2004.

Europresse)¹⁰⁰, ainsi que d'additions manuelles¹⁰¹. Son analyse a été effectuée avec le logiciel Prospéro, qui permet l'analyse de contenu de *corpus* textuels en utilisant des statistiques lexicales et des analyses ontologiques¹⁰².

Le *corpus* de documents télédiffusés a été constitué à partir d'une interrogation du moteur de recherche du fond audiovisuel de l'inathèque (INA) sur les ondes électromagnétiques et l'EHS. Essentiellement incomplet, il permettait de corroborer partiellement et d'illustrer l'analyse conduite sur le *corpus* de presse écrite.

Sur ce *corpus* d'articles de la presse francophone concernant les effets sanitaires des ondes électromagnétiques, une ou plusieurs dénominations de l'EHS apparaissaient dans 620 textes, proportion du même ordre que celles de recensements analogues concernant la presse britannique (Eldridge-Thomas and Rubin 2013). Au vu du *corpus*, le thème de l'hypersensibilité individuelle aux ondes électromagnétiques était abordé par la presse écrite essentiellement à partir de l'année 2006. Durant la période 2006-2012, 10 % des articles du *corpus* contenaient au moins une dénomination de l'EHS. Depuis 2012, cette proportion des articles est en augmentation, atteignant 50 % pour les 6 premiers mois de l'année 2014.

¹⁰⁰ La collation de ces données s'est effectuée entre 2007 et 2014, période durant laquelle l'accès à ces bases a évolué, selon leur disponibilité ou pour compléter le bouquet des titres disponibles. Les requêtes sont spécifiques à chaque moteur de recherche mais restent équivalentes. Pour Factiva, celle-ci consiste en : (téléphon* mobile* or antenne*-relai* or électromagnétique* or WiFi or Wimax) and (risque* or trouble* or dange* or nocivit* or effet*) and santé*. N'ont pas été retenus les articles d'information purement économique et les brèves.

¹⁰¹ Ces additions manuelles concernent des publications non déposées dans les bases mentionnées, telles que le *Journal de l'environnement* ou *Le quotidien du médecin*.

¹⁰² Pour cette analyse, la dénomination EHS regroupe les variations suivantes : hypersensibilité de personnes aux champs électromagnétiques, « hypersensibilité » aux champs électriques, intolérance aux champs électromagnétiques, électro(-hyper)sensibilité, EHS / E.H.S., hypersensibilité, électromagnétique, HSEM, ElectroHyperSensibilité, Électro-hypersensibilité, hypersensibilité aux ondes électromagnétiques, hypersensibilité aux champs, « hypersensibilité » à l'électricité, maladie des radiofréquences, hypersensibilité aux champs électromagnétiques, personnes (électro)hypersensible, personnes dites/ se disant électro-hypersensibles, électro(-hyper)sensible(s), ERS, personnes électrohypersensibles, ElectroHyperSensibles, sujets humains électrosensibles, personnes (dites/ prétendent) électrosensibles, personnes - dites électrosensibles - ;

ainsi que les termes anglais suivants : *Electromagnetic hypersensitivity*, *electro hyper sensitivity*, *hypersensitivity to electromagnetic fields*, *electromagnetic hypersensitivity*, *Electrosensitivity*, *electric hypersensitivity*, *electrical hypersensitivity*.

4.4.2 Des premières mentions à la dénomination d'un trouble

Jusqu'en 2006, les articles qui pouvaient être associés au thème de l'EHS traitaient d'une « maladie des radiofréquences », surtout mise en avant par la plainte de riverains d'antennes relais, et associée principalement à des troubles ORL, une importante fatigue et des maux de tête insupportables, mais en mettant rarement en avant une sensibilité particulière. Ces textes se référaient souvent aux travaux effectués depuis les années 1990 par Roger Santini, comme l'illustre l'article « Maladies des radiofréquences : de nouvelles ondes incriminées » publié par *Science et avenir*¹⁰³, qui rendait compte de son enquête par questionnaire de symptômes ressentis par les riverains d'antennes-relais. En 2003, toutefois, les résultats de l'étude de provocation « TNO » (the Netherlands Organisation for Applied Scientific Research, Physics and Electronics Laboratory (Zwamborn et al. 2003)) concluant, entre autres, à l'existence de sujets électrohypersensibles aux ondes UMTS ont été relayés dans quelques articles (voir analyse de l'étude au § 6.2.1.2.4).

Comme pour la presse, le traitement télévisuel des controverses autour de la téléphonie mobile semble concerner principalement les conflits d'installation d'antennes relais et des cas de cancers infantiles, comme ceux de Saint-Cyr-L'École. Le documentaire « Les risques du portable » (1999)¹⁰⁴ présentait, quant à lui, un entretien avec Stephen C.¹⁰⁵, qui a dû quitter son travail à la *British Telecom* suite au déclenchement de migraines, de problèmes de désorientation et de perte de mémoire.

4.4.3 Médiatisation de cas individuels et expression de plaintes collectives (2006-2009)

À partir de 2006, la presse a multiplié les références à un trouble, alors considéré avec sérieux, mais toujours controversé, associé à une variété de symptômes de plus en plus grande, allant du mal de tête et de la fatigue aux problèmes cardiaques et vasculaires en passant par les troubles du sommeil. La dénomination du trouble par les médias va progressivement se stabiliser au profit du terme « électrohypersensibilité » (EHS)¹⁰⁶.

Au cours des années 2006-2009, les médias vont traiter la thématique de l'EHS en rendant publics quelques cas qui vont donner corps à la revendication d'une plus grande sensibilité individuelle aux ondes. Ainsi, le procès opposant Sabine R. à son bailleur à l'été-automne 2006, qui demandait à être déménagée en « zone blanche », va être l'occasion de décrire une personne électrohypersensible et son quotidien. Elle sera ainsi amenée à détailler ses maux et à présenter les protections installées dans son logement, par exemple au cours du reportage « Ondes électro sensibles »¹⁰⁷.

Le cas de deux sœurs vivant dans un village de Bourgogne a également été présenté à de nombreuses reprises, médiatisant une image de l'électrohypersensible socialement isolé et couvert de longs tissus protecteurs. Le documentaire « Les ondes de l'angoisse »¹⁰⁸ met en scène la fuite hurlante de l'une des sœurs lorsqu'elle se rend compte que les journalistes n'ont pas éteint

¹⁰³ Laurent Clause, « Maladies des radiofréquences : de nouvelles ondes incriminées », *Science et avenir*, décembre 2001, 658, 82-89.

¹⁰⁴ Première diffusion dans l'émission *Envoyé spécial* sur France 2, le 21 octobre 1999.

¹⁰⁵ Pour le présent paragraphe, il a été convenu de ne pas désigner nommément les personnes, à l'exception des personnalités publiques. Pour autant, leur identité ayant été publiée dans les articles de presse, il n'y a pas lieu de les anonymiser en totalité.

¹⁰⁶ Sur la constitution de l'EHS comme cause sanitaire à cette période, voir (Chateauraynaud and Debaz 2010).

¹⁰⁷ Diffusé au cours du 19|20 de France 3, le 8 septembre 2006.

¹⁰⁸ Première diffusion dans le magazine *Complément d'enquête* sur France 2, le 5 janvier 2009 ; un extrait sera rediffusé le 15 octobre 2011.

leurs téléphones mobiles, en l'accompagnant du commentaire : « un cri de douleur qui durera le temps de couper notre portable et d'apaiser son angoisse ».

Autre exemple, en Alsace, avec le cas de Matthias M., ancien instituteur devenu sans domicile fixe et vivant dans la nature pour s'éloigner des ondes. En janvier 2009, pour le mettre à l'abri des très basses températures, le maire de la commune a demandé son hospitalisation psychiatrique. De nombreuses voix se font alors entendre, et en particulier l'association Robin des Toits par voie de presse, pour réclamer sa sortie¹⁰⁹.

La médiatisation de ces cas personnels et de leurs troubles s'accompagne le plus souvent de la description des défenses qu'ils mettent en place : pose de matériaux isolants dans les habitations, équipements personnels de protection, utilisation d'appareils de mesures, évitement et éloignement des sources considérées comme émettrices de champs électromagnétiques.

À l'automne 2007 et au printemps 2008, l'écho de plaintes plus collectives s'est fait jour dans plusieurs bibliothèques parisiennes, des employés se plaignant de maux de tête, de vertiges et de nausées. Les bornes Wi-Fi nouvellement installées ont alors été désactivées ou retirées dans certaines bibliothèques municipales (comme à Sainte-Geneviève), et leur déploiement a été abandonné à la bibliothèque nationale (Afsset 2009).

La question ne se cantonne dès lors plus à quelques cas isolés, mais concerne des groupes de plus grande taille, et relève alors d'un traitement collectif, d'autant que la contestation concerne le Wi-Fi, qui s'installe alors massivement dans les foyers par la multiplication des « box » d'accès à Internet. D'un côté, les partisans d'un effet sanitaire des ondes en appellent au principe de précaution, tandis que certaines critiques s'adressent aux syndicats et aux associations accusés d'avoir organisé une « psychose collective », dans un contexte de mise en place de ces matériels accompagnant une nouvelle organisation des activités, sans concertation au sein des établissements. L'argument de l'effet *nocebo* (voir § 7.7 et définition en 5) est alors relayé par la presse : « *une croyance en la nocivité d'un médicament ou d'un environnement provoque des effets secondaires ! Ce serait la certitude des effets néfastes des ondes qui induirait les symptômes* »¹¹⁰.

Il faut également signaler que c'est au cours de l'année 2008 que le lien entre le nom du Professeur Belpomme et l'EHS est apparu dans la presse. Après avoir ouvert une consultation de médecine environnementale, il est rapidement devenu le principal référent médical du point de vue médiatique.

Bien qu'encore secondaire dans le *corpus* de textes sur la problématique des effets sanitaires des ondes électromagnétiques (voir § 4.4.1), l'électrohypersensibilité devient progressivement un thème incontournable des grands débats autour des effets sanitaires des ondes électromagnétiques et constitue un argument porté plus ou moins spécifiquement lors de contestations d'implantation d'antennes relais et des épisodes judiciaires du corpus. Les médias ont été amenés à aborder la question de l'électrohypersensibilité lors du lancement du 2^{ème} Plan national santé-environnement (PNSE2) en 2009, des rapports d'expertise sur les radiofréquences (Afsset 2009), et des dispositifs de concertation (conférence de citoyens « Ondes, santé, société » de la Ville de Paris et Grenelle des ondes en 2009).

4.4.4 La constitution d'une représentation médiatique de l'EHS (2010-2014)

Avec un traitement plus spécifique, la thématique de l'EHS donne lieu à l'exacerbation par les médias de certains aspects qui constituent une « image médiatique » des personnes se déclarant EHS, avec par exemple l'écho donné à des événements, comme l'installation d'un camping « zone refuge », le regroupement de personnes se déclarant EHS en forêt de Saoû (juin 2010), ou à des

¹⁰⁹ « Electro... choqué », *Le Canard Enchaîné*, 21 janvier 2009.

¹¹⁰ Sylvie Riou-Milliot, « Peut-on être électrosensible ? », *Sciences et avenir*, 15 mai 2009.

situations spécifiques comme celle de personnes vivant dans des grottes. Dans ce contexte, la question de l'origine psychosomatique du trouble est toujours très présente, en particulier lors de la contestation par les associations et les personnes se déclarant EHS de « l'étude Cochin » (mars 2012), qu'ils dénoncent comme biaisée par un *a priori* d'attribution à un trouble psychologique, ou du renvoi de leurs revendications aux « peurs irrationnelles » par la ministre déléguée aux PME, à l'Innovation et à l'Économie numérique, Fleur Pellerin, à l'occasion des débats sur la loi « dite Abeille » (janvier 2013).

Pour autant, cette image de l'EHS évoquant une personne présentant des troubles mentaux et vivant réfugiée dans une grotte est progressivement contrebalancée par un certain nombre de prises de parole de personnes qui décrivent le basculement de vies ordinaires, montrent une diversité de l'ampleur des troubles, et illustrent la possibilité du maintien d'un certain confort de vie par des mesures personnelles de prévention. La montée en visibilité de collectifs organisés, dans lesquels se trouvent des personnes ayant une formation et / ou une profession scientifique ou technique, concourt également à contrefaire la représentation de la personne se déclarant EHS comme réticent par principe à la technologie. De plus, des personnalités publiques commencent à témoigner sur l'EHS pour elles-mêmes ou au nom de ceux qui n'ont pas accès à la parole, pour donner une nouvelle forme de légitimité à l'EHS. Il s'agit, par exemple, de déclarations télévisées, comme celle de la comédienne Audrey Dana sur sa sensibilité aux ondes, de la publication du cas familial du sportif de haut niveau Gaël Prévost ou de l'interview donnée à un journal norvégien, le 14 août 2015, par l'ancienne directrice générale de l'OMS et ancienne première ministre de la Norvège, Gro Harlem Brundtland, sur sa sensibilité aux téléphones mobiles. De même, à l'occasion de la publication, à la rentrée 2013, d'un roman portant sur le thème, l'écrivain Jean-Yves Cendrey a témoigné dans un grand nombre d'émissions télévisées et radiophoniques de sa condition, en tant que personne se déclarant EHS.

L'écho des débats parlementaires au sujet de la régulation de l'émission des ondes électromagnétiques a également donné une ampleur politique aux revendications des électrohypersensibles (voir aussi § 4.2 sur l'approche de l'EHS par les pouvoirs publics).

Le *corpus* de textes sur la problématique des effets sanitaires des ondes électromagnétiques (voir § 4.4.1) a présenté au long de son histoire une importante technicité et de nombreux points de controverses et de polémiques. Le traitement médiatique de la question s'est fait l'écho de la montée progressive de l'EHS, comme cause particulière au sein du dossier, celle de personnes se réclamant d'une sensibilité particulière et délétère aux ondes, contre lesquelles elles développent des procédures d'évitement, de protection et de prévention, et qui revendiquent la mise en place d'aménagements spécifiques.

4.4.5 L'information médiatique a-t-elle une influence sur la perception des risques par la population ?

Quels impacts peut avoir la présence du thème des effets sanitaires des ondes électromagnétiques dans les médias sur ses représentations dans la population ? Si cette question est parfois posée (Witthoft and Rubin 2013, Mortazavi, Atefi, and Kholghi 2011b), elle n'est pas spécifique à l'EHS. Elle interroge de manière plus large les modalités du traitement des risques par les médias, ainsi que celui des informations scientifiques et sanitaires en général. Les médias sont nombreux et hétérogènes : selon le support ou l'approche, le temps ou l'espace à disposition, les attentes supposées du lectorat ou de l'auditoire, ou encore la spécialisation du journaliste, le sujet sera plus ou moins documenté et approfondi et son approche plus ou moins partielle.

Le travail journalistique visant à exposer de manière plurielle la diversité des points de vue, tend à symétriser le traitement de ceux-ci, et peut sembler donner le même poids et la même légitimité aux diverses positions opposées dans une controverse, même si elles n'ont pas le même poids dans la « communauté scientifique ». De plus, ce travail ne consiste pas à communiquer la seule information scientifique, mais également à contextualiser un sujet, à le mettre en histoire et à expliciter les enjeux qui lui sont associés. Dans les domaines sanitaires et environnementaux, il s'agit donc à la fois d'explicitier clairement les dimensions scientifiques et techniques de l'objet

concerné, d'informer sur l'évaluation du risque, et aussi de traiter des enjeux économiques, des questions juridiques, du mode de décision, des luttes d'influence, des choix sociétaux associés, etc. Cette dimension contextuelle est d'autant plus importante à la lumière de récents travaux sur l'histoire de certaines questions sanitaires et environnementales (Proctor 2011, Oreskes and Conway 2012, Girel 2014).

Un certain nombre de travaux cherchent à établir un lien entre le traitement médiatique des effets sanitaires des ondes électromagnétiques et leur perception dans la population¹¹¹. Pris sous l'angle psycho-sociologique, psychométrique ou culturel, il s'agit au fond souvent de lier diffusion médiatique, croyance, représentations et aussi, parfois, mobilisation, souvent en généralisant à partir d'expériences particulières. Ces travaux s'inscrivent dans une approche utilisée de longue date, qui a pu avoir un intérêt pour une compréhension de mécanismes psycho-sociaux concernant des risques industriels bien établis. Depuis une quarantaine d'années, la prise en compte, la publicisation et la politisation de risques bien moins établis a rendu le procédé peu pertinent¹¹². Cette approche oppose de manière réductrice une évaluation objective des risques par une expertise technique et scientifique à une construction émotionnelle et irrationnelle d'une perception de ce risque par la population générale. Selon cette approche, le produit émotionnel serait entretenu ou suscité par les médias qui, relayant les inquiétudes, les rumeurs, voire les peurs, en constitueraient la caisse de résonance. Ce phénomène serait largement amplifié avec la popularisation d'Internet, et surtout, serait déterminant dans la structuration d'une opinion publique¹¹³. Cette vision du rôle des médias peut parfois aider à comprendre des épisodes singuliers, comme la diffusion d'une rumeur, mais elle n'est guère satisfaisante pour traiter des phénomènes de long terme, complexes, incertains, et porteurs d'enjeux multiples et hétérogènes.

Les politiques publiques peuvent être amenées à prendre en compte une échelle des préoccupations relatives. Néanmoins, cette dernière ne peut se substituer au travail d'objectivation du risque dans la hiérarchisation des priorités. Il est nécessaire de comprendre que la représentation du risque se construit à partir « *des outils, des ressources (notamment cognitives) que les acteurs mobilisent, mettent en œuvre. Sont en effet considérés comme risques les problèmes « mis en forme », « équipés » en tant que risques* » (Gilbert 2003). Il est dès lors possible d'intégrer le fait que les médias ont, parmi d'autres, un rôle dans la définition d'un problème public comme un risque, tant comme relais, qu'éventuellement comme producteurs, sans pour autant surévaluer ce rôle.

La question des personnes se déclarant EHS n'est pas spécifique en cela. Par effet de catégorisation, le regroupement des plaintes correspondant à l'EHS est grandement facilité une fois la souffrance nommée et caractérisée. Plus cette catégorie est diffusée (par exemple par voie médiatique), plus des personnes en souffrance peuvent la considérer comme une piste pour désigner et comprendre leur propre trouble. La force de cette éventuelle attribution dépendra évidemment des autres possibilités en concurrence, de la manière dont la catégorie aura été

¹¹¹ C'est par exemple le cas, dans les contextes britannique et norvégiens, de Eldridge-Thomas B, Rubin GJ (2013) et de Huiberts (2013) qui soulignent le décalage entre la position des instances scientifiques officielles et les arguments développés dans la presse, et affirment que cela pourrait entraîner une augmentation de la prévalence de l'EHS, en augmentant le nombre d'attributions et d'autodiagnostic.

¹¹² Comme le montrait déjà Claude Gilbert, « La fabrique des risques », Cahiers internationaux de sociologie 1/2003 (n° 114), p. 55-72 URL : www.cairn.info/revue-cahiers-internationaux-de-sociologie-2003-1-page-55.htm. DOI : 10.3917/cis.114.0055.

¹¹³ C'est dans cette lignée que s'inscrivent les travaux de Gérald Bronner, par exemple *La Démocratie des crédules*, Paris, PUF, 2013.

exposée, de la cohérence entre sa description et le vécu de la personne, et du recoupement avec d'autres sources (médias compris)¹¹⁴.

¹¹⁴ On peut ici proposer une analogie avec le « syndrome de l'étudiant en médecine », phénomène dont la réalité et l'ampleur ne font pas consensus, mais qui est largement pris en compte comme une étape constitutive de l'apprentissage : parce que récemment étudiée, une pathologie se verra plus facilement diagnostiquée ou auto-diagnostiquée.

5 Mécanismes d'interaction avec les champs électromagnétiques dans le monde vivant

Définitions liminaires

En préalable à toute discussion, il est nécessaire de définir la terminologie utilisée :

Perception : événement cognitif dans lequel un stimulus ou un objet, présent dans l'environnement immédiat d'un individu, lui est représenté dans son activité psychologique interne, *en principe de façon consciente* (selon le dictionnaire Larousse).

Sensation : phénomène qui traduit, de façon interne chez un individu, *une stimulation d'un de ses organes récepteurs* (selon le dictionnaire Larousse).

La sensation est l'impression produite par les objets extérieurs *sur un organe des sens, transmise au cerveau par les nerfs, et aboutissant à un jugement de perception*. Les sensations sont passives, lorsque l'organe reçoit l'impression sans l'avoir cherchée ; elles sont actives, lorsque l'attention de l'individu se concentre pour les juger avec plus d'exactitude. La sensation du froid, du chaud. La sensation des saveurs, des odeurs, des couleurs (selon le Littré).

Le chapitre 5 tente de proposer des mécanismes d'interactions entre les ondes électromagnétiques et le corps humain, susceptibles d'expliquer la « sensibilité » de certains sujets à ces ondes. Dans un premier temps, il décrit les mécanismes de perception des champs électromagnétiques de faible intensité par certains organismes. Puis, il étudie plusieurs hypothèses émises pour établir un lien éventuel entre les réponses biologiques et / ou physiologiques du corps humain aux expositions aux champs extrêmement basses fréquences et aux radiofréquences. Enfin, il étudie la question de la perception consciente des champs électromagnétiques chez l'être humain à travers les résultats d'études cliniques de provocation.

5.1 Cas particulier de la magnétoperception

Rappelons tout d'abord que la magnétoperception concerne uniquement la perception d'un champ magnétique statique (c'est-à-dire invariable dans le temps) et, en pratique, du champ magnétique terrestre.

La magnétoperception existe dans le monde vivant. On peut alors se demander si l'être humain peut aussi percevoir le champ magnétique terrestre (consciemment ou non). Cette interrogation trouve sa légitimité dans le fait que de nombreuses espèces animales sont connues pour utiliser le champ magnétique terrestre afin de s'orienter. La perception de ce champ géomagnétique est démontrée chez certains microorganismes, ainsi que chez de nombreux métazoaires (drosophiles, abeilles, truites, oiseaux migrateurs, etc.) (Wiltschko and Wiltschko 2005). Chez les mammifères non-marsupiaux, la magnétoperception est suspectée chez certaines espèces migratrices comme les cétacés, mais non prouvée. Des études ont aussi montré que la perception du champ magnétique pouvait s'étendre aux mammifères non-migrateurs, tels que les rats-taupes par exemple (Němec *et al.* 2001). Une étude controversée a même suggéré que les vaches auraient tendance à s'aligner sur le champ magnétique (Begall *et al.* 2008) ; cependant, cette étude n'a pas été répliquée. La magnétoperception pourrait ainsi être plus répandue dans le monde animal que communément admis. De ce fait, il pourrait être tentant d'extrapoler et de proposer l'existence d'une magnétoperception chez l'être humain comme début d'explication de l'EHS.

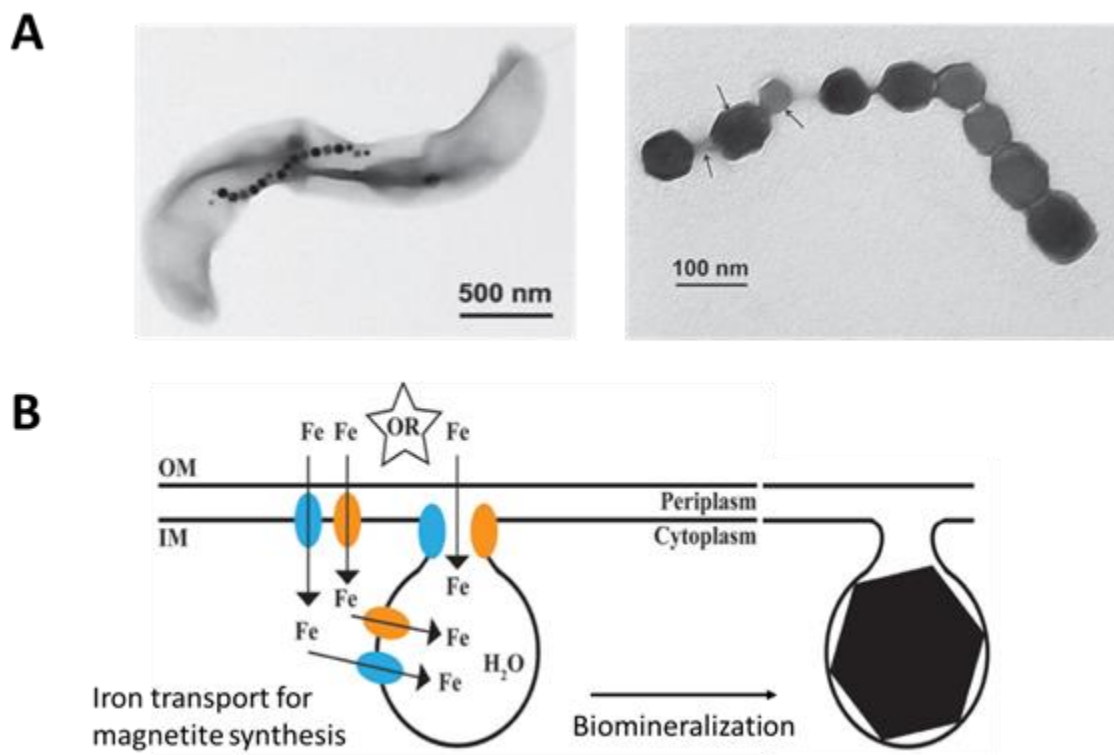
Que sait-on à l'heure actuelle de la magnétoperception ? Tout d'abord, dans le monde vivant, il existe plusieurs systèmes biologiques de détection des champs magnétiques. Tous les animaux cités ci-dessus ne perçoivent pas le champ magnétique de la même façon : certaines espèces semblent être sensibles à l'intensité ou à la polarité magnétique (nord / sud), alors que d'autres distinguent plutôt la direction du champ magnétique. La littérature scientifique montre qu'il existe deux mécanismes majeurs de détection directe du champ magnétique. Le premier système de

perception repose sur des cristaux d'oxyde de fer, appelés magnétite. Le second repose sur l'activation de protéines et l'emploi de réactions chimiques radicalaires.

5.1.1 Les systèmes de magnétoperception

5.1.1.1 La magnétite

Le premier système de magnétoperception a été mis en évidence à la suite des études menées sur les bactéries magnétotactiques (Blakemore 1975). Ces bactéries ont la capacité de se déplacer en suivant l'inclinaison du champ géomagnétique, ce qui les aide pour s'orienter le long de colonnes d'eau et de sédiments, cela afin de trouver des milieux favorables à leur croissance. Ces bactéries ont la particularité d'être pourvues d'organites spécialisés nommés magnétosomes. Ces magnétosomes sont des structures subcellulaires très organisées, entourées d'une bicouche lipidique associée à des protéines, et contenant des cristaux de minéraux de fer (soit de la magnétite (Fe_3O_4), soit de la greigite (Fe_3S_4)). Les magnétosomes s'alignent en chapelets au cœur de la cellule bactérienne (cf. Figure 5A). La taille des cristaux (entre 35 et 120 nm suivant les espèces) et leur motif en chaîne permettent à cette structure d'avoir un moment magnétique permanent (comme les aimants) qui sera responsable de l'orientation de la bactérie. La formation des magnétosomes est un phénomène très complexe et très régulé (Rahn-Lee and Komeili 2013). Cela implique des modifications au niveau de la membrane cytoplasmique, la capture du fer et sa cristallisation (cf. Figure 5B). Certains gènes nécessaires à la formation des magnétosomes ont été identifiés et, pour beaucoup d'entre eux, aucun gène homologue n'a été mis en évidence chez les vertébrés (Lower and Bazylinski 2013). Ces structures sont donc très spécifiques aux microorganismes magnétotactiques et, jusqu'à présent, ce type d'organite intra-cellulaire n'a pas été retrouvé chez les vertébrés.

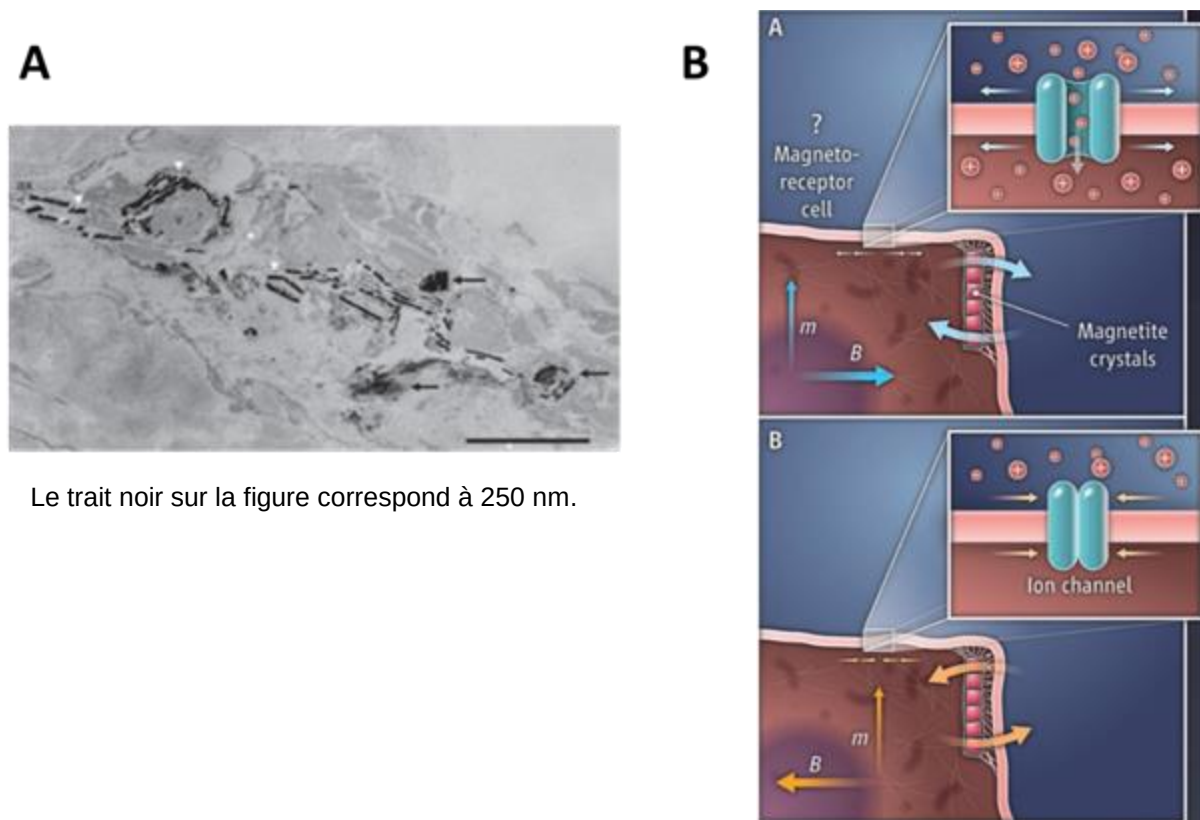


A) Photo en microscopie électronique à transmission d'une bactérie magnétotactique possédant une chaîne de magnétosomes (agrandie sur la photo de droite) (d'après Lower & Bazylinski, 2013).

B) Modèle de formation du magnétosome et biominéralisation de la magnétite. (d'après Rahn-Lee & Komeili, 2013).

Figure 5 : magnétosome

Les magnétosomes sont donc des structures peu répandues au sein du monde vivant. En revanche, la magnétite a été retrouvée dans un large éventail d'organismes, de la bactérie jusqu'à l'être humain. Ces dernières années, des études menées chez certains oiseaux migrateurs ont permis une meilleure connaissance des systèmes de magnétopercption constitués de cristaux d'oxyde de fer. Trois structures différentes ont été décrites comme responsables de la sensibilité de ces animaux au champ géomagnétique (O'Neill 2013). Parmi ces structures, deux utilisent la magnétite comme système détecteur primaire. Des cristaux de magnétite sont ainsi retrouvés dans la partie supérieure du bec, ainsi que dans la lagena, un organe spécifique aux oiseaux et aux poissons, localisé dans l'oreille interne. Cette magnétite forme des particules qui peuvent être détectées en microscopie (cf. Figure 6A). La taille de ces cristaux est toutefois insuffisante pour générer un moment magnétique permanent à température physiologique. L'hypothèse actuelle (Winklhofer 2012) postule la formation d'une couche de magnétite au contact de la membrane cellulaire. La variation du champ électromagnétique déformerait cette couche de particules ferromagnétiques, ce qui en retour déformerait la membrane et permettrait l'activation de canaux ioniques mécano-sensibles (cf. Figure 6B).



Le trait noir sur la figure correspond à 250 nm.

A) Visualisation des cristaux de magnétite (indiqués par des flèches) au niveau des terminaisons nerveuses du bec (d'après O'Neill, 2013).

B) Hypothèse de l'activation de canaux ioniques via les particules de magnétite (d'après Winklhofer, 2012).

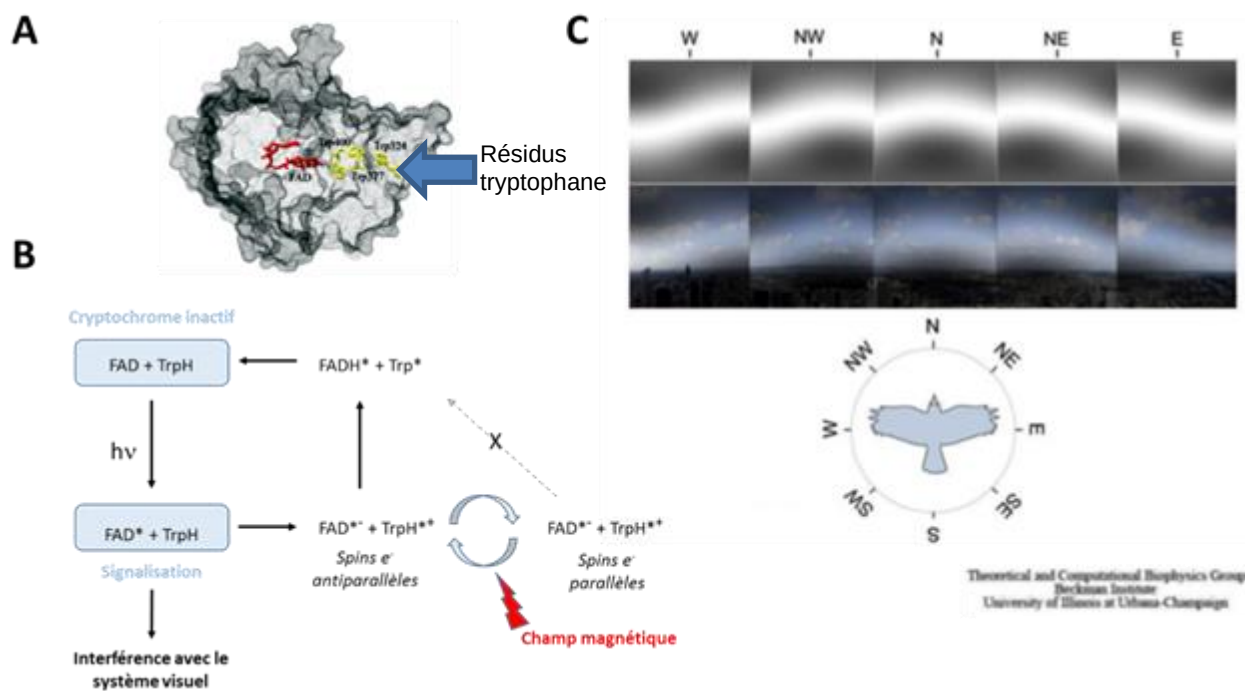
Figure 6 : la magnétite

On peut aussi signaler que des cellules riches en magnétite et pouvant prétendre jouer le rôle de magnéto-récepteurs ont également été identifiées dans l'épithélium olfactif chez la truite (Eder et al. 2012).

5.1.1.2 Les cryptochromes

Un second système de magnétopercption a été décrit chez de nombreuses espèces animales et végétales. Ce système n'utilise pas de cristaux possédant un moment magnétique permanent, mais une famille de protéines photoactivables appelées cryptochromes. Chez les oiseaux migrateurs, ce facteur est présent dans l'œil (O'Neill, 2013). Les cryptochromes présentent une forte homologie de séquence avec les photolyases, des enzymes qui utilisent l'énergie lumineuse pour réparer l'ADN. Les cryptochromes sont retrouvés chez les plantes et les animaux (l'être humain inclus), et ils semblent faire office de photorécepteurs de lumière bleue (sans aucun rapport avec la vision ou sans aucune activité de réparation de l'ADN, contrairement aux photolyases). C'est d'abord chez la plante *Arabidopsis thaliana* qu'il a été montré que les réponses cryptochrome-dépendantes pouvaient être affectées par un champ magnétique (Ahmad et al. 2007). Cette observation a été confirmée chez des drosophiles qui, n'exprimant plus de cryptochrome, perdent leur capacité à répondre à un signal magnétique (Gegear et al. 2010). Le mécanisme moléculaire impliqué dans la sensibilité au champ magnétique commence à être compris. Les cryptochromes sont des flavoprotéines qui fixent la Flavine adénine dinucléotide (FAD) comme co-enzyme (cf. Figure 7A). L'énergie lumineuse est utilisée par le couple protéine / FAD pour induire un transfert d'électron. Il se forme ainsi une paire de radicaux constituée du FAD^{*-} et d'un acide aminé voisin, $TrpH^{*+}$. Ces radicaux sont instables et tendent à retrouver leur état d'origine (cf. Figure 7B). La sensibilité au champ magnétique vient du fait que cette réaction radicalaire dépend de l'orientation du spin des électrons (il faut que les spins des deux radicaux soient antiparallèles pour que la réaction se fasse). Le champ magnétique modifiant la précession des électrons, il va de ce fait influencer sur le temps passé dans l'état de spin antiparallèle et ainsi

jouer sur la cinétique de ces réactions transitoires (Maeda *et al.* 2012). Autrement dit, le champ magnétique joue sur le rendement de la réaction chimique radicalaire. Chez l'oiseau, ceci affecte vraisemblablement le champ de vision, générant des zones plus brillantes ou plus sombres suivant l'orientation de l'animal dans le champ géomagnétique (*cf.* Figure 7 C). On peut souligner que ce modèle est satisfaisant pour expliquer l'orientation dans un champ magnétique statique, mais que son efficacité pour détecter des champs magnétiques à plus hautes fréquences, notamment radiofréquences, n'a pas été prouvée.



Source : d'après Maeda *et al.*, 2012.

Source : d'après (Solov'yov, Mouritsen, and Schulten 2010).

Figure 7 : A) protéine cryptochrome avec ses trois résidus tryptophane conservés (en jaune) et son co-facteur, le FAD (en rouge). B) version simplifiée des réactions radicalaires impliquées dans l'activation/désactivation du cryptochrome. C) modélisation de la perception visuelle du champ magnétique chez les oiseaux migrateurs

5.1.2 L'être humain est-il sensible au champ magnétique terrestre ?

Les molécules impliquées dans la magnétoperception (magnétite et cryptochromes) sont présentes chez l'être humain.

Hypothèse 2 pour expliquer tout ou partie de la survenue de l'EHS : existe-t-il un système magnéto-sensible chez l'être humain ?

L'hypothèse selon laquelle la survenue de l'EHS serait due à l'existence de systèmes de magnétoperception chez l'être humain a été abordée lors des auditions d'Électrosensibles de France/Priartem, de Robin des Toits, des D^{rs} Tournesac et Rosa, du D^r Choucroun et dans le courrier de Générations Futures.

Tout d'abord, des cristaux de magnétite ont été purifiés biochimiquement à partir de cerveaux humains (Kirschvink, Kobayashi-Kirschvink, and Woodford 1992). Le protocole utilisé a détruit l'organisation cellulaire des tissus, il est donc impossible de savoir si ces cristaux sont associés aux membranes cellulaires ou inclus dans des organites particuliers. Plus de vingt ans après cette découverte, il n'est pas possible de parler de magnétosome dans le cerveau humain. Ce dernier contient plusieurs nanogrammes de magnétite par gramme de tissu, ce qui représente plusieurs

dizaines de millions de cristaux par gramme. D'après les données biochimiques, il semble que la distribution de ces cristaux soit plus ou moins homogène, avec toutefois une plus forte concentration au niveau des méninges, ainsi que dans l'hippocampe (Dunn *et al.* 1995). L'origine de ces cristaux n'est pas connue, mais plusieurs éléments tendent à indiquer que le métabolisme du fer, notamment un défaut de stockage par la ferritine¹¹⁵, pourrait être le point de départ de la biogenèse de la magnétite (Gálvez *et al.* 2008). Une possible contamination environnementale a également été évoquée (Maher *et al.* 2016). La très grande majorité de ces cristaux (environ 90 %) sont de petite taille, ce qui empêche une magnétisation permanente (il s'agit de cristaux sous forme superparamagnétique). Quelle pourrait être la conséquence de leur présence sur une éventuelle magnétoperception chez l'être humain ? À l'heure actuelle, très peu de travaux scientifiques se sont penchés sur ce sujet. Aucune publication ne laisse présager que cette magnétite puisse servir à la magnétoréception. En revanche, il a été proposé qu'elle puisse intervenir dans la mémoire à long terme (Banaclocha, Bókkon, and Banaclocha 2010). Il faut souligner que la magnétite est associée aux plaques séniles caractéristiques de la maladie d'Alzheimer (Dobson 2004). Ces cristaux pourraient participer à l'évolution de la maladie, car en interagissant avec les peptides amyloïdes, ils pourraient faciliter leur agrégation.

En ce qui concerne les cryptochromes, l'être humain possède deux gènes codant deux versions de cette protéine (hCRY1 & hCRY2). Ces gènes sont fortement exprimés dans la rétine et ces protéines pourraient jouer le rôle de photorécepteur pour réguler le cycle circadien (Sancar 2004). L'établissement du rôle de ces protéines dans la perception de la photopériode vient d'études réalisées chez la souris, notamment *via* l'utilisation d'animaux transgéniques n'exprimant plus les gènes *Cry1* ou/et *Cry2*, et il est maintenant bien établi que ces facteurs sont des composants de l'horloge moléculaire régulant les cycles circadiens (Leloup and Goldbeter 2008).

Il a été démontré que ces protéines ont gardé leur potentiel magnétorécepteur. En effet, la sensibilité magnétique de drosophiles mutantes déficientes en cryptochrome endogène a été restaurée en leur transférant le gène codant le cryptochrome humain (Foley, Gegear, and Reppert 2011). Cependant, en l'absence de données scientifiques sur le sujet, il n'est pas possible de savoir si les cryptochromes sont susceptibles de jouer un rôle dans une éventuelle perception du champ magnétique chez l'être humain.

Au final, les principales molécules à la base des systèmes de perception du champ géomagnétique ont été mises en évidence chez l'être humain. Ces systèmes moléculaires sont-ils capables pour autant de générer ou de modifier un signal physiologique en réponse à une variation du champ magnétique ? À ce jour, la magnétoperception est loin d'être démontrée chez notre espèce. Les études pionnières montrant une orientation magnéto-dépendante chez l'être humain (Baker 1980) n'ont pas été confirmées quand des répliques indépendantes ont été entreprises (Gould and Able 1981, Westby and Partridge 1986). Toutefois, certaines études électrophysiologiques soulèvent l'hypothèse d'un éventuel sens magnétique humain (Carrubba and Marino 2008). De même, des travaux ont montré que le champ magnétique terrestre exerce une petite influence sur la sensibilité du système visuel humain (Thoss and Bartsch 2003). Dans ce cas, les variations enregistrées sont si faibles que l'on n'en a pas conscience. Ainsi, la magnétoperception de l'être humain, si elle existe réellement, a sans doute un impact extrêmement modéré et ne peut en aucun cas être considérée comme un « 6^{ème} sens », tel qu'il est parfois décrit chez d'autres espèces animales.

En outre, champ magnétique statique et champ électromagnétique sont des phénomènes physiques différents et rien ne permet de dire qu'une éventuelle sensibilité au champ magnétique statique prédisposerait à une sensibilité à des champs variables dans le temps, notamment à des radiofréquences. Ainsi, l'équipe qui avait montré une influence du champ magnétique terrestre sur la vision de l'être humain n'a pas mis en évidence, avec la même méthodologie, un impact des radiofréquences (avec un signal de type GSM 900 MHz et une modulation à 217 Hz) (Irlenbusch *et al.* 2007).

¹¹⁵ La ferritine est une protéine cellulaire, dont le rôle est de séquestrer l'excès de fer intracellulaire.

5.2 Réflexions sur un lien éventuel entre les réponses biologiques ou physiologiques du corps humain aux radiofréquences et celles induites par les champs extrêmement basses fréquences

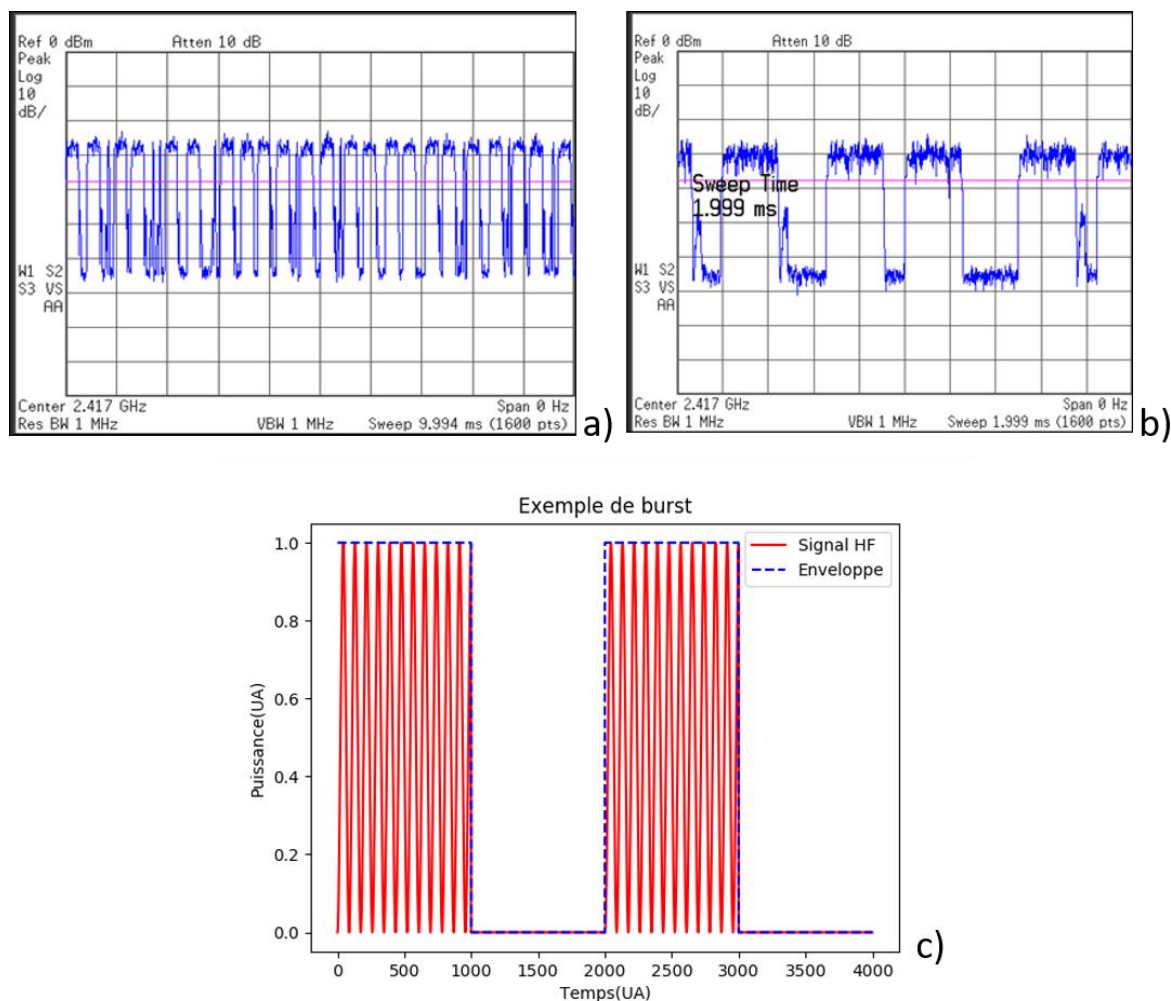
Si le spectre des rayonnements électromagnétiques est très vaste, on peut séparer celui auquel nous sommes exposés en deux grandes familles :

- les rayonnements basses fréquences, et en particulier les extrêmement basses fréquences, avec principalement « le 50 Hz », émis, par exemple, par les lignes de transport d'électricité et les câbles d'alimentation des appareils électroménagers ;
- les rayonnements radiofréquences, utilisés notamment dans les systèmes de communication mobiles (téléphonie mobile et sans-fil, Wi-Fi, etc.).

Comme indiqué en Annexe 6, la nature, la propagation et l'interaction des ondes avec le corps humain sont très différentes pour les extrêmement basses fréquences et les radiofréquences. Quatre hypothèses pour tenter de faire un lien éventuel entre les réponses biologiques et / ou physiologiques du corps humain exposé aux fréquences extrêmement basses et les réponses aux radiofréquences sont présentées ci-après.

Hypothèse i : un mécanisme de démodulation dans le corps humain ?

Les systèmes de communication sans fil utilisent les radiofréquences comme support de transmission et n'émettent pas de façon stable, comme peut l'être une onde entretenue dont la fréquence et les intensités moyenne et maximale sont invariables (*continuous wave*, CW). Les variations temporelles de puissance sont dues à la modulation, aux codages et aux techniques d'accès à la ressource (bandes de fréquences) utilisés par les systèmes de communication. La Figure 8 est un exemple de trains d'ondes émis par paquets (*bursts*), qui représentent l'enveloppe à l'intérieur de laquelle se trouve le signal modulé à la fréquence de l'onde porteuse (CW) qui transporte les informations à transmettre.



Source : Letertre (2013)

Légende : a) et b) enveloppes BF de signaux réels Wi-Fi

c) représente les fréquences RF réellement émises (UA : unité arbitraire)

Figure 8 : exemple de paquets ou « bursts » dans un signal électromagnétique

Les effets de ces variations de puissance temporelle par paquet sont plus ou moins rapides. Le signal sonore que l'on entend lorsque que l'on approche un téléphone mobile d'un haut-parleur en est une illustration. La fréquence de ce signal sonore est de 217 Hz, ce qui correspond à une des fréquences de modulation de l'enveloppe temporelle (trame) du GSM (émission toutes les 4,6152 ms). Cette fréquence ne correspond pas à de l'énergie électromagnétique émise par le téléphone, mais est générée par des effets non-linéaires de démodulation dans un système de réception externe (le haut-parleur).

Cependant, aucun mécanisme de démodulation n'a été mis en évidence dans le corps humain à ce jour ; on peut citer en particulier l'étude négative relative à la recherche de réponses non linéaires dans les cellules de Kowalczyk *et al.* (2010), ainsi que celle de Davis *et al.* (2010) (Davis and Balzano 2010, Kowalczyk *et al.* 2010).

Hypothèse ii : caractère modulé de l'exposition ?

La fréquence 217 Hz d'un téléphone mobile en GSM est rayonnée aussi directement par appels de courant électrique à la batterie du téléphone lui-même, mais ce phénomène est localisé.

Le rapport de l'Anses consacré aux effets des radiofréquences sur la santé publié en octobre 2013 a ouvert une possibilité dans la réponse de l'électro-encéphalogramme (EEG) ; en particulier, Carrubba *et al.* (2010a) ont cherché à vérifier l'existence chez l'être humain de potentiels évoqués¹¹⁶ (PE), déclenchés spécifiquement par l'exposition à un champ magnétique de fréquence 217 Hz, produit par la circulation de courants électriques entre le téléphone et la batterie, résultant eux-mêmes de la modulation du signal GSM. Les résultats de l'étude, basés sur l'analyse des tracés EEG, ont mis en évidence la production d'un potentiel évoqué cérébral par l'exposition à un signal basse fréquence à 217 Hz (voir analyse détaillée de l'article dans la mise à jour de l'expertise 2013 de l'Anses). Les auteurs attribuent ces résultats au caractère modulé de l'exposition et à la non-linéarité de la réponse cérébrale (Carrubba *et al.* 2010a).

Ainsi, les signaux basse fréquence à 217 Hz, issus du fonctionnement d'un téléphone mobile GSM¹¹⁷, pourraient être à l'origine d'une réponse de l'électro-encéphalogramme. Il conviendrait néanmoins de vérifier expérimentalement cette hypothèse directement à partir de la source réelle d'un téléphone.

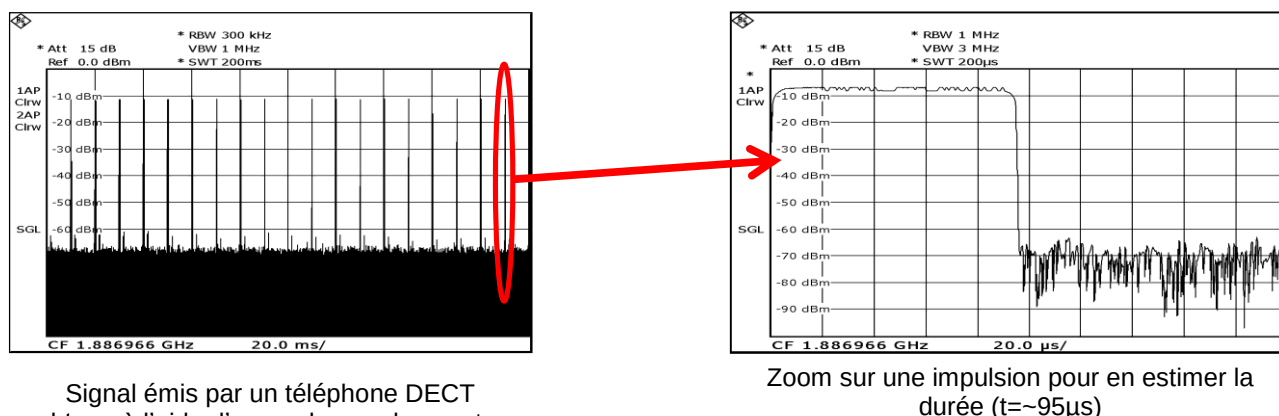
Hypothèse iii : non-linéarité de la réponse cérébrale ?

Lors des entretiens avec des représentants de personnes se déclarant EHS, le groupe de travail de l'Anses a également constaté que ces personnes associaient davantage leurs symptômes aux variations de l'environnement qu'aux fréquences elles-mêmes, comme si les variations brusques du niveau de l'exposition étaient à l'origine des troubles ressentis, plutôt qu'une fréquence fixe à niveau constant. Certains de ces paramètres ont été décrits par ces personnes comme pouvant être associés à des symptômes ressentis : « *Nous avons rapidement compris que la réponse n'était pas dans l'analyse fréquentielle mais dans l'analyse temporelle des signaux* » [Électrosensibles de France/Priartem].

Or, si l'on observe cette fois l'évolution temporelle fine de ces signaux (de l'ordre de la microseconde à la seconde), et notamment les temps de montée ou de descente des *bursts* ou les transitions « *on-off* », des phénomènes hautes fréquences transitoires apparaissent, qui pourraient être susceptibles de générer des perturbations encore inexpliquées sur l'organisme. Par analogie avec un circuit électronique, au-delà d'une certaine fréquence d'excitation (supérieure au mode de fonctionnement nominal du composant), celui-ci (généralement un transistor) sature (comportement non linéaire) et génère des signaux de nature chaotique et désordonnée ; un front de montée amène par ailleurs la circulation de courant à travers une capacité. Un exemple de signal rayonné par un téléphone sans fil (DECT) est donné Figure 9, illustrant les fronts de montée et de descente de chaque trame.

¹¹⁶ Cf. note de bas de page n°75, p75.

¹¹⁷ Dans le cas du système GSM, le téléphone émet un « paquet » d'ondes à la fréquence radioélectrique autour du GHz, toutes les 4,6152 ms, donc avec une fréquence de répétition d'environ 217 Hz (trame TDMA). L'énergie électromagnétique délivrée par le téléphone mobile est donc bien uniquement associée à la fréquence radioélectrique (autour du GHz). En revanche, l'existence de la trame TDMA provoque des appels de courant à la batterie du téléphone, courants qui créent un champ magnétique à la fréquence de 217 Hz.



Source : Letertre (2013)

Figure 9 : exemple de signal rayonné par un téléphone DECT

Pourrait-il y avoir, chez l'être humain, un effet biologique au niveau cellulaire lié à ces phénomènes transitoires pouvant expliquer l'EHS ? Ainsi, la nature même des signaux hautes fréquences transitoires pourrait, éventuellement, être à l'origine de la non-linéarité de la réponse cérébrale.

Cependant, à la connaissance du groupe de travail, cette hypothèse n'a pas encore été étudiée.

Hypothèse iv : présence de matériaux métalliques permettant une démodulation ?

Parmi les autres hypothèses qui ont été proposées, on peut citer l'influence théorique possible de l'association de matériaux métalliques dans les amalgames dentaires, susceptibles d'avoir des propriétés semi-conductrices qui permettraient une démodulation des ondes (il ne s'agit pas ici de la toxicité des métaux lourds qui est discutée au § 7.1.3).

Cependant, à la connaissance du groupe de travail, aucun article scientifique ne s'étant intéressé à cette hypothèse, celle-ci n'a pas pu être étudiée.

5.3 Est-il possible de percevoir les champs électromagnétiques ?

5.3.1 Études chez l'animal

Le groupe de travail a eu connaissance des résultats préliminaires du projet de recherche EVIREF¹¹⁸ (Réponses physiologiques d'adaptation ou d'évitement du rat juvénile exposé aux ondes radiofréquences type antenne relais). Ce projet se situe dans la continuité de travaux de Pelletier *et al.* (2013) qui avaient montré chez le jeune rat qu'une exposition de 5 semaines aux radiofréquences de faible intensité (900 MHz, 1 V/m, $DAS_{calculé} = 0,1$ à $0,3$ mW/kg, $n = 11$ ou 13 rats/groupe et 1 rat/cage) constituait une contrainte environnementale mettant en jeu des récepteurs sensoriels périphériques et des réponses adaptatives du système nerveux végétatif pour optimiser la conservation de l'énergie (Pelletier *et al.* 2013) (cf. analyse de l'article dans le rapport Anses de 2013). Par la suite, le projet a cherché à savoir si ces réponses adaptatives représentaient une contrainte importante et coûteuse pour l'organisme, que l'animal cherchait à éviter, ou si l'animal s'adaptait à l'environnement sans chercher à éviter l'exposition, et à préciser le niveau de perception et / ou le mode d'adaptation de l'organisme aux radiofréquences (Bach 2017).

¹¹⁸ Les résultats de ce projet de recherche, bien que non publiés et n'ayant pas été évalués par la communauté scientifique à ce jour, sont présentés dans le rapport, car ils ont été financés par l'Anses et ont été présentés publiquement lors des rencontres scientifiques de l'Anses le 17 mai 2017.

L'étude précédente de Pelletier *et al.* s'était intéressée au rôle de la température ambiante (24°C *versus* 31°C), et avait essentiellement mis en évidence des effets à 31°C. L'approche méthodologique du projet EVIREF a consisté à réaliser 5 semaines d'exposition aux radiofréquences de faible intensité type antenne relai chez le rat âgé de 3 semaines au début de l'expérience (900 MHz, signal modulé, 1,7 V/m, 30 mW/kg, 23h30 / 24h, 7j/7j, n = 9 rats/groupe). Les rats ont ensuite été placés dans un dispositif équipé de deux chambres communiquant par un tunnel permettant aux animaux de passer d'une chambre à l'autre (à 24°C puis 31°C), modulant ainsi leurs niveaux d'exposition aux radiofréquences (*radiopreferendum* à deux niveaux : $2,39 \pm 0,4$ V/m et $0,96 \pm 0,23$ V/m). Les paramètres physiologiques (sommeil/veille et température cutanée mesurée par télémetrie) ont été enregistrés, de même que la durée de séjour dans la chambre choisie par l'animal. Après implantation de la sonde télémetrique (4^{ème} semaine), cette durée caractérisant le *radiopreferendum* des rats était enregistrée au cours de la sixième semaine d'exposition.

Les résultats préliminaires présentés au groupe de travail ont montré que :

- pendant la période de repos (jour), quelle que soit la température ambiante, les rats ont préféré la chambre la moins exposée, alors qu'en période d'activité (nuit) ils n'ont pas montré de préférence ;
- aucun effet n'a été observé sur les durées totales d'éveil et de sommeil lent, ni sur leur durée moyenne et leur fréquence ;
- la durée totale du sommeil paradoxal a été significativement réduite, quelle que soit la période (repos/activité) considérée, lorsque les animaux séjournaient dans la cage la plus exposée.

À noter que des analyses complémentaires (sommeil et températures cutanées) sont encore en cours au moment de la finalisation du présent rapport.

Ces données préliminaires semblent montrer que le rat serait capable de différencier deux niveaux d'exposition aux radiofréquences. Il aurait tendance à choisir l'environnement où son exposition aux radiofréquences est la plus faible lors de la période de repos (jour) et ce choix serait associé à une augmentation de son temps de sommeil paradoxal. Ainsi, une interprétation de ces résultats préliminaires pourrait être que l'exposition aux radiofréquences serait une contrainte ou un stress et aurait un coût énergétique que l'animal chercherait à éviter s'il le peut. Ces travaux mériteraient d'être répliqués.

5.3.2 Études chez l'être humain

5.3.2.1 Remarque préliminaire

La notion de perception, au sens physiologique du terme, implique qu'il y ait des récepteurs à un signal donné (en l'occurrence les champs électromagnétiques) et une réponse de l'organisme à la stimulation de ces récepteurs se traduisant par une sensation. En ce qui concerne les classiques perceptions visuelles et auditives, il existe des voies nerveuses anatomiquement bien identifiées, qui relient les récepteurs rétiniens et cochléaires à des aires du cortex cérébral spécialisées dont l'activation accompagne la sensation consciente. La stimulation des récepteurs se traduit par des potentiels évoqués¹¹⁹ qui peuvent être enregistrés au niveau des différentes structures corticales.

Il peut y avoir perception directe d'un agent, sans que celui-ci entraîne un effet sanitaire (perception d'un son par exemple) et inversement, il peut y avoir des effets biologiques, physiologiques, voire sanitaires, sans que l'agent causal ne soit consciemment perçu par l'être humain (cas des ultra-violets qui ont un effet sur la peau par exemple).

¹¹⁹ Cf. note de bas de page n°75, p75.

5.3.2.2 Analyse des études sur un éventuel système de perception des champs électromagnétiques chez l'être humain

À l'heure actuelle, il n'existe aucune étude permettant d'infirmer ou d'affirmer l'existence de récepteurs de champs électromagnétiques, ni de voies nerveuses, impliqués dans la détection des champs électromagnétiques chez l'être humain.

Cependant, Carrubba *et al.* (Carrubba *et al.* 2010b, 2007) ont montré l'apparition de potentiels évoqués sur l'électroencéphalogramme (EEG) au début (*onset*) et à la fin (*offset*) d'une exposition à un signal magnétique (60 Hz, uniaxial à 200 μ T ou sinusoïdal à 1 ou 5 μ T) chez plus de 90 % des témoins (Carrubba *et al.* 2010b, 2007). Ces potentiels évoqués ne sont pas détectables par une analyse classique de l'EEG dite linéaire (moyennage des temps), mais uniquement par une analyse non linéaire (analyse de récurrence) dérivée des théories du chaos, qui permet une approche dynamique de la relation stimulus / réponse. Ces expériences ont aussi été menées lors d'expositions à 217 Hz par la même équipe (*cf. Hypothèse ii : caractère modulé de l'exposition dans le § 5.2*). Pour ces auteurs, les champs électromagnétiques seraient détectés *via* un système de transduction sensorielle, dont la nature reste à préciser, comme c'est le cas pour d'autres agents de l'environnement (chaleur, bruit, etc.) et qui conférerait à l'être humain un sens magnétique.

Ces travaux n'ont pas été répliqués et sont encore trop incomplets pour affirmer l'existence d'un système de perception des champs électromagnétiques chez l'être humain. Ils soulèvent néanmoins la question ci-après (hypothèse 3).

Hypothèse 3 pour expliquer tout ou partie de la survenue de l'EHS : l'existence d'une sensibilité particulière aux champs électromagnétiques basses fréquences ? ou d'un seuil faible de perception cutanée du courant électrique ?

L'hypothèse selon laquelle la survenue de l'EHS serait due à un seuil de perception cutanée faible a été abordée lors de l'audition des D^{rs} Tournesac et Rosa.

5.3.2.3 Rappel des études de provocation concernant la capacité à distinguer les expositions réelles des expositions simulées aux champs magnétiques basse fréquence

Les études ci-après ont été analysées au § 6.2.1.2.2.

McCarty *et al.* (2011) ont exposé une personne se déclarant EHS à deux séries d'expositions à un champ électromagnétique basses fréquences (BF) de 60 Hz et de 300 V/m, comportant chacune une alternance d'expositions en mode « pulsé » et en mode « continu ». Cette personne a déclaré avoir ressenti l'apparition ou l'aggravation de symptômes, tels que des maux de tête ou des contractions musculaires, statistiquement reliées aux expositions en mode « pulsé », et non à celles en mode « continu » (*cf. analyse de l'article au § 6.2.1.2.2*).

Ce travail a été réalisé par la même équipe que celle impliquée dans les travaux de Carrubba *et al.* (équipe de Marino, à l'Université de Shreveport, Louisiane, USA) et confirme les effets *on / off* obtenus précédemment. Cependant, il ne concerne qu'une seule personne porteuse d'anomalies morphologiques du cortex cérébral et repose sur une méthodologie succincte. Il ne peut donc être considéré que comme une étude préliminaire. Il mériterait d'être confirmé par ses auteurs sur une série de plusieurs personnes se déclarant EHS et en utilisant une méthodologie plus élaborée, avant d'être répliqué par des équipes indépendantes.

La question de la capacité à distinguer les expositions réelles des expositions factices a également été abordée dans deux études de l'équipe de l'Institut de promotion de la santé de l'Université Eötvös Loránd de Budapest (Hongrie). La première étude a consisté à exposer la main droite des participants placée à l'intérieur d'une enceinte blindée à un champ magnétique de 50 Hz et de 0,5 mT (Köteles *et al.* 2013a). La seconde étude est une réplification utilisant la même méthodologie, mais incluant un calcul préalable des effectifs en fonction des résultats de l'étude précédente (Szemerski *et al.*, 2015) (*cf. analyse des articles au § 6.2.1.2.2*). Leurs auteurs ont

montré que, contrairement aux témoins, la capacité des personnes se déclarant EHS à distinguer les expositions réelles des expositions simulées était supérieure à celle attendue du seul fait du hasard ($p = 0,038$).

Les articles ne présentant pas les données individuelles, il n'est pas possible de dire si la plupart des personnes se déclarant EHS ou quelques-unes d'entre elles seulement avaient une capacité de discrimination supérieure.

5.3.2.4 Analyse des études de provocation sur le seuil de perception cutanée d'un courant électrique

L'hypothèse d'une perception cutanée d'un courant électrique différente selon les personnes a été émise par l'équipe de bioingénierie clinique de l'Université technologique de Graz, en Autriche, qui lui a consacré une étude approfondie (Leitgeb and Schröttner 2002, 2003, Schröttner, Leitgeb, and Hillert 2007).

Dans un premier temps, Leitgeb et Schröttner (2002) ont établi des valeurs de références pour la perception du courant électrique dans un échantillon représentatif de la population générale. Ayant constaté que les connaissances sur ces valeurs étaient insuffisantes compte tenu du faible nombre de données (surtout chez les femmes), et d'échantillons non représentatifs de la population générale, ces auteurs ont développé une méthode originale permettant de réaliser des mesures en double aveugle¹²⁰, dans des conditions de grande sécurité et, si besoin, au domicile des volontaires. Ces auteurs ont conçu un appareil délivrant un courant à 50 Hz, dont l'intensité augmentait automatiquement de façon linéaire et progressive à partir de très faibles valeurs (moins de 5 μA contre 100 μA pour les appareils médicaux standards). Les stimulations ont été effectuées au niveau de l'avant-bras (jusqu'à ce que la personne appuie sur un bouton pour indiquer qu'elle commençait à percevoir le signal). Elles ont été répétées 6 fois, permettant le calcul d'une valeur moyenne et d'un écart-type individuels. L'étude a porté sur un échantillon de 708 adultes (349 hommes et 359 femmes, âgés de 16 à 60 ans) représentatif de la population générale. Les distributions cumulées des seuils de perception ont été portées sur une droite (en coordonnées logarithmiques) pour illustrer leur distribution dans la population. Les résultats ont été les suivants :

- chez les femmes, les seuils de perception étaient légèrement décalés vers des valeurs plus basses (d'un facteur de l'ordre de 0,77) que celles mesurées chez les hommes ;
- les valeurs moyennes des seuils de perception étaient de 349 μA chez les hommes et de 242 μA chez les femmes ;
- les valeurs correspondant à 0,5 % des valeurs les plus basses étaient respectivement de 53 μA et de 24 μA chez les hommes et les femmes.

Cette étude repose sur une méthodologie rigoureuse. Par rapport aux données antérieures de la littérature, les valeurs des seuils de perception du courant électrique sont nettement plus basses, mais ont une étendue bien plus grande qui leur permet de les englober toutes, comme le montre la représentation en coordonnées logarithmiques de l'ensemble des résultats. Ceci s'explique, d'une part, par la meilleure sensibilité de l'appareil utilisé par les auteurs aux valeurs de seuils les plus basses (à partir de 5 μA contre 100 μA pour les appareils standards) et, d'autre part, par la composition de l'échantillon étudié, plus représentatif de la population générale que les échantillons inclus dans les études antérieures d'autres auteurs.

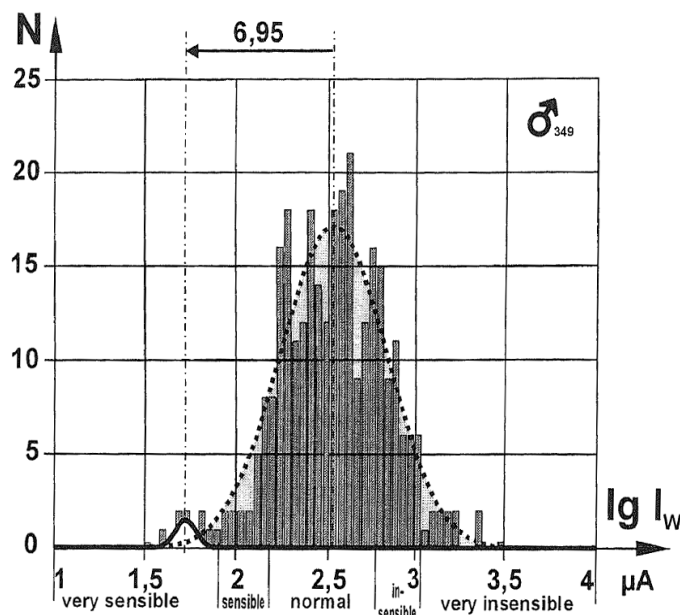
Dans leur deuxième article, Leitgeb et Schröttner (2003) ont approfondi l'analyse des données obtenues chez les 708 personnes ayant participé à l'étude précédente, ce qui a permis de mettre en évidence que les seuils de perception cutanée du courant électrique étaient répartis selon deux distributions log-normales :

- la première autour de la moyenne des intensités seuils, regroupant la plupart des données ;

¹²⁰ En double aveugle, les participants, ainsi que l'expérimentateur, n'ont pas connaissance du type d'exposition (fictive ou réelle).

- la seconde regroupant un petit nombre de données autour d'une intensité plus faible¹²¹ (cf. Figure 10).

Ces résultats ont mis en évidence l'existence, au sein de la population générale, d'un petit nombre de personnes ayant une sensibilité particulière au courant électrique. Ceci a suggéré aux auteurs l'hypothèse selon laquelle une sensibilité plus grande au courant électrique, caractérisée par un seuil de perception bas, pourrait être une condition au développement de l'EHS. Toutefois, étant donné que ces résultats ont été obtenus sans étude de la symptomatologie fonctionnelle des participants, cette hypothèse n'a pas été investiguée par les auteurs.



Source : (Leitgeb and Schröttner 2003)

Remarque : le meilleur ajustement proposé est une distribution log-normale.

Figure 10 : distribution des seuils de perception au courant électrique chez un échantillon de personnes

Dans cette étude, les auteurs ont construit un diagramme permettant de répartir les personnes en 5 zones selon les valeurs des seuils de perception (Figure 10) : une zone « normal » encadrée par deux zones « sensible » et « très sensible » pour les valeurs basses du seuil de perception, et deux zones « insensible » et « très insensible » pour les valeurs les plus hautes. Bien que les données obtenues chez les femmes aient été ajustées sur celles des hommes à l'aide du facteur 0,77 correspondant au décalage observé ci-dessus entre les deux droites représentant les distributions cumulées des seuils de perception pour chaque genre, les résultats ont été les suivants :

- 4,2 % des femmes étaient classées dans la zone « très sensible », contre 1,7 % des hommes ;
- 0.6 % des femmes et 1.2 % des hommes étaient classés dans la zone « très insensible ».

L'utilisation de ce diagramme chez quelques personnes chez lesquelles plusieurs mesures ont pu être faites sur plusieurs jours a suggéré aux auteurs l'hypothèse selon laquelle la mesure du seuil de perception cutanée du courant électrique, selon la méthode proposée, couplée à l'utilisation du diagramme d'électrosensibilité, pourrait être utile dans le diagnostic de l'EHS.

Cette hypothèse a été testée dans une troisième étude des mêmes auteurs (Schröttner, Leitgeb, and Hillert 2007). Trois groupes de personnes se déclarant EHS (séparés en fonction de leur

¹²¹ Remarque : Le meilleur ajustement proposé est une distribution log-normale idéale.

mode de recrutement) ont été comparés entre eux, ainsi qu'à la population de 708 personnes utilisée dans les deux articles précédents, qui a servi de population témoin. Le groupe 1 comprenait 37 personnes (25 femmes et 12 hommes, âgés de 27 à 81 ans) recrutées en Autriche parmi les membres d'une association d'entraide de personnes se déclarant EHS. Le groupe 2 en comprenait 29 (23 femmes et 6 hommes, âgés de 32 à 63 ans) recrutées en Suède par voie de presse et le groupe 3, 24 (15 femmes et 9 hommes, âgés de 37 à 73 ans) recrutées en Autriche parmi des personnes attribuant des troubles du sommeil à la proximité d'antennes de téléphonie mobile et volontaires pour se prêter à des investigations sur ce sujet. Les résultats ont été les suivants :

- la distribution des fréquences cumulées des logarithmes des valeurs moyennes des seuils de perception obtenues pour l'ensemble des personnes se déclarant EHS (groupes 1, 2 et 3), après ajustement par le facteur 0,77¹²² des valeurs obtenues chez les femmes sur celles des hommes, a montré un décalage significatif ($p < 0,001$) vers les valeurs basses par rapport à la même distribution obtenue dans la population générale ;
- cependant, seules les distributions des fréquences cumulées de ces logarithmes obtenues dans les groupes 2 et 3 ont été significativement différentes de celles obtenues dans la population générale, avec un décalage d'un facteur 0,55 pour le groupe 2 et 0,39 pour le groupe 3. L'introduction des données dans le diagramme d'électrosensibilité a mis en évidence une répartition différente en fonction des groupes :
 - dans le groupe 1 : la plupart des personnes (57 %) étaient dans la zone « normale », avec un pourcentage à peu près identique dans les zones « sensibles » et « très sensibles » (21 %) et dans les zones « insensibles » et « très insensibles » (22 %) ;
 - dans le groupe 2 : le pourcentage de personnes dans la zone normale (52 %) restait dominant. En revanche, le pourcentage de personnes dans les zones « sensibles » et « très sensibles », était nettement plus élevé (44 %) que celui évalué dans les zones « insensibles » et « très insensibles » ($n = 1$) ;
 - dans le groupe 3 : 60 % des personnes étaient dans la zone « sensible » ou « très sensible », 38 % dans la zone « normale » et un pourcentage négligeable dans la zone « insensible » et « très insensible » ($n = 1$).

Le fait que de nombreuses personnes se considérant EHS se soient situées dans la zone « normale » retire une grande partie de la valeur diagnostique de ce test. De plus, ce travail, bien que très rigoureux en ce qui concerne le recueil et le traitement des données relatives à la mesure du seuil de perception cutanée du courant électrique, reste critiquable en raison de la (quasi) absence d'information sur la symptomatologie clinique et l'histoire de la maladie de chaque personne incluse dans le protocole, ce qui ne permet pas d'analyser les éventuelles relations entre ces données cliniques et les valeurs du seuil de perception.

5.3.2.5 Conclusion sur l'électrosensibilité

Aucune étude n'a mis en évidence une capacité des personnes se déclarant EHS à percevoir des champs électromagnétiques radiofréquences.

Par ailleurs, les études rassemblées dans ce chapitre sont très disparates, qu'il s'agisse des techniques d'exposition ou des critères d'évaluation. Elles sont aussi de qualité scientifique très inégale. Cependant, elles ont en commun d'être parmi les rares à montrer des réponses à des expositions à des champs électriques et / ou magnétiques ou à des courants électriques basses fréquences : potentiels évoqués chez des personnes non-EHS lors d'une exposition à un signal magnétique (cf. § 5.3.2.2), différences de capacité à distinguer les expositions réelles des expositions simulées à des champs électromagnétiques basses fréquences entre personnes se

¹²² Cf. Explication de ce facteur dans la présentation de l'étude de Leitgeb et Schröttner (2002) au début du paragraphe.

déclarant EHS et témoins (cf. § 5.3.2.3), abaissement significatif du seuil de perception du courant électrique (50 ou 60 Hz) chez certaines personnes se déclarant EHS (cf. § 5.3.2.4). On peut alors parler d'électrosensibilité ou d'hypersensibilité au courant électrique.

Cependant, en raison de biais de recrutement ayant pu entraîner un manque de sensibilité (des personnes non-EHS ayant pu être incluses dans ces études sur la base de leur déclaration), ces résultats doivent être interprétés avec précaution. Ces études mériteraient d'être répliquées, à condition toutefois qu'une attention particulière soit accordée aux critères d'inclusion des participants et aux résultats individuels. Toutefois, en l'absence de recueil de la symptomatologie fonctionnelle des participants, ces études ne permettent pas d'établir de lien entre ces observations et l'EHS.

Enfin, le fait que ces différences aient été observées pour des expositions appliquées au niveau des membres supérieurs (main pour l'équipe de Budapest, avant-bras pour celle de Graz) mérite d'être rapproché de la diminution de la densité des petites fibres nerveuses de l'épiderme, qui est maintenant bien documentée (Caro and Winter 2015), à savoir la fibromyalgie, qui présente quelques analogies avec l'EHS (cf. § 3.8.3 du présent rapport). L'étude de la densité de ces fibres pourrait contribuer à l'analyse des mécanismes qui sous-tendent les différences entre personnes se déclarant EHS et témoins.

5.4 Conclusion sur la capacité de l'être humain à percevoir les champs électromagnétiques

Les systèmes biologiques impliqués dans la perception du champ magnétique terrestre chez l'animal sont présents chez l'être humain (cf. § 5.1). Cependant, leur fonction est à ce jour inconnue. Aucun mécanisme de réception ni de transmission des signaux électromagnétiques par une voie nerveuse spécifique n'a été mis en évidence chez l'être humain. Les conséquences d'un possible dysfonctionnement de ces systèmes biologiques, si elles devaient conduire à l'EHS, restent inconnues à ce jour.

Par ailleurs, certains mécanismes physiologiques du corps humain mettent en œuvre des processus physiques proches de ceux qui sont à l'origine des phénomènes magnétiques et électromagnétiques :

- l'organisme humain produit localement des courants qui peuvent générer des niveaux d'induction magnétique (B) de l'ordre de quelques microteslas (μT) (cf. Annexe 6), valeurs à rapprocher des valeurs limites d'exposition préconisées par l'Icnirp¹²³ (cf. Annexe 6), de l'ordre de 20 mT à la fréquence de 50 Hz et de 27 μT entre 3 kHz et 10 MHz. À partir de ces niveaux d'exposition, des lignes scintillantes peuvent apparaître dans le champ visuel, à 20 Hz, et un effet stroboscopique à 50 ou 60 Hz sans ligne vraiment formée (des magnéto-phosphènes) liés à la formation de micro-courants au niveau de la rétine, qui sont mal interprétés par le cerveau. Indolore et sans effet sur l'œil, ce phénomène disparaît dès que l'exposition aux champs magnétiques cesse ;
- l'organisme humain produit et utilise lui-même de l'électricité. De nombreux mécanismes physiologiques sont liés à des échanges d'ions au travers des membranes des cellules, notamment aux niveaux nerveux, musculaires et sécrétoires. La régulation de la répartition des ions (et de leur nature) au travers des membranes cellulaires permet de maintenir des différences de potentiels, éventuellement des dépolarisations, etc.

¹²³ *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection*. L'Icnirp, la commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants, est un groupement d'experts indépendants chargé d'évaluer l'état des connaissances sur les effets sanitaires des rayonnements non-ionisants. Elle a succédé en 1992 au comité Inirc (*Non Ionizing Radiation Committee*) de l'Irpa (*International Radiation Protection Association*). L'Icnirp édite des lignes directrices visant à protéger les personnes contre les rayonnements non-ionisants qui sont régulièrement mises à jour et reprises comme références dans la plupart des normes et réglementations internationales.

Quoiqu'il en soit, à ce jour, aucun récepteur dédié à la détection des champs électromagnétiques ni aucune voie nerveuse impliquée dans la transmission de cette information n'a été mis en évidence dans l'organisme humain. Dans l'état actuel des connaissances scientifiques, la perception directe des ondes électromagnétiques par l'être humain n'a pas été démontrée.

Toutefois, des personnes se déclarant EHS ont été capables de « percevoir » un champ magnétique (Köteles *et al.*, 2013a ; Szemerski *et al.*, 2015, dans les mêmes conditions d'exposition à 0,5 mT). Il ne s'agit vraisemblablement pas d'un « sixième sens », mais la question d'une perception indirecte d'éventuels effets physiologiques, biologiques et / ou du courant électrique (cf. § 5.3.2.4) peut être posée.

En matière de perception possible des champs électromagnétiques par le corps humain, plusieurs mécanismes peuvent être envisagés, dont les trois hypothèses suivantes :

- des effets biologiques et / ou physiologiques de l'organisme humain (voir le rapport de l'Anses sur les radiofréquences publié en 2013) ;
- une « démodulation » du signal en basses fréquences qui seraient dus aux variations temporelles de puissance (voir détails au § 5.2) ;
- des mécanismes éventuellement dus aux hautes fréquences transitoires, c'est-à-dire aux brusques variations temporelles des signaux (voir également au § 5.2).

Lors des tests de provocation, ou lors de la mesure de l'exposition des personnes aux rayonnements électromagnétiques de l'environnement urbain, les critères discriminants sont généralement l'intensité maximale du champ électromagnétique auquel la personne est exposée, la fréquence du signal et la durée d'exposition. Or, avec le développement des nouvelles technologies de télécommunications utilisant des formes de signaux toujours plus innovantes et complexes, de la modulation de fréquence à un signal ultra large bande purement impulsif, ces tests ne sont plus représentatifs de l'environnement électromagnétique actuel.

On peut donc s'interroger sur la nécessité de construire de nouveaux indicateurs de l'exposition aux champs électromagnétiques qui permettraient d'étudier le lien entre les symptômes décrits par les personnes se déclarant EHS et leur exposition aux champs électromagnétiques (voir recommandations au chapitre 10).

6 Analyse des articles scientifiques impliquant des personnes se déclarant EHS

Dans ce chapitre, sont présentés et analysés les articles scientifiques consacrés à la question de l'EHS avec, d'une part, les études descriptives (sans exposition expérimentale aux champs électromagnétiques) (§ 6.1) et, d'autre part, les études de provocation (avec exposition expérimentale aux champs électromagnétiques) (§ 6.2).

6.1 Études sans exposition expérimentale aux champs électromagnétiques

6.1.1 Études descriptives sur les symptômes déclarés par les personnes se déclarant EHS

Ce paragraphe est consacré à l'analyse d'études décrivant des symptômes ressentis par les personnes se déclarant EHS. Il s'agit d'études descriptives, sans exposition expérimentale aux champs électromagnétiques et le plus souvent sans évaluation des expositions, réalisées soit uniquement avec un échantillon de ces personnes (§ 6.1.1.1), soit en les comparant à des témoins (§ 6.1.1.2). Ces études sont fondées sur le recueil de symptômes subjectifs (voir Annexe 7), tels que les troubles du sommeil ou les maux de tête déclarés (voir Annexe 8). Dans ces études, il n'y a pas d'objectivation des symptômes ni de données biologiques ou physiologiques.

6.1.1.1 Études sans groupe témoin (chez des personnes se déclarant EHS uniquement)

Les premiers articles (Linden and Rolfsen 1981, Nilsen 1982, Tjonn 1984) s'intéressant aux effets attribués à une exposition à des écrans cathodiques (terminaux d'ordinateur, écrans de télévision) ont rapporté uniquement des symptômes cutanés. Des symptômes attribués à la proximité d'appareils électriques ont ensuite été décrits chez des personnes, dont certaines se plaignaient des expositions aux écrans (Bergqvist 1984, Knave *et al.* 1985, Knave 1994, Chia, Chia, and Tan 2000, Chia 2001) ; il s'agissait de maux de tête, de fatigue et de faiblesse, de picotements des extrémités, de respiration courte, de palpitations, de sudation profuse, de dépression et de troubles de la mémoire.

La première description de symptômes attribués à l'utilisation de téléphones mobiles est celle de Hocking (1998) en Australie. Cet auteur a interrogé par téléphone 40 personnes (âgées de 30 à 49 ans, 75 % d'hommes) recrutées par voie de presse. Les résultats ont été les suivants :

- 35 personnes (88 %) se sont plaintes de maux de tête : 17 dans la région temporale du côté du téléphone, 9 au niveau de l'oreille du même côté et 9 dans la région occipitale. Dans 16 cas, la douleur (généralement modérée) a été décrite comme « survenant à chaque utilisation du téléphone », dans 11 cas « habituellement » et dans 8 cas « fréquemment ». Dans deux cas, un diagnostic de migraine avait été porté par leur médecin. Dans la plupart des cas, la douleur apparaissait en moins de 5 minutes (65 %) et disparaissait en moins d'une heure (54 %) ;
- 11 personnes (31 %) se sont plaintes de troubles transitoires de la vue, de type vision trouble ;
- 15 personnes (43 %) se sont plaintes de nausées, de sensations d'étourdissement ou de flou dans la tête rendant la pensée difficile ;

- une femme ayant présenté une hémorragie sous-arachnoïdienne due à une malformation artério-veineuse cérébrale avait associé la survenue de ses maux de tête à une conversation téléphonique ;
- un homme, utilisateur intensif de téléphone mobile, avait développé une faiblesse de la jambe controlatérale, dont la cause n'avait pu être identifiée par un bilan neurologique approfondi ;
- 3 personnes se sont plaintes de paresthésies au niveau de la ceinture, en rapport avec le port de leur appareil à ce niveau ;
- à noter que ces personnes se sont déclarées en bonne santé, à l'exception de 3 d'entre elles, qui présentaient une maladie grave contrôlée (cancer, maladie cardiaque, hypothyroïdie) ;
- dans les antécédents, 5 personnes signalaient des maux de tête, 5 autres des migraines et 13 des allergies ;
- aucune personne n'a rapporté d'électrosensibilité, de sensibilité chimique multiple ou de troubles liés à l'utilisation de téléphone ordinaire.

Dans la conclusion de l'article, l'auteur alertait les médecins et les utilisateurs sur ces phénomènes et appelait à la poursuite des recherches sur l'étendue et les mécanismes de ces effets, ainsi que sur leur implication possible sur les limites de sécurité des radiofréquences.

Schreier *et al.* (2006) ont étudié la prévalence de l'EHS en Suisse et exploré la perception du risque sanitaire en rapport avec les champs électromagnétiques. Ces auteurs se sont également intéressés à la fréquence des symptômes chez les personnes se déclarant EHS. Une enquête téléphonique assistée par ordinateur a été réalisée sur un échantillon représentatif de la population suisse âgée de plus de 14 ans (taux de réponse = 55,1 %). Sur 2 028 personnes interrogées, 107 (5 %) se sont déclarées EHS. Seuls les symptômes rapportés par ces personnes ont été recensés :

- 42,7 % se sont plaintes de troubles du sommeil ;
- 33,8 % de céphalées ;
- 10,4 % de troubles de la concentration ;
- les autres symptômes (douleurs ostéo-musculaires, nervosité, troubles respiratoires) étaient mentionnés par moins de 10 % des participants ;
- aucune atteinte cutanée n'a été signalée, contrairement aux premières études sur les personnes se déclarant EHS qui rapportaient en premier lieu ce type de symptômes.

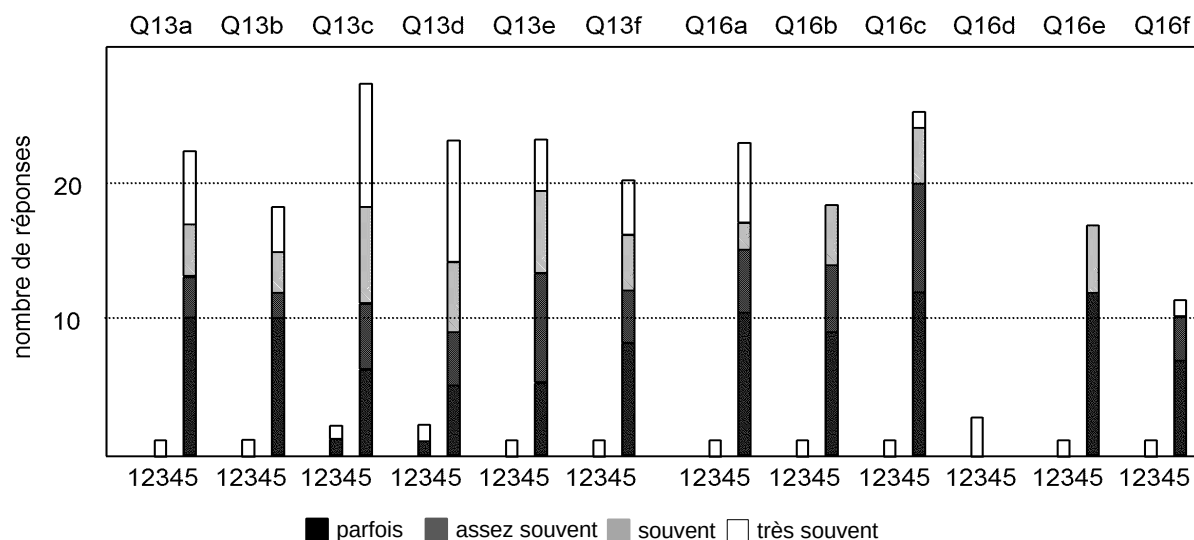
Pour leur part, Brand *et al.* (2009) ont réalisé une étude ambitieuse et très complexe (déjà analysée dans le rapport publié par l'Afsset en 2009 sur les radiofréquences) sur des personnes se plaignant de troubles qu'elles attribuaient à l'environnement. Les auteurs ont associé trois approches distinctes (somatique, psychique et environnementale) chez 61 personnes. L'évaluation médicale comportait un examen physique général, des tests standards de laboratoire (formule sanguine, IgE total, SX-1), des tests cutanés concernant 25 allergènes respiratoires (bouleau, chat, etc.) et 6 allergènes alimentaires, les tests épicutanés de la batterie standard européenne et une spirométrie (test de la fonction pulmonaire). L'approche psychologique et psychiatrique comportait un entretien structuré de 45 à 60 minutes, une échelle de diagnostic psychodynamique opérationnalisée (OPD), l'*interview diagnostic International composite* DIA-X-M-CIDI, sections C, D, E, F, G, K), une échelle de personnalité (*International Diagnostic Checklist for Personality disorder*, IDCL-P), 5 échelles d'auto-évaluation des symptômes et 5 questionnaires d'adaptation (*coping*). L'approche environnementale comportait une visite du domicile, des mesures de l'humidité relative, de la température de l'air de la pièce et du CO₂ pendant deux à trois jours, l'évaluation des champs électromagnétiques basses et hautes fréquences ainsi que, si indiqués, des mesures d'exposition plus spécifiques (telles que formaldéhyde ou radon). L'analyse des résultats a permis de pondérer les trois composantes (somatique, psychique et environnementale) les unes par rapport aux autres, le traitement de l'ensemble de ces données disparates a été

« intégratif » pour chaque cas dans le cadre de conférences interdisciplinaires visant à obtenir un consensus sur l'étiologie des symptômes. Les résultats ont été les suivants :

- même si l'exposition aux champs électromagnétiques a été la source environnementale de pollution la plus fréquemment rencontrée (n = 24, 39,4 % des cas) dans la population étudiée (n = 61), les résultats ne pouvaient pas être attribués à ce seul facteur. D'autres sources de pollution, comme le CO₂, ont été presque aussi fréquentes (n = 20, 32,8 % des cas) ;
- les différences de jugement entre experts et participants en ce qui concernait la tension psychologique ont été exploitées pour créer 4 sous-groupes distincts, dans lesquels tous les facteurs environnementaux, réels ou allégués, étaient représentés, mais qui présentaient des différences en ce qui concerne les étiologies médicales, psychiatriques et environnementales, les traits de personnalité et les compétences interactionnelles ;
- le protocole a mis en évidence des troubles psychologiques ou psychiatriques chez 38 (62,3 %) des 61 patients étudiés et le fait qu'environ la moitié des symptômes ressentis pouvaient être attribués à une cause psychiatrique ;
- aucune différence significative n'a été mise en évidence du point de vue médical (hors évaluation psychiatrique) entre les quatre sous-groupes identifiés.

L'intérêt de cette étude pilote est d'avoir montré la faisabilité d'une approche multimodale complexe, associant un examen médical et psychiatrique et une analyse environnementale, ainsi qu'un traitement intégratif des nombreuses données recueillies. D'un point de vue pratique, elle pourrait servir de modèle à la prise en charge médicale de patients. Du point de vue scientifique, elle tend à confirmer la grande hétérogénéité des affections environnementales et la fréquente association des facteurs impliqués. Cependant, les effectifs de cette étude sont trop faibles pour permettre de généraliser ses conclusions et sa contribution à l'étude de l'EHS reste très modeste.

Korpinen *et al.* (2009b), utilisant une méthode qualitative d'analyse du discours écrit par codage ouvert, se sont intéressés à l'impact de l'usage des nouvelles technologies (ordinateurs de bureau ou portables, téléphones mobiles et autres appareils électriques) sur les symptômes mentaux auto-déclarés (dont les troubles du sommeil) dans une population finlandaise adulte âgés de 18 à 65 ans. Parmi les répondants (n = 6 121 sur 15 000 questionnaires envoyés, taux de réponse = 41 %), deux groupes ont été identifiés et ont fait l'objet d'une étude fine : celui des personnes déclarant des symptômes (maux de tête, maux d'oreilles, ou sensation de chaleur) associés à l'usage du mobile (33 répondants composant le groupe 1), et celui des personnes déclarant des symptômes cutanés associés à l'usage d'un écran pendant une longue période (44 répondants composant le groupe 2). Ces deux groupes peuvent être désignés sous le terme d'EHS. La fréquence des symptômes rapportés par ces participants est présentée graphiquement (*cf.* Figure 11 et Figure 12) (Korpinen and Pääkkönen 2009b).



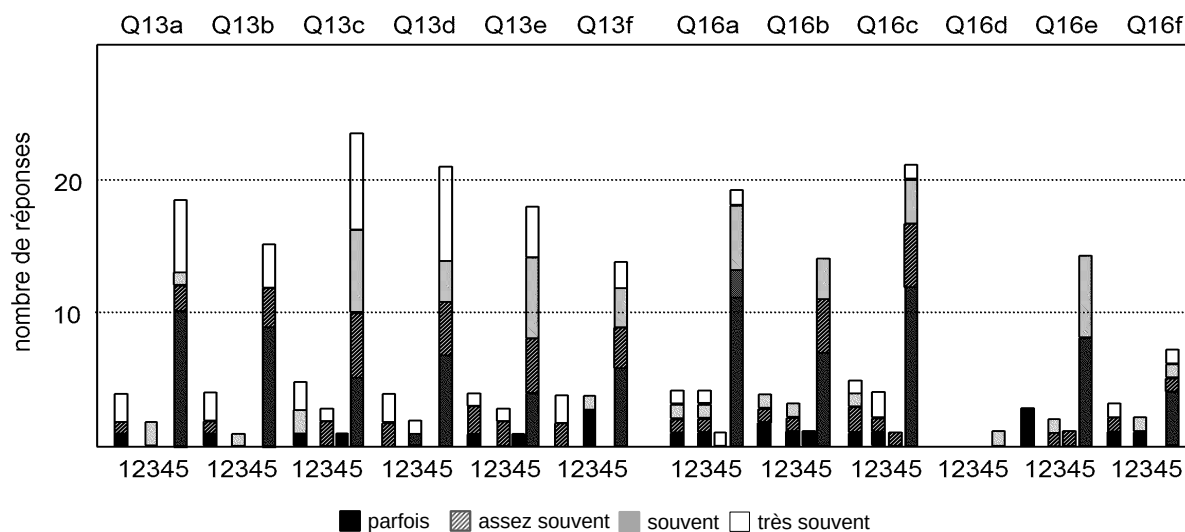
Source : d'après Korpinen et al., 2009b.

Question 8 sur le niveau d'usage du téléphone mobile : 1 = pas du tout, 2 = moins d'une fois par mois, 3 = mensuellement, 4 = chaque semaine, ou 5 = quotidiennement.

Question 13 : « Avez-vous eu une douleur au cours des 12 derniers mois dans (a) les poignets et les doigts, (b) les coudes et les avant-bras, (c) le cou, (d) les épaules, (e) les hanches et le bas du dos, et (f) aux pieds ».

Question 16 : « Avez-vous souffert de (a) troubles du sommeil, (b) de dépression, (c) d'épuisement au travail, (d) d'addiction, (e) d'anxiété, (f) de situation de peur pendant les 12 derniers mois ».

Figure 11 : nombre de réponses des participants du groupe 1 aux questions 13 et 16 par niveau d'usage du téléphone mobile (question 8)



Source : d'après Korpinen et al., 2009b.

Question 11 sur le niveau d'utilisation d'un ordinateur au travail : 1 = pas du tout, 2 = moins d'une fois par mois, 3 = mensuellement, 4 = chaque semaine, ou 5 = quotidiennement.

Question 13 : « Avez-vous eu une douleur au cours des 12 derniers mois dans (a) les poignets et les doigts, (b) les coudes et les avant-bras, (c) le cou, (d) les épaules, (e) les hanches et le bas du dos, et (f) aux pieds ».

Question 16 : « Avez-vous souffert de (a) troubles du sommeil, (b) de dépression, (c) d'épuisement au travail, (d) d'addiction, (e) d'anxiété, (f) de situation de peur pendant les 12 derniers mois ».

Figure 12 : nombre de réponses des participants du groupe 2 aux questions 13 et 16 par niveau d'utilisation d'un ordinateur au travail (question 11)

Cette étude porte essentiellement sur les caractéristiques socio-démographiques et sur les appareils utilisés.

Au Japon, Kato *et al.* (2012) ont réalisé une étude sur un groupe de 75 personnes se déclarant EHS recrutées via une association au cours de l'année 2009. Trente-quatre avaient été déclarées EHS par un médecin (la méthode de diagnostic n'est pas précisée), 37 étaient soucieux des effets des champs électromagnétiques et s'auto-déclaraient EHS, et 4 déclaraient une sensibilité aux champs électromagnétiques ou aux produits chimiques. La fréquence des symptômes est présentée dans le Tableau 7 (Kato and Johansson 2012).

Tableau 7 : principaux symptômes rapportés par des personnes se déclarant EHS au Japon (n = 75)

Symptômes	Proportion de personnes se déclarant EHS concernées (%)
Fatigue, lassitude	85,3
Maux de tête	81,3
Difficultés de concentration	81,3
Troubles du sommeil	76,0
Humeur atone	73,3
Vertiges	64,4
Bourdonnement	62,7
Raideur de la nuque ou du dos	56,0
Irritation	56,0
Anxiété	54,7

Source : d'après Kato *et al.* (2012).

Hagström *et al.* (2013) ont réalisé en Finlande une étude descriptive et transversale sur une population de personnes se déclarant EHS, recrutées entre juillet 2011 et janvier 2012, et dont la majorité appartenait à une association d'aide aux personnes se déclarant EHS. Un questionnaire a été envoyé par courriel à 395 personnes (les 345 membres d'une association d'entraide et 50 autres personnes ayant demandé à participer à l'étude après avoir appris l'existence de celle-ci). Le taux de participation a été de 52,1 % (n = 206, dont 194 réponses valides) avec 80,9 % de femmes d'âge compris entre 27 et 98 ans (moyenne de 55,4 ans). Cette étude a pris en compte les différentes phases de l'EHS (avant le début des symptômes, pendant et après la phase aiguë de l'EHS). Le questionnaire conçu par les auteurs comprenait une liste de 68 symptômes (stress, troubles du sommeil, etc.), deux questions sur les sources incriminées dans l'apparition des symptômes (*cf.* sujet abordé au § 3.3), une série de questions sur les traitements médicaux conventionnels et non conventionnels, ainsi qu'une question ouverte sur les initiatives personnelles ayant conduit à une récupération partielle ou totale de leur santé (*cf.* § 8.1.3). Les résultats concernant les symptômes ont été les suivants :

- avant l'apparition de l'EHS, le nombre moyen de symptômes était de 10,5 et, lors de la phase aiguë, ce nombre augmentait à 26,8 ;
- le stress était le symptôme le plus fréquemment rapporté par 60 % des répondants (n = 117) en phase aiguë, et 34 % (n = 66) dans la période précédant l'apparition des symptômes ;
- les troubles du sommeil apparaissaient dans les 10 symptômes les plus fréquemment rapportés avec une prévalence de 23,7 % dans la période précédant l'apparition des symptômes, qui augmentait à 59,3 % pendant la phase aiguë ;
- les articulations douloureuses (58 %), une fatigue anormale (57 %) et des tensions musculaires (56 %) étaient également fréquemment rapportées en phase aiguë.

Un biais de mémorisation est possible concernant la période avant l'EHS.

Cette étude indique que le stress est le symptôme prépondérant chez les personnes se déclarant EHS, ce qui pourrait expliquer les troubles du sommeil (Hagström *et al.*, 2013). En effet, le stress est une des causes principales de l'apparition des insomnies (Harvey, Gehrman, and Espie 2014) (*cf.* Encadré 7, p228) et des troubles du sommeil chez l'adulte ; il est possible que les troubles du sommeil observés par ces auteurs puissent être reliés à un facteur de stress (sans qu'il soit possible de dire si celui-ci est une cause ou une conséquence de l'EHS).

L'enquête de Lambrozo *et al.* (2013) réalisée auprès de 600 médecins généralistes français apporte une information indirecte sur les symptômes rapportés au cours de consultations de personnes se déclarant EHS. Les symptômes les plus fréquemment décrits étaient les maux de tête (38 %), les troubles du sommeil (19 %) et la fatigue (17 %). La nervosité (6 %), les vertiges (5 %), les acouphènes (4 %), la sensation de chaleur cutanée (3 %), les difficultés de concentration et l'anxiété (2 %) étaient moins souvent évoqués.

Dieudonné (2016) a abordé le problème de la symptomatologie et de son attribution à une exposition aux champs électromagnétiques en posant la question de savoir comment les personnes se déclarant EHS en arrivent à se considérer comme tel. Il a adopté pour cela une approche qualitative, qu'il présente comme exploratoire, consistant à n'interroger que des personnes véritablement convaincues d'être EHS et à leur faire exposer de la manière la plus libre possible l'histoire de leur maladie (*illness narrative*) et de ses conséquences sur leur vie quotidienne. Utilisant deux critères d'inclusion, la revendication de souffrir d'EHS et l'ajustement du style de vie pour éviter les expositions, l'auteur a recruté 40 personnes (11 hommes et 29 femmes, âge moyen = 51 ± 11 ans). L'entretien a comporté deux étapes. La première ne comportait qu'une question, « *Comment les choses se sont-elles passées pour vous ?* », à laquelle les participants pouvaient répondre librement et aussi longtemps qu'ils le souhaitaient. La seconde était un entretien détaillé, guidé par cinq questions les interrogeant successivement sur : (1) leurs symptômes, (2) la manière dont ils y font face, (3) comment ils en sont venus à les attribuer à une exposition aux champs électromagnétiques, (4) les effets qu'ils perçoivent sur leurs relations sociales et (5) leurs principales caractéristiques sociales. D'après l'auteur, le recoupement des réponses, la reformulation et la répétition des questions, le souci de ne pas suggérer les réponses, le choix du lieu de l'entretien laissé aux personnes ont permis de créer un climat de confiance et d'obtenir des informations fiables. Les participants ont assisté volontiers à la reconstitution de leur biographie. La durée moyenne des entretiens était de 143 minutes. L'auteur a rapporté que les troubles du sommeil étaient mentionnés par 28 participants (70,0 %), les maux de tête par 25 (62,5 %), les douleurs par 25 (62,5 %), une fatigue jugée anormale par 20 (50,0 %) et des problèmes de concentration par 17 (42,5 %).

6.1.1.2 Études comportant des groupes témoins (en population générale)

Röösli *et al.* (2004) ont réalisé, à la demande de l'Office Fédéral suisse de la Santé Publique (OFSP), une enquête ayant pour objectifs (1) de caractériser une population de personnes se déclarant EHS en matière de démographie, de prévalence des symptômes et de sources de champs électromagnétiques suspectées, et (2) de la comparer à l'échantillon représentatif de la population suisse constitué à l'occasion du *Swiss Health Survey (SHS)* de 1997¹²⁴ (Abelin *et al.* 2000). Les auteurs ont élaboré un questionnaire spécialement destiné aux personnes se déclarant EHS et comportant, en ce qui concerne « les symptômes de mauvaise santé », des questions ouvertes pour éviter les biais de réponses. Ils ont également utilisé les questions relatives à l'état de santé général, aux troubles du sommeil et aux maux de tête du *SHS*. Ce questionnaire a été diffusé auprès des autorités publiques, des organisations écologistes, aux compagnies de téléphone et aux autres structures pouvant être consultées par les personnes atteintes, pour leur permettre d'encourager les participants attribuant des symptômes de mauvaise santé à des expositions à des champs électromagnétiques de répondre au questionnaire. Puis, l'OFSP a adressé le questionnaire aux personnes ayant accepté de participer à l'étude. En un an, 429 questionnaires ont été collectés, parmi lesquels ceux de 394 personnes (57 % femmes, 43 % hommes, âge moyen = 51 ans) attribuant leurs symptômes de mauvaise santé à l'exposition aux champs électromagnétiques.

- en ce qui concerne les données brutes, recueillies directement auprès de personnes se déclarant EHS, les auteurs ont présenté une liste des 26 symptômes les plus fréquemment déclarés (figure 1, page 143 de l'article) parmi lesquels les troubles du sommeil ont été les

¹²⁴ Cette étude a été réalisée sur un échantillon de 13 004 personnes, représentatif de la population suisse.

plus fréquents (58 %), devant les maux de tête (41 %), la nervosité (19 %), la fatigue (18 %) et les difficultés de concentration (16 %), aussi bien chez les hommes que chez les femmes. Les personnes se déclarant EHS ont indiqué comme causes possibles de leurs symptômes : les antennes de téléphonie mobile (74 %), les téléphones mobiles (36 %), les téléphones sans fil (29 %) et les lignes à haute tension (27 %) ;

- en ce qui concerne la comparaison avec les données du questionnaire SHS, l'échantillon de la population générale était statistiquement plus jeune que celui des personnes se déclarant EHS (46,1 ans *versus* 51,0 ans), moins fréquemment marié (52 % *versus* 58 %, $p < 0,005$) et de niveau éducatif moins élevé (17 % *versus* 40 %, $p < 0,001$). Après ajustement sur l'âge, le genre, le niveau éducatif et le statut conjugal, les résultats ont été les suivants (tableau 2, page 146 de l'article) :
 - les troubles du sommeil, classés en deux catégories (modérés et pathologiques), ont été plus fréquemment rapportés par les personnes se déclarant EHS que par la population générale : $n = 129$ (33 %) *versus* $n = 3\,085$ (24 %) pour les troubles du sommeil modérés et $n = 155$ (39 %) *versus* $n = 638$ (5 %) pour les pathologiques ($p < 0,001$) ;
 - les maux de tête intenses, eux aussi classés en deux catégories (modérés et intenses), ont également été plus fréquemment rapportés par les personnes se déclarant EHS que par la population générale : $n = 129$ (33 %) *versus* $n = 3\,085$ (24 %) pour les troubles du sommeil modérés et $n = 174$ (44 %) *versus* $n = 1\,144$ (9 %) pour les pathologies ($p < 0,001$) et ont été plus fréquents que les troubles du sommeil (voir aussi discussion sur les migraines au § 7.5.3) ;
 - l'état de santé général, caractérisé par la fréquence des pathologies associées, a été significativement plus altéré chez les personnes se déclarant EHS que dans la population générale : rhumatisme (9,4 % *versus* 4,5 %, $p = 0,001$), bronchite (5,8 % *versus* 1,2 %, $p < 0,001$), cancer (4,1 % *versus* 0,8 %, $p = 0,001$), allergie (8,6 % *versus* 2,6 %, $p < 0,001$), et dépression (6,9 % *versus* 2,1 %, $p < 0,001$).

Bien que reposant sur une méthodologie élaborée, ayant fait l'objet d'un large consensus et appliquée rigoureusement, on peut s'interroger sur la validité d'une comparaison entre deux populations dont les données ont été recueillies avec des méthodologies différentes et un décalage de 4,5 ans. De plus, la fréquence élevée d'affections organiques chez les personnes se déclarant EHS pose le problème des critères de recrutement de ces personnes.

Enfin, il existe des discordances dans la fréquence des symptômes étudiés chez les personnes se déclarant EHS, selon qu'elles sont présentées en données brutes ou en données ajustées pour comparaison avec la population de l'enquête SHS. Ceci concerne aussi bien les troubles du sommeil (58 % en données brutes *versus* 72 %, 33 + 39, lors de la comparaison) que les maux de tête (41 % en données brutes *versus* 81 %, 37 + 44 lors de la comparaison). Pour toutes ces raisons, les pourcentages indiqués dans cet article doivent être considérés, sans être remis en cause, comme traduisant des tendances plutôt que comme des données précises.

Schröttner et Leitgeb (2008) ont interrogé par téléphone un échantillon de 526 personnes représentatives de la population autrichienne pour étudier la prévalence de l'EHS dans ce pays. Le taux de participation a été de 88 % ($n = 460$). Les auteurs ont posé 25 questions, les unes d'ordre général et les autres portant plus particulièrement sur l'utilisation des appareils émetteurs de champs électromagnétiques, sur la perception des risques liés à cette utilisation, sur l'éventuelle gêne ressentie en présence d'un ou de plusieurs de ces appareils, sur les symptômes traduisant cette gêne (question ouverte) et sur l'éventuel recours à un médecin pour traiter ces symptômes. Sur les 460 participants, 16 (3,5 %) ont déclaré être EHS à un degré tel qu'ils avaient eu recours à un médecin pour le traitement de leurs symptômes.

- les symptômes les plus fréquemment rapportés chez les personnes se déclarant EHS étaient, sans autre précision : les troubles du sommeil, la migraine, la nervosité et les acouphènes ;

- dans la population générale, les auteurs ont précisé que la fréquence des symptômes était de 16,4 % pour la sensibilité aux changements de temps, de 14,0 % pour la migraine, de 8,2 % pour les perturbations du sommeil et de 8,0 % pour les maux de tête (question fermée ne comportant que ces quatre propositions) (Schröttner and Leitgeb 2008).

Landgrebe *et al.* (2008b, 2009) ont consacré deux articles à une étude cas-témoin. Leur objectif principal était d'approfondir une étude pilote (Frick *et al.* 2005, Landgrebe *et al.* 2007) basée sur une exposition à une stimulation magnétique transcrânienne chez des personnes se déclarant EHS, sans montrer de capacité de détection des expositions par ces personnes (voir présentation de l'étude au § 6.2.1.2.1). En fonction de cet objectif, les effectifs calculés *a priori* à partir des données de cette étude pilote qui devaient être de 90 par groupe ont finalement été de 89 personnes se déclarant EHS et de 107 témoins. L'étude comportait aussi un volet clinique (voir article de Landgrebe *et al.* 2008a analysé au § 6.2.1.2.1), un volet psychique et un sur les « stratégies cognitives » à l'égard des symptômes attribués aux champs électromagnétiques. Les personnes se déclarant EHS ont été recrutées dans la région de Ratisbonne (Allemagne), par annonce dans les journaux ou par des séances d'information dans des lieux publics, sur la base des trois critères suivants : (1) un score d'au moins 19 sur l'échelle de Ratisbonne¹²⁵, cette échelle des plaintes associées aux champs électromagnétiques étant également utilisée pour comparer la symptomatologie fonctionnelle entre les deux groupes, (2) l'attribution de leurs symptômes à des sources de champs électromagnétiques clairement désignées et (3) un âge compris entre 18 et 75 ans. Seul critère d'exclusion, ces participants ne devaient pas avoir d'obstacle (métallique) aux mesures de stimulation magnétique transcrânienne. Sur les 135 personnes se déclarant EHS ayant répondu à l'appel, 101 ont été considérées éligibles et 89 ont rempli le formulaire de consentement. Les témoins (n = 107) ont été recrutés dans le voisinage ou dans l'environnement professionnel, de façon à être appariés sur l'âge ($50,5 \pm 10,9$ ans pour les personnes se déclarant EHS *versus* $49,0 \pm 11,1$ pour les témoins) et le genre (58,5 % de femmes pour les personnes se déclarant EHS *versus* 62,6 % pour les témoins). Indépendamment de l'étude de l'excitabilité corticale par stimulation magnétique transcrânienne, les participants ont rempli plusieurs questionnaires explorant : 1) l'état de santé perçue (sur une échelle de 1 = excellent, à 5 = mauvais), 2) le nombre de jours de maladie, 3) le nombre de visites médicales au cours de l'année écoulée, 4) la qualité du sommeil perçue (estimée à l'aide de l'index de qualité du sommeil de Pittsburgh, *Pittsburgh Sleep Quality Index, PSQI*), le score de plaintes symptomatiques (évalué avec l'échelle de Ratisbonne citée ci-dessus, 5) la tendance à la somatisation (à l'aide de l'*interview* standardisée de détection des troubles somatoformes, SOMS), 6) la présence d'une dépression majeure ou 7) d'un trouble anxieux généralisé (à l'aide de la version allemande de l'*interview* diagnostique internationale composite de l'OMS, CIDI-SF), 8) un questionnaire « maison » de 42 items évaluant leurs stratégies cognitives face à la maladie portant, entre autres, sur la rumination, la tendance à « externaliser » les causes potentielles de sensations corporelles et à « catastrophiser » les symptômes, la défiance à l'égard de la médecine officielle, le maintien de l'estime de soi face au vécu symptomatique, la perception de la vulnérabilité, et l'intolérance aux plaintes corporelles, les réponses ont été codées de 1 (= désaccord) à 4 (= accord fort) et 9) adressé dans un second temps aux 196 personnes ayant participé à la première étude (Landgrebe *et al.*, 2008b), le THI - *Tinnitus Handicap Inventory* permettant d'évaluer la présence et la sévérité des acouphènes (*cf.* Landgrebe *et al.* (2009)).

Les résultats de l'étude ont montré que les personnes se déclarant EHS avaient un état de santé significativement moins bon que les témoins, ainsi :

- elles ont déclaré être en plus mauvaise santé que les témoins ($3,3 \pm 0,8$ *versus* $2,7 \pm 0,8$, $p < 0,001$), avoir eu plus de jours de maladie ($21,7 \pm 44,4$ *versus* $11,9 \pm 37,0$, $p = 0,05$) et plus de visites médicales ($18,6 \pm 16,0$ *versus* $9,4 \pm 10,5$, $p < 0,0001$) au cours de l'année écoulée ;

¹²⁵ Ratisbonne en français ou Regensburg en Allemand.

- leur perception de la qualité du sommeil était moins bonne que celle des témoins avec un score de Pittsburgh de $9,1 \pm 3,1$ *versus* $6,4 \pm 2,1$ ($p < 0,0001$) ;
- leur score de plaintes associées aux champs électromagnétiques sur l'échelle de Ratisbonne était plus élevé que celui des témoins ($47,5 \pm 21,0$ *versus* $15,6 \pm 15,0$, $p < 0,001$), ce qui est attendu en raison des critères de sélection des participants se déclarant EHS ;
- elles avaient une plus grande prévalence de co-morbidité psychiatrique : les pourcentages de dépression majeure (23,6 % *versus* 8,4 %, $p < 0,005$) et d'anxiété généralisée (5,6 % *versus* 0 %, $p < 0,05$) étaient significativement plus élevés que chez les témoins, les troubles somatoformes étaient également plus nombreux ;
- de manière significative, elles avaient une tendance à ressasser et à ne pas tolérer les symptômes, un sentiment de vulnérabilité et de lutte pour maintenir l'estime de soi. elles ont obtenu des scores statistiquement plus élevés que les témoins en ce qui concernait les réponses à des phrases comme, « Je suis différent des autres » ($p < 0,001$), « Je dois prendre soin de moi plus intensément que d'autres » ($p = 0,035$), « Je réfléchis beaucoup à (mon) électrosensibilité » ($p < 0,001$) et « J'évite les charges lourdes pour conserver ma force » ($p = 0,006$).

Les auteurs ont estimé que les stratégies cognitives sont une adaptation à la diminution des capacités de discrimination sensorielle objectivée par la stimulation magnétique transcrânienne (cf. résultats décrits au § 6.2.1.2.1).

Les résultats de l'étude consacrée aux acouphènes (Landgrebe *et al.* 2009), qui n'a porté que sur 69 personnes se déclarant EHS (taux de réponse = 77,5 %) et sur 80 témoins (taux de réponse = 74,8 %) issus de la précédente étude ont été les suivants :

- il n'y a pas eu de différences notables entre les répondants et les non-répondants au questionnaire « acouphènes » et les différences décrites ci-dessus (Landgrebe *et al.*, 2008b) entre personnes se déclarant EHS et témoins n'ont été que très légèrement modifiées ;
- les acouphènes ont été plus fréquents dans le groupe se déclarant EHS (50,72 % *versus* 17,5 %, $p < 0,0001$), alors que leur durée et leur sévérité ne différaient pas entre les deux groupes ;
- une analyse de régression logistique a mis en évidence quatre prédicteurs indépendants d'acouphènes : se déclarer EHS, être de genre masculin, avoir une diminution de la qualité de sommeil perçue au PSQI et avoir une diminution de la capacité de discriminer les stimuli ;
- de même, se déclarer EHS, comme souffrir d'acouphènes, ont été des facteurs de risque indépendants de troubles du sommeil (analyse linéaire de régression avec PSQI - *Pittsburgh Sleep Quality Index* - comme variable dépendante) ;
- l'utilisation du téléphone mobile (pas de dosimétrie, seulement une estimation de l'utilisation par le montant de la dernière facture, ce qui ne tient pas compte des appels entrants), n'était pas associée aux acouphènes ;

Cette étude a globalement été conduite avec rigueur, à l'exception de l'utilisation de l'échelle de Ratisbonne comme critère d'inclusion et comme critère d'évaluation, et de l'absence de dosimétrie.

Elle évoque en outre l'hypothèse d'un mécanisme physiopathologique commun à l'EHS et aux acouphènes, qui pourrait être une suractivation du réseau cortical¹²⁶ de la détresse.

L'étude Qualifex est une étude de cohorte menée en Suisse en 2008-2009 (Röösli *et al.*, 2010 ; Frei *et al.*, 2012). Dans cette étude, 130 personnes au total se sont déclarées EHS en répondant positivement à la question « êtes-vous électrohypersensible ? » soit en 2008, soit en 2009, soit les deux années.

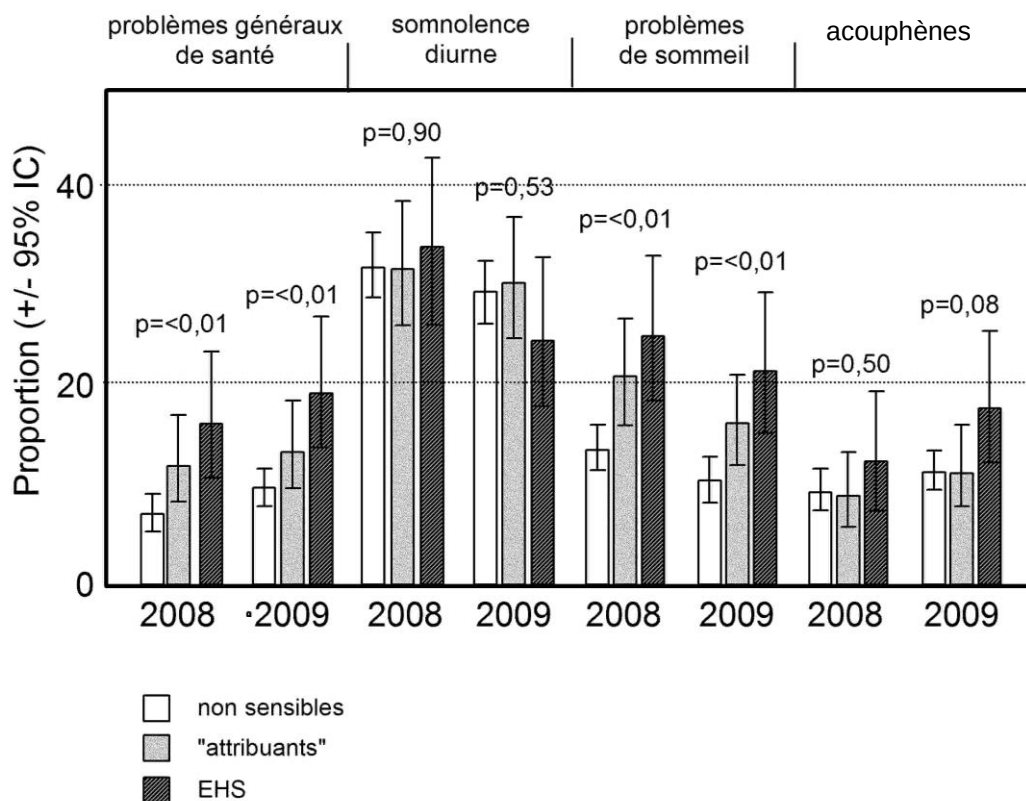
Röösli *et al.* (2010) ont étudié par questionnaires l'apparition de symptômes non spécifiques (céphalées, somnolence diurne, perturbations du sommeil, acouphènes). L'échantillon était constitué de 1 375 adultes recrutés en 2008 par tirage au sort sur les registres de population de la région de Bâle (Suisse), et de nouveau interrogés en 2009 pour 82 % d'entre eux. Parmi les 1 122 personnes suivies, l'échantillon était réparti en trois groupes de participants : des personnes se déclarant EHS (n = 96 en 2008), d'autres pensant avoir des problèmes de santé dus à la pollution électromagnétique quotidienne, mais qui ne se déclaraient pas EHS, qualifiés d'« attributants » (n = 145 en 2008), et des personnes se déclarant « non-sensibles » aux champs électromagnétiques (n = 881 en 2008). Les problèmes de santé généraux ont été déterminés à l'aide du questionnaire *European Health Interview Survey* (EHIS) (il s'agit d'un questionnaire environnement & santé). La liste des plaintes somatiques de von Zerssen a également été utilisée. La sévérité des maux de tête a été évaluée à l'aide du *Headache Impact Test (HIT-6)*. Enfin, la somnolence diurne a été évaluée grâce à l'échelle d'Epworth (ESS) et les perturbations du sommeil grâce au questionnaire *Swiss Health Survey 2007* (Schmitt *et al.* 2000). En champ lointain (antennes-relais), l'exposition des personnes aux radiofréquences a été évaluée par modélisation (exposition moyenne de 0,020 mW/m² pour les antennes et exposition de 0,120 mW/m² pour l'ensemble des sources), et par mesure sur une semaine pour un sous-échantillon de 166 personnes. En champ proche (téléphone mobile et sans fil -DECT-), l'exposition a été évaluée par questionnaire et par les données fournies par les opérateurs durant les 6 mois précédant chaque questionnaire. Les niveaux d'exposition moyens n'ont pas changé significativement entre 2008 et 2009.

- les troubles de santé (score de von Zerssen) (céphalées, endormissements diurnes, acouphènes) étaient plus fréquemment rapportés par les « attributants » et les personnes se déclarant EHS que par les non-EHS et étaient significativement plus sévères chez les personnes se déclarant EHS et les « attributants » que chez les « non-sensibles », mais sans lien avec le niveau d'exposition pour toutes les méthodes d'estimation de l'exposition considérées ;
- les personnes se déclarant EHS avaient plus de maux de tête que les non-EHS (score de 48 pour les EHS et de 45 pour les non-EHS) ;
- la prévalence des troubles du sommeil était significativement plus élevée ($p < 0,01$) chez les personnes se déclarant EHS (25 %) et chez les « attributants » (21 %) que chez les non-EHS (13 %) ;
- il n'y avait pas de différence entre les trois groupes en ce qui concernait la somnolence diurne ;
- l'article confirmait le caractère aspécifique des plaintes et ne mettait pas en évidence de corrélation entre le type de plainte et le niveau d'exposition aux champs électromagnétiques ;

¹²⁶ Sur la base d'études en neuroimagerie chez l'Homme, de nombreux troubles psychologiques ou des pathologies neurologiques et / ou psychiatriques sont associés à une hyperactivité et une réorganisation au sein de réseaux neuronaux, dont certains sont non-spécifiques, c'est-à-dire communs à plusieurs troubles. C'est le cas du réseau cortical de la détresse qui est impliqué dans les acouphènes, les douleurs (neuropathiques, fantôme), les désordres somatoformes, l'anxiété ou encore la dépression. Ce réseau comprend des structures cérébrales appartenant au système limbique, notamment les cortex cingulaire et insulaire antérieurs et l'amygdale (De Ridder *et al.* 2011).

- le groupe de personnes se déclarant EHS comportait plus de femmes et le groupe de personnes qualifiées de « non-sensibles » avait un niveau d'éducation plus élevé que les deux autres groupes.

La fréquence des différents symptômes est représentée sur la Figure 13.



Source : d'après Rööslä et al., 2010.

Figure 13 : fréquence des différents problèmes de santé dans les trois groupes étudiés entre 2008 et 2009

Avec une analyse complémentaire de cette cohorte (utilisant les mêmes données d'exposition), Frei et al. (2012) ont montré :

- l'absence d'association cohérente entre les niveaux initiaux d'exposition estimés, les changements de niveaux d'exposition et le développement de symptômes non spécifiques (score de von Zerssen, maux de tête) ;
- qu'il n'y avait pas d'association entre l'exposition estimée et les acouphènes ;
- qu'il n'y avait pas de différence entre les personnes se déclarant EHS et non-EHS en ce qui concernait les relations entre exposition et symptômes (Frei et al. 2012).

Dans cette étude, les auteurs se sont exclusivement fondés sur une déclaration de perception des acouphènes, en l'absence d'anamnèse orientée, d'échelle spécifique d'évaluation de l'acouphène (THI), d'absence d'examen ORL et d'investigation audiolologique. Il n'y a aucune évaluation de l'anxiété et du profil psychologique des personnes (tests de personnalité), mais les données ont été ajustées sur l'âge, le genre, l'indice de masse corporelle, le stress, l'activité physique, le tabac, la consommation d'alcool, le niveau d'étude, le statut marital, la résidence urbaine ou semi-urbaine, le travail de nuit, les croyances relatives aux effets des champs radiofréquences, l'usage de somnifères, et l'attitude générale envers l'environnement.

Dans une étude cas-témoin réalisée en 2005-2006, Johansson et al. (2010) ont évalué les symptômes, les traits de personnalité et le stress dans deux populations de personnes sensibles, soit aux émissions des téléphones mobiles (groupe MP) (n = 45), soit à d'autres sources de champs électromagnétiques (groupe se déclarant EHS) (n = 71), en comparaison avec un groupe représentatif de la population générale (groupe PB) (n = 106) et un sous-groupe de cet échantillon, appelé groupe témoin (groupe C) (n = 63), dont sont exclus les personnes rapportant des

symptômes attribués aux champs électromagnétiques. Les personnes des groupes MP et EHS ont été recrutés par publicité dans huit journaux suédois. Les témoins, appariés sur l'âge et le genre, ont été recrutés grâce au registre de la population suédoise. Les principaux facteurs de confusion ont été pris en compte (emploi, stress, charge de travail, facteurs psychosociaux, etc.). Des corrections pour analyses multiples ont été réalisées. Les personnes sensibles au téléphone mobile ont été distinguées de celles sensibles aux champs électromagnétiques en général, car, selon les auteurs, les observations et les recherches cliniques suggèrent des différences entre ces deux groupes de populations en matière de prévalence des symptômes, des facteurs psychologiques et donc du pronostic sur la santé. La catégorisation des cas a été faite par les chercheurs : les personnes déclarant des symptômes, au moins une fois par semaine, en relation avec les téléphones mobiles, les écrans vidéo et d'autres appareils fonctionnant à l'électricité sont considérées EHS, celles qui ont des symptômes qu'elles attribuent uniquement au téléphone mobile sont considérées « MP ». Les auteurs ont évalué la fréquence de 13 symptômes (exemple : inconfort, vertiges, difficultés de concentration, fatigue, perte de mémoire, maux de tête, troubles du sommeil, etc.) à l'aide d'un questionnaire inspiré d'études antérieures (Mild *et al.* 1998) permettant notamment d'estimer le pourcentage de participants présentant des troubles du sommeil ou des acouphènes liés ou non à l'exposition aiguë aux champs électromagnétiques. Les auteurs ont recueilli les données démographiques et l'état de santé, et caractérisé la situation professionnelle à l'aide du *Swedish National Labor Market Board classification of occupations*. Enfin, ils ont exploré les caractéristiques psychiques des participants à l'aide d'instruments standardisés : *State-Trait Anxiety Inventory (STAI)*, *Karolinska Scales of Personality (KSP)*, *Beck depression inventory (BDI)*, *subscales of anxiety, depression and somatization of the Symptom checklist-90 (SCL-90)*, *Shirom-Melamed Burnout Questionnaire (SMBQ)*, *general Perceived Stress Questionnaire (PSQ)*. Les résultats sont présentés dans le Tableau 8.

Tableau 8 : pourcentages de participants rapportant différents symptômes (survenant au moins une fois par semaine) parmi des personnes ayant des symptômes qu'elles attribuent au téléphone mobile (groupe MP), se déclarant EHS (groupe EHS), issues de la population générale (groupe PB) et des témoins (groupe C)

	Symptômes non attribués aux champs EM				Symptômes attribués aux champs EM			
	MP (n = 45)	EHS (n = 71)	PB (n = 106)	C (n = 63)	MP (n = 45)	EHS (n = 71)	PB (n = 106)	C (n = 63)
Vertiges	18 ¹	42 ^{1,3,5}	13	11	27 ^{1,4}	75 ^{1,3,5}	7	0
Inconfort général	29 ¹	77 ^{1,3,5}	11	10	73 ^{2,4}	92 ^{3,5}	9	0
Difficultés de concentration	36	68 ^{3,5}	18	13	42 ^{1,2,4}	81 ^{1,3,5}	10	0
Pertes de mémoire	31	49 ^{3,5}	12	10	22 ^{1,4}	61 ^{1,3,5}	3	0
Fatigue	33 ¹	75 ^{1,3,5}	27	21	38 ^{2,4}	80 ^{3,5}	11	0
Maux de tête	22	51 ^{3,5}	21	16	58 ^{2,4}	73 ^{3,5}	19	0
Sensation de chaleur derrière / autour de l'oreille	47 ^{2,4}	41 ^{3,5}	4	0	84 ^{2,4}	66 ^{3,5}	12	0
Sensation de chaleur sur l'oreille	42 ^{2,4}	39 ^{3,5}	5	0	80 ^{2,4}	67 ^{3,5}	19	0
Sensation de brûlure sur la peau	36 ²	62 ^{3,5}	12	6	64 ^{2,4}	90 ^{3,5}	20	0
Picotements / démangeaisons	18 ¹	54 ^{3,5}	3	2	51 ^{2,4}	79 ^{3,5}	4	0
Troubles du sommeil	33 ¹	73 ^{1,3,5}	30	21	20 ^{1,4}	65 ^{1,3,5}	4	0
Acouphènes	24	41 ^{3,5}	11	11	20 ⁴	49 ^{3,5}	2	0
Engourdissements	13	34 ^{3,5}	10	9	22 ^{1,2,4}	59 ^{1,3,5}	2	0
Nombre moyen de symptômes	4,0 ^{1,2,4} (3,3)	7,4 ^{1,3,5} (3,6)	1,8 (2,4)	1,3 (2,0)	6,3 ^{1,2,4} (3,0)	9,7 ^{1,3,5} (3,3)	1,2 (2,1)	0 (0)

Différences significatives : (1) MP/EHS; (2) MP/PB; (3) EHS/PB; (4) MP/C; (5) EHS/C (ajustement de Bonferroni pour tests multiples).

Source : d'après Johansson *et al.* (2010)

- concernant le sommeil, dans le groupe MP, 33 % des participants ont rapporté des troubles qu'ils considéraient non liés à l'exposition aux champs électromagnétiques et 20 % liés à l'exposition. Les résultats n'étaient pas significativement différents de ceux des groupes témoins (PB et C) en ce qui concernait les troubles non liés aux champs électromagnétiques ;
- dans le groupe de personnes se déclarant EHS, 73 % des participants ont rapporté des troubles du sommeil qu'ils considéraient non liés à l'exposition aux champs

électromagnétiques et 65 % liés à l'exposition. Ces résultats étaient significativement différents de ceux des trois autres groupes (MP, PB, C) ;

- pour chaque symptôme (fatigue, perte de mémoire, maux de tête, sensation de chaleur autour, derrière ou sur l'oreille, sensation de brûlure sur la peau, acouphènes, difficultés de concentration, etc.), le nombre de personnes se déclarant EHS présentant un symptôme était à chaque fois supérieur au nombre de personnes du groupe MP présentant le même symptôme ;
- le symptôme le plus fréquent était un inconfort général : 77 % des personnes se déclarant EHS signalaient un inconfort général non lié à l'exposition aux champs électromagnétiques et 92 % en déclaraient un lié à celle-ci. Dans le groupe témoin, 10 % déclaraient un inconfort non lié à l'exposition aux champs électromagnétiques et 0 % un inconfort lié à l'exposition ;
- la fatigue, les troubles du sommeil et les difficultés de concentration étaient également fréquents chez les personnes se déclarant EHS. Ces symptômes pourraient être associés ;
- les picotements et les maux de tête concernaient également plus d'une personne se déclarant EHS sur deux ;
- les groupes MP et EHS pris globalement avaient des scores statistiquement plus élevés à la plupart des tests de personnalité, de dépression et de stress que ceux des groupes de référence, qu'il s'agisse du groupe PB ou du groupe C. Ceci concernait le score global et toutes les sous-échelles du SMBQ, les sous-échelles « tension musculaire », « psychasthénie¹²⁷ » et « anxiété somatique » de la KSP, l'inventaire de dépression du BDI, et toutes les sous-échelles de la SCL-90 ;
- les résultats concernant l'anxiété n'étaient pas homogènes. Il n'y avait pas d'anxiété « état » (au STAI) (voir définition de l'anxiété « trait », constitutionnelle, ou « état », à l'instant présent, dans la présentation du test STAI en Annexe 13) ni d'anxiété psychique (au KSP), aussi bien chez les personnes se déclarant EHS que chez celles sensibles au téléphone mobile (MP), par rapport aux deux groupes témoins (PB et C). En revanche, les scores d'anxiété « trait » (au STAI), d'anxiété somatique (au KSP) et d'anxiété (à la sous-échelle du SCL-90) étaient significativement plus élevés dans le groupe se déclarant EHS que dans les groupes témoins ;
- il n'y avait pas de différence entre les groupes MP et se déclarant EHS, sauf pour la sous-échelle « somatisation » de la SCL-90 ($p = 0,028$) et la sous-échelle « apathie » de la SMBQ ($p = 0,043$). Toutefois, presque tous les scores du groupe se déclarant EHS ont été supérieurs à ceux du groupe MP et leurs différences avec les groupes PB et C ont été bien plus fréquemment significatives (14 fois sur 17) que les différences du groupe MP avec ces mêmes groupes PB et C (6 fois sur 17) ;
- les personnes sensibles aux champs électromagnétiques exprimaient davantage de neurasthénie¹²⁸ (avec maux de tête, fatigue, vertiges, troubles du sommeil, troubles cognitifs, etc.), un niveau plus élevé de réactivité au stress, ainsi qu'un score plus élevé de stress perçu, d'anxiété et de dépression que les autres participants ;
- en comparaison avec les groupes témoins :

¹²⁷ Psychasthénie : névrose liée à une baisse de la tension psychologique, caractérisée par des troubles psychiques (absence d'attention, impuissance à agir, manque de résolution, doute permanent, perte progressive du sens du réel), accompagnés généralement de troubles physiques (angoisse, manque d'appétit, insomnie, céphalées et algies diverses), se traduisant par des difficultés et une appréhension à agir.

¹²⁸ À noter que le terme de neurasthénie dans la littérature scientifique internationale s'apparente à la fibromyalgie dans sa description clinique, elle peut s'accompagner souvent d'éléments dépressifs.

- les personnes sensibles aux téléphones mobiles montraient davantage de souffrances dépressives, et de syndrome d'épuisement, mais pas davantage de souffrance anxieuse ou liée au stress ni de somatisation ;
- les personnes se déclarant sensibles aux champs électromagnétiques exprimaient un niveau plus élevé de tous les indices psychologiques (dépression, anxiété, somatisation), à l'exception du niveau de stress.

Cette étude ambitieuse s'est intéressée à un élément important de la diversité des troubles associés aux groupes de personnes se déclarant EHS ou MP : l'aspect psychosocial. Cependant, la multiplicité des auto-questionnaires et le type de recrutement des patients favorisent un biais de suggestibilité de l'hypersensibilité.

Le groupe MP rapportait des plaintes somatosensorielles locales, alors que les personnes se déclarant EHS décrivaient des plaintes somatiques aspécifiques et plus générales. Ces dernières étaient plus souvent stressées, anxieuses, déprimées et « à bout », ce qui n'est pas le cas chez les personnes MP (généralement plus jeunes, masculins et professionnellement actifs).

Les personnes du groupe « EHS » décrivaient une diminution de leur qualité de vie due aux symptômes qu'ils attribuaient à leur exposition aux radiofréquences et présentaient un pronostic d'évolution moins favorable que les patients MP.

Van Dongen *et al.* (2014) ont conduit une étude épidémiologique aux Pays-Bas. Ils ont comparé trois groupes de personnes âgées de 18 à 82 ans. Les deux premiers groupes sont issus d'un panel en ligne de consommateurs représentatifs de la population générale néerlandaise. Les 1 009 participants (taux de réponse = 60 %) ont été recrutés par internet et rémunérés pour leur participation. Une seule question distingue les deux groupes, à savoir : pensez-vous être sensibles aux champs électromagnétiques ? Ainsi, le premier groupe est constitué de personnes qui se déclaraient non sensibles aux champs électromagnétiques ($n = 937$, soit 93 % de l'échantillon, groupe NS) et le deuxième de personnes qui se déclaraient sensibles aux champs électromagnétiques ($n = 72$, soit 7 % de l'échantillon, groupe GP). Le troisième groupe a été recruté au sein d'associations (ONG). Il s'agissait de participants qui rapportaient des symptômes dus aux champs électromagnétiques, à la pollution et aux odeurs chimiques notamment, depuis au moins 5 ans. Dans ce groupe, 42 % des 278 participants ont répondu aux questionnaires ($n = 116$, groupe SA). Toutes les personnes ont été caractérisées en utilisant plusieurs questionnaires pour mesurer l'optimisme (*Life Orientation Test-Revisited* (LOT-R) (décrit en Annexe 13), le névrotisme (ou tendance persistante à l'expérience des émotions négatives) (les « *neuroticism Items* » du *NEO-Five Factors Inventory* (NEO-FFI) et leurs symptômes (*The Four-Dimensional Symptom Questionnaire* (4DSQ¹²⁹)).

- le groupe symptomatique recruté *via* des associations (groupe ONG) était différent des deux autres par sa composition : les pourcentages de femmes, de personnes au chômage, plus âgées et avec un niveau d'études supérieur y étaient plus élevés que dans ceux issus de la population générale ;
- le groupe de la population générale sans sensibilité déclarée aux champs électromagnétiques (groupe NS) était significativement moins préoccupé par rapport à la santé que les autres groupes sensibles aux champs électromagnétiques ;
- en ce qui concerne les symptômes (*cf.* Figure 14) :
 - les trois groupes différaient significativement les uns des autres pour ce qui est du nombre moyen de symptômes ($11,1 \pm 4,3$ pour le groupe ONG, $8,5 \pm 4,7$ pour le

¹²⁹ Le 4DSQ est un autoquestionnaire qui mesure le stress, l'anxiété, la dépression et la somatisation. Il comprend une liste de 16 symptômes physiques vécus communément. Les auteurs ont ici rajouté la fatigue, parce qu'elle était souvent mentionnée par les personnes. Un item sur l'existence d'un goût métallique dans la bouche (*Metal taste in mouth*) a également été rajouté, car cette sensibilité a été rapportée par plusieurs participants.

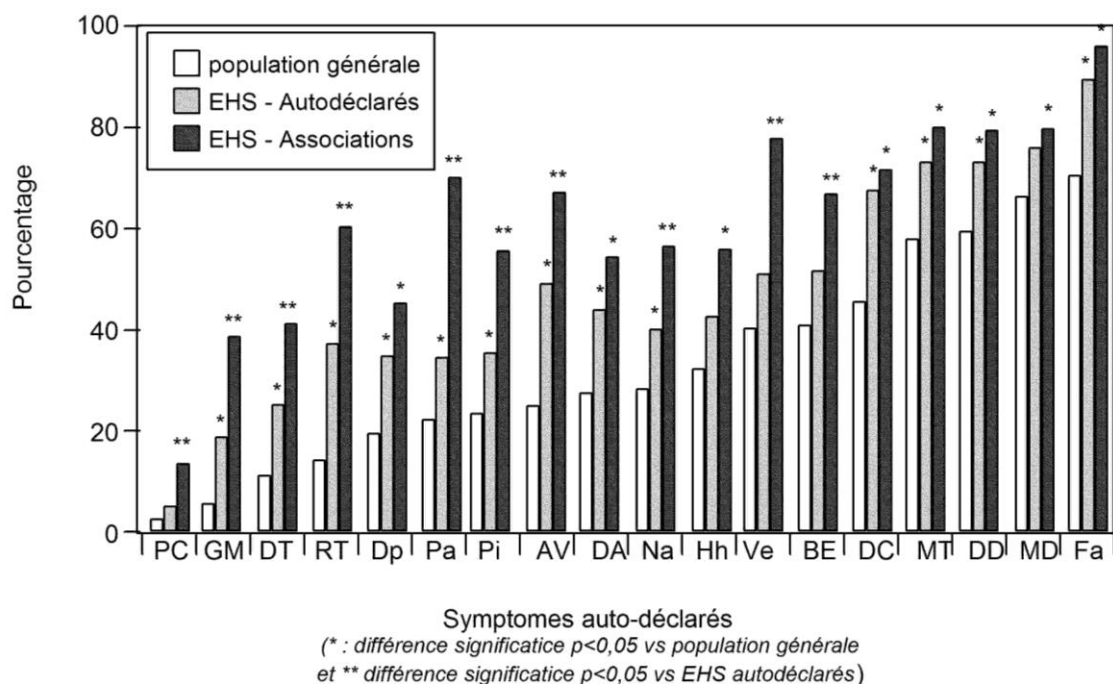
groupe GP et pour le groupe NS, $p < 0,001$), de leur intensité maximale ($40,0 \pm 12,1$ pour le groupe ONG, $34,2 \pm 11,9$ pour le groupe GP et $27,2 \pm 8,2$ pour le groupe NS, $p < 0,001$) et de leur intensité moyenne ($2,0 \pm 0,6$ pour le groupe ONG, $1,7 \pm 0,6$ pour le groupe GP et $1,4 \pm 0,5$ pour le groupe NS, $p < 0,001$) (cf. Tableau 9).

- au 4DSQ, le pourcentage de personnes du groupe ONG mentionnant avoir ressenti l'un des symptômes était significativement plus élevé que celui des personnes du groupe NS pour tous les 18 symptômes ($p < 0,05$). Ce pourcentage était significativement plus élevé que celui des personnes du groupe GP pour 10 de ces symptômes ($p < 0,05$).

Tableau 9 : nombre moyen et intensité des symptômes ressentis par les différents groupes (sensibles aux champs électromagnétiques recrutés via des associations, recrutés en population générale et sensibles ou non aux champs électromagnétiques)

	Groupe « sensibles recrutés via des associations » (ONG)	Population générale	
		Groupe « sensibles » (GP)	Groupe « non sensibles » (NS)
Nombre moyen de symptômes	$11,1 \pm 4,3$ (*)	$8,5 \pm 4,7$	$6,0 \pm 4,0$
Intensité maximale des symptômes	$40,0 \pm 12,1$	$34,2 \pm 11,9$	$27,2 \pm 8,2$
Intensité moyenne des symptômes	$2,0 \pm 0,6$ (*)	$1,7 \pm 0,6$	$1,4 \pm 0,5$

(*) différence significative par rapport aux groupe GP et NS.



Légende : PC : perte de conscience, GM : goût métallique dans la bouche, DT : douleur thoracique, RT : raideur thoracique, Dp : dyspnée, Pa : palpitation, Pi : picotement dans les doigts, AV : altération visuelle, DA : douleur abdominale, Na : nausée, Hh : hyperhidrose, Ve : vertige – éblouissement, BE : ballonnement de l'estomac, DC : douleur au cou, MT : maux de tête, DD : douleur dorsale, MD : muscle douloureux, Fa : fatigue.

Source : d'après Van Dongen et al., 2014

Figure 14 : pourcentages de symptômes auto-déclarés parmi les participants de la population générale (NS), les personnes se déclarant EHS (GP) recrutées en population générale, et celles recrutées via des associations (ONG)

- le groupe GP avait un score moyen d'optimisme plus faible que le groupe non sensible, mais la différence n'était pas significative ; le groupe ONG avait des scores d'optimisme significativement plus élevés que les deux autres groupes ;
- en ce qui concerne le névrotisme, le groupe GP avait un score significativement plus élevé que le groupe non sensible (NS) ; à nouveau le groupe ONG était différent, puisqu'il avait significativement le score le plus bas de névrotisme.
- le groupe de personnes sensibles recrutées via des associations (groupe ONG) différait également sur l'attribution causale des symptômes. En effet, ils les attribuaient plus volontiers à des causes environnementales (champs électromagnétiques, pollution de l'air ou virus) qu'à d'autres causes possibles (mauvaise hygiène de vie, déterminants psychologiques ou hérédité par exemple). Cinquante-six pourcents des participants de ce groupe croyaient possible que les champs électromagnétiques puissent être la cause de leur symptôme le plus grave, tandis que seulement 6 % dans le groupe sensible en population générale (groupe GP) et 1 % dans le groupe non sensible (groupe NS) pensaient la même chose ;
- il existait pour les trois groupes une corrélation positive entre l'attribution causale des troubles dus aux champs électromagnétiques et l'intensité des symptômes physiques non spécifiques, la corrélation la plus forte était retrouvée dans le groupe recruté via des associations.

Sur la base de ces résultats, les auteurs ont conclu que l'attribution causale des troubles aux champs électromagnétiques pourrait être un facteur prédictif de la survenue de symptômes physiques intenses. Ils ont ensuite suggéré que, si on changeait le lien établi entre les champs

électromagnétiques et les problèmes physiques, cela pourrait contribuer à une meilleure qualité de la santé perçue.

Le fait que les personnes du groupe « EHS » recrutées par une association (groupe ONG) présentaient des troubles plus sévères que celles qui étaient recrutées en population générale permet de proposer deux hypothèses distinctes :

- 1) la première est relative aux raisons des personnes se déclarant EHS d'adhérer à une association : l'une d'entre elles pourrait être que la sévérité plus grande des symptômes ressentis inciterait les personnes à se regrouper dans une association pour y chercher une aide qu'elles ne trouveraient pas ailleurs, dans le milieu médical et / ou dans leur entourage ;
- 2) la seconde est relative aux conséquences possibles de l'adhésion : le fait d'adhérer à une association pourrait entraîner, d'une part, une focalisation plus grande sur les symptômes qui en augmenterait la perception et, d'autre part, un renforcement de la méfiance à l'égard du corps médical, qui rendrait, comme cela a été souligné lors d'audition de médecins [cf. Audition du Pr Cathébras par exemple], la prise en charge des patients membres d'une association plus difficile et moins efficace.

Lamech *et al.* (2014) ont étudié les plaintes suite à l'installation de compteurs communicants en Australie, dans la région de Victoria. Parmi les 92 plaignants, 8 % se sont déclarés EHS. Il n'y a pas eu de mesure des expositions aux radiofréquences. Les fréquences des symptômes sont indiquées pour l'ensemble de la population d'étude (sans préciser les résultats pour les personnes se déclarant EHS) :

- 48 % des participants déclaraient des insomnies ;
- 45 % des maux de tête ;
- 33 % des acouphènes ;
- 32 % de la fatigue ;
- 30 % une incapacité à se concentrer (Lamech 2014).

Ce questionnaire est un état des lieux ne permettant pas de faire un lien entre les symptômes déclarés par la population et des expositions environnementales, ni de faire un lien direct avec l'installation des compteurs (pas de questionnaire avant l'installation).

En 2006, Baliatsas *et al.* (2014b) ont réalisé aux Pays-Bas l'étude transversale EMPHASIS auprès d'adultes tirés au sort à partir du registre de la population néerlandaise (taux de participation = 46 %, 5 933 répondants). Le nombre et la durée des symptômes non spécifiques ont été recueillis au moyen de questionnaires envoyés aux participants à l'étude. Les indications apportées par les médecins de famille ont également été prises en compte. Parmi les participants, 202 se sont déclarés EHS (3,5 %, âge moyen = 58,5 ans), 514 (8,9 %) se sont déclarés sensibles à l'environnement (groupe GES, 56,5 ans) et 5 073 (87,6 %) non sensibles (groupe NS, 51,0 ans) (et 144 n'ont pas complété entièrement les questionnaires). Les auteurs se sont intéressés à la fréquence des plaintes pour des symptômes non spécifiques enregistrés par le médecin généraliste au cours des 12 derniers mois :

- les symptômes les plus fréquemment rapportés par les personnes se déclarant EHS étaient : la fatigue (62,2 %, contre 52,4 % chez les non-EHS et 68,5 % chez les sensibles), les douleurs aux épaules et au cou (47,2 %, contre 37,0 % chez les non-EHS et 54,3 % chez les sensibles), les troubles du sommeil (44,4 %, contre 25,6 % chez les non-EHS et 42,7 % chez les sensibles), les maux de tête (43,6 %, contre à 36,8 % chez les non-EHS et 51,0 % chez les sensibles), les douleurs au dos (42,7 %, à comparer à 34,9 % chez les non-EHS et 49,2 % chez les sensibles), aux jambes, hanches, genoux, ou pieds (42,4 %, contre à 31,6 % chez les non-EHS et 46,3 % chez les sensibles) et les douleurs musculaires (38,5 %, contre 30,3 % chez les non-EHS et 41,2 % chez les sensibles) ;

Toutes les différences entre non-EHS et EHS et entre non-EHS et sensibles étaient significatives, après ajustement sur l'âge, le genre, le niveau d'éducation, l'origine ethnique,

la présence de comorbidités médicales et psychiatriques sauf pour les maux de dos, et les douleurs aux jambes, hanches, genoux, ou pieds. Aucune différence entre les sensibles et les personnes se déclarant EHS n'était significative ;

- plus du tiers des personnes se déclarant EHS ont rapporté des vertiges (36,5%, contre 19,4 % chez les non-EHS et 37,4 % chez les sensibles), des problèmes de concentration et de mémoire (35,0 %, contre 19,8 % chez les non-EHS et 36,2 % chez les sensibles) et / ou des symptômes cutanés (35,6 %, contre 21,8 % chez les non-EHS et 38,2 % chez les sensibles) ;

Toutes les différences entre non-EHS et EHS et entre non-EHS et sensibles étaient significatives ; aucune différence entre les sensibles et les personnes se déclarant EHS n'était significative ;

- les autres symptômes (toux, problèmes de poids, nausées, etc.) étaient moins fréquents chez les EHS.

La persistance des symptômes sur une durée de quatre mois ou plus a également été analysée. Les résultats concernant les personnes du groupe « EHS » étaient les suivants :

- la fatigue était le symptôme le plus fréquemment persistant pour 34,6 % des personnes se déclarant EHS (contre 23,3 % chez les non-EHS et 42,5 % chez les sensibles, différences significatives entre personnes se déclarant EHS et non-EHS et entre sensibles et non-EHS, la comparaison sensibles *versus* personnes se déclarant EHS n'était pas significative) ;
- les troubles du sommeil, les maux de dos, les symptômes de douleurs au cou ou aux épaules, aux jambes, hanches, genoux, ou pieds, et les problèmes de mémoire ou de concentration persistaient chez 20 à 28 % des personnes se déclarant EHS (contre 11 à 19 % chez les non-EHS et 25 à 34% chez les sensibles) ;
- les symptômes cutanés, les vertiges, les douleurs musculaires, les maux de tête et les symptômes de douleurs aux bras, aux coudes, aux mains et aux poignets persistaient chez 16 à 20 % des participants du groupe « EHS » (à comparer à 7 à 19 % chez les non-EHS et 18 à 26 % chez les sensibles) (Baliatsas et al. 2014a).

Dans une étude complémentaire du projet EMPHASIS, les mêmes auteurs (Baliatsas *et al.* 2015a) ont étudié la relation entre les champs électromagnétiques (extrêmement basses fréquences et radiofréquences) et les troubles somatiques décrits par les personnes. L'exposition aux champs électromagnétiques a été caractérisée de manière systématique au moyen de diverses sources de données. L'exposition due aux installations de téléphonie mobile, de radiodiffusion et de télévision a été modélisée. La distance par rapport à la ligne à haute tension la plus proche a été calculée à l'aide de systèmes d'informations géographiques (SIG). Les expositions domestiques dues aux téléphones sans fil de type DECT et celles dues aux téléphones mobiles d'autres personnes ont été estimées grâce à un modèle qui a été calibré à partir des mesures personnelles effectuées chez la population d'une autre étude (Kelfkens *et al.* 2012). L'utilisation d'appareils électriques ou l'exposition due à ceux-ci (exemple : radioréveils sur la table de nuit, chargeurs, couvertures chauffantes ou cuisinière à induction) a été identifiée au moyen d'un questionnaire. Les personnes interrogées ont également dû estimer leur exposition globale aux champs électromagnétiques au domicile, au travail et à l'extérieur, sur une échelle de 0 (« pas du tout ») à 10 (« beaucoup »). Lors de l'analyse des données, un certain nombre de facteurs pertinents de confusion ont été pris en compte (âge, genre, éducation, consommation de tabac et d'alcool). Les résultats de l'étude ont été les suivants :

- aucune des expositions modélisées à des radiofréquences n'a permis de mettre en évidence une relation avec le nombre et la durée des troubles décrits ;
- des associations entre symptômes physiques non spécifiques et l'exposition rapportée à des appareils électriques ont été observées chez des personnes ayant un chargeur situé à proximité (≤ 50 cm) de l'oreiller et chez des personnes utilisant des couvertures chauffantes. Dans les deux cas, la qualité du sommeil n'a toutefois pas été perturbée ;

- les personnes vivant à moins de 200 mètres d'une ligne à haute tension ne présentaient pas plus de symptômes que les autres participants ;
- l'exposition estimée par la personne elle-même en ce qui concernait les champs électromagnétiques globaux était associée à davantage de symptômes auto-rapportés et diagnostiqués par les médecins de famille, une durée plus longue des troubles et une réduction de la qualité du sommeil.

Il s'agit d'une des études les plus importantes sur la relation entre champs électromagnétiques et symptômes rapportés par les patients. L'estimation de l'exposition a été réalisée de manière soignée. Il est peu vraisemblable que les modélisations des expositions aux stations de base de téléphonie mobile et aux émetteurs de radio aient conduit à des erreurs systématiques, alors que cela ne peut pas être exclu en ce qui concerne les indications personnelles rapportées par les participants (biais de réminiscence) : il est possible, par exemple, que les personnes présentant davantage de symptômes indiquent également une utilisation accrue d'appareils. Le point faible des modèles d'exposition est leur imprécision et les faibles différences d'exposition. Ces dernières ont d'autant plus d'importance que l'exposition due à l'utilisation de son propre téléphone mobile et de son téléphone sans fil n'a pas été prise en compte dans l'étude. Un autre point faible réside dans le fait qu'il s'agit d'une étude transversale n'apportant pas de données chronologiques. On ne sait donc pas si les symptômes sont dus à l'exposition ou s'ils l'ont précédée. Il se pourrait, par exemple, que les personnes présentant des troubles utilisent plus fréquemment une couverture chauffante, les troubles n'étant donc pas une conséquence de l'utilisation de la couverture. L'étude de Baliatsas *et al.* (2015a) confirme toutefois les résultats d'autres études selon lesquelles les personnes qui s'estiment particulièrement exposées à des champs électromagnétiques déclarent en général davantage de symptômes.

6.1.1.3 Conclusion sur la prévalence des symptômes ressentis par les personnes se déclarant EHS

Au total, une quinzaine d'études descriptives ont été analysées, que ce soit des études incluant uniquement des personnes se déclarant EHS (Hocking, 1998 ; Schreier *et al.*, 2006 ; Korpinen *et al.*, 2009b ; Kato *et al.*, 2012 ; Hagström *et al.*, 2013, Lambrozo *et al.*, 2013 et Dieudonné, 2016) ou réalisées en population générale (Röösli *et al.*, 2004 ; Schröttner et Leitgeb, 2008 ; Landgrebe *et al.*, 2008b et 2009 ; Röösli *et al.*, 2010 ; Frei *et al.*, 2012 ; Johansson *et al.*, 2010 ; Van Dongen *et al.*, 2014 ; Baliatsas *et al.*, 2014 et 2015a).

Hétérogénéité des études descriptives

Les résultats de ces études s'intéressant aux symptômes décrits par les personnes se déclarant EHS varient d'une étude à l'autre et sont difficilement comparables. De même, la fréquence d'un même symptôme subjectif est très variable selon les études. Ces différences pourraient s'expliquer par des différences dans le recrutement des personnes interrogées, ainsi que par les questionnaires utilisés pour recenser les symptômes (il s'agit généralement d'une liste plus ou moins longue de symptômes). L'intensité et la fréquence des troubles sont rarement analysées et, quand elles le sont, les échelles utilisées ne comportent pas les mêmes niveaux. Enfin, les caractéristiques fines de chaque symptôme n'ont jamais été décrites en détail à l'aide de questionnaires spécifiques, tel que celui de Pittsburgh pour le sommeil.

Cohérence dans les symptômes déclarés

Néanmoins, on retrouve dans ces études une certaine cohérence dans l'ordre de la fréquence des symptômes déclarés. La fatigue et les troubles du sommeil sont les symptômes les plus fréquemment décrits dans la plupart des études (cités quatre fois chacun comme étant le premier symptôme le plus rapporté dans les publications où il a été étudié, cf. Tableau 10). De même, les maux de tête, les douleurs dans d'autres parties du corps et un inconfort général sont des symptômes fréquemment rapportés par les personnes se déclarant EHS. Les difficultés de concentration, le stress, les vertiges sont étudiés moins systématiquement, et sont moins souvent rapportés par les personnes se déclarant EHS (cf. Tableau 10).

En conclusion, ces études permettent d'établir que les personnes se déclarant EHS ressentent un grand nombre de symptômes différents. De plus, les études avec groupes témoins permettent d'observer que la prévalence des symptômes subjectifs étudiés est supérieure chez les personnes se déclarant EHS par rapport aux témoins et ce, quels que soient les symptômes. Ces différences portent notamment sur les troubles du sommeil, les céphalées, l'anxiété, le stress et les acouphènes.

Toutefois, en l'absence de mesure ou d'évaluation des expositions et de chronologie claire entre l'estimation de l'exposition et la survenue des symptômes, les études descriptives ne permettent pas d'associer les symptômes des personnes se déclarant EHS à leur exposition aux champs électromagnétiques. La seule étude épidémiologique ayant réalisé une estimation de l'exposition environnementale aux champs électromagnétiques est celle de Baliatsas *et al.* (2015a), mais elle n'a pas mis en évidence de relation entre les expositions aux champs électromagnétiques modélisées et le nombre ou la durée des troubles rapportés.

Perspectives

Une étude française sur la question de l'association entre des troubles ressentis à proximité de stations de téléphonie mobile et l'exposition aux radiofréquences s'inspirant des protocoles de Hutter *et al.* et celui de Heinrich *et al.* est en cours (financée par l'Anses) (Hutter *et al.* 2006, Heinrich *et al.* 2007). Ses résultats, attendus pour 2018, devraient permettre d'apporter un certain nombre d'informations quant aux effets perçus des champs électromagnétiques chez les riverains d'antennes-relais.

Tableau 10 : fréquence (en %) des symptômes rapportés par les personnes se déclarant EHS

Référence de l'étude	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
Pays de l'étude	Suède	Suisse	Suisse	Autriche	Finlande	Suisse	Suède	Japon	Finlande	Pays- Bas	Pays-Bas	France
Nb. de personnes se déclarant ou considérées EHS	50	394	107	16	33	2008 : 96 2009 : 86	71	75	194	72	202	40
Nb. de personnes total	-	13 004	2 048	-	-	1 122	177	-	-	1 009	5 789	-
% de personnes se déclarant sensibles	/	3,0	5,2	/	/	2008 : 8,6 2009 : 7,7	/	/	/	7,1	3,5	/
Troubles du sommeil		58	42,7	+	73	25	65 (4)	76	59,3	-	44	70
Fatigue	32	18	-		79	-	80 (11)	85	57,2	90	62	50
Maux de tête	22	41	33,8		-	-	73 (19)	81	57,7	72	44	62,5
Migraine			-	+	-	-	-	-	43,8	-	-	-
Engourdissement (tête)			-		-	-	59 (2)	-	-	50	-	-
Troubles de la mémoire			-		-	-	61 (3)	-	54,6	-	35	-
Difficultés concentration	12	16	10,4		-	-	81 (10)	81	56,7	-	35	42,5
Palpitations	26	11	-		-	-	-	-	52,6	35	26	-
Douleurs ostéo-musc.		18	5,6		-	-	-	-	58,2	75	39	62,5
Raideur (nuque, dos)		-	-		-	-	-	56	48,5	74	43	-
Troubles respiratoires		4	5,0		-	-	-	-	-	38	16	-
Troubles de l'équilibre / vertiges		11	4,8		-	-	75 (7)	64	54,6	-	37	-
Acouphènes		14	-	+	-	12	49 (2)	-	-	-	-	-
Troubles de l'audition		2	-		-	-	-	-	?	-	21	-
Troubles de la vision		6	-		-	-	-	-	54,1	50	24	-
Morose, léthargique		5	-		-	-	-	73	-	-	-	-
Anxiété		2	-		52	-	-	55	52,6	-	-	-
Nervosité		19	8,6	+	-	-	-	-	-	-	-	-
Irritation		-	-		-	-	-	56	-	-	-	-
Agitation		-	-		-	-	-	-	-	-	-	-
Spasmes intestinaux		4	-		-	-	-	-	-	40	30	-
Jambes sans repos		-	-		-	-	-	-	-	-	-	-
Signes cutanés génér.		6	-		-	-	79 (4)	-	54,6	-	36	-
Signes cutanés face	62	-	-		-	-	-	-	-	-	-	-
Brûlures de la peau		-	-		-	-	90 (20)	-	55,2	-	-	-
Sensat. de chaleur - oreille		-	-		-	-	66 (12)	-	53,1	-	-	-
Autres		4 (nausées) 4 (tremblements)	35,9 (autres symptômes non spécif. ex : douleur de l'oreille, agressivité, dépression)		-	15 (inconfort général)	-	-	60,3 (stress) 53,1 (malaise général)	-	20 (douleur au niveau de la poitrine ou du cœur)	-

(1) Stenberg *et al.*, 2002 ; (2) Rössli *et al.*, 2004 ; (3) Schreier *et al.*, 2006 ; (4) Schröttner et Leitgeb, 2008 ; (5) Korpinen *et al.*, 2009b ; (6) Rössli *et al.*, 2010 et Frei *et al.*, 2012 ; (7) Johansson *et al.*, 2010 ; (8) Kato *et al.*, 2012 ; (9) Hagström *et al.*, 2013 ; (10) Van Dongen *et al.*, 2014 ; (11) Baliatsas *et al.*, 2014 ; (12) Dieudonné (2016).

Légende : les valeurs en **gras** sont celles correspondant au symptôme le plus cité de l'étude et celles en *(italique)* sont celles correspondant à la population générale.

6.1.2 Études descriptives sur les caractéristiques psychiques des personnes se déclarant EHS

Les articles, avec ou sans groupe témoin, sont présentés ci-après dans l'ordre chronologique. Les instruments ou tests psychométriques utilisés dans ces articles sont décrits en Annexe 13.

La première étude de Bergdahl (Bergdahl 1995) est présentée par l'auteur comme une étude exploratoire ayant pour but de décrire les caractéristiques psychologiques de personnes attribuant leurs symptômes à une exposition soit à l'électricité (groupe EG), soit à des écrans cathodiques (groupe VG) et de déterminer l'existence de différences psychologiques entre ces deux groupes. Dix personnes du groupe EG, 10 du groupe VG et 20 témoins appariés selon le genre et l'âge (groupe CG) ont été inclus dans l'étude. La comparaison a été faite sur la base des échelles de personnalité du Karolinska (KSP), et de trois autres échelles destinées à couvrir les aspects psychosociaux non couverts par les échelles du Karolinska et spécialement développées par les auteurs pour cette étude et d'autres. Il s'agit de trois échelles, dont une de personnalité¹³⁰ (PS), dérivée du questionnaire de personnalité d'Eysenck et de l'échelle de personnalité de Cesarek-Marke, une de fonctionnement psychique¹³¹ (PFS) et une de qualité de vie¹³² (QLS). Les témoins ont été comparés aux personnes des groupes EG et VG, d'abord dans leur ensemble, puis séparément. Il n'y a pas eu de comparaison directe entre les données des personnes du groupe EG avec celles des personnes du groupe VG. Les principaux résultats ont été les suivants :

- les 20 personnes des groupes EG et VG considérés dans leur ensemble ont obtenu des scores significativement plus élevés que ceux des 20 témoins à trois échelles des KSP, « tension musculaire » ($18,7 \pm 4,6$ versus $13,1 \pm 3,1$, $p < 0,001$), « anxiété somatique » ($18,0 \pm 4,3$ versus $12,8 \pm 2,2$, $p < 0,001$) et « psychasthénie¹³³ » ($22,1 \pm 4,3$ versus $18,0 \pm 4,1$, $p < 0,01$), ainsi qu'à 4 échelles du PFS, « difficulté de concentration » ($7,1 \pm 4,1$ versus $3,5 \pm 2,0$, $p < 0,001$), « difficile de s'imaginer sans aucune anxiété » ($7,0 \pm 3,9$ versus $4,3 \pm 2,4$, $p < 0,05$), « avoir un mauvais appétit » ($4,1 \pm 2,2$ versus $2,8 \pm 1,3$, $p < 0,05$) et « difficulté à bien dormir » ($5,0 \pm 4,1$ versus $3,2 \pm 1,7$, $p < 0,05$). Elles étaient aussi moins satisfaites de leur travail que les témoins ($5,8 \pm 3,3$ versus $3,6 \pm 3,0$, $p < 0,05$) à la QLS ;
- les 10 personnes du groupe EG ont obtenu des scores significativement plus élevés que ceux des témoins aux échelles ci-dessus sauf une, la satisfaction au travail, mais aussi aux échelles du PFS « difficulté à prendre des initiatives » ($6,6 \pm 3,0$ versus $3,7 \pm 2,1$, $p < 0,01$), « difficulté à ressentir de la joie » ($7,9 \pm 2,8$ versus $4,6 \pm 3,0$, $p < 0,01$), « difficulté à s'entendre avec les gens » ($6,6 \pm 4,1$ versus $4,0 \pm 2,3$, $p < 0,05$) et aux échelles du QLS « visite rarement d'autres personnes » ($10,6 \pm 2,6$ versus $8,3 \pm 3,3$, $p < 0,05$) et « avoir trop peu à faire » ($7,2 \pm 2,2$ versus $3,7 \pm 2,9$, $p < 0,01$). En outre, ces personnes ont obtenu des scores significativement inférieurs à ceux des témoins à l'échelle socialisation du KSP ($60,6 \pm 10,5$ versus $69,8 \pm 5,3$, $p < 0,05$), à l'échelle « presque infatigable » du PS ($6,5 \pm 2,9$ versus $9,4 \pm 2,9$, $p < 0,05$), et à l'échelle « difficile de se sentir inférieur » du PFS ($8,3 \pm 2,9$ versus $13,1 \pm 2,4$, $p < 0,05$) ;

¹³⁰ L'échelle de personnalité comprend 29 items notés de 1 à 15 et mesure le calme, l'extraversion, l'introversion, l'indépendance, la prudence, le niveau d'émotivité, l'ambition et la fatigue.

¹³¹ L'échelle de fonctionnement psychique inclut 18 items notés de 1 à 15 et évalue les capacités à faire face à des émotions diverses, à prendre des décisions et à se concentrer, ainsi que plusieurs aptitudes physiques.

¹³² L'échelle de qualité de vie comprend 14 items notés de 1 à 15 et concernant divers aspects de la vie quotidienne.

¹³³ Cf. définition en note de bas de page n° 127, p110.

- les 10 personnes du groupe VG n'ont obtenu de scores significativement plus élevés que ceux des témoins qu'à deux échelles du KSP, « tension musculaire » ($19,0 \pm 4,0$ versus $13,1 \pm 3,1$, $p < 0,05$) et « anxiété somatique » ($16,4 \pm 3,5$ versus $12,8 \pm 2,2$, $p < 0,05$).

Dans la discussion, Bergdahl précise qu'en raison de la faiblesse des effectifs, ces résultats doivent être interprétés avec prudence. Il estime par contre que, si les échelles PS, PFS et QLS n'ont pas de valeurs normatives, leurs données sont cohérentes entre elles et avec celles des KSP, ce qui lui permet de suggérer que les facteurs psychologiques sont importants chez les deux groupes EG et VG. Il suggère aussi, sans toutefois avoir procédé à des comparaisons directes, que ces deux groupes ont des profils psychologiques différents. Il ne se prononce pas sur la nature des relations entre ces facteurs psychologiques et la symptomatologie fonctionnelle des participants.

Dans un deuxième article, Bergdahl *et al.* (2004) ont étudié un groupe de 344 patients vus en consultation, entre 1980 et 1998, dans les départements de dermatologie et de médecine professionnelle et environnementale de l'hôpital universitaire d'Umeå (Suède). Ces patients ont fait l'objet d'un suivi destiné à évaluer leur pronostic médical et social à l'aide d'un questionnaire adressé par courrier postal (Stenberg *et al.*, 2002). Deux tests psychologiques, l'inventaire des ressources adaptatives (CRI) et l'analyse structurale du comportement social (SASB), ont été ajoutés au questionnaire et leurs résultats ont été analysés séparément (Bergdahl *et al.* 2004) pour ce qui est des capacités d'adaptation et de l'image de soi. Sur 344 patients interrogés, 250 (73 %) ont répondu. Deux-cents d'entre eux, dont 73 % de femmes, attribuaient leurs symptômes à une exposition à des écrans cathodiques (groupe VDT) et 50, dont 62 % de femmes, les attribuaient à des expositions à l'électricité (groupe HE). Un groupe témoin de 250 personnes, appariées en âge ($49,5$ versus $49,1$ ans) et selon le genre (75,2 % de femmes et 24,8 % d'hommes dans les deux populations), a été recruté au hasard à partir des bases de données du département de psychologie de la même université. Les résultats, ainsi que les interprétations qu'en ont fait les auteurs, sont les suivants :

- au test CRI, les patients dans leur ensemble ont obtenu des scores de $28,13 \pm 4,91$ pour les patients versus $27,10 \pm 5,34$ pour les témoins ($p < 0,05$) à l'échelle « spiritualité/philosophie », ce qui suggérerait aux auteurs que les patients pourraient être guidés, plus que les témoins, par des valeurs stables dérivées, soit de traditions religieuses, familiales ou culturelles, soit d'une philosophie personnelle, avec, en conséquence, une certaine rigidité d'attitude et de comportement ;
- aux *clusters* du test SASB, les patients dans leur ensemble ont obtenu, par rapport aux témoins, des scores plus élevés au cluster « spontanéité » ($47,65 \pm 28,46$ versus $41,70 \pm 14,10$, $p=0,004$) et plus faibles au cluster « contrôle de soi » ($43,01 \pm 30,50$ versus $50,40 \pm 17,92$, $p=0,002$), ce qui suggérerait une plus grande impulsivité. De plus, leurs scores aux *clusters* « image de soi » ont été plus élevés que ceux des témoins, aussi bien concernant l'image positive ($72,87 \pm 21,27$ versus $58,86 \pm 14,69$, $p < 0,001$) que l'image négative ($22,26 \pm 17,68$ versus $19,33 \pm 13,75$, $p = 0,004$), ce qui, d'après les auteurs, indiquerait l'existence d'un conflit intrapsychique et interpersonnel qui pourrait se manifester par des difficultés dans les relations interpersonnelles, au travail notamment ;
- les femmes dans leur ensemble ont obtenu un score plus élevé à l'échelle « émotion » du test CRI. Celles du groupe HE ont obtenu des scores plus élevés que ceux des groupes VDT et témoins aux échelles cognitive et totale du CRI et un score plus élevé que celui des témoins à l'échelle « émotion » du CRI. Elles ont aussi obtenu un score plus élevé que celui des femmes des groupes VDT et témoins aux *clusters* spontané et positif du test SASB ;
- comparé aux témoins, les personnes du groupe VDT ont obtenu des scores plus bas au cluster « contrôle de soi » du test SASB et plus élevés à la fois aux *clusters* de l'« image de soi » positive et négative, et les personnes du groupe HE des scores plus élevés au « cluster » spontané et positif de ce test.

Les auteurs ont conclu que l'altération de l'image de soi trouvée chez ces patients, particulièrement chez les femmes du groupe HE, soutenait l'hypothèse que les symptômes des personnes des groupes VDT et HE pouvaient être liés au stress. Dans la pratique clinique, ils ont recommandé d'établir une relation de confiance avec le patient, afin d'appréhender de manière plus réaliste ses capacités. Indépendamment du fait qu'ils n'ont pas été répliqués (il s'agit d'une étude préliminaire), ces résultats, obtenus par comparaison de deux groupes de patients, ne permettent pas de fonder scientifiquement l'application diagnostique de ces tests à des cas individuels.

La troisième étude de Bergdahl *et al.* (2005) avait pour but d'approfondir l'analyse de la personnalité des personnes se déclarant EHS ou hypersensibles à un amalgame dentaire, au moyen de la version suédoise de l'inventaire de Tempérament et de Caractère (TCI) de Cloninger, comprenant 238 items. Utilisé dans de nombreux pays, cet inventaire repose sur le modèle psychobiologique de la personnalité développé par Cloninger. Ce modèle divise la personnalité en deux types de dimensions, celle du tempérament et celle du caractère. Les dimensions du tempérament sont considérées comme étant héréditaires et se manifestent précocement dans la vie. Elles sont au nombre de quatre : la recherche de nouveauté, l'évitement des nuisances, la dépendance aux récompenses et la persévérance. Les dimensions du caractère sont considérées comme déterminées par l'apprentissage social et l'apprentissage cognitif. Elles sont au nombre de trois : la volonté, la coopérativité et la spiritualité. Chacune de ces sept dimensions comprend plusieurs sous-échelles. Deux groupes de personnes hypersensibles, l'un se déclarant hypersensible à un amalgame dentaire (groupe DF), recruté dans le département des pathologies buccales de l'hôpital universitaire d'Umeå (Suède), et l'autre se déclarant hypersensibles aux champs électromagnétiques, recruté dans le département de psychiatrie du même hôpital, ont été comparés entre eux ainsi qu'à un groupe de témoins appariés en âge et selon le genre. Le groupe DF ($n = 26$) comprenait 17 femmes âgées de 34 à 69 ans (âge moyen = 50 ans) et 9 hommes âgés de 41 à 53 ans (âge moyen = 48 ans). Le groupe des personnes se déclarant EHS ($n = 33$) comprenait 17 femmes âgées de 33 à 59 ans (âge moyen = 47 ans) et 16 hommes âgés de 32 à 64 ans (d'âge moyen = 47 ans). Le groupe des témoins ($n = 67$) comprenait 38 femmes (âge moyen = 48 ans) et 29 hommes (âge moyen = 46 ans).

- à la dimension « persévérance » du tempérament, qui comprenait quatre sous-échelles « ardeur à l'effort », « dureté au travail », « ambition » et « perfectionnisme », les deux groupes de personnes ont obtenu un score plus élevé que celui des témoins ($4,15 \pm 1,87$ pour le groupe DF, $4,61 \pm 1,77$ pour le groupe se déclarant EHS et $3,66 \pm 1,69$ pour le groupe témoin, seule la différence entre les personnes se déclarant EHS et les témoins était significative : $p = 0,038$) ;
- à la sous-échelle « fatigabilité et asthénie » de la dimension « évitement des nuisances » du tempérament, les deux groupes ont également obtenu des scores plus élevés que ceux des témoins ($4,85 \pm 2,24$ pour le groupe DF, $3,79 \pm 2,67$ pour le groupe se déclarant EHS et $2,72 \pm 1,82$ pour le groupe témoin, seule la différence entre DF et témoins était significative : $p < 0,001$) ;
- à la sous-échelle « acceptation de soi » de la dimension « volonté » du caractère ($9,27 \pm 2,09$ pour le groupe DF, $8,70 \pm 2,24$ pour le groupe se déclarant EHS et $8,00 \pm 2,36$ pour le groupe témoin, seule la différence entre DF et témoins était significative : $p = 0,052$). Cette augmentation permettait de les qualifier de « personnalités vulnérables » ;
- en l'absence de différences significatives entre les deux groupes, les auteurs ont conclu que ces derniers étaient quasiment semblables sur le plan de la personnalité et ils ont émis l'hypothèse que cette vulnérabilité s'exprimait sous forme de divers symptômes mentaux et somatiques pouvant être interprétés comme des symptômes de maladie liée à l'environnement par les personnes affectées.

Rubin *et al.* (2008) se sont intéressés à la santé psychique en général et aux symptômes de la dépression. Ils ont comparé un groupe de 52 personnes se plaignant uniquement d'une hypersensibilité aux téléphones mobiles (groupe TM), un groupe de 19 se plaignant en outre de

symptômes attribués à l'exposition à d'autres appareils électriques (groupe ES) et un groupe de 60 témoins. Les participants ont été recrutés par des annonces placées chez des médecins généralistes, des publicités dans la presse locale et spécialisée en santé et des courriels notamment. Les auteurs ont utilisé un questionnaire de santé générale de 12 items, le *GHQ-12*, qui permet de détecter la pathologie psychiatrique non psychotique (score ≥ 4), un questionnaire de dépression de 9 items (le *PHQ-9*), un autre sur les inquiétudes concernant les effets sanitaires de différents aspects de la vie moderne (le *MHW*), et un dernier sur la qualité de vie (le *SF-36*).

- les pourcentages de personnes classées en souffrance mentale sur la base du questionnaire *GHQ-12* n'étaient pas statistiquement différents entre les trois groupes ;
- les personnes du groupe ES étaient statistiquement plus âgées que celles du groupe TM et que les témoins ($47,3 \pm 14,0$ versus $33,4 \pm 10,9$ et $33,5 \pm 10,2$, $p < 0,001$). Elles étaient également sensibles aux téléphones mobiles depuis plus longtemps que celles du groupe TM (54 versus 41 mois, $p < 0,02$). Leur score de dépression était plus élevé que celui des deux autres groupes ($p = 0,001$) et elles avaient des inquiétudes plus grandes à l'égard des toxiques et des rayonnements ($p < 0,001$) ;
- dans le groupe ES, les valeurs de scores étaient plus faibles aux sous-échelles du questionnaire *SF-36* ayant une connotation psychique par rapport à celles des groupes TM et témoin : fonctionnement social ($p < 0,001$), limitation émotionnelle ($p < 0,005$), énergie et fatigue ($p < 0,003$) et santé mentale (abaissée par rapport au groupe témoin seulement, $p < 0,05$).

Cette étude confirme l'hétérogénéité de l'EHS et suggère l'existence d'au moins deux groupes distincts, selon que les personnes se déclarent sensibles à une ou plusieurs sources de champs électromagnétiques.

Tseng *et al.* (2011) ont réalisé une enquête téléphonique destinée à étudier la prévalence de l'EHS à Taiwan (cf. § 3.5). Ces auteurs ont utilisé un questionnaire de 25 items portant, entre autres, sur le degré de sévérité de l'EHS, évalué sur une échelle à 4 niveaux (léger, modéré, sévère et extrêmement sévère) et sur la morbidité psychiatrique, évaluée à l'aide d'un questionnaire à 5 items (*Brief Symptom Rating Scale-5*, BSRS-R), version simplifiée du BSRS-50. Les 5 items retenus (anxiété, dépression, hostilité, sensibilité interpersonnelle et symptômes supplémentaires) ont été notés par les participants sur une échelle allant de 0 (pas du tout) à 4 (extrêmement) en fonction de l'inconfort, un score global de 6 constituant un seuil validé pour la recherche des troubles psychiatriques. Un groupe de 170 personnes se déclarant EHS a été comparé à la population totale de 1 197 personnes ayant répondu à l'enquête. Après ajustement pour l'âge, le genre et le niveau éducatif, les résultats ont été les suivants :

- le taux de comorbidité psychiatrique était très significativement plus élevé ($p < 0,001$) dans le groupe se déclarant EHS : 30,7 % (IC₉₅ % : 23,6-38,9) versus 15,1 % (IC₉₅ % : 13,1-17,4) ;
- le taux de comorbidité psychiatrique augmentait d'un peu plus de 10 % lorsque le degré d'hypersensibilité était léger, de 20 % lorsque ce degré était modéré, de 40 % lorsqu'il était sévère et d'environ 60 % lorsque celui-ci était extrêmement sévère (voir figure 1 de l'article). Cependant, les valeurs numériques et leur signification statistique ne sont pas mentionnées (Meg Tseng, Lin, and Cheng 2011b).

Cette étude appelle une réserve concernant l'outil utilisé pour évaluer la comorbidité psychiatrique. Même s'il fait l'objet d'une étude de sensibilité et de spécificité, le questionnaire ne semble pas avoir été utilisé ailleurs qu'à Taiwan. Il ne concerne, pour l'essentiel, que des items qui peuvent être la cause ou la conséquence de la symptomatologie clinique et néglige des troubles psychiatriques importants, comme les troubles obsessionnels compulsifs, l'anxiété phobique, les syndromes persécutatoires et les états psychotiques. Bien que la différence du taux de comorbidité entre personnes se déclarant EHS et témoins soit très significative, la manière dont le taux de comorbidité a été évalué dans cette étude ne permet pas de conclure à l'existence d'une pathologie mentale précédant la survenue de l'EHS et étant la cause de cette dernière. Le taux de réponse au questionnaire était faible, ce qui peut avoir introduit un biais de sélection.

Les articles de Landgrebe *et al.* (2008b), Johansson *et al.* (2010) et Van Dongen *et al.* (2014) se sont également intéressés à la composante psychique de l'EHS (*cf.* leurs analyses au § 6.1.1.2).

6.1.3 Études cliniques comportant des mesures biologiques et / ou physiologiques

L'étude de Hardell *et al.* (2008) menée en Suède porte sur la relation qui pourrait exister entre les polluants organiques persistants dans l'organisme humain et l'EHS. Les analyses sanguines concernaient : 1) le diphenyl éther polybromé, retardateur de flammes présent dans des matelas, des appareils électroniques et dans l'environnement ; 2) l'hexachlorobenzène, fongicide utilisé pour la protection des plantes ; 3) le chlordane, un insecticide organophosphoré. L'utilisation de ces deux derniers polluants est interdite dans l'Union européenne depuis 1981. Dans cette étude, les dosages ont été effectués, en aveugle, sur une population exclusivement féminine. Treize femmes (âge moyen = 53 ans) se déclarant EHS et ayant spontanément contacté un des auteurs de l'étude et 21 personnes (groupe témoin, âge moyen = 45 ans) ont participé à cette étude. Les personnes se déclarant EHS ont répondu à un questionnaire portant sur l'année d'apparition des premiers symptômes dus à l'exposition aux champs électromagnétiques et aux habitudes alimentaires, en particulier celles liées à la consommation de poissons, qui est une source importante de contamination par ces polluants organiques.

Après ajustement des données en fonction de l'âge et de l'indice de masse corporelle, l'analyse statistique a montré que, comparé au groupe témoin :

- les concentrations moyennes d'hexachlorobenzène, de cis-heptachloroépoxyde (produit de dégradation de l'heptachlore) et de cis-nonachlordane étaient significativement inférieures chez les personnes se déclarant EHS ;
- seules les concentrations de trans-nonachlordane et de MC6 (nonachlordane) étaient supérieures chez les personnes se déclarant EHS ;
- les valeurs des *odds ratios* (OR) étaient plus élevées pour le diphenyl éther polybromé (11,7 ; intervalle de confiance 95 % : 1,45-94,7) et le MC6 (11,2 ; 1,18-106) (Hardell *et al.* 2008).

Les auteurs considèrent cette analyse comme une étude préliminaire, dont les résultats doivent être pris avec précaution, compte tenu du petit nombre de participants et d'un éventuel biais de sélection des personnes se déclarant EHS. Aucune information précise n'a été donnée sur le mode de recrutement, en particulier sur les symptômes retenus et sur les conditions d'exposition environnementale aux divers polluants, qui peuvent être différentes entre les groupes de participants. L'intérêt de ce travail est essentiellement de soulever une hypothèse sur la relation qui pourrait exister entre l'EHS et l'exposition à des polluants organiques.

Augner *et al.* (2009b) ont étudié les réponses de personnes estimant vivre à une distance égale ou inférieure à 100 m d'une station de base (ou antenne relais) de téléphonie mobile, afin de déterminer s'il existait des différences psychologiques ou psychobiologiques pouvant expliquer les augmentations de pression psychologique ou de stress. Cinquante-sept personnes (22 hommes / 35 femmes, âge moyen = 40 ans) ont participé à l'étude en répondant à des questionnaires standardisés et non standardisés ciblés sur le stress. Les concentrations d'alpha-amylase, de cortisol, d'immunoglobuline A et de substance P ont été mesurées dans des échantillons de salive, comme indicateurs psychobiologiques de stress.

Le groupe de travail estime que cette étude ne répond pas aux normes de qualité requises pour les études cliniques (mélange des populations se déclarant EHS et non-EHS notamment). De plus, l'utilisation de la seule distance non mesurée par rapport à l'antenne comme indicateur de l'exposition n'est pas pertinente pour évaluer le niveau d'exposition des personnes. La seule information apportée par cette étude est que la proximité auto-estimée d'une antenne relais conduit à des scores aux tests psychologiques et psychobiologiques représentatifs d'une population stressée, angoissée, et qui somatise ce stress (Augner and Hacker 2009b).

Ghezel-Ahmadi *et al.* (2010a) ont analysé la relation entre l'électrohypersensibilité et les métaux lourds (cadmium, mercure et plomb) dans l'organisme. Cette étude a été réalisée sur 132

personnes considérées EHS sur des critères établis par Frick *et al.* (2002) et sur 101 personnes non-EHS (groupe témoin) recrutées par annonce. Les personnes considérées EHS et les non-EHS ont été appariées en fonction de l'âge, du genre et de l'indice de masse corporelle (IMC). Les personnes présentant une maladie psychiatrique n'ont pas été retenues pour cette étude. Les concentrations des métaux lourds ont été mesurées au niveau sanguin selon des méthodes classiques et bien documentées dans la littérature. Les résultats ont montré que :

- les concentrations sanguines de plomb et de mercure ne différaient pas entre les deux groupes EHS *versus* témoin, que l'on considère la population féminine ou masculine ;
- seul le cadmium présentait une concentration plus faible chez les personnes considérées EHS, hommes ($p = 0,024$) ou femmes ($p < 0,001$), comparées à celles du groupe témoin ; les valeurs des concentrations sanguines de cadmium mesurées dans cette étude (comprises entre 0,365 et 0,644 $\mu\text{g/L}$ pour les groupes de personnes considérées EHS et les témoins) étaient toujours largement inférieures à la valeur limite au-delà de laquelle il existe un risque pour la santé, définie par l'Agence fédérale allemande de l'environnement (1 $\mu\text{g/L}$) ;
- ces observations étaient identiques pour le plomb (valeur limite de 100 $\mu\text{g/L}$) et le mercure (3,5 $\mu\text{g/L}$), dont les valeurs expérimentales mesurées par les auteurs étaient respectivement comprises entre 32,343 $\mu\text{g/L}$ et 29,691 $\mu\text{g/L}$ pour le plomb et 1,190 $\mu\text{g/L}$ et 0,898 $\mu\text{g/L}$ pour le mercure.

Costa *et al.* (2010) ont souligné les limites de cet article (voir § 7.1.3.2).

De Luca *et al.* (2014) se sont intéressés à l'hypothèse génétique pour expliquer l'origine de l'EHS (hypothèse discutée au § 7.2.1). Ils ont recruté un groupe de 153 personnes se déclarant EHS à travers toute l'Italie. Dans le but d'effectuer des comparaisons, deux autres groupes, appariés sur l'âge et le genre, ont été constitués : un groupe de 147 personnes sensibles aux produits chimiques (diagnostiqués SIOC à l'aide d'un test du QEESI modifié) et un groupe de 132 personnes non-EHS. Il faut noter que 95 % des personnes du groupe se déclarant EHS se considéraient également sensibles aux produits chimiques (diagnostic de SIOC établi ou suspecté). Un prélèvement sanguin a été effectué sur ces personnes et plusieurs tests biochimiques réalisés sur ces échantillons. Les auteurs se sont intéressés aux paramètres d'oxydo-réduction dans le sang chez les trois populations de personnes. Pour cela, douze paramètres biochimiques ont été analysés. Les auteurs ont dosé l'activité de certaines enzymes impliquées dans la lutte contre le stress oxydant (GST, GPX, SOD, catalase) et ont mesuré les niveaux d'oxydation de molécules de référence (co-enzyme Q10, α -tocophénol, acides gras saturés, ou mono-insaturés, ou polyinsaturés, rapport GSSG/GSH, rapport $\text{NO}_2^-/\text{NO}_3^-$). Les résultats suggèrent :

- une altération de l'équilibre métabolique (vers davantage de marqueurs de stress oxydant et d'inflammation) chez les personnes se déclarant EHS et SIOC, comparées aux témoins.

En ce qui concerne les tests génétiques, étant donné leur coût élevé, un premier sous-groupe de 29 personnes se déclarant EHS a d'abord été exploré. Les résultats ont ensuite été comparés à ceux obtenus sur les personnes SIOC lors d'une précédente étude (Caccamo *et al.* 2013). Une seconde série d'analyses, portant sur d'autres gènes candidats (isoformes de la famille des glutathion-S-transférases – GST) a ensuite été réalisée sur 127 personnes se déclarant EHS et comparée aux résultats obtenus chez les témoins. La recherche d'allèles particuliers pour établir le génotype a été réalisée par PCR, en utilisant un kit dédié permettant de discriminer des différences d'un seul nucléotide au sein de la séquence (SNP).

- les résultats présentés ne mettent pas en évidence l'existence d'une fréquence plus élevée d'un allèle particulier¹³⁴ dans la population se déclarant EHS ;
- en revanche, en analysant les combinaisons d'allèles, les auteurs ont observé qu'une association de deux allèles (*GSTM1*(*0/*0)+*GSTT1*(*0/*0), correspondant à des versions de gènes délétés) était plus fréquente chez les personnes se déclarant EHS par rapport au groupe témoin.

On peut regretter que les auteurs n'aient pas examiné si cette combinaison se retrouvait aussi dans le groupe SIOC. Comme 95 % des personnes du groupe se déclarant EHS étaient également SIOC, on ne sait pas si cette double délétion de gènes impliqués dans l'élimination de produits chimiques est à mettre en relation avec leur sensibilité aux produits chimiques et / ou aux champs électromagnétiques. En effet, les études sur le sujet indiquent que, s'il y a parfois des recouvrements (certaines personnes peuvent être à la fois EHS et SIOC), les deux populations (EHS et SIOC) sont distinctes. En l'occurrence, l'échantillon d'EHS, constitué à 95 % de SIOC, n'est pas représentatif¹³⁵ de la population se déclarant EHS en général, car il y a eu un biais systématique de recrutement. Pour définir la spécificité des personnes se déclarant EHS dans l'étude de De Luca *et al.* (2014), il aurait fallu des personnes se déclarant EHS non SIOC. Dans le cas présent, il n'est pas possible de savoir si les résultats trouvés sont dus à l'EHS ou au SIOC. Les auteurs eux-mêmes admettent que leurs résultats ne permettent pas d'apporter une conclusion définitive et nécessitent d'être confirmés.

De la même manière, le fait que les profils biochimiques mesurés soient très comparables chez les personnes se déclarant EHS et les SIOC pose un problème d'interprétation. En effet, il est impossible de déterminer si l'augmentation du stress oxydant a pour origine la sensibilité aux produits chimiques ou aux champs électromagnétiques. En fait, la seule conclusion possible est que les personnes souffrant de sensibilité aux produits chimiques présentent des réactions de stress oxydant, qu'elles soient EHS ou non.

Belpomme *et al.* (2015)¹³⁶ ont conduit une étude avec un volet portant sur plusieurs biomarqueurs et un autre comportant une étude tomosphygmographique de la circulation cérébrale chez des personnes se déclarant EHS et / ou SIOC. En effet, ils ont mesuré les concentrations en protéine C réactive (hs-CRP), vitamine D, histamine, IgE, protéine S100β, nitrotyrosine (NTT), protéines de choc thermique Hsp27 et Hsp70, ainsi que les anticorps anti-O-myéline dans le sang des patients. Ces auteurs ont également mesuré les concentrations urinaires en hydroxy-mélatonine sulfate (6-OHMS) et en créatine. Le flux sanguin cérébral a été étudié dans les lobes temporaux par tomosphygmographie ultrasonore pulsée. Les auteurs ont reçu en consultation – et examiné cliniquement et biologiquement – 1 216 patients se déclarant EHS et / ou SIOC, mais n'en ont retenu que 839 pour cette étude. Sur ces 839 patients, 112 ne répondaient pas aux critères d'inclusion tels que définis dans l'article. Les résultats des analyses sont donc donnés uniquement pour 727 cas. L'article est intéressant en raison du nombre de participants, la possibilité de faire des comparaisons entre personnes se déclarant EHS et SIOC et le large éventail des dosages biologiques réalisés. De plus, tous les tests ont été faits par le même laboratoire d'analyse, ce qui évite une certaine variabilité. Cependant, un certain nombre de défauts méthodologiques et d'erreurs de calcul ont été relevés (ces limites sont développées en Annexe 4), notamment :

¹³⁴ Les gènes analysés sont *CYP2C19*, *CYP2C9*, *CYP2D6*, *AHR*, *GSTP1*, *GSTM1*, *GSTT1*, tous impliqués dans le métabolisme des xénobiotiques. Les allèles ciblés correspondent à des variants génétiques connus pour produire des isoformes enzymatiques défectueuses. L'idée générale étant que la présence d'une enzyme non ou peu fonctionnelle limite l'élimination des xénobiotiques, induisant la persistance de ces molécules dans l'organisme, ce qui expliquerait la sensibilité accrue des personnes aux produits chimiques.

¹³⁵ Cf. note de bas de page n°58, p56, sur la représentativité des échantillons.

¹³⁶ L'article a été publié dans le journal *Reviews on Environmental Health*. Il s'agit d'un journal à comité de lecture publié depuis 1972, mais qui n'a pas de facteur d'impact. En outre, il n'est pas fait mention d'un avis d'un comité de protection des personnes.

- les critères de sélection des 839 patients et les critères d'exclusion des 377 (31 %) des personnes non retenues ne sont pas indiqués ;
- la distribution des résultats des dosages biologiques n'est pas donnée : il aurait fallu définir une population témoin appariée en âge ou, a minima, une présentation des résultats par tranches d'âges ;
- l'absence d'un groupe témoins pour la tomosphygmographie ultrasonore pulsée ne permet pas d'exploiter les résultats obtenus ;
- aucune information n'est fournie, ni sur le calcul de l'index de pulsatilité, ni sur ses valeurs de référence ;
- la technique tomosphygmographique ultrasonore et le protocole de mesure utilisés ne sont pas décrits et ne font référence à aucune validation par des pairs.

A noter que les erreurs de calcul relevées la version pré-définitive du présent rapport, mise en consultation publique en juillet 2016, ont été corrigées depuis dans un *Corrigendum* publié en octobre 2016 (Belpomme, Campagnac, and Irigaray 2016). Quoiqu'il en soit, l'article de Belpomme *et al.* (2015) ne permet en aucun cas d'établir un lien entre une anomalie quantitative des biomarqueurs analysés et l'origine des symptômes. Certes, cet article montre que les participants à cette étude présentent des anomalies biologiques, mais en aucun cas il n'explique la causalité de leurs troubles. Pour toutes ces raisons, les résultats et les conclusions de cette étude ne sauraient être utilisés autrement que comme des pistes de recherches à explorer ou éléments à répliquer par d'autres études. Toutefois, il pourrait en être autrement si les problèmes décrits ci-dessus étaient clairement explicités et les résultats de la tomosphygmographie cérébrale validés dans un article publié dans un journal de neurosonologie doté d'un comité de lecture. Pour l'instant, il ne saurait être question de reconnaître en quoi que ce soit la tomosphygmographie cérébrale ultrasonore pulsée comme un test diagnostique de l'EHS.

L'étude publiée par Andrianome *et al.* (2016) vise à rechercher les corrélations entre la qualité du sommeil, les taux de mélatonine et l'auto-déclaration d'être EHS. Cette étude a été menée sur 55 personnes, 25 témoins et 30 personnes se déclarant EHS (provenant de différentes origines : affilié à une association ou non) avec une grande majorité de femmes dans les deux groupes. Les deux groupes sont homogènes en matière d'âge, de genre, d'IMC. Le protocole expérimental consiste en deux types de mesures : l'évaluation de la qualité du sommeil et la détermination des concentrations de mélatonine salivaire et des métabolites de la mélatonine dans les urines.

La qualité du sommeil a été évaluée à l'aide de questionnaires classiquement utilisés par ailleurs. Les participants effectuent eux-mêmes des prélèvements salivaires afin de déterminer les concentrations de mélatonine. Les urines sont également collectées par les participants pour la mesure des métabolites de la mélatonine, le tout toujours à domicile par les participants eux-mêmes. Les conditions d'auto-prélèvements sont clairement indiquées dans le texte, mais aucun contrôle n'est (ne peut être) réalisé afin de s'assurer de la conformité des prélèvements par rapport au protocole proposé (Andrianome *et al.* 2016).

Les valeurs recueillies dans les questionnaires de qualité de sommeil montrent que les personnes non-EHS ont une qualité de sommeil supérieure aux personnes se déclarant EHS, mais il est à noter que la qualité du sommeil n'est évaluée que *via* l'utilisation de ces questionnaires. Cependant, malgré ces différences, aucune altération n'est observée pour les taux de mélatonine salivaire ou pour les quantités de métabolites urinaires de la mélatonine.

Cette étude présente l'intérêt d'étudier les paramètres liés au sommeil à domicile chez le participant, sans délocalisation ou stress particulier. En revanche, les données sont essentiellement obtenues par les participants eux-mêmes. Les auteurs de cette étude bien menée insistent sur le caractère préliminaire de celle-ci. En conclusion, cet article suggère que les personnes se déclarant EHS, même si elles déclarent un sommeil de moins bonne qualité, n'ont pas de modifications dans leurs taux de mélatonine.

6.2 Études de provocation (avec exposition expérimentale aux champs électromagnétiques) chez des personnes se déclarant EHS

6.2.1 Analyse des études de provocation

Bien que la recherche de systèmes de réception impliqués dans la détection et / ou la perception du champ magnétique terrestre et des champs électromagnétiques soit restée sans résultats (voir § 5.1.2), des études cliniques sur la perception de ces derniers ont été réalisées sans préjuger des mécanismes sous-jacents.

Une partie importante des travaux menés pour rechercher si certaines personnes ont un niveau de sensibilité aux champs électromagnétiques supérieur à celui de la population générale a été réalisée *via* des études dites « de provocation ».

Selon leurs objectifs, on distingue plusieurs types d'études de provocation, celles cherchant à :

- 1) préciser la capacité des personnes à percevoir (oui / non) une exposition aux champs électromagnétiques ;
- 2) préciser la nature des symptômes incidents ressentis lors des expositions ;
- 3) objectiver des modifications biologiques et / ou physiologiques en présence de champs électromagnétiques (anomalies des réponses du système nerveux autonome, *via* l'EEG, l'ECG, etc.)

6.2.1.1 Études de provocation sans mesure biologique ou physiologique

Dans cette partie figurent les études de provocation dans lesquelles on demande aux participants s'ils perçoivent la présence de champs électromagnétiques (par une question du type : *êtes-vous exposé en ce moment aux champs électromagnétiques ou non ?*) ou s'ils ressentent des symptômes qu'ils associent à la présence des champs.

Exposition factice

Dömötör *et al.* (2016) ont réalisé une étude de provocation (sans exposition aux radiofréquences), dans laquelle les auteurs font croire aux personnes (dont 36 se déclarant EHS et 36 témoins) qu'elles étaient exposées à un champ électromagnétique similaire à celui de leur domicile. Le sujet de l'étude est le *body focus*¹³⁷ (il n'y a pas de terme équivalent en français, mais on pourrait traduire par « tendance hypochondriaque »), comme amplificateur des symptômes conduisant à une plus grande anxiété au sujet de la santé. L'objectif était d'étudier la contribution des divers aspects du *body focus* sur la genèse et le maintien des symptômes médicalement inexpliqués, et plus précisément le maintien à long terme de l'EHS, ceci en lien avec les inquiétudes de santé liées à la vie moderne. Les personnes ont rempli 9 questionnaires : l'échelle des *Modern Health Worries*¹³⁸ (MHWS, *radiation subscale*), l'échelle d'amplification somatosensorielle¹³⁹ (SSA), l'affect négatif (NA), l'échelle d'anxiété (*Short Health Anxiety Inventory*, SHAI), l'échelle somatique (*Somatic Absorption Scale*, SAS), la motivation à coopérer (CoMotiv), les symptômes ressentis

¹³⁷ Le *body focus* est un des régulateurs les plus importants des processus de génération des symptômes. Les affects négatifs induisent des biais cognitifs dans la perception et l'interprétation des événements en lien avec le corps : en d'autres termes, les signes corporels normaux deviennent des symptômes. Avec le *body focus*, l'attention dirigée vers les processus internes les rend plus intenses et cela augmente la détection de stimulus ambigus, on entre alors dans un processus dirigé de recherche qui résulte dans la perception du symptôme attendu. Ces facteurs ne sont pas indépendants, en fait *body focus* et symptômes perçus peuvent générer ou augmenter l'anxiété, qui en retour induit une activation sympathique, une introspection et la perception de plus de symptômes.

¹³⁸ L'échelle des inquiétudes de santé liées à la vie moderne (*Modern Health Worries – MHW*) est présentée en Annexe 13.

¹³⁹ L'échelle d'amplification somatosensorielle (SSAS) est présentée en Annexe 7.

(Szemersky *et al.*, 2015), l'état d'anxiété (*State Anxiety Inventory*, STAI-S) et la sévérité de l'EHS. L'étude a été réalisée selon un protocole d'étude transversale.

Les résultats ont montré que :

- pendant l'exposition factice, les personnes se déclarant EHS présentaient un niveau d'anxiété plus élevé et plus de symptômes que les témoins ;
- parmi toutes les variables, l'échelle somatique (SSA) étaient le meilleur prédicteur de l'EHS ;
- chez les personnes se déclarant EHS, l'anxiété pour la santé (SHAI) et l'anxiété comme trait de caractère (STAI-S) étaient également de bons prédicteurs des symptômes rapportés, alors qu'une relation inverse était observée entre les symptômes rapportés et l'anxiété pour la santé chez les témoins.

Les auteurs ont conclu que l'EHS était basée sur le même socle que d'autres désordres somatoformes. L'amplification somatosensorielle (SSA) serait le facteur le plus pertinent, parmi ceux étudiés, dans l'étiologie de l'EHS et contribuerait pour une large part au diagnostic de l'EHS par la personne elle-même (Dömötör, Doering, and Koteles 2016).

Exposition aux radiofréquences

Nieto-Hernandez *et al.* (2011) ont réalisé une étude de provocation utilisant les champs électromagnétiques générés par un terminal mobile émettant un signal TETRA¹⁴⁰. L'objectif de cette étude était de rechercher si l'exposition, dans un cadre professionnel, à des champs électromagnétiques d'une fréquence de 385,25 MHz pouvait avoir des conséquences sur la santé. Cent vingt personnes ont été incluses dans cette étude dont le protocole d'exposition est clairement décrit. Soixante personnes se déclarant sensibles aux champs électromagnétiques et 60 témoins ont participé à un protocole où ils ont été exposés à trois conditions d'exposition (d'une durée d'une heure chacune) sur 3 jours différents (avec au minimum 24h de récupération, ou plus si nécessaire) : exposition factice, exposition à un signal de type TETRA (385,25 MHz pulsé à 17 Hz), et exposition à un signal entretenu (dit « continu ») à 385,25 MHz. Avant et au décours des différentes sessions d'exposition, huit symptômes ont été évalués : 1) les maux de tête, 2) la fatigue, 3) les vertiges, 4) les nausées, 5) la sensation d'échauffement et / ou de brûlure au niveau de la peau, 6) les démangeaisons, picotements ou engourdissements de la peau, 7) la sensation d'être irritable, anxieux ou déprimé et enfin 8) les difficultés à se concentrer ou à réfléchir. Tous ces paramètres ont été estimés à l'aide de questionnaires à 11 degrés (0 = pas de sensation, 10 = sensation maximale). Les résultats ont été les suivants :

- avant l'exposition :
 - les personnes se déclarant « sensibles » ont rapporté un nombre significativement plus élevé de symptômes (notamment neurophysiologiques, respiratoires et cardiovasculaires) pendant le mois précédant l'expérience ($p < 0,005$) ;
 - les symptômes attribués par les personnes se déclarant sensibles au signal de type TETRA de leur radio les plus fréquemment rapportés étaient : les maux de tête (86 %), la fatigue (31 %), les trous de mémoire (23 %), la perte de concentration (23 %) et l'irritabilité (22 %) ;
- pendant l'exposition aux ondes entretenues et après ajustements pour comparaisons multiples, le seul résultat statistiquement significatif était la diminution des démangeaisons chez les personnes se déclarant sensibles au signal de type TETRA ;
- pendant l'exposition aux ondes pulsées de type TETRA, les observations précédentes n'ont pas été retrouvées (Nieto-Hernandez *et al.* 2011).

¹⁴⁰ TETRA: *Terrestrial Trunked Radio Telecommunication System*.

Ce travail, bien mené et présenté, montre quelques lacunes mineures, comme l'absence de commentaires sur les différences physiologiques existant avant exposition entre les groupes « sensible » et témoin (par exemple, les personnes du groupe se déclarant sensibles au signal de type TETRA ont déjà, à la base, un score plus élevé concernant les céphalées).

L'article d'Eltiti *et al.* (2015) regroupe les résultats de deux études de provocation précédentes (Eltiti *et al.*, 2007a et Wallace *et al.*, 2010) afin de réaliser, sur un nombre important de personnes se déclarant EHS et de témoins une analyse des effets de l'exposition aux radiofréquences sur le bien-être ressenti. Tous les participants ont été sélectionnés après réponse au questionnaire d'Eltiti *et al.* (2007b). Dans l'expérience 1, 56 personnes ont été considérées EHS et 120 témoins ont été exposés à une séquence d'exposition factice et à deux séquences d'exposition réelles (GSM et UMTS). La distance entre les participants et l'antenne était de 5 m. Dans l'expérience 2, 51 personnes considérées EHS et 132 témoins ont été exposés à un signal TETRA réel ou factice. La distance entre les participants et l'antenne était de 4,95 m. Une vingtaine de personnes ont participé aux deux expériences. Ainsi, au total (expériences 1 et 2), 102 personnes considérées EHS (âge moyen = $43,9 \pm 15,0$ ans, 47,1 % d'hommes) et 237 témoins (âge moyen = $47,0 \pm 18,5$ ans, 54,9 % d'hommes) ont participé aux sessions ouvertes¹⁴¹ et 88 personnes considérées EHS et 231 témoins ont participé aux sessions en double aveugle. Le système d'exposition a été décrit dans les deux articles précités. Les participants ont utilisé une échelle visuelle analogique (VAS, *Visual Analog Scale*) et une échelle de symptômes (57 symptômes issus du questionnaire Eltiti *et al.* (2007b)) et une échelle en 5 points (de « pas du tout » à « beaucoup »), afin de quantifier leur bien-être ressenti. L'échelle analogique sert à mesurer l'anxiété, la tension, l'excitation, la relaxation, l'inconfort et la fatigue (sur une échelle de 10 cm sur laquelle les participants positionnent un curseur). Chaque expérience (1 et 2) comportait une session ouverte et plusieurs sessions en double aveugle.

Durant la session ouverte, les participants ont dû indiquer s'ils pensaient que l'antenne fonctionnait ou non et, dans l'expérience 1, s'il s'agissait d'une séquence d'exposition GSM ou UMTS. Chaque session d'exposition (que ce soit factice, TETRA, GSM ou UMTS) durait 15 minutes, pendant lesquelles les participants regardaient une vidéo sur la nature et étaient invités à compléter l'échelle analogique toutes les 5 minutes. L'échelle de symptômes a été complétée à la fin de chaque condition d'exposition, après la dernière échelle analogique.

Durant la partie en double aveugle, les sessions d'exposition dans les deux expériences duraient 50 minutes, durant lesquelles les participants étaient invités à réaliser une tâche requérant un faible effort mental (regarder une vidéo sur la nature) pendant 20 minutes, puis une tâche requérant un effort mental soutenu (arithmétique mentale (MA) pour l'expérience 1 et test OSPAN pour l'expérience 2, ces tests sont présentés en Annexe 12) pendant 20 minutes. Ils devaient aussi effectuer deux tâches cognitives courtes visant à mesurer l'attention et la mémoire, et enfin, à dire s'ils considéraient l'antenne en fonctionnement ou non (pendant les 10 minutes restantes). Durant les 40 premières minutes, les participants étaient invités à utiliser l'échelle analogique toutes les 5 minutes. Ils étaient également invités à déclarer tous leurs symptômes. Les résultats ont été les suivants :

- durant les phases ouvertes (expériences 1 et 2), les personnes considérées EHS ont rapporté un moindre degré de bien-être pendant l'exposition, résultat qui n'a pas été retrouvé dans les conditions d'expérimentation en double aveugle. Sur l'échelle visuelle analogique d'évaluation du bien-être subjectif, elles ont présenté un niveau d'anxiété, d'éveil, d'inconfort et de fatigue supérieur, ainsi qu'un niveau de relaxation inférieur, par rapport aux témoins. De plus, sauf pour la fatigue, il existait une interaction positive avec l'exposition aux radiofréquences. L'échelle des symptômes a montré que les personnes considérées EHS présentaient plus de symptômes, et plus sévères pendant l'exposition

¹⁴¹ Durant les sessions ouvertes, le technicien et les participants ont connaissance du niveau d'exposition et savent s'ils sont exposés ou non.

réelle que pendant l'exposition factice, ce qui n'était pas le cas des témoins (pas de différence entre les deux types d'exposition) ;

- durant les phases en double aveugle, le ressenti négatif a été plus fort pendant l'accomplissement de tâches requérant un effort mental soutenu, quelle que soit l'exposition et dans les deux groupes. Ceci était vérifié à la fois par l'échelle visuelle analogique et celle des symptômes. De plus, il n'existait pas de différences sur les scores ou le nombre de symptômes entre les expositions réelles et factices dans les deux groupes de participants. Enfin, les personnes considérées EHS rapportaient toujours plus de symptômes, plus sévères par rapport à ceux des témoins, et ceci quelle que soit l'exposition (réelle ou factice) (Eltiti *et al.* 2015).

Il s'agit d'une étude bien menée, avec un large échantillon de personnes considérées EHS et de témoins recrutés selon le questionnaire d'Eltiti *et al.* (2007b). Les auteurs soulignent le fait que les effets négatifs ne se manifestaient que lorsque les personnes se déclarant EHS savaient qu'elles étaient exposées aux radiofréquences ; ils conseillent d'explorer le rôle de l'effet *nocebo*¹⁴² dans la manifestation des symptômes chez les personnes se déclarant EHS, ainsi que les mécanismes psychophysiologiques qui les sous-tendent.

Le groupe de travail de l'Anses a également pris connaissance d'une autre étude de provocation concernant le bien-être et les symptômes ressentis en présence de champs électromagnétiques. Augner *et al.* (2009a) ont exploré les effets d'une exposition aiguë d'une durée de 50 minutes à différentes intensités de signaux GSM (faible : 5,2 $\mu\text{W}/\text{m}^2$, moyenne : 153,6 $\mu\text{W}/\text{m}^2$, forte : 2 126,8 $\mu\text{W}/\text{m}^2$) sur 57 participants (35 femmes / 22 hommes, âge moyen = 40 ans). Trois facteurs de bien-être (bonne humeur, vivacité, calme), appréciés à partir des réponses à un questionnaire de bien-être standardisé (MDBF-Mehrdimensionaler befindlichkeitsfragebogen, (Steyer *et al.* 1997)), ont été étudiés chez ces personnes (Augner *et al.* 2009a). Le groupe de travail a estimé que les conclusions de cet article ne pouvaient pas être prises en compte, car le système d'exposition n'était pas adapté, le champ n'était pas constant dans la pièce, l'exposition (avec ou sans protections anti-ondes : rideaux ou peintures sur le mur) n'était pas contrôlée et surtout, l'étude ne répondait pas aux normes de qualité requises pour les études cliniques. On note, par exemple, le mélange des populations se déclarant EHS et non-EHS sans en indiquer la proportion dans chaque groupe, ainsi que l'absence de questionnaire précis sur les antécédents médicaux.

Van Moorselaar *et al.* (2017)¹⁴³ ont réalisé des tests de provocation individualisés au domicile de personnes se déclarant EHS, au moyen d'un appareil d'exposition mobile (Huss *et al.* 2016). Quarante-deux personnes (âge moyen = 55 ans) ont participé à l'étude. Elles ont préalablement indiqué être en mesure de sentir la présence de champs électromagnétiques hautes ou basses fréquences dans un intervalle de quelques minutes. Dans un premier temps, le type et la durée d'exposition auxquels elles réagissaient ont été déterminés en session ouverte¹⁴⁴. Trente-huit participants ont voulu effectuer le test avec des radiofréquences d'intensité comprise entre 0,2 et 6 V/m (médiane : 0,44 V/m). Quatre participants ont préféré effectuer le test avec des champs extrêmement basses fréquences (de 0,15 à 6,6 μT). Pour chaque personne, dix essais en double aveugle ont été effectués, dont 3 à 7 expositions avec ou sans champs électromagnétiques (15 minutes au maximum par exposition). Les participants devaient indiquer s'ils étaient exposés ou non. Les résultats ont été fournis aux participants immédiatement après le test. Lors du test en double aveugle, les résultats ont été les suivants :

- en moyenne, dans 48 % des cas, l'estimation des participants était correcte ;

¹⁴² Cf. définition de l'effet *nocebo* au § 7.7.

¹⁴³ Cette étude, publiée en 2017 après la fin de la période de veille bibliographique, a été prise en compte car, lors de son audition le 26 février 2015, A. Huss, qui a dirigé ces travaux, en avait présenté le protocole et les résultats préliminaires.

¹⁴⁴ Cf. définition de session « ouverte » en note de bas de page n° 141, p146.

- aucun des participants n'a été en mesure d'indiquer de manière fiable s'il était exposé ou non à la fréquence d'exposition qu'il avait lui-même choisie et qu'il déclarait être capable de détecter dans un intervalle de quelques minutes.

Quatre mois après les tests, les participants ont indiqué que leur degré d'électrohypersensibilité n'avait pas varié. Cependant, ils étaient moins sûrs de pouvoir détecter une exposition aux champs électromagnétiques dans un intervalle de quelques minutes. Le nombre de symptômes et leur degré de gravité avaient significativement diminué par rapport au début de l'étude (van Moorselaar *et al.* 2017).

Un point fort de cette étude est constitué par le fait qu'un signal de test individuel a été déterminé avec chaque participant grâce à l'appareil mobile utilisé pouvant émettre des champs électromagnétiques dans une bande de fréquences très large. Les résultats semblent indiquer que certains participants auraient tiré profit de cette méthode individualisée. Néanmoins, l'absence de groupe témoin ne permet pas de préciser si la réduction des symptômes constatée en l'espace de quatre mois est due à la participation à l'étude ou non. Il s'agit toutefois d'une approche innovante pouvant aider les personnes se déclarant EHS réagissant en peu de temps à une exposition aux champs électromagnétiques selon leurs propres indications. Cette étude donne des pistes pour une nouvelle approche du traitement de l'EHS (*cf.* § 8.1.3 sur le traitement de l'EHS).

Basses fréquences

Les articles suivant ne traitent pas des radiofréquences mais des champs électromagnétiques basses fréquences (50 Hz).

Flodin *et al.* (2000) ont eu pour objectif de répondre à deux critiques importantes formulées à l'encontre des études de provocation antérieures, à savoir (1) qu'elles avaient été réalisées en laboratoire, dans des conditions qui ne sont pas celles de la vie courante, et (2) qu'elles n'avaient pas pris en compte la possibilité d'effets différés des expositions. En conséquence, ils ont réalisé une étude de provocation au domicile des personnes ou sur leur lieu de travail et les ont interrogées sur leur perception des champs électromagnétiques et sur leurs symptômes pendant des expositions, réelles ou factices, et 24 heures plus tard. Ils ont inclus dans cette étude 15 personnes se déclarant EHS (11 femmes et 4 hommes, âge moyen = 48,3 ans, intervalle 34 – 59 ans) et 26 témoins recrutés parmi les proches (16 femmes et 10 hommes, âge moyen = 47 ans, intervalle 15 – 77 ans). Les symptômes des personnes se déclarant EHS avaient débuté entre 2 et 20 ans (moyenne = 6,6 ans) auparavant. Le délai entre l'utilisation de l'appareil électrique incriminé et le début des symptômes était compris entre 2 mois et 14 ans (moyenne = 6,6 ans). Les personnes se déclarant EHS étaient toutes sensibles aux écrans cathodiques (écrans d'ordinateur ou de télévision), ainsi qu'à une quinzaine d'autres appareils, dont 5 étaient des téléphones mobiles. Le protocole, décrit en détail, comprend 4 sessions, deux d'exposition réelles et deux factices, réalisées à des intervalles compris entre 2 et 32 jours séparant chaque session. Les expositions ont été provoquées à l'aide de l'appareil le plus incriminé par la personne, chaque fois ($n = 4$) que cela a été compatible avec le strict respect du double aveugle. Dans les autres cas, les expositions ont été provoquées à l'aide d'un écran cathodique. Au début de chaque session, les personnes se déclarant EHS ont été interrogées par une infirmière sur leur état de santé à l'aide d'un questionnaire comprenant 13 symptômes, notés de 0 à 5. Parallèlement, le technicien installait, réglait et masquait l'appareil choisi, puis mesurait le champ électromagnétique de base dans la pièce. La personne et le technicien quittaient alors la pièce et le témoin y entrait pour s'asseoir sur un siège à 50 cm de l'appareil. Le masquage de ce dernier était amélioré jusqu'à ce que le témoin soit incapable de dire, à partir d'indices indirects, si l'appareil était allumé ou non. Après la sortie du témoin et du technicien, la personne revenait dans la salle et s'asseyait sur le siège placé à 50 cm de l'appareil. Elle était ensuite interrogée toutes les 15 minutes à l'aide du questionnaire à 13 symptômes. Dès qu'elle jugeait que l'appareil était allumé, le test était arrêté. Dans le cas contraire, le test était poursuivi pendant une heure. À la fin du test, la personne répondait à nouveau au questionnaire et il lui était demandé de le remplir 24 heures après et de le retourner aux expérimentateurs. Le technicien revenait dans la salle de test pour mesurer le niveau de champ électromagnétique. Les principaux résultats ont été les suivants :

- pendant l'exposition, les personnes se déclarant EHS ont donné 29 réponses correctes (17 vraies positives et 12 vraies négatives) et 31 réponses incorrectes (17 fausses positives et 14 fausses négatives, alors que les témoins donnaient 30 réponses correctes (14 vraies positives et 16 vraies négatives) et 30 réponses incorrectes (13 fausses positives et 17 fausses négatives), la différence entre les deux groupes n'étant pas statistiquement significative ;
- vingt-quatre heures après l'exposition, les personnes se déclarant EHS ont donné 33 réponses correctes (19 vraies positives et 14 vraies négatives) et 27 réponses incorrectes (15 fausses positives et 12 fausses négatives). Ces résultats ne diffèrent pas significativement de ceux obtenus pendant l'exposition ;
- les 4 participants qui ont été testés avec leur propre appareil (16 réponses attendues) ont donné 6 réponses correctes et 10 incorrectes pendant l'exposition, puis 9 réponses correctes et 7 incorrectes 24 heures après ;
- une personne se déclarant EHS et un témoin ont donné des réponses correctes aux quatre tests.
- il n'y avait pas de différence statistiquement significative (test de la somme des rangs de Wilcoxon) dans l'intensité des symptômes avant et pendant exposition, que celle-ci ait été réelle ou factice (Flodin, Seneby, and Tegenfeldt 2000).

Les données brutes sur ces symptômes n'ont pas été fournies. De plus, les auteurs ne donnent aucune explication sur l'inclusion de 26 témoins et sur la place des 11 témoins supplémentaires dans le protocole. De plus, ce travail a surtout porté sur des personnes se déclarant sensibles aux champs électromagnétiques de basses fréquences (5 d'entre elles seulement se déclaraient sensibles à un téléphone mobile) et la plupart des tests de provocation ont été réalisés à l'aide d'écrans cathodiques, alors que ces derniers ont aujourd'hui pratiquement disparu. Le reste de l'étude n'appelle pas de réserve. Les personnes se déclarant EHS et les témoins ont été recrutés sur des critères précis et fiables. Les précautions prises pour assurer un respect strict du double-aveugle sont crédibles. Les mesures de champ électromagnétique avant et après exposition sont cohérentes entre elles. Les résultats publiés ne font pas penser qu'un nombre plus élevé de participants auraient pu permettre de mettre en évidence des différences significatives inter groupe ou entre exposition réelle et factice. En conclusion, cette étude, réalisée au domicile des personnes ou sur leur lieu de travail et après les avoir interrogées pendant et 24 heures après l'exposition, a confirmé les résultats de plusieurs études antérieures, réalisées en laboratoire qui ne s'étaient intéressées qu'aux effets immédiats des expositions, à savoir que des personnes se déclarant EHS n'avaient pas une capacité plus grande que les témoins à percevoir des différences entre les expositions réelles et factices, et qu'ils ne ressentaient pas de symptômes plus intenses pendant ou après une exposition qu'avant celle-ci.

Mueller *et al.* (2002) ont mené une étude de provocation, afin d'identifier des personnes susceptibles de ressentir la présence de champs électromagnétiques et de rechercher s'il existait des différences de perception entre les personnes se déclarant sensibles (ou hyper-sensibles) aux champs électromagnétiques et celles se déclarant non-sensibles (Mueller, Krueger, and Schierz 2002). La population étudiée incluait 63 personnes, avec 49 personnes dans le groupe se déclarant EHS et 14 dans le groupe témoin. La répartition selon le genre n'était pas homogène (19 hommes, 30 femmes dans le groupe sensible ; 12 hommes, 2 femmes dans le groupe témoin). La répartition des âges était comprise entre 15 et 75 ans. Les participants ont été exposés à vingt reprises et de façon aléatoire à des expositions factices ou réelles de 2 minutes à des champs basses fréquences (50 Hz, 100 V/m et 6 µT). Au cours de chaque période de deux minutes, la question leur a été posée (2 fois), afin de savoir s'ils ressentaient (ou non) la présence d'ondes, seule la seconde réponse a été conservée. Une procédure de contrôle interne permettait de s'assurer qu'il y avait vraiment (ou pas) d'exposition aux basses fréquences. Durant 40 minutes, cette expérimentation comprenait dix expositions réelles et dix expositions factices. Pour étudier la capacité des participants à percevoir leur exposition aux champs électromagnétiques, les auteurs ont observé, pour chaque situation d'exposition, la concordance entre les expositions perçues et

réelles. Pour chaque personne, les auteurs disposaient d'une série de 20 observations à la réalisation d'une série de 20 variables de Bernoulli prenant la valeur 0 si l'exposition perçue correspondait à l'exposition réelle (et 1 dans le cas contraire). L'analyse statistique faisait l'hypothèse que ces observations étaient indépendantes. En effet, sous cette hypothèse, leur somme correspondait à une variable binomiale. Cette hypothèse est cependant fausse, les personnes ayant été informées en début de test qu'il y aurait 50 % d'expositions réelles et 50 % d'expositions factices. Les conclusions de l'étude peuvent donc être erronées et ne sont pas exploitables. Elles ne sont pas présentées dans ce rapport. L'article a par ailleurs fait l'objet d'un commentaire de Dworsky (de la société Motorola) (Dworsky 2002), dont le raisonnement est aussi critiquable que l'article lui-même (Mueller and Schierz 2002).

6.2.1.2 Études de provocation avec mesures biologiques ou physiologiques

Cette partie regroupe les études de provocation dans lesquelles les auteurs ont cherché à mettre en évidence des anomalies de fonctionnement objectivables (du système nerveux central (SNC) et autonome (SNA) principalement) chez des personnes se déclarant EHS en présence d'une exposition aux champs électromagnétiques.

6.2.1.2.1 *Études de provocation avec stimulation magnétique transcrânienne*

Le travail de l'équipe de Ratisbonne comprend deux études successives analysées dans le rapport Afsset de 2009 (les deux articles de l'étude pilote : Frick *et al.*, 2005 ; Landgrebe *et al.*, 2007 et celui de Landgrebe *et al.*, 2008b). Dans les deux cas, les auteurs ont étudié, outre les paramètres classiques obtenus avec les techniques de simple impulsion et d'impulsions par paire, la capacité à discriminer une impulsion réelle ou factice.

Dans l'étude pilote, les personnes se déclarant EHS ont été comparées à deux groupes de témoins (3 groupes d'une trentaine de personnes chacun) sélectionnés dans un échantillon représentatif de la population générale en fonction du nombre de symptômes déclarés, les uns parmi les 10 % ayant le plus bas niveau de symptômes et les autres parmi les 10 % ayant le plus haut niveau. L'article de Frick *et al.* (2005) donne les résultats relatifs au seuil de détection du *stimulus* magnétique (il s'agit d'une stimulation magnétique transcrânienne, SMT) mis en évidence par une réponse motrice et la capacité de différencier le signal réel ou factice. Ces résultats sont rappelés ici :

- la capacité de différencier la stimulation magnétique transcrânienne réelle ou factice était significativement inférieure chez les personnes se déclarant EHS (cf. Figure 15).

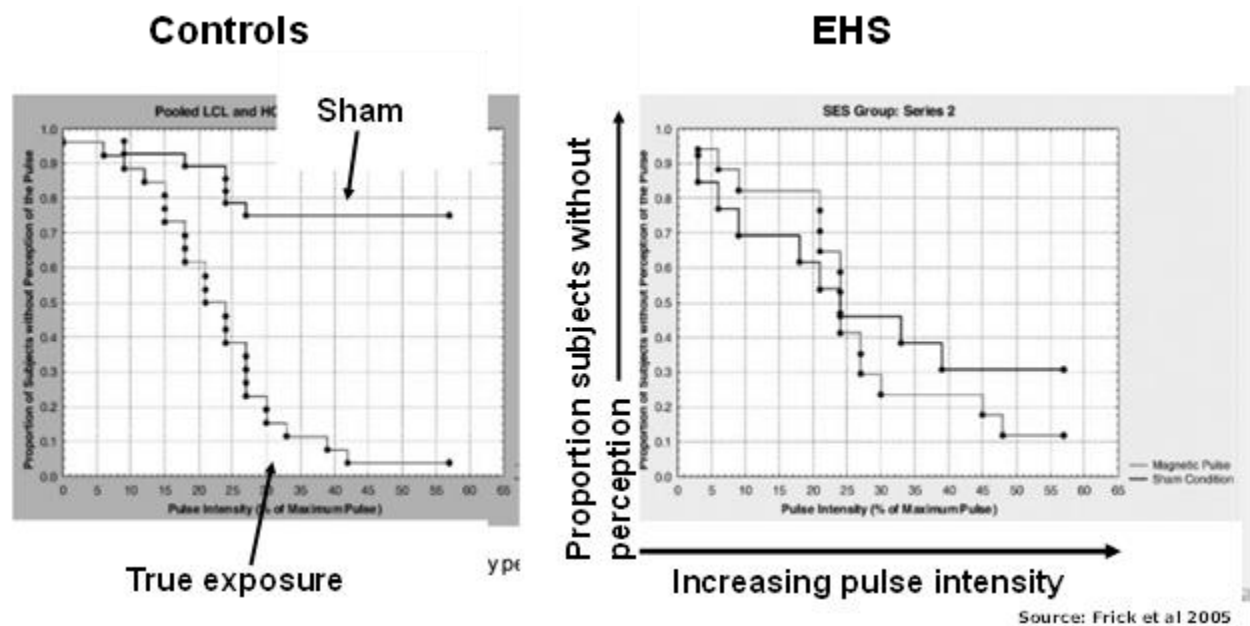


Figure 15 : comparaison entre les capacités à différencier le signal réel ou factice de personnes se déclarant EHS et non-EHS

Ce résultat s'explique du fait d'un taux élevé de faux positifs lors des expositions factices chez les personnes se déclarant EHS, alors que le seuil de détection des expositions réelles ne différait pas significativement entre les trois groupes. Par ailleurs, les trois groupes de l'étude pilote (Frick *et al.*, 2005) différaient significativement en ce qui concernait la proportion de femmes, la perception de l'état de santé, le nombre de visites médicales dans l'année écoulée, l'évaluation subjective de la qualité du sommeil, le nombre de plaintes somatiques et la fréquence des états dépressifs.

Le deuxième article (Landgrebe *et al.* 2007) donne les résultats relatifs à l'inhibition intra-corticale (ISIs = 2 ms), qui n'était pas significativement modifiée chez les personnes se déclarant EHS, et à la facilitation intracorticale (ISIs = 15 ms), qui était statistiquement diminuée chez les personnes se déclarant EHS par rapport aux deux autres groupes de participants. Pour les auteurs, la baisse de l'excitabilité neuronale reflétée par cette diminution de la facilitation corticale, pourrait atténuer la plasticité cérébrale et les capacités adaptatives des personnes. D'où l'hypothèse d'un dysfonctionnement de la régulation corticale et d'une déficience des ressources adaptatives qui pourraient rendre compte de la plus grande vulnérabilité des personnes se déclarant EHS aux influences environnementales et, en même temps, de la diminution de la capacité à discriminer les entrées sensorielles extéroceptives des perceptions internes qui expliquerait les faux positifs lors des expériences de perception.

Comme dans l'étude pilote, Landgrebe *et al.* (2008b) ont étudié les seuils de perception après stimulation magnétique transcrânienne (SMT) au niveau du cortex préfrontal dorsolatéral chez 15 personnes se déclarant EHS (6 femmes, âge moyen = $47,7 \pm 10,5$ ans) et 15 témoins appariés sur l'âge et le genre (6 femmes, âge moyen = $46,9 \pm 9,9$ ans). Le groupe de personnes se déclarant EHS représentait un sous-groupe d'une population de 89 personnes se déclarant EHS recrutées dans le cadre d'une étude épidémiologique (*cf.* Landgrebe *et al.* (2008a) analysé au § 6.1.1.2). Les seuils de perception ont été déterminés en aveugle à l'aide de protocoles standardisés. Le protocole de SMT était identique à celui de l'étude pilote. Les paramètres de l'excitabilité corticale ont été mesurés en SMT. Les résultats ont montré que :

- la capacité à discriminer les stimulations réelles et factices était plus faible chez les personnes se déclarant EHS : 40 % des EHS et 60 % des témoins ne sentaient aucune sensation pendant les stimulations factice, alors que le seuil de perception des impulsions magnétiques réelles étaient comparables dans les deux groupes (médiane à 21 % de l'intensité maximale de l'impulsion chez les personnes se déclarant EHS contre 24 % chez les témoins) ;

- la facilitation intra-corticale (temps de latence entre l'exposition et la réponse) était inférieure chez les jeunes se déclarant EHS (ce qui traduit un meilleur fonctionnement), confirmant les résultats de l'étude pilote, et plus élevée chez les plus âgés, différence que les auteurs ne peuvent expliquer (Landgrebe *et al.* 2008b).

Les auteurs ont conclu à une vulnérabilité individuelle plus élevée chez les personnes se déclarant EHS, démontrée par les altérations psychologiques et neurobiologiques.

6.2.1.2.2 *Études de provocation mesurant plusieurs paramètres physiologiques et / ou biologiques*

Exposition aux radiofréquences

Rea *et al.* (1991) ont réalisé une étude de provocation en environnement contrôlé pour évaluer les réactions de personnes rapportant une sensibilité aux champs électromagnétiques. Celles-ci, ainsi que des personnes non sensibles, ont été exposées en position assise à des champs générés par une bobine de 6 cm de diamètre et 16 cm de hauteur, alimentée par un générateur de signaux carrés, et placée au sol à 30 cm des pieds des participants. Les champs mesurés étaient de 2,9 μ T au sol, 0,35 μ T au niveau des genoux et 0,07 μ T au niveau de la tête¹⁴⁵. La tension artérielle, les fréquences cardiaque et respiratoire, la température, les scores de signes et symptômes et la fonction du système nerveux autonome (enregistrement du taux de contraction / dilatation du diamètre pupillaire) ont été enregistrés avant les expositions.

Dans une première série d'essais, en simple aveugle, 100 personnes se déclarant sensibles aux champs électromagnétiques ont été exposées à des fréquences allant de 0,1 Hz à 5 MHz (21 tests) et à 5 expositions factices (soit 26 expositions par personne). La durée d'exposition était de 3 minutes par test. Les résultats ont été considérés positifs lorsque le nombre ou l'intensité des symptômes ont été de 20 % supérieurs aux niveaux de base ou lorsque le diamètre pupillaire a varié de plus de 2 écart-types. Les résultats de cette série d'essais en simple aveugle ont été les suivants :

- 50 personnes ont réagi à plusieurs expositions factices et 25 n'ont réagi à aucune des expositions réelles ou factices. Ces 75 personnes ont toutes été exclues des étapes suivantes du protocole ;
- 25 personnes ont réagi à des expositions réelles et à aucune exposition factice, et ont été sélectionnées.

Ces 25 personnes à nouveau sélectionnées ont été exposées une deuxième fois dans les mêmes conditions aux mêmes fréquences que précédemment, en double aveugle, et comparées à 25 témoins. Les résultats de cette série d'essais en double aveugle ont été les suivants :

- parmi les personnes se déclarant sensibles, 16 personnes ont à nouveau réagi à des expositions réelles, alors qu'aucun des 25 témoins n'a réagi à une exposition, qu'elle soit réelle ou factice ;
- parmi ces 16 personnes, 75 % ont réagi à une fréquence de 1 Hz, 75 % à 2,5 Hz, 69 % à 5 Hz, 69 % à 10 Hz, 69 % à 20 Hz et 69 % à 10 kHz. Aucune n'a réagi à toutes les 21 fréquences testées, la moyenne étant de 11 fréquences réactives par personne (de 1 à 19 réponses positives) ;
- les principaux symptômes observés étaient neurologiques (somnolence, céphalées, etc.), musculosquelettiques (douleurs, spasmes, fibrillations), cardiovasculaires (palpitations, tachycardie, œdème), respiratoires (oppression, dyspnée), gastrointestinaux (nausée), oculaires (brûlure) et cutanés (douleurs, démangeaison, brûlure).

¹⁴⁵ La publication originale mentionnait 70 nT au niveau de la main (*hand*), mais il s'agissait d'une erreur typographique, il fallait lire « *head* » (tête), comme indiqué par les auteurs en réponse à un commentaire de Bergqvist (Bergqvist *et al.* 1993, Rea and Fenyves 1993).

Les 16 personnes réactives ont été de nouveau exposées une troisième et une quatrième fois, à deux occasions différentes, en double aveugle, en n'utilisant que la fréquence à laquelle elles avaient montré la plus forte réaction :

- toutes ont montré une réponse à cette fréquence (notamment par une variation du diamètre pupillaire), et aucune n'a réagi aux expositions factices ;
- deux d'entre elles ont montré des réactions retardées, devenant progressivement déprimées et finalement inconscientes. Elles se sont réveillées sans traitement. Les symptômes observés ont duré de 5 heures à 3 jours (Rea *et al.* 1991).

Cette étude est l'une des rares études de provocation montrant des résultats positifs qui n'ait pas été répliquée. Dans celle-ci, sur 100 personnes se déclarant sensibles aux champs électromagnétiques, seules 16 ont montré une réaction reproductible à l'une ou l'autre des fréquences testées. Cependant, le trop faible nombre d'expositions factices (5/26) diminue la puissance statistique de l'étude. De plus, on relève des imprécisions sur le recrutement des personnes (notamment en matière d'âge et de genre), sur l'appariement des témoins, sur les méthodes de mesure, et des erreurs ou incohérences dans l'expression des résultats (ex. « *as compared to 6 positive reactions out of 60 blanks (7,5%)* », alors que $6/60 = 10\%$). En outre, il est surprenant qu'aucune réaction n'ait été observée à 650 stimulations réelles ou factices chez les 25 témoins. Ces incohérences constituent des limites importantes, qui ne permettent pas de tirer des conclusions de cette étude.

Wilén *et al.* (2006)¹⁴⁶ ont réalisé une étude de provocation, conçue pour préciser les rôles respectifs du stress et d'une exposition aux radiofréquences dans la modification de plusieurs paramètres physiologiques (fréquence cardiaque et sa variabilité, fréquence respiratoire, débit sanguin cutané, réaction électrodermale). Cette étude a été effectuée avec des personnes se déclarant sensibles au téléphone mobile (celles rapportant des symptômes lors de l'utilisation d'appareils électriques ou se déclarant EHS étaient exclues de l'étude) ($n = 20$, 16 hommes et 4 femmes, âge compris entre 32 et 64 ans) et des témoins ($n = 20$) appariés selon l'âge et le genre. Pour chaque participant, deux expositions de 30 minutes chacune, l'une réelle et l'autre factice, à un champ électromagnétique de type GSM 900 MHz ($\text{DAS}_{10g \text{ tête}} = 0,8 \text{ W/kg}$) ont été réalisées dans un ordre aléatoire à 24 heures d'intervalle. Les participants n'avaient pas connaissance de leur exposition (simple aveugle). Chaque exposition était en outre précédée et suivie d'une mesure de la fréquence de fusion critique visuelle¹⁴⁷, d'un test de mémoire à court terme, d'une évaluation du niveau d'éveil et de vigilance et d'une mesure du temps de réaction. Le test de mémoire de travail et la mesure du temps de réaction (une version adaptée pour ordinateur du *Sternberg memory test* (Sternberg, 1966)) a consisté en une tâche (*1-back*). Les tests ont été réalisés au cours de deux expériences, la première sans aucune exposition (factice ou réelle) soit la condition basale, et la seconde avant et après 30 minutes d'exposition (factice ou réelle). Ces épreuves avaient pour but de générer un stress et d'évaluer les effets de ce dernier sur les paramètres physiologiques d'une part et d'étudier les effets de l'exposition sur ces paramètres d'autre part. Au total, chaque expérimentation durait 80 minutes :

- aucune différence entre personnes se déclarant sensibles au téléphone mobile et témoins n'a été observée en ce qui concerne les mesures de base (effectuées avant toute exposition), sauf pour le temps de réaction (au test *1-back*), plus long chez les personnes

¹⁴⁶ Cet article a fait l'objet d'une récompense en 2012 par l'éditeur de *Bioelectromagnetics* en tant qu'article le plus cité et le plus influent entre 2006 et 2010. Il s'agit de la même équipe que les articles : Lyskov *et al.*, 2001 a et b ; Sandström *et al.*, 2003.

¹⁴⁷ La fréquence de fusion critique visuelle ou seuil critique de fusion du papillotement est la fréquence à laquelle un stimulus visuel discontinu est perçu comme complètement continu. Le seuil critique de fusion est lié à la persistance rétinienne. La fréquence de fusion critique visuelle a été souvent utilisée comme un indice objectif de fatigue. La revue de la littérature révèle pourtant de nombreuses divergences dans les résultats obtenus et dans leurs interprétations.

se déclarant sensibles au téléphone mobile que chez les témoins lors du premier essai (la différence disparaissait lors de la répétition du test) ;

- en condition basale, les performances aux tests de mémoire des témoins au premier jour de test étaient meilleures que celles des personnes symptomatiques (nombre de réponses correctes et incorrectes, temps mort, temps de réaction). En revanche, au deuxième jour, ces effets disparaissaient, seule subsistait une tendance statistique ($p = 0,07$) pour le nombre de réponses correctes légèrement inférieur chez les personnes symptomatiques ;
- les personnes sensibles au téléphone mobile différaient significativement des témoins en ce qui concernait la variabilité de la fréquence cardiaque pendant la réalisation des tests de fréquence de fusion visuelle et de mémoire, quelles que soient les conditions d'exposition. Cette différence, qui se traduisait par une augmentation de l'énergie des bandes basses fréquences et une diminution de celles hautes fréquences, a été interprétée comme un effet du stress, qui déclencherait un déplacement de la régulation du système nerveux autonome vers une dominance sympathique et serait à l'origine des symptômes perçus ;
- aucune autre différence significative sur les paramètres mesurés (en particulier ceux ayant trait à l'activité du SNA ou la mémoire de travail) n'a été observée, quels que soient les conditions d'exposition (factices ou réelles) ou le groupe.

Les auteurs ont conclu à une absence d'effet de l'exposition aux radiofréquences de type téléphone mobile sur les fonctions mnésiques chez les personnes symptomatiques et non symptomatiques. L'hypothèse des auteurs selon laquelle une dysrégulation du système nerveux autonome chez les personnes se déclarant sensibles au téléphone mobile serait la cause ou la conséquence de leur état est intéressante à considérer (voir § 7.4). Elle est compatible avec les résultats de l'étude clinique quantitative d'Eltiti *et al.* (2007a), dans laquelle la composante neuro-végétative était apparue comme la plus importante, rendant compte de la moitié de la variance totale expliquée.

Eltiti *et al.* (2009) ont réalisé une étude de provocation en double aveugle évaluant les effets d'une exposition entretenue de 50 minutes simulant une exposition aux radiofréquences émises par une station de base UMTS (2 020 MHz) ou GSM 900 et 1 800 MHz combinés (densité de puissance = 10 mW/m², niveau de champ = 2 V/m). Les participants étaient les mêmes que ceux d'une étude précédente (Eltiti *et al.*, 2007b) portant sur les symptômes et les réponses physiologiques spécifiques aux personnes se déclarant EHS. Tous les participants ont complété le questionnaire « *Electromagnetic Hypersensitivity* » proposé par les auteurs (Eltiti *et al.*, 2007a), avec des personnes se déclarant EHS ($n = 44$, âge moyen = 46,14 ans, 59,1 % d'hommes) et des témoins ($n = 44$, âge moyen = 46,1 ans, 54,5 % hommes) appariés pour le genre et l'âge. Les auteurs ont étudié les performances cognitives des participants. Les paramètres étudiés concernaient la mémoire à court terme et la mémoire de travail (WAIS *forward* et *backward*, DS), l'attention (DSST) et l'arithmétique mentale (MA) au cours de quatre sessions réalisées à une semaine d'intervalle, la première pour l'obtention du niveau basal. Les personnes ont passé les tests après 20 minutes d'exposition où ils se relaxaient en regardant une vidéo (Eltiti *et al.*, 2007b). Différentes versions de ces tests ont été utilisées pour minimiser l'effet de la pratique. Simultanément, des paramètres cardiovasculaires (volume sanguin pulsé, fréquence cardiaque), ainsi que les conductances électrodermales ont été mesurés selon des procédures et des techniques non décrites dans le protocole. Les résultats ont montré :

- une absence de différences lorsque l'on considèrait la cognition, les paramètres cardiovasculaires ou les conductances cutanées entre les témoins et les personnes se déclarant EHS en dehors de toute exposition aux radiofréquences ;
- une absence d'effet de l'exposition aiguë au GSM ou UMTS sur les divers paramètres cognitifs ou physiologiques (notamment cardiovasculaires), que ce soit chez les personnes se déclarant EHS ou les témoins ;
- la seule différence entre les deux groupes résidait dans une augmentation plus importante des conductances cutanées chez les personnes se déclarant EHS pendant la réalisation

des tests cognitifs, indépendamment de l'exposition. Selon les auteurs, cela pourrait être lié à un déséquilibre général au niveau de la régulation du SNA.

Il s'agit d'un travail satisfaisant sur le plan méthodologique, avec une analyse statistique adéquate. L'augmentation de la conductance cutanée pourrait traduire un état de stress plus important chez les personnes se déclarant EHS lors des tests.

Furubayashi *et al.* (2009) ont conduit une grande étude ayant pour objectif de mesurer la prévalence de l'EHS dans la population générale des femmes japonaises. Ces auteurs ont réalisé une étude de provocation portant sur la perception de l'exposition et sur l'effet de cette exposition sur le système nerveux autonome (SNA) chez des femmes attribuant des symptômes à l'utilisation de téléphones mobiles et / ou à l'exposition à des stations de base (personnes MP RS – *Mobile Phone Related Symptoms*). L'étude a été menée sur un échantillon sélectionné après envoi d'un questionnaire à 2 472 femmes : 11 femmes MP RS (âge moyen = 37 ans) et 43 témoins (âge moyen = 38 ans) ont été recrutées. Le protocole prévoyait d'exclure les participantes présentant des troubles mentaux évidents. Dans ce but, avant l'expérimentation, les personnes ont été évaluées à l'aide du *Mini-International Neuropsychiatric Interview* (MINI), qui est l'outil utilisé pour diagnostiquer les troubles mentaux dans le DSM-IV (voir Annexe 9), et leur personnalité a été évaluée à l'aide de la version abrégée de l'inventaire de personnalité à cinq facteurs (*Neo Five-Factor Inventory*, *NEO-FFI*), qui est un test classique de personnalité (*cf.* tests présentés en Annexe 13). Quatre types d'exposition d'une durée de 30 minutes en chambre anéchoïque (le faisceau était centré sur la tête de la personne et l'uniformité du champ était vérifiée à $\pm 1,64$ V/m pour 10 V/m incident) simulant l'exposition aux champs électromagnétiques d'une station de base (2,14 GHz, 10 V/m, W-CDMA), ont été réalisés : continue, intermittente (*on/off* par périodes de 5 minutes), factice avec ou sans bruit (65 dB(A)). L'humeur (*POMS*, *Profile of Mood States*, 65 items) et le temps de réaction dans le PCRT (*Precued Choice Time Task*, voir Annexe 12, p 341) ont été mesurés avant et après l'exposition. L'étude indirecte du SNA a consisté à mesurer la fréquence cardiaque, le volume sanguin par doppler infrarouge, le débit sanguin local (à l'extrémité du doigt) et la température corporelle sur trois périodes : précoce (0-5 minutes), intermédiaire (12-17 minutes) et tardive (25-30 minutes). Les résultats de l'étude ont été les suivants :

- aucune des personnes sélectionnées n'a été exclue de l'étude, car aucune ne présentait de troubles mentaux au test *MINI* ;
- le groupe sensible (MP RS) ne différait pas du groupe témoin dans son aptitude à détecter l'exposition aux champs électromagnétiques ;
- sur les 11 personnes du groupe « sensibles » (MP RS), 3 se déclaraient EHS ;
- les personnes du groupe MP RS avaient un temps de réaction significativement plus long que les témoins ($p < 0,001$). Elles ont également été plus lentes après les expositions qu'avant, sans qu'il y ait de différence entre les deux groupes sur ce point ;
- de même, l'étude n'a montré aucune différence entre les deux groupes quant aux variations induites par l'exposition au niveau du système nerveux autonome ;
- le groupe MP RS a manifesté de façon persistante plus d'inconfort, qu'il soit ou non exposé aux champs EM, ceci en dépit du manque de changements significatifs dans les fonctions du système nerveux autonome ;
- aucune différence significative n'a été observée entre les deux groupes en ce qui concernait les cinq caractéristiques de personnalité, avec cependant une légère tendance à une amabilité moindre chez les femmes symptomatiques que chez les témoins ($30,36 \pm 1,0$ versus $33,00 \pm 0,84$, $p < 0,10$) ;
- au test *POMS*, les femmes du groupe MP RS ont obtenu des scores significativement plus élevés que les témoins aux échelles tension-anxiété ($p < 0,005$), colère-hostilité ($p < 0,001$), fatigue ($p < 0,01$) et confusion ($p < 0,05$), ainsi qu'un score moins élevé à l'échelle de vigueur ($p < 0,05$), sans différence significative à l'échelle dépression ;
- les scores de fatigue et de confusion obtenus au test *POMS*, ont été significativement plus élevés et celui de vigueur significativement moins élevé après exposition qu'avant, quelles qu'aient été les conditions d'exposition et le groupe, avec un effet séquence très significatif,

ce qui suggérerait que les changements d'humeur étaient dus au déroulement de l'expérimentation et non aux effets des expositions.

Le protocole est rigoureux et l'exposition est contrôlée et reproductible. Les données suggèrent que dans les conditions testées, les deux groupes n'ont pas différé quant à leurs réponses à l'exposition ou non aux champs électromagnétiques ou l'exploration de la réponse du système nerveux autonome. Le groupe MPRS ne semble pas présenter de sensibilité particulière à l'exposition aiguë aux radiofréquences. Les auteurs ont noté que leurs résultats étaient compatibles avec ceux d'autres études montrant que les personnes MPRS ne présentaient pas de sensibilité ni de capacité de détection particulière des radiofréquences, mais étaient plus sensibles au stress imposé par la performance lors de l'exécution d'une tâche (cf. résultats précédents de : (Rubin, Das Munshi, and Wessely 2005, Rubin *et al.* 2006b, Wilén *et al.* 2006, Hietanen, Hämäläinen, and Husman 2002, Lyskov, Sandström, and Mild 2001a)).

Les tests psychologiques sont nombreux, classiques et bien validés, ils couvrent un large champ de fonctions mentales. Ils montrent que des femmes se déclarant sensibles aux radiofréquences de la téléphonie mobile ne présentent ni trouble mental caractérisé, ni trouble de la personnalité, mais des troubles de l'humeur et un ralentissement des temps de réaction. Toutefois, en raison du petit nombre de personnes MPRS incluses dans l'étude de provocation ($n = 11$) et du fait que, comme dans les études précédentes, seuls les effets d'une exposition aiguë ont été mesurés, ces résultats doivent être considérés avec prudence. Ils demandent à être répliqués, notamment ceux obtenus avec les tests *MINI* et *NEO-FFI*.

Wallace *et al.* (2010 et 2012) ont réalisé une étude de provocation en double aveugle sur une même population, qui a donné lieu à deux articles. L'étude s'intéressait aux effets d'une exposition de courte durée à un signal d'une station de base du système TETRA¹⁴⁸ utilisé dans la police et les services d'urgence sur la santé et le bien-être de policiers. Chaque article décrit les résultats concernant des paramètres différents. L'exposition effectuée dans une chambre semi anéchoïque blindée consistait en un signal entretenu de $420 \pm 12,5$ Hz. Le DAS calculé pour une personne standard de 70 kg et de $1,9 \text{ m}^2$ de surface cutanée était de $271 \mu\text{W/kg}$. La puissance était en moyenne de 10 mW/m^2 sur la surface où le patient était assis. Le protocole comprenait 3 sessions d'exposition séparées chacune par au moins une semaine (session 1 : 1×15 minutes et 2×5 minutes, sessions 2 et 3 : 1×50 minutes). Le protocole était celui d'un test de provocation en double aveugle, évaluant les effets du signal TETRA *versus* une exposition factice chez des personnes se déclarant EHS ($n = 48$, âge moyen = 42 ± 16 ans, 29 femmes) et des témoins ($n = 132$, âge moyen = 41 ± 19 ans ; 67 femmes) comparables en ce qui concerne l'âge et le genre. Les participants ont été recrutés à travers une annonce dans la presse locale, nationale et spécialisée (santé), des lettres d'invitation, des recommandations et un site internet. Ils ont reçu un dédommagement financier pour leur participation. Toutes les personnes se déclarant EHS ont été considérées comme telles ; leur classement ne se fonde pas sur le score obtenu au questionnaire d'hypersensibilité électromagnétique d'Eltiti *et al.* (2007a). Au cours de trois sessions différentes (15 minutes d'exposition, 2 minutes de « washout ») les participants ont d'abord été exposés de manière « ouverte » (pas en aveugle), puis alternativement exposés ou non au signal TETRA dans un ordre aléatoire et en double aveugle.

Wallace *et al.* (2010) ont exploré la fréquence cardiaque extrapolée à partir des mesures de pression sanguine et de la conductance cutanée à l'aide de micro-capteurs fixés sur le majeur de la main non dominante. Les résultats de l'étude étaient les suivants :

- aucun groupe n'a détecté le signal TETRA autrement que par hasard (50 %, test de corrélation de Pearson) ;
- lors de la phase d'exposition « ouverte », les personnes se déclarant EHS ont dit se sentir plus mal et ont présenté des symptômes plus sévères pendant l'exposition TETRA, par comparaison à l'absence de signal ;

¹⁴⁸ Cf. note de bas de page n° 140.

- cependant, aucune différence objective n'a été enregistrée entre le groupe se déclarant EHS et le groupe témoin sur aucune des mesures réalisées pendant l'exposition au signal TETRA ou en l'absence de signal ;
- la seule différence entre les témoins et les personnes se déclarant EHS se traduisait par une fréquence cardiaque plus élevée chez ces derniers durant l'exposition. Cependant, cette différence n'a été retrouvée que pour la partie « ouverte » de l'étude et non lors de l'étude randomisée (en double aveugle) (Wallace *et al.* 2010).

L'article de Wallace *et al.* (2012) est consacré aux résultats des tests cognitifs concernant la mémoire à court terme (*WAIS-F*, *WAIS-R*, *B-span test*), la mémoire de travail (*OSPAN*) et l'attention (*Letter Cancellation Task*). Après application de critères d'exclusion, les données comportementales ont été analysées sur 36, 43 et 48 personnes se déclarant EHS et 107, 125 et 129 témoins. Les résultats de l'étude ont été les suivants :

- les résultats n'ont montré aucun effet significatif de l'exposition TETRA sur la mémoire de travail, la mémoire à court terme ou l'attention, et ceci quel que soit le groupe (témoins ou EHS) ;
- il n'y avait pas de différence de réponse de la fréquence cardiaque ou de la conductance cutanée entre les deux périodes d'exposition, tant chez les personnes se déclarant EHS que chez les témoins (Wallace *et al.* 2012).

Les auteurs ont conclu que chez les personnes se déclarant EHS, les symptômes perçus étaient davantage dus au fait d'être avertis de l'exposition qu'à l'exposition elle-même. Ces résultats sont en accord avec ceux observés par le même groupe utilisant les signaux GSM et UMTS (Eltiti *et al.*, 2009, voir ci-dessus) sur les mêmes personnes. Il convient de souligner la qualité de la méthode expérimentale et celle de l'analyse statistique avec en particulier un échantillon de taille respectable ayant fait l'objet d'un calcul *a priori*. Les groupes témoin et hypersensible sont statistiquement comparables lorsque l'on considère l'âge, le délai séparant les différentes sessions, la répartition de la population hommes/femmes et certains critères de morbidité. Seul le critère « propension au mal de tête » est jugé plus important chez les personnes hypersensibles ($p < 0,001$), quelle que soit l'exposition.

Les analyses statistiques sont menées de façon rigoureuse en utilisant des tests particulièrement résolutifs et adaptés (utilisation de la correction de Bonferroni) lors des comparaisons intra et inter groupes. À noter cependant que dans cette étude, le score symptomatique moyen des personnes se déclarant EHS était seulement de 5,92 (page 739, 2^{ème} colonne de l'article), il n'y a pas de score minimum pour sélectionner les personnes se déclarant EHS, ce qui est en contradiction avec le principe même du questionnaire d'hypersensibilité électromagnétique d'Eltiti *et al.* (2007a).

Exposition aux basses fréquences

McCarty *et al.* (2011) ont étudié les effets des basses fréquences sur les symptômes et sur différents paramètres physiologiques chez une personne se déclarant EHS. L'objectif de cet article était de rechercher des preuves directes que l'exposition aiguë à un champ électromagnétique pouvait induire des réactions somatiques. Dans cette publication, une seule personne a été exposée à deux séries de 15 ou 20 brèves expositions (100 secondes chacune) à des champs électriques 60 Hz d'intensité 300 V/m en mode entreteu (dit « continu ») ou pulsé. Cette étude de provocation a été réalisée en double aveugle et plusieurs paramètres physiologiques ont été analysés. La personne devait évaluer l'intensité de la douleur ressentie (trois niveaux : nul, moyen, fort) à différentes localisations sur le corps (mâchoire, oreilles, douleur localisée dans la tête (temporal), douleur diffuse dans la tête, contraction musculaire (cou, dos, hanche)). En parallèle, la qualité du sommeil a été analysée via un EEG. Une IRM et des dosages sanguins ont été effectués pour évaluer l'état de santé général de la personne participant à ces tests. Les analyses sanguines (hormones et métabolites) n'ont pas montré d'altération particulière. La personne testée ne présentait pas non plus de troubles du sommeil importants, si ce n'est un sommeil agité et fragmenté (les résultats ne sont pas détaillés dans l'article). En revanche, l'IRM a montré que la patiente présentait des troubles légers du développement au niveau du cerveau (dysplasie corticale et polygyrie). Lors de l'exposition aux champs extrêmement basses fréquences, en cas

d'apparition de symptômes, la disparition de ces derniers était attendue avant toute nouvelle session d'exposition. Les résultats obtenus ont été les suivants :

- la personne n'a pas perçu consciemment quand elle était exposée. En revanche, l'apparition des symptômes ressentis semblait être statistiquement corrélée à l'exposition ;
- les maux de tête ont été les principaux symptômes autorapportés et leur intensité augmentait lors d'une exposition aux ondes en mode pulsé par rapport à une exposition en mode entretenu ;
- la personne a également rapporté des contractions musculaires suite à l'exposition aux ondes (McCarty *et al.* 2011).

Ce travail est original, mais il ne comporte qu'une seule personne qui présente des altérations morphologiques du cortex cérébral. Il y a peu de séries d'exposition et lors de la seconde série, les chercheurs ont réalisé deux fois plus d'expositions réelles que factices, ce qui peut induire un biais statistique. En effet, la personne testée ayant tendance à se déclarer exposée (elle se trompe presque systématiquement sur une série d'expositions factices où elle déclare être exposée), le fait de la soumettre à davantage d'expositions réelles tend à augmenter artificiellement le nombre de réponses justes. Les résultats auraient mérité d'être vérifiés avec plusieurs séries d'expositions réelles et factices. Il s'agit là d'un problème de *design* expérimental, qui induit des biais et une possibilité d'artéfact lors de l'analyse statistique. En l'absence de tout travail de réplication, le fait que les données ne concernent qu'un effectif limité à une seule personne, associé à un protocole expérimental assez minimaliste ne permet pas d'exclure que le hasard puisse être impliqué dans ces résultats. Il pose néanmoins la question de la perception des champs électromagnétiques basses fréquences par l'être humain (*cf.* 5.3.2.3).

Cet article a généré une polémique entre les groupes de Rubin (Rubin, Cleare, and Wessely 2012a, 2012b) et McCarty (Marino, Carrubba, and McCarty 2012) et d'autres (Coggon 2012), *via* des lettres à l'éditeur.

Köteles *et al.* (2013a) ont réalisé une étude de provocation en double aveugle sur 29 personnes se déclarant EHS (16 hommes, 13 femmes) et 42 témoins (22 hommes, 20 femmes) d'âge compris entre 25 et 30 ans. Les personnes ont été exposées à un champ magnétique à 50 Hz (500 μ T) au niveau de la main droite au cours de 20 sessions (10 réelles et 10 factices) d'une minute, séparées par une période de « repos » de 30 secondes. Les participants ont complété plusieurs questionnaires (sur les symptômes attendus, la *SomatoSensory Amplification Scale (SSAS)*¹⁴⁹ et sur les préoccupations de santé liées à la vie moderne (*Modern Health Worries*¹⁵⁰, *MHW*)). À l'issue de chaque session, ils ont été interrogés pour savoir s'ils percevaient la présence de champs électromagnétiques. Leur rythme cardiaque et différents indices de variabilité cardiaque (fréquence cardiaque, déviation standard de la moyenne des intervalles des pics RR : SDNN, haute et basse fréquences HF et LF, et rapport LF/HF mesurant la balance sympathovagale) ont également été calculés. Un indice *d'*, calculé dans le cadre de l'application de la théorie de la détection du signal, a aussi été calculé pour mesurer la performance de détection des champs électromagnétiques. Les principaux résultats ont été les suivants :

- une meilleure perception des champs magnétiques par les personnes se déclarant EHS (nombre moyen de bonnes réponses égal à $5,97 \pm 1,72$ et celui des fausses égal à $4,90 \pm 1,21$) que par les témoins (nombre de bonnes réponses égal à $4,45 \pm 2,35$ et celui des fausses égal à $3,90 \pm 2,24$). Bien que cette différence ait été significative, les auteurs ont estimé que, dans leur ensemble, les résultats des deux groupes étaient trop proches les uns des autres (moyennes des indices *d'* égales à $0,225 \pm 0,751$ dans le groupe témoin et à $0,296 \pm 0,634$ dans le groupe se déclarant EHS) pour considérer qu'il y avait des

¹⁴⁹ Cf. Annexe 7, p314.

¹⁵⁰ Cf. Annexe 13 : p324.

différences notables dans les capacités de détection des deux groupes. De plus, ces résultats ont été obtenus après élimination d'un témoin dont les performances de détection étaient presque parfaites ($d' = 3,61$) ;

- des scores sur les symptômes attendus (SSAS) et les préoccupations de santé liées à la vie moderne (MHW) plus élevés chez les personnes se déclarant EHS ;
- en ce qui concernait la variabilité de la fréquence cardiaque :
 - il n'existait pas de différence entre les personnes se déclarant EHS et les témoins avant le début des sessions ;
 - il n'y avait pas de différence significative au niveau de la fréquence cardiaque ou de sa variabilité (HRV) entre les périodes d'expositions factices et réelles ;
 - deux paramètres de la variabilité cardiaque (à savoir la SDNN et l'énergie de la bande HF) semblaient significativement associés à la perception correcte ou non de l'exposition au champ magnétique 50 Hz reflétant, selon les auteurs, un lien direct entre la capacité à percevoir correctement les champs électromagnétiques et la modulation vagale de la fréquence cardiaque (Köteles *et al.* 2013a).

Le protocole expérimental de cette étude, qui multiplie les périodes d'exposition réelles et factices est intéressant. En revanche, la méthode d'analyse spectrale de la variabilité cardiaque (HRV) n'est pas décrite et pose *a priori* problème en raison de la faible durée de chaque session d'enregistrement des données (1 minute) ne permettant (normalement) pas une analyse fréquentielle, qui requiert habituellement chez l'être humain, selon les recommandations en vigueur, des séries d'au moins 512 valeurs consécutives et équidistantes, soit environ 4 minutes d'enregistrement. Enfin, il est impossible d'affirmer l'existence d'une relation positive entre perception et activité vagale sur la base des paramètres choisis, puisque la SDNN est une mesure globale de la variabilité cardiaque et que l'activité vagale n'est pas le seul déterminant de l'énergie de la bande HF, qui dépend également de la fréquence et du volume courant¹⁵¹ respiratoires, c'est-à-dire de paramètres non contrôlés dans cette étude. Basée à la fois sur la réponse à plusieurs questionnaires validés et des enregistrements ECG, cette étude semble bien menée. Elle aboutit à des résultats similaires à ceux déjà obtenus dans plusieurs études de provocation, à savoir l'absence de symptômes clairement imputables aux champs électromagnétiques. Elle laisse ouverte la question de la perception des champs magnétiques par les personnes se déclarant EHS (cf. 5.3.2.3).

C'est la raison pour laquelle les auteurs ont répliqué leur étude (Szemerszky *et al.* 2015). Sur la base des résultats antérieurs, le calcul préalable des effectifs nécessaires à l'obtention d'une différence significative entre les deux groupes était de 44 pour chaque groupe. En fait, 49 personnes se déclarant EHS (24 hommes et 25 femmes, âge moyen = 34,8 ans) et 57 témoins (32 hommes et 25 femmes, âge moyen = 35,4 ans) ont été inclus et soumis au même protocole que dans l'étude précédente :

- dans le groupe se déclarant EHS, le nombre moyen de bonnes réponses a été de $5,61 \pm 1,97$, celui des fausses de $4,71 \pm 2,27$ et l'indice d' a été significativement différent de zéro ($p = 0,038$) ;
- dans le groupe témoin, le nombre de bonnes réponses a été de $4,16 \pm 2,02$, celui des fausses de $3,84 \pm 2,14$ et l'indice d' n'a pas été significativement différent de zéro ($p = 0,20$) ;
- par ailleurs, les symptômes des personnes se déclarant EHS étaient associés aux résultats des tests concernant les préoccupations de santé liées à la vie moderne (MHW) et l'amplification somatosensorielle (SSAS), mais n'étaient pas corrélés aux performances de détection.

¹⁵¹ Le volume courant est le volume d'air qui entre dans les poumons lors d'une inspiration.

Après avoir analysé soigneusement les limites de leur étude, les auteurs ont conclu que les personnes se déclarant EHS pourraient être capables, dans une faible mesure, de détecter les champs magnétiques.

6.2.1.2.3 Études de provocation s'intéressant spécifiquement au système nerveux autonome

Exposition aux radiofréquences

Nam *et al.* (2009) ont réalisé une étude de provocation en simple aveugle sur les effets de l'émission d'un téléphone mobile (exposition factice ou réelle : DAS constructeur = 1,22 W/kg, signal entrete nu sinusoïdal, fréquence 835 MHz, puissance max : 300 mW, temps réel d'exposition de 31 minutes), chez 37 personnes, dont 18 se déclarant sensibles aux téléphones mobiles de type CDMA et 19 témoins d'âge et de genre comparables. De nombreux paramètres ont été mesurés (ECG, variabilité sinusale, fréquence respiratoire, réponses sympathiques cutanées (RSC), ainsi que le recueil de 9 symptômes toutes les 5 minutes durant l'exposition). Les résultats ont montré :

- une absence d'effet de l'exposition aux radiofréquences sur les fréquences cardiaque et respiratoire ;
- une absence d'effet spécifique de l'exposition aux radiofréquences sur la variabilité sinusale et en particulier sur le rapport LF/HF mesurant la balance sympathovagale ;
- une augmentation régulière du rapport LF/HF dans les deux groupes (EHS et non-EHS) lors de l'exposition factice, plus instable que lors de l'exposition réelle, mais sans différence entre les deux périodes d'exposition ;
- que le taux de réponses exactes en ce qui concerne la perception des champs électromagnétiques était plus élevé chez les personnes se déclarant EHS que chez les témoins lors de l'exposition réelle, alors que l'inverse est observé lors de l'exposition factice, ce qui suggère que les personnes se déclarant EHS sont davantage enclines à se croire exposées (Nam *et al.* 2009).

Il est dommage qu'il ne soit pas possible de connaître les éventuelles différences entre les personnes se déclarant EHS et les témoins pour le rapport LF/HF avant le début de l'exposition réelle ou factice puisque les valeurs absolues du rapport ne sont pas fournies et ont fait l'objet d'une normalisation. La méthodologie est très satisfaisante, bien détaillée, et comporte l'enregistrement de nombreux paramètres. Les données de réponses sympathiques cutanées ne sont pas analysables, car elles sont influencées par la réponse aux questionnaires multiples durant les deux séquences d'exposition (factice et réelle). Les auteurs soulignent d'ailleurs l'inadéquation de l'usage de la RSC pour mettre en évidence un effet des radiofréquences sur le système nerveux autonome (méthode hautement variable et non reproductible).

Kwon *et al.* (2011) ont réalisé une étude croisée, en double aveugle, en exposant aux radiofréquences deux populations de petite taille : 10 personnes se déclarant EHS (sélectionnées selon un score minimum de 26/227 sur l'échelle de Eltiti *et al.*, 2007a) et 10 témoins d'âge comparable. Les participants ont été exposés à deux sessions d'exposition (réelle et factice) de 32 minutes aux radiofréquences (signal WCDMA dans des conditions d'exposition bien contrôlées, $DAS_{1g} = 1,57$ W/kg). Il s'agissait d'étudier les effets de l'exposition sur le système cardiovasculaire et le système nerveux autonome (SNA). La fréquence respiratoire et la fréquence cardiaque (ECG) ont été enregistrées pendant l'exposition. Pour le SNA, la technique utilisée est l'analyse fréquentielle de la variabilité sinusale à partir de l'ECG. Les principaux résultats ont été les suivants :

- il n'existait pas de différence entre témoins et personnes se déclarant EHS lors des deux sessions ;
- il existait des variations significatives du rapport LF/HF de la fréquence cardiaque au cours des deux périodes d'exposition (réelle ou factice), mais uniquement chez les témoins et elles n'étaient pas liées à l'exposition aux radiofréquences (Kwon *et al.* 2011).

Il s'agit d'un bon travail sur le plan méthodologique, mais dont la présentation reste un peu trop simplifiée du fait d'un format adapté à la publication d'une communication réalisée dans le cadre d'un congrès. L'analyse fréquentielle de la variabilité sinusale à partir de l'ECG par exemple, la largeur et le positionnement des bandes d'intérêt, ainsi que la méthode d'analyse ne sont pas précisées. Le délai entre les deux sessions n'est pas précisé, un éventuel effet de report (« *carry-over* ») n'a pas été étudié. Les résultats sont correctement analysés sur le plan statistique. Cependant, la normalisation des valeurs ne permet pas de repérer d'éventuelles différences dans les niveaux de base du rapport LF/HF entre personnes se déclarant EHS et témoins. Par ailleurs, on ne peut s'assurer de la comparabilité des participants au début de chaque session.

Kwon *et al.* (2012b)¹⁵² ont étudié les effets de l'émission de téléphones mobiles de type WCDMA chez des personnes se déclarant EHS (n = 17, âge moyen = 30 ans, 8 hommes/9 femmes) et des témoins (n = 20, âge moyen = 29 ans, 11 hommes/9 femmes) comparables pour le genre et l'âge. Il s'agit d'une étude de provocation comportant une exposition factice et une exposition réelle, d'une durée de 32 minutes, en double aveugle. Le choix initial des personnes se déclarant EHS s'est fait selon le protocole de Eltiti (Eltiti *et al.* 2007b) : une personne se déclarant EHS étant considérée comme telle lorsque son score était supérieur à 26. Dans cette étude, la moyenne des scores était de 54 pour ces personnes et de 9 pour les témoins. L'expérience a été conduite avec un téléphone factice contenant un module WCDMA (puissance moyenne : 24 dBm à 1 950 MHz, DAS = 1,57 W/kg) placé à 3 mm de l'oreille et fixé par un bandeau élastique ; l'exposition était contrôlée. Chacune des deux sessions de test (espacées de 1 à 10 jours) durait 64 minutes (dont 15 minutes de pré-exposition, 32 minutes d'exposition aux champs électromagnétiques ou exposition factice, 16 minutes post-exposition). Les paramètres étudiés étaient les fréquences cardiaque et respiratoire, la variabilité sinusale (enregistrées avant, pendant et après l'exposition), ainsi que huit symptômes subjectifs (vomissements, démangeaisons, chaleur, fatigue, maux de tête, nausées, étourdissements, palpitations) et la perception des radiofréquences pendant l'exposition réelle ou factice. Les résultats ont été les suivants :

- aucune différence n'a été observée entre les réponses des personnes se déclarant EHS et les témoins, tant en ce qui concerne la symptomatologie fonctionnelle que la perception de l'exposition, et ce, quelle que soit la nature de l'exposition (réelle ou factice) ;
- une absence de différence entre personnes se déclarant EHS et témoins pour la fréquence cardiaque et la fréquence respiratoire avant l'exposition ;
- une absence de variation de la fréquence cardiaque ou respiratoire pendant l'exposition réelle ou factice pour les personnes se déclarant EHS et témoins ;
- une augmentation significative pendant les deux périodes expérimentales de la variabilité sinusale (rapport LF/HF), qui n'est pas différente en fonction du type d'exposition (réelle ou factice) ou selon le groupe (EHS et témoins), suggérant qu'il s'agirait d'un effet non spécifique, lié au protocole expérimental.

Les auteurs ont conclu que ni les témoins ni les personnes se déclarant EHS ne percevaient les champs électromagnétiques et que les effets des champs électromagnétiques sur les paramètres mesurés au cours de cette expérience étaient inexistantes (Kwon *et al.* 2012b).

Il s'agit d'une expérience très bien menée, en double aveugle, avec un effectif correct bien que limité. Le protocole est clair et bien décrit. La principale limite réside dans la sélection des personnes se déclarant EHS, qui a bien été faite selon le protocole d'Eltiti, mais sans recherche d'une éventuelle corrélation entre l'ampleur de l'électrohypersensibilité et les éventuels troubles physiologiques. Il est impossible de savoir s'il existe des différences de variabilité sinusale entre les deux groupes avant l'exposition, car les valeurs absolues du seul paramètre étudié (rapport LF/HF) ne sont pas disponibles.

Havas *et al.* (2010) ont réalisé une étude de provocation bicentrique visant à étudier les effets d'un téléphone sans fil (2,4 GHz) sur la pression artérielle, l'électrocardiogramme et la variabilité

¹⁵² Ce travail a fait l'objet d'une publication dans les actes d'un congrès (Kwon *et al.* 2012c).

sinusale chez 25 volontaires (80 % de femmes et environ 50 % de personnes obèses ou en surcharge pondérale), dont 40 % se déclarent EHS. L'idée générale défendue par les auteurs est que la mesure des capacités d'adaptation lors d'un test simple comme l'orthostatisme permettrait de prédire l'existence d'une EHS. Ainsi, les personnes ayant les capacités d'adaptation faibles seraient plus susceptibles de ressentir les champs électromagnétiques et de présenter des modifications physiologiques notables lors d'une exposition (Havas *et al.* 2010).

L'analyse des résultats, difficilement compréhensible, mêle un score de prédiction incluant les réponses physiologiques à l'orthostatisme et les modifications de ces mêmes paramètres lors de l'exposition aux champs électromagnétiques. L'ensemble fait appel à des scores et à des catégories qui n'ont jamais fait l'objet d'une validation. Les valeurs absolues des paramètres mesurés ne sont pas disponibles. Par ailleurs, l'absence d'objectif clair, d'analyse statistique adaptée et de validation éthique rendent les résultats discutables d'autant plus que les méthodes employées, en particulier pour l'analyse de la variabilité sinusale, sont obscures. Certains participants inclus dans ce travail souffrent d'affections diverses, dont certaines (diabète, hypertension artérielle, anxiété, dépression, etc.) sont connues pour être associées à des anomalies du SNA et reçoivent sans doute des médicaments non décrits mais susceptibles de modifier l'activité de ce dernier. Enfin, il s'agit d'un article non référencé dans *PubMed*, publié dans une monographie consacrée aux effets des champs électromagnétiques sur les organismes vivants. Il n'y a pas de comité de lecture pour les articles de cette publication.

Havas *et al.* (2013) ont ensuite publié un article qui ne sera pas commenté (Havas and Marrongelle 2013), car il a fait l'objet d'une rétractation¹⁵³ par l'éditeur du journal pour non-respect des règles de conformité administrative (Havas and Marrongelle 2014).

Les experts du groupe de travail de l'Anses ont également pris connaissance de l'étude iranienne de Mortazavi *et al.* (2011a) sur l'effet des champs électromagnétiques émise par les téléphones mobiles. Dans un premier temps, 700 étudiants (18-35 ans) en médecine ont reçu une information leur indiquant que l'utilisation du téléphone mobile pouvait être associée à des problèmes de concentration et des maux de dos. Ils ont ensuite répondu à un questionnaire auto-administré sur les symptômes qu'ils pouvaient parfois ressentir (vertiges, maux de tête, etc.), en précisant leur fréquence (jamais, de temps en temps, souvent, toujours). Cinquante-deux étudiants se sont déclarés sensibles aux champs électromagnétiques. Ceux qui avaient des symptômes potentiellement attribuables au téléphone mobile d'après les auteurs de l'étude (problèmes de concentration et douleurs dorsale), ont ensuite été considérés EHS. Parmi ces derniers (n = 28), 20 ont accepté de remplir le formulaire de consentement éclairé pour participer à l'étude de provocation (Mortazavi *et al.* 2011a). L'article ne détaille pas le protocole d'exposition (fréquence, niveau, banc de test, etc.) ni les tests réalisés (pression sanguine, respiration et rythme cardiaque). Le nombre de personnes considérées EHS incluses dans l'expérience (n = 20) est faible, et les analyses statistiques ne mettent pas en évidence de résultat significatif. Au final, l'article n'est pas informatif.

L'article de Tuengler *et al.* (2013) ne présente pas de réels résultats scientifiques étayés par des expériences méthodologiquement rigoureuses, mais analyse les résultats négatifs obtenus par d'autres auteurs, formule une hypothèse et propose des critères phénotypiques sensés permettre de caractériser l'EHS. Parmi ces critères figure la quantification simultanée des harmoniques lors d'une analyse fréquentielle de la variabilité sinusale en utilisant la transformée rapide de Fourier (FFT), de l'amplitude des variations de conductances électrodermales et de la fréquence des oscillations de la microcirculation. Ainsi, l'hypothèse des auteurs est qu'en l'absence de l'exposition aux champs électromagnétiques, il n'y a pas de différence entre personnes se déclarant EHS et témoins. En revanche, les modifications surviendraient lors de l'exposition avec, chez les personnes se déclarant EHS, une augmentation du nombre d'harmoniques sur l'analyse par FFT de l'ECG, une réduction de l'amplitude des variations de la fréquence cardiaque dans le

¹⁵³ Le détail de cette rétractation peut être consulté sur le lien : <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25356664>.

domaine temporel et une réduction des oscillations de basse fréquence de la microcirculation. L'ensemble de ces modifications phénotypiques reflèterait un impact particulier des champs électromagnétiques sur l'activité du système nerveux autonome.

En soi, l'hypothèse mérite d'être examinée, surtout en l'absence de méthode validée pour le diagnostic de l'EHS. Cependant, il convient de faire un certain nombre de remarques portant sur les critères choisis et leurs rapports avec le SNA, ainsi que sur les éléments manquants permettant de valider l'hypothèse. Concernant le premier point, la quantification des harmoniques sur l'analyse par FFT de la variabilité sinusale n'a jamais été validée comme un paramètre qui traduit le fonctionnement du SNA. D'ailleurs, le positionnement de ces harmoniques sur les tracés présentés dans l'article (entre 1 et 12 Hz) sort totalement des gammes fréquentielles attribuées au SNA¹⁵⁴. En fait, il s'agit d'harmoniques du signal cardiaque (pic spectral normal autour de 1 Hz pour la composante principale), sans relation avec la modulation de la variabilité sinusale par le SNA. L'analyse de la variabilité dans le domaine temporel des séries d'intervalles R-R de la fréquence cardiaque indiquerait une réduction des capacités adaptatives de la réponse cardiaque à une stimulation. Proposer l'utilisation de ces paramètres pour poser le diagnostic d'EHS suppose un minimum de validation clinimétrique¹⁵⁵ de ces outils diagnostiques, ce qui n'a jamais été réalisé.

Exposition à un champ magnétique basse fréquence

Lyskov *et al.* (2001a) ont réalisé une étude de provocation chez des personnes se déclarant EHS (n = 20) et des témoins (n = 20) d'âge (environ 45 ans) et de genre (15 hommes et 5 femmes dans chaque groupe) comparables (voir aussi Lyskov *et al.* (2001b) présentée au § 7.4.3). Les participants étaient soumis de façon randomisée, mais en simple aveugle, à une exposition intermittente avec des cycles de 15 secondes à un champ magnétique : (60 Hz, 10 µT), en 4 séquences : exposition réelle ou factice au repos et lors d'une épreuve de calcul mental. De multiples paramètres étaient enregistrés : EEG, potentiels évoqués visuels, conductances cutanées, pression artérielle, fréquence cardiaque et variabilité sinusale. Les résultats ont indiqué :

- des différences entre les personnes se déclarant EHS et les témoins, au repos en dehors de toute exposition aux radiofréquences. Ces différences étaient les suivantes :
 - une fréquence cardiaque plus élevée chez les personnes se déclarant EHS que chez les témoins ;
 - une valeur du rapport entre les basses et hautes fréquences (LF/HF) de la variabilité sinusale de la fréquence cardiaque plus petite chez les personnes se déclarant EHS que chez les témoins ;
- l'absence d'effet différentiel d'une exposition aux radiofréquences sur ces paramètres, tant au repos que lors du calcul mental, entre les deux groupes (Lyskov, Sandström, and Mild 2001a).

Si le protocole expérimental est intéressant, il est à noter plusieurs imperfections. La variabilité sinusale a été analysée dans le domaine spectral, mais en utilisant des bandes d'analyse non standard et sans vérification de la stabilité du signal. Il est impossible de savoir à quoi attribuer les différences du rapport LF/HF en l'absence de données quantifiées de l'énergie des bandes HF et LF. Par ailleurs, il est paradoxal que la valeur du rapport LF/HF diminue lors du calcul mental, alors qu'il s'agit d'un test d'activation sympathique donc sensé aboutir à une augmentation de ce rapport. Cette activation sympathique est d'ailleurs visible sur les données de conductance électrodermale, qui est au moins doublée lors du calcul mental. Quoi qu'il en soit, la pertinence des

¹⁵⁴ Gammes fréquentielles attribuées au SNA : 0,15-150 mHz pour la bande des basses fréquences reflétant à la fois la modulation sympathique et parasympathique sur le nœud sinusal et 150-400 mHz pour les bandes de hautes fréquences reflétant l'activité parasympathique et dont le positionnement dépend de la fréquence respiratoire.

¹⁵⁵ Une validation clinimétrique nécessite une évaluation statistique et métrologique des performances cliniques (répétabilité, sensibilité, spécificité, valeurs prédictives positives et négatives, etc.).

différences montrées entre les personnes se déclarant EHS et les témoins s'avère limitée par la faible taille de l'échantillon et l'absence de calcul *a priori* du nombre de participants nécessaires pour avoir une puissance statistique calculée suffisante. Enfin, l'environnement radioélectrique général est insuffisamment précisé.

Kim *et al.* (2012) ont évalué, en double aveugle, les effets de l'exposition à un champ magnétique (12,5 μ T) pendant 30 minutes chez des personnes se déclarant EHS sensibles au téléphone mobile et aux extrêmement basses fréquences ($n = 15$) et des témoins ($n = 16$). Les fréquences respiratoire et cardiaque, ainsi que la variabilité sinusale, ont été enregistrées en utilisant des méthodes appropriées. Les valeurs du rapport LF/HF ont été normalisées pour évaluer l'impact de l'exposition au champ magnétique.

- les données basales des fréquences respiratoire et cardiaque, ainsi que du rapport LF/HF ne différaient pas entre les groupes ;
- l'exposition réelle ou factice au champ magnétique ne provoquait, ni chez les personnes se déclarant EHS, ni chez les témoins, de modification significative des fréquences cardiaque et respiratoire ;
- il existait une augmentation identique du rapport LF/HF chez les personnes se déclarant EHS et les témoins au cours de l'exposition réelle ou factice (Kim *et al.* 2012).

Cette étude, qui inclut un échantillon de petite taille, est bien menée. Elle met en évidence le fait que le champ magnétique ne provoque pas de modification spécifique des constantes physiologiques reflétant l'activité du système nerveux autonome chez des personnes se déclarant EHS.

6.2.1.2.4 Études de provocation s'intéressant spécifiquement aux fonctions cognitives

Les fonctions cognitives, au sens restrictif du terme, peuvent être classées en quatre catégories : attention, mémoire, fonctions instrumentales et fonctions exécutives. Parmi les plaintes et symptômes évoqués par les personnes se déclarant EHS, les troubles de l'attention et de la mémoire sont très fréquemment rapportés et ont fait l'objet de quelques d'études cliniques, à ce jour peu nombreuses.

La première étude à s'intéresser aux fonctions cognitives des personnes se déclarant EHS dans le cadre d'un travail sur les effets d'une exposition à une station de base sur le bien-être et la cognition, est celle de Zwamborn *et al.* (2003), appelée l'étude « TNO » (*Netherlands Organization for Applied Scientific Research, Physics and Electronics Laboratory*). Elle était novatrice, dans le sens où elle s'intéressait aux effets d'une exposition environnementale (en champ lointain) qui correspondait à la plainte des personnes se déclarant sensibles, alors que les études précédentes s'étaient attachées à modéliser une exposition aux téléphones mobiles, donc en champ proche. Il s'agissait d'une étude de provocation comparant deux groupes de personnes (âge : 18-75 ans), l'un rapportant des plaintes concernant les radiofréquences ($n = 24$, âge moyen = $55,7 \pm 12,0$ ans) et l'autre non ($n = 24$, âge moyen = $46,6 \pm 16,4$ ans). Deux types d'exposition ont été testés : un signal GSM (900 et 1 800 MHz, 0,7 V/m) et un signal de type UMTS (2 100 MHz, 1 V/m) qui était en développement à cette période. Pour l'exposition au signal UMTS, le DAS mesuré au niveau de la tête était de 0,068 mW/kg (0,078 mW/kg moyenné sur 10 g de tissu). Les fonctions cognitives ont été évaluées à l'aide d'une batterie de 5 tests (*Taskomat test*) mesurant le temps de réaction simple, la mémoire de travail (test de comparaison), l'attention visuelle sélective (*VERSUSAT*), l'attention auditive sélective et la capacité à filtrer des informations non pertinentes.

Aucun effet sur les fonctions cognitives n'a été observé quel que soit le signal RF. Les auteurs ont également conduit un questionnaire de bien-être (*well-being*) et un test de personnalité (*Big Five*, présenté en Annexe 13). L'exposition au signal UMTS a affecté le bien-être dans les deux groupes de personnes de manière significativement plus marquée chez celles se déclarant EHS après exposition au signal UMTS, ce qui n'a pas été le cas lors de l'exposition aux signaux GSM.

Ce rapport, clair et détaillé, a, de prime abord, l'apparence d'un bon travail scientifique. Cependant, il présente plusieurs défauts méthodologiques : utilisation sans justification d'une partie non validée d'un questionnaire de bien-être classique, nombre insuffisant de participants dans les deux groupes ($n = 24$, alors que les calculs préalables en prévoyaient 36), non

appariement des deux groupes pour l'âge, le genre, l'attention visuelle, etc. Les deux groupes diffèrent en âge, les témoins étant plus jeunes (groupe se déclarant EHS : âge moyen = 55 ans ; groupe non-EHS : âge moyen = 46 ans) et selon le genre (groupe se déclarant EHS : majorité de femmes, groupe non-EHS : majorité d'hommes), ce qui a pu influencer les résultats, notamment pour les réponses aux tests cognitifs qui varient clairement en fonction de l'âge.

Une étude destinée à confirmer ou infirmer ces résultats a été effectuée en Suisse quelques années plus tard (Regel *et al.* 2006), aboutissant à des résultats divergents. Regel *et al.* (2006) ont répliqué cette expérience en étudiant les effets d'un signal UMTS émis d'une station de base (exposition de 45 minutes, à 0, 1 ou 10 V/m) sur le bien-être et les performances cognitives en utilisant plusieurs tâches (SRT : *Simple Reaction Time Task* et CRT : *Two-Choice Reaction Time Task* (Koivisto *et al.* 2000a, Preece *et al.* 1999) ; 1-, 2-, 3- *back Task*, *N-back task* (Koivisto *et al.* 2000b) ; *VERSUSAT* : *Visual Selective Attention Task*, Zwamborn *et al.*, 2003, les 6 tâches étant toujours explorées dans le même ordre). Ces auteurs ont également proposé des questionnaires similaires à ceux de l'étude TNO (le questionnaire de qualité de vie modifié par Zwamborn *et al.*, 2003), en y ajoutant d'autres questionnaires (un questionnaire « maison » pour inclure d'autres facteurs potentiellement liés au bien-être tels que la durée de sommeil, la consommation d'alcool, etc.). Regel *et al.* ont inclus 33 personnes se déclarant EHS (*versus* 24 dans l'étude TNO) et 84 témoins (*versus* 24 dans l'étude TNO), avec autant d'hommes que de femmes dans chaque groupe et appariés pour l'âge et le genre entre les deux groupes. De plus, Regel *et al.* ont contrôlé la période de la journée où les tests et les questionnaires avaient lieu pour permettre d'éliminer les éventuels effets des rythmes circadiens (Waterhouse 2010) et l'effet cumulatif des expositions sur les performances et / ou les réponses des personnes (soit 4 sessions à une semaine d'intervalle), alors que dans l'étude TNO, les tests ont été réalisés sur un seul jour.

- Comme dans le rapport TNO, aucun effet significatif sur les performances cognitives n'a été rapporté. Seuls deux effets ont été observés pour l'exposition à 10 V/m :
 - une diminution du temps de réaction lors d'un test à deux choix au fil des sessions pour l'une des 6 tâches cognitives explorées (CRT: *Two-Choice Reaction Time Task*) chez les personnes se déclarant EHS (-20 ms ; $p = 0,005$), contrairement à ce qui était observé à 0 V/m et 1 V/m ;
 - une légère augmentation du nombre d'erreurs à l'épreuve *1-back task* (97,3 % de réponses justes *versus* 98,2 % pendant l'exposition factice ; $p = 0,046$) chez les témoins exposés par rapport aux non-exposés.

Cependant, d'après les auteurs, ces effets disparaissaient après ajustements statistiques multiples. Ainsi, l'étude de Regel *et al.* (2006) n'a mis en évidence aucun effet significatif d'un signal UMTS sur le bien-être :

- l'étude de Regel *et al.* n'a donc pas confirmé les résultats précédemment observés dans l'étude TNO. En effet, aucune relation entre le bien-être (QCD : *Questionnaire on Current Disposition*, 6 items; TNO-q ; QOF : *Questionnaire to include Other Factors*) et le niveau d'exposition n'a été observée, aussi bien chez les personnes se déclarant EHS que chez les témoins.

Le rapport 2009 de l'Anses avait déjà analysé l'étude de Regel *et al.* (2006) et l'avait considérée plus convaincante que le rapport TNO. Interrogé à ce sujet par l'Anses, la réponse de Zwamborn (du 20/03/2015) a été la suivante (traduction)¹⁵⁶ :

« Comme je l'ai déclaré moi-même à plusieurs reprises à l'époque, je considère que la recherche de 2003 [i.e. le rapport TNO] a été au mieux génératrice d'hypothèses. Je crois que mes efforts

¹⁵⁶ Citation originale de Zwamborn (du 20/03/2015): "As stated many times by myself in that period, I think that the 2003 research was hypothesis-generating at best. I do believe that my efforts to be open and engage in scientific debate at that time has been positive to others, like Regel *et al.*, to improve their research design. Without disregarding my own 2003-research, the follow-up research is scientifically improved as it should be in conducting science and therefore has more scientific value".

pour être ouvert et engagé dans un débat scientifique à ce moment-là ont été positifs pour d'autres, comme Regel et al., afin d'améliorer leur conception de la recherche. Sans négliger mes propres travaux de 2003, l'étude qui a suivi est scientifiquement meilleure, comme il se doit en sciences, et a donc plus de valeur scientifique ».

Depuis ces deux analyses, cinq nouvelles études de provocation se sont intéressées aux effets d'une exposition aux radiofréquences sur la cognition de personnes se déclarant EHS ou présentant des symptômes en lien avec une exposition au téléphone mobile. Les quatre premières sont présentées au § 6.2.1.2.2. Il s'agit des études de Wilén et al. (2006) ; Eltiti et al. (2009) ; Furubayashi et al. (2009) et Wallace et al. (2012).

Dans une dernière étude, Wiholm et al. (2009) ont exposé 19 témoins et 23 personnes présentant des symptômes spécifiques en lien avec l'usage du téléphone mobile (maux de tête, vertiges, douleurs ou inconfort au niveau de la tête), à l'aide d'une antenne émettrice placée à quelques centimètres du côté gauche de la tête (GSM 884 MHz, $DAS_{10g} = 1,4$ W/kg) pendant 2h30. Les participants (âge moyen = 29 ans, compris entre 18 et 45 ans) ont réalisé une tâche de navigation spatiale dans un test de piscine de Morris virtuelle avant et après l'exposition aux radiofréquences ou sans exposition (exposition factice). Dans cette étude en double aveugle et en *cross-over*, le paramètre mesuré était la distance parcourue pour rejoindre la plateforme invisible au cours de sept essais consécutifs d'apprentissage :

- aucune différence n'a été observée entre les groupes lorsque le test était réalisé avant l'exposition (factice ou réelle) ;
- en revanche, les auteurs ont observé une diminution significative de la distance traversée pour rejoindre la plateforme (amélioration des performances) après l'exposition aux radiofréquences par rapport à la condition sans exposition, uniquement chez les personnes symptomatiques. Ces dernières, qui présentaient un déficit léger en condition d'exposition factice, retrouvaient ainsi les valeurs des témoins (en conditions d'exposition factice ou réelle) après l'exposition aux radiofréquences.

Les auteurs ne fournissent aucune explication sur ce résultat qui évoque une amélioration de la mémoire spatiale dans le groupe symptomatique sous l'effet de l'exposition aux radiofréquences. Il est à noter que le groupe symptomatique comprenait plus de femmes (61 %) que le groupe témoin (37 %) : leurs performances dans ce type de test ont souvent été rapportées comme moins bonnes que celles des hommes (Driscoll et al. 2005, Nowak et al. 2014, Woolley et al. 2010, Sneider et al. 2015), ce qui pourrait expliquer les résultats obtenus en condition d'exposition factice dans le groupe symptomatique. Enfin, on ne peut pas exclure que l'absence d'effet de l'exposition aux radiofréquences chez les témoins soit liée à la facilité de la tâche et donc au protocole ne permettant pas de mettre en évidence une amélioration des performances (« effet plafond »).

Ainsi, ces études ont abordé divers aspects de la cognition, comme la mémoire de travail, la mémoire à court terme, la mémoire spatiale, l'attention, l'arithmétique mentale ou encore le temps de réaction. Les cinq études analysées, dont deux sont issues de la même équipe, montrent peu (Wiholm et al., 2009) ou pas d'effet (Wilén et al., 2006 ; Eltiti et al., 2009 ; Furubayashi et al., 2009 ; Wallace et al., 2012) d'une exposition aiguë à des radiofréquences de type GSM, UMTS, W-CDMA et TETRA sur l'attention, la mémoire à court terme et la mémoire de travail, ainsi que la mémoire spatiale.

Cependant, le rapport de l'Anses sur l'exposition aux radiofréquences et la santé des enfants publié en 2016 avait conclu à un effet possible des radiofréquences sur les fonctions cognitives sur la base d'effets limités chez l'enfant et l'adolescent. Ainsi, deux études épidémiologiques rapportaient une amélioration de certaines fonctions cognitives après exposition au téléphone mobile et deux études expérimentales montraient des modifications de l'EEG associées à l'éveil actif, aux capacités d'attention et à des comportements focalisés (ondes *béta*), ainsi qu'à la mémoire, aux émotions et aux sensations (ondes *théta*).

En conclusion, ces résultats, cohérents avec ceux obtenus chez des témoins, semblent indiquer qu'il n'existerait pas de sensibilité particulière chez les personnes se déclarant EHS en ce qui concerne les effets d'une exposition aiguë aux radiofréquences sur les fonctions cognitives. Ainsi,

aucune donnée de la littérature ayant exploré de manière objective diverses fonctions cognitives après une exposition aiguë aux radiofréquences ne permet d'expliquer les plaintes des personnes se déclarant EHS concernant notamment la mémoire et l'attention. Par ailleurs, l'absence d'études scientifiques pour évaluer les effets d'une exposition prolongée ne permet pas de répondre à la question des effets chroniques potentiels des radiofréquences.

6.2.1.2.5 Études de provocation avec enregistrement EEG du sommeil

Arnetz *et al.* (2007) ont étudié les effets d'une exposition à un signal GSM à 884 MHz sur un enregistrement EEG du sommeil pratiqué une heure après la fin de l'exposition. Au total, 71 personnes âgées de 18 à 45 ans, dont 38 se déclarant EHS (22 femmes et 16 hommes) et 33 témoins (14 femmes et 19 hommes) ont été exposés à trois sessions de 3 heures : une session d'habituation, suivie de deux sessions d'exposition (réelle et factice, randomisées). Le dispositif d'exposition a été bien détaillé (assurant une exposition reproductible de 1,4 W/kg de l'hémisphère gauche). Après l'exposition, un enregistrement EEG a été effectué pendant leur sommeil. Pour l'ensemble des volontaires de l'étude, les résultats ont été les suivants :

- le temps de latence d'apparition du sommeil à ondes lentes delta (δ) caractérisant le stade 3 était plus long après exposition réelle qu'après exposition factice ($0,37 \pm 0,33$ heures *versus* $0,27 \pm 0,12$, $p = 0,0037$) ;
- la quantité (ou durée) de sommeil à ondes lentes caractérisant le stade 4 était plus petite après exposition réelle, qu'après exposition factice ($37,2 \pm 28$ *versus* $45,5 \pm 28$, $p = 0,0019$) (Arnetz *et al.* 2007).

Dans cette étude préliminaire un soin particulier a été apporté au recrutement des participants et les conditions d'exposition aux radiofréquences ont été bien contrôlées. Cependant, les conditions d'enregistrement ne sont pas précisées : température, humidité relative de l'air, activité des participants avant de se coucher, etc. *A posteriori*, les modifications de la macrostructure du sommeil mises en évidence pour l'ensemble des volontaires de cette étude n'ont pas été retrouvées chez des témoins dans des études ultérieures citées au § 7.5.6.2 (Danker-Hopfe *et al.* 2011, Loughran *et al.* 2012, Schmid *et al.* 2012), dans des conditions d'exposition qui ne sont toutefois pas strictement identiques (mais qui sont mieux contrôlées). Ceci ne permet pas de conclure quant au fait que ces modifications soient propres aux personnes se déclarant EHS ou pas et suggère qu'il est possible que les personnes se déclarant EHS soient les seules à présenter ces modifications. En effet, si l'on veut comparer des témoins et des personnes se déclarant EHS, il faut être certain que les conditions environnementales (température d'air, de rayonnement, vitesse de l'air, humidité de l'air, bruit, activité précédant l'heure du coucher, alimentation, etc.) soient rigoureusement contrôlées et identiques entre les groupes. C'est l'une des difficultés majeures dans les études concernant l'analyse du sommeil. En effet, l'impact de ces facteurs est connu et démontré et n'est plus scientifiquement remis en question. Or, rien n'est dit sur la comparaison des EEG de sommeil entre les personnes se déclarant EHS et les témoins. On ne peut exclure le fait que, dans cette étude, les personnes se déclarant EHS ne diffèrent pas des témoins quant aux effets des radiofréquences sur la macrostructure du sommeil. Les insuffisances de cette étude ne permettent pas de répondre à la question de savoir si les personnes EHS sont plus sujettes aux modifications du sommeil que les témoins et de choisir entre deux conclusions opposées, c'est-à-dire : i) contrairement aux témoins, les personnes se déclarant EHS présenteraient des modifications de la macrostructure du sommeil et ; ii) les personnes se déclarant EHS ne diffèrent pas des témoins en ce qui concerne la qualité de leur sommeil après exposition aux radiofréquences.

L'importance des modifications de l'EEG de sommeil justifie de nouvelles études comparant, avant tout, les résultats obtenus chez des personnes se déclarant EHS et chez des témoins.

Lowden *et al.* (2011) ont exposé des personnes déclarant des symptômes liés aux signaux GSM de la téléphonie mobile ($n = 23$, 8 hommes / 15 femmes) et des témoins ($n = 25$, 13 hommes / 12 femmes) dans le cadre d'une étude de provocation en double aveugle (Lowden *et al.* 2011). Il s'agit d'un second article tiré d'un protocole unique dont les participants sont les mêmes que ceux

d'une précédente étude de Hillert (Hillert *et al.* 2008). La veille de leur exposition, les participants ne devaient pas consommer de café, thé, alcool ou drogue. Le jour où démarrait l'expérience, ils ont été exposés pendant trois heures à un téléphone émettant un signal GSM à 884 MHz ($DAS_{\text{moy}} \text{ tête} = 1,4 \text{ W/kg}$ et $DAS_{\text{max}} \text{ 1 g matière grise} = 1,8 \text{ W/kg}$) à partir de 19h30. Durant l'exposition, les personnes se reposaient, lisaient et exécutaient des tests de performance évaluant, par exemple, leur temps de réaction, leur orientation spatiale ou leur vigilance. L'exposition se terminait à 22h30, une heure avant une nuit de sommeil de sept heures. Deux expositions, réelle ou factice, ont été réalisées à une semaine au moins d'intervalle (14 jours en moyenne). Les enregistrements EEG ont eu lieu dans une chambre privée en conditions contrôlées (en ce qui concerne la température, le bruit, la lumière, les vibrations et les champs extrêmement basses fréquences). Le sommeil a été évalué cliniquement par i) la mesure de sa durée pendant trois jours avant l'exposition et celle des stades de sommeil (polysomnographie : étude macroscopique du sommeil sur l'EEG), ii) l'évaluation de la somnolence avant, pendant et après l'exposition jusqu'à l'endormissement et au réveil (questionnaires d'auto-évaluation de la somnolence : *Karolinska sleep diary* ou KSD et *Karolinska sleepiness scale* ou KSS), iii) l'évaluation de la qualité du sommeil nocturne. Ces évaluations ont été complétées par une analyse spectrale. De manière inattendue, seules les comparaisons entre exposition réelle et factice pour les 48 participants sont présentées et aucune comparaison entre personnes se déclarant sensibles et non sensibles n'est donnée. Les résultats ont été les suivants :

- sur le plan clinique, il n'y avait pas de différence entre les sessions d'exposition réelle ou factice sur la durée du sommeil, l'utilisation du téléphone au cours des trois jours précédents les expositions, sur la somnolence avant et pendant les expositions et la qualité du sommeil, excellente dans les deux cas ;
- sur l'EEG, des modifications significatives de l'organisation du sommeil après exposition réelle : durée plus longue du stade 2 de sommeil, latence de survenue du stade 3 plus longue et celle du stade 4 plus courte. En ce qui concerne la latence de survenue du stade 3, ce résultat est similaire à celui obtenu dans l'étude d'Arnetz *et al.* (2007) décrite ci-dessus ;
- l'analyse spectrale des tracés du stade 2 de sommeil a montré des augmentations de puissance dans les bandes de fréquences 0,5-1,5 Hz dans les 30 premières minutes, dans les fréquences 7,5-11,75 Hz dans la première heure et dans les fréquences 4,75-8,25 Hz dans la seconde heure.

Ainsi, cette étude retrouve les augmentations de puissance dans les fréquences alpha et les fréquences basses des fuseaux de sommeil déjà rapportées dans des études antérieures (voir rapport Anses 2013). Cette étude montre également des augmentations de puissance dans les bandes delta et thêta, ainsi que des modifications dans l'organisation générale du sommeil qui n'ont pas été décrites précédemment chez les témoins. La présentation des résultats ne permet pas de dire si les modifications sont plutôt observées chez les personnes se déclarant EHS ou aussi chez les témoins, tout comme l'étude précédente de la même équipe (Arnetz *et al.*, 2007). Malgré la qualité du recrutement des participants et de l'expérimentation, cette étude ne répond donc pas davantage à la question annoncée dans le titre de l'article, qui est de savoir si les effets d'une exposition au GSM sur l'EEG de sommeil sont plus prononcés chez les personnes se déclarant EHS que chez les témoins.

6.2.1.2.6 Études de provocation centrées sur la place de l'effet nocebo dans l'EHS

Oftedal *et al.* (2007) et Stovner *et al.* (2008) ont été les premiers à réaliser une étude, qui a fait l'objet de deux publications, centrée sur la place de l'effet *nocebo* (voir définition au § 7.7) dans l'EHS. Leur étude se distingue à la fois par des critères d'inclusion et d'exclusion très stricts et par le nombre d'expositions (4 réelles et 4 factices par personne). Pour l'essentiel, la méthodologie de cette étude est décrite dans le premier article (Oftedal *et al.* 2007). Le critère d'inclusion principal a été la perception d'une douleur ou d'un inconfort dans la tête pendant ou peu de temps après un appel avec un téléphone mobile d'une durée comprise entre 15 et 30 min. Les personnes

présentant des maux de tête fréquents ou une altération de leur état de santé, ainsi que celles se déclarant sensibles à d'autres sources de champs électromagnétiques ont été exclues. Un deuxième critère d'inclusion a été l'apparition, lors d'un test de provocation ouvert, de symptômes similaires à ceux ressentis lors de l'utilisation d'un téléphone mobile. Sur 36 candidats ayant passé ce test, 24 ont rempli ce critère, mais 17 seulement ont accepté de participer à l'étude complète. Il s'agissait de 5 femmes et de 12 hommes, âgés de 20 à 58 ans, qui se sont prêtés à une étude de provocation randomisée, en double aveugle et *cross-over*. Un signal de type GSM 900, émis par une antenne placée à 8,5 cm de la tête, a été utilisé pour l'exposition réelle ($DAS_{1g} = 1,0 \text{ W/kg}$, $DAS_{10g} = 0,8 \text{ W/kg}$). Toutes les personnes, sauf deux, ont participé à quatre paires de deux sessions, l'une avec exposition réelle et l'autre avec exposition factice, réalisées selon un ordre préétabli. Un délai d'au moins deux jours a été observé entre chaque session. Celles-ci, d'une durée de 2 heures, comportaient trois périodes : une d'adaptation et de repos de 20 minutes, avec un premier recueil des symptômes suivi de l'enregistrement du pouls et de la pression sanguine pendant 10 minutes, puis une période d'exposition (réelle ou factice) de 30 minutes, au cours de laquelle l'enregistrement du pouls et de la pression artérielle a été poursuivie, et, enfin, une période post-exposition, au cours de laquelle l'enregistrement du pouls et de la pression artérielle a été poursuivie pendant 5 minutes et les symptômes recueillis 5 minutes après la fin de l'exposition, puis quatre fois à 15 minutes d'intervalle. Le recueil des symptômes a été poursuivi toutes les heures pendant sept heures après la sortie du laboratoire. Ce recueil a porté sur deux variables (mal de tête et douleur ou inconfort dans la tête, ce dernier étant appelé « autres symptômes » par la suite). L'intensité des scores symptomatiques était évaluée à l'aide d'une échelle visuelle analogique (de 0 à 100 mm). Une troisième variable, appelée douleur et / ou inconfort dans la tête, a été créée en ne retenant que la valeur maximale de l'une des variables mesurées directement. Rapidement après la fin de l'exposition, les participants étaient invités à dire s'ils pensaient avoir été exposés aux radiofréquences ou non, et à dire pourquoi.

Pour l'article de Stovner *et al.* (2008), les personnes ont eu à remplir un questionnaire supplémentaire sur les maux de tête, attribués ou non à l'usage d'un téléphone mobile. Elles ont ensuite été interrogées et examinées par un neurologue pour un diagnostic précis de leurs maux de tête selon la classification internationale (*International Classification of Headache Disorders*, ICHD-2).

Les résultats ont été les suivants :

- les participants ont présenté une augmentation des trois variables symptomatiques pendant la plupart des sessions (68 %), sans effet significatif, ni de l'ordre des essais, ni de la nature de l'exposition, réelle ou factice (Oftedal *et al.* 2007) ;
- les scores symptomatiques moyens ont été :
 - pour la douleur et / ou l'inconfort dans la tête, de 10,1 sous exposition réelle et de 12,6 sous exposition factice ($p = 0,30$) ;
 - pour le mal de tête, de 7,4 sous exposition réelle et de 10,3 sous exposition factice ($p = 0,22$) ;
 - pour les autres symptômes, de 8,1 sous exposition réelle et 11,6 sous exposition factice ($p = 0,19$) ;

avec une répartition équilibrée entre les cas pour lesquels les scores avec exposition réelle étaient supérieurs, égaux ou inférieurs aux scores avec exposition factice. Les scores avec exposition réelle inférieurs aux scores avec exposition factice étaient systématiquement, mais de peu, les plus nombreux (Oftedal *et al.* 2007) ;

- les personnes ont déclaré avoir été exposées après 38 (58 %) des 65 expositions réelles et après 31 (48 %) des 65 expositions factices et n'avoir pas été exposées après 14 (22 %) des expositions réelles ou factices. La différence entre le type d'exposition et ce que les participants en ont pensé n'a pas été significative ($p = 0,27$) (Oftedal *et al.* 2007) ;
- aucun changement de fréquence cardiaque ou de pression sanguine (systolique et diastolique) n'a été observé entre la période de pré-exposition et la période d'exposition, ni

entre la fin de la période d'exposition et la période post-exposition, 5 minutes après la fin de l'exposition (Oftedal *et al.* 2007) ;

- pour les maux de tête attribués avant l'étude à l'usage d'un téléphone mobile, le diagnostic posé par le neurologue a été celui de céphalées de tension (2.2 *Tension-type headache* (TTH) de la classification ICHD-2) chez 16 personnes, la 17^{ème} ne décrivant qu'un son étrange et déplaisant dans l'oreille. La douleur était localisée dans l'oreille ou juste au-dessus pour 10 personnes et dans la tempe pour 3 autres, les 3 dernières la situant soit dans le front, soit dans l'occiput, soit à l'intérieur de la tête. Cette localisation était unilatérale dans tous les cas sauf deux. Les douleurs survenaient, dans un cas 2 à 4 secondes après le début de l'entretien téléphonique, dans neuf cas en moins de 5 minutes, dans deux cas en moins de 30 minutes, et dans quatre cas le temps d'apparition était variable (Stovner *et al.* 2008) ;
- des maux de tête non attribués à l'usage du téléphone mobile ont été retrouvés chez 11 (65 %) des 17 participants. Le diagnostic du neurologue a été celui de migraine sans aura dans 4 cas (avec aussi des migraines avec aura dans un cas), de céphalées de tension dans 8 cas (associées à des migraines dans trois cas) et de céphalées induites par l'alcool dans un cas (Stovner *et al.*, 2008) ;
- bien que le diagnostic de céphalées de tension ait été porté par le neurologue aussi bien pour les maux de tête attribués à l'usage d'un téléphone mobile qu'à ceux non attribués, la plupart des participants a déclaré que les premiers étaient différents des seconds, essentiellement en raison de leur caractère unilatéral. Toutefois, pendant l'étude de provocation, le côté de la douleur n'était pas corrélé à celui de l'exposition (Stovner *et al.*, 2008).

Cette étude repose sur une méthodologie complexe, mais exposée de façon très claire, très détaillée et très rigoureuse. Il en est de même des tests statistiques. Le test de provocation ouvert a comporté une période d'exposition réelle au téléphone mobile. Cette étude apporte plusieurs arguments sérieux en faveur d'un rôle de l'effet *nocebo* dans la survenue des maux de tête chez les personnes qui se déclarent sensibles aux téléphones mobiles. Ces résultats ne peuvent cependant pas être généralisés, car ils ne concernent qu'un petit nombre de personnes particulières se déclarant sensibles uniquement aux téléphones mobiles.

Szemerszky *et al.* (2010) ont également réalisé une étude centrée sur l'effet *nocebo* sur les symptômes physiques rapportés lors d'une exposition à des champs extrêmement basses fréquences 50 Hz et les facteurs psychologiques qui pourraient prédisposer à l'EHS. Cette étude a été doublement originale : les auteurs ont cherché à provoquer cet effet par deux expositions factices successives et, parallèlement, ont étudié, d'une part, les corrélations entre les réponses à ces expositions et, d'autre part, le niveau de perception du risque, l'état d'anxiété à chaque phase de l'étude et certains traits de personnalité. Quarante étudiants hongrois (11 hommes et 29 femmes, âge moyen = 22,80 ± 3,20 ans) ont accepté de participer à l'étude, sans être rémunérés. Même si cela n'est pas clairement formulé, cette étude a inclus des personnes se déclarant EHS et des témoins. Les candidats présentant une affection médicale majeure ou un problème de santé aigu ont été exclus. L'expérimentation a comporté trois phases au cours desquelles les étudiants ont été testés un par un dans une pièce où, assis sur une chaise, face à un ordinateur, ils ont eu à répondre à des questionnaires. Ces trois phases étaient décrites comme étant successivement des phases d'exposition factice, faible et forte. En réalité, le système d'exposition situé sous la chaise n'était pas raccordé au générateur installé dans la pièce (et ce, quelle que soit la phase d'exposition). Au cours de la phase 1 (T₀), il a été demandé aux participants d'auto-évaluer leur sensibilité aux champs électromagnétiques (ou niveau d'EHS), d'indiquer les symptômes (sur une liste de 20) qu'ils s'attendaient à ressentir s'ils étaient exposés à des champs électromagnétiques et d'en évaluer l'intensité sur une échelle à 5 niveaux, puis de répondre à l'inventaire de l'état d'anxiété du moment (STAI-S). Toujours au cours de la phase 1, les participants avaient à remplir des questionnaires de personnalité (LOT-R sur l'optimisme, présenté en Annexe 13, PHQ-15 sur la somatisation et SSAS sur l'amplification somato-sensorielle, présentés en Annexe 7, ainsi qu'une échelle de motivation à coopérer). Au début de la phase 2 (T₁), les personnes étaient

informées qu'elles allaient être exposées à une « faible » exposition à des champs électromagnétiques. Puis, après avoir répondu à nouveau à l'inventaire de l'état d'anxiété du moment, elles étaient invitées à déclencher elles-mêmes l'exposition pendant 10 minutes et à indiquer et à évaluer les symptômes ressentis au cours de cette période. La phase 3 (T₂) était identique à la phase 2, à l'exception de l'information préalable qui était celle d'une exposition « forte », mais dans les limites d'exposition réglementaires : réponse à l'inventaire de l'état d'anxiété du moment, autodéclenchement de l'exposition pendant 10 minutes et évaluation des symptômes ressentis. À la fin de la phase 3, les participants devaient dire dans quelle mesure, sur une échelle à 5 niveaux, ils avaient perçu la présence des champs électromagnétiques au cours des deux périodes de pseudo exposition.

Les résultats ont été les suivants :

- les étudiants ont ressenti plus de symptômes pendant l'exposition factice « forte » ($n = 10,4 \pm 3,7$; écart : 3-19), que pendant l'exposition factice « faible » ($n = 7,1 \pm 3,6$; écart : 1-15). De plus, leurs scores symptomatiques globaux ($13,10 \pm 5,94$ versus $7,72 \pm 4,40$; $p < 0,001$) et leurs scores moyens de perception des champs électromagnétiques ($1,23 \pm 1,29$ versus $0,75 \pm 1,13$; $p < 0,005$) ont été significativement plus élevés pendant l'exposition factice « forte » que pendant l'exposition factice « faible » ;
- les scores symptomatiques globaux obtenus pendant les périodes factices « fortes » et « faibles » ont été fortement corrélés entre eux ($r = 0,93$; $p < 0,001$), mais plus faiblement corrélés avec le score symptomatique global attendu en cas d'exposition ($r = 0,42$ et $0,49$; $p < 0,01$) ;
- il n'y a pas eu de changement significatif de l'état d'anxiété (évalué par les différences T₁-T₀ et T₂-T₀) entre les trois phases de l'étude ;
- le score de motivation coopérative a été inversement et faiblement corrélé aux scores symptomatiques globaux obtenus pour l'exposition factice « forte » ($r = -0,39$; $p < 0,05$) et l'exposition factice « faible » ($r = -0,44$; $p < 0,01$) ;
- parmi les traits de caractère, les plus fortement corrélés aux scores symptomatiques globaux ont été :
 - la tendance à la somatisation (PHQ-15) : $r = 0,68$ ($p < 0,001$) pour l'exposition factice « forte » et $r = 0,71$ ($p < 0,001$) pour l'exposition factice « faible » ;
 - l'amplification somatosensorielle de la perception des symptômes (SSAS) : $r = 0,48$ ($p < 0,01$) pour l'exposition factice « forte » et $r = 0,53$ ($p < 0,001$) pour l'exposition factice « faible ».
- en revanche, l'optimisme (LOT-R) est faiblement et inversement corrélé avec les scores symptomatiques globaux : $r = -0,39$ ($p < 0,05$) pour l'exposition factice « forte » et $r = -0,40$ ($p < 0,05$) pour l'exposition factice « faible » ;
- des analyses de régression linéaire multiples complémentaires ont confirmé ces résultats et ont montré, en outre, que l'amplification somatosensorielle (SSAS) était le seul prédicteur significatif du degré de sévérité de l'EHS autoévalué en début d'étude.

Dans la discussion, les auteurs ont analysé l'apport de leur étude aux hypothèses concernant les relations entre l'autodiagnostic de l'EHS et la symptomatologie fonctionnelle, les effets de l'augmentation de la perception des risques et l'association des traits de personnalité avec la façon de rapporter les symptômes. Ils ont aussi discuté l'hypothèse selon laquelle certains traits de caractère, comme l'amplification somatosensorielle mesurée par l'échelle SSAS, seraient responsables de l'EHS. À chaque étape, ils ont montré la cohérence de la plupart de leurs résultats avec ceux de certaines études antérieures, mais aussi leur discordance en ce qui concerne la disposition à l'optimisme (LOT-R) et l'état d'anxiété du moment. Ce dernier point est particulièrement important, dans la mesure où de nombreuses études ont mis en évidence une augmentation de l'anxiété chez les personnes se déclarant EHS, alors que la présente étude ne montre pas cette augmentation lors des expositions. Pour expliquer cette discordance, les auteurs ont évoqué la possibilité d'un effet plafond, mais n'ont pas fourni les données brutes qui auraient

permis de vérifier cette hypothèse. D'une manière générale, on peut regretter que les auteurs n'aient donné aucune valeur brute (ex : histogramme du nombre de personnes en fonction de la note qu'ils ont attribuée à l'item IEI-CEM, ou à défaut, le score moyen et l'écart-type obtenu à cet item et le nombre de personnes lui ayant attribué la note 0). Les auteurs ont par ailleurs reconnu des limites à leur étude : non représentativité du groupe étudié (composé d'un petit nombre de personnes jeunes, se déclarant EHS et non-EHS, ce qui interdit la généralisation des résultats à des groupes plus âgés et / ou présentant une symptomatologie fonctionnelle plus sévère), absence d'équilibre dans l'ordre des expositions (la « faible » précédant systématiquement la « forte ») et absence de prise en considération des effets biophysiques et de leur interaction possible avec les influences psychosociales. Malgré ses limites et quelques imprécisions rédactionnelles, cette étude peut être considérée comme étant de bonne qualité scientifique : les nombreux paramètres mesurés sont pertinents et, à deux exceptions près (échelle de motivation et évaluation de l'anxiété), fiables ; le protocole n'appelle que des critiques de détail, le traitement statistique des données a été rigoureux et la discussion bien argumentée. Au final, elle représente une contribution intéressante à l'étude de l'effet *nocebo*, sans toutefois permettre de dire si celui-ci est différent chez les personnes se déclarant EHS et chez les non-EHS.

Witthöft *et al.* (2013) ont cherché à déterminer si les médias pouvaient avoir un rôle de suggestion dans la perception et l'autodiagnostic de l'EHS. L'expérience a été réalisée sur 147 volontaires sains, persuadés qu'ils participaient à une expérience sur le Wi-Fi. Les personnes ont été séparées en deux groupes, l'un visionnant un film décrivant les méfaits du Wi-Fi, l'autre visionnant un film neutre sur les champs électromagnétiques. Après le film, les personnes ont été soumises à une exposition factice et ont répondu à plusieurs questionnaires (évaluation du niveau d'inquiétude, du niveau d'anxiété, symptômes de la vie quotidienne). Il ressort de cette expérience :

- que le degré d'inquiétude au sujet des champs électromagnétiques des personnes ayant vu le film sur le danger du Wi-Fi a augmenté ;
- que le score des symptômes a augmenté davantage pour les personnes ayant vu le film sur le danger du Wi-Fi que pour les autres après l'exposition factice ;
- qu'une relation entre le niveau d'anxiété générale et l'augmentation des scores après l'exposition factice a été mise en évidence.

Cette étude laisse supposer que la teneur d'un message diffusé par les médias joue un certain rôle dans la perception négative de l'effet des champs électromagnétiques (effet *nocebo*), rôle pouvant varier en fonction du caractère (plus ou moins anxieux) des personnes.

Szemerszky *et al.* (2016) ont testé l'hypothèse selon laquelle les effets *nocebo* imputés aux champs électromagnétiques seraient dus à un phénomène d'attribution erronée, par une étude au protocole original. Celle-ci comparait les effets d'un comprimé *placebo* présenté comme sédatif et ceux d'une exposition factice à des champs électromagnétiques présentés comme ayant de légers effets négatifs sur les performances cognitives et sur l'interprétation de symptômes somatiques (Szemerszky *et al.* 2016). Ce travail est fondé sur la théorie psychologique de l'attribution causale et de son application à l'attribution de symptômes à des médicaments ou à des facteurs environnementaux. Les auteurs ont recruté 132 étudiants volontaires (50 % d'hommes), âgés de $20,4 \pm 2,4$ ans, qui ont été répartis au hasard en trois groupes comparables : témoins ($n = 44$), comprimé *placebo* ($n = 45$) et simulation d'une exposition à des champs électromagnétiques ($n = 43$). Le protocole a comporté trois étapes : 1) des enregistrements de base de 2 minutes de l'ECG (calcul de la fréquence cardiaque et de sa variabilité) et des conductances cutanées, suivis du remplissage de questionnaires numériques [échelle des inquiétudes de santé liées à la vie moderne (*Modern Health Worries* – MHW, voir Annexe 13, p343, échelle d'amplification somatosensorielle (SSAS, voir Annexe 7, p333), court inventaire d'anxiété pour la santé (SHAI, (Salkovskis *et al.* 2002), échelle de motivation à coopérer (CoMotiv) élaborée par les auteurs et une liste de 26 symptômes] ; 2) les participants ont reçu soit un comprimé *placebo*, soit une exposition factice aux champs électromagnétiques, soit un verre d'eau ; 3) dix minutes plus tard, l'ECG et les conductances cutanées ont à nouveau été enregistrés, puis les participants ont effectué une tâche cognitive « de vigilance » pendant 14 minutes, utilisée comme distracteur

(résultats non enregistrés) avant de remplir à nouveau la liste de symptômes et d'indiquer à quoi ils attribuaient chaque symptôme. De plus, les personnes des groupes *placebo* et champs électromagnétiques simulés ont dû préciser, sur une échelle de 4 (1 = pas du tout, 2 = légèrement, 3 = nettement, 4 = fortement), dans quelle mesure le comprimé ou l'exposition avait gêné leurs performances pendant la tâche cognitive. Les résultats ont été les suivants :

- avant l'intervention (comprimé, exposition ou verre d'eau), les valeurs de la fréquence cardiaque et de sa variabilité, des conductances cutanées, ainsi que le score symptomatique ne différaient pas entre les trois groupes ;
- après l'intervention, les symptômes rapportés, les valeurs de la fréquence cardiaque, de la variabilité sinusale et des conductances cutanées étaient inchangées, quel que soit le groupe considéré ;
- un impact significatif sur la performance cognitive a été faussement attribué à l'intervention, qu'il s'agisse de la prise du comprimé *placebo* ($1,53 \pm 0,74$, $p < 0,001$) ou de l'exposition factice aux champs électromagnétiques ($1,64 \pm 0,54$, $p < 0,001$) ;
- la médiane des scores de symptômes attribués au comprimé *placebo* et à l'exposition factice aux champs électromagnétiques ne différait pas entre les deux groupes ;
- l'impact sur les performances cognitives faussement attribué à l'intervention a été positivement corrélé au score des inquiétudes sanitaires liées à la vie moderne ($r = 0,30$, $p < 0,01$) et négativement aux changements de conductance cutanée ($r = -0,26$, $p < 0,05$). Aucune relation n'a été observée entre les attributions de symptômes à l'intervention et les différentes variables psychologiques ou physiologiques mesurées. Les deux attributions (de symptômes et d'affaiblissement de la performance cognitive) étaient significativement corrélées entre elles ($r = 0,30$, $p < 0,01$).

Cette étude présente plusieurs faiblesses méthodologiques reconnues par les auteurs : 1) tous les volontaires étaient des étudiants âgés d'une vingtaine d'années, recevant en échange de leur participation un crédit de points à valoir sur leurs évaluations. Toutefois, le fait que ces résultats aient été obtenus chez de telles personnes est, *a contrario*, un argument fort en faveur de l'hypothèse selon laquelle l'effet *nocebo* résulterait « naturellement » d'une attribution causale erronée (dans la mesure, bien sûr, où l'existence de ce mécanisme serait démontrée dans d'autres groupes) ; 2) demander à ces étudiants, après l'intervention et la tâche cognitive, à quoi ils attribuaient leurs symptômes et leurs difficultés cognitives a pu jouer un rôle dans le processus d'attribution (il est regrettable que ces questions n'aient pas été posées au groupe témoin. Ceci aurait permis de préciser les causes de l'attribution), 3) le protocole a été conçu pour minimiser l'anxiété et l'attente d'effets indésirables, ce qui pourrait expliquer l'absence de changement des symptômes et des paramètres physiologiques, mais donne plus de poids au fait que le processus d'attribution ait été mesurable dans trois occasions sur quatre ; 4) les auteurs n'ont pas donné les résultats de la tâche de vigilance, ce qui introduit un doute sur la validité de l'hypothèse selon laquelle cette tâche hautement exigeante pouvait difficilement être exécutée sans erreur et qu'en conséquence, certains participants ont pu essayer de trouver une excuse externe à leurs performances. Si tel n'était pas le cas, l'interprétation globale de cette étude devrait être reconsidérée. Toutefois, ces critiques ne remettent pas en cause l'originalité et l'intérêt des hypothèses ou la conception générale de l'étude, ainsi que les résultats montrant (1) des réponses presque identiques des groupes *placebo* et champs électromagnétiques pour ce qui concerne la fausse attribution à l'intervention des difficultés cognitives rencontrées lors de la tâche de vigilance et (2) la corrélation significative de cette attribution avec le score des inquiétudes sanitaires liées à la vie moderne. En conséquence, cette étude est un travail préliminaire qui, en raison des progrès récents accomplis dans la connaissance des mécanismes neurobiologiques de l'effet *nocebo* imputé aux médicaments, ouvre des perspectives de recherche intéressantes sur les mécanismes neurobiologiques imputés aux champs électromagnétiques. Pour l'instant, la conclusion selon laquelle l'effet *nocebo* attribué à un médicament ou à des facteurs environnementaux serait un effet indésirable inévitable du fonctionnement cognitivo-affectif reste une hypothèse qui mérite d'être validée par des futures études inspirées du présent travail.

6.2.1.2.7 Étude de provocation de symptômes attribués à l'EHS par d'autres facteurs que les champs électromagnétiques

L'hypothèse qu'une exposition à d'autres facteurs que les champs électromagnétiques serait nécessaire, en association ou non avec ces derniers, pour provoquer les symptômes dont se plaignent les personnes qui se déclarent EHS a été émise par des personnes se déclarant EHS ou des associations les représentant (cf. § 7.8). Cette hypothèse permettrait d'expliquer que, dans les conditions expérimentales exposées précédemment, ces personnes ont été, dans l'immense majorité des cas, incapables de démontrer leur aptitude à différencier la présence et l'absence de champs électromagnétiques, et n'ont pas présenté plus de symptômes fonctionnels pendant les périodes d'exposition que pendant les périodes de non exposition.

Sandström *et al.* (1997) ont testé cette hypothèse, en exposant 10 personnes se déclarant EHS (3 hommes et 7 femmes ; âge moyen = 47 ans) et 10 témoins (4 hommes et 6 femmes ; âge moyen = 37 ans) soit à une lampe stroboscopique émettant des flash lumineux à des fréquences comprises entre 20 Hz et 75 Hz (durée d'un flash environ 10 µs), soit à 2 projecteurs de diapositives induisant différentes profondeurs de la modulation d'amplitude lumineuse (fréquence de 45 Hz). Ces expositions avaient une durée de 1,5 à 2 minutes et étaient séparées par des périodes de repos de 2 minutes. L'étude a porté sur l'électrorétinogramme (ERG) et les potentiels évoqués visuels (PEV). De plus, avant la présentation de la lumière, un électrocardiogramme a été enregistré (mesure des intervalles du pouls « *interbeat intervals* » ou IBI) sur une période de 10 minutes comprenant 5 minutes de communication active avec un membre du personnel et 5 minutes de période de relaxation dans l'obscurité.

Les résultats ont été les suivants :

- dans les deux groupes, les potentiels évoqués visuels avaient une forme sinusoïdale dont la fréquence fondamentale était égale à la fréquence de stimulation, et leur amplitude a diminué avec l'augmentation de cette fréquence. Ces résultats sont conformes aux données de la littérature ;
- chez les personnes se déclarant EHS, la courbe des amplitudes moyennes des potentiels évoqués visuels (PEV) en fonction des fréquences de stimulation était significativement supérieure à celle observée chez les témoins ($p < 0,05$), sans qu'il y ait de différence entre les pentes de ces courbes ;
- de même, pour une fréquence de stimulation de 45 Hz, l'amplitude moyenne des PEV a augmenté, dans les deux groupes, avec la modulation de l'intensité lumineuse. À nouveau, la courbe des amplitudes moyennes des PEV en fonction du degré de modulation était significativement plus élevée chez les personnes se déclarant EHS que chez les témoins ($p < 0,05$) ;
- en ce qui concerne les ERG, les courbes d'amplitude moyenne avaient la même disposition générale que celles des PEV, à savoir (1) diminution des amplitudes avec la fréquence de stimulation et augmentation avec le degré de modulation de l'intensité lumineuse, et (2) amplitudes moyennes des ERG des personnes se déclarant EHS constamment supérieures à celles des témoins, mais sans que ces différences soient significatives ;
- chez les personnes se déclarant EHS, l'intervalle moyen entre battements cardiaques (l'inverse de la fréquence cardiaque) augmentait significativement ($p < 0,05$) pendant la période de relaxation ($0,75 \pm 0,08$ sec) par rapport à la période de communication active ($0,72 \pm 0,09$), alors qu'il était stable chez les témoins ($0,85 \pm 0,09$ versus $0,84 \pm 0,10$ sec), la différence entre les deux groupes étant significative (Sandström *et al.* 1997).

Comme les auteurs le laissent entendre dans la discussion, cette étude doit être considérée comme préliminaire. Elle porte sur un petit nombre de personnes dont les critères de sélection ne sont pas précisés. Les différences observées entre personnes se déclarant EHS et témoins sont faibles, même si certaines sont significatives. De plus, l'étude n'aborde pas le problème des relations entre données physiologiques et symptômes cliniques, ce qui pose le problème de la significativité réelle des différences observées. Néanmoins, par la pertinence de son protocole

expérimental et la cohérence de ses résultats, elle suggère que les personnes se déclarant EHS pourraient avoir une sensibilité cérébrale accrue à la lumière, sensibilité qui pourrait avoir un effet sur le système nerveux autonome (accélération significative du rythme cardiaque), hypothèses qui mériteraient d'être explorées de façon plus approfondie selon les pistes proposées par les auteurs.

6.2.1.2.8 *Étude de provocation couplant le paradigme de provocation par champs électromagnétiques et le paradigme d'activation cérébrale*

Landgrebe et al. (2008a) ont réalisé une étude de provocation complexe qui a déjà été analysée dans le rapport Afsset (2009). Une demande de réexamen ayant été formulée dans le cadre de la consultation publique du pré-rapport d'expertise, une analyse complémentaire est présentée ci-après.

Rappel de l'analyse de 2009

« Ce travail couple pour la première fois le paradigme de provocation par champs électromagnétiques et le paradigme d'activation cérébrale sur lequel a reposé les grands progrès accomplis ces 20 dernières années dans la connaissance des bases cérébrales des grandes fonctions psychiques. L'originalité de l'étude réside dans le choix des critères (activation des cortex cingulaire antérieur et insulaire) de réponse à une exposition factice à des radiofréquences de type téléphonie mobile. Le protocole utilisé n'appelle aucune réserve méthodologique : comparaison de 15 sujets EHS et de 15 témoins sains appariés en âge et en genre, comparaison d'une exposition factice à des radiofréquences et d'une exposition à la chaleur. Pendant l'anticipation et l'exposition factice aux radiofréquences de type téléphonie mobile, les cortex cingulaire antérieur et insulaire ainsi que le gyrus fusiforme ont été activés chez les sujets EHS et non chez les témoins, alors que la stimulation calorique provoquait une stimulation similaire dans les deux groupes. Une relation entre les symptômes ressentis pendant l'exposition factice et l'activation spécifique des cortex cingulaire antérieur et insulaire chez les sujets EHS constitue un argument fort en faveur de l'implication de ces aires corticales dans les perceptions désagréables et la génération de symptômes fonctionnels somatiques. Ce travail, qui demande à être reproduit, ouvre de réelles perspectives de démonstration de l'effet nocebo dans la genèse de l'EHS. »

Nouvelle analyse

L'étude de Landgrebe et al. (2008a) n'a pas été répliquée. Il n'est donc pas possible de conclure sur l'implication des structures cérébrales dans la symptomatologie des personnes se déclarant EHS. Cependant, en raison de l'importance de cet article dans la discussion sur le rôle éventuel d'un effet *nocebo* dans l'EHS, il est parfaitement légitime d'en réexaminer soigneusement ses fondements scientifiques, sa méthodologie et ses résultats.

L'étude est fondée sur le « paradigme d'activation » qui consistait à étudier à l'aide de techniques d'imagerie fonctionnelle cérébrale les réponses à des *stimuli* sensitifs ou sensoriel ou à des tâches motrices ou cognitives. Ce paradigme consiste à enregistrer des séries d'images obtenues pendant un seul temps expérimental, les unes pendant des périodes de « repos » et les autres dans des conditions expérimentales différentes, puis à effectuer des soustractions entre ces différentes images pour faire apparaître les structures cérébrales impliquées dans une condition expérimentale donnée. Mis en œuvre depuis le début des années 1970 (Olesen 1971), ce paradigme a donné lieu à des milliers d'études, qui ont permis de constituer un corpus de connaissances solides sur les bases cérébrales des fonctions sensitivo-motrices et cognitives. Il est évident que l'usage de ce paradigme exige une grande rigueur méthodologique dans la sélection des participants, dans la conception du protocole expérimental et des tests d'activation, ainsi que dans l'acquisition et le traitement des images fonctionnelles.

Dans l'étude de Landgrebe et al. (2008), les deux groupes de personnes incluses dans l'étude ont été parfaitement appariés selon l'âge et le genre (15 personnes se déclarant EHS (6 femmes, âge moyen = $47,7 \pm 10,5$ ans) et 15 témoins (6 femmes, âge moyen = $46,9 \pm 9,9$ ans)), ainsi que selon leurs lieux de vie ou de travail. Ces effectifs ont été de l'ordre de ceux qui sont habituellement inclus dans les études basées sur le paradigme d'activation. Toutes les personnes avaient déjà participé à une autre étude (Landgrebe et al. 2008b). Toutes les personnes se déclarant EHS

avaient un score symptomatique élevé (> 19 sur l'échelle de Ratisbonne, cf. § 3.4.2). Le groupe témoin ne comprenait que des personnes n'ayant jamais ressenti le moindre symptôme en relation avec les expositions aux radiofréquences.

Le protocole a comporté 48 tests d'une durée de 24 secondes chacun (24 expositions factices à un téléphone mobile et 24 expositions à des températures de 42°C, 45°C et 48°C). Chaque test a eu un déroulement identique : (1) la condition de stimulation a été annoncée, pendant 2 à 8 secondes, par une icône représentant soit un téléphone mobile, soit un thermomètre apparaissant sur un fond blanc ; (2) cet indice a été suivi d'une période d'exposition de 8 secondes, pendant laquelle le fond apparaissait en rouge ; (3) puis, pendant 6 secondes, les participants étaient invités à évaluer, sur une échelle de 5 points, le degré de désagrément occasionné par le stimulus ; (4) enfin, une période de repos de 2 à 8 secondes était observée. Les deux conditions (température ou exposition factice à un téléphone mobile) ont été présentées dans un ordre pseudo-aléatoire.

Les stimuli thermiques locaux (42°C, 45°C et 48°C) ont été appliqués à l'aide d'une thermodé¹⁵⁷ fixée au poignet gauche. Les expositions factices au téléphone mobile ont été délivrées à l'aide d'un appareil présenté comme spécialement construit pour fonctionner dans un scanner IRM (aucun doute n'a été émis sur la faisabilité du dispositif expérimental) et fixé sur la surface supéro-interne droite de la bobine de tête. L'information standardisée préalable au recueil du consentement mentionnait seulement qu'il s'agissait d'investiguer l'activation cérébrale associée aux perceptions désagréables induites soit par une stimulation thermique, soit par une exposition à un téléphone mobile. À la fin de l'expérience, les participants ont été informés que le téléphone utilisé était factice. Ces modalités d'information sont parfaitement conformes aux règles internationales et françaises de protection des personnes dans la recherche médicale. Elles sont d'usage courant dans le vaste champ des recherches étudiant les effets des croyances sur les perceptions, les interprétations et les comportements des personnes.

La technique IRM d'imagerie fonctionnelle cérébrale a utilisé des images pondérées en T2 acquises par un appareil 3 Tesla selon la technique de référence à l'époque où l'étude a été réalisée¹⁵⁸. Pour les comparaisons entre personnes se déclarant EHS et témoins, seules les premières ayant eu un score de désagrément $\geq 1,5$ ($n=11$) ont été retenues (tous les témoins ont eu un score de désagrément $< 1,5$). Les cartes de T (*T-maps*) ont été calculées en unités de contraste pour les différences « stimulation thermique *versus* baseline », « stimulation par téléphone mobile *versus* baseline ». Une analyse de la variance à deux facteurs (EHS *versus* témoins et exposition thermique *versus* exposition au téléphone mobile) a été utilisée pour tester les principaux effets, l'interaction, les effets dans un groupe et les différences de groupes. Toutes ces procédures sont très classiques et décrites avec précision ;

Cette analyse de la variance, appliquée aux données d'imagerie, a mis en évidence une interaction significative entre les facteurs « groupe » et « type de stimulation », avec des activations significatives ($p < 0,001$) dans les cortex cingulaires et de l'insula (aires corticales dont l'activation accompagne la perception de la douleur) et les gyri frontaux inférieur et moyen, indiquant que les personnes se déclarant EHS réagissaient plus fortement à l'exposition au téléphone mobile que les témoins. Des analyses *post-hoc* ont permis d'apporter les précisions suivantes :

¹⁵⁷ Il s'agit du terme employé par les auteurs pour désigner un appareil du commerce, Thermal Sensory Analyser, Medoc Inc., Israël.

¹⁵⁸ Il s'agit de la méthode d'écho planar (EPI) avec une résolution spatiale de 3 x 3 x 3 mm par voxel.

- stimulation thermique :
 - avant (anticipation) et pendant la stimulation, des activations significatives (augmentation du contraste par rapport à la condition de repos) ont été observées dans les deux groupes dans des aires cérébrales à peu près superposables ;
 - après la stimulation, le degré de désagrément moyen a augmenté significativement ($p < 0,05$) en fonction de la température (42, 45 et 48°C), aussi bien dans le groupe témoin (2,24, 2,98, 4,3), que dans le groupe de personnes se déclarant EHS (2,05, 2,95, 3,41), sans qu'il y ait de différence significative entre les deux groupes ;
- stimulation factice au téléphone mobile (seuls les 11 personnes se déclarant EHS qui ont eu un score de désagrément $\geq 1,5$ ont été retenues pour ces comparaisons) ;
 - avant la stimulation (anticipation), les personnes se déclarant EHS ont présenté des activations très significatives ($p < 0,001$) du gyrus fusiforme, des gyri temporaux inférieur et moyen et du cervelet du côté droit, alors que les témoins n'ont présenté aucune activation ;
 - pendant la stimulation (exposition factice au téléphone mobile *versus baseline*), les personnes se déclarant EHS ont présenté des activations significatives ($p < 0,05$) ainsi que dans les aires corticales dont l'activation accompagne la perception de la douleur (cortex cingulaires antérieurs et insulaires), alors que les témoins n'ont présenté aucune activation. Une comparaison entre les deux groupes a montré une activation significativement plus élevée chez les personnes se déclarant EHS que chez les témoins ($p < 0,001$) dans le gyrus frontal inférieur et le cortex insulaire antérieur du côté droit, ainsi que dans les deux gyri frontaux moyen et supérieur et dans les deux gyri cingulaires ;
 - après la stimulation, la comparaison entre les scores de désagrément moyens obtenus chez les 11 personnes se déclarant EHS ayant un score $> 1,5$ et le groupe témoin a fait apparaître une différence significative ($p < 0,021$) entre les deux groupes (Landgrebe et al. 2008a).

Dans la discussion, les auteurs ont comparé leurs résultats avec ceux obtenus antérieurement avec le paradigme d'activation dans des situations d'anticipation de la douleur et de perception de douleurs induites par des stimuli réels et simulés. Cette comparaison a fait ressortir le rôle du gyrus fusiforme dans les processus d'anticipation, et celui des deux cortex cingulaires antérieurs et des deux cortex insulaires antérieurs dans la perception du désagrément et de la douleur, ainsi que dans la génération des syndromes fonctionnels. La très faible durée des étapes de chaque test et l'enchaînement de ces derniers ne permet pas de mettre en doute la validité des résultats, car cette procédure a permis de retrouver les données de la littérature quand elle a été mise en œuvre pour étudier les effets d'une stimulation thermique. Toutefois, comme les auteurs ont tenu à le préciser, ces données n'expliquent pas comment ces altérations du cortex cérébral sont impliquées dans la génération de symptômes chez les personnes se déclarant EHS.

Cette analyse représente un travail rigoureux, n'appelant aucune réserve méthodologique et produisant des résultats cohérents entre eux et avec les données de la littérature. Il n'y a pas lieu de modifier l'analyse plus succincte qui en avait été faite dans le rapport publié par l'Afsset en 2009.

6.2.2 Discussion sur les études déclarant s'intéresser au « bien-être » chez les personnes se déclarant EHS

Quelques études de provocation incluant des personnes se déclarant EHS utilisent l'expression « bien-être », et sont discutées ci-après.

6.2.2.1 Introduction sur le « bien-être »

« La santé est un état complet de bien-être physique, mental et social et ne consiste pas seulement en une absence de maladie ou d'infirmité » (définition OMS, 1946). En juin 2012, s'est

tenue à Paris la deuxième réunion du groupe d'experts du Bureau régional pour l'Europe de l'OMS dans le cadre de la politique de santé européenne à horizon 2020. Son but était de définir le concept de bien-être dans le contexte de « Santé 2020 » et de déterminer quels travaux étaient nécessaires pour développer des indicateurs de bien-être, ainsi que les cibles à atteindre. Le groupe d'experts a proposé du bien-être la définition de travail suivante : « Le bien-être a deux dimensions, subjective et objective. Il comprend l'expérience de la vie qu'ont les personnes, ainsi que la comparaison des conditions de vie en fonction de normes et valeurs sociales ». De ces travaux, on doit retenir que le bien-être est multidimensionnel, que la santé contribue au bien-être et le bien-être à la santé, que le bien-être peut être vu comme un concept et une entité en lui-même et se compose de différents éléments (objectifs et subjectifs) (voir quelques exemples de questionnaires explorant la notion de bien-être en Annexe 9).

6.2.2.2 Réflexion au sujet des études déclarant s'intéresser au « bien-être » chez les personnes se déclarant EHS

L'origine du débat concernant la question du bien-être chez les EHS trouve sa source dans un rapport du laboratoire néerlandais TNO publié en 2003 (*the Netherlands Organisation for Applied Scientific Research, Physics and Electronics Laboratory, Zwamborn et al., 2003*), décrivant une étude conjointe des effets des champs électromagnétiques sur le bien-être et la cognition (cette étude est présentée et analysée au § 6.2.1.2.4, p 176). Au total, quatre articles relatifs à des personnes se déclarant EHS s'intéressent à leur « bien-être » (Zwamborn et al., 2003 ; Regel et al., 2006 ; Augner et al., 2009a, Eltiti et al., 2015), ainsi que deux revues (Augner et al. 2012, Kundi and Hutter 2009). Ces études, qui traitent des effets de l'exposition aux radiofréquences sur le bien-être et la santé, sont basées sur le recueil de symptômes subjectifs (voir Annexe 7) et de questionnaires explorant la notion de bien-être (voir Annexe 9).

Comme pour les autres études, les groupes de personnes se déclarant EHS sont constitués sur la base d'auto-déclarations et, parfois, après réponse à des questionnaires qui permettent d'apprécier leur état de santé et dans quelle mesure ils attribuent leurs symptômes aux champs électromagnétiques.

L'utilisation de questionnaires et d'échelles de somatisation validés peut seule permettre d'objectiver les résultats. Cependant, aucune échelle n'intègre à la fois la notion d'intensité et de durée des symptômes. Les symptômes les plus fréquemment pris en compte dans les questionnaires sont les maux de tête, la fatigue, le stress, l'irritabilité, les troubles du sommeil et les acouphènes, ne donnant qu'une vision partielle du bien-être des personnes.

Au final, le groupe de travail de l'Anses considère que l'usage du terme « bien-être » est inapproprié pour ce genre d'étude. En effet, il n'y est en fait pas question de bien-être, mais de symptômes subjectifs et d'analyses de personnalité (test du *Big-Five* par exemple, présenté en Annexe 13).

6.2.3 **Réflexion sur les limites des études de provocation**

Les études de provocation étudient le lien de causalité éventuel entre l'exposition aux champs électromagnétiques et l'EHS. Elles peuvent avoir trois objectifs distincts :

- 1) la recherche de la capacité des personnes à percevoir ou non les champs électromagnétiques, c'est-à-dire à identifier s'ils sont soumis à une exposition réelle ou factice ;
- 2) l'identification de symptômes spécifiques liés à l'exposition, tant en ce qui concerne la nature des symptômes que leur sévérité ;
- 3) la mise en évidence d'effets spécifiques sur des fonctions précises : cognition, sommeil, système nerveux autonome, etc.

Ces trois types d'études de provocation méritent une analyse globale, car quel que soit leur objectif, elles utilisent une méthodologie similaire qui peut comporter un certain nombre de limites, mises en avant notamment par certaines associations de personnes se déclarant EHS, qui affirment que les études de provocation ne prennent pas en compte les spécificités de l'EHS (cf. le

document non publié intitulé « Lorsque les études de provocation ne prennent pas en compte les spécificités de l'hypersensibilité électromagnétique » rédigé et transmis par l'association Électrosensibles de France/Priartem).

Il faut toutefois noter que les expérimentations donnant lieu à publications subissent toutes une expertise (revue par les pairs) quant aux protocoles, au choix des participants, aux analyses statistiques utilisées et que, même si cet examen n'est pas infaillible, il permet d'éliminer la plupart des études présentant des défauts méthodologiques majeurs. De plus, le groupe de travail a procédé à une évaluation critique de ces publications.

Ainsi, le recrutement et la sélection des participants, la conduite de l'expérimentation (lieux, sources, protocoles d'exposition) et l'analyse des résultats sont susceptibles d'impacter significativement les résultats des études de provocation.

Recrutement et sélection des sujets

Le recrutement des participants représente une première condition limitante des études de provocation. Un échantillon de sujets recrutés en population générale (par annonces dans la presse, ou auprès de médecins généralistes) a de fortes chances d'être différent d'un échantillon recruté par le truchement d'une association de malades (cf. Van Dongen *et al.* (2014) par exemple, décrit au § 6.1.1.2). Les conditions de réalisation de l'étude, en laboratoire, peuvent décourager les personnes se déclarant EHS dont les symptômes sont les plus sévères, d'y participer, et, à moins que l'étude ne soit conduite dans un environnement très faiblement exposé, aboutir au recrutement de personnes peu ou moyennement sensibles. À titre d'exemple, une association de malades a encouragé ses adhérents à participer à une étude de caractérisation de l'EHS, dans la mesure où cette étude se déroulait dans un lieu faiblement exposé et n'était pas une étude de provocation¹⁵⁹. Pour contourner cette difficulté et atteindre des personnes qui craindraient de devoir se rendre dans un lieu fortement exposé, des études sont actuellement en cours pour réaliser des essais de provocation dans un lieu familier, le domicile de la personne se déclarant EHS (comme dans l'étude de : (Huss *et al.* 2016) ou dans un environnement contrôlé (cf. les projets Else et Presense financés par l'Anses). En tout état de cause, il apparaît important que s'établisse une relation de confiance entre les personnes recrutées et les expérimentateurs¹⁶⁰.

La sélection des participants est un autre point crucial. L'inclusion des personnes se déclarant EHS varie d'une étude à l'autre (auto-déclaration, questionnaires, etc.). L'absence de caractérisation clinique de l'EHS pourrait avoir entraîné une hétérogénéité des groupes de participants, -à supposer qu'une telle hétérogénéité existe réellement-, qui se sont prêtés à des études de provocation ou à des études portant sur les facteurs biologiques associés. Cette hétérogénéité pourrait, par exemple, être due à l'inclusion possible de personnes non réellement EHS et / ou présentant des états de gravité très différents. Le contexte des essais cliniques, imposant une sélection souvent drastique des volontaires de façon à limiter les biais d'interprétation, conduit inmanquablement à inclure dans les essais de provocation des personnes non représentatives de la population se déclarant EHS.

Comment définir ce qu'est une personne se déclarant EHS ? Est-ce une personne qui est en permanence touchée par ses symptômes, ou y-a-t-il des périodes de crises ? Autrement dit, une personnes se déclarant EHS est-elle toujours sensible de la même façon ? Aujourd'hui, la définition d'une personne se déclarant EHS est toujours difficile à décrire. Schröttner et Leitgeb (2007) pointent du doigt l'importance que peut avoir la sélection des personnes se déclarant EHS dans une étude et montrent qu'en fonction des critères utilisés pour les sélectionner, les résultats expérimentaux peuvent complètement changer. Et ce, d'autant plus que selon certaines

¹⁵⁹ <http://www.electrosensible.org/b2/index.php/accueil/lancement-d-une-etude-scientifique>

¹⁶⁰ L'absence de cette relation de confiance a conduit une grande étude nationale, l'étude « Cochin », à rencontrer des difficultés de recrutement (cf. les notes de bas de page n° 46 et 47, p42 sur le sujet.

associations, la sensibilité des personnes se déclarant EHS aux champs électromagnétiques évolue au cours du temps. Au début de l'apparition des troubles décrits par les personnes se déclarant EHS (phase aiguë), elles seraient, d'après certains témoignages, plus enclines à une réponse immédiate à une exposition aux champs électromagnétiques et seraient donc de « bons sujets » pour des essais de provocation, alors que parmi celles présentant des symptômes plus anciens, certaines n'auraient plus de sensibilité immédiate (phase chronique).

Faut-il tenir compte dans les critères de sélection des personnes se déclarant EHS de leur exposition aux champs électromagnétiques dans les jours précédant l'étude (« période d'exclusion » ; effet rémanent ?). Les questionnaires de certaines études font en effet mention de l'utilisation de téléphone mobile par ces personnes et les témoins. Dans les études comportant un groupe témoin, il est important que les personnes incluses dans ce groupe soient les plus proches possible de celles du groupe EHS.

Cependant, à trop vouloir homogénéiser les groupes entre témoins et personnes se déclarant EHS, n'élimine-t-on pas les « vraies » personnes EHS parce qu'elles ont des troubles cardiaques ou des troubles du sommeil, par exemple ? Ces symptômes étant peut-être liés à l'état EHS ? Certaines de ces questions sont reprises dans la publication de Schröttner et Leitgeb (2006) qui insistent sur l'importance d'une sélection adéquate des participants à ce genre d'étude.

En particulier, plusieurs études indiquent qu'une proportion notable de personnes se déclarant EHS déclarent également souffrir de SIOC (voir § 3.8 sur les relations possibles entre EHS et d'autres syndromes). Faut-il exclure ces personnes ou seulement en tenir compte dans les analyses ? Il n'est pas possible de répondre à cette question dans l'état actuel des connaissances.

Taille des échantillons

Un autre défaut méthodologique constaté est la taille souvent très réduite des échantillons et l'absence de calcul *a priori* du nombre de sujets à inclure en fonction de l'hypothèse formulée et donc une très faible puissance statistique des études.

De plus, il est parfois observé dans les études l'utilisation de tests statistiques à mauvais escient, qui ne permettent pas d'accorder confiance aux résultats et ce, quels qu'ils soient. À titre d'exemple, pour démontrer une variation d'au moins 15 % de la valeur du coefficient de Lyapounov sous l'effet d'une exposition aux radiofréquences avec un risque *alpha* de 5 % et une puissance de 80 %, sur la base des données de l'étude de Yimaz & Yildiz (2010), le nombre de personnes à inclure est d'environ 200. Or, dans cet essai, seulement 16 personnes ont été incluses (Yimaz & Yildiz, 2010). Seule une (ou plusieurs) étude(s) multicentrique(s) serai(en)t à même de fournir la puissance statistique nécessaire.

Il est à noter que des stratégies alternatives, telles que la méta-analyse, semblent difficilement applicables dans le domaine de l'étude des effets des champs électromagnétiques du fait de la disparité très importante des sources d'exposition utilisées et de l'hétérogénéité des protocoles expérimentaux.

Conduite de l'expérimentation

Le schéma conceptuel de l'étude est d'une importance primordiale. Un protocole des plus convaincants est une étude d'intervention randomisée en double aveugle. Le protocole expérimental des études de provocation avec un schéma croisé dans lequel le même sujet est exposé de façon randomisée à plusieurs périodes d'expositions réelles ou factices, en simple ou double aveugle, a l'avantage de réduire la variabilité des mesures, puisque chaque sujet est son propre témoin. Cependant, il impose un certain nombre de vérifications et le respect de critères précis pour que leurs résultats soient considérés comme acceptables. Ces éléments de contrôle sont rarement présents dans les études publiées à ce jour sur l'effet des champs électromagnétiques :

- ce type d'étude est habituellement utilisé pour évaluer l'impact d'une intervention par rapport à une situation de référence et il faut donc impérativement que les groupes de participants formés par la randomisation soient strictement comparables, non seulement

pour les critères classiquement analysés (tels que l'âge, le genre, la masse corporelle, etc.), mais aussi en matière de sévérité des symptômes ou de la maladie étudiée ;

- le critère précédent rend compte du fait que mêler dans le même essai croisé des personnes se déclarant EHS et des témoins conduit à poser simultanément deux questions : 1) les champs électromagnétiques ont-ils des effets ? et 2) ces effets sont-ils comparables entre EHS et non-EHS ? Or, un critère méthodologique d'un essai, quel que soit son objectif est de répondre à une seule question (objectif principal) ;
- la comparabilité doit être vérifiée au moment de l'inclusion dans l'étude mais également avant chaque période d'exposition. Concrètement, pour le cas d'une étude de provocation étudiant l'effet d'une exposition aux champs électromagnétiques *versus* une exposition factice, la randomisation doit aboutir à deux groupes qui subiront deux périodes d'expérimentation : un groupe avec une exposition réelle, puis factice, et un groupe avec une exposition factice, puis réelle. En l'absence de comparabilité avant le début de chaque période, l'essai sera non recevable. Cela peut signifier que l'intervention subie durant la première période a des effets rémanents, qui vont biaiser les résultats de la seconde période. De ce fait, l'analyse statistique doit comporter une analyse séparée pour chaque période, avec la recherche d'un effet période avant de regrouper les données pour en faire l'analyse de l'effet de l'intervention. La rémanence éventuelle de l'effet de l'intervention subie pendant la période 1 peut être prévenue par le respect d'une fenêtre suffisamment longue entre les deux périodes. La durée de cette fenêtre dépend des situations cliniques, mais peut obliger à des études cinétiques spécifiques ;
- la stabilité de la maladie pendant toute la durée de l'essai. Ce critère découle du précédent, car si la maladie n'est pas stable, le critère de comparabilité ne sera pas respecté. Concernant les personnes se déclarant EHS, outre les difficultés liées au diagnostic qui ne seront pas reprises ici, les études de provocation ne font jamais état du mode évolutif des symptômes dans le temps (symptômes chroniques stables, évolution par crises, etc.). Ce critère n'est donc pas respecté dans les études publiées à ce jour ;
- les personnes incluses doivent constituer des groupes homogènes en matière d'ancienneté des symptômes, de leur sévérité, etc. Ceci pose la question du caractère optimal du recrutement des personnes se déclarant EHS dans ces études. Cette hétérogénéité potentielle est peut-être responsable d'un manque de discrimination n'ayant pas permis de mettre en évidence d'éventuels effets de faible ampleur ;
- au cours d'un essai croisé, les mesures constituant les critères de jugement sont effectuées à plusieurs reprises. Elles doivent donc être reproductibles avec une variabilité faible et surtout ne pas être influencées par la répétition des tests.

Les lieux où sont réalisés ces études de provocation et les protocoles d'exposition doivent être adaptés. La plupart des études de provocation ont été réalisées en cage de Faraday anéchoïque dans des conditions d'exposition normalisées et, de fait, non parfaitement représentatives de l'environnement réel (condition thermique ambiante, lumière, champs électromagnétiques, humidité, etc.). Dans des conditions plus proches de la réalité quotidienne des personnes, il est important de caractériser les sources et le bruit de fond, et de vérifier notamment que des émissions résiduelles d'appareils ne viennent pas perturber les expositions factices.

Il est à noter que la plupart des études de provocation portent sur un petit nombre de stimulations (de courte durée), et que la chronologie des réponses a rarement été étudiée en détail : délai entre deux stimulations, latence de la réponse, temps de récupération. Il semble en effet que la réponse des personnes se déclarant EHS à une exposition à des champs électromagnétiques présente d'importantes variations interindividuelles, en matière de sensibilité aux extrêmement basses fréquences ou aux radiofréquences, de latence d'apparition (immédiate ou différée, voire même très différée, par exemple dans la nuit suivant une exposition en journée).

Un point particulier à considérer est l'existence d'un phénomène d'habituation voire d'apprentissage : l'étude de Wilén *et al.* (2006) met en évidence le fait que les personnes se déclarant EHS présentent davantage de déficits de mémoire de travail accompagnés d'altérations

du système nerveux autonome que les témoins lors de la première session d'exposition. Cependant, il n'y a plus de différence significative entre les deux groupes lors de la répétition du test, ce qui suggère l'existence d'un phénomène d'habituation ou d'apprentissage. Ceci pourrait également s'expliquer par un effet possible du stress qui s'atténuerait avec l'habituation.

Expositions

Comme mentionné plus haut (cf. § 5.4), plusieurs paramètres fréquentiels et temporels doivent être analysés (séparément ou simultanément) :

- le niveau instantané du champ électrique dans les bandes de fréquences correspondant aux applications de télécommunications et de radio-télédiffusion ;
- le découpage des signaux en différentes bandes fréquentielles, et les différentes modulations (GSM, DECT, Wi-Fi, par exemple) ;
- l'influence des variations temporelles rapides (ou non) du champ électrique (inhérentes à la forme du signal, ou simulant le déplacement du sujet dans des zones d'ombre du signal) ;
- la possibilité d'effets cumulés dus à la répétition des expositions (très peu d'études ont utilisé un protocole où l'exposition aux champs électromagnétiques est répétée).

En effet, les personnes se déclarant EHS rapportent qu'elles répondent à certains types de signaux ou variation de signaux, plutôt qu'à un niveau d'exposition moyen, tel que cela est simulé dans la plupart des études de provocations publiées à ce jour. Et de fait, ces personnes sont généralement exposées à des niveaux bien inférieurs aux valeurs limites autorisées pour le public (cf. valeurs limites et recommandations présentées en Annexe 6)¹⁶¹.

Enfin, il s'avère que l'on n'a pas testé toutes les possibilités d'exposition de l'environnement électromagnétique réel auquel sont soumises quotidiennement les personnes se déclarant EHS, par ailleurs en évolution permanente.

Analyse des résultats

L'analyse des résultats est souvent limitée par la faiblesse des effectifs. De nombreuses études incluses dans la revue de Rubin *et al.* (2010) étaient réalisées sur des effectifs relativement petits : médiane du nombre de personnes se déclarant EHS égale à 19 (Rubin, Nieto-Hernandez, and Wessely 2010). On ne peut alors exclure l'hypothèse qu'un petit nombre de participants « véritablement capables de percevoir les champs radiofréquences de faible niveau, mais que ces sujets n'ont pas encore été identifiés » (Röösli 2008a). Deux approches ont été réalisées pour pallier ce manque de puissance des études. D'une part, Eltiti et Wallace (2015) ont effectué une analyse *poolée* de deux de leurs études (Eltiti *et al.*, 2007, et Wallace *et al.*, 2010), mais n'ont pas pour autant montré de relation de causalité, malgré un effectif plus grand. D'autre part, une méta-analyse incluant 5 études sur l'exposition au téléphone mobile (n = 180) n'a pas non plus identifié d'effet significatif de l'exposition (Röösli 2008a).

Enfin, il faut prendre garde au fait que l'exclusion des analyses de certaines données ou de certaines personnes, si elle est scientifiquement justifiée, doit être solidement expliquée et argumentée (ex. : non prise en compte de valeurs extrêmes non reproductibles), et peut même illustrer la difficulté de maintenir l'insu au cours de l'étude.

Par exemple, dans une étude où 43 participants ont dormi à leur domicile, trois nuits sous un voile protecteur (cage de Faraday), trois nuits sous un voile non protecteur et trois nuits sans voile, trois participants ont bénéficié d'une amélioration significative de la qualité subjective de leur sommeil sous le voile protecteur, mais la vérification des appareils de mesure des champs

¹⁶¹ À titre d'exemple, les travaux du Copic (Comité opérationnel sur les ondes de téléphonie mobile) (rapport du 31 juillet 2013) ont montré, par simulation des antennes-relais de la téléphonie mobile, que 90 % des niveaux d'exposition modélisés sont inférieurs à 0,7 V/m et 99 % à 2,7 V/m, alors que les valeurs limites réglementaires pour le public sont comprises entre environ 40 V/m et 61 V/m pour les fréquences utilisées par la téléphonie mobile.

électromagnétiques installés a permis de penser que chacun de ces trois volontaires avait pu vérifier si le voile était protecteur ou factice (Leitgeb *et al.* 2008), influençant ainsi leur comportement.

6.2.4 Conclusion des études de provocation

Provoquer l'apparition de la symptomatologie des personnes se déclarant EHS par une exposition expérimentale, en double aveugle, aux champs électromagnétiques, apparaît comme un moyen simple de vérifier leur capacité, à travers les symptômes qu'elles déclarent ressentir lorsqu'elles sont exposées, à percevoir indirectement les champs électromagnétiques.

Ces études ont été suffisamment nombreuses pour justifier deux revues systématiques (Rubin *et al.*, 2005 ; Rössli *et al.*, 2008a) analysées dans le rapport publié par l'Afsset en 2009. La revue de Rubin *et al.* portait sur 31 articles et celle de Rössli *et al.*, limitée aux radiofréquences de la téléphonie mobile, sur deux articles inclus dans le travail de Rubin *et al.*, et sur dix nouveaux articles, publiés entre 2005 et 2007, auxquels ont été ajoutés quatre articles en population générale.

Les résultats de la méta-analyse de Rubin *et al.* (2005) avaient conduit les auteurs à conclure que l'EHS était sans rapport avec la présence de champs électromagnétiques, bien que davantage de recherches dans ce domaine soient nécessaires.

La méta-analyse de Rössli *et al.* (2008a) concluait ainsi : « *La différence relative globale entre les réponses correctes observées et attendues est de 0,042 [IC 95 % : -0,021 - 0,105]. Le taux de détection correcte du champ a été légèrement plus élevé dans les études portant sur des personnes se déclarant EHS que dans les études portant sur des sujets non-EHS, sans que la différence soit statistiquement significative. Dans la discussion, les auteurs disent qu'on ne peut pas exclure complètement que cette différence soit due à un petit nombre de sujets véritablement capables de percevoir les champs radiofréquences de faible niveau, mais que ces sujets n'ont pas encore été identifiés. S'ils existaient vraiment, il serait toutefois important qu'ils puissent être reconnus, d'une part, parce qu'ils traduiraient l'existence d'un mécanisme biologique pour l'instant inconnu et, d'autre part, parce que cette notion pourrait être utile dans la prise en charge des personnes se déclarant EHS* » (p295, Afsset 2009).

Depuis cette date, 8 articles publiés ont été présentés dans le rapport de l'Afsset de 2009 (Arnetz *et al.* (2007) et Hillert *et al.* (2008) donnant des résultats complémentaires obtenus lors de la même étude ; (Cinel *et al.* 2008, Boutry *et al.* 2008, Johansson *et al.* 2008, Landgrebe *et al.* 2008b, Augner *et al.* 2009a, Kwon *et al.* 2008)) et près d'une trentaine d'études de provocation ont été analysées dans le présent rapport (Landgrebe *et al.*, 2008a ; Nam *et al.*, 2009 ; Furubayashi *et al.*, 2009 ; Wallace *et al.*, 2010 ; Mortazavi *et al.*, 2011a ; Kwon *et al.*, 2012b ; etc.).

Sur la base des articles originaux ainsi répertoriés, on peut dire que, dans des conditions expérimentales, les personnes se déclarant EHS ont été, dans l'immense majorité des cas, incapables de démontrer leur aptitude à différencier la présence et l'absence de champs électromagnétiques, et n'ont pas présenté plus de symptômes fonctionnels pendant les périodes d'exposition que pendant les périodes de non exposition.

La question de savoir si l'hypothèse de Rössli *et al.* (2008a), selon laquelle il pourrait exister de rares personnes réellement sensibles aux radiofréquences, mérite encore notre attention.

Cette hypothèse a été à nouveau soulevée par l'étude de McCarty *et al.* (2011). Cette étude est la seule analysée dans le présent rapport qui semblerait mettre en évidence un résultat positif. Cependant, en l'absence de toute réplication, le fait que les données ne concernent qu'un effectif limité à une seule personne, associé à un protocole expérimental assez minimaliste, ne permet pas d'exclure que le hasard puisse être impliqué dans ces résultats. Cette étude pose néanmoins la question de la perception des champs électromagnétiques basses fréquences par l'être humain. Cette étude nécessite donc d'être répliquée avec un protocole amélioré et un nombre de sujets plus conséquent.

L'étude de Kwon *et al.* (2008)¹⁶² (analysée dans le rapport (Afsset, 2009) est, à la connaissance du groupe de travail, la seule ayant retesté des personnes qui s'étaient distinguées pour avoir détecté les champs électromagnétiques et qui a montré que les résultats n'étaient pas reproductibles.

Plus récemment, Van Moorselaar *et al.* (2017) ont réalisé des tests de provocation individualisés au domicile de personnes se déclarant EHS, au moyen d'un appareil d'exposition mobile, mais aucun des participants n'a été en mesure d'indiquer de manière fiable s'il était exposé ou non à la fréquence d'exposition qu'il avait lui-même choisie et qu'il déclarait être capable de détecter dans un intervalle de quelques minutes.

Au final, les résultats des études de provocation s'intéressant à la perception des champs électromagnétiques par les personnes se déclarant EHS semblent donc être en contradiction avec les témoignages (Ofstedal 2012), ce qui ne remet pas en question la réalité des symptômes ressentis par celles-ci (et présentés au § 6.1).

Un effet *nocebo*¹⁶³ est observé par plusieurs auteurs (notamment Rubin *et al.*, 2005 ; Stovner *et al.*, 2008, Szermersky *et al.*, 2010 et 2016 ; Witthöft *et al.*, 2013 ; Eltiti *et al.*, 2015). Cet effet est discuté au § 7.7.

Par ailleurs, certaines études de provocation ont cherché à objectiver des anomalies biologiques et / ou physiologiques en présence d'une exposition aux champs électromagnétiques chez des personnes se déclarant EHS (voir études analysées au § 6.2.1.2) :

- certaines études de provocation semblent mettre en évidence un phénotype différent au niveau basal (c'est-à-dire en l'absence d'exposition) entre les personnes se déclarant EHS et les témoins, concernant l'activité du système nerveux autonome (Lyskov *et al.*, 2001a ; Wilén *et al.*, 2006, Wallace *et al.* (2010), voir aussi Eltiti *et al.*, 2009). Cependant, les résultats sont divergents (voir discussion au § 7.4.4). Ainsi, l'hypothèse selon laquelle les personnes se déclarant EHS souffriraient d'un dysfonctionnement basal du SNA ne peut être ni validée ni exclue.
- concernant les variables hypniques, les travaux d'Arnetz *et al.* (2007) et de Lowden *et al.* (2011) analysent les modifications du sommeil à ondes lentes, qui est un stade fortement impliqué dans la récupération des fonctions homéostasiques de l'organisme et qui est particulièrement modifié par les activités physiques et les expositions environnementales qui précèdent l'heure du coucher. La structure globale du sommeil, la durée, ainsi que la latence de survenue du sommeil à ondes lentes sont également fortement influencées par les conditions ambiantes nocturnes dans lesquelles les enregistrements EEG sont réalisés. Celles-ci n'étant pas définies dans ces deux études (il faudrait qu'elles soient identiques entre les personnes se déclarant EHS et les témoins), la cause de ces modifications est très difficile à interpréter et à relier à un effet spécifique de l'exposition aux ondes. L'étude de Lowden *et al.* (2011) peut présenter un intérêt particulier, dans la mesure où elle confirme l'augmentation des fréquences *alpha* et des fuseaux de sommeil déjà décrites dans le rapport de l'Anses de 2013 et qui semble maintenant faire l'objet d'un consensus dans la littérature scientifique. L'impact de ces modifications sur la santé n'est pas connu et reste à démontrer le cas échéant ;
- l'analyse des études montre que l'exposition n'affecte pas le temps de réaction (Furubayashi *et al.*, 2009), les processus de mémorisation et l'attention (Wallace *et al.*, 2012), ainsi qu'une tâche de navigation spatiale (Wiholm *et al.*, 2009). Seule l'étude de Wilén *et al.* (2006) met en évidence davantage de déficits de mémoire de travail accompagnés d'altérations du système

¹⁶² Kwon *et al.* (2008) : cette étude est particulièrement intéressante par le nombre de sujets inclus (n = 84), le nombre d'essais réalisés pour chaque sujet (n = 600). Deux sujets ont réussi une performance lors d'une série de 100 essais, avec un taux de réponse correcte de 97 et de 94 % respectivement, mais ils n'ont pas pu obtenir le même résultat lors de l'épreuve renouvelée, effectuée dans les mêmes conditions, un mois plus tard.

¹⁶³ Cf. définition de l'effet *nocebo* au § 7.7.

nerveux autonome chez les personnes se déclarant EHS par rapport aux témoins lors de la première session d'exposition. Cependant, il n'y a plus de différence significative entre les deux groupes lors de la répétition du test, suggérant un effet possible du stress, plus important chez les personnes se déclarant EHS, qui s'atténuerait avec l'habituation (*cf.* discussion § 6.2.3).

En conclusion, les études de provocation n'ont pas permis d'objectiver d'anomalies biologiques ou physiologiques spécifiques aux personnes se déclarant EHS en condition d'exposition ; ceci suggère deux hypothèses distinctes :

- soit il n'existe pas d'anomalie biologique ou physiologique objectivable chez les personnes se déclarant EHS ;
- soit l'absence de résultat est due aux limites des études de provocation, qui ne sont pas spécifiques à l'étude de la perception des champs électromagnétiques (*cf.* discussion du § 6.2.3).

7 Recherche des raisons pour expliquer les symptômes des personnes se déclarant EHS

Les personnes se déclarant EHS souffrent d'un grand nombre de symptômes (troubles du sommeil, maux de tête, fatigue, etc., cf. § 6.1.1.3) et aucun auteur n'a contesté la réalité du vécu de ces personnes.

Pour essayer d'expliquer ces différents symptômes, un grand nombre d'hypothèses ont été formulées par les scientifiques, par les médecins prenant en charge des personnes se déclarant EHS ou directement par ces personnes elles-mêmes. Les experts du groupe de travail de l'Anses ont recensé ces hypothèses à travers les auditions de nombreuses parties prenantes (cf. liste des personnes auditionnées dans le Tableau 1, p6) et de l'analyse de la littérature scientifique. Le chapitre ci-après présente les hypothèses¹⁶⁴ identifiées et les discute, chaque fois que cela est possible, à la lumière des données de la littérature scientifique.

7.1 Les biomarqueurs

Classiquement, la notion de biomarqueur¹⁶⁵ s'applique à une caractéristique biologique mesurable, qui est représentative d'un état normal ou pathologique. Souvent, cela correspond à rechercher et doser une molécule précise, ou estimer des niveaux d'activité enzymatique. Les biomarqueurs (enzymes, protéines, antigènes, etc.) sont souvent recherchés pour répondre à la subjectivité et au manque de spécificité des données cliniques afin, le plus souvent, d'établir un diagnostic. Il faut préciser que l'utilisation d'un biomarqueur est un test diagnostic, mais il ne le remplace pas. Leur utilisation peut permettre la recherche d'une signature biologique d'un impact ou de la présence d'un xénobiotique dans l'organisme (biomarqueur d'exposition) ; elle peut aussi s'appliquer à l'effet induit d'un changement ou stress environnemental (biomarqueur d'effet). Une variation du milieu extérieur peut constituer pour l'organisme une contrainte qui se répercute par des modifications physico-chimiques du milieu intérieur et sur l'activité des organes. Il est cependant important de noter que des mécanismes correctifs d'adaptation ou d'ajustement peuvent permettre de diminuer ou de compenser ces modifications du milieu intérieur limitant, voire annulant, la stimulation environnementale et les réponses de l'organisme. Ces modifications n'induisent pas obligatoirement de troubles fonctionnels, mais elles peuvent permettre de maintenir les différentes constantes biologiques du milieu intérieur entre des valeurs normales compatibles avec le fonctionnement optimal de l'organisme. Les troubles fonctionnels avérés pour lesquels l'organisme souffre d'un dommage plus ou moins réversible et qui sont le signe d'une atteinte pathologique ne surviennent, le plus souvent, que pour des contraintes intenses, en fonction de leur durée et de leur intensité. L'étude des biomarqueurs pourrait constituer une piste de recherche intéressante pour essayer de prouver l'organicité de l'EHS. La détection de biomarqueurs d'effet spécifiques des personnes se déclarant EHS pourrait aussi mettre sur la piste de mécanismes biologiques éventuels.

¹⁶⁴ Les hypothèses n° 3 à 17 sont discutées dans le chapitre 6. Les hypothèses n°1 et 2 ont été discutées respectivement aux pages 96 et 101.

¹⁶⁵ Un biomarqueur peut être défini comme une substance chimique ou ses produits de dégradation présents dans le corps humain (biomarqueur d'exposition). Il peut être aussi une réponse biologique vis-à-vis de cette substance (biomarqueur d'effet).

7.1.1 Études phénotypiques sur les différences biologiques entre personnes se déclarant EHS et population générale

Hypothèse 4 pour expliquer tout ou partie de la survenue de l'EHS : une différence biologique ou des modifications physico-chimiques ?

L'hypothèse selon laquelle la survenue de l'EHS serait liée à des corrélats biologiques a été soulevée lors de l'audition des D^{rs} Tournesac, Rosa, et Choucroun. Ces médecins, dans leurs pratiques, font faire un certain nombre de dosages (vitamines, acides gras, oligo-éléments, etc.), mais les résultats de ces analyses n'ont pas fait l'objet de publication à ce jour.

7.1.1.1 Rappel des conclusions des rapports précédents

Le rapport publié par l'Afsset en 2009 avait conclu que certaines études montraient quelques différences biologiques entre les personnes se déclarant EHS et la population générale. Aucune de ces différences n'avait été confirmée par au moins deux équipes indépendantes. Les études analysées avaient permis de décrire trois grandes pistes de recherche :

- l'augmentation des mastocytes cutanés proposée par Gangi et Johansson (2000) (Gangi and Johansson 2000), mais contredite depuis (Lonne-Rahm *et al.* 2000, Johansson 2006, Johansson *et al.* 2001) ;
- le système de réparation de l'ADN lors de stress génotoxique chez des lymphocytes de personnes se déclarant EHS (Belayev *et al.*, 2005 et 2009) ;
- les dysfonctionnements thyroïdiens et hépatiques, ainsi que des processus inflammatoires chroniques chez certaines personnes se déclarant EHS (Dahmen, Ghezel-Ahmadi, and Engel 2009).

Ces pistes ont été présentées dans le rapport (Afsset, 2009) et, à notre connaissance, aucune étude ne s'est intéressée depuis à ces questions.

7.1.1.2 Personnes se déclarant EHS : synthèse des données et conclusion

L'article de Belpomme *et al.* (2015) (analysé au § 6.1.3 et en Annexe 4) teste l'hypothèse de marqueurs biologiques de l'EHS. Les auteurs ont dosé jusqu'à 11 biomarqueurs (la protéine C réactive (hs-CRP), la vitamine D2-D3, l'histamine, les IgE, la protéine de liaison du calcium S100B, la nitrotyrosine (NTT), les protéines chaperones (HSP70 et HSP27), les anti-corps anti-O-myéline, le 6-hydroxy-melatonin sulfate (6-OHMS), la créatinine) chez 727 personnes se déclarant EHS et / ou SIOC. Les auteurs ont cependant reconnu qu'aucun de ces biomarqueurs n'était spécifique de l'EHS (*cf.* p. 259 de l'article).

Jusqu'à présent, aucun test biologique n'est apparu comme pouvant entrer dans la constitution d'un ensemble de critères de diagnostic de l'EHS (ce point est discuté au § 3.4.1).

7.1.2 Étude du stress oxydant chez les personnes se déclarant EHS

Le stress oxydant est une agression des molécules intra- ou extra-cellulaires, liée à la production d'espèces radicalaires autrement nommées radicaux libres¹⁶⁶. Il existe de nombreuses pathologies associées à un stress oxydant chronique.

L'hypothèse d'une relation entre l'exposition aux radiofréquences ou aux extrêmement basses fréquences et le déclenchement d'un stress oxydant est souvent avancée dans la littérature, qu'elle soit scientifique ou non. Cette hypothèse a justifié la réalisation d'un essai clinique thérapeutique à base d'anti-oxydants (vitamine C et E, sélénium) chez 16 personnes se déclarant EHS, mais les résultats n'ont pas mis en évidence d'effet bénéfique (Hillert *et al.* 2001).

Hypothèse 5 pour expliquer tout ou partie de la survenue de l'EHS : un stress oxydant chronique ?

L'hypothèse selon laquelle la survenue de l'EHS serait liée à un stress oxydant a été soulevée lors de l'audition d'Électrosensibles de France / Priartem

Très récemment, cette hypothèse a été à nouveau privilégiée par Pall, via la publication d'une série de revues de synthèse (Pall 2013, 2014). Ce chercheur s'est appuyé sur certaines publications pour postuler que l'évènement déclencheur de l'EHS serait dû au fait que les champs électromagnétiques seraient capables de modifier la conformation des canaux ioniques voltage-dépendants. Cette hypothèse de départ se base principalement sur des travaux de modélisation (Panagopoulos *et al.* 2000) :

1. l'ouverture de ces canaux induirait une entrée d'ions calcium dans la cellule, ce qui activerait la synthèse de Monoxyde d'azote (NO) (hypothèse étayée par les travaux de (Pilla 2012)) ;
2. la production de NO provoquerait l'apparition d'ions ONOO⁻ (peroxynitrite), ce qui conduirait à la production de radicaux libres induisant un stress oxydant dans les cellules.

L'ouverture de ces canaux ioniques voltage-dépendants a plusieurs conséquences ou effets, car ces protéines sont impliquées dans de nombreuses fonctions physiologiques. De plus, le cycle NO/ONOO⁻ est au centre de plusieurs phénomènes : stress oxydant chronique, capacité réduite pour détoxifier, phénomènes auto-immuns et pro-inflammatoires chroniques, qui pourraient être impliqués dans certaines pathologies fonctionnelles. Ainsi, Pall pense que l'EHS pourrait être expliquée par ce mécanisme d'action, même s'il reconnaît¹⁶⁷ que, pour l'instant, aucune donnée scientifique ne permet d'étayer cette hypothèse.

7.1.2.1 Personnes non-EHS : rappel des conclusions des précédents rapports

Longtemps avant l'élaboration de l'hypothèse de Pall, la possibilité que les champs électromagnétiques aient un impact sur le stress oxydant avait déjà été évoquée. Cette piste a été analysée et commentée dans les précédents rapports d'expertise de l'Agence. Pour rappel, le rapport (Afsset 2009) avait conclu qu'aucune étude de qualité ne mettait en évidence d'effet des radiofréquences sur les divers marqueurs du stress oxydant testés. Les nouvelles études analysées dans le rapport (Anses, 2013) laissaient entrevoir qu'une exposition aux radiofréquences pouvait, dans certains cas, entraîner une augmentation du stress oxydant, ou un

¹⁶⁶ cf. notamment encadré sur le stress oxydant p 139 du rapport sur les radiofréquences publié par l'Anses en 2013.

¹⁶⁷ Conférence du 23 octobre 2014: "Integrative Solutions for 21st Century Medicine" in Albuquerque, New Mexico, USA.

dérèglement des systèmes de protection. Toutefois, il faut souligner que les résultats publiés étaient très hétérogènes et semblaient dépendre du type de modèle biologique utilisé. Comme aucune donnée chez l'être humain n'avait été publiée, il était difficile d'extrapoler quant aux effets des radiofréquences sur la santé humaine (Anses, 2013).

7.1.2.2 Personnes se déclarant EHS : synthèse des données et conclusion

Étant donné que certaines publications récentes (Esmekaya, Ozer, and Seyhan 2011, Ozgur, Guler, and Seyhan 2010, Tomruk, Guler, and Dincel 2010, Xu *et al.* 2010) suggèrent un effet possible des radiofréquences sur le stress oxydant en fonction du modèle biologique, on peut s'interroger sur une éventuelle prédisposition à développer un stress oxydant sous exposition électromagnétique chez les personnes se déclarant EHS.

Pour répondre à cette question, il est primordial d'analyser le niveau de stress oxydant chez les personnes se déclarant EHS et non plus dans la population générale. Très peu d'études ont utilisé cette stratégie.

Les travaux de Belyaev *et al.* (Belyaev *et al.* 2005, Belyaev *et al.* 2009) et Markova *et al.* (2005), de la même équipe, font partie des très rares études utilisant des échantillons biologiques issus de personnes se déclarant EHS. Ces chercheurs n'ont pas directement étudié le stress oxydant mais plutôt le stress génotoxique. Néanmoins, ces deux types de stress cellulaires sont très étroitement liés, car un stress oxydant prolongé provoque systématiquement un stress génotoxique. Belyaev *et al.* ont travaillé sur des lymphocytes issus de donneurs se déclarant EHS en les comparant à des cellules issues de témoins. Ils ont ensuite analysé l'impact des expositions aux radiofréquences sur l'apparition de marqueurs cytologiques liés à la réparation de l'ADN. Le détail des résultats publiés par cette équipe a déjà été analysé dans le rapport (Afsset, 2009). Pour rappel, les deux premières études de cette équipe (Belyaev *et al.* 2005, Markovà *et al.* 2005) n'avaient pas montré de différences significatives entre les échantillons, qu'ils proviennent de personnes se déclarant EHS ou non. Dans leur troisième publication (Belyaev *et al.*, 2009), les auteurs soulignent qu'ils ont observé des différences entre témoins et personnes se déclarant EHS, mais les résultats expérimentaux ne sont pas présentés et sont très peu discutés. Il ressort de cette série d'études que les échantillons cellulaires venant de personnes se déclarant EHS ne semblent pas présenter plus de stress oxydant que ceux des témoins. Néanmoins, il faut souligner que très peu d'échantillons de personnes se déclarant EHS ont été analysés (entre 5 et 7 suivant les publications), et que les tests utilisés ne sont pas les plus sensibles en ce qui concerne le stress oxydant.

Les travaux publiés par De Luca *et al.* (2014) se sont intéressés aux paramètres d'oxydo-réduction dans le sang de personnes se déclarant EHS (également SIOC à 95 %) (*cf.* analyse de l'article au § 6.1.2). Cependant, ils ne permettent pas de déterminer si l'augmentation du stress oxydant observée chez ces personnes a pour origine la sensibilité aux produits chimiques ou l'EHS elle-même. En fait, cette étude permet uniquement d'affirmer que les personnes SIOC présentent un stress oxydant, qu'elles se déclarent EHS ou non.

En conclusion, les études sont rares et insuffisamment bien conduites par rapport à la problématique de l'EHS pour conclure à l'existence d'une éventuelle particularité des personnes se déclarant EHS vis-à-vis du stress oxydant (Belyaev *et al.* 2005, Markovà *et al.* 2005, Belyaev *et al.* 2009, De Luca *et al.* 2014, Belpomme, Campagnac, and Irigaray 2015). Dans ce domaine, tout reste à faire.

7.1.3 Étude des concentrations en métaux lourds et autres polluants chez les personnes se déclarant EHS

7.1.3.1 Introduction

Hypothèse 6 pour expliquer tout ou partie de la survenue de l'EHS : une intoxication chimique (métaux lourds, etc.) ?

L'hypothèse selon laquelle la survenue de l'EHS serait liée à une intoxication aux métaux lourds (éventuellement liée à la problématique des amalgames dentaires) ou à une capacité de détoxification réduite a été évoquée lors des auditions des associations Électrosensibles de France / Priartem et Zone blanche, ainsi que dans le courrier de Générations futures.

L'hypothèse selon laquelle l'EHS serait due à une intoxication aux métaux lourds ou à une capacité réduite de détoxification est souvent avancée dans la littérature, qu'elle soit scientifique (Genuis and Lipp 2012) ou non. D'après Ghezel-Ahmadi *et al.* (2010a), les métaux lourds pourraient interférer avec les champs électromagnétiques en accroissant la réponse inflammatoire, notamment par l'intermédiaire d'oxydations et la production de radicaux libres oxygénés (espèces réactives de l'oxygène - *Reactive Oxygen Species* : ROS). Certains métaux lourds diminueraient la protection radicalaire des cellules de l'organisme, ce qui favoriserait le stress oxydant. Cet aspect pourrait être exacerbé chez les personnes à sensibilité accrue aux stimuli de l'environnement.

Les métaux lourds tels que le mercure, le plomb, le cadmium peuvent s'accumuler¹⁶⁸ dans les tissus et les organes du corps en cas d'exposition de longue durée même à des concentrations très faibles. Le mercure s'accumule dans différents organes, en particulier le cerveau. La demi-vie d'élimination de ce toxique est très longue, atteignant 1 à 18 ans respectivement dans le cerveau et les os (Mutter *et al.* 2005). Cette accumulation peut être à l'origine de troubles dont les signes cliniques non spécifiques sont très proches de ceux rapportés par les personnes se déclarant EHS : perturbations du sommeil, migraine, fibromyalgie, paresthésie, maladies neurodégénératives, troubles comportementaux, déficit de l'attention, dépression et perturbations du système immunitaire (Mutter *et al.* 2005, Gardner *et al.* 2009, Costa *et al.* 2010).

Selon Miller (1997), une sensibilité chimique pourrait se développer suite à une diminution de la tolérance (sensibilisation) consécutive à une exposition prolongée aux agents chimiques, qui provoquerait dans un second temps la survenue de symptômes lors d'expositions à de faibles doses de ces agents (hypersensibilité) (*cf.* théorie du « *TILT* » ou *Toxicant-Induced Loss of Tolerance*). Selon cette théorie, il existerait des seuils de tolérance variant dans le temps et en fonction des personnes (Miller 1997).

7.1.3.2 Analyse des articles chez des personnes se déclarant EHS

Intoxication aux métaux lourds

Il existe peu d'études scientifiques sur le lien qui pourrait exister entre l'état d'une personne se déclarant EHS et la présence d'éléments-traces métalliques (ETM)¹⁶⁹ dans l'organisme. Une seule étude observationnelle s'est intéressée aux différences de concentrations en métaux lourds (cadmium, mercure et plomb) dans le sang entre une population se déclarant EHS et la population générale (Ghezel-Ahmadi *et al.* 2010a) (*cf.* analyse détaillée au § 6.1.3). Les résultats n'ont pas

¹⁶⁸ L'élimination des métaux lourds peut se faire par chélation. Dans l'organisme, la métallothionéine est une protéine chélatrice qui présente une grande affinité pour le mercure, le cadmium, le zinc, l'argent, le sélénium et l'arsenic. La métallothionéine présente dans la membrane de l'appareil de Golgi permet une détoxification naturelle de l'organisme et une protection contre le stress oxydant.

¹⁶⁹ La notion d'éléments-traces métalliques (ETM) tend à remplacer celle de « métaux lourds » mais reste un concept mal défini car associant des éléments toxiques à d'autres l'étant moins. Selon les éléments et le contexte, ils sont plus ou moins assimilables et peuvent être concentrés dans la chaîne alimentaire.

montré de différence significative pour le plomb et le mercure entre les deux populations. La concentration en cadmium était plus faible chez les personnes se déclarant EHS, hommes ($p < 0,05$) ou femmes ($p < 0,001$), comparée à celle du groupe témoin. Les valeurs des concentrations sanguines de cadmium, plomb et mercure mesurées dans cette étude sont toujours largement inférieures aux valeurs limites définies par l'Agence fédérale allemande de l'environnement auxquelles les auteurs les compare et au-delà desquelles il existe un risque pour la santé.

Costa *et al.* (2010) ont souligné les limites de cet article, notamment en ce qui concerne la mesure des concentrations sanguines de métaux lourds sans mesurer leur immunotoxicité. Costa *et al.* concluent qu'une telle approche démontrant l'absence d'augmentation des niveaux de concentrations de plomb, mercure et cadmium¹⁷⁰ dans le sang n'est pas suffisante pour écarter l'hypothèse que ces métaux jouent un rôle important dans l'EHS. Selon eux, l'étude devrait être complétée par une analyse des effets immunotoxiques de ces métaux. Les auteurs proposent un dosage tissulaire des métaux lourds, notamment du cadmium. Costa *et al.* avancent également l'idée que la mesure de la concentration urinaire du cadmium serait un marqueur plus représentatif de l'intoxication globale de l'organisme que celle effectuée par Ghezel-Ahmadi *et al.* au niveau sanguin.

En réponse à ces critiques, Ghezel-Ahmadi *et al.* (2010b) ont souligné que leur étude était la première à mesurer les concentrations de métaux lourds chez les personnes se déclarant EHS. « Nous tenons à remercier le Dr Costa et ses collègues pour la suggestion de considérer les interactions du système immunitaire avec les métaux lourds. En fait, nous avons réalisé une batterie de tests immunologiques chez les patients et ces données sont en cours d'analyse » (Ghezel-Ahmadi 2010b).

À la connaissance du groupe de travail de l'Anses, ces résultats n'ont toujours pas été publiés au moment de la finalisation du présent rapport. Le résultat principal de cette étude concerne les concentrations de plomb, mercure et cadmium mesurées dans le sang, qui n'étaient pas significativement plus élevées chez les personnes se déclarant EHS que chez les témoins.

Intoxication aux polluants organiques

Une autre étude, plus ancienne, de Hardell *et al.* (2008) a porté sur la relation qui pourrait exister entre les polluants organiques persistant dans l'organisme et l'EHS (cf. analyse détaillée au § 6.1.3). Les auteurs considèrent cette analyse comme une étude préliminaire. L'intérêt de ce travail est essentiellement de soulever une hypothèse sur la relation qui pourrait exister entre l'EHS et l'exposition aux polluants organiques, tels que le diphényl éther polybromé présent dans les habitations et les lieux de travail et les pesticides organophosphorés. Cette hypothèse est intéressante dans la mesure où elle pose le problème des co-expositions, en particulier aux pesticides organophosphorés comme le chlordane. Ceux-ci agissent comme des inhibiteurs de l'acétylcholinestérase, ce qui provoque des anomalies de la transmission nerveuse au niveau synaptique à la fois au niveau du système nerveux central et périphérique (cœur, vaisseaux sanguins, muscles, etc.). Ces anomalies sont responsables de fatigue musculaire, en particulier au niveau des muscles striés comme le diaphragme, et peuvent provoquer des symptômes similaires à ceux que rapportent les personnes EHS (notamment troubles du sommeil, migraines, etc.).

7.1.3.3 Conclusion

Il n'existe actuellement aucune étude scientifique sur les concentrations tissulaires des métaux lourds et leur élimination urinaire chez les personnes se déclarant EHS. Les résultats de la seule étude analysée sur les concentrations sanguines en métaux lourds (Ghezel-Ahmadi *et al.*, 2010a)

¹⁷⁰ Le cadmium est dosé habituellement dans l'urine car, chez l'adulte, sa concentration urinaire est corrélée à la charge rénale (en l'absence d'altération rénale importante) et donc traduit bien l'exposition cumulée au cours du temps. Le cadmium dosé dans le sang reflète surtout l'exposition récente.

ne sont pas suffisants pour conclure à une association (ou pas) entre une intoxication aux métaux lourds et la survenue de l'EHS.

La réponse critique de Costa *et al.* (2010), ainsi que d'autres travaux comme ceux de Gardner *et al.* (2009), Miller *et al.* (1997) et (Johansson 2009) ouvrent de nouvelles pistes de recherche en proposant une orientation des études sur l'immunotoxicité des métaux lourds.

L'étude de Hardell *et al.* (2008) soulève une autre hypothèse sur la relation qui pourrait exister entre l'exposition aux polluants organiques et la survenue de l'EHS, qui mériterait d'être investiguée.

7.2 Marqueurs génétiques ou épigénétiques

Hypothèse 7 pour expliquer tout ou partie de la survenue de l'EHS : un génotype ou phénotype prédisposant ?

L'hypothèse d'une sensibilité individuelle génétique ou épigénétique a notamment été soulevée par le Collectif EHS et Priartem lors de leur audition du 6 novembre 2014.

7.2.1 Prédisposition génétique et EHS

7.2.1.1 Introduction

Si l'on tient compte de toutes les formes de variations possibles (mutations ponctuelles, délétion, insertion, séquences répétées, etc.), le génome de tous les êtres humains est identique à 99,6 % environ. Ces 0,4 % de différence entre l'ADN de deux personnes ont cependant une grande importance, car c'est ce qui explique en partie la diversité des phénotypes (l'autre partie importante étant due à l'épigénétique). Avec le développement du séquençage haut-débit, ces dernières années ont vu fleurir de nombreuses études pour essayer de relier les variations inter-individuelles au sein des gènes et le risque de développer une maladie. À l'heure actuelle, les efforts se sont surtout concentrés sur les polymorphismes nucléotidiques (SNP, *single nucleotide polymorphisms*). Le génome d'une personne contient, en moyenne, trois millions de SNP (0,1 %). Ces petites variations au sein de la séquence génique peuvent, dans certains cas, modifier des séquences régulatrices contrôlant l'expression des gènes, ou encore modifier un codon¹⁷¹ et générer une autre version de protéine. Il arrive parfois que l'une de ces altérations soit suffisamment grave pour impacter directement le bon fonctionnement de l'organisme et générer une maladie. En général, il faut la présence simultanée de plusieurs versions de gènes variants (appelés allèles) pour aboutir à l'apparition d'une maladie. Par ailleurs, des modifications de la transcription et de la régulation de la maturation des ARNm peuvent pérenniser des modifications dans l'expression de gènes clés de fonctions cellulaires essentielles.

Dans la majorité des cas, il est question de « maladie génétique complexe » ou de « déterminisme polygénique ». Dans ce contexte, l'apparition de certaines maladies peut résulter d'une combinaison défavorable entre environnement (au sens large) et susceptibilité génétique exacerbée. C'est l'exemple du cas bien documenté de l'obésité, où s'entremêlent les effets des habitudes alimentaires et des prédispositions métaboliques personnelles. Plusieurs études ont recherché si la présence d'allèles particuliers pouvait expliquer la susceptibilité à certains agents présents dans l'environnement. La plupart de ces études portent sur la susceptibilité de développer des cancers suite à une exposition (ex : UV et cancer de la peau, ou tabac et cancer, etc.). Grâce à ces travaux, on sait maintenant que certaines versions de gènes peuvent favoriser le développement de pathologies dans un contexte environnemental particulier.

¹⁷¹ Codon : séquence composée de trois nucléotides consécutifs sur l'acide désoxyribonucléique (ADN), ou sur sa transcription en acide ribonucléique messager (ARNm), codant pour la synthèse de l'un des 20 acides aminés.

Parmi les troubles fonctionnels, seule la sensibilité aux produits chimiques (SIOC) a été réellement étudiée sous l'angle de la génétique (Hetherington and Battershill 2013), des travaux pionniers ont également été récemment publiés au sujet de la fibromyalgie ou du syndrome de fatigue chronique (Feng *et al.* 2013, Shimosako and Kerr 2014).

7.2.1.2 Personnes se déclarant EHS : synthèse des données et conclusion

En ce qui concerne les personnes se déclarant EHS, à notre connaissance, seuls De Luca *et al.* se sont intéressés au polymorphisme génétique dans cette population (De Luca *et al.*, 2014). À l'origine, ce groupe s'est spécialisé dans le domaine du SIOC (Caccamo *et al.* 2013, De Luca *et al.* 2015). Par la suite, il a aussi étendu son expertise aux autres types de sensibilité environnementale.

Lors de travaux précédents (Caccamo *et al.*, 2013), ces auteurs avaient examiné la possibilité que des personnes souffrant de SIOC puissent posséder des versions particulières de gènes codant des enzymes impliquées dans le métabolisme et l'élimination des produits chimiques. Ils avaient ainsi démontré que certaines variantes génétiques rares, codant des formes altérées de cytochrome P450¹⁷², étaient plus fréquemment présentes chez ces patients.

Suite à ces travaux, De Luca *et al.* (2014) ont étudié l'hypothèse selon laquelle ces mêmes allèles pourraient également être surreprésentés chez les personnes se déclarant EHS (*cf.* présentation détaillée de l'article au § 6.1.3). La justification première de cette stratégie « gène candidat » est la forte comorbidité entre les deux pathologies, les personnes se déclarant EHS souffrant souvent également de SIOC, et *vice versa*. La publication de De Luca *et al.* (2014) donne une première indication montrant que l'hypothèse d'une susceptibilité génétique à l'EHS et / ou au SIOC est une piste plausible, bien qu'encore non démontrée. Cette conclusion est valable pour la plupart des maladies polygéniques.

Enfin, il faut signaler que vu la forte hétérogénéité de la sous-population des EHS, la mise en évidence de combinaisons d'allèles statistiquement surreprésentés chez certaines personnes se déclarant EHS sera d'un faible pouvoir prédictif et ne pourra vraisemblablement pas servir d'outil de diagnostic.

7.2.2 Une composante épigénétique pour expliquer l'EHS ?

7.2.2.1 Introduction

La génétique moderne a mis en évidence l'importance de l'organisation de la chromatine dans l'expression des gènes. Celle-ci est très régulée grâce à un code ou système moléculaire complexe qui relève du domaine de l'épigénétique. La notion d'épigénétique a évolué au cours de l'histoire des sciences biologiques. Aujourd'hui, ce terme fait référence aux modifications chimiques enzymatiques de l'ADN (méthylation notamment) et à l'identité des protéines qui l'entourent. Ces protéines empaquettent l'ADN pour former la chromatine et sont elles-mêmes sujettes à de nombreuses modifications post-traductionnelles. Toutes ces modifications servent de tremplin au recrutement de différents facteurs, ce qui a pour conséquence de modifier la façon dont les gènes pourront être lus et exprimés. Les recherches effectuées ont pu mettre en évidence le fait que ces modifications épigénétiques peuvent être en partie influencées par l'environnement et par l'histoire individuelle des cellules ou de l'organisme. L'importance de l'épigénétique n'est plus à démontrer dans de nombreux cancers et de nombreuses études montrent notamment que l'épigénétique joue un rôle-clé dans la plasticité cérébrale (Encadré 3) et dans toute maladie multifactorielle où l'environnement est impliqué.

¹⁷² Les cytochromes P450 (CYP) correspondent à une famille d'enzymes assurant le métabolisme de certaines de molécules chimiques, endogènes ou exogènes (xénobiotiques).

Encadré 3 : la neuroépigénétique : cognition, mémoire et plasticité cérébrale - Effets du milieu enrichi

Si l'importance de l'épigénétique est depuis longtemps reconnue dans les domaines du cancer, de la biologie développementale et des recherches sur les cellules souches, ce n'est que plus récemment que son implication a été démontrée dans le cerveau. En effet, les mécanismes épigénétiques sont critiques pour les processus cellulaires cérébraux, par exemple la plasticité synaptique, et pour les comportements complexes comme l'apprentissage et la mémoire : ils jouent un rôle essentiel dans les fonctions neuronales (Rudenko and Tsai 2014). Ainsi, l'épigénétique joue un rôle-clé dans la plasticité synaptique, c'est-à-dire la capacité des neurones à renforcer ou affaiblir leurs connexions, mais aussi en créer de nouvelles, suite à une activation neuronale. Cette plasticité synaptique est proposée comme le corrélat cellulaire de l'apprentissage et de la mémoire. De nombreuses études ont démontré le rôle des modifications épigénétiques, en particulier au niveau des histones (« *histone code* » ou « *histone language* »), dans la mémoire par la régulation des programmes transcriptionnels liés à la consolidation d'un souvenir. Ils impliquent en particulier des gènes précoces, des facteurs de transcription ou encore le facteur neurotrophique BDNF. De plus, ces mécanismes épigénétiques (acétylation des histones, méthylation de l'ADN) jouent un rôle important dans les dysfonctionnements cognitifs observés dans certaines pathologies neurologiques ou psychiatriques chez l'être humain (Gräff and Mansuy 2008, Peixoto and Abel 2013). Enfin, l'impact de l'environnement, essentiellement étudié au travers de l'enrichissement du milieu de vie, a permis de montrer que l'augmentation des stimulations sensorielles, cognitives et motrices a un effet bénéfique sur le cerveau, notamment sur les apprentissages et la mémoire, et il retarde l'apparition de symptômes dans divers modèles de pathologies neurodégénératives ainsi qu'au cours du vieillissement normal. Fischer *et al.* (2007) montrent ainsi, dans un modèle de souris transgénique CK-p25, une protéine impliquée dans diverses maladies neurodégénératives chez l'être humain, que l'exposition à un environnement enrichi pendant 4 semaines permet la récupération des capacités d'apprentissage et de mémoire, ainsi que la plasticité cérébrale associée. Ces auteurs démontrent le rôle clé du remodelage de la chromatine par l'augmentation de l'acétylation des histones chez les animaux enrichis (Fischer *et al.* 2007). Ces découvertes ouvrent la voie pour de nouvelles pistes thérapeutiques visant à « manipuler » l'épigénome à l'aide d'agents pharmacologiques ou d'autres stratégies comme l'enrichissement du milieu de vie.

Un dernier point concerne le fait que les marques épigénétiques peuvent être transmises de manière stable au travers de la mitose et de la méiose, et donc sous-tendre la transmission trans-générationnelle non-génomique des traits comportementaux ou de sensibilité à diverses pathologies, appelée « *soft inheritance* » ou « hérédité douce » (Jirtle and Skinner 2007, Gräff and Mansuy 2008, Richards 2006). Ainsi, les effets de l'environnement (enrichi) peuvent être transmis aux générations futures *via* les modifications de l'expression de gènes spécifiques « marqués » épigénétiquement (Arai *et al.* 2009).

7.2.2.2 Personnes se déclarant EHS : synthèse des données et conclusion

En ce qui concerne les personnes se déclarant EHS et l'épigénétique, aucune étude scientifique n'a été publiée à ce jour. D'une manière plus générale, les effets des radiofréquences sur la santé n'ont pas été étudiés dans le domaine de l'épigénétique.

En l'absence de données pouvant étayer ou infirmer l'hypothèse épigénétique, aucune conclusion ne peut être formulée sur ce thème à l'heure actuelle.

7.3 Système immunitaire

Parmi les possibles pistes permettant d'expliquer l'origine de l'EHS, l'hypothèse d'une origine immunitaire est parfois évoquée.

Hypothèse 8 pour expliquer tout ou partie de la survenue de l'EHS : des phénomènes auto-immuns et un état pro-inflammatoire chronique ?

L'hypothèse selon laquelle la survenue de l'EHS serait liée à un problème immunitaire a été évoquée lors des auditions du Criirem, des Électrosensibles de France et de Priartem, du D^r Choucroun et dans le courrier de Générations Futures.

Les marqueurs suivants ont été cités par le Criirem : Lymphocytes (natural killers), IgG.

Diverses infections latentes ont été évoquées : la maladie de Lyme¹⁷³, bartonellose et babésiose.

Cette hypothèse s'appuie, d'une part sur le constat de l'existence d'une incidence élevée d'allergies déclarées chez les personnes se déclarant EHS (Hetherington and Battershill 2013) et, d'autre part, sur l'existence de témoignages de personnes se déclarant EHS évoquant une amélioration de leur état général lors de la prise d'anti-inflammatoires [cf. notamment Audition d'Agnès Fontana, Robin des Toits], ce traitement ayant pour effet de diminuer la réponse immunitaire (cf. Encadré 4).

Encadré 4 : le système immunitaire

Le système immunitaire est le système de défense de l'organisme contre les substances étrangères ou les agents infectieux, mais aussi contre ses propres constituants altérés (tels que les cellules cancéreuses). La réponse immunitaire est finement régulée par une intense communication intercellulaire directe (réaction récepteur / ligand) et par l'intermédiaire de cytokines. L'atteinte des systèmes de régulation peut entraîner une immunodépression favorisant les infections ou, au contraire, une hyper activation du système immunitaire pouvant conduire à un état allergique ou pro inflammatoire chronique.

Un modèle physiopathologique expliquant la survenue de l'EHS au travers d'un effet immunitaire a été proposé dès le début des années 2000. Dans leurs travaux théoriques, Gangi et Johansson (2000) ont construit une hypothèse, suite à plusieurs recoupements, selon laquelle les champs électromagnétiques pourraient conduire à la dégranulation des mastocytes. Ces cellules libèrent un large spectre de médiateurs chimiques, dont l'histamine, qui est un médiateur spécifiquement libéré en cas de crise allergique. Cette voie n'a cependant pas été validée expérimentalement.

Dans leur revue d'articles portant sur l'électrohypersensibilité, Genius *et al.* (2012) évoquent également la possibilité d'une origine immunitaire de l'EHS et rattachent celle-ci aux syndromes d'hypersensibilités. Pour ces auteurs, le mécanisme par lequel le corps devient hypersensible aux champs électromagnétiques pourrait être induit par une exposition toxique environnementale autre que celle liée aux rayonnements. Par la suite, après avoir dépassé un point limite de bioaccumulation, le système immunitaire perdrait sa capacité normale d'adaptation et son immunotolérance. Cette perte conduirait l'organisme à être sensibilisé à des signaux de très faible amplitude et sans relation avec le stimulus d'origine comme les rayonnements électromagnétiques.

¹⁷³ À propos de la maladie de Lyme, ou « borréliose de Lyme », il s'agit d'une maladie bactérienne (zoonose et parasitose) transmise à l'Homme et à certains animaux par des bactéries du genre *Borrelia* transmises par des morsures de tiques. 27 000 personnes sont officiellement touchées chaque année par la maladie de Lyme, son diagnostic étant difficile à effectuer, elles pourraient être bien plus nombreuses. La controverse autour de la maladie de Lyme et de son diagnostic est présentée dans une thèse de sociologie (Massart, 2013) (<https://halshs.archives-ouvertes.fr/PACTE-THESE/tel-01155064v1>).

L'hypothèse d'une origine de l'EHS due à un affaiblissement des défenses immunitaires par une infection chronique telle que la maladie de Lyme est parfois avancée dans la littérature non scientifique (témoignages, forum, etc.). Elle est alimentée par la controverse autour du diagnostic de la maladie de Lyme. À ce jour, aucun article scientifique ne s'est intéressé à cette hypothèse qui ne repose sur aucun élément scientifique ; le groupe de travail de l'Anses n'a donc pas pu l'étudier.

7.3.1 Sujets non-EHS : rappel des conclusions des rapports précédents

L'hypothèse d'un effet potentiel des radiofréquences sur le système immunitaire a fait l'objet d'une analyse attentive au cours des précédents rapports publiés par l'Afsset en 2009 et par l'Anses en 2013.

En 2009, l'analyse de neuf articles de bonne qualité avait amené les experts à conclure à « l'absence de preuve montrant l'existence d'un effet délétère des radiofréquences (essentiellement à 900 et 1 800 MHz) sur les cellules du système immunitaire ».

En 2013, l'analyse des six articles de qualité traitant de cette thématique avait mis en évidence « un niveau de preuve insuffisant pour conclure à un éventuel effet des radiofréquences sur le système immunitaire chez l'être humain » chez des personnes non-EHS.

7.3.2 Personnes se déclarant EHS : synthèse des données et conclusion

L'hypothèse d'une origine de l'EHS liée à une perturbation du système immunitaire a été évoquée, cependant, en l'absence d'étude réalisée chez des personnes se déclarant EHS, aucun élément ne permet d'étayer cette hypothèse.

Dans l'état actuel des connaissances, les études réalisées sur modèles *in vitro* et *in vivo* ou chez des personnes non-EHS ne suggèrent pas de mécanisme d'action des radiofréquences sur le système immunitaire.

7.4 Système nerveux autonome

L'objectif de ce chapitre est de faire un point actualisé sur les données cliniques expérimentales concernant les effets des radiofréquences sur l'activité du système nerveux autonome (SNA). En effet, l'analyse de l'activité de ce système a été proposée comme un outil pertinent pour le diagnostic positif de l'hypersensibilité aux radiofréquences et la compréhension des effets de celles-ci sur l'organisme humain. Après un rappel sur le fonctionnement et les méthodes d'études du SNA, l'analyse objective de la qualité et des résultats de ces études sera détaillée.

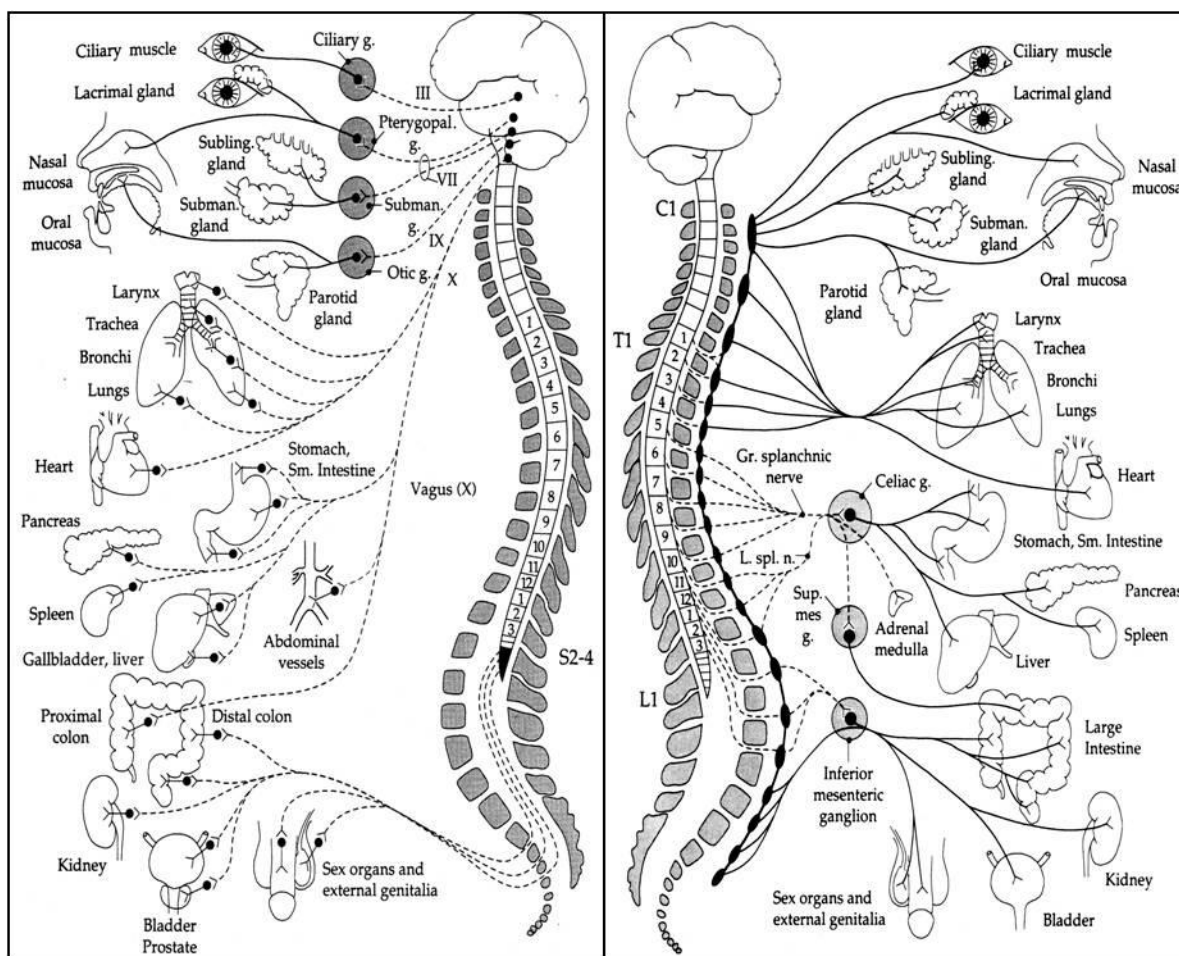
7.4.1 Introduction

Hypothèse 9 pour expliquer tout ou partie de la survenue de l'EHS : un dysfonctionnement du système nerveux autonome ?

L'hypothèse selon laquelle la survenue de l'EHS serait liée à un dysfonctionnement du système nerveux autonome est souvent évoquée dans la littérature scientifique.

7.4.1.1 L'organisation anatomo-fonctionnelle du système nerveux autonome

Essentiellement involontaire et automatique, le système nerveux autonome (SNA) module, régule et harmonise la vie végétative des différents organes du corps humain, contribuant ainsi au maintien de l'homéostasie. La totalité des organes reçoit une innervation végétative. Le SNA comprend le système parasympathique et le système (ortho)sympathique (cf. Figure 16).



Le système parasympathique (à gauche)

Le système (ortho)sympathique (à droite)

Source : d'après Senard, 2011

Figure 16 : organisation anatomique du système nerveux autonome

Les centres végétatifs sont situés dans le tronc cérébral (noyau du tractus solitaire, noyau dorsal du vague, noyaux vasomoteurs, etc.) et le diencephale (thalamus et hypothalamus). Ainsi, bien qu'automatique, le fonctionnement du SNA subit de nombreuses modulations sous l'effet de modifications de l'activité corticale qu'il s'agisse de stimulations provenant des organes sensoriels, ou de facteurs endogènes (veille-sommeil, stress, etc.).

Parmi ces centres, l'hypothalamus est une structure particulièrement importante impliquée dans la régulation du sommeil, des rythmes biologiques (*via* les noyaux supra-chiasmatiques), du stress, du maintien de l'homéothermie et de la prise alimentaire. En relation avec les structures du système limbique comme l'hippocampe ou l'amygdale, l'hypothalamus est impliqué dans les comportements émotionnels. Enfin, cette structure assure également la « gestion » des conflits de régulation entre diverses fonctions lors de poly-expositions (l'un des conflits les plus étudiés chez l'animal et l'être humain est celui entre le maintien des stades de sommeil, en particulier le sommeil paradoxal et le maintien de l'homéothermie lors d'un stress thermique).

Les fibres nerveuses les mieux connues sont les fibres efférentes allant du cerveau aux organes périphériques. Sur le plan anatomique et fonctionnel, on peut opposer le système parasympathique (organisation étagée, métamérique, fibres post-ganglionnaires de petite taille, rapport neurones pré/post-ganglionnaires élevé), dont l'action reste localisée au système orthosympathique (origine étendue tout au long de la moelle dorsolombaire, fibres post-ganglionnaires peu ou pas myélinisées plus nombreuses que les fibres pré-ganglionnaires), dont l'action est diffuse. Au niveau biochimique, le neuromédiateur (*cf.* § 7.5.2 sur la neurotransmission) ganglionnaire des deux systèmes est l'acétylcholine qui interagit avec des récepteurs nicotiniques. Au niveau post-ganglionnaire, l'acétylcholine est le médiateur du SNA parasympathique

(récepteurs muscariniques) et la noradrénaline (à l'exception des fibres musculaires vasodilatatrices et des glandes sudoripares où le neuromédiateur est l'acétylcholine) celui du SNA orthosympathique (récepteurs alpha- et bêta-adrénergiques).

Outre les fibres efférentes, le SNA comporte également des fibres nerveuses afférentes allant des organes périphériques vers le système nerveux central. Ces fibres sont de petit calibre, non myélinisées (fibres de type C), et font relais dans le noyau du tractus solitaire dont les efférences projettent vers les centres supérieurs, y compris le cortex cérébral, en particulier insulaire.

Le SNA est le siège de dérèglements pathologiques primaires (maladies neurologiques avec atteinte du SNA : maladie de Parkinson, démences à corps de Lewy, atrophies multisystématisées, etc.) ou secondaires (diabète, amylose, insuffisance rénale, etc.) qui sont présentées en Annexe 10.

7.4.1.2 Les méthodes d'étude du fonctionnement du SNA

De très nombreuses techniques de mesure de l'activité du SNA ont été décrites. On peut distinguer celles mesurant directement son activité électrique et les techniques indirectes fondées sur les réponses d'organes cible aux stimulations mettant en jeu la modulation par le SNA. De façon à éviter un descriptif inutile dans le contexte de ce rapport, seules quelques techniques seront citées et / ou détaillées, car elles représentent les méthodes de référence ou sont utilisées dans les essais cliniques qui seront discutés plus loin (cf. Annexe 11).

7.4.2 Personnes non-EHS

Les rapports précédents de l'Agence (Afsset, 2009 ; Anses, 2013) n'ont pas spécifiquement évalué les données disponibles sur l'effet des radiofréquences sur le SNA. Cependant, l'analyse des effets sur le système cardiovasculaire, et en particulier la régulation de la fréquence cardiaque chez l'être humain (Parazzini *et al.* 2007c, Kantz *et al.* 2005, Atlasz *et al.* 2006, Nam *et al.* 2006, Barker *et al.* 2007, Tamer, Gündüz, and Özyildirim 2009, Yilmaz and Yildiz 2010, Barutcu *et al.* 2011, Bortkiewicz *et al.* 2012), évoquait indirectement des effets sur le SNA.

L'objet de ce chapitre est de reprendre l'analyse des effets des radiofréquences sur l'activité du SNA, en ne se cantonnant pas à la seule modulation de la variabilité de la fréquence cardiaque, chez des personnes se déclarant EHS et des témoins. En effet, les symptômes attribués par les personnes se déclarant EHS à l'exposition aux radiofréquences n'ont pu à ce jour être reliés à aucun mécanisme physiopathologique. Or, nombre de ces symptômes pourraient évoquer un dysfonctionnement végétatif. Seuls sont discutés ici les articles non analysés précédemment (pour les autres, le lecteur pourra consulter les rapports antérieurs de l'Anses).

Dans cette partie, les études sur des personnes non-EHS ont été analysées, car elles n'avaient pas été prises en compte dans le rapport publié par l'Anses en 2013.

Exposition aux champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences

Bortkiewicz *et al.* (2006) ont réalisé une étude ouverte¹⁷⁴ incluant un groupe de 63 travailleurs hommes, afin d'analyser les effets de l'exposition professionnelle à un champ basse fréquence (50 Hz, 26,1 à 37,3 μ T, 4,3-6,7 kV/m) sur la variabilité de la fréquence cardiaque dans les domaines temporel et fréquentiel (transformée rapide de Fourier), ainsi que sur la pression artérielle (enregistrement ambulatoire de 24 heures) (Bortkiewicz *et al.* 2006). Les mêmes paramètres ont été mesurés chez 42 travailleurs comparables pour l'âge et le genre, mais non exposés à un champ 50 Hz. Le but de l'étude était de d'analyser l'impact d'une exposition chronique à 50 Hz sur l'homéostasie cardiovasculaire.

Cependant, l'article est peu rigoureux sur le plan méthodologique avec de nombreux biais pouvant expliquer les quelques différences observées entre les groupes. Par ailleurs, les conditions de recueil du signal cardiaque sont mal explicitées et les bandes de haute fréquence (150-350 mHz)

¹⁷⁴ Cf. Définition de session « ouverte » en note de bas de page n° 141, p139.

ne correspondent pas à celles généralement recommandées pour ce type d'analyse. Les différences observées portent sur des critères non validés (pourcentage de participants ayant un rapport LF/HF¹⁷⁵ > 1 ou avec une déviation standard de la moyenne des intervalles RR correspondant au temps entre deux battements successifs inférieure à 27 ms plus élevée dans le groupe exposé). Les caractéristiques de l'enregistrement ambulatoire de la pression artérielle (matériel utilisé, définition des périodes de jour et de nuit, etc.) ne sont pas précisées. De plus, la taille de l'échantillon est vraisemblablement trop petite pour montrer un effet. Enfin, cet article reprend une partie des données acquises et déjà publiées dans un travail précédent en incluant les mêmes personnes, ce qui est en soi critiquable (Bortkiewicz, Zmyslony, and Gadzicka 1998).

Kim *et al.* (2013) ont étudié les effets d'un champ magnétique 60 Hz chez 30 adultes et 30 adolescents non-EHS. Le protocole de l'étude est strictement identique à celui des publications de Kwon *et al.* (2012b) (*cf.* § 6.2.1.2.3), car il s'agit de la même équipe. C'est une étude en double aveugle où les participants étaient exposés à des champs électromagnétiques 60 Hz d'intensité 12,5 µT pendant 32 minutes. Différents paramètres physiologiques ont été mesurés (l'activité électrique cardiaque et le rythme respiratoire notamment). Les résultats sont superposables à ceux de l'étude précédente de Kim *et al.* (2012) (*cf.* § 6.2.1.2.3), à savoir :

- l'absence d'effets spécifiques liés à l'exposition réelle au champ électromagnétique sur les fréquences cardiaque et respiratoire ou le rapport LF/HF (ici exprimé en pourcentage de la valeur basale) ;
- il n'y a pas de différence entre les deux groupes d'âge (adolescents et adultes) sur l'ensemble des paramètres mesurés ;
- les résultats concernant la perception des champs électromagnétiques sont présentés au § 5.3 (Kim *et al.* 2013).

Exposition aux radiofréquences

Parazzini *et al.* (2013) ont réalisé une étude croisée en double aveugle sur les effets de l'émission d'un téléphone GSM sur la variabilité de la fréquence cardiaque au repos et lors d'un test d'activation sympathique (lever actif), sur une population de 26 personnes non-EHS. Les personnes sous traitement médical ou susceptibles de présenter des anomalies du SNA ont été exclues du protocole. La variabilité non linéaire de la fréquence cardiaque (Poincaré *plot* et entropie) a été étudiée à partir de l'intervalle R-R enregistré par un ECG. Les résultats ont été les suivants :

- le lever actif pendant la période d'exposition factice diminuait la complexité du signal cardiaque et sa variabilité non linéaire, suggérant une perte de sa plasticité et de ses capacités de modulation ;
- les valeurs de base et les variations mesurées pendant l'exposition factice ou réelle n'étaient pas significativement différentes (Parazzini *et al.* 2013).

La méthode d'analyse statistique est adaptée.

Choi *et al.* (2014) ont réalisé une étude croisée (exposition factice et exposition réelle pendant 32 minutes), en double aveugle, pour évaluer les effets d'une exposition à un signal de type WCDMA chez 26 adultes et 26 adolescents non-EHS. Le protocole de l'étude est strictement identique à celui des publications de Kwon *et al.*, car il s'agit de la même équipe. Les paramètres évaluant l'impact de l'exposition sur le SNA sont classiques : fréquences cardiaque et respiratoire, variabilité sinusale. Par ailleurs, la perception de l'exposition et le ressenti de huit symptômes subjectifs ont également été évalués (*cf.* § 5.3). Les résultats ont été les suivants :

- il n'y avait pas de différences significatives des fréquences cardiaque ou respiratoire ni de la valeur du rapport LF/HF entre les deux groupes avant toute exposition ;

¹⁷⁵ Le rapport LF/HF est supposé refléter la balance sympathovagale (voir en Annexe 11).

- l'exposition, qu'elle soit factice ou réelle, ne modifiait ni la fréquence cardiaque ni la fréquence respiratoire ;
- les deux périodes d'exposition augmentaient la valeur du rapport LF/HF de façon comparable ;
- il n'y avait pas de différence dans les réponses des adultes et des adolescents ;
- les deux groupes de volontaires avaient des réponses similaires quant à l'identification de la nature réelle ou factice de l'exposition (les résultats concernant la perception des champs électromagnétiques sont présentés au § 5.3) (Choi *et al.* 2014).

7.4.3 Études phénotypiques

Les deux articles présentés ci-après ne sont pas des études de provocation (traitées au § 6.2.1), mais de recherche d'un phénotype différent entre personnes se déclarant EHS et témoins. Les personnes ne sont soumises à aucune exposition autre que celles de l'environnement.

Absence d'exposition

Lyskov *et al.* (2001b) ont réalisé une seconde étude (*cf.* la première étude de Lyskov *et al.* (2001a) présentée au § 6.2.1.2.3), qui s'intéresse aux différences de phénotypes entre personnes se déclarant EHS (n = 20) et témoins (n = 20) en utilisant les mêmes tests que Lyskov *et al.* (2001a) (EEG, potentiels évoqués visuels, mesures de la pression artérielle et de la fréquence cardiaque, analyse spectrale de la variabilité sinusale en utilisant des valeurs correctes des bandes de fréquences HF et LF, conductances électrodermales), mais en ajoutant des tests évaluant l'activité végétative cardiovasculaire dans le domaine temporel (déviation standard SD de la fréquence cardiaque, épreuve de respiration profonde, rapport 30/15 (*cf.* signification du rapport en Annexe 11)). L'environnement radioélectrique n'était pas connu. Les résultats ont été les suivants :

- comme dans l'étude précédente, la fréquence cardiaque était significativement plus élevée chez les personnes se déclarant EHS que chez les témoins ;
- l'indicateur de la variabilité globale de la fréquence cardiaque (SD) était plus faible chez les personnes se déclarant EHS, mais ceci s'explique par une fréquence cardiaque plus élevée chez ces personnes ;
- le rapport LF/HF de la fréquence cardiaque était plus élevé chez les personnes se déclarant EHS que chez les témoins (Lyskov, Sandström, and Hansson Mild 2001b). Cette évolution de la balance LF/HF traduit une augmentation de la composante sympathique du SNA, qui est souvent observée en présence d'un stress environnemental.

Les valeurs d'énergie des bandes LF et HF ne sont pas fournies, ce qui ne permet pas de connaître l'origine de la différence LF/HF entre les personnes se déclarant EHS et témoins. Cependant, l'absence de différence pour le rapport ventilatoire E/I (expiration/inspiration) lors de l'épreuve de respiration profonde évaluant l'activité parasympathique à destination cardiaque suggère que la différence du rapport LF/HF pourrait être due à une activité sympathique plus élevée chez les personnes se déclarant EHS. La plus grande augmentation du rapport 30/15 lors du lever chez les témoins que chez les personnes se déclarant EHS peut paraître contradictoire avec les données de LF/HF. Il est dommage que les variations de variabilité sinusale et du rapport LF/HF pendant l'orthostatisme n'aient pas été mesurées.

Sandström *et al.* (2003) ont effectué, pendant 24 heures, des enregistrements ECG de personnes se déclarant EHS (n = 14) et chez des témoins (n = 14) appariés selon l'âge et le genre. Ils ont calculé la fréquence cardiaque moyenne (FC) et sa variabilité (HRV) à partir d'un enregistrement holter ECG, en relation avec la mesure de l'exposition au champ magnétique environnant (40-800 Hz) sur l'ensemble des 24 heures. Il ressort de ce travail que :

- contrairement à ce qui était observé chez les témoins, il existait chez les personnes se déclarant EHS une augmentation significativement plus faible de l'énergie de la bande HF (bande haute fréquence évaluant l'activité parasympathique) lors de l'induction du sommeil et durant la nuit et ce, en dépit de l'absence de variations notables du champ magnétique.

Des anomalies similaires ont été retrouvées au niveau du rapport LF/HF identique dans les deux groupes durant la période de veille et significativement plus élevé la nuit chez les personnes se déclarant EHS que chez les témoins ;

- l'énergie des bandes basses fréquences (reflétant l'activité sympathique) est identique dans les deux groupes ;
- aucune association entre la variabilité de la fréquence cardiaque et l'exposition environnementale aux champs électromagnétiques n'a été observée (Sandström *et al.* 2003).

Ces résultats suggèrent l'existence de troubles du sommeil (pouvant impacter par exemple la répartition des différents stades de sommeil, le nombre de cycles, les périodes de sommeil, etc.) chez les personnes se déclarant EHS. Les auteurs avancent l'hypothèse selon laquelle ces troubles seraient dus à un déséquilibre du système nerveux autonome, car il est bien établi que, selon les stades, le sommeil s'accompagne de variations de la variabilité sinusale (cf. analyse des articles sur le sommeil au § 6.2.1.2.5). En revanche, ce travail, bien mené (les techniques utilisées sont convaincantes), ne montre pas de lien entre la variabilité de la fréquence cardiaque (HRV) et l'exposition aux champs électromagnétiques.

7.4.4 Personnes se déclarant EHS : synthèse des données et conclusion

Une dizaine d'études de provocation (Lyskov *et al.*, 2001a ; Wilén *et al.*, 2006 ; Eltiti *et al.*, 2009 ; Furubayashi *et al.*, 2009 ; Nam *et al.*, 2009 ; Wallace *et al.*, 2010 et 2012 ; Kim *et al.*, 2012 ; Kwon *et al.*, 2011 ; Kwon *et al.*, 2012b) (analysées au § 6.2.1.2.2 et au § 6.2.1.2.3) et deux études de recherche d'un phénotype spécifique (Lyskov *et al.*, 2001b ; Sandström *et al.*, 2003) (analysées au § 7.4.3) se sont intéressées à l'activité du SNA des personnes se déclarant EHS.

Certaines études semblent mettre en évidence un phénotype différent au niveau basal (c'est-à-dire en l'absence d'exposition) entre les personnes se déclarant EHS et les témoins, concernant l'activité du SNA (Lyskov *et al.*, 2001a et b ; Sandström *et al.*, 2003 ; Wilén *et al.*, 2006, Wallace *et al.*, 2010, voire aussi Eltiti *et al.*, 2009). L'origine de cette différence serait un déséquilibre de la balance ortho/parasympathique, qui se manifesterait par une augmentation de la composante orthosympathique, une tachycardie et une augmentation de la conductance cutanée. Ces modifications pourraient traduire un effet du stress lié aux conditions expérimentales. Cependant, les résultats sont divergents : la valeur du rapport LF/HF est généralement plus élevée chez les personnes se déclarant EHS (Lyskov *et al.*, 2001b ; Sandström *et al.*, 2003), mais l'inverse est parfois observé (Lyskov *et al.*, 2001a). Les travaux de Wallace *et al.* ont montré en 2010 une augmentation de la fréquence cardiaque, qu'ils n'ont plus retrouvée en 2012. D'autres auteurs n'ont pas non plus décrit de telles différences (Furubayashi *et al.*, 2009 ; Kwon *et al.*, 2011, 2012b, Nam *et al.*, 2009 ; Kim *et al.*, 2012). L'hétérogénéité des résultats peut s'expliquer par plusieurs limites, que l'on retrouve dans la plupart de ces études, notamment :

- 1) la faible taille des échantillons et donc une faible puissance statistique des études ;
- 2) l'absence d'évaluation, même simple, de l'activité du SNA préalable à l'inclusion des personnes. Ainsi, lorsque cela est réalisé, c'est-à-dire rarement, on constate un pourcentage non négligeable de participants souffrant de maladies connues pour être associées à des anomalies de fonctionnement du SNA (cf. Annexe 10). Ceci pose le problème de la sélection des participants dans les études ;
- 3) les moyens utilisés pour l'analyse de l'activité du SNA sont peu adaptés à la question posée. En effet, le recueil des conductances électrodermales, bien que souvent réalisé, est peu adapté en raison de sa très grande variabilité et de sa sensibilité aux conditions expérimentales. L'analyse de la variabilité sinusale, bien que mieux validée quant à sa signification physiologique, est peu adaptée à la réalisation d'études de provocation, car elle repose sur une stabilité indispensable du signal pendant des périodes d'enregistrements assez longues (de l'ordre de 5 minutes), peu compatibles avec la détection de l'effet d'une exposition de brève durée aux radiofréquences. Par ailleurs,

l'analyse de la variabilité sinusale doit répondre à un certain nombre de règles méthodologiques rarement détaillées dans les études.

Ainsi, en l'état actuel des connaissances, l'hypothèse selon laquelle les personnes se déclarant EHS souffriraient d'un dysfonctionnement basal du SNA ne peut être ni validée ni exclue.

Par ailleurs, les données disponibles ne permettent pas de mettre en évidence un impact des champs électromagnétiques sur le SNA des personnes se déclarant EHS (ni celui des témoins).

L'hypothèse d'un dysfonctionnement du SNA dû à l'exposition aux champs électromagnétiques n'est pas non plus vérifiée avec les techniques mises en œuvre jusqu'à présent.

7.5 Système nerveux central

7.5.1 La barrière hémato-encéphalique (BHE)

Parmi les hypothèses mises en avant par certains auteurs, et notamment par des associations, pour expliquer tout ou partie de la survenue de l'EHS, une altération de l'intégrité de la barrière hématoencéphalique (BHE) a été proposée.

Hypothèse 10 pour expliquer tout ou partie de la survenue de l'EHS : une altération de l'intégrité de la barrière hématoencéphalique (BHE) ?

L'hypothèse selon laquelle la survenue de l'EHS serait due à un problème de perméabilité de la BHE a été abordée lors des auditions du Criirem, des Électrosensibles de France et de Priartem, ainsi que d'une Terre pour les EHS.

7.5.1.1 Introduction

La BHE régule les échanges entre le sang et le cerveau. En conditions physiologiques, elle contrôle activement l'entrée et la sortie des composés endogènes et exogènes et contribue à l'homéostasie du liquide extracellulaire cérébral et au maintien des conditions optimales pour les fonctions neuronales et gliales. Cette action est rendue possible grâce aux caractéristiques structurales et biochimiques de ses composants, soit les cellules endothéliales, les péricytes et les pieds astrocytaires (cf. revue de (Wolburg and Lippoldt 2002) et rapport (Anses, 2013, § 7.1.2) pour les fonctions et caractéristiques de la BHE, ainsi que la revue de (Stam 2010) pour les méthodes d'exploration *in vivo* chez le rongeur et les modèles d'études *in vitro*). Toute augmentation de la perméabilité de cette barrière est potentiellement délétère, car elle permet l'entrée dans l'espace extracellulaire cérébral de substances potentiellement toxiques, ainsi que la formation d'œdèmes.

Des altérations de la BHE sont décrites dans de nombreuses pathologies cérébrales, en lien avec notamment une mort neuronale, et incluent des pathologies auto-immunes (sclérose en plaques), infectieuses (SIDA, méningites, paludisme, etc.), neurodégénératives (Alzheimer, etc.), ainsi que l'ischémie ou encore certaines tumeurs cérébrales. L'intégrité de cette barrière dépend en particulier de la température ; en effet, une augmentation de la température cérébrale de 1°C chez l'animal induit des altérations réversibles de la BHE, pointant l'importance du contrôle strict de celle-ci dans les études expérimentales visant à étudier les effets non thermiques des radiofréquences.

7.5.1.2 Modèles et personnes non-EHS : rappel des conclusions des expertises précédentes

Études *in vitro* et *in vivo*

L'idée que les effets des radiofréquences sur le cerveau puissent être liés à une altération de la BHE a émergé il y a plus de 30 ans avec des études chez le rongeur (Oscar and Hawkins 1977,

Williams *et al.* 1984a, Williams, Del Cerro, and Michaelson 1984b, Neubauer *et al.* 1990) puis à partir des années 2000, notamment avec les travaux du groupe suédois de Salford¹⁷⁶ qui, à plusieurs reprises, a montré qu'une exposition aux radiofréquences pouvait altérer la perméabilité de la BHE chez le rat (Eberhardt *et al.* 2008, Grafstrom *et al.* 2008, Nittby *et al.* 2009, Salford *et al.* 2003) (articles analysés dans le rapport Afsset de 2009) ou encore l'expression de gènes impliqués dans la régulation de la BHE (Belyaev *et al.* 2006). Cependant, plusieurs études expérimentales issues de groupes de recherche différents ont tenté de confirmer ces résultats chez le rat ou la souris, mais sans succès (Cosquer *et al.* 2005, Poulletier de Gannes *et al.* 2009, McQuade *et al.* 2009) (articles analysés dans les rapports publiés par l'Afsset en 2009 et par l'Anses en 2013).

Depuis la publication du dernier rapport de l'Anses (2013) sur les effets sanitaires des radiofréquences, de nouvelles études ont été publiées, qui proposent notamment une approche d'étude de la BHE chez l'animal (*in vivo* et *in vitro*) plus complète. Ainsi, Tang *et al.* (2015) ont montré chez le rat des altérations de la perméabilité de la BHE (extravasation de l'albumine et de bleu evans) dans l'hippocampe et le cortex après 28 jours d'exposition aux radiofréquences (signal « continu » GSM 900 MHz, 3 h/jour, 1 mW/cm², DAS corps entier = 0,16 W/kg et DAS tête = 2 W/kg) (Tang *et al.* 2015). De plus, ces auteurs ont mis en évidence le rôle de la voie ERK1/2 impliquée notamment dans l'extravasation de l'albumine. De tels effets n'étaient pas ou peu observés après une exposition similaire d'une durée de 14 jours.

Wang *et al.* (2015) ont utilisé un modèle *in vitro* de la BHE (co-culture de lignées cellulaires de type endothéliale-épithéliale humaine et d'astrocytes de cortex cérébral de rat) et une exposition pendant 5 minutes à un signal radiofréquence de type radar d'intensité très élevée (2,856 GHz à une puissance moyenne de 50 mW/cm², soit une intensité de champ électrique de 434 V/m¹⁷⁷) n'induisant cependant pas de modification de la température du milieu. Les radiofréquences ont induit des changements transitoires (entre 1 h et 24 h post-exposition) caractérisés par :

- un élargissement des jonctions serrées intercellulaires des cellules endothéliales et une baisse de l'expression des protéines spécifiques de ces jonctions (occludine, ZO-1) ;
- une baisse de la résistance électrique trans-endothéliale (marqueur de la perméabilité de la BHE) ;
- une augmentation de la perméabilité de la peroxydase de raifort ;
- une activation partielle de la voie VEGF/flk-1-ERK impliquée dans la composition et la perméabilité des jonctions serrées intercellulaires (Wang *et al.* 2015).

Ces données confortent celles obtenues par Zhou *et al.* (2013) avec un signal radiofréquence pulsé d'intensité très élevée (100 ou 400 kV/m) (Zhou *et al.* 2013), mais pas d'autres données antérieures (Franke, Ringelstein, and Stogbauer 2005b, Franke *et al.* 2005a, Kuribayashi *et al.* 2005) dans des modèles *in vitro* exposés à des signaux radiofréquences de type UMTS, GSM 1 800 ou encore 1 439 MHz (Franke, Ringelstein, and Stogbauer 2005b, Franke *et al.* 2005a). En effet, ces dernières études ne montrent pas de changement de la perméabilité de la BHE sous l'effet des radiofréquences.

Enfin, Masuda *et al.* (2015a,b) dans un modèle d'exposition locale au niveau du cortex cérébral de jeunes rats (1 et 2 mois) à l'aide d'une fenêtre intra-crânienne, n'ont montré aucune extravasation de fluorescéine, ni de modification des paramètres de la microcirculation cérébrale (visualisation en temps réel) pendant les 50 minutes d'exposition à un signal radiofréquences à 1 457 MHz (DAS

¹⁷⁶ À plusieurs reprises, l'Anses a envoyé des courriers à Salford et Persson pour leur demander des précisions sur les conditions d'obtention de leurs résultats et leur interprétation de ces derniers, mais sans succès. Ils n'ont pas souhaité répondre aux questions du GT de l'Anses.

¹⁷⁷ La publication mentionne une puissance maximale de 200 W/cm², mais il s'agit vraisemblablement d'une puissance de 200 mW/cm², correspondant à une intensité maximale de champ électrique de 868 V/m. Les impulsions de longueur 0,5 ms sont délivrées toutes les 2 ms.

local = 2 W/kg), ni d'extravasation d'albumine mesurée à la fin de l'exposition (Masuda *et al.* 2015a, Masuda *et al.* 2015b).

Leurs données confirment celles obtenues en 2007 chez le rat adulte selon le même protocole (Masuda *et al.* 2007a, 2007b).

Les articles récents de Sirav et Seyhan (2016), réalisés dans la lignée de leurs travaux antérieurs (Sirav and Seyhan 2011, 2009), et de Razavi *et al.* (2015), ont analysé chez le rat la perméabilité de la BHE par l'extravasation du Bleu Evans pour la première étude (Sirav and Seyhan 2016) et par une coloration histologique (hématoxyline & éosine) et un kit anti-albumine pour la seconde (Razavi *et al.* 2015). Ces deux études présentent des faiblesses méthodologiques importantes, au niveau de la description et du contrôle du système d'exposition (*cf.* rapport Anses 2013 pour Seyhan et Sirav) incluant l'absence de caractérisation de l'exposition (DAS) pour Razavi *et al.* De plus, l'absence de rats soumis à une exposition factice pour Razavi *et al.* et une analyse des résultats réduite à son minimum ne permettent pas de retenir ces résultats pour les conclusions du rapport (*cf.* analyse des articles de Sirav et Seyhan 2009 et 2011 dans le rapport Anses 2013).

L'article de Persson¹⁷⁸ *et al.* (2012) n'avait pas été analysé dans le rapport publié par l'Anses en 2013, car il ne remplissait pas les critères scientifiques habituels : il ne figure pas dans les bases de données internationales (*PubMed*, *Scopus*) et ne répond pas aux critères de sélection des articles pour le rapport (il n'a, notamment, pas été publié dans un journal à comité de lecture) (*cf.* § 2.1). Il s'agit d'un article de l'équipe de Salford, publié dans le journal *Acta Scientiarum Lundensia*, qui est une revue à compte d'auteur créée en 2011 (Persson 2012). Son comité scientifique ne comprend que des membres de l'Université de Lund (Suède). L'article n'est pas un travail « original », dans la mesure où les auteurs ont en partie ré-analysé des résultats antérieurs publiés dans des articles précédents, ainsi que ceux d'auteurs n'appartenant pas à leur équipe. Il s'agit toujours des mêmes résultats de l'équipe de Salford montrant un effet des radiofréquences sur la BHE chez le rat.

Études chez l'être humain

Chez l'être humain, l'étude de la perméabilité de la BHE repose principalement sur les techniques d'imagerie cérébrale 3D, IRM et scanner X. Elle nécessite l'utilisation de produits de contraste qui ne franchissent pas la BHE lorsque celle-ci est intacte, et diffusent dans les espaces extracellulaires cérébraux lorsque celle-ci est altérée. Ces produits de contraste sont, soit des composés iodés non dépourvus de toxicité pour le scanner X, soit des complexes de gadolinium mieux tolérés pour l'IRM. Cette dernière technique est donc actuellement la technique de référence. Cependant, jusqu'à une date récente, elle n'avait pas les performances suffisantes en matière de résolution temporelle et spatiale pour permettre les calculs nécessaires à la caractérisation fine du fonctionnement de la BHE dans l'ensemble du cerveau. Ceci explique que ces méthodes de *dynamic contrast-enhanced MRI* (DCE-MRI) n'aient pu être appliquées à l'étude des effets des radiofréquences sur la BHE chez l'être humain (non-EHS).

D'autres approches utilisant des marqueurs sanguins de dysfonctionnement de la BHE comme la protéine sérique S100 β , la transthyréline (TTR) ou encore la protéine β -trace, n'ont pas permis d'établir un lien évident entre leurs concentrations circulantes et le profil d'utilisation du téléphone mobile (durée d'exposition, date de la première utilisation du téléphone mobile) évalué par des questionnaires écrits (trois études du même groupe : (Soderqvist *et al.* 2012, Soderqvist, Carlberg, and Hardell 2009a, 2009b)).

Söderqvist *et al.* (2015) ont également évalué l'impact d'une exposition de 30 minutes aux radiofréquences (890 MHz, DAS_{10g} = 0,2 et 2 W/kg) sur les concentrations de trois marqueurs sanguins (S100 β , TTR et protéine β -trace) chez 24 personnes (12 hommes, 12 femmes) jeunes (18-30 ans, médiane = 22,5 ans) :

- les résultats n'ont montré aucun effet d'une exposition aiguë aux radiofréquences sur les trois marqueurs sanguins étudiés (Soderqvist, Carlberg, and Hardell 2015).

¹⁷⁸ Cet article est cité ici pour répondre à la demande de l'association Priartem [*cf.* Audition Priartem].

7.5.1.3 Personnes se déclarant EHS : synthèse des données et conclusion

Étant donné que certaines maladies neurologiques (Parkinson et Alzheimer par exemple) s'accompagnent d'une augmentation plus ou moins importante de la perméabilité de la BHE, il est parfaitement légitime de se poser les questions de savoir (1) si l'exposition à des radiofréquences aggrave les altérations de la BHE provoquées par d'autres facteurs et (2) si l'EHS, qui comporte une symptomatologie de dysfonctionnement cérébral, est associée à une augmentation de cette perméabilité.

Concernant la première hypothèse, les données publiées entre 2009 et 2013 ne permettaient pas de remettre en cause les conclusions des précédents rapports (Afsset 2009), qui étaient en accord avec les conclusions de la monographie du CIRC (2013), à propos de l'innocuité des radiofréquences sur la BHE dans les divers modèles biologiques testés, en dehors d'effets thermiques (CIRC 2013). Cependant, les données récentes, qui incluent pour certaines la recherche de mécanismes cellulaires et moléculaires, alimentent à nouveau le débat autour de l'innocuité ou non des radiofréquences. Ainsi, dans les conditions d'expositions athermiques, l'hypothèse de modifications de la perméabilisation de la BHE par les champs électromagnétiques, qui seraient à l'origine de l'extravasation de molécules du sang vers le liquide cébrospinal, ne peut être ni acceptée, ni rejetée et surtout nécessite d'être confortée par des études complémentaires. En effet, les résultats contradictoires à l'origine de la controverse sur la BHE pourraient notamment être liés à l'utilisation de méthodologies différentes, incluant le modèle d'étude (*in vivo*, *in vitro*, clinique), les marqueurs de la perméabilité de la BHE (Bleu Evans, albumine, protéine 100 β , résistance électrique trans-endothéliale, etc.) et les caractéristiques des expositions aux radiofréquences. Ces études nécessitent la mise en place de protocoles de recherche standardisés qui permettraient des analyses comparatives.

Concernant la seconde hypothèse, Belpomme *et al.* (2015) se sont intéressés à la perméabilité de la BHE (à travers des dosages de la protéine S100 β et de la nitrotyrosine) chez un nombre élevé de personnes se déclarant EHS et/ou SIOC (cf. analyse détaillée de l'article au § 6.1.2). Cependant, l'étude est trop imprécise et donne des résultats insuffisants pour apporter des arguments en faveur d'une altération de la BHE à l'origine de l'EHS chez tous les participants. Néanmoins, les auteurs ont recueilli un volume de données impressionnant à partir duquel des traitements mieux adaptés pourraient peut-être caractériser certaines sous-populations et faire progresser la compréhension physiopathologique de l'EHS.

Perspectives

Il serait souhaitable de disposer de nouvelles techniques d'exploration, plus fiables et moins invasives, pour pouvoir étudier les altérations de la BHE chez l'animal et *a fortiori* chez l'être humain.

Par exemple, le développement d'approches plus fines en imagerie cérébrale utilisant l'IRM-DCE (*Dynamic Contrast-Enhanced*) (Taheri *et al.* 2011) permettrait l'amélioration des résolutions spatiale et temporelle pour quantifier la constante de perméabilité de la BHE dans les différentes régions cérébrales de la matière blanche et de la matière grise (Chassidim *et al.* 2015). Montagne *et al.* (2015) ont ainsi réalisé une étude sur l'impact des modifications de la BHE dans l'hippocampe de personnes âgées, qui montre que l'altération de la perméabilité de la BHE est en lien avec l'existence de troubles cognitifs (Montagne *et al.* 2015).

De même, l'utilisation de l'imagerie en tenseur de diffusion (TDI, *tensor imaging diffusion*) associée au dosage plasmatique de la protéine S100 β , ainsi que celui des auto-anticorps contre cette même protéine¹⁷⁹ représente une possibilité d'étude plus approfondie de l'intégrité de la BHE chez l'être humain.

Ces deux approches innovantes ouvrent de nouvelles perspectives pour une recherche fiable des effets des radiofréquences sur l'intégrité de la BHE chez l'être humain.

¹⁷⁹ Cf. (Marchi *et al.* 2013) : une étude sur les traumatismes crâniens chez les footballeurs.

7.5.2 La neurotransmission monoaminergique

Hypothèse 11 pour expliquer tout ou partie de la survenue de l'EHS : des perturbations dans la production de neurotransmetteurs ?

L'hypothèse selon laquelle la survenue de l'EHS serait liée à un problème de production de catécholamines ou de sérotonine a été abordée lors de l'audition de l'association Une Terre pour les EHS.

7.5.2.1 Des perturbations de la production de catécholamines ?

7.5.2.1.1 Introduction

Les catécholamines sont des neurotransmetteurs (noradrénaline et dopamine) ou une hormone produite par la médullo-surrénale (adrénaline). Leur voie de biosynthèse commence par une hydroxylation de la tyrosine et la formation de lévodopa dont la décarboxylation aboutit à la dopamine. Celle-ci est ensuite hydroxylée pour donner la noradrénaline. La méthylation de cette dernière aboutit à la synthèse d'adrénaline.

En ce qui concerne le rôle des catécholamines (noradrénaline et dopamine) au niveau du système nerveux central, elles participent au contrôle de la motricité involontaire, à la régulation des affects et de l'humeur et modulent de nombreuses fonctions végétatives (vomissement, température corporelle, libido, etc.) ou endocriniennes (sécrétion de prolactine). À la périphérie, elles se comportent comme un vasodilatateur rénal et régulent le tonus des sphincters digestifs. La noradrénaline est le neurotransmetteur principal du système nerveux sympathique et agit par l'intermédiaire de récepteurs qu'elle partage avec l'adrénaline (récepteurs adrénergiques, cf. § 7.4 sur le SNA). Ces deux catécholamines participent à la réaction de stress « de lutte ou de fuite »¹⁸⁰ (*flight-or-fight*) en modulant le tonus vasculaire, en stimulant les fonctions intrinsèques du cœur (fréquence cardiaque, conduction, force de contraction et excitabilité). Elles interviennent également dans la motricité digestive ou de la vessie et dans le métabolisme glucidique par exemple. Aux niveaux du système nerveux central, produite par le *locus coeruleus*, et de divers noyaux du bulbe rachidien, la noradrénaline joue un rôle dans l'attention sélective, la vigilance et le sommeil, les émotions, et le renforcement de certains circuits de la mémoire.

La production des catécholamines dépend de l'activité des neurones noradrénergiques et dopaminergiques, cette dernière étant elle-même soumise à de nombreuses influences neuronales.

Des perturbations de la production de catécholamines ont été évoquées parmi les mécanismes physiopathologiques possibles expliquant l'hypersensibilité aux radiofréquences, mais il existe peu de données scientifiques étayant cette hypothèse.

7.5.2.1.2 Modèles et personnes non-EHS : rappel des données des précédents rapports

Au niveau biochimique, chez l'animal, les effets des radiofréquences sur le contenu cérébral en monoamines sont peu documentés (Chance *et al.*, 1995 ; Benfante *et al.*, 2008 ; Fragopoulou *et al.*, 2012) et les données obtenues sont peu robustes (cf. notamment la critique de l'article de Fragopoulou *et al.* (2012) dans le rapport publié par l'Anses en 2013).

Chez l'être humain, Buchner *et al.* (2011) (article analysé dans le rapport (Anses, 2013)) ont étudié l'évolution des profils hormonaux de 60 personnes habitant la ville de Rimbach en Bavière et exposés aux champs électromagnétiques émis par une station de base (GSM). Ces auteurs ont effectué trois dosages urinaires d'adrénaline, de noradrénaline, de dopamine et de phényléthylamine, répartis sur 18 mois (Buchner 2011).

¹⁸⁰ La réponse combat-fuite a été décrite pour la première fois par le psychologue américain Walter Bradford Cannon. Sa théorie explique que la réaction animale face aux menaces accompagnée d'une décharge générale du système nerveux orthosympathique, amorce l'animal à un combat ou une fuite.

Il n'y a aucune dosimétrie (pas d'exposimètres individuels). Les expositions (DECT, GSM, Wi-Fi, etc.), autres que celles de l'antenne-relais, ne sont pas prises en compte. La classification en trois catégories selon l'exposition estimée par rapport à la distance à l'antenne n'est pas satisfaisante. La population étudiée est petite et très hétérogène (0-69 ans), avec très peu de participants par catégorie. L'échantillon retenu n'est pas représentatif de la population générale. Aucun facteur de confusion possible n'a été pris en compte (maladie, surcharge pondérale, etc.). Les conditions de mesures biochimiques n'ont pas été contrôlées (dosages en fonction de l'heure de la journée, etc.). De plus, un biais lié par exemple à l'alimentation ne peut être exclu, seules les monoamines ont été mesurées, mais pas leurs métabolites (méthanéphrines, métabolites acides), rendant hasardeuse l'interprétation des observations. Par ailleurs, si l'effet semble net 6 mois après le début de l'exposition, les courbes représentant les profils hormonaux ont en général un aspect en cloche avec un retour vers des concentrations normales au bout de 18 mois. L'analyse statistique de ces courbes, en particulier pour les différents niveaux d'exposition définis, n'est pas correcte et ne permet pas de conclure à d'une différence entre les groupes en fonction du temps.

7.5.2.2 Des perturbations de la production de sérotonine ?

7.5.2.2.1 *Introduction*

La sérotonine (5-hydroxytryptamine ou 5-HT), comme les autres monoamines, participe à la modulation de nombreuses fonctions cérébrales incluant la régulation de l'humeur et des affects, la température corporelle, la libido, le sommeil, la prise alimentaire, mais aussi les rythmes biologiques, la motricité, l'attention, le stress, les processus sensoriel et la cognition. Au niveau périphérique, la sérotonine est impliquée dans la motricité intestinale, le tonus vasculaire, les fonctions plaquettaire et cardiaque, etc.

La 5-HT, synthétisée à partir du tryptophane, un acide aminé essentiel, ne franchit pas la barrière hémato-encéphalique. En revanche, son métabolite principal formé sous l'effet des monoamines oxydases (MAO), l'acide 5-hydroxyindolacétique (5-HIAA) éliminé dans les urines, est le reflet de l'activité cérébrale de ce système de neurotransmission. La 5-HT exerce ses effets par l'intermédiaire de 14 récepteurs, ayant chacun un nombre important de sous-types différents. Ce sont des récepteurs couplés aux protéines G, sauf un qui est un récepteur-canal (5-HT₃).

Par son rôle important sur la régulation de l'humeur et les émotions notamment, la sérotonine est une cible pharmacologique essentielle (agonistes ou antagonistes des récepteurs 5HT, inhibiteurs de la recapture de la 5HT, ou de sa dégradation par la MAO-A) dans le traitement de nombreuses pathologies psychiatriques et neurologiques incluant la dépression, l'anxiété, les douleurs chroniques, la fibromyalgie, etc. Ainsi, en clinique, la plupart, voire tous les psychotropes interfèrent plus ou moins directement avec le système sérotoninergique, et les inhibiteurs de la recapture de la sérotonine représentent une des avancées majeures en psychopharmacologie et sont les médicaments les plus prescrits en France¹⁸¹.

La sérotonine affecte également les systèmes immunitaire et gastrointestinal (90 % de la sérotonine est synthétisée au niveau gastrointestinal). Il a été proposé récemment que la sérotonine faisait partie d'un circuit plus complexe au niveau du corps entier incluant le système immunitaire qui pourrait avoir un rôle dans l'homéostasie énergétique par la modulation de l'activité mitochondriale (Marazziti 2017).

À ce jour, le dysfonctionnement sérotoninergique dans les pathologies psychiatriques ne peut être relié à des entités nosologiques distinctes mais plutôt aux symptômes et dimensions partagés par différentes conditions. Des données récentes montrent que l'altération des processus sérotoninergiques au cours du développement constituerait une vulnérabilité avec un risque augmenté de psychopathologie : dans ce contexte, les événements de vie ultérieurs agiraient sur la réponse au stress et la régulation des émotions. Ainsi, l'implication d'un polymorphisme génétique sur le transporteur de la sérotonine (SERT) ou les sous-types de récepteurs à la

¹⁸¹ La 5-HT est le précurseur de la mélatonine produite au niveau de l'épiphyse et qui intervient dans les rythmes circadiens (cf. § 7.5.6 sur le sommeil et les rythmes circadiens, Encadré 8 et § 7.5.6.4).

sérotonine est associé à une plus grande sensibilité aux stimuli de l'environnement chez l'être humain dans le contexte de stress durant l'enfance et l'adolescence ayant impacté le système 5HT (Homberg *et al.*, 2016) (cf. § 3.8.4.1).

7.5.2.2.2 Modèles et personnes non-EHS

Les données *in vivo* et cliniques concernant les effets des radiofréquences sur la production de neurohormones sont parcellaires et divergentes (Masuda *et al.* 2009, Aboul Ezz *et al.* 2013, Maaroufi *et al.* 2014, Eris *et al.* 2015, Singh, Mani, and Kapoor 2015). À ce jour, on ne peut pas statuer sur un éventuel effet des radiofréquences sur la production des monoamines tant au niveau du cerveau qu'en périphérie.

7.5.2.3 Personnes se déclarant EHS : synthèse des données et conclusion

Chez l'être humain, les effets des radiofréquences sur les catécholamines et la sérotonine pourraient constituer le substrat biologique de certains symptômes évoqués par les personnes se déclarant EHS. Cette hypothèse a été soulevée par Buchner et Eger (2011) et reprise dans la revue de Genuis *et al.* (2012).

En ce qui concerne la production de monoamines (catécholamines, sérotonine), à notre connaissance, aucune étude scientifique concernant des personnes se déclarant EHS n'a été publiée à ce jour. En l'absence de données pouvant étayer ou infirmer cette hypothèse, aucune conclusion ne peut être tirée sur ce thème à l'heure actuelle. Les fonctions multiples des neuromodulateurs sont une difficulté majeure pour la compréhension et la mise en évidence d'une altération possible des systèmes de neuromodulation, en particulier celui passant par la sérotonine, dans la survenue ou l'entretien de l'EHS. Il n'existe pas de données suffisantes et convaincantes qui permettent de considérer qu'une altération de l'un et / ou l'autre de ces systèmes puisse être un élément discriminant vis-à-vis des nombreuses pathologies ayant des symptômes communs avec l'EHS.

7.5.3 Migraines

Hypothèse 12 pour expliquer tout ou partie de la survenue de l'EHS : les personnes se déclarant EHS, ou certaines d'entre elles, auraient-elles un terrain migraineux ?

L'hypothèse selon laquelle la survenue de l'EHS serait liée à un terrain migraineux a été abordée lors d'échanges avec le D^r Chevallier, ainsi que par le D^r Choucroun.

7.5.3.1 Introduction

Les céphalées (ou maux de tête) sont des symptômes extrêmement fréquents. À l'échelle mondiale, l'OMS estime que 47 % de la population générale adulte a eu au moins une fois une céphalée au cours de l'année écoulée¹⁸². Cependant, l'OMS, suivant en cela les recommandations de l'*International Headache Society* (IHS), considère que ce terme recouvre une réalité hétérogène et distingue les céphalées primaires, parmi lesquelles la migraine, et les céphalées secondaires, dont la céphalée par surconsommation de médicaments¹⁸³. Cette distinction a rarement été faite dans les études portant sur les symptômes de l'EHS. Le D^r Chevallier a attiré l'attention du groupe de travail sur ce problème et sur l'intérêt thérapeutique qu'il y aurait à rechercher et à traiter les cas de migraine que pourraient présenter les sujets se déclarant EHS.

La migraine est une maladie neurologique répertoriée dans la Classification internationale des maladies de l'OMS sous le numéro G43. Elle se manifeste essentiellement par des crises répétées de maux de tête accompagnés de symptômes divers (cf. Encadré 5). La migraine n'est que l'une

¹⁸² <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs277/fr/>

¹⁸³ <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs277/fr/>

des 14 entités décrites dans la classification internationale des maux de tête. La version bêta de la troisième édition de cette classification (*Cephalagia* 2013 ; 33 (9) : 629-808) les classe en trois grandes catégories¹⁸⁴. Comme la migraine, chaque entité est subdivisée en plusieurs sous-entités dont il n'est pas utile de parler ici, sauf pour souligner le caractère incomplet des études réalisées jusqu'à présent sur les maux de tête chez les sujets se déclarant EHS.

Si les hémicrânies sont connues depuis l'antiquité et le terme « migraine » utilisé depuis le 14^{ème} siècle, les critères de diagnostic pour la pratique (cf. Encadré 5), n'ont été publiés qu'en 1988 par l'*International Headache Society* (IHS), dans le cadre de la première classification internationale des céphalées. Ils sont aujourd'hui utilisés dans le monde entier.

Encadré 5 : critères de diagnostic de la migraine définis par l'IHS

- (A) au moins cinq crises remplissant les critères B à D (quelle que soit la durée de la période de temps au cours de laquelle ces crises sont survenues) ;
- (B) crises de maux de tête durant entre 4 et 72 heures ;
- (C) mal de tête ayant au moins deux des caractéristiques suivantes : unilatéral, pulsatile, d'intensité modérée à forte, aggravé par la montée des escaliers ou autre activité physique de routine semblable ;
- (D) au moins un des deux critères suivants pendant la crise : nausées et / ou vomissements, photophobie et phonophobie ;
- (E) absence d'anomalie neurologique dans les antécédents, à l'examen clinique et aux investigations complémentaires (ou, en présence d'une telle anomalie, les premières crises de migraine n'ont pas coïncidé avec elle).

L'IHS a en outre proposé des critères de classification des crises de migraine qui sont destinés à permettre la réalisation de recherches sur des groupes de patients homogènes et qui ont eux aussi été adoptés universellement¹⁸⁵. Ceci a permis la réalisation de recherches fructueuses sur la physiopathologie de la migraine et l'homogénéisation des populations incluses dans les essais cliniques. Ainsi, de nombreux essais thérapeutiques bien conduits ont, en particulier, abouti à la mise sur le marché de traitements efficaces de la crise migraineuse.

¹⁸⁴ Les trois catégories de maux de tête sont les suivantes :

- les maux de tête primaires (qui regroupent quatre entités : migraines, céphalées de tension, céphalées trigéminales et autres céphalées primaires) ;
- les maux de tête secondaires (qui en regroupent huit, dont les maux de tête attribués aux troubles psychiatriques) ;
- les neuropathies crâniennes douloureuses, les autres douleurs faciales et les autres maux de tête (qui en regroupent deux).

¹⁸⁵ Critères de classification des crises de migraine définis par l'IHS :

- Les migraines avec aura, dans lesquelles les maux de tête sont précédés et / ou accompagnés de troubles neurologiques transitoires. Ces derniers sont le plus souvent visuels, mais ils peuvent frapper le système sensitif ou le système du langage. Ces auras peuvent survenir isolément, sans être suivies ou accompagnées de maux de tête, ce sont les anciens équivalents migraineux. De même, les symptômes de migraine basilaire (vertige, instabilité et acouphènes) peuvent accompagner toutes les formes de migraine sans être associés aux douleurs nucales pulsatiles qui caractérisent cette forme de migraine. La migraine hémiplégique, familiale ou sporadique, est plus rare. Elle s'accompagne d'une aura motrice, qui peut se prolonger et s'accompagner de troubles complexes, mais reste de bon pronostic ;
- Les migraines sans aura, anciennes migraines communes, qui correspondent aux critères de diagnostic de l'Encadré 5 ;
- Les états mal de migraineux, lorsque la durée de la crise excède 72 heures ;
- Les migraines compliquées, exceptionnelles mais bien réelles, dans lesquelles les signes neurologiques de l'aura ne régressent pas complètement et laissent des séquelles ;
- Les migraines ophtalmoplégiques et les migraines rétinienues.

Il est connu depuis longtemps que la migraine est une maladie héréditaire. Il s'agit d'une maladie multigénique, avec plus d'une douzaine de gènes de susceptibilité identifiés. Ces gènes codent notamment pour des protéines impliquées dans des mécanismes qui assurent la transmission des signaux nerveux, comme la régulation glutamatergique. Une exception, la migraine hémiplegique familiale, qui est une maladie autosomique dominante liée à un seul gène, le même dans une famille¹⁸⁶.

Sur ce terrain génétiquement déterminé, les crises de migraine sont très souvent déclenchées par des facteurs qui varient d'une personne à l'autre (par exemple des facteurs alimentaires tels que les boissons alcoolisées ou le chocolat) et même, avec le temps, chez une même personne (par exemple en fonction du cycle menstruel ou de perturbations des rythmes circadiens).

7.5.3.2 Retour d'expérience

Les déclarations du D^r Chevallier sur les résultats qu'il a obtenus chez certaines personnes se déclarant EHS en les traitant comme des migraineux ont retenu l'attention du groupe de travail.

L'exercice et l'expérience du D^r Chevallier dans la prise en charge de ces personnes avaient été signalés par certaines associations [cf. Audition des Électrosensibles de France]. Des contacts ont donc été établis avec lui. Le D^r Chevallier est un nutritionniste de renom, qui a écrit plusieurs ouvrages dans ce domaine. Il dirige aussi à Montpellier une consultation pluridisciplinaire de pathologie environnementale dans une clinique privée, dans laquelle il reçoit 5 à 10 personnes se déclarant EHS par mois. Il ne s'est pas déplacé pour une audition, mais a adressé plusieurs courriels décrivant sa position. Selon lui, un grand nombre de ces personnes verraient leur état amélioré par un traitement conventionnel de la migraine et une médication à base de plantes, pour limiter les effets secondaires des traitements.

« Autrement dit pour notre équipe il n'y a aucun doute sur la réalité de ces troubles, ils ne concernent selon nos observations que des migraineux non traités ». (D^r Chevallier, courriel du 10/02/2015).

Selon lui, les céphalées migraineuses ont une prise en charge plus complexe chez la plupart des patients se déclarant EHS, compte tenu de leur réticence vis-à-vis de l'allopathie en général. Les approches plus « naturelles » sont d'emblée mieux acceptées, notamment la phytothérapie.

Le D^r Chevallier connaît bien les critères de diagnostic et de classification de l'ISH. Il utilise hors de leur indication des médicaments qui ont une AMM dans le traitement de fond de la migraine. Ce témoignage mérite d'être pris en considération, même si le D^r Chevallier estime ne pas avoir le temps de le publier.

7.5.3.3 Personnes se déclarant EHS : synthèse des données et conclusion

Dès la première description de signes fonctionnels attribués à l'usage de téléphone mobile (Hocking, 1998), des antécédents de migraine ont été rapportés par cinq (12,5 %) des 40 participants à l'étude, ce qui correspond à peu près à la fréquence de la maladie dans la population générale. Plus intéressant, chez deux d'entre eux, les céphalées décrites comme étant liées à l'usage du téléphone mobile ont été diagnostiquées médicalement comme étant des migraines. Par la suite, les auteurs n'ont pas fait la distinction entre les crises migraineuses et les autres céphalées. Le premier questionnaire faisant cette distinction est celui d'Eltiti *et al.* (2007 a). Cependant, ces auteurs n'ont pas publié leurs résultats détaillés symptôme par symptôme, mais seulement ceux d'une analyse en composantes principales de l'ensemble des données.

Les premières données disponibles sur la fréquence de la migraine chez des personnes se déclarant EHS sont celles de Schröttner et Leitgeb (2008) (cf. analyse de l'article au § 6.1.1.2). Cet article montre que la migraine figure parmi les symptômes les plus fréquents chez ces personnes. Il montre également l'intérêt qu'il pourrait y avoir à distinguer la migraine des autres céphalées et,

¹⁸⁶ À ce jour, quatre gènes de la migraine hémiplegique sont connus : CACNA1A, ATP1A2, SCN1A et PRRT2.

plus généralement, à utiliser les critères de classification des céphalées de l'IHS dans les études portant sur les symptômes de l'EHS. Cependant, il n'autorise aucune conclusion sur les relations entre EHS et migraine. Il ne permet même pas de dire si la migraine est plus ou moins fréquente chez les personnes se déclarant EHS que chez les témoins. De plus, il ne mentionne pas les critères utilisés par ces personnes - EHS et témoins - pour dire qu'elles sont migraineuses.

Stovner *et al.* (2008) (*cf.* analyse de l'article au § 7.6.3.2.3) ont observé des antécédents de migraine chez 4 (24 %) des 17 personnes qui ont été interrogées et examinées par un neurologue pour un diagnostic précis de leurs maux de tête selon la classification internationale (ICHD-2) dans le cadre d'une étude de provocation. Il s'agissait de migraines sans aura associées, dans un cas, à des migraines avec aura. En revanche, aucune des céphalées ressenties pendant ou après les 130 expositions (65 réelles et 65 factices) n'a été considérée comme étant une crise de migraine. L'intérêt de cette étude réside dans le fait que le diagnostic de migraine a été porté cliniquement par un neurologue et que sa fréquence semble, *a priori*, plus élevée que dans la population générale. Cependant, la portée de ce résultat est limitée par le petit nombre de participants.

Hagström *et al.* (2013) (*cf.* analyse de l'article au § 7.6.3.2.3) ont introduit un item « migraine et céphalées similaires » dans la liste de 68 symptômes proposée aux 194 personnes se déclarant EHS qui se sont prêtées à leur étude. En matière de fréquence dans le groupe étudié, cet item arrive au huitième rang, aussi bien avant l'apparition de l'EHS (25,8 %) qu'à la phase aiguë de celle-ci (43,8 %), loin derrière, dans ce dernier cas, le stress (60,3 %), les troubles du sommeil (59,3 %), les douleurs articulaires (58,2 %), la fatigue anormale (57,2 %), les tensions musculaires (55,7 %) et la photosensibilité (54,1 %).

Toutefois, la valeur de ces résultats est limitée par le fait qu'ils ont été obtenus à l'aide d'un questionnaire auto-rempli et retourné par la poste (taux de réponse de 52,1 %).

Par la suite, Kwon *et al.* (2012b) ont utilisé le score obtenu au questionnaire d'Eltiti comme l'un des critères d'inclusion de personnes se déclarant EHS et témoins dans leur étude de provocation portant sur les effets d'une exposition à un signal WCDMA (*cf.* analyse de l'article au § 6.2.1.2.3). Cela leur a permis de rapporter que parmi les 17 personnes se déclarant EHS, toutes se plaignaient de maux de tête, dont 15 de migraine, alors que parmi les 20 témoins, 6 seulement se plaignaient de migraines et aucun de maux de tête.

Cet article suggère l'existence d'un lien entre EHS et migraine. Cependant, comme pour l'article précédent, les données disponibles souffrent de l'absence de vérification de la nature de la céphalée basée sur l'utilisation des critères de l'IHS.

Ces données sont trop disparates pour en tirer la moindre conclusion. Notamment, l'hypothèse de l'existence d'un terrain migraineux à l'origine de l'EHS n'a pas été vérifiée. À ce jour, il n'existe aucun argument en faveur de la prescription d'antimigraigneux chez les personnes se déclarant EHS et le rapport bénéfice / risque de ces médicaments doit inciter à une grande prudence. En particulier, chez une personne, le diagnostic de migraine ne peut être porté que par un médecin utilisant les critères de classification de l'ICHD. Il en est de même pour toute recherche sur cette affection. Seules les études de Hocking (1998) et de Stovner *et al.* (2008) remplissent cette condition. Les autres études (Schröttner *et al.* 2008, Kwon *et al.* 2012b et Hagström *et al.* 2013) et l'expérience du D^r Chevallier contribuent à suggérer l'existence d'un lien entre migraine et EHS et justifient que des recherches centrées sur ce problème soient réalisées.

7.5.4 Activité électrique cérébrale

Hypothèse 13 pour expliquer tout ou partie de la survenue de l'EHS : un dysfonctionnement de l'activité électrique cérébrale ?

Cette hypothèse a été abordée lors de l'audition d'Électrosensibles de France / Priartem.

7.5.4.1 Introduction

L'étude de l'activité électrique cérébrale, couplée avec les mesures du débit sanguin et du métabolisme cérébral, permet l'exploration fonctionnelle du cerveau. Elle est réalisée à partir

d'électrodes placées sur le scalp, qui enregistrent l'activité électrique synchrone de populations de neurones corticaux : c'est l'électro-encéphalogramme (EEG). Celui-ci se divise en ondes de fréquences variables, *delta* (< 4 Hz), *thêta* (4-8 Hz), *alpha* (8-12 Hz) et *bêta* (12-30 Hz). L'EEG est une méthode non invasive utilisée en routine et très utile pour caractériser les différents états comportementaux comme la veille ou le sommeil (voir Encadré 8, p. 230). L'une des autres mesures de la fonction cérébrale en lien avec l'EEG est celle des potentiels évoqués qui représentent l'activité cérébrale associée à des stimuli sensoriels, cognitifs ou moteurs.

7.5.4.2 Personnes non-EHS : rappel des conclusions des précédents rapports

Le rapport publié par l'Anses en 2013 avait analysé dix études relatives aux effets des radiofréquences sur l'activité électrique cérébrale, dont trois chez l'animal et sept études cliniques chez des personnes non-EHS.

L'unique étude de qualité chez le rat montrait qu'une exposition sub-chronique aux radiofréquences amplifiait l'activité électrique uniquement dans la bande β_2 (17,8-30,5 Hz) dans l'hypothalamus et à un degré moindre dans le cortex cérébral (Vorobyov *et al.* 2010). L'activité dans les autres bandes de fréquences n'était pas modifiée.

Les quatre études cliniques de qualité portaient sur des critères différents et montraient :

- 1) une augmentation de la cohérence inter-hémisphérique du rythme *alpha* sous exposition GSM, plus marquée chez la personne âgée (Vecchio *et al.* 2010). En 2012, ces auteurs ont également montré que cette cohérence inter-hémisphérique du rythme *alpha* était plus élevée chez les personnes épileptiques que chez les témoins ;
- 2) une augmentation de la puissance *alpha* de l'EEG en condition basale (repos, sans test cognitif) sous exposition à un signal 2G (Croft *et al.*, 2010), ce qui confirmait les résultats d'études antérieures (Croft *et al.* 2008, Curcio *et al.* 2005, Regel *et al.* 2007). De plus, en 2010, Croft *et al.* ont utilisé une échelle d'activation psychologique (liste AD-ACL de Thayer [1967]) comprenant une liste de 28 adjectifs dits d'activation [calme, endormi, etc.] et 21 adjectifs dits de non-activation décrivant l'humeur. L'ensemble de ces adjectifs permet une auto-évaluation de l'état des personnes allant de l'excitation extrême à un sommeil profond (Thayer, 1967). Ces auteurs montrent que l'augmentation de la puissance *alpha* était associée chez la personne jeune à une activation psychologique en réponse à un test cognitif. Celle-ci n'a cependant pas été retrouvée chez les adolescents et chez les personnes âgées, ni sous exposition à un signal 3G, quel que soit leur âge (Croft *et al.* 2010).
- 3) un potentiel évoqué similaire à celui observé après exposition à un signal extrêmement basse fréquence à 60 Hz (200 μ T) après exposition à un signal 217 Hz simulant la fréquence des trames temporelles du GSM 900 MHz (Carrubba *et al.* 2010a) (article analysé dans le rapport (Anses, 2013) et discuté au § 5.2). Pour ces auteurs, ce potentiel évoqué serait une caractéristique des expositions aux champs électromagnétiques basses fréquences.
- 4) une modification des potentiels évoqués pendant une tâche cognitive : a) une augmentation de l'amplitude du potentiel évoqué N1 (ou N100, 1^{ère} onde négative sur l'EEG survenant environ 100 ms après la stimulation cognitive) sous exposition à un signal 2G lors de l'exécution d'une tâche de détection d'un signal discordant sans altération des performances cognitives et, b) un retard du rapport désynchronisation/synchronisation des rythmes *alpha* sous exposition à des signaux 2G et 3G avec une diminution des temps de réponses correctes sous exposition à un signal 3G lors des tâches de *N-back* (voir Annexe 12 ;, p341). Cet effet était plus marqué chez les adolescents que chez les adultes (Leung *et al.* 2011).

Les études réalisées chez des personnes non-EHS suggèrent que l'exposition aiguë aux radiofréquences peut modifier l'activité électrique du cerveau. Trois d'entre elles ont montré que cette modification dépendait de l'âge (Vecchio *et al.*, 2010 ; Croft *et al.*, 2010 ; Leung *et al.*, 2011).

7.5.4.3 Personnes se déclarant EHS : synthèse des données et conclusion

Les articles s'étant intéressés spécifiquement à l'activité électrique cérébrale chez les personnes se déclarant EHS sont rares. Le rapport publié par l'Afsset en 2009 avait décrit et analysé trois études d'un même groupe (Frick *et al.*, 2005 ; Landgrebe *et al.*, 2007 ; Landgrebe *et al.*, 2008a) concernant cette activité, et plus précisément l'excitabilité corticale. Les trois articles se sont intéressés à l'hypothèse de la démodulation des signaux radiofréquences. Les auteurs ont utilisé la stimulation trans-crânienne ou TMS (*transcranial magnetic stimulation*) qui permet d'explorer divers paramètres de la fonction cérébrale comme la connectivité, l'excitabilité ou encore la plasticité cérébrale. Ces études sont présentées au § 6.2.1.2.1, ainsi que leurs résultats, qui concernent la perception directe des champs électromagnétiques. Outre la détection d'un stimulus magnétique, les auteurs ont également étudié l'inhibition et la facilitation intracorticale à l'aide de la TMS dans l'étude pilote cas-témoins publiée en 2007 et répliquée en 2008. Ils ont montré que, chez les personnes se déclarant EHS, la facilitation intracorticale diminuait chez les jeunes et augmentait chez les personnes âgées. Cet effet âge-dépendant n'a pas été expliqué par les auteurs. De plus, l'étude de l'inhibition intracorticale n'a montré aucune différence entre le groupe de personnes se déclarant EHS et les deux groupes de témoins (Landgrebe *et al.*, 2007) (cf analyse de l'article au § 6.2.1.2.1). Ces travaux sont à considérer avec prudence, dans la mesure où le signal électromagnétique utilisé est très différent de ceux que l'on rencontre dans l'environnement.

Pour ce qui est des caractéristiques EEG des personnes se déclarant EHS dans le contexte d'études sur le sommeil, deux études cliniques expérimentales (Arnetz *et al.*, 2007 ; Lowden *et al.*, 2011) sont décrites dans le § 6.2.1.2.5. Comme indiqué dans la conclusion du chapitre sur le sommeil, ces deux études n'apportent aucune information utile en ce qui concerne la question des troubles du sommeil chez les personnes se déclarant EHS, car elles n'ont pas comparé les résultats obtenus chez ces personnes à ceux obtenus chez les témoins.

Ainsi, en l'état actuel des connaissances, il n'est pas possible de mettre en évidence un quelconque dysfonctionnement de l'activité électrique cérébrale spécifique aux personnes se déclarant EHS. Par ailleurs, les données disponibles ne permettent pas d'affirmer que l'effet biologique observé chez les sujets non-EHS s'inscrit ou pas dans les limites des variations physiologiques et qu'il peut entraîner un effet sanitaire favorable ou défavorable à long terme.

7.5.5 Métabolisme et débit sanguin cérébral

Hypothèse 14 pour expliquer tout ou partie de la survenue de l'EHS : un dysfonctionnement du métabolisme ou du débit sanguin cérébral ?

Cette hypothèse a été abordée lors de l'audition d'Électrosensibles de France / Priartem.

7.5.5.1 Introduction

L'étude du métabolisme et du débit sanguin cérébral sont deux approches qui permettent d'évaluer l'activité fonctionnelle cérébrale dans l'ensemble des régions du cerveau (cf. Encadré 6).

Le cerveau adulte est l'organe qui a les besoins énergétiques les plus importants et, s'il ne pèse que 2 % du poids du corps, il consomme 20 % de l'énergie totale. Celle-ci est apportée en continu par la circulation sanguine sous forme de glucose et de dioxygène (O₂), qui sont les deux substrats presque exclusifs du cerveau. Ce dernier, contrairement aux autres organes, ne dispose pas de réserve glucidique. Ainsi, l'augmentation des besoins en énergie liée à une activité localisée et transitoire se traduit par une augmentation dans la région concernée du débit sanguin et du métabolisme du glucose. Il existe un couplage étroit entre ces deux facteurs qui sont eux-mêmes corrélés à l'activité fonctionnelle cérébrale (cf. détails dans le § 7.1.4, p. 158 du rapport Anses 2013).

Encadré 6 : techniques de mesure du débit sanguin et / ou du métabolisme énergétique cérébral

Dans les études cliniques, la mesure simultanée du débit sanguin et du métabolisme énergétique du cerveau a été la première mesure du débit et du métabolisme d'un organe (Kety and Schmidt 1948). De nombreuses techniques ont été développées par la suite. À ce jour, trois groupes de techniques ont été appliquées à l'étude des effets des radiofréquences :

Les techniques de référence, qui permettent une estimation relativement exacte et bien localisée de l'activité tissulaire, sont celles de la **tomographie à émission de positons** (TEP) ; elles comprennent les techniques de mesure du débit sanguin cérébral à l'eau marquée à l'oxygène O^{15} [$(^{15}O)H_2O$] et de mesure de la consommation cérébrale en glucose à l'aide du déoxyglucose marqué au fluor F^{18} [^{18}FDG]. L'analyse des images est standardisée depuis longtemps, elle utilise le logiciel « *statistical parametric mapping* » (SPM) (dont il existe plusieurs versions successives) et effectue une normalisation spatiale des images dans l'espace stéréotaxique du « *Montreal Neurological Institute* » (MNI). Des soustractions sont ensuite effectuées entre les images obtenues dans les différentes conditions expérimentales. Les résultats sont exprimés, topographiquement, en fonction des coordonnées de Talayrac ou des aires corticales de Brodmann. Ces techniques sont limitées par leur coût élevé, par la lourdeur de leur mise en œuvre, par la nécessité d'injecter un traceur radioactif (ce qui limite le nombre de mesures réalisables chez une même personne) et surtout par leur faible résolution temporelle (temps d'acquisition des images de 1 à 2 minutes pour le débit et de 30 minutes pour la consommation de glucose), ce qui est mal adapté aux constantes de temps de l'activité cérébrale.

Ces techniques sont peu à peu supplantées par les techniques d'**IRM fonctionnelle** (IRMf) et principalement par la méthode BOLD (*Blood Oxygen Level Dependent*), technique non invasive qui détecte les variations locales d'oxyhémoglobine (O_2Hb) et fournit en 3D un index de perfusion très proche du débit sanguin, avec une résolution temporelle inférieure à la minute. Autre technique d'IRM, la spectrométrie par résonance magnétique du proton (^1H SRM) permet de quantifier la présence de N-Acétyl-Aspartate (marqueur de l'intégrité neuronale), de choline (marqueur de la densité cellulaire et intégrité des membranes), de myo-inositol (marqueur des échanges membranaires) et de créatine (marqueur de métabolisme énergétique) dans des régions délimitées, mais relativement vastes, du cerveau. Il s'agit d'une technique lourde à mettre en œuvre et de ce fait peu utilisée.

Un autre groupe de techniques, la **spectrophotométrie dans l'infrarouge proche** (*near-infrared spectrophotometry*, NIRS), repose également sur la mesure des concentrations locales en oxyhémoglobine (O_2Hb) et déoxyhémoglobine (HHb). Elle consiste à placer sur le crâne une diode émettant sur 2 longueurs d'onde (730 nm et 830 nm) et à recueillir à distance, à l'aide d'une batterie d'optodes, l'intensité des signaux lumineux transmis par le cerveau. Les changements de débit se traduisent par des changements parallèles de O_2Hb et inverses de HHb. De plus, la somme de O_2Hb et de HHb est égale à l'hémoglobine totale (tHb), elle-même proportionnelle au volume sanguin cérébral. Cette méthode utilise des algorithmes bien établis et a été largement validée par comparaison avec les techniques TEP et IRMf. Elle a l'avantage d'être non-invasive, non douloureuse et relativement peu onéreuse, de ne pas nécessiter, comme les méthodes TEP, de traceur radioactif et de permettre des mesures continues et répétables aussi souvent que nécessaire.

Enfin, la **vélocimétrie Doppler**, est potentiellement utilisable dans l'étude des effets des radiofréquences. Cette technique ne permet pas une mesure quantitative, mais présente une bonne résolution spatiale et temporelle. Son principe est basé sur l'utilisation d'une sonde laser positionnée à la surface du cortex cérébral (pie-mère). Quand le faisceau de lumière pénètre dans le tissu cérébral, les photons, qui interagissent avec les cellules sanguines en mouvement (globules rouges), sont déplacés (effet Doppler) : il existe une relation linéaire entre la vitesse de déplacement des cellules sanguines et la fréquence du signal Doppler déplacé, qui est lui-même proportionnel au volume occupé par les éléments mobiles du tissu, permettant ainsi une évaluation du débit sanguin cortical (à la surface du cerveau). La méthode peut être appliquée aux artères extra crâniennes (carotides et vertébrales) et à l'artère sylvienne (Doppler transcrânien). Elle est non-invasive, non douloureuse et peu onéreuse. Cependant, elle est sensible aux artefacts (mouvements, propriétés optiques du tissu). De plus, elle ne fournit que des mesures de vitesse qui, du fait de la vasomotricité et de la variation interindividuelle du calibre des vaisseaux, ne sont pas étroitement liées au débit sanguin et à l'activité cérébrale.

7.5.5.2 Personnes non-EHS : rappel des conclusions des précédents rapports

Les articles analysés dans le rapport (Anses, 2013) relatifs à l'étude du débit sanguin et du métabolisme cérébral mettaient en œuvre différentes techniques. Leurs résultats étaient hétérogènes. Pour le débit sanguin cérébral, les deux études analysées ne montraient aucun effet

d'une exposition à court terme à des radiofréquences de type W-CDMA ou GSM (Kwon *et al.* 2012a, Mizuno *et al.* 2009). Pour le métabolisme du glucose en tomographie d'émissions aux positons (TEP), ces études aboutissaient à des conclusions contradictoires avec, soit une légère augmentation dans les régions les plus exposées, comme le cortex orbito-frontal droit et le gyrus temporal supérieur droit (Volkow *et al.* 2010), soit une légère diminution dans la jonction temporo-pariétale et la partie antérieure du lobe temporal de l'hémisphère exposé (Kwon *et al.*, 2011, voir § 7.1.4 du rapport (Anses, 2013) pour plus de détails sur ces études).

Chez les personnes non-EHS, les données sont peu nombreuses et les résultats controversés pourraient être le reflet i) d'un nombre insuffisant de participants, ii) des variations inter- et intra-individuelles, notamment pour le débit sanguin cérébral, ainsi que iii) des conditions d'exposition différentes. Le rapport publié par l'Anses en 2013 avait conclu que les faibles variations observées, situées en deçà de celles rencontrées lors de la réalisation de tâches cognitives, motrices ou sensorielles, s'inscrivaient probablement dans les limites des fluctuations physiologiques.

7.5.5.3 Personnes se déclarant EHS : synthèse des données et conclusion

Dans un article étudiant une série de biomarqueurs chez des personnes se déclarant EHS et / ou souffrant d'un SIOC (*cf.* § 6.1.2 pour la description et l'analyse détaillée de l'article), Belpomme *et al.* (2015) ont appliqué une technique de tomosphygmographie ultrasonore cérébrale pulsée chez 727 personnes (dont 521 se déclarant EHS, 52 se plaignant de sensibilité chimique multiple et 154 présentant les deux symptomatologies). Ces auteurs ont suggéré que le diagnostic objectif de l'EHS et / ou du SIOC pourrait être fait sur la base de ces anomalies tomosphygmométriques chez les sujets ne présentant pas d'anomalie biologique.

Cette étude est trop imprécise et donne des résultats insuffisants pour apporter des arguments en faveur d'une modification du débit sanguin cérébral chez les personnes se déclarant EHS. Ainsi, les données disponibles ne permettent pas de dire si l'effet biologique observé chez les sujets non-EHS s'inscrit (ou pas) dans les limites des variations physiologiques et s'il peut entraîner un effet sanitaire favorable ou défavorable à long terme.

En conclusion, les données actuelles (une seule étude) ne permettent pas de statuer quant à un quelconque dysfonctionnement du métabolisme ou du débit sanguin cérébral chez les personnes se déclarant EHS.

7.5.6 Sommeil et rythmes circadiens

Hypothèse 15 pour expliquer tout ou partie de la survenue de l'EHS : une dysrégulation du cycle veille-sommeil (ou de l'horloge circadienne) ?

L'hypothèse selon laquelle la survenue de l'EHS serait liée à un effet des champs électromagnétiques sur le sommeil a été évoquée par l'association Électrosensibles de France / Priartem au cours de leur audition, ainsi que dans le cadre d'échanges avec le Dr Ben Brick.

Les perturbations du sommeil sont parmi les troubles les plus fréquemment rapportés aussi bien par les personnes se déclarant EHS (*cf.* § 3.1.3 et 6) que par les auteurs de publications scientifiques. Ces troubles sont également très fréquents dans la population générale (*cf.* Encadré 7).

Encadré 7 : l'insomnie

Les troubles du sommeil et en particulier l'insomnie, touchent un nombre important de français dans la population générale. Ainsi, l'Institut national du sommeil et de la vigilance (INSV) rapporte qu'un français sur cinq (soit plus de 12 millions) souffre d'insomnie et que cette insomnie est sévère dans 9 % des cas (1,1 millions environ) : jusqu'à 1/3 des français se plaignent de troubles du sommeil.

Les causes principales de l'insomnie sont psychologiques ou psychiatriques. Le stress, l'anxiété et la dépression sont les premières causes d'insomnie, à l'origine de plus de la moitié d'entre elles. La répétition de l'insomnie, nuit après nuit, accentue la détresse psychologique, entraînant un véritable cercle vicieux dont il est difficile de sortir. Le facteur stress est donc très souvent impliqué, ainsi que l'environnement ou le mode de vie. Lorsque l'on peut identifier la cause (psychique ou physique [ex : syndrome des jambes sans repos, apnées du sommeil]), l'insomnie est dite « secondaire ». Il existe aussi une insomnie dite « primaire », car on ne trouve pas, ou plus, de cause. Dans ce cas, l'insomnie est dite psychophysiologique ; c'est une « maladie » qui évolue pour son propre compte et qui s'auto-entretient en raison du comportement de l'insomniaque. Dans l'insomnie « maladie », les comportements (ex : travail tardif, irrégularité des horaires de couchers, etc.) peuvent avoir un rôle important. De même, l'anxiété, les angoisses et les pensées fréquentes au moment du coucher (comme une machine qui ne s'arrête pas) retardent l'endormissement. Il faut également considérer le rôle de l'âge avec une augmentation des insomnies après 50 ans, car le sommeil se fragilise, devient plus léger et plus fractionné. Enfin, les femmes sont toujours plus insomniaques (jusqu'à 44 % des femmes de plus de 75 ans) que les hommes, cette différence apparaît à la puberté et semble se maintenir après la ménopause¹⁸⁷.

7.5.6.1 Introduction

Nous passons près d'un tiers de notre vie à dormir et pourtant, le rôle et les fonctions du sommeil restent encore aujourd'hui mal connus. Cependant, plusieurs théories, en plus du rôle du sommeil sur la récupération physique, ont été proposées et, notamment, celle de son rôle-clé dans l'apprentissage et la consolidation de nos mémoires (Diekelmann and Born 2010). En revanche, il est clairement démontré que la privation de sommeil (aiguë ou chronique) a des conséquences majeures : chez l'être humain, elle a des effets cognitifs délétères et des effets physiques significatifs (Durmer and Dinges 2005). Ainsi, le caractère universel et vital du sommeil, son organisation (sommeil lent principalement en début de nuit, sommeil paradoxal en fin de nuit), en alternance avec la veille, impliquent qu'il fait partie intégrante du vivant et est indispensable à la survie des espèces.

L'étude du sommeil et de ses troubles relève de plusieurs disciplines médicales, de la neurologie tout d'abord, ainsi que de la pneumologie et de la psychiatrie et est une discipline importante des neurosciences. Sur le plan comportemental, le sommeil se définit comme un état naturel récurrent de perte ou diminution de conscience du monde extérieur caractérisé par : i) une diminution progressive du tonus musculaire, ii) un état de quiescence physique, avec une réponse diminuée aux stimulations, iii) des postures stéréotypées (allongée chez l'être humain), iv) une réversibilité relativement rapide, v) la possibilité de régulation (circadiennes [voir ci-dessous] et homéostasiques). Le processus homéostatique (processus S) se définit comme l'augmentation exponentielle au cours de la veille de la pression de sommeil et reflète la propension au sommeil qui augmente en fonction du temps passé éveillé (Borbely and Wirz-Justice 1982).

Le sommeil est caractérisé par des stades qui se répètent au cours de la nuit et qui sont organisés en cycles, avec 3 à 5 cycles, chacun d'environ 90 minutes par nuit. Ceux-ci peuvent être enregistrés et quantifiés sur l'électroencéphalogramme (EEG, cf. Encadré 8, p. 230). Ainsi, les stades 1 et 2 sont des stades de sommeil lent léger, le stade 1 se caractérisant par des ondes *alpha* de l'EEG de veille (8-12 Hz) et le stade 2 par l'apparition d'ondes *thêta* plus lentes (3-7 Hz) sur lesquelles se surajoutent les complexes K et les fuseaux de sommeil. Ces derniers sont des marqueurs majeurs du maintien du sommeil. Les stades 3 et 4 caractérisent le sommeil lent profond avec le remplacement progressif des ondes *thêta* par des ondes plus lentes de type *delta* (0,5-2 Hz) qui constituent l'ensemble du tracé EEG en stade 4. Enfin, le sommeil paradoxal se

¹⁸⁷ <http://www.reseau-morphee.fr/le-sommeil-et-ses-troubles-informations>

caractérise par un tracé EEG rapide, bas volté, entrecoupé d'ondes en dents de scie, associé à des mouvements oculaires rapides et à la disparition complète du tonus musculaire. Ce dernier stade n'apparaît qu'après le passage par le sommeil lent profond et précède le retour à un stade 1. L'ensemble de ces stades définit un cycle de sommeil.

Le sommeil est ainsi un phénomène complexe étroitement associé à des modifications physiologiques du système nerveux autonome qui régule de nombreuses fonctions, en particulier cardiovasculaire comme la fréquence cardiaque, la pression artérielle ou encore le niveau des catécholamines plasmatiques et urinaires (voir § 7.4.1.1, l'introduction sur le système nerveux autonome). Ainsi, le sommeil s'accompagne d'une augmentation de l'activité du système parasympathique en relation avec sa profondeur, et d'une diminution du tonus sympathique. Par exemple, la pression artérielle diminue (5-15 %), ainsi que la fréquence cardiaque, pendant le sommeil lent, alors que le sommeil paradoxal est associé à des variations importantes du rythme cardiaque, à des augmentations phasiques de la pression artérielle et à une diminution de l'efficacité des réponses thermorégulatrices (partielle chez l'être humain et totale chez l'animal), ce qui peut compromettre le maintien de l'homéothermie. Ces régulations accompagnent l'augmentation du tonus sympathique qui atteint un niveau supérieur à celui de la veille. Ainsi, le système nerveux autonome sous-tend les anomalies cardiovasculaires aiguës rencontrées lors des troubles du sommeil et une part importante des anomalies chroniques rencontrées lors de pathologies du sommeil comme le syndrome d'apnées du sommeil.

Enfin, le sommeil, ainsi que la veille, changent avec l'âge : nos rythmes biologiques s'altèrent avec le vieillissement, ce qui a de profondes conséquences sur la qualité du sommeil, ainsi que sur la qualité de la veille diurne, y compris nos capacités de mémorisation, d'attention et notre humeur. Chez le sujet âgé, la phase de sommeil est avancée, le sommeil survient plus précocement et donc la fin du sommeil est avancée. De plus, la latence d'endormissement et la fragmentation du sommeil augmentent, ce qui réduit son efficacité et le temps total de sommeil nocturne, qui est compensé en partie par des siestes diurnes. La répartition des stades de sommeil change également avec une diminution du temps passé en sommeil lent profond. Ainsi, les deux processus circadien et homéostatique de régulation du sommeil sont affectés par l'âge et associés à une avance de phase, ainsi qu'à une diminution des rythmes de la température corporelle, de la mélatonine et du cortisol. L'ensemble de ces troubles du sommeil liés à l'âge sont associés à des troubles cognitifs, notamment de la mémoire (Pace-Schott and Spencer 2011).

Les rythmes circadiens représentent l'ensemble des processus physiologiques rythmiques ayant une période de 24 heures et dont certains régulent le sommeil (« processus C » pour circadien, qui est responsable de l'aspect rythmique du cycle veille-sommeil). Les rythmes circadiens régulent également le niveau de vigilance, ainsi que les performances cognitives sur 24 heures (Reid, McGee-Koch, and Zee 2011). L'altération des rythmes circadiens a un effet néfaste sur la santé et est impliquée notamment dans les troubles cognitifs, les démences, la maladie d'Alzheimer, l'obésité, le diabète, les troubles de l'humeur et les cancers (Zelinski, Deibel, and McDonald 2014). Les rythmes circadiens sont essentiellement régulés par la lumière et impliquent l'expression de gènes spécifiques rythmiques comme *Bmal1*, *Clock*, *Per* ou *CRY* dans les noyaux suprachiasmatiques de l'hypothalamus (Ko and Takahashi 2006). Ces derniers sont le siège de l'horloge principale qui permet la synchronisation de nombreux rythmes biologiques coordonnant les variations circadiennes de multiples paramètres biochimiques, physiologiques et comportementaux. Parmi ceux-ci, la mélatonine est l'hormone principale de cette horloge circadienne synthétisée par la glande pinéale et sécrétée pendant l'obscurité chez l'être humain et les espèces animales diurnes. Cette glande sensible à l'alternance lumière/obscurité permet à l'horloge de s'adapter à l'environnement externe : la mélatonine joue donc un rôle important dans le contrôle de nombreux processus physiologiques rythmiques, comme la température corporelle, le sommeil, le métabolisme ou la reproduction. Il existe assez peu d'études sur l'impact des radiofréquences sur les rythmes circadiens et la sécrétion de mélatonine. En revanche, il existe une littérature plus abondante dans le domaine des basses fréquences (50-60 Hz notamment, cf. paragraphe ci-après, 7.5.6.4).

Encadré 8 : les tests d'évaluation du sommeil et des rythmes circadiens chez l'être humain**Les techniques d'étude du sommeil en laboratoire**

- La polysomnographie est l'examen de référence, car il est le seul à permettre de caractériser les différents états de vigilance que sont l'éveil, le sommeil lent et le sommeil paradoxal. Elle comporte i) l'EEG qui enregistre l'activité corticale, ii) l'électromyographie (EMG) qui renseigne sur le tonus musculaire et iii) l'électro-oculographie (EOG) pour enregistrer les mouvements oculaires. Ces trois paramètres permettent de distinguer l'état d'éveil (calme ou actif) et les deux états de sommeil (lent, environ 75 % du temps total de sommeil chez un sujet adulte jeune) et paradoxal (SP, environ 25 % du temps total de sommeil chez l'adulte jeune). D'autres enregistrements cardio-respiratoires sont souvent associés. Ces enregistrements permettent de décrire et quantifier les stades et cycles de sommeil. L'analyse de ces enregistrements se fait par voie visuelle ou par un traitement basé sur l'analyse spectrale du tracé EEG. L'analyse par voie visuelle permet de caractériser la macrostructure du sommeil à partir du temps total de sommeil, de la latence d'endormissement, de la survenue des différents stades de sommeil, de leurs durées respectives. La stabilité du sommeil est également analysée à partir des éveils intra-sommeils, du nombre et de la fréquence des stades, ainsi que de leur fractionnement. L'efficacité du sommeil peut être quantifiée par le rapport entre la somme des durées du sommeil à ondes lentes et du sommeil paradoxal sur le temps total de sommeil. Les enregistrements peuvent être réalisés en laboratoire sous environnement contrôlé ou en ambulatoire au domicile ;

- L'actigraphie permet de déterminer les habitudes de sommeil et les rythmes circadiens (périodes activité-repos). C'est un outil de diagnostic dans l'évaluation des troubles du sommeil et des rythmes circadiens. L'actigraphie donne accès aux horaires et à la durée de sommeil grâce à l'enregistrement des mouvements du sujet par un « accéléromètre » porté au poignet (cf. une montre). Les mesures incluent les mouvements pendant le sommeil, la fragmentation du sommeil, le temps passé éveillé au cours de la nuit, le temps d'immobilité pendant le sommeil et l'heure des éveils. Elle ne permet cependant pas de quantifier les différents stades de sommeil.

La mesure des rythmes circadiens : mélatonine, température corporelle et cortisol

La mélatonine est une neurohormone produite par la glande pinéale et physiologiquement contrôlée par la lumière. La biosynthèse de la mélatonine s'effectue à partir de la sérotonine ou 5-HT et fait intervenir plusieurs enzymes dont l'aralkylamine N-acétyltransférase, particulièrement exprimée au niveau de l'épiphyse et dont l'activité est régulée par la noradrénaline. Elle exerce ses effets par l'intermédiaire de trois récepteurs couplés aux protéines G. La mélatonine est considérée comme un excellent marqueur du rythme circadien endogène et donne des informations sur la synchronisation des personnes (Selmaoui and Touitou 2003). La mélatonine franchit librement la barrière hématoencéphalique et les concentrations plasmatiques sont le reflet de la production cérébrale de mélatonine.

La mélatonine, ou plutôt son métabolite principal produit par le foie, la sulfatoxymélatonine (aMT6s), peut être dosée dans le plasma, l'urine ou la salive. Cependant les teneurs salivaires sont basses (30 % des teneurs plasmatiques ou urinaires). Le dosage urinaire par tranche de 4 heures sur une période de 24 heures est privilégié pour un premier *screening* et permet d'obtenir le rythme circadien du sujet. Le dosage plasmatique permet d'obtenir un profil plus précis. La mélatonine est sécrétée pendant la nuit et la lumière supprime ou décale cette sécrétion.

En thérapeutique, la mélatonine ou des agonistes de synthèse sont utilisés dans le traitement de certains troubles du sommeil ou de la dépression.

La variation de la température corporelle (mesurée au niveau rectal ou œsophagien) au cours du nyctémère est également un excellent marqueur du rythme circadien utilisé chez l'être humain. Tout comme la mélatonine, elle est un marqueur reproductible et relativement stable pour une personne donnée.

Avec la mélatonine et la température corporelle, le rythme du cortisol est également fréquemment exploré chez l'être humain. Il est caractérisé par un pic en début de matinée (au moment du réveil), puis une diminution progressive jusqu'au soir, avec une période de sécrétion minimale en première partie de nuit, puis une augmentation rapide en fin de nuit. Sa sécrétion est sous l'influence du système circadien et du sommeil. De plus, le cortisol, aussi appelé « l'hormone du stress », fait partie de l'axe HPA (Hypothalamo-hypophyso-surrénalien) et sa sécrétion est augmentée en cas d'hyperactivité de cet axe, telle qu'on la trouve dans la dépression, les troubles de l'humeur ou encore l'insomnie. Il faut donc tenir compte de ces différents facteurs influençant le rythme circadien du cortisol en tant qu'indicateur du système circadien ou indicateur de stress.

Ces trois marqueurs du rythme circadien, s'ils présentent des variabilités importantes d'une personne à l'autre, sont, en revanche, relativement stables pour une même personne, faisant partie de la vie quotidienne de celle-ci et peu sujets à des variations faibles et transitoires liées à l'environnement.

Encadré 9 : définition des troubles du sommeil liés à un facteur de l'environnement

Les troubles du sommeil liés à un facteur de l'environnement ont été caractérisés par des critères objectifs tels que ceux définis en 2005 par l'Académie américaine de médecine du sommeil en association avec les Sociétés européenne, japonaise et d'Amérique Latine du sommeil.

Ainsi, le diagnostic requiert au minimum cinq critères : 1) l'existence de plaintes et d'endormissements diurnes excessifs¹⁸⁸ ; 2) les troubles doivent être en lien direct avec un stimulus mesurable de l'environnement ; 3) ils ne doivent pas être liés à un facteur psychogène de l'environnement (insomnies psychosomatiques) ou à des troubles neuropsychiatriques, à des pathologies, à la prise de médicaments, à l'exposition à des toxiques susceptibles de modifier le sommeil ; 4) ils doivent disparaître dès le retrait de la nuisance avec un retour rapide ou progressif à un sommeil normal ; 5) ils doivent être présents pendant plus de trois semaines.

Les troubles du sommeil se caractérisant par des réductions du temps de sommeil, de la durée des stades de sommeil à ondes lentes et paradoxal, de son efficacité et une augmentation des éveils nocturnes, il est nécessaire de les objectiver par des enregistrements polysomnographiques ambulatoires effectués sur site (cf. Encadré 8). En effet, ils ne sont pas toujours observables lors des enregistrements effectués en environnement contrôlé en laboratoire où les personnes qui se plaignent d'insomnies peuvent présenter une durée et une efficacité du sommeil normales.

Selon l'Académie américaine de médecine du sommeil et les Sociétés européenne, japonaise et d'Amérique Latine du sommeil, les troubles du sommeil sont qualifiés, selon leur durée, d'aigus s'ils persistent trois mois ou moins et chroniques après six mois.

7.5.6.2 Personnes non-EHS : rappel des conclusions des précédents rapports

Dans le rapport publié par l'Anses en 2013 concernant les personnes non-EHS, le niveau de preuve avait été considéré suffisant pour admettre qu'une exposition aiguë à des signaux GSM provoquait une augmentation de la puissance spectrale de l'EEG dans la fréquence des fuseaux de sommeil avec une modulation autour de 14 Hz, sans modification de la macrostructure du sommeil, ni perturbation des tâches cognitives associées aux enregistrements polysomnographiques. De plus, des différences importantes (de réactivité entre hommes et femmes notamment, ainsi que d'une étude à l'autre chez les mêmes personnes) dans les réponses individuelles aux expositions utilisées chez les témoins ont été rapportées (Danker-Hopfe *et al.*, 2011 ; Schmid *et al.*, 2012 et Loughran *et al.*, 2012).

Pour les rythmes circadiens, le rapport (Anses, 2013) mentionne deux études chez l'animal (Hata *et al.* 2005, Lerchl *et al.* 2008) et une étude clinique (Wood, Loughran, and Stough 2006). Ces trois études n'ont montré aucun effet d'une exposition aux radiofréquences sur la concentration et la rythmicité de sécrétion de la mélatonine.

7.5.6.3 Personnes se déclarant EHS : synthèse des données et conclusion

Le sommeil des personnes se déclarant EHS a rarement fait l'objet d'études spécifiques. Le plus souvent, la prévalence des troubles du sommeil chez ces personnes a été étudiée parallèlement à celle d'autres symptômes, à l'aide de questionnaires permettant seulement une évaluation subjective du sommeil (cf. § 6).

Le premier article mentionnant l'existence de troubles du sommeil chez les personnes se déclarant EHS est, à notre connaissance, celui de Frick *et al.* (2002).

¹⁸⁸ Les endormissements diurnes excessifs sont considérés comme légers si la latence d'endormissement est comprise entre 10 et 15 minutes, modérés entre 5 et 10 minutes et sévères si cette latence est inférieure à 5 minutes. Ces mesures sont réalisées selon un protocole et un test standardisés en site hospitalier.

Si l'on excepte les tous premiers travaux, les données fournies par les études descriptives (cf. § 6.1.1.1) sans groupe témoin ont montré que la prévalence des troubles du sommeil chez les personnes se déclarant EHS était élevée, avec des valeurs de 42,7 % (Schreier *et al.*, 2006), 43,1 % (Frick, Rehm, and Eichhammer 2002), 59,3 % (Hagström *et al.*, 2013) et 62 % (Schooneveld et Kuiper, 2007). Cependant, certaines de ces études (Schreier *et al.*, 2006 ; Frick *et al.*, 2002) décrivaient des prévalences de troubles du sommeil comparables à celles rapportées dans la population générale (respectivement 42,7 % et 43,1 %) (cf. Encadré 7, p. 228).

Les données fournies par les études avec groupes témoins sont intéressantes (cf. § 6.1.1.2). Elles ont montré que la prévalence des troubles du sommeil qualifiés de « pathologiques » était significativement plus élevée chez les personnes se déclarant EHS que chez les témoins, avec respectivement des valeurs pour les personnes se déclarant EHS et les témoins de 39 % et 5 % (Röösli *et al.*, 2004), 25 % et 13 % (Röösli *et al.*, 2010) et 65 % et 4 % (Johansson *et al.*, 2010). Comme dans les études sans groupe témoin, les valeurs de prévalence diffèrent sensiblement d'un travail à l'autre. Cependant, elles varient aussi dans les groupes témoins, ce qui suggère que ces différences sont essentiellement dues aux outils utilisés pour évaluer les troubles du sommeil.

Une seule étude s'est intéressée à la qualité du sommeil, mesurée avec l'échelle de Pittsburgh (Landgrebe *et al.*, 2009). Les résultats ont montré que la qualité du sommeil était statistiquement moins bonne chez les personnes se déclarant EHS que chez les témoins. Toutefois, cette étude, essentiellement consacrée à l'étude des acouphènes, ne donne pas de comparaison détaillée, item par item, de l'échelle de Pittsburgh entre personnes se déclarant EHS et témoins. Par ailleurs, cette dernière étude ne donne pas la prévalence des troubles du sommeil dans les deux groupes.

La mise en évidence de manière objective de l'existence de troubles du sommeil chez les personnes se déclarant EHS nécessite la réalisation d'études cliniques en laboratoire.

Deux d'entre elles, celle d'Arnetz *et al.* (2007), publiée dans un journal non revu par les pairs et qui avait été analysée dans le rapport (Afsset, 2009) et celle de Lowden *et al.* (2011), ont été réalisées par la même équipe et ont comporté des mesures objectives de la qualité du sommeil. La troisième (Sandström *et al.*, 2003) est une étude indirecte du sommeil à travers les modifications du système nerveux autonome.

Les deux premières études comportent des enregistrements polysomnographiques du sommeil après exposition de longue durée à un signal GSM chez des personnes se déclarant EHS (cf. analyse des articles au § 6.2.1). Elles ont confirmé que cette exposition provoquait une augmentation de la puissance spectrale de l'EEG dans la fréquence des fuseaux de sommeil avec une modulation autour de 14 Hz, déjà décrite par plusieurs auteurs et soulignée dans le rapport Anses de 2013.

Le fait que les fuseaux soient un marqueur de stabilisation du sommeil semblerait être en contradiction avec les troubles du sommeil décrits par les personnes se déclarant EHS. Cette contradiction apparente soulève la question de la grande différence entre les analyses subjectives du ressenti de la qualité du sommeil et celles objectivées par une polysomnographie incluant un enregistrement EEG et permettant de diagnostiquer diverses pathologies ou troubles du sommeil (apnées du sommeil, narcolepsie, syndrome des jambes sans repos, insomnies, etc.).

Toutefois, les deux études (Arnetz *et al.*, 2009 ; Lowden *et al.*, 2011) n'apportent aucune information utile concernant la question des troubles du sommeil chez les personnes se déclarant EHS, dans la mesure où elles n'ont pas comparé ces résultats à ceux obtenus chez les témoins.

Durant le sommeil et son induction, l'énergie de la bande HF (bande des hautes fréquences traduisant l'activité parasympathique) du signal cardiaque augmente. L'étude de Sandström *et al.* (2003) (cf. analyse de l'article au § 7.4.3) a mis en évidence que cette augmentation de la composante parasympathique était significativement plus petite chez les personnes se déclarant EHS que chez les témoins, à la fois durant l'induction du sommeil et durant la nuit. Cette observation est à rapprocher des constatations faites sur les effets d'une exposition aux radiofréquences sur l'EEG du sommeil chez les personnes non-EHS (rapport Anses de 2013). Les conséquences de ces modifications du sommeil sur l'organisme n'ont cependant pas été caractérisées selon les critères définis par l'Académie Américaine de médecine du sommeil (Darien IL. 2005, Sack *et al.* 2007) (cf. Encadré 9, p. 231) et restent inconnues.

En ce qui concerne le rôle possible d'une désorganisation des rythmes circadiens chez les personnes se déclarant EHS, l'absence de données scientifiques ne permet à ce jour aucune conclusion. De même, les études ayant exploré les effets des radiofréquences sur les rythmes circadiens chez des témoins ou chez l'animal ne permettent pas de conclure à un effet ou non des radiofréquences sur les divers paramètres étudiés. En effet, des données contradictoires et / ou incohérentes ont été obtenues, essentiellement avec la mesure de la sécrétion de mélatonine (plasmatique ou urinaire) ou du cortisol (cf. notamment Belpomme *et al.* 2015, analysé au § 6.1.3 et en Annexe 4). Il est à noter que de nombreuses données, elles aussi contradictoires, ont été obtenues avec des champs basses fréquences, y compris chez le rongeur.

Ainsi, l'hypothèse « mélatonine » selon laquelle l'exposition aux ondes électromagnétiques supprimerait l'excrétion de mélatonine ne semble pas être validée à ce jour. Toutefois, étant donné la symptomatologie rencontrée chez les personnes se déclarant EHS (troubles du sommeil de la concentration et de la mémoire fréquents d'après les études descriptives par questionnaires), l'hypothèse d'un dysfonctionnement de l'horloge circadienne reste crédible et mérite d'être étudiée.

7.5.6.4 Éléments de réflexions sur un possible dérèglement des rythmes circadiens chez les personnes se déclarant EHS

Dans un courrier du 13 décembre 2013 adressé au Pr Lévi¹⁸⁹, le Dr E. Ben Brik¹⁹⁰ pose la question des symptômes de personnes se déclarant EHS et du lien possible avec un dysfonctionnement de l'horloge circadienne. En effet, nombre d'entre elles rapportent des modifications de leur rythme nyctéméral de veille-sommeil, ainsi que de celui des périodes d'activité-repos qui sont associées chez certains, à une modification du cortisol ou de la mélatonine et parfois à des pathologies qui pourraient être en lien avec une perturbation hormonale. Dans ce courrier, le Dr Ben Brik écrit : *« je me pose la question d'un éventuel lien entre l'exposition aux champs électromagnétiques des patients présentant une intolérance environnementale idiopathique et une ou plusieurs désynchronisations de l'expression de gènes du rythme circadien du noyau suprachiasmatique, s'agissant bien sûr de bmax ou de Clock et plus particulièrement des cryptochromes CRY1 ou CRY2 qui s'expriment de façon rythmique dans ce noyau suprachiasmatique pour maintenir un rythme circadien activité-repos qui me semble perturbé chez certains de ces patients... »*.

Il est ici important de rappeler que de nombreux travaux ont été réalisés depuis plus de 30 ans concernant les effets des champs électromagnétiques, et surtout les basses fréquences (50 et 60 Hz), sur les concentrations en mélatonine, en lien avec la survenue du cancer du sein notamment (Touitou and Selmaoui 2012). Ainsi, « l'hypothèse mélatonine » postulait la suppression de la mélatonine par l'exposition aux ondes électromagnétiques basses et très basses fréquences. Celle-ci était soutenue par des travaux chez l'être humain (volontaires et travailleurs dans différentes conditions d'exposition) et l'animal, qui montraient une baisse des concentrations circulantes et urinaires de mélatonine sous l'effet d'une exposition, aiguë le plus souvent, aux ondes électromagnétiques. Cependant, de nombreux résultats contradictoires ont conduit à l'idée que cette hypothèse d'une altération de la sécrétion de mélatonine sous l'influence de champs électromagnétiques basses ou hautes fréquences n'était pas supportée par les données épidémiologiques et expérimentales (Touitou and Selmaoui 2012, Lewczuk *et al.* 2014). Un des points délicats est le fait que la sécrétion de mélatonine est sous la dépendance de nombreux facteurs (masse corporelle, alcool, genre, âge, etc.) qui représentent des facteurs confondants non pris en compte dans un certain nombre d'études et qu'il existe une variabilité interindividuelle très importante. Récemment, l'« hypothèse mélatonine » a été revisitée en focalisant les recherches sur la rythmicité de la synthèse de la mélatonine, en lien avec une éventuelle magnétoperception humaine, plutôt que la baisse globale de sa concentration, toujours dans le domaine des basses

¹⁸⁹ À l'époque, le Pr Lévi était directeur du service de cancérologie ambulatoire, oncologie et hématologie et chronothérapie de l'Hôpital Paul Brousse de Villejuif.

¹⁹⁰ Le Dr Ben Brik est responsable d'une consultation de Pathologies professionnelles et environnementales (CHU de Poitiers).

fréquences (Vanderstraeten *et al.* 2012). Ces auteurs ont souligné la nécessité de recherches complémentaires dans ce domaine avec des expositions à long terme. De même, des études récentes chez le rat (Qin *et al.* 2012, Qin *et al.* 2014) semblaient montrer des effets des radiofréquences (1 800 MHz, 2 h/j pendant 32 jours) sur les rythmes circadiens de la mélatonine et de la synthèse d'hormones régulées par la mélatonine comme la testostérone, notamment quand l'exposition a lieu à certaines périodes du cycle (ZT0 pour la testostérone, ZT16 pour la mélatonine, ZT pour Zeitgeber ou donneur de temps). Les « Zeitgeber » représentent l'ensemble des signaux externes capables de synchroniser l'horloge circadienne endogène, comme le cycle lumière-obscurité ou encore des facteurs sociaux tels que les repas ou les interactions sociales (Munch and Bromundt 2012). Enfin, l'hypothèse de l'existence de sous-populations sensibles aux champs électromagnétiques en raison d'un fond génétique et / ou d'un état de santé particulier, ou encore de l'âge (ex : enfant) a été proposée (Touitou *et al.*, 2012 ; Lewczuk *et al.*, 2014) : ces auteurs insistent sur la nécessité de pousser plus avant les recherches dans ce domaine.

7.6 Composantes psychiques

Toutes les affections médicales organiques s'accompagnent de réactions psychiques (normales et / ou pathologiques). Il donc est parfaitement légitime de s'interroger sur les aspects psychiques de l'EHS.

Dans les syndromes médicalement inexpliqués, certains scientifiques ou médecins sont allés plus loin en évoquant une origine psychogène de ces affections (troubles psychosomatiques, etc.). Comme les autres syndromes médicalement inexpliqués (*cf.* § 3.8), l'origine de l'EHS n'échappe pas aux hypothèses selon lesquelles les symptômes ressentis auraient une cause psychique ou seraient entretenus par des facteurs psychiques. Ces hypothèses ont généré des tentatives de traitement de personnes se déclarant EHS par des thérapies comportementales et cognitives (TCC) (*cf.* § 8.1).

Or, ces hypothèses et ces tentatives de traitement sont une des principales causes, si ce n'est la principale, de désaccord et de méfiance entre une partie du corps médical, qui adhère à ces concepts, et les associations de soutien aux personnes se déclarant EHS, qui les récusent catégoriquement. Le groupe de travail a donc décidé de consacrer une étude approfondie à cette question.

Hypothèse 16 pour expliquer tout ou partie de la survenue et / ou de l'évolution de l'EHS : une origine psychosomatique ?

Cette hypothèse a principalement été discutée avec le D^r Mirabel-Sarron lors de son audition (qui avait été suggérée par le collectif Électrosensibles de France / Priartem) du 29 janvier 2015.

7.6.1 Introduction sur le concept de troubles psychosomatiques

Depuis ses origines, la médecine occidentale est divisée en deux courants opposés l'un à l'autre (Hippocrate dit « oui », Galien dit « non »). La médecine d'Hippocrate était tournée vers le tempérament du malade, dont la maladie représentait la rupture d'un équilibre intérieur qu'il s'agissait de rétablir en se conformant le plus possible aux lois de la nature. Celle de Galien était tournée vers l'organe malade plus que vers l'organisme en général et vers le diagnostic de la lésion locale, dont il s'agissait de le délivrer, comme d'un corps étranger. Ces deux conceptions de la médecine ont dominé tour à tour, sans toutefois que la frontière entre les deux ne soit parfaitement étanche. Ainsi, dès le XIX^{ème} siècle, on avait reconnu que les émotions pouvaient jouer un rôle dans le déclenchement de troubles organiques comme les crises d'asthme, d'épilepsie et de migraine, que les troubles mentaux pouvaient s'accompagner de symptômes corporels sans substrat organique et que ces symptômes s'atténuaient, voire disparaissaient, avec l'amélioration de l'état mental. Ces dernières constatations avaient conduit aux concepts de

neurasthénie, puis de troubles somatoformes, qui figurent dans la classification internationale des maladies¹⁹¹.

La médecine psychosomatique actuelle a cherché à dépasser une médecine des organes, devenue de plus en plus spécialisée, au profit d'une médecine générale de l'organisme. Elle met au premier plan le rôle du terrain, renouant ainsi avec la tradition hippocratique qui considère la maladie comme un développement intimement lié à la nature des réactions du patient. Du point de vue scientifique, elle repose sur deux notions, celle de stress et celle de conditionnement (ces notions sont définies en Annexe 14).

La notion de conditionnement tient une place importante dans le concept de maladie psychosomatique. Il est aujourd'hui bien établi que, grâce aux connexions cérébrales entre le système limbique et l'hypothalamus, les émotions peuvent déclencher un syndrome général d'adaptation, indépendamment de toute modification physique de l'environnement, ces émotions pouvant elles-mêmes être engendrées par des croyances diverses. Cette réaction de stress interagit avec des facteurs psycho-sociaux, tels que des antécédents d'abus, des troubles de la personnalité, etc. Il est généralement admis depuis des décennies que toutes les carences affectives ont des conséquences importantes sur les émotions et sur l'humeur, les réactions de stress, les croyances, les fonctionnements sociaux, le développement de la personnalité, les réactions de dissociation, et certaines pathologies médicales, etc.

Selon l'hypothèse psychogène, dérivée du concept de maladie psychosomatique, l'hypersensibilité électromagnétique pourrait être une « maladie des croyances », terme utilisé après Beck (1976, 1979) pour désigner les troubles dans lesquels les croyances personnelles sur soi, sur le monde et sur le futur jouent un rôle très important (qu'elles soient plus ou moins fondées). Cet auteur a montré la participation importante de ces croyances dans toute la psychopathologie, et tout particulièrement dans tous les troubles émotionnels quels qu'ils soient, dans les addictions, les troubles psychosomatiques, etc. (Mirabel-Sarron 2013, Mirabel-Sarron 2015).

Dans cette hypothèse, il est présumé que tous ces facteurs précédemment énumérés constitueraient des facteurs de risque qui prédisposeraient au développement de troubles anxieux et d'une variété de symptômes somatiques pouvant être attribués, par exemple, à une sensibilité aux champs électromagnétiques. Cette sensibilité acquise - ou plutôt apprise par l'expérience vécue - serait un processus individuel par lequel la personne développerait des symptômes à partir d'une exposition réelle (conditionnement classique) ou perçue (conditionnement associé) à de faibles niveaux de dose, pour lesquelles elle croit qu'il peut y avoir un effet toxique. Un mécanisme de « conditionnement classique » (réaction conditionnelle) de type pavlovien est à considérer dans l'acquisition de cette hypersensibilité aiguë ou chronique. L'apprentissage basé sur la croyance d'être exposé à une source serait également un conditionnement, expliqué par les variables cognitives qui l'ont créé. On peut l'appeler « le conditionnement associé ».

Le conditionnement médié par les variables cognitives (ou conditionnement par observation, cf. définition en Annexe 14) est celui qui expliquerait les généralisations non spécifiques des sources « gâchettes », généralisations qui ne se limitent pas en effet aux sources spécifiques. La généralisation dans le conditionnement pavlovien (cf. Annexe 14) correspond à un gradient impliquant le système nerveux autonome et les différents processus attentionnels (vigilance, attention soutenue, sélective ou partagée).

Par exemple, certaines études de provocation, utilisant des agents pathogènes comme sources de panique, ont fait apparaître des symptômes spécifiques résultant d'une hyperventilation aiguë, et d'hypocapnie (chute de la pression partielle du gaz carbonique dans le sang) chez des patients présentant une « hypersensibilité » générale (autrefois appelés spasmophilie). Ainsi, ces patients développent des symptômes d'attaques de panique quand ils sont exposés à un stimulus de provocation. Ceci suggère que ces personnes présentent des conditions neurobiologiques

¹⁹¹ Classification internationale des maladies, chapitre 5 : Troubles mentaux et du comportement, avec la référence F48.0 pour la première (neurasthénie) et F45 pour les seconds (troubles somatoformes).

identiques aux sujets paniqueurs qui induisent des boucles de la peur au sein du système nerveux central impliquant des structures comme le cortex préfrontal, l'hippocampe, l'amygdale qui seraient activés par peur anticipatoire à l'exposition. Par exemple, des crises de panique peuvent se produire spontanément ou après un choc émotionnel chez certains sujets, appelés « paniqueurs ». Cependant, ces crises de panique peuvent aussi être provoquées, chez les paniqueurs et chez d'autres sujets prédisposés, par une hyperventilation entraînant une hypocapnie. Ceci suggère que toutes ces personnes présentent les conditions neurobiologiques conduisant à l'activation des circuits neuronaux de la peur. Cet exemple illustre l'interaction étroite entre facteurs biologiques et facteurs psychiques dans le comportement et le vécu.

En ce qui concerne l'EHS, l'hypothèse d'un trouble psychogène a été défendue par Herman Staudenmayer, lors d'un atelier organisé par l'OMS en 2004 (cf. rapport publié par l'Afsset en 2009). L'argumentation¹⁹² de cet auteur reposait, d'une part, sur l'analogie symptomatique de l'EHS avec les autres syndromes d'intolérance environnementale idiopathique (IEI) et, d'autre part, sur une analyse de causalité de l'IEI, entre théorie toxicogénique et théorie psychogénique, basée sur 22 facteurs en faveur d'une théorie psychogénique et les 9 critères de causalité de « Bradford-Hill » (Hill 1965)¹⁹³. À noter que l'article de Staudenmayer (Staudenmayer 2006) ne comportait pas de comparaison précise entre les symptômes décrits par les personnes se déclarant EHS et ceux décrits par les personnes se plaignant d'autres IEI, d'intolérance aux odeurs chimiques notamment, et que son analyse de causalité se référait essentiellement à des travaux réalisés chez des patients non-EHS. Malgré ces limites, l'atelier de l'OMS reprenait à son compte la proposition de remplacer le terme d'hypersensibilité électromagnétique par celui d'intolérance environnementale idiopathique attribuée aux champs électromagnétiques. Cependant, il formulait des conclusions ambiguës sur la nature psychogène du trouble. D'une part, il retenait les arguments de Staudenmayer selon lequel : 1) le terme IEI englobe différents troubles qui ont en commun des symptômes non spécifiques et médicalement inexpliqués, qui affectent les personnes et perturbent leurs activités professionnelles, sociales et personnelles ; 2) les symptômes pourraient être dus à des troubles psychiatriques pré-existants, aussi bien qu'à des réactions de stress résultant d'inquiétudes vis-à-vis des effets potentiels des champs électromagnétiques, plutôt qu'à l'exposition elle-même. L'atelier de l'OMS concluait que l'IEI ne devrait pas être utilisée comme diagnostic médical (mais plutôt pour définir un objet de recherche clinique, voir différences entre les deux au § 3.3.2), car aucune base scientifique ne permet de relier les symptômes à l'exposition aux champs électromagnétiques. D'autre part, l'atelier de l'OMS maintenait la définition de l'IEI donnée par l'OMS en 1996, comme : « *descripteur n'impliquant aucune étiologie chimique ou aucune sensibilité de type immunologique ou électromagnétique. Ce trouble a été décrit comme :*

- *un trouble acquis avec de multiples symptômes récurrents ;*
- *associé à divers facteurs environnementaux tolérés par la majorité de la population ;*
- *expliqué par aucun trouble médical ou psychologique / psychiatrique connu*¹⁹⁴. »

¹⁹² cf. conclusion p. 52 *Electromagnetic Hypersensitivity, Proceeding Workshop 2004* : http://www.who.int/peh-emf/publications/reports/EHS_Proceedings_June2006.pdf?ua=1.

¹⁹³ Critères de causalité de Hill (1965) : association forte, relation dose-effet, la cause précède l'effet, spécificité de l'association, reproductibilité des résultats, plausibilité biologique, cohérence biologique, présence de données expérimentales, analogie.

¹⁹⁴ En anglais dans le texte original : “IEI is a descriptor without any implication of chemical etiology, immunological sensitivity or EMF susceptibility. Rather it has been described as:

- *an acquired disorder with multiple recurrent symptoms,*
- *associated with diverse environmental factors tolerated by the majority of people,*
- *not explained by any known medical, psychiatric or psychological disorder”.*

7.6.2 Rappel des conclusions des rapports précédents

En ce qui concerne les caractéristiques psychologiques et / ou l'état de santé mentale des personnes se déclarant EHS, trois articles (Bergdahl *et al.* 2005, Rubin, Cleare, and Wessely 2008, Brand *et al.* 2009) avaient été analysés dans le rapport (Afsset, 2009), ce qui avait conduit l'Afsset à formuler la conclusion suivante : « *ces trois études récentes attirent l'attention sur le fonctionnement psychique des sujets EHS... Qu'il s'agisse de vulnérabilité psychique, de dépression ou de troubles plus diversifiés, ces données sont à rapprocher de certains résultats des études fonctionnelles (Landgrebe *et al.* 2008a) montrant une plus grande prévalence de comorbidité psychiatrique (dépression majeure, troubles anxieux généralisés, troubles somatoformes) chez les sujets EHS par rapport à des témoins, ainsi que certains résultats des études de provocation suggérant l'existence d'un effet nocebo des champs électromagnétiques* » (cf. p. 293 et 294 du rapport 2009).

7.6.3 Analyse des nouvelles études

Depuis le rapport publié par l'Afsset en 2009, trois études ont été publiées sur les profils psychologiques des personnes se déclarant EHS (Johansson *et al.* 2010, Van Dongen, Smid, and Timmermans 2014, Dömötör, Doering, and Koteles 2016) et trois sur l'apport des études de provocation à la question d'un éventuel effet *nocebo*¹⁹⁵ des champs électromagnétiques qui comporte aussi une étude des caractéristiques psychiques (Szemerszky *et al.*, 2010 ; Koteles *et al.*, 2013a ; Szemerszky *et al.*, 2016).

Les instruments ou tests psychométriques utilisés dans l'étude de la composante psychique de l'EHS sont présentés en Annexe 13.

Parmi les articles analysés au § 6, treize contiennent des informations sur les caractéristiques psychiques des personnes se déclarant EHS (Bergdahl 1995, Bergdahl *et al.* 2004, Bergdahl *et al.* 2005, Rubin, Cleare, and Wessely 2008, Landgrebe *et al.* 2008b, Brand *et al.* 2009, Furubayashi *et al.* 2009, Johansson *et al.* 2010, Szemerszky, Koteles, *et al.* 2010, Meg Tseng, Lin, and Cheng 2011a, Meg Tseng *et al.* 2013, Van Dongen, Smid, and Timmermans 2014, Dömötör, Doering, and Koteles 2016, Koteles *et al.* 2013a). Toutefois, ces articles diffèrent très sensiblement les uns des autres en ce qui concerne les protocoles expérimentaux, les instruments psychométriques utilisés et leurs conditions de passation, ainsi que les groupes de participants. L'analyse de l'ensemble de ces travaux ne permet donc que des conclusions de portée limitée.

Les protocoles expérimentaux sont de quatre types. Cinq articles (Bergdahl, 1995 ; Bergdahl *et al.*, 2004 ; Bergdahl *et al.*, 2005 ; Rubin *et al.*, 2008 ; Tseng *et al.*, 2011) ont été principalement centrés sur l'étude des caractéristiques psychiques et ont été analysés au § 6.1.2. Pour quatre autres d'entre eux, l'étude des caractéristiques psychiques accompagnait des études cliniques, biologiques et / ou environnementales, soit sans groupe témoin (Brand *et al.*, 2009, analysé au § 6.1.1.1), soit avec groupe témoin (Landgrebe *et al.*, 2008b ; Johansson *et al.*, 2010 ; Van Dongen *et al.*, 2014, analysés au § 6.1.1.2). Un seul article (troisième type d'étude), visait à comparer les réponses de personnes se déclarant EHS et de témoins à une exposition simulée et à étudier les relations entre ces réponses et quelques caractéristiques psychiques (Dömötör *et al.*, 2016 analysé au § 6.2.1.1). Enfin, dans les trois derniers, l'étude des caractéristiques psychiques a été faite avant une étude de provocation plus ou moins complexe (Furubayashi *et al.*, 2009 ; Koteles *et al.*, 2013a ; Szemerszky *et al.*, 2010) et ont été analysés au § 6.2.1.2.2 pour les deux premiers et au § 6.2.1.2.6 pour le troisième. Ces différences de contexte ont pu avoir une influence sur la passation des tests que rien ne permet d'évaluer mais qui doit inciter à la prudence dans la comparaison des résultats.

Les instruments psychométriques utilisés ont été nombreux (n = 19) et diversifiés (cf. Annexe 13). Huit d'entre eux étaient des tests de personnalités construits et validés pour définir les

¹⁹⁵ cf. définition de l'effet *nocebo* au § 7.7.1.

caractéristiques psychiques d'une population prise dans son ensemble, personnes saines et malades confondues. Parmi eux, cinq étaient des tests de personnalités globaux et trois des tests de personnalités spécifiques (optimisme / pessimisme ; capacités d'adaptation, estime de soi). Les onze autres instruments étaient des tests de mesure des troubles psychiques et, parmi eux, cinq étaient des outils d'approche globale des troubles psychiques, nécessitant l'utilisation de tests plus approfondis pour porter un diagnostic précis, ce qui n'a pas été fait dans les études synthétisées ici. Enfin, six tests de mesure des troubles psychiques étaient développés pour évaluer des troubles psychiques particuliers, les diverses formes d'anxiété, la dépression, l'humeur au sens large du terme, les préoccupations de santé liées aux modalités de la vie moderne, le stress et le *burn-out*.

Le nombre d'instruments utilisés était, selon les études, compris entre un (Bergdahl *et al.*, 2005 ; Tseng *et al.*, 2011) et six (Johansson *et al.*, 2010), deux (Bergdahl, 1995 ; Bergdahl *et al.*, 2004 ; Furubayashi *et al.*, 2009), trois (Landgrebe *et al.*, 2008b ; Van Dongen *et al.*, 2014), quatre (Szemerszky *et al.*, 2010 ; Köteles *et al.*, 2013a), cinq (Rubin *et al.*, 2008) et six (Dömötör *et al.*, 2016). L'utilisation d'une batterie de tests est un procédé classique, mais elle ne doit pas entraîner, par sa longueur et / ou sa difficulté, une fatigue et / ou un manque de concentration des participants. Un même instrument psychométrique a rarement été utilisé par plusieurs équipes différentes. Ça n'a été le cas – et souvent avec quelques sous-échelles seulement – que pour les *Karolinska Scales of Personality* (KSP) par Bergdahl (1995) et Johansson *et al.* (2010), le *Neo-Five Factor Inventory* (NEO-FFI) par Furubayashi *et al.* (2009) et Van Dongen *et al.* (2014), le *State-Trait Anxiety Inventory* (STAI) par Johansson *et al.* (2010), Szemerszky *et al.* (2010), Köteles *et al.* (2013a) et Dömötör *et al.* (2016) et le *Life-Orientation Test revisited* (LOT-R) par Szemerszky *et al.* (2010), Köteles *et al.* (2013a) et Van Dongen *et al.* (2014).

Le plus souvent, les questionnaires ont été remplis au laboratoire et, sauf exception (Szemerszky *et al.*, 2010 ; Köteles *et al.*, 2013a), en présence d'un investigateur (Bergdahl, 1995 ; Bergdahl *et al.*, 2005 ; Rubin *et al.*, 2008 ; Landgrebe *et al.*, 2008b ; Brand *et al.*, 2009 ; Furubayashi *et al.*, 2009). Dans les autres études, des auto-questionnaires ont été adressés et recueillis par voie postale (Bergdahl *et al.*, 2004 ; Johansson *et al.*, 2010), remplis lors d'un entretien téléphonique (Tseng *et al.*, 2011), ou à la fois sur internet par une partie des personnes et, par une autre partie, sur questionnaires papiers adressés et recueillis par voie postale (van Dongen, 2013).

Les groupes de participants étudiés ont été constitués en fonction de critères qui ont différé d'une étude à l'autre. Ainsi, Bergdahl *et al.* ont recruté pour leurs deux premières études (1995, 2004) deux groupes de personnes, un se plaignant d'expositions aux écrans cathodiques et l'autre se plaignant d'expositions à l'électricité, alors que par la suite, Rubin *et al.* (2008) et Johansson *et al.* (2010) ont comparé un groupe se plaignant uniquement d'expositions aux téléphones mobiles avec un groupe se plaignant d'expositions à des sources d'ondes électromagnétiques multiples (à noter que Johansson *et al.* ont recherché systématiquement des personnes se plaignant d'expositions aux écrans cathodiques et n'en ont trouvé qu'une qui a été exclue de l'étude). Dans ces quatre études, les participants ont présenté significativement plus d'anomalies aux tests psychologiques et / ou psychiatriques que les témoins. Les personnes se plaignant d'expositions à plusieurs sources d'ondes électriques ou électromagnétiques ont présenté plus d'anomalies que celles qui se sont plaintes d'expositions à un seul type de sources d'ondes électromagnétiques (écrans cathodiques ou téléphones mobiles). Van Dongen *et al.* ont également recruté des personnes se déclarant EHS, les unes dans la population générale et les autres *via* des associations. Ces auteurs ont également observé des différences entre personnes se déclarant EHS et témoins et entre les deux groupes de personnes se déclarant EHS. Ainsi, les personnes recrutées par l'intermédiaire d'une association présentaient plus d'anomalies aux tests que celles recrutées dans la population générale.

Toutefois, cette étude ne mentionne pas la proportion de personnes sensibles aux ondes de la téléphonie mobile et celles sensibles à un large spectre de champs électromagnétiques dans ses deux groupes de personnes se déclarant EHS, ce qui rend impossible la comparaison des résultats avec ceux des deux études précédentes.

Ces différents résultats seraient en faveur d'une distinction entre des formes spécifiques (où la personne ne se plaint que de certaines sources de champs électromagnétiques) et des formes

généralisées de l'EHS (où elle se plaint de nombreuses sources), dont les expressions psychologiques seraient différentes, et pour lesquelles les réponses thérapeutiques devraient être adaptées. Cependant, les données sont insuffisantes pour caractériser clairement ces différentes formes. Les sept autres études n'apportent pas d'informations nouvelles sur ce point, soit qu'elles n'aient pas fait de distinction au sein du groupe de personnes se déclarant EHS (Landgrebe *et al.*, 2008b ; Szemerszky *et al.*, 2010 ; Tseng *et al.*, 2011 ; Köteles *et al.*, 2013a), soit qu'elle n'ait inclus que des personnes sensibles aux ondes basses fréquences (Dömötör *et al.*, 2016) ou aux ondes de la téléphonie mobile (Furubayashi *et al.*, 2009), soit qu'elle ait comparé le groupe de personnes se déclarant EHS à un groupe se plaignant d'hypersensibilité à un plombage dentaire (Bergdahl *et al.*, 2005), soit qu'elle n'ait pas distingué les personnes se déclarant EHS au sein d'un groupe se plaignant de symptômes liés à l'environnement (Brand *et al.*, 2009). Les critères d'exclusion ont également varié d'une étude à l'autre.

Dans ces conditions, seules quelques conclusions préliminaires peuvent être formulées. Elles concernent l'anxiété, la dépression et la tendance à la somatisation. D'une manière générale, les personnes se déclarant EHS (y compris celles uniquement sensibles aux ondes de la téléphonie mobile) sont plus fréquemment et / ou plus fortement anxieuses que les témoins non sensibles (Bergdahl, 1995 ; Landgrebe *et al.*, 2008b ; Furubayashi *et al.*, 2009 ; Johansson *et al.*, 2010 ; Dömötör *et al.*, 2016). Cependant, Szemerszky *et al.* (2010) n'ont pas observé de variation du score d'anxiété « état »¹⁹⁶ au cours d'une étude de provocation comportant trois phases d'exposition. Les personnes se déclarant EHS sont également plus fréquemment et / ou plus fortement déprimées que les témoins (Rubin *et al.*, 2008 ; Landgrebe *et al.*, 2008b ; Johansson *et al.*, 2010). Enfin, elles présentent une tendance à la somatisation statistiquement plus marquée que les témoins (Rubin *et al.*, 2008 ; Szemerszky *et al.*, 2010 ; Köteles *et al.*, 2013a ; Dömötör *et al.*, 2016).

Toutefois, aucune de ces études n'apporte d'arguments permettant de dire si ces différences sont la cause ou la conséquence de l'exposition aux champs électromagnétiques. Cette remarque avait été faite dès les premières études sur les composantes psychiques de l'EHS : les résultats des deux premiers articles de Bergdahl (1995, 2004) avaient été inclus dans la revue générale sur l'EHS présentée par Stenberg (un des co-auteurs de Bergdahl) en introduction de la réunion organisée par l'OMS sur l'hypersensibilité électromagnétique, les 25-27 octobre 2004, à Prague (République Tchèque) avec le commentaire suivant « *il n'est pas clair si les constatations psychologiques/physiologiques représentent un état qui précède l'EHS, ou si elles se développent parallèlement* » (Stenberg 2006).

Les autres résultats sont trop fragmentaires pour être considérés autrement que comme étant à confirmer avec des méthodologies plus adéquates. Des différences de quelques traits de personnalité ont été observées entre personnes se déclarant EHS et témoins, mais celles-ci sont trop disparates et pourraient être expliquées par les différences entre les instruments de mesure qui les ont mises en évidence. En l'état actuel des connaissances, il n'est pas possible de dire que les personnes se déclarant EHS présentent un (ou plusieurs) profil psychologique particulier. Cependant, les tests de personnalité pathologique ne leur ont pas été appliqués jusqu'à présent. De même, l'absence de troubles psychiatriques majeurs chez les personnes se déclarant EHS, dans les études actuellement disponibles, pourrait être expliquée par l'exclusion explicite (Rubin *et al.*, 2008) ou implicite (la plupart des autres études) des personnes présentant de tels troubles. À noter, toutefois, qu'à la suite d'une enquête portant au départ sur 5 000 femmes japonaises (cf. Furubayashi *et al.*, 2009, § 6.2.1.2.2), les 43 témoins et les 11 personnes se déclarant EHS qui ont accepté de se prêter à une étude de provocation n'ont pas présenté d'anomalie à un test d'évaluation globale des troubles psychiques, alors que la présence de tels troubles n'était pas un critère d'exclusion de cette étude. La question reste donc ouverte de savoir si la fréquence des troubles psychiques majeurs, autres que l'anxiété, la dépression et la tendance à la somatisation, est différente ou pas de celle de la population générale.

¹⁹⁶ Cf. définition de l'anxiété « trait », constitutionnelle, ou « état », à l'instant présent, dans la présentation du test STAI en Annexe 13.

À noter que le trait de personnalité « hypersensibilité (cf. 3.9.4) ne doit pas être considéré comme étant pathologique.

En résumé, les études descriptives des composantes psychiques des personnes se déclarant EHS doivent être considérées comme étant des études préliminaires n'ayant obtenu que des résultats partiels (anxiété, dépression, tendance à la somatisation) qui sont à prendre en compte dans leur prise en charge, mais dont la signification (cause ou conséquence) reste à élucider. L'étude des profils psychologiques de ces personnes et celle des affections psychiatriques majeures qu'elles pourraient présenter restent à faire.

7.6.4 Synthèse des données et conclusion

On sait aujourd'hui que des facteurs psychiques interviennent, de manière plus ou moins importante, dans le déclenchement et / ou l'évolution de la plupart des maladies. Les troubles somatoformes et la tendance à la somatisation, bien connus des psychiatres, représentent des situations extrêmes dans lesquelles ces facteurs jouent le rôle principal (cf. § 3.8). Il est donc parfaitement légitime de se poser la question des composantes psychiques de l'EHS et de leur influence éventuelle sur le cours des symptômes décrits sous ce terme. Cependant, il est également bien établi que l'absence d'anomalie aux examens cliniques, biologiques et d'imagerie ne signifie pas obligatoirement que les symptômes dont se plaignent les personnes sont d'origine psychique. Des constatations d'ordre psychologique, pas forcément pathologiques, doivent être faites pour qu'une telle origine puisse être considérée comme raisonnablement établie.

À la lumière des articles résumés ci-dessus, qu'en est-il pour l'EHS ? Cette question a été abordée en comparant des personnes se déclarant EHS à des témoins présumés sains à l'aide d'instruments psychométriques (présentés en Annexe 13). Les articles qui les ont utilisés sont analysés au § 6.1.2 et discutés au § 7.6.3.1 ci-dessus. Ils ne sont qu'une dizaine seulement, ce qui est peu si l'on considère le nombre élevé et la diversité de ces instruments, ainsi que l'hétérogénéité des situations cliniques. Il n'est donc pas surprenant de constater des lacunes importantes. Ainsi, aucune recherche ne s'est intéressée à la présence éventuelle chez les personnes se déclarant EHS de troubles spécifiques de la personnalité, tels qu'ils sont définis dans la classification internationale des maladies (CIM10 sous la référence F60). De même, aucune de ces études n'a utilisé les grands instruments classiques de diagnostic psychiatrique, tels que le *Minnesota Multiphasic Personality Inventory* (MMPI) ou la version complète du *World Health Mental Composite International Diagnostic Interview* (WHM-CIDI) de l'OMS.

Le seul enseignement que l'on puisse tirer de ces travaux est que les personnes se déclarant EHS sont plus anxieuses et plus déprimées que les témoins. Cependant, ce résultat est difficile à interpréter car, telles que ces recherches ont été conçues, il n'est pas possible de dire si cette anxiété et / ou cette dépression sont la cause ou la conséquence des symptômes ressentis par ces personnes. L'anxiété et la dépression sont en effet des réactions (conséquences) communes à la plupart des maladies graves ou rares. Dans le cas des personnes se déclarant EHS, on peut comprendre que les difficultés de la prise en charge médicale et la persistance des symptômes engendrent de l'anxiété et de la dépression.

En tout état de cause, aussi bien l'analyse des articles ci-dessus que les déclarations des médecins prenant en charge des personnes se déclarant EHS suggèrent que les affections psychiatriques graves ne sont pas plus fréquentes chez ces personnes que dans la population générale. En conclusion, le niveau de preuve est suffisant pour dire que – dans l'EHS, comme dans beaucoup d'autres affections – il existe une composante psychique non négligeable. Celle-ci est caractérisée par une anxiété et / ou un état dépressif qui sont plus fréquents et plus intenses que dans les populations témoins, sans que l'on puisse dire actuellement si ces états sont la cause ou la conséquence de l'EHS.

En attendant une meilleure compréhension du rôle de ces composantes psychiques, il est évident que de nombreuses personnes se déclarant EHS sont dans un état de souffrance plus ou moins important et qu'elles doivent être prises en charge et traitées, à ce titre, par des professionnels de santé ayant une bonne connaissance de leur problématique.

7.7 Effet *nocebo*

L'effet *nocebo* se définit comme l'ensemble des symptômes « négatifs » ressentis par une personne soumise à l'exposition à un médicament, une thérapeutique non médicamenteuse ou à des facteurs environnementaux. Il est causé par la suggestion, la croyance ou la crainte que cette exposition est nuisible. Comme il sera montré ci-dessous, il s'agit d'un phénomène psychophysiologique normal.

Hypothèse 17 pour expliquer tout ou partie de la survenue et / ou de l'évolution de l'EHS : un effet *nocebo* ?

7.7.1 Généralités sur l'effet *nocebo*

Le terme *nocebo* provient du verbe latin *nocere* (nuire), il signifie de façon littérale « je nuirai ». On regroupe en fait sous ce terme plusieurs faits différents, comme pour le terme *placebo* (« je plairai », du verbe latin *placere*). Ainsi, *nocebo* et *placebo* sont les deux faces en miroir d'un même phénomène et peuvent être envisagés de deux façons :

- L'objet *nocebo* peut être un médicament (comme le médicament *placebo*), une stratégie thérapeutique ou n'importe quel « objet » auquel est exposé une personne afin d'induire des effets désagréables. Ces « effets désagréables » peuvent soit avoir une explication physiopathologique et être observés chez la plupart des gens, soit n'avoir aucune explication biologique et n'être observés que chez une petite minorité de personnes. Il est difficile d'illustrer ce concept, car pour des raisons évidentes, induire volontairement un effet désagréable est contraire à l'éthique. Cependant, quelques exemples permettent d'appréhender l'idée. Un médicament ayant un mauvais goût est parfois plus efficace que le même médicament ayant un goût neutre. L'information donnée aux patients lors de la prescription d'un médicament, ainsi que la liste des risques figurant dans la notice du produit augmentent le risque d'événements indésirables.
- L'effet ou réponse *nocebo* se définit comme l'ensemble des symptômes « négatifs » ressentis par une personne soumise à une intervention qui peut être un médicament, une thérapeutique non médicamenteuse ou l'exposition aux champs électromagnétiques par exemple. On utilise parfois l'effet *nocebo* en recherche clinique dans des études comparant un médicament à un produit inactif. Il s'agit ici, en utilisant l'effet *nocebo*, de maintenir le double insu (l'ignorance de la nature du traitement administré par le patient et le médecin). Par exemple, certains antidépresseurs ont des effets latéraux atropiniques responsables d'une sécheresse désagréable de la bouche par diminution de la sécrétion salivaire. Si on compare le médicament testé à un simple *placebo* (il s'agit ici d'un produit ayant l'aspect du médicament testé mais ne contenant aucun principe actif), le patient et le médecin identifieront rapidement la nature du traitement reçu. Pour pallier ce problème, on peut administrer au groupe témoin un médicament dépourvu de l'effet supposé du médicament testé, mais induisant une sécheresse buccale.

Tout comme pour l'effet *placebo*, de nombreuses théories tentent d'expliquer l'effet *nocebo* au niveau neuropsychologique et neurobiologique.

Une revue récente (Schedlowski *et al.* 2015) fait le point sur les mécanismes neuro-bio-comportementaux des réponses *placebo* et *nocebo*. Ce document constate que les publications et les connaissances sur les réponses *placebo* sont presque 10 fois plus abondantes que celles sur les réponses *nocebo* (2 672 publications sur les premières depuis 1950 contre 280 pour les secondes). Ceci s'explique par les considérations éthiques signalées ci-dessus.

Il est aujourd'hui reconnu que les trois facteurs principaux qui interviennent dans le déclenchement et l'intensité de l'effet *nocebo* sont :

- (1) l'attente du sujet, liée à ses croyances personnelles et à son appartenance socio-culturelle ;
- (2) le conditionnement, lié à des expériences antérieures désagréables¹⁹⁷ ;
- (3) la qualité de la relation soignant-soigné, documentée récemment pour ce qui est de la pratique médicale (Greville-Harris and Dieppe 2015).

Cependant, d'autres facteurs peuvent également intervenir, comme les propriétés intrinsèques de « l'objet thérapeutique » (couleur et goût d'un médicament, manipulation compliquée d'un système d'administration ou d'un dispositif médical, coût, etc.) ou les relations inter-individuelles (observation et / ou écoute de personnes se plaignant de troubles sérieux après avoir pris le même médicament que celui prescrit au patient). Un exemple frappant de dissémination sociale des symptômes a été décrit dans un groupe qui allait être exposé à des conditions hypobariques dans les Alpes. Un seul des participants avait été informé de la survenue de maux de tête induits par l'hypoxie. Les autres membres du groupe ont été « infectés » par ce symptôme en fonction de leurs contacts sociaux avec celui-ci (Benedetti *et al.* 1997).

Schedlowski *et al.* (2015) ont également résumé les connaissances sur les mécanismes neurobiologiques sous-tendant les réponses *nocebo*. Ces connaissances reposent principalement sur l'étude du phénomène douloureux. Grâce aux techniques d'imagerie fonctionnelle cérébrale, plusieurs études (Koyama *et al.* 2005, Keltner *et al.* 2006) ont montré que, chez des volontaires sains, la simple attente des symptômes pouvait activer les structures cérébrales impliquées dans la perception des symptômes (régions nociceptives du thalamus, du cortex somato-sensoriel secondaire et de l'insula) avant que la moindre stimulation sensorielle ait été appliquée. Lorsque les sujets s'attendaient à un stimulus nociceptif très intense, l'activation pouvait s'étendre au cortex cingulaire antérieur caudal, à la tête du noyau caudé, au cervelet et au noyau cunéiforme antérieur (Keltner *et al.*, 2006).

Des phénomènes comparables ont été observés au niveau de la moëlle épinière (Geuter and Buchel 2013) et pour d'autres modalités sensorielles, notamment visuelles (Summerfield and de Lange 2014). En ce qui concerne les mécanismes neurochimiques de l'effet *nocebo*, Benedetti *et al.* (1997) ont montré, lors d'un essai thérapeutique sur les douleurs post-opératoires, qu'une hyperalgésie *nocebo*-induite pouvait être empêchée par un antagoniste de la cholécystokinine, la proglumide, suggérant que ce polypeptide était un médiateur de l'effet *nocebo* par l'intermédiaire de son implication dans le fonctionnement des faisceaux descendants du contrôle de la douleur (Benedetti *et al.* 1997). De plus, Benedetti *et al.* (2013) ont mis en évidence un rôle des systèmes opioïdes et cannabinoïdes dans la régulation par effet *nocebo* des phénomènes douloureux (Benedetti *et al.* 2013). Enfin, Benedetti *et al.* (2014) ont décrit une augmentation significative des concentrations sanguines de prostaglandines E2 et F2 chez les sujets « contaminés » verbalement du groupe cité ci-dessus (Benedetti *et al.* 1997) pour avoir été exposé à des conditions hypobariques, expliquant la vasodilatation cérébrale responsable de la survenue des maux de tête (Benedetti, Durando, and Vighetti 2014). Toutefois, Schedlowski *et al.* (2015) considèrent que, pris dans leur ensemble, les mécanismes sous-tendant les réponses *nocebo* sont beaucoup moins bien compris que ceux des réponses *placebo* (Schedlowski *et al.* 2015). En particulier, on ne sait pas quelles sont les contributions respectives des « trajectoires » similaires, conjointes et distinctes aux réponses *placebo* et *nocebo*.

¹⁹⁷ Une définition plus simple du conditionnement lié aux expériences antérieures désagréables a été donnée dans le cadre de la consultation publique (commentaire n°100) : « ce qui fait mal fait peur et ce qui fait peur fait mal ». Cette définition peut s'appliquer aussi à l'effet *nocebo*.

7.7.2 L'effet *nocebo* en recherche clinique

L'effet *nocebo* en recherche clinique a partiellement été envisagé plus haut sous l'angle méthodologique pour le maintien du double *insu*. Au-delà de cet exemple, l'enjeu en recherche clinique est de mesurer l'effet *nocebo* et l'effet *placebo* (on utilise souvent le terme *placebo* pour décrire les deux phénomènes) et de les distinguer des effets propres de l'intervention à laquelle est soumis le patient. C'est la raison pour laquelle la méthodologie de référence utilisée en recherche clinique est l'essai comparatif *versus placebo* (le terme fait ici référence à un produit d'apparence identique au produit testé mais n'ayant aucune activité). Dans ce schéma expérimental, la comparaison des effets observés dans les groupes exposés à l'intervention ou non exposés permet d'identifier les effets *placebo / nocebo*. Dans les essais cliniques traditionnels évaluant le médicament, les personnes du groupe témoin expérimentent des événements indésirables désagréables qui sont le plus fréquemment des céphalées, des troubles digestifs (nausées, vomissements) ou neuropsychiatriques (anxiété, somnolence, malaises divers, etc.). Toujours dans le cadre de la recherche clinique, on a également pu montrer que l'information donnée au participant afin d'obtenir son consentement, et qui comporte un exposé des contraintes et des risques encourus en cas de participation à la recherche, génère un effet *nocebo*. Il en est de même des recherches impliquant des schémas expérimentaux compliqués ou l'utilisation de matériels sophistiqués perçus comme mystérieux par le participant.

7.7.3 L'effet *nocebo* en pratique clinique

Bien que perçu intuitivement depuis longtemps par de nombreux praticiens, le problème de l'effet *nocebo* en pratique clinique n'a fait l'objet de publications que depuis une dizaine d'années (Olshansky 2007, Hauser, Hansen, and Enck 2012). Greville-Harris et Dieppe (2015) ont fait une brève revue des quelques articles consacrés à cette question et y ont inclus quelques données succinctes tirées d'une thèse portant sur le concept de validation / invalidation¹⁹⁸ dans la relation médecin-patient, ainsi que dans d'autres domaines. Ils ont notamment décrit les résultats d'une étude conduite dans un centre de traitement de la douleur, au cours de laquelle ils ont observé et enregistré les consultations et réalisé des entretiens semi-directifs chez 5 patientes et 4 consultants. Les entretiens ont suggéré que les effets d'une invalidation étaient très dommageables. Aussi bien les patients que les consultants ont rapporté beaucoup de circonstances au cours desquelles ils se sentaient invalidés au cours des consultations. Les patients en ont éprouvé un sentiment de désespérance et d'irritation, ainsi qu'un besoin accru de justifier leur état et d'éviter certains médecins. Malgré la petite taille de l'échantillon étudié, les auteurs ont conclu qu'une invalidation pendant une consultation pouvait engendrer des réponses *nocebo* puissantes chez les patients qui n'avaient pas été bien examinés. Selon eux, le problème est cependant plus général : il est dans la nature humaine de souhaiter se sentir compris par les autres et notre expérience générale de la vie nous apprend que des mots et des critiques durs (*harsh*) peuvent blesser et avoir des effets négatifs de longue durée (Greville-Harris and Dieppe 2015).

Si l'on considère la situation d'incompréhension entre les personnes se déclarant EHS et de très nombreux professionnels de santé, l'application du concept de validation / invalidation conduit à formuler l'hypothèse que cette situation peut générer un important effet *nocebo* chez ces personnes.

¹⁹⁸ Dans le concept de validation / invalidation, la validation est un acte de communication signifiant à autrui l'acceptation et la compréhension de son message, alors que l'invalidation est un acte signifiant la non compréhension et la non acceptation de ce dernier. Ces concepts diffèrent de ceux d'empathie qui s'applique à la seule compréhension d'autrui, et de compassion qui consiste à créer des sentiments de chaleur, de gentillesse et de soutien, car ils impliquent la communication à autrui de la compréhension et de l'acceptation ou de l'incompréhension et de la non acceptation.

7.7.4 Qu'en est-il chez les personnes se déclarant EHS ?

7.7.4.1 Apport des études de provocation

Les études de provocation ont fait l'objet d'une analyse article par article, d'une synthèse et d'une réflexion approfondie sur leurs limites (cf. § 6.2). Rappelons que l'OMS¹⁹⁹ les considère comme indispensables pour préciser la nature des intolérances environnementales idiopathiques : « *des études cliniques sont nécessaires de toute urgence pour déterminer la nature (par exemple : psychogène, toxicogène) de l'IEI, puisque les résultats auront une influence sur les politiques publiques et la pratique clinique pour la prévention et le traitement de l'IEI. La question clé est de savoir si les sujets avec IEI sont capables, dans le cadre d'études de provocation, de discriminer en double aveugle les expositions environnementales des expositions placebos. L'aptitude à discriminer suggère un mécanisme toxicologique. L'incapacité à discriminer suggère un effet psychogène (par exemple un mécanisme conditionné ou appris)* ».

Depuis les premiers cas de personnes se déclarant EHS, de nombreuses études de provocation ont été réalisées (cf. § 6.2.1). Elles ont montré que, « *dans l'immense majorité des cas, les personnes se déclarant EHS [...] n'ont pas présenté plus de symptômes fonctionnels pendant les périodes d'exposition que pendant les périodes de non exposition* » (Afsset, 2009).

Toutefois, plusieurs de ces études de provocation suggèrent ou confirment que les symptômes ressentis par les personnes se déclarant EHS seraient dus à un effet *nocebo*.

Les premiers à avoir soulevé cette hypothèse sont Rubin *et al.* (2006b) qui, dans la discussion de leur étude de provocation, se sont essentiellement appuyés, pour faire cette proposition, sur le fait que 26 personnes se déclarant EHS sur 60 (43 %) ont présenté, au cours des expositions (réelles ou factices), des réactions suffisamment sévères pour demander l'arrêt de l'exposition (n = 17) ou pour se retirer de la suite de l'étude (n = 9), alors qu'aucun des 60 témoins n'a présenté de telles réactions. De plus, ces réactions sévères étaient distribuées de manière identique entre les trois conditions d'exposition : GSM (n = 7), signal continu non pulsé (n = 10) et exposition factice (n = 9). Ces résultats, qui ne confirment pas le sentiment que les personnes se déclarant EHS ont dans leur capacité à discriminer les signaux réels des signaux simulés, ont conduit les auteurs à émettre deux hypothèses : (1) la perception de symptômes lors des études de provocation serait due à un effet *nocebo* et (2) le même mécanisme serait en cause pour expliquer l'apparition des symptômes que ces personnes ressentent dans leur vie quotidienne.

Dans une revue générale portant sur 46 études de provocation réalisées en aveugle ou en double-aveugle, ces mêmes auteurs (Rubin *et al.*, 2010) ont relevé huit études ((Wenzel, Reissenweber, and David 2005, Wilén *et al.* 2006, Rubin *et al.* 2006b, Eltiti *et al.* 2007a, Oftedal *et al.* 2007, Hillert *et al.* 2008, Leitgeb *et al.* 2008, Furubayashi *et al.* 2009) qui, comme leur étude précédente réalisée en 2006, rapportait que les expositions réelles et factices avaient la même efficacité dans le déclenchement des symptômes. À nouveau, ils en ont déduit que, « *dès lors que des expositions factices paraissent suffisantes pour déclencher les symptômes rapportés par les sujets EHS participant à des études de laboratoire, il semblait probable que les mêmes effets nocebo puissent expliquer aussi les symptômes aigus qu'ils ressentent dans la vie quotidienne* ».

Ils ont également cité, à l'appui de leur hypothèse, les travaux de l'équipe de Ratisbonne (Frick *et al.*, 2005 : Landgrebe *et al.*, 2008b), qui ont mis en évidence un taux de faux positifs plus élevé chez les personnes se déclarant EHS lors des stimulations magnétiques transcrâniennes, alors

¹⁹⁹ International Programme on Chemical Safety/World Health Organization (IPCS/WHO. *Conclusions and recommendations of a workshop on multiple chemical sensitivities (MCS)*. Regulatory Toxicology Pharmacology 1996 ; 24 : S188-S189: « *human research is urgently needed to determine the nature (e.g., psychogenic, toxicogenic) of IEI since the outcome will influence public policy and clinical practice for IEI prevention and treatment, respectively. The key question is whether subjects with IEI are able to discriminate in double-blind, placebo-controlled challenge studies between reported environmental triggers and placebos. Ability to discriminate suggests a toxicologic mechanism. Inability to discriminate would suggest a psychogenic (e.g., conditioned or learned mechanism)* ».

que le seuil de détection des expositions réelles ne différait pas significativement entre ces personnes et les témoins. Parmi les études citées par Rubin *et al.* (2010), celle d'Oftedal *et al.* (2007) est la première à réaliser une étude de provocation spécifiquement centrée sur la place de l'effet *nocebo* dans l'EHS (cf. analyse de l'article au § 6.2.1.2.6). Dans cette étude, les auteurs ont sélectionné 17 personnes ayant déclaré avoir ressenti des maux de tête lors d'un test ouvert²⁰⁰ et les ont incluses dans une étude en double-aveugle, qui a montré que la fréquence et l'intensité des maux de tête pendant et après l'exposition réelle n'étaient pas différentes de celles observées pendant et après l'exposition factice.

D'autres études (Heinrich *et al.* 2007, Regel *et al.* 2006) ont noté une corrélation significative entre les scores symptomatiques et l'intensité du champ électromagnétique perçu (et non celui mesuré), même quand les personnes n'étaient pas exposées, mais croyaient l'être. De même, Wallace *et al.* (2010) (cf. analyse de l'article au § 6.2.1.2.6) n'ont pas évoqué d'effet *nocebo*, mais ont présenté des résultats compatibles avec cette hypothèse.

Szemerszky *et al.* (2010) (cf. analyse de l'article au § 6.2.1.2.6) ont également étudié l'effet *nocebo* lors de deux expositions factices, présentées comme étant l'une faible et l'autre forte, à des champs extrêmement basse fréquence à 50 Hz. Ces auteurs en ont conclu que le phénomène *nocebo* jouait un rôle important dans la genèse des symptômes attribués aux champs électromagnétiques et que certains traits de personnalité, notamment la tendance à la somatisation et à l'amplification somatosensorielle des symptômes, semblaient être de meilleurs prédicteurs de la perception des symptômes lors d'expositions aux champs électromagnétiques que le fait de s'attendre à des effets négatifs des ondes sur la santé.

Eltiti *et al.* (2015) (cf. analyse de l'article au § 6.2.1.1) ont regroupé les résultats de deux études de provocation (Eltiti *et al.*, 2007a et Wallace *et al.*, 2010) pour augmenter la puissance statistique de leurs analyses grâce à un plus grand nombre de personnes se déclarant EHS et de témoins. Ces deux études comportaient une session ouverte, avec exposition réelle et factice connue, et deux sessions d'exposition, l'une en double-aveugle, l'une réelle et l'autre factice. Au cours des sessions ouvertes, les personnes se déclarant EHS ont présenté un nombre et un score de symptômes, ainsi que des scores d'anxiété, d'éveil, d'inconfort et de fatigue plus élevés sous exposition réelle que sous exposition factice, alors que les témoins n'ont pas présenté de différence entre les deux conditions d'exposition (réelle et factice). Au cours des sessions en double aveugle, les personnes se déclarant EHS et les témoins n'ont pas présenté de différences entre les deux conditions d'exposition. Dans les deux conditions d'exposition, les personnes se déclarant EHS ont cependant rapporté un nombre et un score de symptômes plus élevés que les témoins. Les auteurs ont souligné le fait que les effets négatifs ne se manifestaient que lorsque les participants savaient qu'ils étaient exposés aux radiofréquences. Ils ont souhaité entreprendre des études plus approfondies de l'effet *nocebo* et de ses mécanismes chez les personnes se déclarant EHS.

Szemerszky *et al.* (2016) (cf. analyse de l'article au § 6.2.1.2.6) ont montré chez de jeunes adultes sains, qu'après avoir reçu un comprimé *placebo* présenté comme étant sédatif ou une exposition factice à des champs électromagnétiques, ceux-ci attribuaient les difficultés rencontrées lors de l'exécution d'une tâche de vigilance, ainsi que les symptômes ressentis à la prise de ce comprimé ou à cette exposition, alors même que ces symptômes étaient équivalents en nombre et en intensité à ce qu'ils étaient avant la prise de comprimé ou l'exposition. Ils ont également montré que ces deux fausses attributions étaient corrélées entre elles et que la fausse attribution des difficultés cognitives était corrélée au score des inquiétudes sanitaires liées à la vie moderne.

Ce travail, fondé sur la théorie de l'attribution causale, suggère qu'il pourrait y avoir des analogies entre l'effet *nocebo* imputé aux médicaments, phénomène dont la réalité est bien établie, et l'effet *nocebo* imputé aux expositions aux champs électromagnétiques. De plus, le fait que ces effets aient été observés chez des personnes jeunes et saines suggère qu'il s'agit d'un phénomène normal, ce qui est en accord avec la théorie de l'attribution causale.

²⁰⁰ Cf. définition de session « ouverte » en note de bas de page n° 141, p146.

Toutefois, cette étude présente quelques faiblesses méthodologiques qui font que les éléments de preuve qu'elle apporte sont limités. Elle mérite d'être répliquée, car elle ouvre des perspectives nouvelles sur le rôle, les mécanismes et la signification de l'effet *nocebo* chez les personnes se déclarant EHS.

Enfin, Landgrebe *et al.* (2008a) (*cf.* analyse de l'article au § 6.2.1.2.8) ont montré, en couplant le paradigme d'activation cérébrale à celui de provocation, que des personnes se déclarant EHS et des témoins répondaient de façon statistiquement différente à une exposition factice à un téléphone mobile, et de façon non statistiquement différente à une stimulation thermique. Lorsque les deux groupes étaient soumis à l'exposition factice, ces auteurs ont décrit, chez les personnes se déclarant EHS, une activation du gyrus fusiforme pendant l'attente de l'exposition, une activation des cortex cingulaires et insulaires antérieurs pendant l'exposition et une augmentation du score de désagrément noté immédiatement après l'exposition, alors que, chez les témoins, aucune modification de l'état de base n'a été observée. Par contre, la stimulation thermique entraînait, par rapport à l'état de base, des activations cérébrales et une augmentation du score de désagrément qui ne différait pas entre les deux groupes. Pour les auteurs, l'association de manifestation symptomatiques (score de désagrément) à l'activation de régions cérébrales précises pendant une exposition factice constituait un argument en faveur d'une implication de ces aires cérébrales dans la perception du désagrément et dans la génération des symptômes.

On peut ajouter que ces aires cérébrales recoupent en partie celles que les études d'activation cérébrale citées ci-dessus (Koyama *et al.*, 2005 ; Keltner *et al.*, 2006) ont montré être impliquées dans la manifestation d'un effet *nocebo* dans les perceptions douloureuses. Des études complémentaires sont cependant nécessaires pour préciser les relations entre ces diverses conditions. À noter aussi que, dans l'étude de Keltner *et al.* (2006), 4 personnes se déclarant EHS sur 15 ont déclaré un score de désagrément comparable à ceux déclarés par les témoins et que leurs données d'imagerie n'ont pas été incluses dans les comparaisons par rapport à l'état de base et par rapport aux témoins. Ces résultats ne sont donc pas généralisables à l'ensemble des personnes se déclarant EHS.

La pertinence de ces résultats doit être examinée à la lumière des règles qui ont été élaborées progressivement dans le cadre plus classique et plus ancien des essais thérapeutiques

Les problèmes posés sont essentiellement d'ordre méthodologique, dont on voit la mise en œuvre de manière plus ou moins efficace dans les études dites « de provocation ». Il s'agit ici, quel que soit l'objectif principal de l'étude, de soumettre de façon aléatoire la personne à une exposition réelle ou factice à un type de radiofréquences. Dans l'absolu, pour mesurer les symptômes liés spécifiquement aux radiofréquences, et donc les distinguer d'un effet *nocebo*, ce type d'études ne devrait inclure que des personnes EHS ou des témoins non-EHS, bien caractérisés sur le plan phénotypique, et comparables, répartis de façon aléatoire dans le groupe exposé de manière réelle ou factice. S'il existe, le surplus d'événements désagréables dans le groupe exposé pourra être attribué à la seule chose qui distingue les deux groupes de patients : l'exposition aux radiofréquences. Dans ce schéma expérimental idéal en groupe parallèle, on compare la fréquence de survenue de symptômes, ainsi que leur nature et leur sévérité. L'inconvénient de ce type d'étude tient au fait qu'il est aujourd'hui difficile, voire impossible, de définir exactement l'EHS, que le contrôle des biais expérimentaux impose des dispositifs lourds qui peuvent générer de l'effet *nocebo*. L'ensemble de ces limites fait qu'il faut un nombre important de participants pour atteindre un degré de différence ayant une pertinence statistique. Dans la plupart des 17 études rappelées ci-dessus, cette pertinence a été atteinte. Toutefois, cela n'a pas toujours été le cas : l'étude de Wensel *et al.* (2005) n'a porté que sur 3 personnes se déclarant EHS et 7 témoins. Par ailleurs, les différences observées dans l'étude de Heinrich *et al.* (2007) n'ont pas atteint le seuil de significativité malgré un effectif de 95 personnes.

Pour contourner une partie de ces difficultés, la plupart des études publiées à ce jour ont adopté un schéma croisé où la même personne (se déclarant EHS ou non) est soumise successivement, mais dans un ordre aléatoire, à une exposition réelle et à une exposition factice aux radiofréquences. L'avantage théorique est que chaque personne étant son propre témoin, le nombre global de participants à inclure est fortement diminué. À l'issue de l'expérience, on

compare les événements indésirables (ou tout autre paramètre) au cours de chacune des périodes et le surplus observé lors de l'exposition réelle peut être imputé aux radiofréquences, le reste est attribué à l'effet *nocebo* / *placebo*. Cependant, il convient d'être prudent dans l'interprétation de ces études car il peut exister des biais expérimentaux qui doivent être contrôlés : si l'exposition réelle lors de la première séquence générerait des symptômes, l'incidence de ceux-ci lors de l'exposition factice ultérieure pourrait augmenter, mais dans la plupart des protocoles, l'ordre des expositions est généralement aléatoire. L'exposition aux radiofréquences peut induire des effets qui vont durer un certain temps, au-delà de la période d'exposition. Il faut donc un intervalle suffisant entre les deux périodes et vérifier que l'état de base de chaque participant est identique au début de chaque période de l'expérimentation. Pour différencier les symptômes imputables aux radiofréquences de ceux relevant d'un effet *nocebo*, les chercheurs enregistrent les symptômes et demandent en même temps à la personne d'identifier la période (exposition réelle ou factice) à laquelle elle est exposée.

7.7.4.2 Autres contributions sur l'effet *nocebo*

Les études de provocation n'ont pas été les seules à apporter des arguments en faveur de l'existence d'un effet *nocebo* dans l'EHS.

Ainsi, l'étude de Witthöft *et al.* (2013) laisse supposer que le contenu des messages diffusés par les médias joueraient un certain rôle dans la perception négative de l'effet des ondes (effet *nocebo*) et que ce rôle serait d'autant plus important que les personnes auraient, à la base, un caractère anxieux.

Ce rôle de l'effet *nocebo* a été affiné par un article récent (Dieudonné, 2016) (*cf.* analyse de l'article au § 6.1.1.1) et a fait l'objet d'un éditorial (Berthelot 2016) qui apporte quelques notions complémentaires.

Dieudonné (2016) a élaboré, par recoupements successifs, un modèle synthétique unique du processus d'attribution, dont la cohérence avec chaque biographie a été testée. Ce modèle, qui constitue un « *ideal type* », comprend sept étapes : (1) le début des symptômes, (2) la non obtention d'une solution (médicale), (3) la découverte de l'EHS, (4) le recueil d'informations sur l'EHS, (5) l'apparition implicite de la conviction, (6) l'expérimentation, (7) l'acceptation consciente de la conviction. Dans la discussion, l'auteur insiste sur le fait que les symptômes débutent bien avant que l'environnement ne soit suspecté et que l'exposition aux champs électromagnétiques ne soit considérée comme nocive et tenue pour responsable de ces symptômes. Il en déduit qu'il est hautement invraisemblable que l'effet *nocebo* soit la cause des premiers symptômes ressentis par les personnes se déclarant EHS. Analysant finement quelques cas particuliers, il montre cependant que les réponses *nocebo* et *placebo* interviennent dans le processus d'attribution et que, dans quelques rares cas, l'EHS pourrait trouver son origine dans le stress technologique. Cette étude présente l'intérêt de retrouver chez des personnes se déclarant EHS le modèle évolutif largement décrit par le P^r Cathébras dans son livre sur les syndromes médicalement inexpliqués (Cathébras, 2006) (*cf.* § 3.8.1).

Enfin, l'éditorial de Berthelot (2015) n'apporte pas de données originales, mais relève six arguments, dont cinq en faveur du rôle de l'effet *nocebo* dans l'EHS :

- à ce jour, les études scientifiques n'ont pas trouvé d'effets indésirables des champs électromagnétiques habituels ;
- quelques personnes qui se déclarent hypersensibles aux champs électromagnétiques peuvent être hypersensibles aux effets *nocebo* :
 - les symptômes ne sont pas reproduits de façon fiable par des expositions réelles dans les études en double aveugle ;
 - les personnes se déclarant EHS sont habituellement incapables de discriminer les expositions réelles et factices ;
- les symptômes rapportés par les personnes se déclarant EHS semblent fréquemment attribuables aux effets *nocebo* ;
- les effets *nocebo* sont potentialisés par les médias (et même par quelques industriels) qui soutiennent la croyance aux effets indésirables des champs électromagnétiques ;

- on ne peut exclure qu'une minorité de personnes éprouve des effets idiosyncrasiques des champs électromagnétiques ;
- quelques personnes pourraient tirer des bénéfices secondaires en se déclarant EHS.

7.7.4.3 Synthèse des données et conclusion

En résumé, il existe dans la littérature une quinzaine d'études de provocation réalisées en double aveugle et apportant des éléments de preuve concordants en faveur d'un rôle de l'effet *nocebo* dans les symptômes ressentis par de nombreuses personnes se déclarant EHS. Ces études émanent de 12 équipes différentes qui ont utilisé des protocoles très différents. Neuf d'entre elles, les plus anciennes, montrent que les expositions réelles et factices ont la même efficacité dans le déclenchement des symptômes chez les personnes se déclarant EHS. Trois de ces études (Eltiti *et al.*, 2007a ; Oftedal *et al.*, 2007 ; Wallace *et al.*, 2010) ont, en outre, montré que ces personnes qui déclaraient ressentir des symptômes lors d'expositions réelles ouvertes²⁰¹ (mais pas lors d'expositions factices ouvertes), ne faisaient plus cette différence lors des expositions réelles et factices réalisées en double aveugle. Une relation de type « dose-effet », critère majeur dans la démonstration de l'effet d'une substance en pharmacologie, a été mise en évidence par Szemerszky *et al.* (2010) : le nombre et l'intensité des symptômes ressentis par les personnes se déclarant EHS étant significativement plus élevés lors d'une exposition factice présentée comme étant forte que lors de la même exposition factice présentée comme étant faible.

De plus, un argument en faveur d'une possible base cérébrale d'un effet *nocebo* chez des personnes se déclarant EHS a été fourni par l'association d'un score de désagrément élevé à une activation du gyrus fusiforme et des cortex cingulaires et insulaires antérieurs lors d'une exposition factice de plusieurs personnes se déclarant EHS à un téléphone mobile, alors que la même exposition n'a modifié en rien l'état de base des témoins et qu'une stimulation thermique n'a pas entraîné de réponses différentes dans les deux groupes de participants (Landgrebe *et al.*, 2008a). Ces données sont à rapprocher de celles qui montrent que des structures cérébrales comparables sont impliquées dans les effets *nocebo* qui accompagnent certaines perceptions douloureuses (cf. § 7.7.1 ci-dessus : Koyama *et al.*, 2005 ; Keltner *et al.*, 2006) et dont on commence à connaître les mécanismes neurochimiques (cf. § 7.7.1 ci-dessus : Benedetti *et al.*, 1997 ; Benedetti *et al.*, 2014). Ce rapprochement pourrait ouvrir des perspectives de recherche sur les mécanismes neurochimiques de l'EHS qui, à notre connaissance n'ont été que très peu abordés.

Enfin, le fait que des adultes jeunes et sains aient attribué des symptômes et les difficultés rencontrées dans la réalisation d'une tâche de vigilance à une intervention expérimentale préalable (prise d'un comprimé *placebo* supposé sédatif ou exposition factice à des champs électromagnétiques), suggère que l'effet *nocebo* potentiellement impliqué dans l'EHS pourrait être un effet indésirable inévitable du fonctionnement cognitivo-affectif, pouvant affecter toute personne, y compris les médecins²⁰², et pouvant être facilité par les inquiétudes sanitaires²⁰³ liées à la vie moderne.

²⁰¹ Cf. définition de session « ouverte » en note de bas de page n° 141, p146.

²⁰² Toutefois, la mauvaise qualité de la relation médecin-patient n'est probablement pas la seule cause d'effet *nocebo*. Dans un commentaire récent sur la crise du Lévothyrox (<http://www.atoute.org/n/article362.html>) le Dr D. Dupagne déclare : « Ce n'est pas faire insulte aux patients que de parler d'effet *nocebo*. Tous les médecins en ont été victimes eux-mêmes : pendant mes études, il suffisait qu'une infirmière découvre des poux sur un clochard hospitalisé pour que tout le monde perçoive immédiatement d'authentiques démangeaisons... L'autre option fréquente étant de ressentir les symptômes des maladies que l'on était en train d'étudier ! En revanche, insinuer que toutes les difficultés sont dues à l'effet *nocebo* est à la fois faux et méprisant. »

²⁰³ « Ce qui fait mal fait peur et ce qui fait peur fait mal » témoignage formulé dans le cadre de la consultation publique.

À nouveau, la ressemblance des réponses à la prise d'un comprimé *placebo* et à une exposition factice à un champ magnétique ouvre des perspectives de recherche sur les mécanismes neurobiologiques en jeu dans l'EHS.

Au total, les résultats des études de provocation sont compatibles avec l'hypothèse d'un effet *nocebo* important dans l'EHS. Aucune autre explication scientifique à ces résultats n'a été avancée, et encore moins démontrée, jusqu'à présent. Toutefois, plusieurs de ces études n'ont pas été répliquées ; leurs conclusions doivent donc être interprétées avec prudence. De plus, ces études de provocation ont été réalisées chez des personnes se déclarant EHS depuis un certain temps et ne renseignent donc pas sur les modalités de la première apparition des symptômes et de leur attribution à une exposition à des champs électromagnétiques. Si les résultats des études de provocation montrent que l'effet *nocebo* joue incontestablement un rôle dans l'entretien de l'EHS, ils ne permettent pas de dire que cet effet est le facteur ou un des facteurs déclenchant(s) de l'EHS. En conséquence, l'argumentation de Dieudonné (2016), basée sur le laps de temps souvent long qui sépare l'apparition des symptômes de leur attribution à une exposition à des champs électromagnétiques, ainsi que sur une analyse fine des 40 entretiens qu'il a réalisés, est à prendre en considération pour estimer que l'effet *nocebo* n'a pu être à l'origine de l'EHS que dans un tout petit nombre de cas.

Enfin, il ne faut pas perdre de vue que la symptomatologie fonctionnelle de l'EHS est, dans sa banalité, compatible avec l'hypothèse d'un effet *nocebo*. Quant à l'hypothèse, soulevée sans argument précis par Berthelot (2015), d'une recherche de bénéfices indirects par une auto-déclaration d'être EHS, elle sort du cadre de cette discussion et, en tout état de cause, aucune donnée actuelle ne nous permet de la vérifier.

En conclusion, le niveau de preuve est suffisant pour affirmer qu'un effet *nocebo* notable intervient, chez de nombreuses personnes se déclarant EHS, dans le maintien des symptômes ressentis. Comme les autres effets *nocebo* décrits dans la littérature (cf. § 7.7.1 ci-dessus), cet effet n'est probablement que la conséquence indésirable, mais inévitable, d'un fonctionnement cognitivo-affectif normal. Il n'implique ni l'absence d'effet biologique de l'exposition aux champs électromagnétiques (même si ceux-ci n'ont pas été démontrés jusqu'à présent), ni l'existence de troubles psychiques.

7.8 Autre hypothèse : un effet cocktail

Hypothèse 18 pour expliquer tout ou partie de la survenue et / ou de l'évolution de l'EHS : l'EHS serait due à un stimulus environnemental complexe (produits chimiques, pesticides, sources multiples de champs électromagnétiques, bruit, etc.) potentialisé par les champs électromagnétiques, ou « effet cocktail ».

Cette hypothèse a été évoquée lors de l'audition des Électrosensibles de France et de Priartem.

Selon cette dernière hypothèse, purement spéculative, l'EHS pourrait être la conséquence d'une première atteinte qui ne serait pas causée par les champs électromagnétiques, ou du moins en partie seulement, ou bien elle pourrait aussi être la résultante de l'amplification d'une réponse physiologique à d'autres agents, sous l'effet de l'exposition aux champs électromagnétiques.

À la connaissance du groupe de travail, aucune publication n'a été faite sur les effets d'une exposition conjointe à des champs électromagnétiques et à un autre facteur pouvant être la cause de symptômes comparables à ceux décrits par les personnes se déclarant EHS par rapport à des témoins.

Toutefois, une étude ancienne (analysée au § 6.2.1.2.7), réalisée chez des personnes se déclarant EHS (Sandström *et al.*, 1997), montre que celles-ci présentent des réponses statistiquement plus marquées que celles des témoins lors d'expositions à des lumières clignotantes :

- amplitudes moyennes des potentiels évoqués visuels (PEV) plus élevées quelle que soit la fréquence de stimulation, entre 20 et 75 Hz, et quelle que soit la modulation de l'intensité lumineuse à 45 Hz, ainsi que ;
- augmentation de la fréquence cardiaque par rapport aux témoins et, chez les personnes électrohypersensibles, entre la période de relaxation et la période de communication active.

Cette étude (Sandström *et al.* 1997) a le mérite d'avoir proposé de nouvelles pistes de recherche.

8 Prise en charge médicale des personnes EHS et stratégies d'évitement mises en œuvre par celles-ci

Deux rapports d'experts consacrés à l'EHS (Bergqvist et Vogel, 1997 ; Mild KH et al. 2006) ont formulé des recommandations sur la prise en charge des personnes se déclarant EHS :

Pour Bergqvist et Vogel (1997), « Dans certains pays et certains organismes, il existe des protocoles de prise en charge de l'EHS centrés autour :

1°) de la prévention, s'appuyant principalement sur l'information et des actions visant à réduire l'impact sur la santé de facteurs comme l'altération de la qualité de l'air intérieur ou le stress ;

2°) de la prise en charge précoce des personnes atteintes, comprenant un examen médical pour rechercher une maladie connue, et d'autres facteurs que les champs électromagnétiques pouvant être à l'origine des troubles ;

3°) du traitement visant principalement à réduire les symptômes et les handicaps fonctionnels.

L'expérience pratique suggère fortement qu'une intervention précoce réduit considérablement la probabilité de troubles plus graves.

Réduire l'exposition aux champs électromagnétiques dans les situations pertinentes est une question fréquemment posée par les personnes se déclarant hypersensibles aux champs électromagnétiques. Il y a, toutefois, des avantages et des inconvénients à des actions telles que la mesure et la réduction des émissions ou l'évitement des expositions aux champs. Ces actions doivent être examinées soigneusement au cas par cas »²⁰⁴.

Pour les experts de l'OMS (Mild KH et al., 2006), « Quelle que soit sa cause, l'IEI peut être invalidante pour la personne atteinte. Le traitement devrait être centré sur les symptômes et sur le tableau clinique et comporter :

1°) un examen clinique pour rechercher et traiter toute anomalie spécifique qui pourrait être à l'origine de la survenue des symptômes ;

2°) une recherche des facteurs qui pourraient contribuer aux symptômes décrits par la personne se déclarant EHS en lien avec le lieu de travail et le domicile. Ces facteurs peuvent par exemple être la pollution de l'air intérieur, un bruit excessif, un éclairage insuffisant (lumière clignotante) ou des facteurs ergonomiques. Une réduction du stress et une amélioration des conditions de travail peuvent être nécessaires. La mesure de l'exposition aux champs électromagnétiques peut être éventuellement utile pour vérifier que les niveaux d'exposition respectent les standards et recommandations existants ;

²⁰⁴ Le texte anglais est le suivant : « In some countries and within some organisations, schemes to handle « electromagnetic hypersensitivity » center around :

1 – Prevention, mainly concerned with information and mitigation of factors known to give rise to adverse health effects such as indoor air quality or stress conditions;

2 – Intervention or early handling of afflicted cases, including medical examination to detect if the individual suffers from a known disease, and investigations of the relevant situations for other factors besides EMF;

3 – Treatment, primarily directed towards reducing symptoms and functional handicaps;

Practical experience strongly suggests that early intervention greatly reduces the likelihood of more serious problems.

To reduce the exposure to electromagnetic fields in the relevant situation(s) is a commonly asked for action by individuals claiming « electromagnetic hypersensitivity ». There are, however, both advantages and disadvantages of such actions, such as measuring and reducing field emissions or avoiding field exposures. These must be carefully considered, case by case. »

3°) un examen psychologique pour rechercher des troubles psychiatriques ou psychologiques qui pourraient être à l'origine des symptômes.

Quelques études suggèrent que certaines réponses physiologiques des personnes se déclarant EHS ont tendance à être en dehors des normes. En particulier, l'existence d'une hyperréactivité du système nerveux central et d'un déséquilibre du système nerveux autonome mis en évidence dans des études devraient faire l'objet d'études de recherche cliniques et leurs résultats pris en compte pour développer le cas échéant des protocoles thérapeutiques appliqués aux personnes.

Sous l'égide du projet OMS EMF, un protocole de « bonnes pratiques » de prise en charge des personnes se déclarant EHS devrait être élaboré par des médecins reconnus au niveau international et être communiqué aux autorités sanitaires nationales pour être mis en œuvre dans chaque pays ²⁰⁵ ».

Outre le fait que ce dernier point n'a pas été suivi d'effet, ces recommandations étaient trop générales pour apporter des solutions concrètes satisfaisantes en pratique courante. Elles ne mentionnaient pas les quelques essais thérapeutiques qui avaient été réalisés avec des personnes se déclarant EHS, entre 1995 et 2002. Ces essais, dont les résultats ont été négatifs pour la plupart, ont été résumés dans plusieurs revues (Crasson 2005, Irvine 2005b, Rubin, Das Munshi, and Wessely 2006a) et dans le rapport publié par l'Afsset en 2009.

8.1 Études sur l'efficacité des thérapies comportementales et cognitives (TCC) et autres thérapies sur les symptômes ou troubles présentés par les personnes se déclarant EHS

8.1.1 Rappel des conclusions du rapport précédent

Le rapport (Afsset, 2009) avait fait précéder ses analyses sur les traitements de l'EHS de deux commentaires qui restent d'actualité.

« Il peut paraître paradoxal d'avoir procédé à des essais thérapeutiques pour une « affection » dont la définition, purement clinique, est restée floue pendant longtemps (et le reste encore pour une part) et dont les causes et mécanismes sont inconnus. En fait, il faut considérer ces essais, non seulement, dans leur dimension pragmatique de recherche d'une solution efficace toujours nécessaire en médecine, mais aussi dans leur dimension théorique d'apport à la compréhension de ces causes et mécanismes. »

« Dans l'ensemble, ces essais n'ont pas donné de résultats véritablement significatifs. Ils auraient pu être résumés en quelques lignes s'il n'y avait pas le projet gouvernemental de poursuivre l'élaboration d'un protocole d'accord et de prise en charge des patients hypersensible aux ondes électromagnétiques » (Grenelle des ondes).

²⁰⁵ Le texte anglais est le suivant : « Whatever its cause, IEI can be disabling for the affected individual. Treatment should focus on the health symptoms and the clinical picture by performing :

1 – a medical evaluation to identify and treat specific conditions that may be responsible for the symptoms,
2 – an assessment of the work place and home for factors that might contribute to the presented symptoms. These could include indoor air pollution, excessive noise, poor lighting (flickering light) or ergonomic factors. A reduction of stress and other improvements of the work situation might be appropriate. EMF might be assessed to ensure that levels of exposure meet existing standards and recommendations.

3 – a psychologic evaluation to identify alternative psychiatric/psychological conditions that may be responsible for the symptoms.

Some studies suggest that certain physiological responses of IEI individuals tend to be outside the normal range. In particular, the findings of hyper reactivity in the central nervous system and misbalance in the autonomic nervous system need to be followed up in clinical investigation and the results for the individuals taken as input for possible treatment.

Under the umbrella of WHO's EMF project, internationally qualified physicians should develop a « best practice » protocol for managing IEI individuals and provide this information to national health authorities for implementation at the local level. »

Le rapport notait ensuite que « ces essais se répartissent en six groupes, selon qu'ils concernent les thérapies cognitives (4 études²⁰⁶), les protections physiques (2 études), la supplémentation alimentaire en antioxydants (2 études), les prises en charge globales et prolongées (2 études), l'acupuncture (1 étude) et le shiatsu (1 étude). D'une manière générale, les trois revues (citées plus haut) s'accordent pour considérer que ces articles appellent des réserves méthodologiques ».

En ce qui concerne les essais de thérapies comportementales et cognitives (TCC), seules les conclusions des trois revues (Crasson, 2005 ; Irvine, 2005 ; Rubin et al., 2006) avaient été reprises dans le rapport : « Pour Rubin et al., 3 de ces 4 études ont rapporté une amélioration des sujets traités, mais chaque fois sur des critères différents : réduction du degré de la souffrance liée à l'EHS, réduction de la sévérité des symptômes, réduction du handicap, et réduction du nombre de sujets se décrivant comme sensibles aux champs électromagnétiques. De plus, dans la seule étude ayant testé la réponse des sujets à une provocation expérimentale après thérapie cognitive, celle-ci n'a pas eu d'effet sur l'augmentation de la sévérité des symptômes induits par la provocation et sur les croyances des sujets quant à leur capacité à détecter les champs électromagnétiques. Pour Irvine, trois de ces études ont obtenu un « succès limité ». Pour Crasson enfin, des publications tendent à démontrer l'efficacité des thérapies comportementales au niveau du handicap perçu et du degré d'hypersensibilité » (voir p. 299 à 301 du rapport (Afsset, 2009)).

Le rapport (Afsset, 2009) faisait état d'une seule nouvelle étude de recherche thérapeutique (Nieto-Hernandez et al., 2008) montrant que « la divulgation des résultats – négatifs pour la relation de causalité entre exposition et symptômes – d'une étude de provocation n'avait eu aucun effet quantifié sur les symptômes de sujets « EHS » et sur leur croyance en la causalité de la téléphonie mobile » (voir p. 303 du rapport (Afsset, 2009)).

Les conclusions du rapport étaient les suivantes : « les quelques tentatives et essais thérapeutiques dans l'EHS n'ont pas permis d'obtenir des résultats probants. Il semble cependant qu'une tendance se dégage en faveur des thérapies comportementales et des prises en charge globales, dans la mesure où elles sont davantage centrées sur les symptômes que sur leurs causes ».

Depuis, bien que de nombreux articles aient continué à suggérer que les thérapies comportementales et cognitives pourraient être le traitement le plus efficace des symptômes présentés par les personnes se déclarant EHS, aucune nouvelle étude sur les effets de ces thérapies chez ces personnes n'a été publiée, c'est-à-dire depuis plus de 10 ans (Harlacher and et al. 1998, Hillert et al. 2002b, Andersson et al. 1996, Hillert et al. 1998).

Toutefois, aucun autre traitement de l'EHS n'a été validé jusqu'à présent. De plus, de nombreuses données montrent que les personnes se déclarant EHS sont plus anxieuses et plus déprimées que les personnes issues de la population générale et qu'un effet *nocebo* intervient au moins dans la persistance, voire l'aggravation des symptômes présentés par certaines de ces personnes (cf. § 7.6). Ces observations maintiennent un intérêt pour les thérapies comportementales et cognitives (Hillert 2004) et justifient la poursuite des recherches dans ce domaine. En conséquence, une analyse détaillée des trois principaux articles consacrés aux effets de ces thérapies chez des personnes se déclarant EHS a été faite ci-après.

8.1.2 Analyse des articles sur les effets des thérapies comportementales et cognitives chez des personnes se déclarant EHS

Les thérapies comportementales et cognitives constituent l'une des cinq grandes familles de psychothérapie (cf. Encadré 10).

²⁰⁶.(Andersson et al. 1996, Hillert et al. 1998, Hillert et al. 2002b, Harlacher and et al. 1998).

Encadré 10 : les thérapies comportementales et cognitives (TCC)

On distingue les psychothérapies dites « du pourquoi », qui visent à rechercher l'origine d'un trouble, et les psychothérapies dites « du comment », qui s'attachent plutôt à soulager les souffrances du patient.

Les thérapies comportementales et cognitives font partie de la deuxième catégorie. Leurs caractéristiques fondamentales sont (1) de se vouloir basées sur les connaissances de la psychologie scientifique, c'est-à-dire comportementaliste et cognitive, et (2) de s'attaquer, « ici et maintenant », aux symptômes dont souffrent les patients (phobie, obsession, addiction, délire, etc.) par des exercices pratiques et des interventions du thérapeute pour modifier les processus cognitifs, conscients ou non, considérés comme étant à l'origine des émotions et de leurs désordres. Elles associent des thérapies comportementales, basées sur les théories du conditionnement (voir Annexe 14) et des thérapies cognitives, basées sur les théories de la cognition. Les premières utilisent l'immersion durable dans la situation pathogène, l'aversion, l'inhibition réciproque, le renforcement positif et négatif ; les secondes s'appuient sur une investigation portant sur les éléments cognitifs (pensées, images, comportements, émotions) pour induire un décentrement et une « métacognition » qui rend possible la « restructuration cognitive ». Les TCC reposent sur l'hypothèse, aujourd'hui bien étayée, que les croyances, les schémas mentaux de l'individu influencent la manière dont il pense, ressent et se comporte. Cette modalité de psychothérapie apprend à la personne à identifier et évaluer ses pensées erronées dites « dysfonctionnelles » et ses croyances singulières, pour y répondre de manière contrôlée et, si possible, en réduire l'influence. Le thérapeute est actif et directif et doit garder avec le patient une bonne relation ; il lui est lié par un « contrat thérapeutique » prévoyant les résultats escomptés, et il encourage le patient à prendre un rôle actif.

Pratiquées en France depuis les années 1980, elles s'adressent surtout aux personnes ayant des troubles anxieux, des phobies et des troubles obsessionnels compulsifs. Cependant, le profil du patient (son enfance, ses facteurs de stress, ses facteurs traumatiques, etc.) est, bien sûr, pris en compte dans le choix de la thérapie.

Andersson B. *et al.* (1996) ont recruté 35 patients envoyés par leur médecin généraliste ou leur dermatologue de la ville de Stockholm. Seuls 17 d'entre eux correspondaient aux critères d'inclusion de l'étude. Les patients ont été randomisés, soit en groupe thérapeutique ($n = 9$), soit en liste contrôle en intentionnalité de traitement ($n = 8$). Les auteurs ont créé spécifiquement pour cette étude un questionnaire qui évaluait le handicap fonctionnel du trouble en six sous-dimensions : effets sur le travail, sur la vie en général, souffrances physiques, psychologiques, hypersensibilité et croyances. Une échelle analogique pour chacune de ces variables a été mise au point. Des dosages de prolactine et de cortisol ont été pratiqués lors de l'inclusion et à chaque étape du suivi. Des tests de provocation, avec expositions, réelle et simulée, appliquées en double aveugle à plus d'une semaine d'intervalle, ont été réalisés avant et après traitement.

Le programme de TCC était le suivant :

- 1) information du patient : présentation d'un modèle pour comprendre comment des symptômes somatiques pouvaient interférer avec l'interprétation des symptômes par la personne elle-même, à la manière d'un cercle vicieux. Le patient pouvait interpréter un symptôme comme étant le signal d'alerte d'un autre symptôme plus inquiétant ;
- 2) explication au patient que son schéma d'interprétation pouvait avoir été acquis dans le passé en ressentant des symptômes très inquiétants pour lui, mais pouvait aussi résulter d'informations multiples données par les journaux, la radio ou la télévision ;
- 3) le thérapeute discutait avec le patient des fondements de ses croyances. De fait, de multiples interprétations pouvaient être données ; elles étaient explorées une à une et évaluées. Il n'y avait pas une seule manière de voir ou d'interpréter l'expérience du patient et une seule manière de la contredire. Le modèle du cercle vicieux était validé, indépendamment des effets biochimiques ou non des champs électromagnétiques ;
- 4) relevé quotidien dans son carnet de thérapie, le patient notait à chaque fois que ses symptômes survenaient, leur intensité, les situations dans lesquelles ils apparaissaient et les interprétations qu'il en avait sur le moment. De cette manière le patient testait l'évidence de ses interprétations, il pouvait ainsi développer des stratégies de contrôle sur ses symptômes, ainsi que sur les situations déclenchantes ;

- 5) apprentissage au patient de stratégies de gestion du stress, telle qu'une méthode de relaxation, l'identification des stressors et leur gestion par le patient ;
- 6) travail sur les routines journalières (rythmes circadiens) et les manières de mieux appréhender les « autres » ;
- 7) réévaluation au bout de 20 semaines.

Les principaux résultats de l'étude ont été les suivants :

- réduction du score symptomatique global ;
- les tests de provocation n'ont pas entraîné de modification des symptômes et des variables biochimiques, aussi bien chez les personnes se déclarant EHS que chez les témoins, qu'il s'agisse des tests pratiqués avant ou après traitement (Andersson *et al.* 1996).

Hillert L. *et al.* (1998) ont recruté 31 patients sur une année. Neuf patients ont été exclus du protocole (chômage, maladies organiques ou psychiatriques associées, examen physique, examen biologique standard). Dix patients et 12 témoins en intentionnalité de traitement ont suivi une T.C.C pendant 6 mois et ont été suivis ensuite pendant une année après la fin de l'essai.

Les paramètres suivants ont été mesurés :

- l'inconfort, avec une échelle analogique ;
- une liste de symptômes cutanés (sensation de brûlure, etc.), avec calcul d'un indice relatif ;
- le taux d'évitement des sources de champs électromagnétiques était rapporté (un ratio était calculé) ;
- les stress « gâchettes » : le patient faisait un auto-relevé des sources d'exposition susceptibles de lui apporter un stress (tubes cathodiques, téléphones, ampoules, train, métro, etc.).

Les auteurs ont utilisé les questionnaires suivants :

- *Check-list* SCL 90 ;
- l'échelle d'alexithymie Toront (*alexithymia scale*) en 20 items. Le rapport entre l'alexithymie et les troubles somatomorphes a été discuté ;
- l'échelle du style attributionnel (*attributionnal style questionnaire*) ;
- le questionnaire de sentiment de cohérence²⁰⁷ dans la vie (*sens of coherence*).

Sur le plan biochimique, les mesures suivantes ont été réalisées :

- des dosages sanguins : hormones thyroïdiennes, prolactine et cortisol, qui reflètent, entre autre, le niveau de stress ;
- le dosage salivaire du fructosaminine, qui est un reflet de la glycémie des 15 derniers jours, reconnu comme un paramètre sensible au stress sur cette même période.

La thérapie comportementale et cognitive est centrée sur l'évolution des symptômes et sur les stratégies de *coping* (pour faire face) mises en place par le patient. Après les entretiens d'évaluation initiale, la thérapie comportait 15 séances réparties sur six mois.

Le problème à traiter était défini pour chaque patient dans les séances préliminaires, puis concrètement, une liste d'actions était identifiée pour résoudre le problème, le but de la thérapie était défini, et des stratégies étaient développées pour atteindre ce but, après agrément du patient et du thérapeute (*cf.* « Le contrat thérapeutique classique de TCC »).

²⁰⁷ Le sentiment de cohérence est habituellement corrélé à la sensation de bien-être évaluée, de fait, par le GHQ (*général health questionnaire*).

- construction de la liste des objectifs : le thérapeute vérifiait qu'ils étaient réalistes (par exemple : reprendre les transports en commun, aller faire des courses dans un endroit avec des ampoules fluorescentes, ou encore regarder la télévision) ;
- le travail permettait de tester plusieurs interprétations des symptômes : si « mon symptôme est la manifestation d'une maladie plus grave ? » ou encore « est-il une réaction temporaire inconfortable ? ». Le patient était alors encouragé à tester différentes actions : évitement ou non évitement, car il était suspecté que des facteurs déclenchants (*trigger*) influençaient les symptômes. La relaxation était apprise au patient pour diminuer le seuil d'éveil.

La thérapie était structurée, elle comportait des tâches au domicile, rapportées dans un carnet de thérapie, les hypothèses testées par le thérapeute et le patient, la notation de la réactivité, ses interprétations par rapport aux symptômes, des alternatives de pensées et d'autres interprétations étaient proposées par le thérapeute.

Le patient notait dans un carnet de thérapie tout ce qui pouvait être utile.

De nouvelles tâches au domicile étaient définies entre thérapeute et patient (*cf.* Travail personnel quotidien défini, classique et indispensable dans un programme TCC).

Les principaux résultats de l'étude ont été les suivants :

- paramètres biochimiques :
 - le taux de cortisol était très élevé avant traitement dans les deux groupes ;
 - il n'y avait pas de modification entre les deux groupes en ce qui concernait les facteurs biochimiques à la fin de l'étude ;
- Dans le groupe TCC. :
 - la TCC a permis au patient d'arrêter un cercle vicieux qui aggravait ses symptômes, elle a permis de développer de nouvelles interprétations, de nouveaux comportements lui permettant d'augmenter ses stratégies pour faire face (*coping*) et de diminuer ses évitements. Au bout de 6 mois, le groupe thérapeutique a évalué que sa sensibilité aux champs électriques était significativement plus faible que le groupe témoin, et l'autoévaluation de leur inconfort a montré une diminution des facteurs « gâchettes » ;
 - diminution significative de l'indice des symptômes ;
 - les patients améliorés montraient un taux de dépression et d'agressivité plus élevé que les autres avant le traitement TCC (les résultats sont statistiquement significatifs) ;
 - les patients qui avaient un score élevé d'anxiété phobique, d'agressivité et de sensibilité, amélioraient leur score à six mois.
- la possibilité de travailler était conservée dans les deux groupes (Hillert *et al.* 1998).

Au final, ces résultats sont cohérents avec ceux obtenus par Andersson B. *et al.* (1996). Le handicap fonctionnel diminue, mais pas la perception de l'hypersensibilité.

À Stockholm, Hillert L. *et al.* (2002b) ont recruté des sujets qui attribuaient leurs symptômes à une hypersensibilité aux champs électriques ou électromagnétiques. Dans leur vie courante, ils confondaient les sources de stress et, par conséquent, cherchaient à éviter toute source de champs électromagnétiques. Comme cela est impossible en pratique, ils vivaient dans un état de stress chronique, du fait d'un fort sentiment d'impuissance. Cinquante pour cent des patients recrutés n'ont pas été inclus (en raison de la découverte de pathologies hormonales, psychologiques, ou encore d'un manque de disponibilité). Quatre groupes de six personnes ont été formés en fonction de l'ordre d'arrivée des patients. Au final, 22 personnes ont participé à l'étude (14 femmes, 8 hommes, âge moyen = 42 ans, compris entre 29 et 58 ans). Une approche pédagogique a été entreprise, respectant le cadre d'une TCC. Les séances étaient thématiques, il y avait huit thèmes pour huit sessions :

1. présentation du travail, du groupe ;

2. présentation des données scientifiques actuelles sur l'hypersensibilité aux champs (avec un médecin) ;
3. répercussions des symptômes et difficultés dans la vie quotidienne, le sentiment de bien-être ;
4. définition du stress, du besoin des autres ;
5. les stratégies pour faire face (*coping*) au stress ;
6. le réseau social, le support des autres ;
7. l'environnement au travail, les modifications d'organisation, le temps horaire au travail, le support social ;
8. résumé général et évaluation des patients.

La session de TCC durait 3 heures, avec des thérapeutes de quatre disciplines : psychologue, travailleur social, kinésithérapeute, médecin généraliste. La session était entrecoupée et s'étalait, au final, sur toute une journée. La première partie de la session (90 minutes), animée par le psychologue et le travailleur social consistait à :

- revoir ce qui avait été dit et fait au groupe précédent ;
- raconter leurs expériences depuis la session précédente ;
- introduire le nouveau thème de la session présente ;
- définir des tâches au domicile en rapport avec le thème de la session.

Les patients ont participé à un groupe, sur huit week-ends, abordant le corps (avec un kinésithérapeute) et la psychologie (même si les patients rejettent une origine psychogène de leurs troubles). L'intervention kinésithérapique était de 90, puis de 30 minutes complémentaires une fois par semaine. Elle visait à augmenter la conscience du corps, son contrôle et à améliorer la santé physique. Les critères d'évaluation ont été les suivants : 1) la capacité de travail ; 2) l'évaluation du bien-être ; 3) les stratégies de *coping*, la forme physique (*physical fitness*), l'éveil du corps (*body awareness*). Seize des 22 patients ont rapporté des événements de vie perturbateurs dans les deux années qui précédaient les symptômes. Leur score de qualité de vie (questionnaire *SF-36*) était inférieur à celui de la population générale suédoise pour 15 d'entre eux (soit 15/22 = 68 %). Au bout de huit week-ends, les principaux résultats de l'étude ont été les suivants :

- diminution des tensions musculaires ;
- meilleur éveil du corps ;
- pas de différences significatives sur les symptômes ressentis ;
- pas de modification psychologique avant / après (5 des patients exprimaient une forte attente positive à l'égard de cette thérapie de groupe) ;
- un changement positif dans la manière de percevoir son corps.

À l'issue de cette étude, 14 patients ont continué la thérapie psychologique²⁰⁸ et / ou corporelle (avec le kinésithérapeute)²⁰⁹ augmentant leur bien-être. L'hypothèse thérapeutique des auteurs était de développer une identification précoce de la réaction de stress dans le corps, dès qu'il augmentait, avec toutes ses répercussions physiques. Le but était alors de réduire la réactivité au

²⁰⁸ Cette thérapie a trois composantes, qui développent les compétences du sujet : la compréhension, la gestion de soi et la pleine conscience (*MBCT*) (Segal, Teasdale, Williams 2001).

²⁰⁹ La thérapie d'éveil du corps se poursuit en trois étapes, afin d'augmenter la prise de conscience des sensations corporelles démontrant qu'il y a urgence à changer : 1) démontrer le rapport entre les tensions musculaires existantes et les symptômes ressentis ; 2) augmenter le contrôle corporel, afin d'influencer le style relationnel au corps et, de fait, les symptômes ; 3) développer une autre relation au corps quand les symptômes surviennent.

stress, offrant la possibilité au patient d'avoir une meilleure qualité de vie et de bien-être (Hillert et al. 2002b).

Au total, ces trois études ont procédé à une application correcte des thérapies comportementales et cognitives et ont utilisé des critères d'évaluation cliniques, psychométriques et / ou biochimiques acceptables, mais différents selon les études. De plus, elles ont porté sur un petit nombre de sujets, respectivement 17 personnes réparties en deux groupes (9 traitées et 8 témoins en intentionnalité de traitement) dans l'étude d'Andersson et al. (1996), 22 personnes (10 traitées et 12 témoins en intentionnalité de traitement) dans l'étude de Hillert et al. (1998) et 22 personnes réparties en 4 groupes dans l'étude de Hillert L. et al. (2002b). Il n'est donc pas surprenant que des résultats différents aient été obtenus : réduction du degré de souffrance lié à l'EHS, réduction de la sévérité des symptômes, réduction du handicap ou réduction du nombre de personnes se déclarant EHS. Cependant, le fait que ces résultats aient atteint le seuil de significativité leur confère une crédibilité.

Des conclusions comparables ont été formulées par les trois revues qui ont analysé ces trois articles. Irvine (2005) a estimé que les TCC avaient obtenu « *un succès limité* » chez les personnes se déclarant EHS (Irvine 2005b). Pour Crasson (2005), « *des publications tendent à démontrer l'efficacité des thérapies cognitivo-comportementales au niveau du handicap perçu et du degré d'hypersensibilité* » (Crasson 2005). Enfin, Rubin et al. (2006) ont conclu que ces trois études n'étaient pas comparables entre elles du fait de leurs grandes hétérogénéités méthodologiques, apportaient des résultats variables, que « *les thérapies comportementales et cognitives étaient bénéfiques pour certains patients se déclarant EHS, mais pas pour tous* ».

Une information complémentaire, mais indirecte, sur ces thérapies a été fournie par une enquête sur les symptômes, les sources d'exposition, et l'efficacité des différents types de traitements médicaux conventionnels et non conventionnels (Hagström, Auranen, and Ekman 2013). Dans cette étude, la psychothérapie, sans autre précision, n'a été jugée efficace que par une personne sur les 38 qui l'ont utilisée (2,6 %) alors que d'autres mesures ont donné des résultats nettement plus satisfaisants (cf. § 8.1.3 ci-après).

8.1.3 Autres données sur les traitements de l'EHS

Hagström et al. (2013) ont eu l'originalité d'interroger des personnes se déclarant EHS, non seulement sur leurs symptômes (cf. § 6.1.1.1) et sur les sources d'exposition incriminées dans l'apparition de leurs symptômes (§ 3.3), mais aussi sur l'efficacité des divers traitements conventionnels et non conventionnels auxquels ils ont eu recours.

Cette enquête a été faite à l'aide d'un questionnaire adressé par voie postale à 395 personnes se déclarant EHS. La méthodologie de l'étude et les résultats concernant les symptômes sont exposés au § 6.1.1.1. Pour ce qui est des traitements, le taux de réponse n'a été que de 39,7 % (n = 157). Les participants avaient à répondre à des questions sur les traitements conventionnels auxquels ils auraient pu avoir recours (psychothérapie, médicaments, exérèse d'amalgame dentaire, changements diététiques, vitamine B12 et autre suppléments, augmentation de l'exercice physique) et sur les traitements non conventionnels (suppléments diététiques naturels, solarium, acupuncture, chiropraxie/naprapathie/ostéopathie, recours à un rebouteux, physiothérapie, homéopathie, réflexologie, shiatsu). Pour chacune de ces possibilités, ils devaient dire s'ils l'avaient utilisé et, le cas échéant, si elle les avait « aidés considérablement », « aidés quelque peu », « pas du tout » ou si elle avait « aggravé la situation ». Ils avaient aussi à répondre à une question ouverte sur les actions qu'ils avaient entreprises et qui avaient conduit à une récupération partielle ou totale de leur état de santé. Les principaux résultats ont été les suivants :

- 154 personnes ont essayé plusieurs traitements de leurs symptômes, avec un nombre moyen de traitements de 5,4 par personne ;
- d'après les personnes se déclarant EHS, les meilleurs traitements auraient été les changements diététiques (69,4 %), les suppléments nutritionnels (67,8 %), l'augmentation de l'exercice physique (61,4 %) et les traitements physiques du corps, à savoir le *shiatsu*

- (64,3 %), le recours à un rebouteux (63,0 %), la chiropraxie/naprapathie/ostéopathie (48,1 %) et la réflexologie (45,9 %) ;
- d'après les personnes se déclarant EHS, les traitements les moins efficaces auraient été les psychothérapies (2,6 %) et le solarium (0,0 %). Les médicaments conventionnels ont été considérés inutiles (95,8 %) voire néfastes (4,2 %) pour traiter les symptômes de l'EHS (48 patients les ont essayés) ;
 - à la question ouverte, 75,8 % des 119 sujets ont répondu que la réduction ou l'évitement des expositions aux champs électromagnétiques avaient contribué à une récupération partielle ou complète.

Ces résultats corroborent l'expérience professionnelle du Dr Choukroun, qui a rapporté l'abondance de l'usage et du mésusage de compléments diététiques chez les personnes se déclarant EHS qui la consultent [audition Dr Choukroun]. Toutefois, pour aussi intéressants qu'ils soient, car il est toujours important de connaître le vécu des patients, ces résultats ne sauraient avoir la valeur de ceux d'un essai thérapeutique. Il ne faut pas oublier qu'il s'agit ici des réponses à un questionnaire envoyé par la poste et dont la plupart des questions étaient fermées. De plus, le taux de réponses n'a été que de 39,7 %. Néanmoins, ces résultats peuvent contribuer utilement aux choix des modalités thérapeutiques faisant l'objet d'essais thérapeutiques. En attendant que de tels essais soient réalisés, ils peuvent aussi aider les praticiens qui prennent en charge des personnes se déclarant EHS.

Au Pays-Bas, une étude de provocation récente a montré que dans les 4 mois qui avaient suivi le test au domicile de personnes se déclarant EHS, la certitude des personnes concernant leur capacité à réagir dans les minutes qui suivaient l'exposition aux champs électromagnétiques avait décru, ainsi que leurs symptômes (van Moorselaar *et al.* 2017) (cf. analyse de l'article au § 6.2.1.1).

Les résultats semblent indiquer que certains participants auraient tiré profit de cette méthode individualisée. Il s'agit d'une approche innovante pouvant aider les personnes se déclarant EHS réagissant en peu de temps à une exposition aux champs électromagnétiques selon leurs propres indications. Il pourrait donc être utile de déterminer si de tels tests individualisés sont appropriés à long terme et quels types de personnes concernées pourraient en tirer le plus de profit. Cette étude donne des pistes pour une nouvelle approche du traitement de l'EHS.

8.1.4 Synthèse et discussion sur les traitements de l'EHS

Plusieurs articles suggèrent que les thérapies comportementales et cognitives pourraient contribuer au traitement des symptômes décrits par les personnes se déclarant EHS. Toutefois, aucun autre traitement de l'EHS n'a été validé jusqu'à présent.

À noter que des membres du Comité de dialogue « Radiofréquences et santé » de l'Anses ont demandé des informations sur l'utilisation de psychothérapies autres que les TCC, à savoir l'EMDR (*Eye Movement Desensitization and Reprocessing*) et l'EFT (*Emotional Freedom Technique*), dans l'EHS (cf. Encadré 11). Il s'agit de deux thérapies corporelles de conception, développement et application purement empiriques.

Encadré 11 : l'EMDR (Eye Movement Desensitization and Reprocessing) et l'EFT (Emotional Freedom Technique)

L'EMDR consiste à faire exécuter aux patients des mouvements oculaires latéraux. Sur la base de deux méta-analyses (Davidson and Parker 2001, Van Etten and Taylor 1998) de qualité, elle a été reconnue par l'Inserm (2004) comme étant, avec la TCC, la psychothérapie la plus efficace dans le traitement du stress post-traumatique, les psychothérapies étant par ailleurs plus efficaces que les chimiothérapies dans cette affection (Inserm 2004). Elle est parfois considérée comme une simple variante de la TCC.

L'EFT est une technique de stimulation corporelle comparable à l'acupuncture, qui consiste, avec les doigts, à stimuler des quinze points, situés sur le visage, la tête, le torse et les mains. Cette stimulation est précédée de l'identification d'un problème à traiter et de la verbalisation des émotions liées à la situation générant ce problème. Elle est accompagnée par la répétition de phrases destinées à traiter le problème et

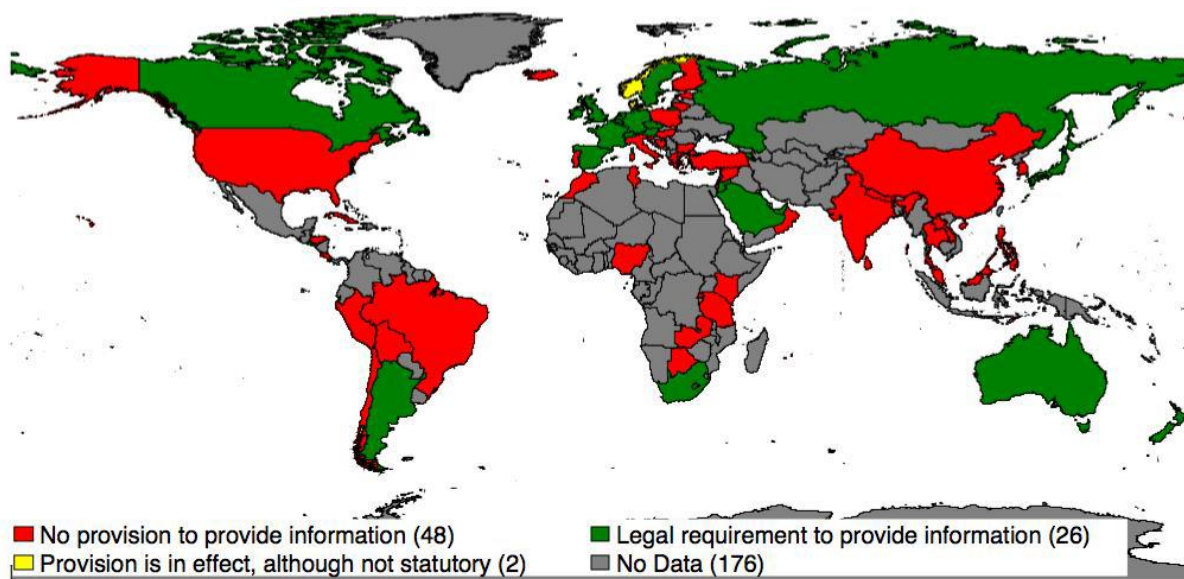
à réaffirmer la confiance du patient en ses propres valeurs. Bien qu'elle soit relativement répandue en raison de la facilité de son autoadministration, elle n'a pas encore fait l'objet de validation scientifique.

À la connaissance du groupe de travail, aucune de ces deux techniques n'a fait l'objet de publication sur son application à des personnes se déclarant EHS. Si l'application de la première (EMDR) peut être envisagée dans le cas du traitement de l'EHS, l'application de la seconde (EFT) semble prématurée, car elle n'est pas validée scientifiquement.

8.2 Prise en charge des personnes se déclarant EHS à l'étranger par les autorités publiques

8.2.1 Enquête internationale sur l'hypersensibilité aux champs électromagnétiques (EHS) et sa prise en charge

Selon une enquête internationale menée par l'EHESP en 2012²¹⁰ à l'initiative de l'OMS, 28 pays déclaraient avoir pris des dispositions pour répondre aux demandes des personnes se déclarant EHS (cf. Figure 17). Pour onze d'entre eux, il s'agit d'effectuer des mesures d'exposition et de s'assurer du respect des limites d'exposition en vigueur. Certains pays, comme le Danemark, ont déclaré que l'Etat n'avait pas d'obligation à fournir des réponses aux demandes des personnes se déclarant EHS, et que ces réponses relevaient de l'initiative des autorités locales. Dix-neuf pays, parmi lesquels le Canada, la Russie et la Nouvelle-Zélande, ont indiqué apporter des réponses individuelles aux plaintes enregistrées, le cas échéant accompagnées d'informations sur les moyens de réduire les expositions aux champs électromagnétiques.



Source : EHESP, 2014.

Figure 17 : dispositions prises pour fournir une réponse aux personnes se déclarant EHS

Afin de comprendre comment la question de l'EHS est traitée en dehors de la France, une enquête internationale, complémentaire à celle de l'EHESP menée en 2012, a été lancée le 4 juin 2015 par l'Anses auprès d'une trentaine de pays (dont ceux ayant répondu à l'enquête de l'EHESP).

²¹⁰ « Pratiques internationales de gestion des risques possiblement liés aux usages des ondes radiofréquences ». EHESP. Convention de recherche-développement N° 2013- CRD-04. Février 2014.

8.2.1.1 Présentation de l'enquête de l'Anses

L'enquête de l'Anses a ciblé, à travers les contacts de l'Agence, les personnes impliquées dans la gestion ou l'évaluation du risque lié aux radiofréquences, que ce soit dans les institutions sanitaires publiques ou les ministères en charge de la santé. Le questionnaire se divisait en cinq catégories de questions portant respectivement sur :

1. le niveau de préoccupation que constituait la question de l'EHS ;
2. la population concernée par ces troubles ;
3. les éventuelles dispositions mises en place par les autorités compétentes ;
4. l'impact de ces dispositions le cas échéant ;
5. les projets de recherche en cours et prioritaires.

Le détail du courrier est présenté en Annexe 15. Dix-neuf pays ont répondu au questionnaire (la dernière réponse est arrivée le 26 août 2015) : Afrique du Sud, Allemagne, Australie, Autriche, Belgique, Canada, Corée du Sud, Danemark, États-Unis, Finlande, Israël, Japon, Luxembourg, Norvège, Nouvelle-Zélande, Pays-Bas, Suède, Suisse, Royaume-Uni.

8.2.1.2 Résultats de l'enquête

Parmi les dix-neuf interlocuteurs ayant répondu à l'enquête, quatre institutions ont indiqué qu'elles n'avaient pas de données ni de travail en cours sur l'EHS (la Direction de la santé du Danemark, le Centre pour le contrôle et la prévention des maladies aux États-Unis, le Conseil de la santé des Pays-Bas, le ministère de la santé du Luxembourg. Cette dernière institution a mentionné que ce n'était un sujet préoccupant que pour les organisations non-gouvernementales.

Quatre autres institutions ont répondu que l'EHS n'était pas vraiment un sujet de préoccupation dans leur pays (le ministère de la santé d'Afrique du Sud, l'université nationale de *Chungnam* en Corée du Sud, l'agence de santé publique de Suède, et le ministère de la santé de Nouvelle Zélande).

Parmi les onze pays restant ayant renseigné le questionnaire, seuls quatre interlocuteurs ont déclaré que l'EHS était un sujet de préoccupation dans leur pays, il s'agit du Japon (Centre d'information sur les champs électromagnétiques du Japon), de la Finlande (Autorité de radioprotection et de sûreté nucléaire), d'Israël (Société israélienne de radioprotection) et du Canada (Santé Canada). D'autres, parmi les onze pays, se sont montrés plus réservés, déclarant que le sujet était « ponctuel », « à bas bruit » ou que ce n'était « pas un gros problème » : en Allemagne (Office Fédéral Allemand de Protection contre les rayonnements (*BfS*)), en Australie (Agence australienne de radioprotection et de sûreté nucléaire (*ARPANSA*)), en Autriche (ministère de la santé fédéral), en Belgique (Institut scientifique de santé publique), en Norvège (Agence norvégienne de radioprotection), en Suisse (Office fédéral de la santé publique (*OFSP*)) et au Royaume-Uni (Agence nationale de santé publique).

Quelques pays disposent de données relatives à la population se déclarant EHS (cf. aussi § 3.5 sur la prévalence de l'EHS) :

- le Japon évoque les données de l'article de Furubayashi *et al.* (2009), à savoir : 1,2 % des personnes se déclarant EHS ;
- l'Autriche dispose des données des études de Leitgeb *et al.*. Dans la première, de 1995, 2 % des personnes interrogées se déclaraient sensibles à l'électricité ou aux champs électromagnétiques (Leitgeb *et al.*, 1995). Dans la seconde, de 2005, 5 % des personnes interrogées se déclaraient EHS (Leitgeb *et al.*, 2005) ;
- la Belgique ne dispose pas de données chiffrées, mais le Conseil supérieur de la santé (CSS), dans son avis n°8927 (1^{er} octobre 2014), a observé que, d'une manière générale : « *Le nombre de personnes souffrant d'IEI-CEM a présenté une tendance à la hausse plutôt qu'à la baisse au cours des dernières années, y compris en Belgique* ».

- il n'existe pas d'étude s'intéressant à la prévalence de l'EHS en Australie. Cependant, l'Arpansa a établi un registre²¹¹ des plaintes relatives aux champs électromagnétiques où les personnes peuvent déclarer les problèmes de santé qu'elles attribuent à leur exposition aux champs électromagnétiques. Depuis 2003, 146 déclarations ont été enregistrées, dont 22 de personnes se déclarant EHS ;
- la Suisse dispose des résultats d'une enquête téléphonique²¹² sur un échantillon de 2 048 personnes choisies au hasard, qui fait état de 5 % (IC : 4-6 %) de personnes attribuant des problèmes de santé à une exposition aux rayonnements non ionisants ;
- en Allemagne, l'enquête annuelle de 2013²¹³ réalisée par le *German Mobile Telecommunication Research Programme* (DMF) (« *The general public's fears and anxieties with regard to the possible risks of high frequency electromagnetic fields of mobile telecom* ») a révélé une proportion de 9 à 10 % de personnes déclarant ressentir des effets liés aux radiofréquences. Une étude complémentaire de 2006 (« *supplementary information about EHS* »²¹⁴) a permis de déterminer que 1 à 2 % des personnes interrogées se définissaient elles-mêmes comme EHS ;
- au Royaume-Uni, les données ne sont pas collectées via le système médical. Cependant, des publications scientifiques ont permis de documenter le sujet à l'échelle nationale (Irvine 2005b, Eltiti *et al.* 2007b, Fox E. 2007).

Parmi les pays qui n'ont pas de données officielles, certains se basent sur le nombre d'adhérents aux associations de personnes se déclarant EHS :

- en Finlande, la principale association (*Sähköherkät ry*) compte 400 adhérents (pour une population totale d'environ 5,5 millions d'habitants) ;
- en Norvège, la *Norwegian association for electrosensitive* (EHS) comptait 670 membres en 2014 (pour une population totale d'environ 5,2 millions d'habitants).

Les dispositions spécifiques mises en place pour la prise en charge des personnes se déclarant EHS sont rares et varient en fonction des pays ; seuls trois interlocuteurs citent des initiatives particulières :

- en Belgique, le domaine d'action des SAMI « Services d'analyse des milieux intérieurs » s'est progressivement élargi aux radiofréquences et basses fréquences. Ces services sont chargés, sur demande du médecin traitant, de se rendre au domicile des patients pour effectuer des mesures environnementales et apporter des conseils pour réduire leur exposition aux différents polluants ;
- en Autriche, la chambre des médecins propose un protocole sous forme de notice à suivre pour les personnes se déclarant EHS. Cette notice permet au praticien d'offrir des conseils pour réduire l'exposition de la personne dans son environnement quotidien. Si les symptômes persistent, des examens supplémentaires sont alors recommandés (*cf.* exemple développé au § 3.4.1.3) ;
- au Royaume-Uni, comme dans les autres pays, le statut d'EHS n'est pas reconnu ; cependant, certains symptômes, dont les personnes se déclarant EHS font l'objet, peuvent rejoindre les

²¹¹ <http://www.arpansa.gov.au/RadiationProtection/emr/index.cfm>.

²¹² L'étude (en allemand) a été menée par l'université de Berne sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV). Le résumé anglais de l'étude a été publié par l'OMS (2004). *Electrical Hypersensitivity Workshop*. Prague, 25-27 October 2004. *Book of Abstracts*. World Health Organization, Geneva.

²¹³ <http://doris.bfs.de/jspui/handle/urn:nbn:de:0221-2014022811170>.

²¹⁴ http://www.emf-forschungsprogramm.de/forschung/risikokommunikation/risikokommunikation_abges/risiko_025_AB.pdf.

critères du handicap ; des aides, sur le plan social notamment, peuvent alors être obtenues. Il n'y a, dans ce cas, aucun besoin d'identifier la cause des troubles.

Seule la Suisse évoque l'exemple d'un bâtiment en bordure de la ville de Zurich qui a été construit spécifiquement pour des personnes SIOC, et qui convient aussi aux personnes se déclarant EHS. Cette initiative relève d'une association privée²¹⁵ (cf. exemple développé au § 8.3.2.2). Aucune autre initiative de zone blanche ou d'espace dédié n'a été rapporté par les pays répondant au questionnaire (en dehors d'initiatives privées : chambres d'hôtels en Autriche, chambres d'hôpitaux en Suède).

Aucun des pays consultés ne reconnaît l'EHS comme une maladie à part entière, dont la causalité aurait été identifiée.

8.2.1.3 Principales limites de l'enquête

L'enquête réalisée par l'Anses est strictement informative. Elle ne cherche pas à être exhaustive, sachant qu'il n'y a d'information centralisée sur le sujet de l'EHS dans aucun pays. De plus, les personnes contactées n'avaient pas les mêmes fonctions institutionnelles dans leurs pays respectifs (institutions sanitaires, ministère de la santé ou personne impliquée dans la gestion ou l'évaluation du risque lié aux radiofréquences). Aussi, les réponses enregistrées dépendent-elles de l'interlocuteur, qui peut n'avoir qu'une vision partielle des initiatives (locales, nationales) mises en œuvre dans son pays.

8.2.2 Exemple de prise en charge individualisée : le réseau de médecine environnementale en Suisse

8.2.2.1 Description du réseau de médecine environnementale en Suisse et de l'étude menée sur les premiers patients inclus dans le réseau

À l'interface entre la recherche et la médecine, le projet pilote de réseau de médecine environnementale (*Umweltmedizinisches Beratungsnetzwerk*), lancé en 2008 en Suisse par les « médecins en faveur de l'environnement », témoigne de la volonté de définir une prise en charge adaptée aux personnes se déclarant EHS par une approche expérimentale. Le projet s'articule autour d'une plateforme téléphonique, en charge de recueillir les appels de toute personne ayant des questions relatives à la santé et l'environnement, et d'un réseau de médecins suisses, vers lequel les patients sont dirigés lorsque leurs questions ne peuvent pas être traitées par téléphone ou qu'une consultation est jugée nécessaire.

Une étude (Röösli *et al.* 2011) a été menée sur les patients inclus dans le réseau entre le 1^{er} janvier 2008 et le 30 janvier 2010, pour évaluer les besoins, la faisabilité et les bénéfices perçus du projet. Plusieurs questionnaires ont jalonné le parcours du patient. Après la prise de contact avec la plateforme, si le patient était dirigé vers le réseau de médecins, deux questionnaires lui étaient proposés pour évaluer sa situation initiale (état des symptômes et expositions environnementales supposées liées aux troubles). Le patient rencontrait ensuite un des médecins du réseau et ils décidaient ensemble des étapes ou mesures à entreprendre pour améliorer son état de santé. Au sortir de cette première consultation, patients et médecins remplissaient un questionnaire de satisfaction. Les étapes de la prise en charge étaient décidées individuellement, selon les besoins du patient et l'avis du médecin (consultation de spécialiste, médecine alternative, dosimétrie, mesures *in situ*, changements dans les lieux de vie ou évolution des habitudes de vie, etc.). Après un an, un nouveau questionnaire était proposé au patient, permettant de réévaluer son état de santé et de l'interroger sur les bénéfices ressentis.

8.2.2.2 Résultats de l'étude sur les premiers patients inclus dans le réseau

Les 255 appels reçus par la plateforme ont confirmé le besoin d'informations ou de conseils sur le sujet santé-environnement dans la population générale. L'opinion des patients suivis était très

²¹⁵ <http://www.gesundes-wohnen-mcs.ch/>

majoritairement pour le maintien de la plateforme, ce qui attestait de l'intérêt perçu d'une telle structure d'informations, simple et directe.

L'évaluation par les médecins et organisateurs de la plateforme témoignait de la faisabilité du projet, tout en précisant son caractère chronophage. La dimension pluridisciplinaire donnée au réseau a été particulièrement appréciée.

Pour les 36 patients inclus dans l'étude (Röösli *et al.* 2011), les résultats ont été les suivants :

- 31 ont attribué leurs troubles aux ondes électromagnétiques (le terme EHS n'est pas utilisé dans l'étude) ;
- la santé physique et mentale des participants a été évaluée à l'aide de scores (*Short-Form-12*²¹⁶). Les scores de santé physique des patients étaient légèrement inférieurs aux scores de références (études menées sur des échantillons de population suisse ou européenne, en bonne santé) ; la moitié des patients estimait avoir un bon état de santé, mais presque tous considéraient que la maladie dégradait leur qualité de vie. Les scores de santé mentale étaient également légèrement inférieurs aux scores de référence utilisés dans l'étude ;
- préoccupés par la question des champs électromagnétiques dans leur environnement, la majorité des patients ont déjà cherché à réduire leur exposition.

Au sortir de la première consultation, médecins et patients ont témoigné de l'établissement d'un bon rapport de confiance. Les patients se sont déclarés satisfaits des étapes de prise en charge définies. Les médecins étaient partagés quant au rôle que joue l'environnement dans l'explication des troubles.

Sur ces 31 patients, 19 ont répondu au second questionnaire un an après :

- la majorité des patients a alors estimé que le réseau les a moins aidés qu'espéré ;
- en moyenne, les résultats sur l'évolution des indicateurs de santé n'ont pas montré d'amélioration significative, mais une amélioration de l'état de santé a été observée chez certains ;
- plus d'un tiers des sujets a affirmé mieux gérer ses troubles.

Les médecins du réseau ont conclu que les cas des patients étaient en général complexes et que la cause des troubles ne pouvait pas être clairement identifiée (maladies plurifactorielles). Ils ont distingué deux groupes de patients de taille à peu près égale : ceux pour lesquels une relation entre l'apparition des troubles et l'exposition au facteur environnemental supposé ne pouvait pas être exclue (exposition supérieure à la moyenne, empêchant de rejeter l'hypothèse d'une relation) et ceux pour lesquels cette relation ne semblait pas évidente (autres causes probables, comorbidités).

8.2.2.3 Réflexions du réseau de médecins suisses sur la question de l'origine des troubles des patients se déclarant EHS

D'après le rapport de Röösli *et al.* (2011), après l'année de prise en charge par le réseau, une large majorité des sujets semblait avoir gardé le même avis quant à l'origine de ses troubles. Selon les médecins, chez un certain nombre de personnes, l'histoire de la maladie semblait connectée à la fixation opérée sur les facteurs environnementaux. Aussi, au cours de l'étude, les médecins ont-ils mené une réflexion avec certains patients sur la façon de gérer la question de la cause des troubles ressentis. De fait, dans le contexte d'incertitude scientifique, l'hypothèse de causalité n'a jamais pu être totalement écartée. Cependant, dans le cadre de leur expérience, les médecins ont constaté que laisser le doute s'instaurer sur la question semblait renforcer l'attention que le patient y prête, et entraîner plus de dommages que de bénéfices au long terme. C'était le cas notamment

²¹⁶ Le *Short-Form-12* (SF12) est un questionnaire permettant de calculer un score de qualité de vie mentale et sociale et un score de qualité de vie physique. Il s'agit d'un questionnaire composé de 12 questions réalisé à partir du SF-36.

si le patient était sensible à de très bas niveaux d'exposition dont il ne pourrait jamais totalement supprimer la source. Les médecins du réseau ont avancé l'idée que nier (volontairement, même sans certitude) la causalité pourrait, dans certains cas, soulager les patients.

Mettre l'accent sur la causalité semblerait, selon les auteurs du rapport, être plutôt un frein à un traitement efficace, notamment lorsque des mesures ont été réalisées. Si la réalisation de mesures a été appréciée de manière générale, car les patients y voyaient une occasion d'objectiver leurs troubles, les médecins ont observé que ces mesures pouvaient avoir des conséquences négatives sur certains patients. En effet, il n'est pas toujours possible d'éliminer la source d'exposition. En outre, l'élimination de la source ne garantit pas la disparition des symptômes, et il existe un risque de fixation du patient sur une ou des sources jusqu'alors inconnues, mesurées au domicile. Enfin, le patient ne faisait pas toujours confiance aux mesures et ne les interprétait pas en tenant compte des valeurs limites réglementaires. Un travail de discussion avec le patient semblait donc nécessaire en amont de tout protocole de mesures.

Le traitement encouragé par les médecins du réseau a repose donc davantage sur la consolidation des compétences du patient, et non sur les hypothèses de causalité qui, au contraire, pourraient mener à une chronicisation des troubles.

Dans une réflexion ultérieure sur l'évolution de la plateforme, les auteurs ont déclaré que l'objectif du réseau était de pouvoir assurer une prise en charge précoce des personnes se déclarant sensibles aux ondes électromagnétiques, et ont formulé le souhait d'intégrer le médecin de famille dans la démarche. Ce dernier enverrait le patient vers les médecins du réseau si des examens particuliers devaient être réalisés, et assurerait lui-même le suivi à long terme. La plateforme resterait un soutien potentiel en cas de questions du médecin traitant (Steiner *et al.* 2013).

8.3 Les stratégies d'évitement utilisées

8.3.1 Dispositifs de protection contre les champs électromagnétiques

Afin d'essayer de réduire leur exposition aux champs électromagnétiques, la plupart des personnes se déclarant EHS réalisent différents aménagements de leur lieu de vie ou de leur tenue vestimentaire (Hagström *et al.* 2012). Cette tendance est associée à l'apparition de produits variés sur le marché destinés à :

- Diminuer les expositions à la source :
 - achat de téléphones filaires pour remplacer son propre téléphone DECT et celui de ses voisins ;
 - utilisation du disjoncteur pour atténuer l'exposition aux basses fréquences au domicile la nuit par exemple ;
- blinder les lieux de vie ;
 - utilisation de peintures anti-ondes sur certains murs de l'habitation ;
 - calfeutrage des murs et des fenêtres avec du film pour vitre, du grillage, du papier aluminium ou des couvertures de survie ;
 - blindage des câbles électriques ;
 - installation d'une cage de Faraday (dans la chambre généralement) ;
- servir de protections individuelles anti-ondes : vêtements et accessoires (lunettes, casquettes, etc).

Ces produits ont pour point commun d'être présentés, de manière plus ou moins argumentée, comme des dispositifs qui procureraient aux utilisateurs de ces technologies une protection contre les champs électromagnétiques en réduisant les expositions (et en particulier celle des émetteurs de la téléphonie mobile).

L'offre de dispositifs de protection est hétéroclite, et ces produits sont souvent vendus à des prix élevés (environ 70 € pour un bandeau de grossesse, 250 € pour une veste à capuche, 200 € le pot de peinture anti-ondes de cinq litres, etc.).

À l'occasion de son rapport publié en 2013, l'Anses avait fait tester 13 dispositifs « anti-ondes » présentés comme réduisant les émissions des téléphones (*patches* à coller sur le téléphone,

dispositifs à placer à proximité de l'antenne du téléphone et étuis de protection dans lesquels le téléphone mobile est placé). Les mesures effectuées n'avaient pas permis d'établir l'efficacité de ces dispositifs (Anses, 2013).

À l'occasion du présent rapport sur l'EHS, l'Anses a pris l'initiative de solliciter le CSTB (réf : n° 2015-CRD-07) pour évaluer l'efficacité des dispositifs de protections mis en œuvre par les personnes se déclarant EHS pour réduire leur exposition aux champs électromagnétiques (vêtements, « moustiquaires », peintures, etc.) (CSTB 2015).

Précisons toutefois que cette étude est une évaluation de l'efficacité de blindage de divers matériaux dans des conditions de laboratoire ; ses résultats ne peuvent en aucun cas être appliqués directement à un bâtiment ou un individu, sans une analyse préalable des conditions d'installation.

8.3.1.1 Protections utilisées par les personnes se déclarant EHS

Les moyens mis en œuvre par les personnes se déclarant EHS pour réduire leur exposition aux ondes sont nombreux. Pour les recenser, la méthodologie a consisté à croiser un recueil de témoignages et une étude du marché :

- un appel à témoignages a été lancé par l'Anses et le CSTB dans la communauté se déclarant EHS entre le 28 avril et le 18 mai 2015. Une vingtaine de témoignages ont été recueillis par voies électronique, postale, et téléphonique ;
- en complément, une étude de marché a été réalisée entre mai et juillet 2015 par le CSTB, afin de mieux comprendre l'offre commerciale en France. La démarche a consisté à adopter la posture d'un « acheteur éclairé » cherchant à se munir de dispositifs dans les meilleures conditions. À ce titre, des informations publiques sur les dispositifs, les fabricants, les distributeurs, les laboratoires d'essai, et les normes de mesure ont été relevées et comparées.

Ainsi, un panorama des dispositifs et des acteurs du marché a été réalisé. Les dispositifs identifiés (une centaine au total) ont été classés en trois groupes :

1. les dispositifs conditionnés en rouleau (56 références), classés selon leur usage :
 - a. les *tissus* servant à la fabrication de casquettes, caleçons, plaids, bandeaux de maternité, etc. ;
 - b. les *voilages* servant à la confection de baldaquins, de rideaux, de séparateurs de pièce, etc. ;
 - c. les dispositifs de *construction* (sol, papier peint, literie, et moustiquaire), destinés au blindage des bâtiments (ils peuvent être agrafés, collés, placés sous un papier peint, etc.).
2. les peintures (11 références) ;
3. les « autres » dispositifs (environ 30 références) (produits servant à fixer ou à connecter d'autres dispositifs tels que colles ou vernis, films transparents destinés au blindage des parois vitrées, feuilles d'aluminium, couvertures de survie, etc.).

Le champ de l'étude a été restreint, d'une part aux dispositifs dont le mode de fonctionnement s'appuyait sur un effet de blindage (atténuation) des champs électromagnétiques radiofréquences, et d'autre part, pour les textiles, aux produits semi-finis.

8.3.1.2 Efficacité des dispositifs de protection contre les champs électromagnétiques utilisés par les personnes se déclarant EHS

La méthode de mesure du *coefficient d'affaiblissement électromagnétique en champ diffus* (représentative d'une exposition lointaine de type antenne-relais, modules Wi-Fi, etc.) en salles réverbérantes couplées a été développée au CSTB à partir des normes utilisées pour caractériser

l'affaiblissement acoustique des matériaux du bâtiment (normes NF EN ISO 10140-2 et 717-1²¹⁷). Cette méthode est bien adaptée aux matériaux du bâtiment (gros œuvre, revêtements, vitrages, matériaux inhomogènes), aux revêtements et textiles et à la caractérisation de l'exposition à des champs électromagnétiques radiofréquences tels que l'on peut les rencontrer *in situ*. La bande de fréquences d'analyse est limitée aux domaines radiofréquences entre 700 MHz et 6 GHz.

- Mesures du coefficient d'atténuation de plusieurs matériaux en champ diffus en conditions « réalistes »

Les matériaux testés (textiles, tissus et peintures dédiés à réduire l'exposition aux champs électromagnétiques) apportaient une réelle atténuation vis-à-vis des champs électromagnétiques radiofréquences (cf. Figure 18), par rapport aux matériaux classiques du bâtiment. Les matériaux textiles et peinture développés spécifiquement pour le blindage des champs électromagnétiques ont une atténuation comprise entre 30 et 70 dB, soit respectivement 97 à 99,9 % du niveau de champ électrique.

Des produits métallisés alternatifs (produits dont l'usage initial est détourné : papier aluminium, couverture de survie, isolants thermiques minces, grillages métalliques) ont également été testés, suite au retour d'expérience de personnes se déclarant EHS. Les produits à base de couches d'aluminium, métal de bonne conductivité électrique tels que couverture de survie, papier aluminium, isolant thermique multicouches atténuaient entre 20 et 40 dB, soit 90 à 99 % du niveau de champ électrique.

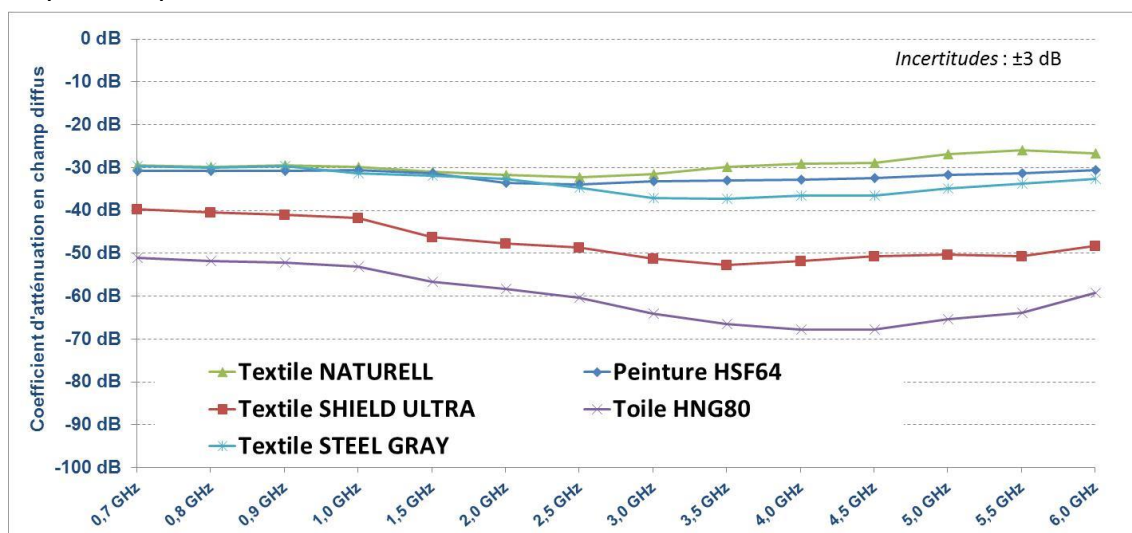


Figure 18 : coefficient d'atténuation en champ diffus – exemple de résultats de mesures

- Influence du nombre de couches d'un matériau

La multiplication du nombre de couches apportait une nette augmentation du coefficient d'atténuation sur l'ensemble des matériaux testés : l'atténuation augmentait d'environ 5 à 10 dB, en fonction des matériaux.

- Influence du lavage des tissus

Les résultats ont montré une dégradation de l'atténuation du textile d'environ 2 à 8 dB suite à cinq lavages. Il est possible que des lavages successifs aient un effet sur la structure interne des fibres métallisées (cuivre, argent, etc.) et donc sur le coefficient d'atténuation.

²¹⁷ ISO 10140-2:2010 : Mesurage en laboratoire de l'isolation acoustique des éléments de construction - Partie 2: Mesurage de l'isolation au bruit aérien.

ISO 717-1:2013 : Évaluation de l'isolement acoustique des immeubles et des éléments de construction - Partie 1: Isolement aux bruits aériens.

- Influence de la continuité ou non du blindage

Sur le terrain, une mise en œuvre correcte de ces solutions de blindage et protection est nécessaire. Pour les bandes de fréquences testées, de petites ouvertures peuvent rapidement dégrader le coefficient d'atténuation. À 3 GHz, la longueur d'onde est de 10 cm, de sorte que tout défaut (fente, ouverture, etc.) du même ordre de grandeur constitue une voie de pénétration potentielle pour les champs électromagnétiques. Les câbles, blindés ou non, sont également des vecteurs privilégiés de conduction des ondes à l'intérieur d'un local faradisé s'ils ne sont pas filtrés et raccordés mécaniquement au blindage de l'enceinte. Une protection efficace suppose le traitement complet d'un local, comme cela est réalisé dans des espaces blindés comme une chambre réverbérante ou une cage de faraday. Il faut donc retenir que les ondes « hautes fréquences » s'infiltreront partout dès lors que le moindre défaut offre une voie de pénétration.

En conséquence, l'aménagement d'un local ou d'un logement suppose une analyse technique préalable des émetteurs concernés sur le terrain (localisation, puissances, bandes de fréquences), des possibles discontinuités de blindage et nécessite de dissocier le domaine des radiofréquences de celui des champs électromagnétiques basses fréquences autour du réseau 50 Hz.

Dans le cas où ces matériaux sont utilisés sur la personne (casquettes, vêtements, couverture, etc.) en ne couvrant qu'une partie du corps, l'efficacité d'atténuation est difficile à estimer. Il faudrait effectuer des mesures et/ou des simulations numériques de débit d'absorption spécifique, avec et sans protection, sur des configurations réelles d'utilisation. Cela resterait indicatif par rapport à la diversité des configurations rencontrées.

- Fréquences des faisceaux hertziens

Des essais sur une bande de fréquences plus large ont été réalisés sur plusieurs matériaux, jusqu'à la fréquence de 20 GHz. Ces essais permettent de couvrir certaines bandes utilisées par les liaisons par faisceaux hertziens : 1,4 / 6 / 8 / 11 / 13 / 18 GHz.

Des comportements différents ont été observés en fonction des matériaux. Pour les composants du bâtiment de grande épaisseur (pierre, béton), l'absorption augmentait avec la fréquence et l'atténuation gagne plus de 25 dB à 20 GHz. Dans le cas de grillages métalliques, l'atténuation diminuait avec la fréquence puisqu'elle est directement liée au ratio entre la longueur d'onde et la taille de maille (à 20 GHz la longueur d'onde est de 1,5 cm).

- Problématique de la mise à la terre

Les résultats des essais montrent que la mise à la terre du matériau n'a pas d'impact sur le coefficient d'atténuation mesuré dans le domaine des radiofréquences (cf. Figure 19). Cet aspect relève d'une problématique plus générale de sécurité électrique.

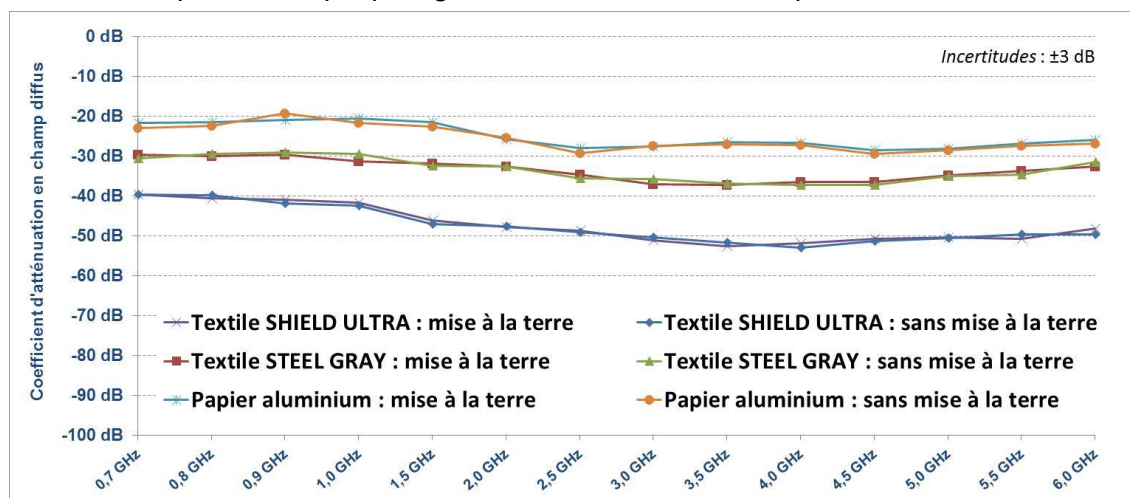


Figure 19 : coefficient d'atténuation en champ diffus – résultats des essais : influence de la mise à la terre

Cette problématique de mise à la terre est abordée fréquemment dans les témoignages reçus de personnes se déclarant EHS. Cela sort du cadre de cette étude limitée aux radiofréquences. Cependant, les essais réalisés ici permettent d'illustrer la confusion qui existe entre les basses fréquences, autour de la fréquence 50 Hz du réseau électrique et les radiofréquences. Dans ces domaines de fréquences aussi éloignés, les phénomènes physiques sont extrêmement différents.

- Réflexions et surexpositions

Dans le cas d'un « blindage » de la pièce de mauvaise qualité, ou présentant des défauts (fentes, ouvertures, trous, etc.), une partie du rayonnement externe va pénétrer à l'intérieur du local. Ce rayonnement va se transformer en une source « interne » qui, en présence d'un revêtement métallisé destiné à atténuer les champs électromagnétiques radiofréquences externes, va générer un grand nombre de réflexions des ondes à l'intérieur de la pièce. Ces réflexions sont alors susceptibles d'augmenter significativement le niveau de champ résultant en des points de « renforcement » de l'exposition.

Dans le cadre des essais, une configuration simple avec un émetteur de type Wi-Fi placé à l'intérieur d'une pièce « blindée » a conduit à une augmentation locale de 20 % du niveau de champ électrique maximum.

8.3.1.3 Conclusion sur les stratégies d'évitement mises en œuvre par les personnes se déclarant EHS

Les matériaux utilisés dans les dispositifs de protection contre les champs électromagnétiques sont « intrinsèquement » efficaces, voire très efficaces, avec des réductions du niveau de champ électromagnétique de 50 à 99 %, mesurées en laboratoire. Toutefois, leur efficacité *in situ* est plus qu'aléatoire si l'installation n'est pas faite dans les règles de l'art (règles de compatibilité électromagnétique), souvent du fait des problèmes de continuité de blindage.

Les résultats montrent même parfois, dans certains cas, des augmentations locales du champ électromagnétique lorsqu'une ouverture ou un trou (compte tenu de la fréquence) laisse passer les ondes et qu'un blindage les retient à l'intérieur de la pièce.

L'utilisation d'un accessoire vestimentaire (casquette, bandeau, etc.) réduit faiblement et très localement l'exposition d'une personne aux champs électromagnétiques. En raison des nombreuses ouvertures, ce type de produit n'est pas suffisant pour réduire efficacement l'exposition globale de la personne et peut augmenter la valeur de l'exposition en périphérie du dispositif.

Pour les « hautes fréquences », le blindage d'un lieu, pour être efficace, doit être complet, pas seulement sur les murs ou les fenêtres, mais aussi du sol au plafond.

La meilleure façon de réduire les niveaux de champs dans un lieu est d'intégrer les dispositifs de réduction lors de la construction (cf. § 8.3.2), mais cela a, bien sûr, un coût non négligeable et nécessite surtout l'implication de professionnels du domaine de la compatibilité électromagnétique (CEM).

Il ressort du recueil de témoignages que la perception de l'efficacité des solutions de protection est fondée sur le ressenti, sans forcément de lien avec les données techniques et scientifiques disponibles. Dans beaucoup de témoignages, les personnes sont toujours en recherche de solutions et remettent en cause l'efficacité des protections qu'elles ont installées.

8.3.2 Les zones blanches et immeubles collectifs dédiés aux personnes se déclarant EHS

8.3.2.1 Les zones blanches ou de faible niveau d'exposition

D'après l'Arcep, une « zone blanche » désigne une partie du territoire non couverte par les réseaux des opérateurs mobiles (téléphonie ou internet). Par extension, le terme de « zone grise » a été créé pour désigner des zones desservies par un unique, voire deux ou trois des quatre opérateurs.

La couverture s'entend comme la possibilité de passer un appel téléphonique et de le maintenir durant une minute, à l'extérieur des bâtiments et en usage piéton.

Il est possible de distinguer deux types de zones blanches :

- les espaces restés naturellement blancs : il s'agit généralement de vastes zones dans lesquelles le développement des réseaux de communication est resté limité en raison de très faibles densités de population, ou pour des raisons stratégiques afin de minimiser les interférences électromagnétiques (recherches scientifiques ou sécurité militaire). Dans d'autres cas, il peut s'agir de zones de tailles limitées, restées blanches du fait de conditions géographiques spécifiques ;
- les espaces que l'on pourrait qualifier de « blanchis », ou protégés dans un environnement lui-même exposé aux champs électromagnétiques. Il en existe quelques rares exemples (habitat protégé en milieu urbain, chambres d'hôpital blindées, etc.) ; il s'agit en général de projets initiés par des associations pour répondre à des demandes spécifiques des personnes se déclarant EHS. Les revendications portent notamment sur la création d'espaces blancs dans les transports en commun, les maternités, les centres commerciaux, etc.

8.3.2.2 Les espaces « blanchis »

En Suisse, « un logement sain pour les SIOC et les personnes se déclarant EHS »

L'association *Wohnbaugenossenschaft Gesundes Wohnen MCS* (Un logement sain pour les SIOC) a été créée en février 2008 en Suisse, avec pour objectif de permettre l'accès à un logement adapté aux personnes atteintes de maladies environnementales. M. Schifferle, SIOC et EHS depuis son enfance est à l'origine de l'association.

La construction d'un premier bâtiment pour les personnes SIOC et personnes se déclarant EHS a été soutenue par la ville de Zurich, qui a accordé un terrain pour la construction du bâtiment. Le site a été choisi pour ses caractéristiques géographiques et environnementales (notamment faibles pollution de l'air et pollution sonore), pour son faible niveau d'exposition aux champs électromagnétiques et aux rayonnements ionisants et selon des critères de faisabilité technique et économique. Le chantier a duré de 2011 à 2013 ; le coût total du projet s'est élevé à près de 5 millions d'euros (Gesundes-Wohnen-MCS 2011).

Le bâtiment comporte 15 appartements de 1 à 3 pièces (sans compter la cuisine) (Gesundes-Wohnen-MCS 2015a).

La structure du bâtiment a été pensée en deux couches concentriques (Gesundes-Wohnen-MCS 2011) : l'entrée dans chaque appartement se fait par un sas situé au niveau du cœur de l'immeuble qui permet de se dépouiller de ses habits pouvant transporter des pollutions de l'environnement extérieur.

L'électricité ne circule que dans le mur entre les 2 couches (en jaune sur la Figure 20), permettant d'alimenter les installations électriques de part et d'autre du mur et notamment la salle de bain, la cuisine, ou éventuellement une salle d'ordinateur, situées dans la couche centrale.

Les murs de façade de l'immeuble ne contiennent quant à eux aucune installation électrique (la surface où l'électricité circule est ainsi minimisée), et isolent les habitants des rayonnements électromagnétiques de l'environnement extérieur. La couche externe du bâtiment est ainsi la moins exposée; on y trouve les pièces à vivre (chambres, salons).

Dans tout le bâtiment, des circuits d'air et systèmes de purification ont été mis en place et les matériaux ont été choisis en prenant en compte la sensibilité aux produits chimiques des résidents. Des tests ont notamment été proposés à un petit échantillon de personnes pour choisir les enduits provoquant le moins de réactions (Kasser and Savi 2013).

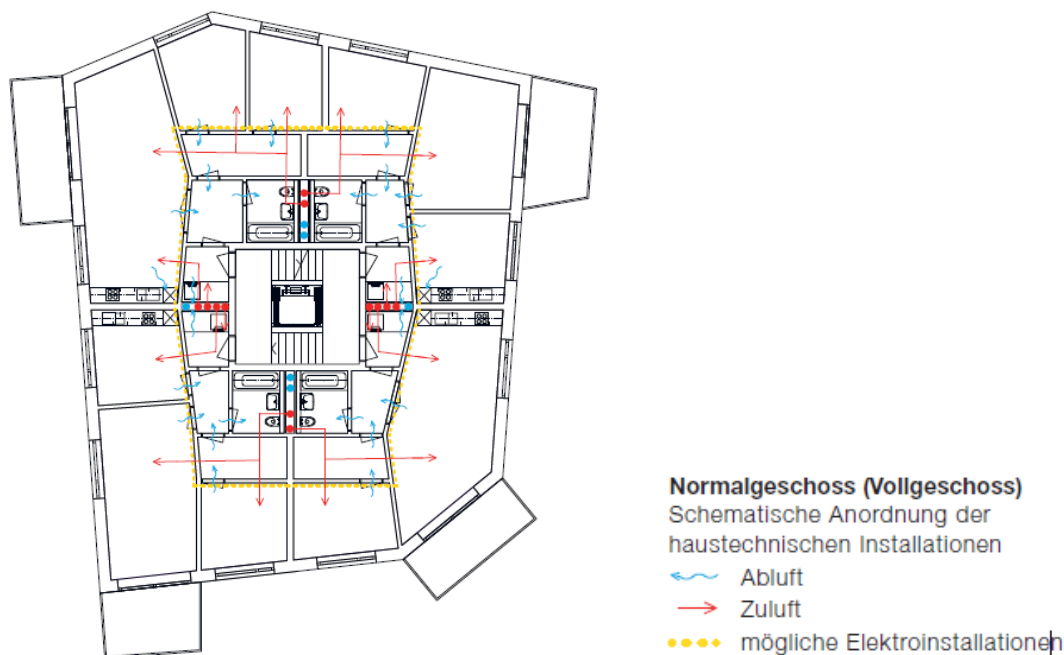


Figure 20 : un bâtiment conçu pour minimiser les pollutions dans les pièces à vivre

M. Schifferle a conduit une centaine d'entretiens [cf. entretien téléphonique avec C Schieferle], lui permettant de juger lui-même du niveau de sensibilité des candidats et de leur motivation à vivre en communauté. Certaines personnes ont pu essayer de passer une ou plusieurs nuits dans un appartement pour voir comment elles s'y sentaient. Des règles de vie strictes ont été définies pour respecter les sensibilités de chacun ; il est notamment interdit de fumer, d'utiliser des parfums, détergents, produits chimiques, Wi-Fi et téléphones mobiles dans et à proximité du bâtiment.

L'expérience a été suivie scientifiquement par une équipe de l'université de Berne, mais la publication, parue en mai 2015 (Bolliger-Salzmänn et al. 2015), ne s'intéresse qu'aux résidents SIOC. Lors d'un entretien téléphonique avec Christian Schifferle le 4 juin 2015, celui-ci a affirmé que, pour la majorité des résidents, une amélioration de l'état de santé avait été observée, bien qu'on ne puisse pas parler de guérison.

Suède : des chambres d'hôpital blindées pour les personnes se déclarant EHS

En Suède, il semblerait que plusieurs hôpitaux soient équipés pour recevoir des patients électrohypersensibles. Dans une enquête menée en 2007 (El-Överkanligas 2007) par l'association pour les personnes se déclarant EHS, certains centres de santé ont répondu avoir aménagé une ou plusieurs chambres pour garantir un faible niveau d'exposition aux ondes électromagnétiques.

Corée du Sud : un projet de « zones de sécurité électromagnétique »

La Corée du Sud ne possède à ce jour pas de zone blanche à proprement parler, mais d'après la réponse de la *Chungnam National University* à l'enquête internationale, le gouvernement, (*MISP: Ministry of Science, Information and Communications technology and Future Planning*) envisagerait de protéger certaines zones sensibles comme les crèches ou les écoles élémentaires grâce à des réglementations applicables aux alentours (« *EMF Safety Zones* »).

8.3.2.3 Conclusion sur les zones blanches

Considérant les attentes d'une partie de la population et le fait que l'Arcep impose progressivement aux opérateurs mobiles (téléphonie ou internet) d'assurer une couverture optimale du territoire français, les zones « blanches » naturelles sont amenées à disparaître dans les années à venir, à l'exception de quelques zones situées dans des conditions géographiques spécifiques ne permettant pas une couverture téléphonique.

La création d'immeubles ou de bâtiments dédiés (*cf.* illustration de la Figure 20) est une alternative envisageable pour ceux qui souhaitent réduire leur exposition, mais avant toute nouvelle décision, une évaluation coût-bénéfice des expériences existantes est nécessaire.

9 Conclusions du groupe de travail

Le présent rapport a été rédigé dans un contexte de forte demande de la part de personnes se déclarant EHS et d'associations en faveur de la reconnaissance de l'EHS en tant que maladie et / ou handicap, ainsi que de manque de confiance de ces personnes à l'égard des institutions. Le groupe de travail a écouté les revendications de ces personnes et a auditionné une vingtaine de parties-prenantes (médecins, associations, scientifiques, etc.). Parallèlement, il a dressé un état des connaissances scientifiques à partir de la littérature publiée principalement au cours des quinze dernières années pour apporter des éléments de réponse aux déclarations, questions et hypothèses ainsi recueillies. Jointe à l'absence de modèle animal connu de l'EHS et à la quasi absence d'études *in vivo* et / ou *in vitro* spécifiques à la problématique de l'EHS, cette démarche, qui s'est voulue à la fois attentive aux expériences de terrain et respectueuse des données scientifiques, a conduit le groupe de travail à adopter un plan et une présentation spécifiquement adaptés aux différentes facettes du problème complexe que constitue actuellement l'EHS.

Le pré-rapport d'expertise ainsi élaboré a été soumis à une consultation publique ouverte entre le 27 juillet et le 15 octobre 2016, dans le but de recueillir des informations complémentaires (cf. bilan de la consultation publique en Annexe 17).

Au final, il apparaît clairement que les plaintes (douleurs, souffrance²¹⁸) formulées par les personnes se déclarant EHS correspondent à une réalité vécue. La fatigue et les troubles du sommeil sont les symptômes les plus fréquemment rapportés dans la plupart des études descriptives, ainsi qu'à travers les témoignages. Cependant, les symptômes sont multiples, communs à de nombreuses autres affections et hétérogènes, avec des descriptions variables (les questionnaires utilisés, le recrutement des personnes ne sont pas comparables d'une étude à l'autre, etc.). Les différents témoignages rapportés lors des auditions et de la consultation publique sont également hétérogènes. Il en est de même des sources d'exposition incriminées (extrêmement basse fréquences ou radiofréquences, dont les modes d'interactions avec le corps humain sont différents).

Les études qui ont essayé de décrire les caractéristiques cliniques, biologiques et / ou physiologiques de l'EHS n'ont pas permis l'élaboration de critères de diagnostic pour la pratique clinique courante, ni de critères de classification pour la recherche qui fassent l'objet d'un consensus suffisant. Il en résulte une grande imprécision dans l'organisation des recherches et dans l'interprétation de leurs résultats. Actuellement, la seule possibilité pour définir l'EHS repose sur l'auto-déclaration des personnes. Si on ajoute à cela la multiplicité des thèmes de recherche abordés, la rareté de leur approfondissement et la qualité scientifique très inégale des articles qui reposent souvent sur une méthodologie très critiquable, on comprend qu'il ne soit possible de formuler qu'un tout petit nombre de conclusions.

Ainsi, une évaluation de la prévalence de l'EHS reste très difficile à faire ; les données scientifiques sur le pourcentage de personnes se déclarant EHS dans la population en France et à l'international ne sont pas fiables et sont comprises entre 0,7 % et 13,3 %. Toutefois, les données les plus récentes (sept articles publiés entre 2008 et 2013) donnent des résultats plus resserrés, autour de 5 % (entre 1,2 % et 8,8 %) et ne confirment pas la perspective d'une augmentation progressive de la prévalence de l'EHS suggérée par certaines études plus anciennes.

Les études descriptives ont néanmoins permis de faire émerger deux éléments. Le premier est que les personnes se déclarant EHS rapportent un moins bon niveau de bien-être et sont, en moyenne, plus anxieuses et déprimées que les témoins. Ce résultat doit attirer l'attention des soignants. Cependant, cette observation est difficile à interpréter, car telles que les études ont été

²¹⁸ Cf. Note de bas de page n° 48, p 43 sur la différence entre les termes « douleur » et « souffrance ».

conçues, il n'est pas possible de déterminer si cette anxiété et / ou cette dépression sont la cause ou la conséquence des symptômes ressentis par ces personnes. L'anxiété et la dépression sont en effet des réactions communes à la plupart des maladies graves ou rares. Dans le cas des personnes se déclarant EHS, il est compréhensible que les difficultés de prise en charge médicale et la persistance des symptômes puissent engendrer de l'anxiété et / ou de la dépression. Il n'est pas possible d'affirmer si cette composante psychique est plus ou moins fréquente chez les personnes se déclarant EHS que chez celles présentant une maladie grave ou rare. En tout état de cause, aucune augmentation de la prévalence de personnalités pathologiques et / ou de troubles psychiatriques majeurs n'a été rapportée chez ces personnes. Il n'en reste pas moins que le niveau de preuve est actuellement suffisant pour conclure que l'EHS, comme de nombreuses autres affections, s'accompagne de composantes anxieuse et / ou dépressive non négligeables.

Le second élément est que l'EHS est souvent associée à un ou plusieurs syndromes ou troubles (syndrome d'intolérance aux odeurs chimiques et/ou fibromyalgie principalement, migraines ou acouphènes). Le concept d'hypersensibilité comme trait de personnalité fournit une piste de réflexion sur la possibilité d'un facteur commun à ces diverses entités, qui mérite d'être étudiée.

Par ailleurs, les études de provocation sont considérées comme le meilleur moyen de démontrer, en laboratoire, une éventuelle capacité des personnes à percevoir une exposition aux champs électromagnétiques et / ou l'existence d'un lien de causalité entre les expositions aux champs électromagnétiques - extrêmement basse fréquences ou radiofréquences - d'une part, et la survenue et la persistance des symptômes d'autre part.

En ce qui concerne la capacité des personnes se déclarant EHS à percevoir une exposition aux champs électromagnétiques, aucune étude n'a mis en évidence une capacité de ces personnes à percevoir les radiofréquences. Toutefois, quelques études disparates montrent des réponses à des expositions à des champs électriques et / ou magnétiques basses fréquences ou à des courants électriques (50 et 60 Hz). Ces résultats doivent cependant être interprétés avec précaution et ces études méritent d'être répliquées en accordant une attention particulière aux critères d'inclusion des participants.

En outre, les études de provocation n'ont pas permis de mettre en évidence, de manière fiable et reproductible, l'apparition de symptômes ou d'anomalies biologiques ou physiologiques spécifiques à l'EHS en condition d'exposition (basses fréquences ou radiofréquences). Ceci suggère deux hypothèses distinctes :

- soit les symptômes ressentis par les personnes se déclarant EHS ne seraient pas dus aux expositions aux champs électromagnétiques et il n'existerait pas d'anomalie biologique et / ou physiologique objectivable lorsqu'elles sont exposées aux champs électromagnétiques (hypothèse 1) ;
- soit l'absence de résultat serait due aux limites méthodologiques des études de provocation (hypothèse 2). Ces limites ne permettent pas d'exclure avec certitude que :
 - quelques personnes sensibles aux champs électromagnétiques et présentant des effets biologiques et / ou physiologiques en condition d'exposition, n'aient pas été détectées jusqu'à présent en raison de l'imprécision des critères d'inclusion et d'exclusion des participants à ces études de provocation ;
 - des effets biologiques et / ou physiologiques puissent se manifester uniquement dans certaines conditions d'exposition (non encore testées) ;
 - les champs électromagnétiques aient certains effets biologiques et / ou physiologiques non encore analysés dans les études de provocation (cf. effets sur l'EEG du sommeil dans le rapport publié par l'Anses en 2013 sur les radiofréquences et la santé).

En outre, les résultats de plusieurs études de provocation ont conduit leurs auteurs à proposer l'hypothèse d'un rôle de l'effet *nocebo* dans l'apparition et / ou la persistance de l'EHS (compatible à la fois avec les hypothèses 1 et 2 ci-dessus). Toutefois, ces études de provocation ont été réalisées chez des personnes se déclarant EHS depuis un certain temps et ne renseignent donc pas sur les modalités de la première apparition des symptômes et de leur attribution à une exposition à des champs électromagnétiques. Il n'en reste pas moins que les résultats concordent

(une quinzaine d'articles sur le sujet) pour montrer que, soumises à des expositions simulées, les personnes se déclarant EHS expriment un nombre de fausses reconnaissances et de symptômes ressentis nettement plus élevé que les témoins, ce qui ne peut être expliqué que par un effet *nocebo*. Le niveau de preuve est donc suffisant pour dire qu'un effet *nocebo* joue un rôle non négligeable dans la persistance de l'EHS. Si les mécanismes qui sous-tendent cet effet sont encore mal connus, il est bien établi que ce phénomène, comme l'effet *placebo*, intervient souvent dans la relation soignants-soignés, et qu'il s'agit d'une réponse cognitivo-affective normale. De plus, sa survenue n'exclut pas la présence d'une affection organique non identifiée.

Au final, les causes d'apparition des symptômes décrits par les personnes se déclarant EHS restent inconnues.

En attendant une meilleure compréhension de ce problème complexe, et notamment des composantes biologiques, physiologiques et / ou psychiques de l'EHS, il est évident que de nombreuses personnes se déclarant EHS présentent un état de souffrance (physique et / ou psychique) plus ou moins important. Ceci nécessite et justifie une prise en charge adaptée par le système de soins. Une telle prise en charge est par ailleurs une condition nécessaire à la réalisation de recherches de qualité.

10 Recommandations du groupe de travail

Le groupe de travail a rédigé les recommandations ci-après, avec pour objectifs principaux d'améliorer la prise en charge des personnes se déclarant EHS, et d'approfondir les connaissances sur l'EHS. Il recommande aussi d'évaluer les moyens empiriques de diagnostic et de prise en charge de l'EHS actuellement utilisés.

10.1 Amélioration de la prise en charge des personnes se déclarant EHS par les professionnels de santé

Pour améliorer la prise en charge des personnes se déclarant EHS, il est avant tout indispensable d'établir et de préserver un climat de confiance entre toutes les parties prenantes. Pour cela, le groupe de travail recommande aux pouvoirs publics d'organiser une stratégie de prise en charge de ces personnes, en partenariat avec les professionnels de santé et en priorité de :

- demander à la Haute Autorité de Santé (HAS) d'examiner la pertinence d'appliquer à l'EHS les recommandations qu'elle a formulées dans le « rapport d'orientation sur le syndrome fibromyalgique de l'adulte » de juillet 2010 et le guide « Fibromyalgie de l'adulte : favoriser une prise en charge précoce et graduée » de juin 2011.
- créer une cellule de coordination ayant pour mission de faciliter le rapprochement entre tous les acteurs impliqués dans la prise en charge des personnes se déclarant EHS et notamment :
 - d'harmoniser les pratiques des centres de consultation de pathologies professionnelles et environnementales (CCPP) et élaborer un guide de bonnes pratiques cliniques à destination des professionnels de santé ;
 - d'étudier la possibilité de mettre en place au sein des CCPP des consultations pluridisciplinaires, avec des médecins, psychologues, physiciens et préventeurs en hygiène et sécurité, comme il en existe pour d'autres disciplines et à l'étranger²¹⁹ ;
 - de rassembler les données de santé disponibles, afin de faciliter les programmes de recherche, en lien avec les activités des Délégations à la Recherche Clinique et à l'Innovation (DRCI) ;
 - de conseiller aux Maisons départementales des personnes handicapées (MDPH) de s'adresser aux CCPP pour mener les expertises médicales des personnes se déclarant EHS dans le cadre de l'attribution du statut de « handicapé » et des avantages sociaux qui en découlent ;
 - de proposer des éléments à introduire dans les formations initiales et continues des professionnels de santé et dans les formations en environnement, hygiène et sécurité du travail, sur la thématique des champs électromagnétiques et de leurs effets possibles sur la santé, en collaboration avec les instances universitaires.
 - ainsi que d'étudier la faisabilité et l'efficacité d'une plateforme téléphonique et internet dédiée aux syndromes médicalement inexpliqués et de préciser le rôle des CCPP,
- demander à la Société française de médecine du travail d'étudier la faisabilité d'un guide de bonnes pratiques à l'égard des personnes se déclarant EHS en milieu professionnel²²⁰.

²¹⁹ sur le modèle de celles décrites dans l'étude de Brand *et al.* (2009) par exemple.

10.2 Évaluation des moyens empiriques actuellement utilisés pour poser un « diagnostic » ou pour le « traitement » des personnes se déclarant EHS

Considérant :

- que certains auteurs ou praticiens ont proposé des méthodes empiriques de diagnostic empirique et / ou de traitement des personnes se déclarant EHS non validées à ce jour ;
- que ces méthodes reposent toutes sur l'hypothèse de l'existence d'analogies et / ou d'associations entre l'EHS et d'autres syndromes médicalement inexpliqués (notamment SIOC, fibromyalgie, etc.) ou la migraine ;
- qu'il y a très peu d'études sur l'efficacité des différents traitements testés pour la prise en charge médicale des personnes se déclarant EHS ;

le groupe de travail recommande d'évaluer en priorité l'efficacité des différents modes de diagnostic empirique et de traitement recensés pour traiter les personnes se déclarant EHS, notamment sur :

- la balance ortho/para-sympathique (dynamique du système nerveux autonome), en particulier la variabilité de la fréquence cardiaque ;
- les méthodes tridimensionnelles de référence²²¹, la circulation sanguine et le métabolisme énergétique du cerveau chez les personnes se déclarant EHS, afin de vérifier l'hypothèse d'une ischémie cérébrale en rapport avec l'EHS ;
- les questionnaires sur l'EHS ;
- en réalisant des essais cliniques sur l'efficacité des différents traitements de l'EHS proposés de manière empirique.

10.3 Approfondissement des connaissances sur l'EHS

La nécessité de poursuivre les recherches sur l'EHS résulte de l'incertitude engendrée par le dilemme persistant entre, d'une part, les déclarations de personnes, selon lesquelles elles présenteraient une intolérance aux champs électromagnétiques et, d'autre part, l'absence de preuves scientifiques d'une relation de cause à effet entre les expositions à ces champs et les symptômes dont elles se plaignent.

Dans ce contexte, le groupe de travail recommande aux pouvoirs publics d'encourager la recherche sur l'EHS en :

- pérennisant le financement de l'effort de recherche sur les effets sanitaires des radiofréquences en général ;
- soutenant les appels à projets de recherche (APR) sur l'EHS.

²²⁰ Ce guide pourrait s'appuyer sur les données validées de la science et sur une enquête auprès des médecins de travail prenant en charge ces personnes. Il pourrait définir les modalités d'utilisation des mesures de champs électromagnétiques en milieu professionnel quand une source de champs électromagnétiques est mise en cause par une personne se déclarant EHS et, en collaboration avec les structures hospitalières de pathologie professionnelle, les modalités de recours à ces structures.

²²¹ TEP (Tomographie par Émission de Positrons) scan par exemple.

Sur le plan des protocoles expérimentaux, le groupe de travail propose quelques pistes d'amélioration en Annexe 18.

10.3.1 Études de provocation

Considérant que :

- les études de provocation sont celles qui ont le meilleur niveau de preuve pour démontrer un éventuel lien de causalité entre l'exposition aux champs électromagnétiques et les symptômes décrits par les personnes se déclarant EHS, mais ont été, jusqu'à présent, entachées de limites méthodologiques (cf. § 6.2.3) et n'ont pas permis d'aboutir à un consensus scientifique (cf. § 6.2.4) ;
- des personnes se déclarant EHS rapportent être plus sensibles à certains types de signaux (ou variations de signaux) qu'à d'autres²²² ;

le groupe de travail recommande aux scientifiques de mener des études de provocation (avec des groupes homogènes et bien caractérisés) sur les effets :

- de signaux proches de ceux rencontrés dans l'environnement ;
- des expositions aux champs électromagnétiques en concevant de nouveaux protocoles (différents modes d'exposition, effets différés, etc.).

10.3.2 Recherches sur les principaux symptômes de l'EHS

10.3.2.1 Troubles du sommeil et des rythmes circadiens

Considérant que :

- les troubles du sommeil figurent parmi les symptômes les plus fréquemment rapportés par les personnes se déclarant EHS, mais restent mal caractérisés ;
- des anomalies de l'EEG de sommeil ont été décrites, chez des personnes non-EHS, après exposition aux radiofréquences (cf. Rapport Anses 2013), et que ces anomalies semblent avoir été retrouvées chez des personnes se déclarant EHS, sans toutefois avoir fait l'objet d'une comparaison avec celles observées chez des personnes non-EHS (cf. § 6.2.1.2.5) ;
- de très récents travaux expérimentaux ont montré, pour la première fois, que des rats étaient capables de choisir un environnement où leur exposition aux radiofréquences était la plus faible durant la période de repos (jour) et que ce choix était associé à une augmentation de la durée du sommeil paradoxal (cf. § 5.3.1)) ;
- la symptomatologie des personnes se déclarant EHS (troubles du sommeil notamment) rend possible l'hypothèse d'un dysfonctionnement de l'horloge circadienne ;

le groupe de travail recommande :

²²² Des travaux récents conduits aux Pays-Bas (Van Moorselaar *et al.*, 2016) ont montré la faisabilité et l'intérêt de réaliser une étude de provocation rigoureuse tout en étant spécifique à chaque participant se déclarant EHS.

- que les futures études sur le sommeil approfondissent les relations entre les troubles du sommeil rapportés par les personnes se déclarant EHS et les troubles associés (comme la somnolence diurne, les troubles de la mémoire, de l'attention, de la concentration, de l'humeur et la modification de l'activité physique) ;
- que des études de provocation utilisant la polysomnographie soient réalisées, afin d'analyser de manière objective la qualité du sommeil lors d'une exposition aux champs électromagnétiques chez des personnes se déclarant EHS ;
- d'étudier à la fois la prévalence, l'intensité et les caractéristiques des troubles subjectifs ou auto-rapportés du sommeil (avec des échelles d'intensité notamment) et les rythmes circadiens chez des personnes se déclarant EHS et chez des témoins.

10.3.2.2 Migraines et céphalées

Considérant que :

- les maux de tête sont un des symptômes les plus fréquemment rapportés par les personnes se déclarant EHS, mais que, jusqu'à présent, les recherches sur ce thème ont rarement été conduites en conformité avec la classification internationale des céphalées ;
- les rares études ayant fait la distinction entre migraines et autres céphalées ont mis en évidence une fréquence non négligeable de crises ou d'antécédents migraineux chez les personnes se déclarant EHS, sans qu'il soit possible de dire si cette fréquence est plus élevée que dans la population générale ;
- l'expérience d'un médecin (cf. § 7.5.3.2) concernant l'utilisation de médicaments anti-migraineux chez des personnes se déclarant EHS soulève des hypothèses intéressantes, dont la vérification pourrait déboucher sur un traitement efficace par des médicaments antimigraineux de personnes se déclarant EHS ;

le groupe de travail recommande :

- d'étudier les différents types de céphalées présentées par les personnes se déclarant EHS sur la base de la classification internationale, pour préciser les relations entre migraine et EHS. Il s'agit de définir si les maux de tête de ces personnes sont, en tout ou partie, des migraines, et si elles (ou certaines d'entre elles) ont plus de migraines que les personnes non-EHS ;
- en fonction des résultats des recherches précédentes, de réaliser des essais cliniques, afin d'étudier l'efficacité (et de préciser les indications) des traitements antimigraineux chez les personnes se déclarant EHS.

10.3.2.3 Fonctions cognitives

Considérant que :

- la mesure des performances cognitives dans le cadre des recherches sur les radiofréquences pose un certain nombre de problèmes liés au fait qu'il n'existe pas de standards ou de normes concernant la méthodologie d'évaluation comportementale de la cognition chez les personnes exposées ;
- cette absence d'outils validés contribuerait aux données non cohérentes de la littérature chez les témoins (cf. rapport Anses de 2013), et serait un obstacle important pour la validation des effets ou de l'absence d'effet des radiofréquences sur les fonctions cognitives, et ceci, chez les témoins ou les personnes se déclarant EHS ;

le groupe de travail recommande :

- de concentrer les recherches sur les troubles de la mémoire de personnes se déclarant EHS en les faisant objectiver dans des centres de consultations spécialisées ;
- d'étudier les facteurs (stress, sommeil, anxiété, âge, genre, niveau d'éducation, etc.) pouvant avoir un impact sur les performances mnésiques de ces personnes.

10.3.2.4 Hypersensibilité et étude globale de la personnalité

Considérant que :

- l'hypersensibilité (cf. § 3.8.4) a été décrite comme un trait de caractère et de comportement qui commence à être documenté, à la fois du point de vue psychologique et neurobiologique ;
- l'étude de la personnalité n'a utilisé jusqu'à présent chez les personnes se déclarant EHS que des tests n'explorant qu'un petit nombre de composantes (anxiété, dépression, somatisation) ;

le groupe de travail recommande :

- d'étudier les relations qui pourraient exister entre l'hypersensibilité comme trait de caractère et l'EHS, dans un but exploratoire, afin d'évaluer l'intérêt de poursuivre les investigations avec des marqueurs d'imagerie fonctionnelle cérébrale ;
- d'étudier la personnalité des personnes se déclarant EHS avec des tests qui, comme le MMPI, en explorent la plupart des composantes (normales et pathologiques).

10.3.2.5 EHS et autres troubles ou syndromes associés

Considérant :

- qu'il existe de nombreuses associations entre l'EHS et / ou plusieurs syndromes ou troubles (le plus souvent syndrome d'intolérance aux odeurs chimiques (SIOC ou *multiple chemical sensitivity*) ou fibromyalgie, acouphènes, troubles du système nerveux autonome et troubles psychosociaux ;
- que les troubles cutanés sont fréquents au cours de l'EHS et que des anomalies des petites fibres nerveuses de la peau ont été mises en évidence dans la fibromyalgie ;

le groupe de travail recommande :

- d'approfondir l'analyse des relations (études sur la fréquence d'association) entre l'EHS et d'autres troubles présentant des analogies (syndromes médicalement inexpliqués notamment) en comparant des personnes se déclarant EHS à des témoins sans aucun syndrome d'intolérance environnementale, ainsi qu'à des témoins se plaignant d'autres troubles présentant des analogies ;
- de comparer les aspects cliniques et éventuellement physiopathologiques de l'EHS d'une part, et du SIOC, de la fibromyalgie, des acouphènes idiopathiques, et des troubles psychosociaux, d'autre part ;
- de poursuivre l'étude de la variabilité de la fréquence cardiaque au repos et après lever actif pour tester l'orthostatisme de ces personnes ;
- d'étudier les anomalies des petites fibres nerveuses de la peau lors des comparaisons entre EHS et fibromyalgie.

10.3.3 Autres propositions de recherche

Considérant que :

- les très rares études de suivi sur le long-terme des personnes se déclarant EHS ne dépassent pas un an ;
- quelques études, ainsi que les auditions et les témoignages mettent l'accent sur l'errance médicale des personnes se déclarant EHS ;
- l'isolement des personnes se déclarant EHS est systématiquement souligné ;
- la prise en charge et les représentations des personnes se déclarant EHS peuvent varier d'un pays à l'autre ;

le groupe de travail recommande :

- d'encourager de grandes études prospectives, comme le projet COSMOS, à inclure la problématique de l'EHS dans leurs questionnaires de suivi ;
- d'étudier les difficultés de la relation soignant-soigné pour les personnes se déclarant EHS ;
- de rechercher les différents facteurs qui contribuent à l'isolement psycho-social de ces personnes ;
- de mener des études comparatives sur le vécu et les représentations des EHS dans plusieurs pays.

10.4 Exposition aux champs électromagnétiques

Considérant :

- que malgré les nombreux témoignages de personnes se déclarant EHS et rapportant la fin de leurs symptômes avec la fin de l'exposition aux ondes, les éléments scientifiques disponibles à l'heure actuelle ne plaident ni en faveur ni en défaveur d'une amélioration de leur état de santé, suite à un abaissement des niveaux d'exposition ;
- que la loi n° 2015-136 du 9 février 2015 relative à la sobriété (dite « loi Abeille ») confie à l'ANFR les modalités de traitement et la trajectoire de résorption des points atypiques ;
- qu'aucune donnée scientifique ne permet d'objectiver l'efficacité de zones blanches ou d'immeubles « blanchis », ni de chambres d'hôpital spécifiques ;

le groupe de travail recommande aux pouvoirs publics :

- de mettre en œuvre les recommandations du rapport publié par l'Anses en 2013 pour la population générale en matière de niveaux d'exposition (§ 13.3, p 346), dont celle visant à peser avec soin des conséquences d'un éventuel abaissement des niveaux d'exposition induits par les antennes-relais de téléphonie mobile, et celle d'étudier le lien entre la multiplication du nombre d'antennes et l'augmentation parallèle possible de la valeur moyenne de l'exposition ;
- d'évaluer rigoureusement les bénéfices en matière de santé d'éventuelles zones blanches si de telles zones devaient être expérimentées.

Date de validation du pré-rapport d'expertise collective par le groupe de travail : 1^{er} juillet 2016.

Date de validation du rapport d'expertise collective par le groupe de travail : 23 octobre 2017.

11 Bibliographie

11.1 Publications

- "Gesundes Wohnen MCS, Un logement sain pour les chimicosensibles." accessed 2015/08/06. <http://www.gesundes-wohnen-mcs.ch/willkommen.html>.
- Abelin, T., N. Bachmann, B. Bisig, and et al. 2000. "Gesundheit und Gesundheitsverhalten in der Schweiz 1997." *Neuenburg*.
- Aboul Ezz, H. S., Y. A. Khadrawy, N. A. Ahmed, N. M. Radwan, and M. M. El Bakry. 2013. "The effect of pulsed electromagnetic radiation from mobile phone on the levels of monoamine neurotransmitters in four different areas of rat brain." *Eur Rev Med Pharmacol Sci* 17 (13):1782-8.
- Acevedo, B. P., E. N. Aron, A. Aron, M. D. Sangster, N. Collins, and L. L. Brown. 2014. "The highly sensitive brain: an fMRI study of sensory processing sensitivity and response to others' emotions." *Brain Behav* 4 (4):580-94. doi: 10.1002/brb3.242.
- Afsset. 2009. *Mise à jour de l'expertise relative aux radiofréquences*.
- Aggarwal, Rohit, Sarah Ringold, Dinesh Khanna, Tuhina Neogi, Sindhu R. Johnson, Amy Miller, Hermine I. Brunner, Rikke Ogawa, David Felson, Alexis Ogdie, Daniel Aletaha, and Brian M. Feldman. 2015. "Distinctions Between Diagnostic and Classification Criteria?" *Arthritis Care & Research* 67 (7):891-897. doi: 10.1002/acr.22583.
- Ahmad, M., P. Galland, T. Ritz, R. Wiltschko, and W. Wiltschko. 2007. "Magnetic intensity affects cryptochrome-dependent responses in *Arabidopsis thaliana*." *Planta* 225 (3):615-624. doi: 10.1007/s00425-006-0383-0.
- Akerstedt, T. 2006. "Psychosocial stress and impaired sleep." *Scand J Work Environ Health* 32 (6):493-501.
- Åkerstedt, T., and M. Gillberg. 1990. "Subjective and objective sleepiness in the active individual." *International Journal of Neuroscience* 52 (1-2):29-37. doi: 10.3109/00207459008994241.
- Akerstedt, T., K. Hume, D. Minors, and J. Waterhouse. 1994a. "The subjective meaning of good sleep, an intraindividual approach using the Karolinska Sleep Diary." *Perceptual and Motor Skills* 79 (1 Pt 1):287-296.
- Akerstedt, T., K. Hume, D. Minors, and J. Waterhouse. 1994b. "The meaning of good sleep: A longitudinal study of polysomnography and subjective sleep quality." *Journal of Sleep Research* 3 (3):152-158.
- Andersen, J. H., and J. C. Jensen. 2012. "Modern health worries and visits to the general practitioner in a general population sample: An 18month follow-up study." *Journal of Psychosomatic Research* 73 (4):264-267. doi: 10.1016/j.jpsychores.2012.07.007.
- Andersson, B., M. Berg, B. B. Arnetz, L. Melin, I. Langlet, and S. Lidén. 1996. "A cognitive-behavioral treatment of patients suffering from 'electric hypersensitivity': Subjective effects and reactions in a double-blind provocation study." *Journal of Occupational and Environmental Medicine* 38 (8):752-758.
- Andrianome, S., L. Hugueville, R. de Seze, M. Hanot-Roy, K. Blazy, C. Gamez, and B. Selmaoui. 2016. "Disturbed sleep in individuals with Idiopathic environmental intolerance attributed to electromagnetic fields (IEI-EMF): Melatonin assessment as a biological marker." *Bioelectromagnetics*. doi: 10.1002/bem.21965.
- ANFR. 2017. Etude de l'exposition du public aux ondes radioélectriques - Analyse des résultats de mesures d'exposition du public aux ondes électromagnétiques réalisées en 2016 dans le cadre du dispositif national de surveillance.
- Anses. 2013. *Mise à jour de l'expertise "radiofréquences et santé"*.
- Anses. 2016. *Exposition aux radiofréquences et santé des enfants*.
- Anses. 2017. *Exposition de la population aux champs électromagnétiques émis par les « compteurs communicants »*

- Arai, J. A., S. Li, D. M. Hartley, and L. A. Feig. 2009. "Transgenerational rescue of a genetic defect in long-term potentiation and memory formation by juvenile enrichment." *Journal of Neuroscience* 29 (5):1496-1502. doi: 10.1523/JNEUROSCI.5057-08.2009.
- Arnetz, BB., T. Akerstedt, L. Hillert, A. Lowden, N. Kuster, and C. Wiholm. 2007. "The Effects of 884 MHz GSM Wireless Communication Signals on Self-reported Symptom and Sleep (EEG)- An Experimental Provocation Study." *PIERS Online* 3 (7): 1148-1150
- Aron, E. N., and A. Aron. 1997. "Sensory-processing sensitivity and its relation to introversion and emotionality." *J Pers Soc Psychol* 73 (2):345-68.
- Aron, E. N., A. Aron, and J. Jagiellowicz. 2012. "Sensory processing sensitivity: a review in the light of the evolution of biological responsivity." *Pers Soc Psychol Rev* 16 (3):262-82. doi: 10.1177/1088868311434213.
- Atlasz, T., L. Kellényi, P. Kovács, N. Babai, G. Thuróczy, L. Hejmel, and I. Hernádi. 2006. "The application of surface plethysmography for heart rate variability analysis after GSM radiofrequency exposure." *Journal of Biochemical and Biophysical Methods* 69 (1-2):233-236. doi: 10.1016/j.jbbm.2006.03.017.
- Augner, C., M. Florian, G. Pauser, G. Oberfeld, and G. W. Hacker. 2009a. "GSM base stations: Short-term effects on well-being." *Bioelectromagnetics* 30 (1):73-80. doi: 10.1002/bem.20447.
- Augner, C., T. Gnamb, R. Winker, and A. Barth. 2012. "Acute effects of electromagnetic fields emitted by GSM mobile phones on subjective well-being and physiological reactions: a meta-analysis." *Sci Total Environ* 424:11-5. doi: 10.1016/j.scitotenv.2012.02.034.
- Augner, C., and G. W. Hacker. 2009b. "Are people living next to mobile phone base stations more strained? Relationship of health concerns, self-estimated distance to base station, and psychological parameters." *Indian J Occup Environ Med* 13 (3):141-5. doi: 10.4103/0019-5278.58918.
- Austrian Medical Association. 2012. *Guideline of Austrian Medical Association for the diagnoses and treatment of EMF-related health problems and illnesses (EMF syndrome). Consensus paper of the Austrian Medical Association's EMF working group 2012.*
- Bach, V. 2017. Réponses physiologiques d'adaptation ou d'évitement du rat juvénile exposé aux ondes radiofréquences type antenne relais. Université de Picardie Jules Verne.
- Bachelot-Narquin, R., N. Kosciusko-Morizet, and C. Jouanno. 2009. *Dix orientations retenues par le gouvernement suite à la table ronde "radiofréquences, santé, environnement"*.
- Baguley, D., D. McFerran, and D. Hall. 2013. "Tinnitus." *Lancet* 382 (9904):1600-7. doi: 10.1016/s0140-6736(13)60142-7.
- Bailer, J., M. Witthöft, C. Paul, C. Bayerl, and F. Rist. 2005. "Evidence for overlap between idiopathic environmental intolerance and somatoform disorders." *Psychosomatic Medicine* 67 (6):921-929. doi: 10.1097/01.psy.0000174170.66109.b7.
- Bailer, J., M. Witthöft, and F. Rist. 2008. "Psychological predictors of short- and medium term outcome in individuals with idiopathic environmental intolerance (IEI) and individuals with somatoform disorders." *Journal of Toxicology and Environmental Health - Part A: Current Issues* 71 (11-12):766-775. doi: 10.1080/15287390801985562.
- Baker, R. R. 1980. "Goal orientation by blindfolded humans after long-distance displacement: Possible involvement of a magnetic sense." *Science* 210 (4469):555-557.
- Baliatsas, C., J. Bolte, J. Yzermans, G. Kelfkens, M. Hooiveld, E. Lebre, and I. van Kamp. 2015a. "Actual and perceived exposure to electromagnetic fields and non-specific physical symptoms: an epidemiological study based on self-reported data and electronic medical records." *International journal of hygiene and environmental health* 218 (3):331-344. doi: 10.1016/j.ijheh.2015.02.001.
- Baliatsas, C., I. Van Kamp, M. Hooiveld, J. Yzermans, and E. Lebre. 2014a. "Comparing non-specific physical symptoms in environmentally sensitive patients: Prevalence, duration, functional status and illness behavior." *Journal of Psychosomatic Research* 76 (5):405-413. doi: 10.1016/j.jpsychores.2014.02.008.
- Baliatsas, C., I. van Kamp, M. Hooiveld, J. Yzermans, and E. Lebre. 2014b. "Comparing non-specific physical symptoms in environmentally sensitive patients: Prevalence, duration, functional status and illness behavior." *J Psychosom Res* 76 (5):405-13. doi: 10.1016/j.jpsychores.2014.02.008.
- Banaclocha, M. A., I. Bókkon, and H. M. Banaclocha. 2010. "Long-term memory in brain magnetite." *Medical Hypotheses* 74 (2):254-257. doi: 10.1016/j.mehy.2009.09.024.

- Barker, A. T., P. R. Jackson, H. Parry, L. A. Coulton, G. G. Cook, and S. M. Wood. 2007. "The effect of GSM and TETRA mobile handset signals on blood pressure, catechol levels and heart rate variability." *Bioelectromagnetics* 28 (6):433-8. doi: 10.1002/bem.20333.
- Bartha, L., W. Baumzweiger, D. S. Buscher, T. Callender, K. A. Dahl, A. Davidoff, A. Donnay, S. B. Edelson, B. D. Elson, E. Elliott, D. P. Flayhan, G. Heuser, P. M. Keyl, K. H. Kilburn, P. Gibson, L. A. Jason, J. Krop, R. D. Mazlen, R. G. McGill, J. McTamney, W. J. Meggs, W. Morton, M. Nass, C. L. Oliver, D. D. Panjwani, L. A. Plumlee, D. Rapp, M. B. Shayevitz, J. Sherman, R. M. Singer, A. Solomon, A. Vojdani, J. M. Woods, and G. Ziem. 1999. "Multiple Chemical Sensitivity: A 1999 Consensus." *Archives of Environmental Health* 54 (3):147-149. doi: 10.1080/00039899909602251.
- Barutcu, I., A. M. Esen, D. Kaya, M. Turkmen, O. Karakaya, M. Saglam, M. Melek, A. Çeläk, C. Kälät, E. Onrat, and C. Kirma. 2011. "Do mobile phones pose a potential risk to autonomic modulation of the heart?" *PACE - Pacing and Clinical Electrophysiology* 34 (11):1511-1514. doi: 10.1111/j.1540-8159.2011.03162.x.
- Beard, GM. . 1869. "Neurasthenia, or nervous exhaustion. ." *Boston Med Surg J* 3 :217-21.
- Begall, S., J. Červený, J. Neef, O. Vojtěch, and H. Burda. 2008. "Magnetic alignment in grazing and resting cattle and deer (Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (2008) 105, (13451-13455) DOI: 10.1073/pnas.0803650105)." *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 105 (44):17206. doi: 10.1073/pnas.0809028105.
- Belpomme, D., C. Campagnac, and P. Irigaray. 2015. "Reliable disease biomarkers characterizing and identifying electrohypersensitivity and multiple chemical sensitivity as two etiopathogenic aspects of a unique pathological disorder." *Reviews on Environmental Health* 30 (4):251-271. doi: 10.1515/reveh-2015-0027.
- Belpomme, D., C. Campagnac, and P. Irigaray. 2016. "Corrigendum to: Reliable disease biomarkers characterizing and identifying electrohypersensitivity and multiple chemical sensitivity as two etiopathogenic aspects of a unique pathological disorder." *Rev Environ Health*. doi: 10.1515/reveh-2015-8888.
- Belsky, J., C. Jonassaint, M. Pluess, M. Stanton, B. Brummett, and R. Williams. 2009. "Vulnerability genes or plasticity genes?" *Mol Psychiatry* 14 (8):746-54. doi: 10.1038/mp.2009.44.
- Belyaev, I., A. Dean, H. Eger, G. Hubmann, R. Jandrisovits, O. Johansson, M. Kern, M. Kundi, P. Lercher, W. Mosgöller, H. Moshhammer, K. Müller, G. Oberfeld, P. Ohnsorge, P. Pelzmann, C. Scheingraber, and R. Thill. 2015a. "EUROPAEM EMF Guideline 2015 for the prevention, diagnosis and treatment of EMF-related health problems and illnesses." *Reviews on Environmental Health* 30 (4):337-371. doi: 10.1515/reveh-2015-0033.
- Belyaev, I., A. Dean, H. Eger, G. Hubmann, R. Jandrisovits, M. Kern, M. Kundi, H. Moshhammer, P. Lercher, K. Muller, G. Oberfeld, P. Ohnsorge, P. Pelzmann, C. Scheingraber, and R. Thill. 2016. "EUROPAEM EMF Guideline 2016 for the prevention, diagnosis and treatment of EMF-related health problems and illnesses." *Rev Environ Health* 31 (3):363-97. doi: 10.1515/reveh-2016-0011.
- Belyaev, I. Y., L. Hillert, M. Protopopova, C. Tamm, L. O. G. Malmgren, B. R. R. Persson, G. Selivanova, and M. Harms-Ringdahl. 2005. "915 MHz microwaves and 50 Hz magnetic field affect chromatin conformation and 53BP1 foci in human lymphocytes from hypersensitive and healthy persons." *Bioelectromagnetics* 26 (3):173-184. doi: 10.1002/bem.20103.
- Belyaev, I. Y., C. B. Koch, O. Terenius, K. Roxström-Lindquist, L. O. G. Malmgren, W. H. Sommer, L. G. Salford, and B. R. R. Persson. 2006. "Exposure of rat brain to 915 MHz GSM microwaves induces changes in gene expression but not double stranded DNA breaks or effects on chromatin conformation." *Bioelectromagnetics* 27 (4):295-306. doi: 10.1002/bem.20216.
- Belyaev, I. Y., E. Markova, L. Hillert, L. O. G. Malmgren, and B. R. R. Persson. 2009. "Microwaves from UMTS/GSM mobile phones induce long-lasting inhibition of 53BP1/γ-H2AX DNARepair foci in human lymphocytes." *Bioelectromagnetics* 30 (2):129-141. doi: 10.1002/bem.20445.
- Belyaev, Igor, Amy Dean, Horst Eger, Gerhard Hubmann, Reinhold Jandrisovits, Olle Johansson, Markus Kern, Michael Kundi, Piero Lercher, Wilhelm Mosgöller, Hanns Moshhammer, Kurt Müller, Gerd Oberfeld, Peter Ohnsorge, Peter Pelzmann, Claus Scheingraber, and Roby Thill. 2015b. Retraction of: EUROPAEM EMF Guideline 2015 for the prevention, diagnosis and treatment of EMF-related health problems and illnesses. In *Reviews on Environmental Health*.
- Benedetti, F., M. Amanzio, C. Casadio, A. Oliaro, and G. Maggi. 1997. "Blockade of placebo hyperalgesia by the cholecystikinin antagonist proglumide." *Pain* 71 (2):135-40.

- Benedetti, F., J. Durando, and S. Vighetti. 2014. "Nocebo and placebo modulation of hypobaric hypoxia headache involves the cyclooxygenase-prostaglandins pathway." *Pain* 155 (5):921-8. doi: 10.1016/j.pain.2014.01.016.
- Benedetti, F., W. Thoen, C. Blanchard, S. Vighetti, and C. Arduino. 2013. "Pain as a reward: changing the meaning of pain from negative to positive co-activates opioid and cannabinoid systems." *Pain* 154 (3):361-7. doi: 10.1016/j.pain.2012.11.007.
- Berg-Beckhoff, G., J. Breckenkamp, P. V. Larsen, and B. Kowall. 2014. "General practitioners' knowledge and concern about electromagnetic fields." *International Journal of Environmental Research and Public Health* 11 (12):12969-12982. doi: 10.3390/ijerph111212969.
- Berg-Beckhoff, G., K. Heyer, B. Kowall, J. Breckenkamp, and O. Razum. 2010a. "The views of primary care physicians on health risks from electromagnetic fields." *Dtsch Arztebl Int* 107 (46):817-23. doi: 10.3238/arztebl.2010.0817.
- Berg-Beckhoff, G., K. Heyer, B. Kowall, J. Breckenkamp, and O. Razum. 2010b. "The views of primary care physicians on health risks from electromagnetic fields." *Deutsches Arzteblatt* 107 (46):817-823. doi: 10.3238/arztebl.2010.0817.
- Bergdahl, J. 1995. "Psychologic aspects of patients with symptoms presumed to be caused by electricity or visual display units." *Acta Odontologica Scandinavica* 53 (5):304-310. doi: 10.3109/00016359509005992.
- Bergdahl, J., L. Mårell, M. Bergdahl, and H. Perris. 2005. "Psychobiological personality dimensions in two environmental-illness patient groups." *Clinical Oral Investigations* 9 (4):43-48. doi: 10.1007/s00784-005-0015-2.
- Bergdahl, J., B. Stenberg, N. Eriksson, G. Lindén, and L. Widman. 2004. "Coping and self-image in patients with visual display terminal-related skin symptoms and perceived hypersensitivity to electricity." *International Archives of Occupational and Environmental Health* 77 (8):538-542. doi: 10.1007/s00420-004-0546-x.
- Bergdahl, J., A. Tillberg, and E. Stenman. 1998. "Odontologic survey of referred patients with symptoms allegedly caused by electricity or visual display units." *Acta Odontol Scand* 56 (5):303-7.
- Bergqvist, U., O. Franzen, W. J. Rea, and E. J. Fenveyes. 1993. "Electromagnetic Field Sensitivity (Letter and Reply)." *Electro Magnetobiol* 12 (1):5-7.
- Bergqvist, U. and E editors. Vogel. 1997. *Possible implications of subjective symptoms and electromagnetic fields. A report by a European group of experts for the European Commission, DG V: National Institute for Working Life (Arbete och Halsa 1997:19).*
- Bergqvist, U. O. V. 1984. "Video display terminals and health. A technical and medical appraisal of the state of the art." *Scandinavian Journal of Work, Environment and Health* 10 (SUPPL. 2):1-87.
- Berthelot, J. M. 2016. "Is electromagnetic hypersensitivity entirely ascribable to nocebo effects?" *Joint Bone Spine* 83 (2):121-3. doi: 10.1016/j.jbspin.2015.11.003.
- Blakemore, R. 1975. "Magnetotactic bacteria." *Science* 190 (4212):377-379.
- Blettner, M., B. Schlehofer, J. Breckenkamp, B. Kowall, S. Schmiedel, U. Reis, P. Potthoff, J. Schüz, and G. Berg-Beckhoff. 2009. "Mobile phone base stations and adverse health effects: Phase 1 of a population-based, cross-sectional study in Germany." *Occupational and Environmental Medicine* 66 (2):118-123. doi: 10.1136/oem.2007.037721.
- Bolliger-Salzmänn, Heinz , Beatrice Metry, Anna ErbCand, Sarah Heiniger, and Elean Schaffner. 2015. "Evaluation des MCS-Pilotprojekts der Wohnbaugenossenschaft Gesundes Wohnen MCS - Eine explorative Studie Schlussbericht."
- Bonde, J. P. 2008. "Psychosocial factors at work and risk of depression: a systematic review of the epidemiological evidence." *Occup Environ Med* 65 (7):438-45. doi: 10.1136/oem.2007.038430.
- Borbely, A. A., and A. Wirz-Justice. 1982. "Sleep, sleep deprivation and depression. A hypothesis derived from a model of sleep regulation." *Hum Neurobiol* 1 (3):205-10.
- Borraz O, Devigne M, Salomon M. 2004. Controverses et mobilisations autour des antennes relais de téléphonie mobile. CSO/FNSP.
- Bortkiewicz, A., E. Gadzicka, W. Szymczak, and M. Zmyslony. 2012. "Heart rate variability (HRV) analysis in radio and TV broadcasting stations workers." *Int J Occup Med Environ Health* 25 (4):446-55. doi: 10.2478/s13382-012-0059-x.

- Bortkiewicz, A., E. Gadzicka, M. Zmyslony, and W. Szymczak. 2006. "Neurovegetative disturbances in workers exposed to 50 Hz electromagnetic fields." *Int J Occup Med Environ Health* 19 (1):53-60.
- Bortkiewicz, A., M. Zmyslony, and E. Gadzicka. 1998. "[Exposure to electromagnetic fields with frequencies of 50 Hz and changes in the circulatory system in workers at electrical power stations]." *Med Pr* 49 (3):261-74.
- Boutry, C. M., S. Kuehn, P. Achermann, A. Romann, J. Keshvari, and N. Kuster. 2008. "Dosimetric evaluation and comparison of different RF exposure apparatuses used in human volunteer studies." *Bioelectromagnetics* 29 (1):11-19. doi: 10.1002/bem.20356.
- Brand, S., P. Heller, A. J. Bircher, C. Braun-Fahrleander, A. Huss, M. Niederer, S. Schwarzenbach, R. Waeber, L. Wegmann, and J. Kuechenhoff. 2009. "Patients with environment-related disorders: Comprehensive results of interdisciplinary diagnostics." *International Journal of Hygiene and Environmental Health* 212 (2):157-171. doi: 10.1016/j.ijheh.2008.05.004.
- Buchner, K.; Eger H. 2011. "Changes of Clinically Important Neurotransmitters under the Influence of Modulated RF Fields — A Long-term Study under Real-life Conditions." *Umwelt-Medizin-Gesellschaft* 24(1): 44-57.
- Buysse, D. J., C. F. Reynolds Iii, T. H. Monk, S. R. Berman, and D. J. Kupfer. 1989. "The Pittsburgh sleep quality index: A new instrument for psychiatric practice and research." *Psychiatry Research* 28 (2):193-213. doi: 10.1016/0165-1781(89)90047-4.
- Caccamo, D., E. Cesareo, S. Mariani, D. Raskovic, R. Ientile, M. Curro, L. Korkina, and C. De Luca. 2013. "Xenobiotic sensor- and metabolism-related gene variants in environmental sensitivity-related illnesses: a survey on the Italian population." *Oxid Med Cell Longev* 2013:831969. doi: 10.1155/2013/831969.
- Caro, X. J., and E. F. Winter. 2015. "The Role and Importance of Small Fiber Neuropathy in Fibromyalgia Pain." *Curr Pain Headache Rep* 19 (12):55. doi: 10.1007/s11916-015-0527-7.
- Carrubba, S., C. Frilot, A. L. Chesson, and A. A. Marino. 2007. "Nonlinear EEG activation evoked by low-strength low-frequency magnetic fields." *Neuroscience Letters* 417 (2):212-216. doi: 10.1016/j.neulet.2007.02.046.
- Carrubba, S., C. Frilot, A. L. Chesson, and A. A. Marino. 2010b. "Numerical analysis of recurrence plots to detect effect of environmental-strength magnetic fields on human brain electrical activity." *Medical Engineering and Physics* 32 (8):898-907. doi: 10.1016/j.medengphy.2010.06.006.
- Carrubba, S., C. Frilot, A. L. Chesson Jr, and A. A. Marino. 2010a. "Mobile-phone pulse triggers evoked potentials." *Neuroscience Letters* 469 (1):164-168. doi: 10.1016/j.neulet.2009.11.068.
- Carrubba, S., and A. A. Marino. 2008. "The effects of low-frequency environmental-strength electromagnetic fields on brain electrical activity: A critical review of the literature." *Electromagnetic Biology and Medicine* 27 (2):83-101. doi: 10.1080/15368370802088758.
- Carskadon, M.A, and W.C Dement. 1977. "Sleep tendency: an objective measure of sleep loss." *Sleep Research* 6: 200.
- Carskadon, M.A., W.C. Dement, M.M Mitler, T Roth, P.R Westbrook, and S Keenan. 1986. "Guidelines for the Multiple Sleep Latency Test (MSLT): a standard measure of sleepiness. ." *Sleep* 9:519–524.
- Caspi, A., A. R. Hariri, A. Holmes, R. Uher, and T. E. Moffitt. 2010. "Genetic sensitivity to the environment: the case of the serotonin transporter gene and its implications for studying complex diseases and traits." *Am J Psychiatry* 167 (5):509-27. doi: 10.1176/appi.ajp.2010.09101452.
- Caspi, A., K. Sugden, T. E. Moffitt, A. Taylor, I. W. Craig, H. Harrington, J. McClay, J. Mill, J. Martin, A. Braithwaite, and R. Poulton. 2003. "Influence of life stress on depression: moderation by a polymorphism in the 5-HTT gene." *Science* 301 (5631):386-9. doi: 10.1126/science.1083968.
- Cathébras, P. 2006. *Troubles fonctionnels et somatisation - Comment aborder les symptômes médicalement inexpliqués*. Edited by Masson éd. Paris.
- Chassidim, Y., U. Vazana, O. Prager, R. Veksler, G. Bar-Klein, K. Schoknecht, M. Fassler, S. Lublinsky, and I. Shelef. 2015. "Analyzing the blood-brain barrier: The benefits of medical imaging in research and clinical practice." *Seminars in Cell and Developmental Biology* 38:43-52. doi: 10.1016/j.semdb.2014.11.007.
- Chateauraynaud, Francis, and Josquin Debaz. 2010. "Le partage de l'hypersensible : le surgissement des électro-hypersensibles dans l'espace public." *Sciences sociales et santé*:5-33.

- Chen, C., C. Chen, R. Moyzis, H. Stern, Q. He, H. Li, J. Li, B. Zhu, and Q. Dong. 2011. "Contributions of dopamine-related genes and environmental factors to highly sensitive personality: a multi-step neuronal system-level approach." *PLoS One* 6 (7):e21636. doi: 10.1371/journal.pone.0021636.
- Chia, S. E. 2001. "Erratum: "Prevalence of headache among handheld cellular telephone users in Singapore: A community study" (Environmental Health Perspectives (2000) vol. 108 (1059-1062))." *Environmental Health Perspectives* 109 (2).
- Chia, S. E., H. P. Chia, and J. S. Tan. 2000. "Prevalence of headache among handheld cellular telephone users in Singapore: A community study." *Environmental Health Perspectives* 108 (11):1059-1062.
- Choi, S. B., M. K. Kwon, J. W. Chung, J. S. Park, K. Chung, and D. W. Kim. 2014. "Effects of short-term radiation emitted by WCDMA mobile phones on teenagers and adults." *BMC Public Health* 14 (1). doi: 10.1186/1471-2458-14-438.
- Cinel, C., R. Russo, A. Boldini, and E. Fox. 2008. "Exposure to mobile phone electromagnetic fields and subjective symptoms: A double-blind study." *Psychosomatic Medicine* 70 (3):345-348. doi: 10.1097/PSY.0b013e31816521f1.
- Cioffi, D. 1991. "Beyond attentional strategies: A cognitive-perceptual model of somatic interpretation." *Psychological Bulletin* 109 (1):25-41.
- CIRC. 2013. "IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans." In, edited by WHO Press.
- Coggon, D. 2012. "Letter to the editor: Electromagnetic hypersensitivity." *International Journal of Neuroscience* 122 (7):405. doi: 10.3109/00207454.2012.675377.
- COPIC. 2013. "Diminution de l'exposition aux ondes électromagnétiques émises par les antennes-relais de téléphonie mobile." *RAPPORT DE SYNTHÈSE DES EXPERIMENTATIONS DU COPIC*.
- Cosquer, B., A. P. Vasconcelos, J. Frohlich, and J. C. Cassel. 2005. "Blood-brain barrier and electromagnetic fields: effects of scopolamine methylbromide on working memory after whole-body exposure to 2.45 GHz microwaves in rats." *Behav Brain Res* 161 (2):229-37. doi: 10.1016/j.bbr.2005.02.025.
- Costa, A., V. Branca, C. Minoia, P. D. Pigatto, and G. Guzzi. 2010. "Heavy metals exposure and electromagnetic hypersensitivity." *Science of the Total Environment* 408 (20):4919-4920. doi: 10.1016/j.scitotenv.2010.06.045.
- Crasson, M. 2005. "L'hypersensibilité à l'Électricité: Une approche multidisciplinaire pour un problème multifactoriel. Revue de la littérature." *Revue Europeene de Psychologie Appliquee* 55 (1):51-67. doi: 10.1016/j.erap.2004.10.001.
- Croft, R. J., D. L. Hamblin, J. Spong, A. W. Wood, R. J. McKenzie, and C. Stough. 2008. "The effect of mobile phone electromagnetic fields on the alpha rhythm of human electroencephalogram." *Bioelectromagnetics* 29 (1):1-10. doi: 10.1002/bem.20352.
- Croft, R. J., S. Leung, R. J. McKenzie, S. P. Loughran, S. Iskra, D. L. Hamblin, and N. R. Cooper. 2010. "Effects of 2G and 3G mobile phones on human alpha rhythms: Resting EEG in adolescents, young adults, and the elderly." *Bioelectromagnetics* 31 (6):434-44. doi: 10.1002/bem.20583.
- CSTB. 2015. "Evaluation de l'efficacité des dispositifs de protection utilisés contre les champs électromagnétiques." N/Réf. DSC 2015-128/FG/GC.
- Cullen, M. R. 1987. "Multiple chemical sensitivities: summary and directions for future investigators." *Occupational medicine (Philadelphia, Pa.)* 2 (4):801-804.
- Curcio, G., M. Ferrara, F. Moroni, G. D'Inzeo, M. Bertini, and L. De Gennaro. 2005. "Is the brain influenced by a phone call? An EEG study of resting wakefulness." *Neurosci Res* 53 (3):265-70. doi: 10.1016/j.neures.2005.07.003.
- Dahmen, N., D. Ghezel-Ahmadi, and A. Engel. 2009. "Blood laboratory findings in patients suffering from self-perceived electromagnetic hypersensitivity (EHS)." *Bioelectromagnetics* 30 (4):299-306. doi: 10.1002/bem.20486.
- Danker-Hopfe, H., H. Dorn, A. Bahr, P. Anderer, and C. Sauter. 2011. "Effects of electromagnetic fields emitted by mobile phones (GSM 900 and WCDMA/UMTS) on the macrostructure of sleep." *J Sleep Res* 20 (1 Pt 1):73-81. doi: 10.1111/j.1365-2869.2010.00850.x.
- Darien IL., Académie Américaine de Médecine du sommeil (American Academy of Sleep Medicine). 2005. "International clarification of sleep disorders revised diagnostic and coding manual (AASM-ICSD)." p 298.

- Davidson, P. R., and K. C. H. Parker. 2001. "Eye movement desensitization and reprocessing (emdr): A meta-analysis." *Journal of Consulting and Clinical Psychology* 69 (2):305-316. doi: 10.1037//0022-006X.69.2.305.
- Davis, C. C., and Q. Balzano. 2010. "The brain is not a radio receiver for wireless phone signals: Human tissue does not demodulate a modulated radiofrequency carrier." *Comptes Rendus Physique* 11 (9-10):585-591. doi: 10.1016/j.crhy.2010.09.002.
- de Graaff, M. B., and Christian Bröer. 2012. "'We are the canary in a coal mine': Establishing a disease category and a new health risk." *Health, Risk & Society* 14 (2):129-147. doi: 10.1080/13698575.2012.661040.
- De Luca, C., J. Chung Sheun Thai, D. Raskovic, E. Cesareo, D. Caccamo, A. Trukhanov, and L. Korkina. 2014. "Metabolic and genetic screening of electromagnetic hypersensitive subjects as a feasible tool for diagnostics and intervention." *Mediators of Inflammation* 2014. doi: 10.1155/2014/924184.
- De Luca, C., A. Gugliandolo, C. Calabrò, M. Currò, R. Ientile, D. Raskovic, L. Korkina, and D. Caccamo. 2015. "Role of polymorphisms of inducible nitric oxide synthase and endothelial nitric oxide synthase in idiopathic environmental intolerances." *Mediators of Inflammation* 2015. doi: 10.1155/2015/245308.
- de Luca, C., D. Raskovic, V. Pacifico, J. C. S. Thai, and L. Korkina. 2011. "The search for reliable biomarkers of disease in multiple chemical sensitivity and other environmental intolerances." *International Journal of Environmental Research and Public Health* 8 (7):2770-2797. doi: 10.3390/ijerph8072770.
- De Ridder, D., A. B. Elgoyhen, R. Romo, and B. Langguth. 2011. "Phantom percepts: tinnitus and pain as persisting aversive memory networks." *Proc Natl Acad Sci U S A* 108 (20):8075-80. doi: 10.1073/pnas.1018466108.
- Diekelmann, S., and J. Born. 2010. "The memory function of sleep." *Nature Reviews Neuroscience* 11 (2):114-126. doi: 10.1038/nrn2762.
- Dieudonné, M. 2016. "Does electromagnetic hypersensitivity originate from nocebo responses? Indications from a qualitative study." *Bioelectromagnetics* 37 (1):14-24. doi: 10.1002/bem.21937.
- Dobson, J. 2004. Magnetic iron compounds in neurological disorders. In *Annals of the New York Academy of Sciences*.
- Dömötör, Z., B. K. Doering, and F. Koteles. 2016. "Dispositional aspects of body focus and idiopathic environmental intolerance attributed to electromagnetic fields (IEI-EMF)." *Scand J Psychol* 57 (2):136-43. doi: 10.1111/sjop.12271.
- Driscoll, I., D. A. Hamilton, R. A. Yeo, W. M. Brooks, and R. J. Sutherland. 2005. "Virtual navigation in humans: The impact of age, sex, and hormones on place learning." *Hormones and Behavior* 47 (3):326-335. doi: 10.1016/j.yhbeh.2004.11.013.
- Dunn, J. R., M. Fuller, J. Zoeger, J. Dobson, F. Heller, J. Hammann, E. Caine, and B. M. Moskowitz. 1995. "Magnetic material in the human hippocampus." *Brain Research Bulletin* 36 (2):149-153. doi: 10.1016/0361-9230(94)00182-Z.
- Durmer, J. S., and D. F. Dinges. 2005. "Neurocognitive consequences of sleep deprivation." *Seminars in Neurology* 25 (1):117-129. doi: 10.1055/s-2005-867080.
- Dworsky, L. N. 2002. "Comment: 'Project NEMESIS: Perception of a 50 Hz electric and magnetic field at low intensities'." *Bioelectromagnetics* 23 (7):553-4; discussion 555. doi: 10.1002/bem.10064.
- Eberhardt, J. L., B. R. Persson, A. E. Brun, L. G. Salford, and L. O. Malmgren. 2008. "Blood-brain barrier permeability and nerve cell damage in rat brain 14 and 28 days after exposure to microwaves from GSM mobile phones." *Electromagn Biol Med* 27 (3):215-29. doi: 10.1080/15368370802344037.
- Eder, S. H. K., H. Cadiou, A. Muhamad, P. A. McNaughton, J. L. Kirschvink, and M. Winklhofer. 2012. "Magnetic characterization of isolated candidate vertebrate magnetoreceptor cells." *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 109 (30):12022-12027. doi: 10.1073/pnas.1205653109.
- Eek, F., J. Merlo, U. Gerdtham, and T. Lithman. 2009. "Health care utilisation and attitudes towards health care in subjects reporting environmental annoyance from electricity and chemicals." *J Environ Public Health* 2009:106389. doi: 10.1155/2009/106389.
- El-Överkansligas, Riksförbund. 2007. Hospital Accommodations of EHS Patients In Sweden.

- Eldridge-Thomas, B., and G. J. Rubin. 2013. "Idiopathic Environmental Intolerance Attributed to Electromagnetic Fields: A Content Analysis of British Newspaper Reports." *PLoS ONE* 8 (6). doi: 10.1371/journal.pone.0065713.
- Eltiti, S., D. Wallace, A. Ridgewell, K. Zougkou, R. Russo, F. Sepulveda, D. Mirshekar-Syahkal, P. Rasor, R. Deeble, and E. Fox. 2007a. "Does short-term exposure to mobile phone base station signals increase symptoms in individuals who report sensitivity to electromagnetic fields? A double-blind randomized provocation study." *Environmental Health Perspectives* 115 (11):1603-1608. doi: 10.1289/ehp.10286.
- Eltiti, S., D. Wallace, R. Russo, and E. Fox. 2015. "Aggregated data from two double-blind base station provocation studies comparing individuals with idiopathic environmental intolerance with attribution to electromagnetic fields and controls." *Bioelectromagnetics* 36 (2):96-107. doi: 10.1002/bem.21892.
- Eltiti, S., D. Wallace, K. Zougkou, R. Russo, S. Joseph, P. Rasor, and E. Fox. 2007b. "Development and evaluation of the electromagnetic hypersensitivity questionnaire." *Bioelectromagnetics* 28 (2):137-151. doi: 10.1002/bem.20279.
- Eris, A. H., H. S. Kiziltan, I. Meral, H. Genc, M. Trabzon, H. Seyithanoglu, B. Yagci, and O. Uysal. 2015. "Effect of Short-term 900 MHz low level electromagnetic radiation exposure on blood serotonin and glutamate levels." *Bratislava Medical Journal* 116 (2):101-103. doi: 10.4149/BLL_2015_019.
- Esmekaya, M. A., C. Ozer, and N. Seyhan. 2011. "900 MHz pulse-modulated radiofrequency radiation induces oxidative stress on heart, lung, testis and liver tissues." *Gen Physiol Biophys* 30 (1):84-9. doi: 10.4149/gpb_2011_01_84.
- Fatahi, Mahsa, Liliana Ramona Demenescu, and Oliver Speck. 2016. "Subjective perception of safety in healthy individuals working with 7 T MRI scanners: a retrospective multicenter survey." *Magnetic Resonance Materials in Physics, Biology and Medicine* 29 (3):379-387. doi: 10.1007/s10334-016-0527-6.
- Feng, J., Z. Zhang, X. Wu, A. Mao, F. Chang, X. Deng, H. Gao, C. Ouyang, K. J. Dery, K. Le, J. Longmate, C. Marek, R. P. St Amand, T. G. Krontiris, and J. E. Shively. 2013. "Discovery of potential new gene variants and inflammatory cytokine associations with fibromyalgia syndrome by whole exome sequencing." *PLoS One* 8 (6):e65033. doi: 10.1371/journal.pone.0065033.
- Fischer, A., F. Sananbenesi, X. Wang, M. Dobbin, and L. H. Tsai. 2007. "Recovery of learning and memory is associated with chromatin remodelling." *Nature* 447 (7141):178-82. doi: 10.1038/nature05772.
- Flodin, U., A. Seneby, and C. Tegenfeldt. 2000. "Provocation of electric hypersensitivity under everyday conditions." *Scand J Work Environ Health* 26 (2):93-8.
- Foley, L. E., R. J. Gegear, and S. M. Reppert. 2011. "Human cryptochrome exhibits light-dependent magnetosensitivity." *Nature Communications* 2 (1). doi: 10.1038/ncomms1364.
- Fox E., Eltiti S., Russo R., Mirshekar D., Sepulveda F., Wallace D., Zougkou K., Ridgewell A., Deeble R., Joseph S., Rasor P. 2007. "Hypersensitivity Symptoms Associated with Electromagnetic Field Exposure " *Mobile Telecommunications and Health Research Programme*.
- Franke, H., E. B. Ringelstein, and F. Stogbauer. 2005b. "Electromagnetic fields (GSM 1800) do not alter blood-brain barrier permeability to sucrose in models in vitro with high barrier tightness." *Bioelectromagnetics* 26 (7):529-35. doi: 10.1002/bem.20123.
- Franke, H., J. Streckert, A. Bitz, J. Goeke, V. Hansen, E. B. Ringelstein, H. Nattkamper, H. J. Galla, and F. Stogbauer. 2005a. "Effects of Universal Mobile Telecommunications System (UMTS) electromagnetic fields on the blood-brain barrier in vitro." *Radiat Res* 164 (3):258-69.
- Frei, P., E. Mohler, C. Braun-Fahrlander, J. Fröhlich, G. Neubauer, and M. Röösli. 2012. "Cohort study on the effects of everyday life radio frequency electromagnetic field exposure on non-specific symptoms and tinnitus." *Environment International* 38 (1):29-36. doi: 10.1016/j.envint.2011.08.002.
- Frick, U, M Mayer, S Hauser, H Binder, R Rosner, and P. Eichhammer. 2006b. "Development of a German-language measuring instrument for electrosmog complaints / Entwicklung eines deutschsprachigen Messinstruments für "Elektrosmog-Beschwerden. " *Umweltmedizin in Forschung und Praxis*. 11 :11-22.
- Frick, U., M. Mayer, S. Hauser, H. Binder, R. Rosner, and P. Eichhammer. 2006a. "Development of a standardized questionnaire to measure EMF-related symptoms in the general population - A psychometric analysis." *Umweltmedizin in Forschung und Praxis* 11 (2):103-113.

- Frick, U., J. Rehm, and P. Eichhammer. 2002. "Risk perception, somatization, and self report of complaints related to electromagnetic fields - A randomized survey study." *International Journal of Hygiene and Environmental Health* 205 (5):353-360.
- Frick, Ulrich, Alexander Kharraz, Simone Hauser, Rainer Wiegand, Jürgen Rehm, Ulla von Kovatsits, and Peter Eichhammer. 2005. "Comparison perception of singular transcranial magnetic stimuli by subjectively electrosensitive subjects and general population controls." *Bioelectromagnetics* 26 (4):287-298. doi: 10.1002/bem.20085.
- Furubayashi, Toshiaki, Akira Ushiyama, Yasuo Terao, Yoko Mizuno, Kei Shirasawa, Pornanong Pongpaibool, Ally Y. Simba, Kanako Wake, Masami Nishikawa, Kaori Miyawaki, Asako Yasuda, Mitsunori Uchiyama, Hitomi Kobayashi Yamashita, Hiroshi Masuda, Shogo Hirota, Miyuki Takahashi, Tomoko Okano, Satomi Inomata-Terada, Shigeru Sokejima, Eiji Maruyama, Soichi Watanabe, Masao Taki, Chiyoji Ohkubo, and Yoshikazu Ugawa. 2009. "Effects of short-term W-CDMA mobile phone base station exposure on women with or without mobile phone related symptoms." *Bioelectromagnetics* 30 (2):100-113. doi: 10.1002/bem.20446.
- Gálvez, N., B. Fernández, P. Sánchez, R. Cuesta, M. Ceolín, M. Clemente-León, S. Trasobares, M. López-Haro, J. J. Calvino, O. Stéphan, and J. M. Domínguez-Vera. 2008. "Comparative structural and chemical studies of ferritin cores with gradual removal of their iron contents." *Journal of the American Chemical Society* 130 (25):8062-8068. doi: 10.1021/ja800492z.
- Gangi, S., and O. Johansson. 2000. "A theoretical model based upon mast cells and histamine to explain the recently proclaimed sensitivity to electric and/or magnetic fields in humans." *Med Hypotheses* 54 (4):663-71. doi: 10.1054/mehy.1999.0923.
- Gardner, R. M., J. F. Nyland, S. L. Evans, S. B. Wang, K. M. Doyle, C. M. Crainiceanu, and E. K. Silbergeld. 2009. "Mercury induces an unopposed inflammatory response in human peripheral blood mononuclear cells in vitro." *Environmental Health Perspectives* 117 (12):1932-1938. doi: 10.1289/ehp.0900855.
- Gegear, R. J., L. E. Foley, A. Casselman, and S. M. Reppert. 2010. "Animal cryptochromes mediate magnetoreception by an unconventional photochemical mechanism." *Nature* 463 (7282):804-807. doi: 10.1038/nature08719.
- Genuis, S. J., and C. T. Lipp. 2012. "Electromagnetic hypersensitivity: Fact or fiction?" *Science of the Total Environment* 414:103-112. doi: 10.1016/j.scitotenv.2011.11.008.
- Gesundes-Wohnen-MCS. 2011. MCS Prospekt dritte Auflage. In *Description du projet*.
- Gesundes-Wohnen-MCS. 2015a. Grundrisse und Mieten. In *Plans et loyers*.
- Geuter, S., and C. Buchel. 2013. "Facilitation of pain in the human spinal cord by nocebo treatment." *J Neurosci* 33 (34):13784-90. doi: 10.1523/jneurosci.2191-13.2013.
- Ghezel-Ahmadi, D. 2010b. "Response to Costa et al." *Science of the Total Environment* 408 (20):4921. doi: 10.1016/j.scitotenv.2010.06.044.
- Ghezel-Ahmadi, D., A. Engel, J. Weidemann, L. T. Budnik, X. Baur, U. Frick, S. Hauser, and N. Dahmen. 2010a. "Heavy metal exposure in patients suffering from electromagnetic hypersensitivity." *Science of the Total Environment* 408 (4):774-778. doi: 10.1016/j.scitotenv.2009.11.023.
- Gilbert, Claude. 2003. "La fabrique des risques." *Cahiers internationaux de sociologie* 1/2003 n° 114:55-72. doi: 10.3917/cis.114.0055.
- Girel, M. 2014. *Agnotologie. Mode d'emploi, Critique* n° 799, 2014.
- Goldberg, D. 1992. "General Health Questionnaire (GHQ-12)." *Windsor, UK: NFER-Nelson* 1992.
- Goldberg, L. R. 1990. "An alternative "description of personality": the big-five factor structure." *J Pers Soc Psychol* 59 (6):1216-29.
- Goldberg, LR. 1993. "The structure of phenotypic personality traits." *Am Psychol* 48(1):26-34.
- Gould, J. L., and K. P. Able. 1981. "Human homing: an elusive phenomenon." *Science* 212 (4498):1061-1063.
- Gräff, J., and I. M. Mansuy. 2008. "Epigenetic codes in cognition and behaviour." *Behavioural Brain Research* 192 (1):70-87. doi: 10.1016/j.bbr.2008.01.021.
- Grafstrom, G., H. Nittby, A. Brun, L. Malmgren, B. R. Persson, L. G. Salford, and J. Eberhardt. 2008. "Histopathological examinations of rat brains after long-term exposure to GSM-900 mobile phone radiation." *Brain Res Bull* 77 (5):257-63. doi: 10.1016/j.brainresbull.2008.08.004.

- Greco, M. 2012. "The classification and nomenclature of 'medically unexplained symptoms': conflict, performativity and critique." *Soc Sci Med* 75 (12):2362-9. doi: 10.1016/j.socscimed.2012.09.010.
- Greville-Harris, M., and P. Dieppe. 2015. "Bad is more powerful than good: the nocebo response in medical consultations." *Am J Med* 128 (2):126-9. doi: 10.1016/j.amjmed.2014.08.031.
- Hagström, M., J. Auranen, and R. Ekman. 2013. "Electromagnetic hypersensitive Finns: Symptoms, perceived sources and treatments, a questionnaire study." *Pathophysiology* 20 (2):117-122. doi: 10.1016/j.pathophys.2013.02.001.
- Hagström, M., J. Auranen, O. Johansson, and R. Ekman. 2012. "Reducing electromagnetic irradiation and fields alleviates experienced health hazards of VDU work." *Pathophysiology* 19 (2):81-87. doi: 10.1016/j.pathophys.2012.01.005.
- Hardell, L., M. Carlberg, F. Söderqvist, K. Hardell, H. Björnfoth, B. Van Bavel, and G. Lindstrom. 2008. "Increased concentrations of certain persistent organic pollutants in subjects with self-reported electromagnetic hypersensitivity-A pilot study." *Electromagnetic Biology and Medicine* 27 (2):197-203. doi: 10.1080/15368370802089053.
- Harlacher, U., and et al. 1998. "Electric Hypersensitivity : An Explanatory Model, Some Characteristics of Sufferers and Effects of Psychological Treatment with Cognitive Behavioural Methods (in Swedish); ." PhD Diss, Lund, University of Lund. .
- Harvey, C. J., P. Gehrman, and C. A. Espie. 2014. "Who is predisposed to insomnia: a review of familial aggregation, stress-reactivity, personality and coping style." *Sleep Med Rev* 18 (3):237-47. doi: 10.1016/j.smr.2013.11.004.
- Hata, K., H. Yamaguchi, G. Tsurita, S. Watanabe, K. Wake, M. Taki, S. Ueno, and H. Nagawa. 2005. "Short term exposure to 1439 MHz pulsed TDMA field does not alter melatonin synthesis in rats." *Bioelectromagnetics* 26 (1):49-53. doi: 10.1002/bem.20080.
- Hauser, W., E. Hansen, and P. Enck. 2012. "Nocebo phenomena in medicine: their relevance in everyday clinical practice." *Dtsch Arztebl Int* 109 (26):459-65. doi: 10.3238/arztebl.2012.0459.
- Havas, M., J. Marrongelle, B. Pollner, E. Kelley, C.R.G. Rees, and L. Tully. 2010. "Provocation study using heart rate variability shows microwave radiation from DECT phone affects autonomic nervous system." *European Journal of Oncology*.
- Havas, M., and J. Marrongelle. 2013. "Replication of heart rate variability provocation study with 2.4-GHz cordless phone confirms original findings." *Electromagnetic Biology and Medicine* 32 (2):253-266. doi: 10.3109/15368378.2013.776437.
- Havas, M., and J. Marrongelle. 2014. "Statement of retraction: "Replication of heart rate variability provocation study with 2.4-GHz cordless phone confirms original findings" (Electromagnetic Biology and Medicine (2013) 32, 2, (253-66) DOI: 10.3109/15368378.2013.776437)." *Electromagnetic Biology and Medicine* 33 (4):335. doi: 10.3109/15368378.2014.978190.
- Hech, K.; Balzer, HU. 1997. Biologische Wirkungen Elektromagnetischer Felder im Frequenzbereich 0 – 3 GHz auf den Menschen, Studie russischer Literatur von 1960 – 1996. I.S.F. Institut für Stressforschung Forschung und Entwicklung.
- Hedendahl, L., M. Carlberg, and L. Hardell. 2015. "Electromagnetic hypersensitivity-an increasing challenge to the medical profession." *Reviews on Environmental Health* 30 (4):209-215. doi: 10.1515/reveh-2015-0012.
- Heinrich, S., A. Ossig, S. Schlittmeier, and J. Hellbrück. 2007. "Electromagnetic fields of a UMTS mobile phone base station and possible effects on health - Results from an experimental field study." *Umweltmedizin in Forschung und Praxis* 12 (3):171-180.
- Heinrich, S., S. Thomas, C. Heumann, R. von Kries, and K. Radon. 2010. "Association between exposure to radiofrequency electromagnetic fields assessed by dosimetry and acute symptoms in children and adolescents: A population based cross-sectional study." *Environmental Health: A Global Access Science Source*:75. doi: 10.1186/1476-069X-9-75.
- Heinrich, S., S. Thomas, C. Heumann, R. von Kries, and K. Radon. 2011. "The impact of exposure to radio frequency electromagnetic fields on chronic well-being in young people - A cross-sectional study based on personal dosimetry." *Environment International* 37 (1):26-30. doi: 10.1016/j.envint.2010.06.008.
- Heiss, W. D. 2014. "Radionuclide imaging in ischemic stroke." *Journal of Nuclear Medicine* 55 (11):1831-1841. doi: 10.2967/jnumed.114.145003.

- Hetherington, L. H., and J. M. Battershill. 2013. "Review of evidence for a toxicological mechanism of idiopathic environmental intolerance." *Human and Experimental Toxicology* 32 (1):3-17. doi: 10.1177/0960327112457189.
- Hietanen, M., A. M. Hämäläinen, and T. Husman. 2002. "Hypersensitivity Symptoms Associated with Exposure to Cellular Telephones: No Causal Link." *Bioelectromagnetics* 23 (4):264-270. doi: 10.1002/bem.10016.
- Hill, A. B. 1965. "THE ENVIRONMENT AND DISEASE: ASSOCIATION OR CAUSATION?" *Proceedings of the Royal Society of Medicine* 58:295-300.
- Hillert, L. 2004. "Cognitive behavioral therapy for patients who report electrical hypersensitivity" In: *Hansson Mild K, Repacholi M, van Deventer E, Ravazzani P, editors. International Workshop on EMF Hypersensitivity, Prague, Czech Republic 2004. Geneva: WHO Press.*
- Hillert, L., T. Åkerstedt, A. Lowden, C. Wiholm, N. Kuster, S. Ebert, C. Boutry, S. D. Moffat, M. Berg, and B. B. Arnetz. 2008. "The effects of 884 MHz GSM wireless communication signals on headache and other symptoms: An experimental provocation study." *Bioelectromagnetics* 29 (3):185-196. doi: 10.1002/bem.20379.
- Hillert, L., N. Berglind, B. B. Arnetz, and T. Bellander. 2002a. "Prevalence of self-reported hypersensitivity to electric or magnetic fields in a population-based questionnaire survey." *Scandinavian Journal of Work, Environment and Health* 28 (1):33-41.
- Hillert, L., B. K. Hedman, B. F. Dölling, and B. B. Arnetz. 1998. "Cognitive behavioural therapy for patients with electric sensitivity - A multidisciplinary approach in a controlled study." *Psychotherapy and Psychosomatics* 67 (6):302-310.
- Hillert, L., B. K. Hedman, E. Söderman, and B. B. Arnetz. 1999. "Hypersensitivity to electricity: Working definition and additional characterization of the syndrome." *Journal of Psychosomatic Research* 47 (5):429-438. doi: 10.1016/S0022-3999(99)00048-3.
- Hillert, L., B. Kolmodin-Hedman, P. Eneroth, and B. B. Arnetz. 2001. "The effect of supplementary antioxidant therapy in patients who report hypersensitivity to electricity: a randomized controlled trial." *MedGenMed : Medscape general medicine* 3 (2):11.
- Hillert, L., P. Savlin, A. L. Berg, A. Heidenberg, and B. Kolmodin-Hedman. 2002b. "Environmental illness - Effectiveness of a salutogenic group-intervention programme." *Scandinavian Journal of Public Health* 30 (3):166-175. doi: 10.1080/14034940210133852.
- Hocking, B. 1998. "Preliminary report: Symptoms associated with mobile phone use." *Occupational Medicine* 48 (6):357-360. doi: 10.1093/occmed/48.6.357.
- Homberg, J. R., and K. P. Lesch. 2011. "Looking on the bright side of serotonin transporter gene variation." *Biol Psychiatry* 69 (6):513-9. doi: 10.1016/j.biopsych.2010.09.024.
- Homberg, J. R., D. Schubert, E. Asan, and E. N. Aron. 2016. "Sensory processing sensitivity and serotonin gene variance: Insights into mechanisms shaping environmental sensitivity." *Neurosci Biobehav Rev* 71:472-483. doi: 10.1016/j.neubiorev.2016.09.029.
- Huss, A., M. Murbach, I. van Moorselaar, N. Kuster, R. van Strien, H. Kromhout, R. Vermeulen, and P. Slottje. 2016. "Novel exposure Units for at-home personalized testing of electromagnetic sensibility." *Bioelectromagnetics* 37 (1):62-68. doi: 10.1002/bem.21943.
- Huss, A., and M. Rösli. 2006. "Consultations in primary care for symptoms attributed to electromagnetic fields - A survey among general practitioners." *BMC Public Health* 6. doi: 10.1186/1471-2458-6-267.
- Hutter, H. P., H. Moshhammer, P. Wallner, M. Cartellieri, D. M. Denk-Linnert, M. Katzinger, K. Ehrenberger, and M. Kundi. 2010. "Tinnitus and mobile phone use." *Occupational and Environmental Medicine* 67 (12):804-808. doi: 10.1136/oem.2009.048116.
- Hutter, H. P., H. Moshhammer, P. Wallner, and M. Kundi. 2006. "Subjective symptoms, sleeping problems, and cognitive performance in subjects living near mobile phone base stations." *Occup Environ Med* 63 (5):307-13. doi: 10.1136/oem.2005.020784.
- Icnirp. 1998. "Icnirp guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)." *Health Physics* 74 (4):494-522.
- Icnirp. 2002. "General approach to protection against non- ionizing radiation protection." *Health Physics* 82(4):540-548.
- Icnirp. 2003. *Exposure to Static and Low Frequency Electromagnetic Fields, Biological Effects and Health Consequences (0-100 kHz) - Review of the Scientific Evidence and Health Consequences.*

- ICNIRP. 2010. "ICNIRP GUIDELINES for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1Hz - 100 kHz)" *Health Physics* 99(6) : 818-836.
- Inserm. 2004. *Expertise collective Inserm. Psychothérapies : Trois approches évaluées.*
- IPCS/WHO, International Programme on Chemical Safety/World Health Organization. 1996. "Conclusions and recommendations of a workshop on multiple chemical sensitivities (MCS)." *Regulatory Toxicology Pharmacology* 2 4: S188-S189.
- Irlenbusch, L., B. Bartsch, J. Cooper, I. Herget, B. Marx, J. Raczek, and F. Thoss. 2007. "Influence of a 902.4 MHz GSM signal on the human visual system: investigation of the discrimination threshold." *Bioelectromagnetics* 28 (8):648-54. doi: 10.1002/bem.20344.
- Irvine, N. 2005b. Definition, Epidemiology and Management of Electrical Sensitivity - Report for the Radiation Protection Division of the Health Protection Agency edited by HPA-RPD-010: HPA.
- Jagiellowicz, J., X. Xu, A. Aron, E. Aron, G. Cao, T. Feng, and X. Weng. 2011. "The trait of sensory processing sensitivity and neural responses to changes in visual scenes." *Soc Cogn Affect Neurosci* 6 (1):38-47. doi: 10.1093/scan/nsq001.
- Jastreboff, P. J., and J. W. P. azell. 1993. "A neurophysiological approach to tinnitus: Clinical implications." *British Journal of Audiology* 27 (1):7-17. doi: 10.3109/03005369309077884.
- Jensen, K. B., R. Loitole, E. Kosek, F. Petzke, S. Carville, P. Fransson, H. Marcus, S. C. Williams, E. Choy, Y. Mainguy, O. Vitton, R. H. Gracely, R. Gollub, M. Ingvar, and J. Kong. 2012. "Patients with fibromyalgia display less functional connectivity in the brain's pain inhibitory network." *Mol Pain* 8:32. doi: 10.1186/1744-8069-8-32.
- Jirtle, R. L., and M. K. Skinner. 2007. "Environmental epigenomics and disease susceptibility." *Nature Reviews Genetics* 8 (4):253-262. doi: 10.1038/nrg2045.
- Johansson, A., S. Forsgren, B. Stenberg, J. Wilén, N. Kalezić, and M. Sandström. 2008. "No effect of mobile phone-like RF exposure on patients with atopic dermatitis." *Bioelectromagnetics* 29 (5):353-362. doi: 10.1002/bem.20402.
- Johansson, A., S. Nordin, M. Heiden, and M. Sandström. 2010. "Symptoms, personality traits, and stress in people with mobile phone-related symptoms and electromagnetic hypersensitivity." *Journal of Psychosomatic Research* 68 (1):37-45. doi: 10.1016/j.jpsychores.2009.06.009.
- Johansson, O. 2006. "Electrohypersensitivity: state-of-the-art of a functional impairment." *Electromagn Biol Med* 25 (4):245-58. doi: 10.1080/15368370601044150.
- Johansson, O. 2009. "Disturbance of the immune system by electromagnetic fields-A potentially underlying cause for cellular damage and tissue repair reduction which could lead to disease and impairment." *Pathophysiology* 16 (2-3):157-77. doi: 10.1016/j.pathophys.2009.03.004.
- Johansson, O., S. Gangi, Y. Liang, K. Yoshimura, C. Jing, and P. Y. Liu. 2001. "Cutaneous mast cells are altered in normal healthy volunteers sitting in front of ordinary TVs/PCs--results from open-field provocation experiments." *J Cutan Pathol* 28 (10):513-9.
- Johns, M. W. 1991. "A new method for measuring daytime sleepiness: the Epworth sleepiness scale." *Sleep* 14 (6):540-5.
- Johnson, J. V., and E. M. Hall. 1988. "Job strain, work place social support, and cardiovascular disease: a cross-sectional study of a random sample of the Swedish working population." *Am J Public Health* 78 (10):1336-42.
- Kantz, J., J. Müller, K. P. Haderler, F. M. Landstorfer, and F. Lang. 2005. "Insensitivity of cardiovascular function to low power cm-/mm-microwaves." *International Journal of Environmental Health Research* 15 (3):207-215. doi: 10.1080/09603120500105695.
- Kasser, Ueli , and Daniel Savi. 2013. Baustofftests für MCS Kranke. In *Tests des matériaux par des sujets MCS.*
- Kato, Y., and O. Johansson. 2012. "Reported functional impairments of electrohypersensitive Japanese: A questionnaire survey." *Pathophysiology* 19 (2):95-100. doi: 10.1016/j.pathophys.2012.02.002.
- Kelfkens, G., C. Baliatsas, J. Bolte, and I. Van Kamp. 2012. "ECOLOG based estimation of exposure to mobile phone base stations in the Netherlands." In: *Proceedings: 7th International Workshop on Biological Effects of EMF. Electromagnetic Research Group (EMRG), Valletta, ISBN 978-99957-0-361-5.*

- Keltner, J. R., A. Furst, C. Fan, R. Redfern, B. Inglis, and H. L. Fields. 2006. "Isolating the modulatory effect of expectation on pain transmission: a functional magnetic resonance imaging study." *J Neurosci* 26 (16):4437-43. doi: 10.1523/jneurosci.4463-05.2006.
- Kety, S. S., and C. F. Schmidt. 1948. "The Effects of Altered Arterial Tensions of Carbon Dioxide and Oxygen on Cerebral Blood Flow and Cerebral Oxygen Consumption of Normal Young Men." *J Clin Invest* 27 (4):484-92.
- Kim, D. W., J. L. Choi, K. C. Nam, D. I. Yang, and M. K. Kwon. 2012. "Origins of electromagnetic hypersensitivity to 60 Hz magnetic fields: A provocation study." *Bioelectromagnetics* 33 (4):326-33. doi: 10.1002/bem.20711.
- Kim, S. K., J. L. Choi, M. K. Kwon, J. Y. Choi, and D. W. Kim. 2013. "Effects of 60 Hz magnetic fields on teenagers and adults." *Environmental Health: A Global Access Science Source* 12 (1). doi: 10.1186/1476-069X-12-42.
- Kirschvink, J. L., A. Kobayashi-Kirschvink, and B. J. Woodford. 1992. "Magnetite biomineralization in the human brain." *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 89 (16):7683-7687.
- Knave, B. 1994. "Electric and magnetic fields and health outcomes - An overview." *Scandinavian Journal of Work, Environment and Health* 20 (SPEC. ISS.):78-89.
- Knave, B. G., R. I. Wibom, M. Voss, L. D. Hedstrom, and U. O. Bergqvist. 1985. "Work with video display terminals among office employees. I. Subjective symptoms and discomfort." *Scand J Work Environ Health* 11 (6):457-66.
- Ko, C. H., and J. S. Takahashi. 2006. "Molecular components of the mammalian circadian clock." *Human Molecular Genetics* 15 (SUPPL. 2). doi: 10.1093/hmg/ddl207.
- Koivisto, M., C. M. Krause, A. Revonsuo, M. Laine, and H. Hämäläinen. 2000b. "The effects of electromagnetic field emitted by GSM phones on working memory." *NeuroReport* 11 (8):1641-1643.
- Koivisto, M., A. Revonsuo, C. Krause, C. Haarala, L. Sillanmäki, M. Laine, and H. Hämäläinen. 2000a. "Effects of 902 MHz electromagnetic field emitted by cellular telephones on response times in humans." *NeuroReport* 11 (2):413-415.
- Kolk, A. M., G. J. F. P. Hanewald, S. Schagen, and C. M. T. Gijssbers Van Wijk. 2003. "A symptom perception approach to common physical symptoms." *Social Science and Medicine* 57 (12):2343-2354. doi: 10.1016/S0277-9536(02)00451-3.
- Korpinen, L. H., and R. J. Pääkkönen. 2009b. "Self-report of physical symptoms associated with using mobile phones and other electrical devices." *Bioelectromagnetics* 30 (6):431-437. doi: 10.1002/bem.20500.
- Koteles, F., and G. Bardos. 2009. "[Perceptual characteristics of drugs and their potential effects]." *Psychiatr Hung* 24 (4):282-95.
- Köteles, F., R. Szemerszky, M. Gubányi, J. Körmendi, C. Szekrényesi, R. Lloyd, L. Molnár, O. Drozdovszky, and G. Bárdos. 2013a. "Idiopathic environmental intolerance attributed to electromagnetic fields (IEI-EMF) and electrosensitivity (ES) - Are they connected?" *International Journal of Hygiene and Environmental Health* 216 (3):362-370. doi: 10.1016/j.ijheh.2012.05.007.
- Kowalczyk, Christine, Gemma Yarwood, Roger Blackwell, Marisa Priestner, Zenon Sienkiewicz, Simon Bouffler, Iftekhar Ahmed, Raed Abd-Alhameed, Peter Excell, Vildana Hodzic, Christopher Davis, Robert Gammon, and Quirino Balzano. 2010. "Absence of nonlinear responses in cells and tissues exposed to RF energy at mobile phone frequencies using a doubly resonant cavity." *Bioelectromagnetics* 31 (7):556-565. doi: 10.1002/bem.20597.
- Kowall, B., J. Breckenkamp, and G. Berg-Beckhoff. 2015. "General practitioners using complementary and alternative medicine differ from general practitioners using conventional medicine in their view of the risks of electromagnetic fields: A postal survey from Germany." *Journal of Primary Care and Community Health* 6 (1):21-28. doi: 10.1177/2150131914546332.
- Kowall, B., J. Breckenkamp, M. Blettner, B. Schlehofer, J. Schüz, and G. Berg-Beckhoff. 2012. "Determinants and stability over time of perception of health risks related to mobile phone base stations." *International Journal of Public Health* 57 (4):735-743. doi: 10.1007/s00038-011-0310-4.
- Kowall, B., J. Breckenkamp, K. Heyer, and G. Berg-Beckhoff. 2010. "German wide cross sectional survey on health impacts of electromagnetic fields in the view of general practitioners." *International Journal of Public Health* 55 (5):507-512. doi: 10.1007/s00038-009-0110-2.

- Koyama, T., J. G. McHaffie, P. J. Laurienti, and R. C. Coghill. 2005. "The subjective experience of pain: where expectations become reality." *Proc Natl Acad Sci U S A* 102 (36):12950-5. doi: 10.1073/pnas.0408576102.
- Kühnlein, A., C. Heumann, S. Thomas, S. Heinrich, and K. Radon. 2009. "Personal exposure to Mobile communication networks and well-being in children-a statistical analysis based on a functional approach." *Bioelectromagnetics* 30 (4):261-269. doi: 10.1002/bem.20477.
- Kundi, M., and H. P. Hutter. 2009. "Mobile phone base stations-Effects on wellbeing and health." *Pathophysiology* 16 (2-3):123-35. doi: 10.1016/j.pathophys.2009.01.008.
- Kuribayashi, M., J. Wang, O. Fujiwara, Y. Doi, K. Nabae, S. Tamano, T. Ogiso, M. Asamoto, and T. Shirai. 2005. "Lack of effects of 1439 MHz electromagnetic near field exposure on the blood-brain barrier in immature and young rats." *Bioelectromagnetics* 26 (7):578-88. doi: 10.1002/bem.20138.
- Kwon, M. K., J. Y. Choi, S. K. Kim, T. K. Yoo, and D. W. Kim. 2012b. "Effects of radiation emitted by WCDMA mobile phones on electromagnetic hypersensitive subjects." *Environmental Health: A Global Access Science Source* 11 (1). doi: 10.1186/1476-069X-11-69.
- Kwon, M. K., S. K. Kim, J. M. Koo, J. Y. Choi, and D. W. Kim. 2012c. "EHS subjects do not perceive RF EMF emitted from smart phones better than non-EHS subjects." *Conference proceedings : ... Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Conference* 2012:2190-2193.
- Kwon, M. K., K. C. Nam, S. Lee, K. H. Jang, and D. W. Kim. 2011. "Effects of RF fields emitted from smart phones on cardio-respiratory parameters: a preliminary provocation study." *Conference proceedings : ... Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Conference* 2011:1961-1964.
- Kwon, M. S., M. Koivisto, M. Laine, and H. Hamalainen. 2008. "Perception of the electromagnetic field emitted by a mobile phone." *Bioelectromagnetics* 29 (2):154-9. doi: 10.1002/bem.20375.
- Kwon, M. S., V. Vorobyev, S. Kännälä, M. Laine, J. O. Rinne, T. Toivonen, J. Johansson, M. Teräs, J. Joutsa, L. Tuominen, H. Lindholm, T. Alanko, and H. Hämäläinen. 2012a. "No effects of short-term GSM mobile phone radiation on cerebral blood flow measured using positron emission tomography." *Bioelectromagnetics* 33 (3):247-256. doi: 10.1002/bem.20702.
- Lambrozo, J., M. Souques, F. Bourg, X. Guillaume, and A. Perrin. 2013a. "French general practitioners and electromagnetic fields." *Presse Medicale* 42 (5). doi: 10.1016/j.lpm.2012.09.026.
- Lambrozo, Jacques, Martine Souques, Fabrice Bourg, Xavier Guillaume, and Anne Perrin. 2013b. "Les médecins généralistes français face aux champs électromagnétiques." *La Presse Médicale* 42 (5):e133-e143. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.lpm.2012.09.026>.
- Lamech, F. 2014. "Self-reporting of symptom development from exposure to radiofrequency fields of wireless smart meters in Victoria, Australia: A case series." *Alternative Therapies in Health and Medicine* 20 (6):28-39.
- Landgrebe, M., W. Barta, K. Rosengarth, U. Frick, S. Hauser, B. Langguth, R. Rutschmann, M. W. Greenlee, G. Hajak, and P. Eichhammer. 2008a. "Neuronal correlates of symptom formation in functional somatic syndromes: A fMRI study." *NeuroImage* 41 (4):1336-1344. doi: 10.1016/j.neuroimage.2008.04.171.
- Landgrebe, M., U. Frick, S. Hauser, G. Hajak, and B. Langguth. 2009. "Association of tinnitus and electromagnetic hypersensitivity: Hints for a shared pathophysiology?" *PLoS ONE* 4 (3). doi: 10.1371/journal.pone.0005026.
- Landgrebe, M., U. Frick, S. Hauser, B. Langguth, R. Rosner, G. Hajak, and P. Eichhammer. 2008b. "Cognitive and neurobiological alterations in electromagnetic hypersensitive patients: Results of a case-control study." *Psychological Medicine* 38 (12):1781-1791. doi: 10.1017/S0033291708003097.
- Landgrebe, M., S. Hauser, B. Langguth, U. Frick, G. Hajak, and P. Eichhammer. 2007. "Altered cortical excitability in subjectively electrosensitive patients: Results of a pilot study." *Journal of Psychosomatic Research* 62 (3):283-288. doi: 10.1016/j.jpsychores.2006.11.007.
- Leitgeb, N., and J. Schröttner. 2002. "Electric current perception study challenges electric safety limits." *J Med Eng Technol* 26 (4):168-72. doi: 10.1080/03091900210156878.
- Leitgeb, N., and J. Schröttner. 2003. "Electrosensitivity and electromagnetic hypersensitivity." *Bioelectromagnetics* 24 (6):387-94. doi: 10.1002/bem.10138.

- Leitgeb, N., J. Schröttner, and M. Bohm. 2005. "Does "electromagnetic pollution" cause illness? An inquiry among Austrian general practitioners." *Wien Med Wochenschr* 155 (9-10):237-41.
- Leitgeb, Norbert, Jörg Schröttner, Roman Cech, and Reinhold Kerbl. 2008. "EMF-protection sleep study near mobile phone base stations." *Somnologie - Schlafforschung und Schlafmedizin* 12 (3):234-243. doi: 10.1007/s11818-008-0353-9.
- Leloup, J. C., and A. Goldbeter. 2008. "Modeling the circadian clock: From molecular mechanism to physiological disorders." *BioEssays* 30 (6):590-600. doi: 10.1002/bies.20762.
- Lerchl, A., H. Kruger, M. Niehaus, J. R. Streckert, A. K. Bitz, and V. Hansen. 2008. "Effects of mobile phone electromagnetic fields at nonthermal SAR values on melatonin and body weight of Djungarian hamsters (*Phodopus sungorus*)." *J Pineal Res* 44 (3):267-72. doi: 10.1111/j.1600-079X.2007.00522.x.
- Leung, S., R. J. Croft, R. J. McKenzie, S. Iskra, B. Silber, N. R. Cooper, B. O'Neill, V. Cropley, A. Diaz-Trujillo, D. Hamblin, and D. Simpson. 2011. "Effects of 2G and 3G mobile phones on performance and electrophysiology in adolescents, young adults and older adults." *Clin Neurophysiol* 122 (11):2203-16. doi: 10.1016/j.clinph.2011.04.006.
- Levallois, P., R. Neutra, G. Lee, and L. Hristova. 2002. "Study of self-reported hypersensitivity to electromagnetic fields in California." *Environmental Health Perspectives* 110 Suppl 4:619-623.
- Levenstein, S., C. Pranter, V. Varvo, M. L. Scribano, E. Berto, C. Luzi, and A. Andreoli. 1993. "Development of the perceived stress questionnaire: A new tool for psychosomatic research." *Journal of Psychosomatic Research* 37 (1):19-32. doi: 10.1016/0022-3999(93)90120-5.
- Lewczuk, B., G. Redlarski, A. Zak, N. Ziolkowska, B. Przybylska-Gornowicz, and M. Krawczuk. 2014. "Influence of electric, magnetic, and electromagnetic fields on the circadian system: current stage of knowledge." *Biomed Res Int* 2014:169459. doi: 10.1155/2014/169459.
- Linden, V., and S. Rolfen. 1981. "Video computer terminals and occupational dermatitis." *Scandinavian Journal of Work, Environment and Health* 7 (1):62-64.
- Lonne-Rahm, S., B. Andersson, L. Melin, M. Schultzberg, B. Arnetz, and M. Berg. 2000. "Provocation with stress and electricity of patients with "sensitivity to electricity"." *J Occup Environ Med* 42 (5):512-6.
- Loughran, S. P., R. J. McKenzie, M. L. Jackson, M. E. Howard, and R. J. Croft. 2012. "Individual differences in the effects of mobile phone exposure on human sleep: rethinking the problem." *Bioelectromagnetics* 33 (1):86-93. doi: 10.1002/bem.20691.
- Lowden, A., T. Akerstedt, M. Ingre, C. Wiholm, L. Hillert, N. Kuster, J. P. Nilsson, and B. Arnetz. 2011. "Sleep after mobile phone exposure in subjects with mobile phone-related symptoms." *Bioelectromagnetics* 32 (1):4-14. doi: 10.1002/bem.20609.
- Lower, B. H., and D. A. Bazylinski. 2013. "The bacterial magnetosome: A unique prokaryotic organelle." *Journal of Molecular Microbiology and Biotechnology* 23 (1-2):63-80. doi: 10.1159/000346543.
- Lundgren-Nilsson, A., I. H. Jonsdottir, J. Pallant, and G. Ahlborg. 2012. "Internal construct validity of the Shirom-Melamed Burnout Questionnaire (SMBQ)." *BMC Public Health* 12 (1). doi: 10.1186/1471-2458-12-1.
- Lyskov, E., M. Sandström, and K. Hansson Mild. 2001b. "Neurophysiological study of patients with perceived 'electrical hypersensitivity'." *International Journal of Psychophysiology* 42 (3):233-241. doi: 10.1016/S0167-8760(01)00141-6.
- Lyskov, E., M. Sandström, and K. H. Mild. 2001a. "Provocation study of persons with perceived electrical hypersensitivity and controls using magnetic field exposure and recording of electrophysiological characteristics." *Bioelectromagnetics* 22 (7):457-462. doi: 10.1002/bem.73.
- Maaroufi, K., L. Had-Aissouni, C. Melon, M. Sakly, H. Abdelmelek, B. Poucet, and E. Save. 2014. "Spatial learning, monoamines and oxidative stress in rats exposed to 900 MHz electromagnetic field in combination with iron overload." *Behav Brain Res* 258:80-9. doi: 10.1016/j.bbr.2013.10.016.
- Maeda, K., A. J. Robinson, K. B. Henbest, H. J. Hogben, T. Biskup, M. Ahmad, E. Schleicher, S. Weber, C. R. Timmel, and P. J. Hore. 2012. "Magnetically sensitive light-induced reactions in cryptochrome are consistent with its proposed role as a magnetoreceptor." *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 109 (13):4774-4779. doi: 10.1073/pnas.1118959109.
- Maher, B. A., I. A. Ahmed, V. Karloukovski, D. A. MacLaren, P. G. Foulds, D. Allsop, D. M. Mann, R. Torres-Jardon, and L. Calderon-Garciduenas. 2016. "Magnetite pollution nanoparticles in the human brain." *Proc Natl Acad Sci U S A* 113 (39):10797-801. doi: 10.1073/pnas.1605941113.

- Marazziti, D. 2017. "Understanding the role of serotonin in psychiatric diseases." *F1000Res* 6:180. doi: 10.12688/f1000research.10094.1.
- Marchi, N., J. J. Bazarian, V. Puvenna, M. Janigro, C. Ghosh, J. Zhong, T. Zhu, E. Blackman, D. Stewart, J. Ellis, R. Butler, and D. Janigro. 2013. "Consequences of Repeated Blood-Brain Barrier Disruption in Football Players." *PLoS ONE* 8 (3). doi: 10.1371/journal.pone.0056805.
- Marino, A. A., S. Carrubba, and D. E. McCarty. 2012. "Response to letter to the editor concerning "Electromagnetic hypersensitivity: Evidence for a novel neurological syndrome"." *International Journal of Neuroscience* 122 (7):402-403. doi: 10.3109/00207454.2011.648764.
- Markovà, E., L. Hillert, L. Malmgren, B. R. R. Persson, and I. Y. Belyaev. 2005. "Microwaves from GSM mobile telephones affect 53BP1 and γ -H2AX foci in human lymphocytes from hypersensitive and healthy persons." *Environmental Health Perspectives* 113 (9):1172-1177. doi: 10.1289/ehp.7561.
- Masuda, H., S. Hirota, A. Ushiyama, A. Hirata, T. Arima, H. Kawai, K. Wake, S. Watanabe, M. Taki, A. Nagai, and C. Ohkubo. 2015b. "No Dynamic Changes in Blood-brain Barrier Permeability Occur in Developing Rats During Local Cortex Exposure to Microwaves." *In Vivo* 29 (3):351-7.
- Masuda, H., S. Hirota, A. Ushiyama, A. Hirata, T. Arima, H. Watanabe, K. Wake, S. Watanabe, M. Taki, A. Nagai, and C. Ohkubo. 2015a. "No changes in cerebral microcirculatory parameters in rat during local cortex exposure to microwaves." *In Vivo* 29 (2):207-15.
- Masuda, H., A. Ushiyama, S. Hirota, K. Wake, S. Watanabe, Y. Yamanaka, M. Taki, and C. Ohkubo. 2007a. "Effects of acute exposure to a 1439 MHz electromagnetic field on the microcirculatory parameters in rat brain." *In Vivo* 21 (4):555-62.
- Masuda, H., A. Ushiyama, S. Hirota, K. Wake, S. Watanabe, Y. Yamanaka, M. Taki, and C. Ohkubo. 2007b. "Effects of subchronic exposure to a 1439 MHz electromagnetic field on the microcirculatory parameters in rat brain." *In Vivo* 21 (4):563-70.
- Masuda, H., A. Ushiyama, M. Takahashi, J. Wang, O. Fujiwara, T. Hikage, T. Nojima, K. Fujita, M. Kudo, and C. Ohkubo. 2009. "Effects of 915 MHz electromagnetic-field radiation in TEM cell on the blood-brain barrier and neurons in the rat brain." *Radiation Research* 172 (1):66-73. doi: 10.1667/RR1542.1.
- McCarty, D. E., S. Carrubba, A. L. Chesson, C. Frilot, E. Gonzalez-Toledo, and A. A. Marino. 2011. "Electromagnetic hypersensitivity: Evidence for a novel neurological syndrome." *International Journal of Neuroscience* 121 (12):670-676. doi: 10.3109/00207454.2011.608139.
- McQuade, J. M., J. H. Merritt, S. A. Miller, T. Scholin, M. C. Cook, A. Salazar, O. B. Rahimi, M. R. Murphy, and P. A. Mason. 2009. "Radiofrequency-radiation exposure does not induce detectable leakage of albumin across the blood-brain barrier." *Radiat Res* 171 (5):615-21. doi: 10.1667/rr1507.1.
- MEDDE. 2014. Bilan de la campagne de mesures réalisées en 2014.
- Meg Tseng, M. C., Y. P. Lin, and T. J. Cheng. 2011a. "Prevalence and psychiatric comorbidity of self-reported electromagnetic field sensitivity in Taiwan: A population-based study." *Journal of the Formosan Medical Association* 110 (10):634-641. doi: 10.1016/j.jfma.2011.08.005.
- Meg Tseng, M. C., Y. P. Lin, and T. J. Cheng. 2011b. "Prevalence and psychiatric comorbidity of self-reported electromagnetic field sensitivity in Taiwan: a population-based study." *J Formos Med Assoc* 110 (10):634-41. doi: 10.1016/j.jfma.2011.08.005.
- Meg Tseng, M. C., Y. P. Lin, F. C. Hu, and T. J. Cheng. 2013. "Risks Perception of Electromagnetic Fields in Taiwan: The Influence of Psychopathology and the Degree of Sensitivity to Electromagnetic Fields." *Risk Analysis* 33 (11):2002-2012. doi: 10.1111/risa.12041.
- Melamed, S., T. Kushnir, A. Shirom, and S. Melamed. 1992. "Burnout and risk factors for cardiovascular diseases." *Behavioral Medicine* 18 (2):53-60. doi: 10.1080/08964289.1992.9935172.
- Melzack, R. 1999. "From the gate to the neuromatrix." *Pain Suppl* 6:S121-6.
- Mild, KH., G Oftedal, M Sandström, and et al. 1998. *Comparison of symptoms experienced by users of analogue and digital mobile phones; a Swedish-Norwegian epidemiological study, Solna, Sweden: National Institute of Working Life, 1998 [Report No.: 1998:23]*.
- Mild, KH., M Repacholi, E van Deventer, and P Ravazzanni. 2006. *Electromagnetic hypersensitivity, ed. OMS, .*
- Miller, C. S. 1997. "Toxicant-induced loss of tolerance - An emerging theory of disease?" *Environmental Health Perspectives* 105 (SUPPL. 2):445-453.

- Miller, C. S., and T. J. Prihoda. 1999. "The Environmental Exposure and Sensitivity Inventory (EESI): a standardized approach for measuring chemical intolerances for research and clinical applications." *Toxicol Ind Health* 15 (3-4):370-85. doi: 10.1177/074823379901500311.
- Mirabel-Sarron, C. 2013. *Soigner la dépression avec les thérapies comportementales et cognitives*, 2013, Ed. Dunod.
- Mirabel-Sarron, C. . 2015. *L'entretien en thérapies comportementales et cognitive 4ème édition 2015*, Ed. Dunod.
- Miro, L. 1960. apport sur les troubles cliniques et les modifications hématologiques observées sur le personnel de la base radar, soumis aux ondes ultra-courtes. Rapport interne de l'Armée de l'Air.
- Mizuno, Y., Y. Moriguchi, T. Hikage, Y. Terao, T. Ohnishi, T. Nojima, and Y. Ugawa. 2009. "Effects of W-CDMA 1950 MHz EMF emitted by mobile phones on regional cerebral blood flow in humans." *Bioelectromagnetics* 30 (7):536-544. doi: 10.1002/bem.20508.
- Mollasadeghi, A., A. H. Mehrparvar, S. Atighechi, M. H. Davari, P. Shokouh, M. Mostaghaci, and M. Bahaloo. 2013. "Sensorineural hearing loss after magnetic resonance imaging." *Case Rep Radiol* 2013:510258. doi: 10.1155/2013/510258.
- Montagne, A., S. R. Barnes, M. D. Sweeney, M. R. Halliday, A. P. Sagare, Z. Zhao, A. W. Toga, R. E. Jacobs, C. Y. Liu, L. Amezcua, M. G. Harrington, H. C. Chui, M. Law, and B. V. Zlokovic. 2015. "Blood-brain barrier breakdown in the aging human hippocampus." *Neuron* 85 (2):296-302. doi: 10.1016/j.neuron.2014.12.032.
- Moore, S. R., and R. A. Depue. 2016. "Neurobehavioral foundation of environmental reactivity." *Psychol Bull* 142 (2):107-64. doi: 10.1037/bul0000028.
- Mortazavi, S. M., M. Atefi, and F. Kholghi. 2011b. "The pattern of mobile phone use and prevalence of self-reported symptoms in elementary and junior high school students in shiraz, iran." *Iran J Med Sci* 36 (2):96-103.
- Mortazavi, S. M. J., A. Mahbudi, M. Atefi, S. Bagheri, N. Bahaedini, and A. Besharati. 2011a. "An old issue and a new look: Electromagnetic hypersensitivity caused by radiations emitted by GSM mobile phones." *Technology and Health Care* 19 (6):435-443. doi: 10.3233/THC-2011-0641.
- Mueller, C. H., H. Krueger, and C. Schierz. 2002. "Project NEMESIS: perception of a 50 Hz electric and magnetic field at low intensities (laboratory experiment)." *Bioelectromagnetics* 23 (1):26-36.
- Mueller, Christopher H., and Christoph Schierz. 2002. "Reply to comment by Lawrence N. Dworsky, Ph.D., on "Project NEMESIS: Perception of 50 Hz electric and magnetic field at low intensities (laboratory experiment)"." *Bioelectromagnetics* 23 (7):555-555. doi: 10.1002/bem.10065.
- Munch, M., and V. Bromundt. 2012. "Light and chronobiology: implications for health and disease." *Dialogues Clin Neurosci* 14 (4):448-53.
- Mutter, J., J. Naumann, H. Walach, and F. Daschner. 2005. "Amalgam risk assessment with coverage of references up to 2005." *Gesundheitswesen* 67 (3):204-216. doi: 10.1055/s-2005-857962.
- Nam, K. C., S. W. Kim, S. C. Kim, and D. W. Kim. 2006. "Effects of RF exposure of teenagers and adults by CDMA cellular phones." *Bioelectromagnetics* 27 (7):509-514. doi: 10.1002/bem.20229.
- Nam, K. C., J. H. Lee, H. W. Noh, E. J. Cha, N. H. Kim, and D. W. Kim. 2009. "Hypersensitivity to RF fields emitted from CDMA cellular phones: A provocation study." *Bioelectromagnetics* 30 (8):641-650. doi: 10.1002/bem.20518.
- Napadow, V., J. Kim, D. J. Clauw, and R. E. Harris. 2012. "Decreased intrinsic brain connectivity is associated with reduced clinical pain in fibromyalgia." *Arthritis and Rheumatism* 64 (7):2398-2403. doi: 10.1002/art.34412.
- Némec, P., J. Altmann, S. Marhold, H. Burda, and H. H. A. Oelschläger. 2001. "Neuroanatomy of magnetoreception: The superior colliculus involved in magnetic orientation in a mammal." *Science* 294 (5541):366-368. doi: 10.1126/science.1063351.
- Neubauer, C., A. M. Phelan, H. Kues, and D. G. Lange. 1990. "Microwave irradiation of rats at 2.45 GHz activates pinocytotic-like uptake of tracer by capillary endothelial cells of cerebral cortex." *Bioelectromagnetics* 11 (4):261-268. doi: 10.1002/bem.2250110402.
- Nieto-Hernandez, R., J. Williams, A. J. Cleare, S. Landau, S. Wessely, and G. J. Rubin. 2011. "Can exposure to a terrestrial trunked radio (TETRA)-like signal cause symptoms? A randomised double-blind provocation study." *Occup Environ Med* 68 (5):339-44. doi: 10.1136/oem.2010.055889.

- Nilsen, A. 1982. "Facial rash in visual display unit operators." *Contact Dermatitis* 8 (1):25-28.
- Nittby, H., A. Brun, J. Eberhardt, L. Malmgren, B. R. Persson, and L. G. Salford. 2009. "Increased blood-brain barrier permeability in mammalian brain 7 days after exposure to the radiation from a GSM-900 mobile phone." *Pathophysiology* 16 (2-3):103-12. doi: 10.1016/j.pathophys.2009.01.001.
- Nordin, S., G. Neely, D. Olsson, and M. Sandström. 2014. "Odor and noise intolerance in persons with self-reported electromagnetic hypersensitivity." *International Journal of Environmental Research and Public Health* 11 (9):8794-8805. doi: 10.3390/ijerph110908794.
- Nowak, N. T., M. P. Diamond, S. J. Land, and S. D. Moffat. 2014. "Contributions of sex, testosterone, and androgen receptor CAG repeat number to virtual Morris water maze performance." *Psychoneuroendocrinology* 41:13-22. doi: 10.1016/j.psyneuen.2013.12.003.
- O'Neill, P. 2013. "Magnetoreception and baroreception in birds." *Development Growth and Differentiation* 55 (1):188-197. doi: 10.1111/dgd.12025.
- Oftedal, G. 2012. "Are some people hypersensitive to electromagnetic fields ?" *Systematic review of scientific studies. EMF Spectrum* 2012.
- Oftedal, G., A. Straume, A. Johnsson, and L. J. Stovner. 2007. "Mobile phone headache: A double blind, sham-controlled provocation study." *Cephalalgia* 27 (5):447-455. doi: 10.1111/j.1468-2982.2007.01336.x.
- Olesen, J. 1971. "Contralateral focal increase of cerebral blood flow in man during arm work." *Brain* 94 (4):635-46.
- Olshansky, B. 2007. "Placebo and nocebo in cardiovascular health: implications for healthcare, research, and the doctor-patient relationship." *J Am Coll Cardiol* 49 (4):415-21. doi: 10.1016/j.jacc.2006.09.036.
- OMS. 2006. "Electromagnetic Hypersensitivity. Proceedings International Workshop on EMF Hypersensitivity." Prague, Czech Republic. October 25-27, 2004. .
- Oreskes, N. , and E. M. Conway. 2012. *Les Marchands de doute. Comment une poignée de scientifiques ont masqué la vérité sur des enjeux de société tels que le tabagisme et le réchauffement climatique, Paris, Le Pommier, 2012.*
- Oscar, K. J., and T. D. Hawkins. 1977. "Microwave alteration of the blood-brain barrier system of rats." *Brain Research* 126 (2):281-293. doi: 10.1016/0006-8993(77)90726-0.
- Ouillon, A. 2014. Electrosensibilité : le rapport médecins-profanes à l'épreuve d'une pathologie environnementale. In *Philosophy*.
- Ozgur, E., G. Guler, and N. Seyhan. 2010. "Mobile phone radiation-induced free radical damage in the liver is inhibited by the antioxidants N-acetyl cysteine and epigallocatechin-gallate." *Int J Radiat Biol* 86 (11):935-45. doi: 10.3109/09553002.2010.496029.
- Pace-Schott, E. F., and R. M. C. Spencer. 2011. Age-related changes in the cognitive function of sleep. In *Progress in Brain Research*.
- Pall, M. L. 2013. "Electromagnetic fields act via activation of voltage-gated calcium channels to produce beneficial or adverse effects." *Journal of Cellular and Molecular Medicine* 17 (8):958-965. doi: 10.1111/jcmm.12088.
- Pall, M. L. 2014. "Microwave electromagnetic fields act by activating voltage-gated calcium channels: why the current international safety standards do not predict biological hazard." *Recent Res. Devel. Mol. Cell. Biol.*
- Palmquist, E., A. S. Claeson, G. Neely, B. Stenberg, and S. Nordin. 2014. "Overlap in prevalence between various types of environmental intolerance." *International Journal of Hygiene and Environmental Health* 217 (4-5):427-434. doi: 10.1016/j.ijheh.2013.08.005.
- Panagopoulos, D. J., N. Messini, A. Karabarbounis, A. L. Philippetis, and L. H. Margaritis. 2000. "A mechanism for action of oscillating electric fields on cells." *Biochem Biophys Res Commun* 272 (3):634-40. doi: 10.1006/bbrc.2000.2746.
- Parazzini, M., P. Ravazzani, G. Thuroczy, F. B. Molnar, G. Ardesi, A. Sacchetti, and L. T. Mainardi. 2013. "Nonlinear heart rate variability measures under electromagnetic fields produced by GSM cellular phones." *Electromagnetic Biology and Medicine* 32 (2):173-181. doi: 10.3109/15368378.2013.776424.

- Parazzini, M., P. Ravazzani, G. Tognola, G. Thuróczy, F. B. Molnar, A. Sacchettini, G. Ardesi, and L. T. Mainardi. 2007c. "Electromagnetic fields produced by GSM cellular phones and heart rate variability." *Bioelectromagnetics* 28 (2):122-129. doi: 10.1002/bem.20275.
- Peixoto, L., and T. Abel. 2013. "The role of histone acetylation in memory formation and cognitive impairments." *Neuropsychopharmacology* 38 (1):62-76. doi: 10.1038/npp.2012.86.
- Pelletier, A., S. Delanaud, P. Decima, G. Thuroczy, R. de Seze, M. Cerri, V. Bach, J. P. Libert, and N. Loos. 2013. "Effects of chronic exposure to radiofrequency electromagnetic fields on energy balance in developing rats." *Environ Sci Pollut Res Int* 20 (5):2735-46. doi: 10.1007/s11356-012-1266-5.
- Pennebaker, JW. 1982. *The psychology of physical symptoms*: New York: Springer; 1982.
- Persson, B. R. R.; Malmgren, L.; Brun, A.; Eberhardt, J.; Nittby, H.; and Salford, L. G. . 2012. ""Non-Thermal" Effects on the Blood-Brain Barrier in Fischer rats by exposure to microwaves." *Acta Scientiarum Lundensia*
- Petrie, K. J., B. Sivertsen, M. Hysing, E. Broadbent, R. Moss-Morris, H. R. Eriksen, and H. Ursin. 2001. "Thoroughly modern worries: The relationship of worries about modernity to reported symptoms, health and medical care utilization." *Journal of Psychosomatic Research* 51 (1):395-401. doi: 10.1016/S0022-3999(01)00219-7.
- Pilla, A. A. 2012. "Electromagnetic fields instantaneously modulate nitric oxide signaling in challenged biological systems." *Biochem Biophys Res Commun* 426 (3):330-3. doi: 10.1016/j.bbrc.2012.08.078.
- Poulliet de Gannes, F., B. Billaudel, M. Taxile, E. Haro, G. Ruffie, P. Leveque, B. Veyret, and I. Lagroye. 2009. "Effects of head-only exposure of rats to GSM-900 on blood-brain barrier permeability and neuronal degeneration." *Radiat Res* 172 (3):359-67. doi: 10.1667/rr1578.1.
- Preece, A. W., G. Iwi, A. Davies-Smith, K. Wesnes, S. Butler, E. Lim, and A. Varey. 1999. "Effect of a 915-MHz simulated mobile phone signal on cognitive function in man." *International Journal of Radiation Biology* 75 (4):447-456.
- Presman, Aleksandr Samuilovich. 1970. *Electromagnetic fields and life*.
- Proctor, Robert N. 2011. *Golden Holocaust. Origins of the Cigarette Catastrophe and the Case for Abolition*: Berkeley, University of California Press.
- Qin, F., J. Zhang, H. Cao, W. Guo, L. Chen, O. Shen, J. Sun, C. Yi, J. Li, J. Wang, and J. Tong. 2014. "Circadian alterations of reproductive functional markers in male rats exposed to 1800 MHz radiofrequency field." *Chronobiol Int* 31 (1):123-33. doi: 10.3109/07420528.2013.830622.
- Qin, F., J. Zhang, H. Cao, C. Yi, J. X. Li, J. Nie, L. L. Chen, J. Wang, and J. Tong. 2012. "Effects of 1800-MHz radiofrequency fields on circadian rhythm of plasma melatonin and testosterone in male rats." *J Toxicol Environ Health A* 75 (18):1120-8. doi: 10.1080/15287394.2012.699846.
- Rahn-Lee, L., and A. Komeili. 2013. "The magnetosome model: Insights into the mechanisms of bacterial biomineralization." *Frontiers in Microbiology* 4 (NOV). doi: 10.3389/fmicb.2013.00352.
- Raines, Jeremy K. 1981. *Electromagnetic field interaction with the human body : observed effects and theori.* . Report prepared for National Aeronautics and Space Administration.
- Razavi, Morteza Kafaee, Ahmad Reza Raji, Mohsen Maleki, Hesam Dehghani, and Alireza Hagheima. 2015. "Histopathological and immunohistochemical study of rat brain tissue after exposure to mobile phone radiation." *Comparative Clinical Pathology* 24 (5):1271-1276. doi: 10.1007/s00580-015-2113-0.
- Rea, W. J., Y. Pan, E. J. Fenyves, Sujisawa, H. Suyama, N. Samadi, and G. H. Ross. 1991. "Electromagnetic Field Sensitivity." *J Bioelectricity* 10 (1-2):241-256.
- Rea, William J., and Ervin J. Fenyves. 1993. "Letters to the Editors Electromagnetic Field Sensitivity: Reply." *Electro- and Magnetobiology* 12 (1):vii-vii. doi: 10.3109/15368379309012857.
- Redmayne, M., E. Smith, and M. J. Abramson. 2013. "The relationship between adolescents' well-being and their wireless phone use: A cross-sectional study." *Environmental Health: A Global Access Science Source* 12 (1). doi: 10.1186/1476-069X-12-90.
- Regel, S. J., S. Negovetic, M. Rösli, V. Berdiñas, J. Schuderer, A. Huss, U. Lott, N. Kuster, and P. Achermann. 2006. "UMTS base station-like exposure, well-being, and cognitive performance." *Environmental Health Perspectives* 114 (8):1270-1275. doi: 10.1289/ehp.8934.

- Regel, S. J., G. Tinguely, J. Schuderer, M. Adam, N. Kuster, H. P. Landolt, and P. Achermann. 2007. "Pulsed radio-frequency electromagnetic fields: dose-dependent effects on sleep, the sleep EEG and cognitive performance." *J Sleep Res* 16 (3):253-8. doi: 10.1111/j.1365-2869.2007.00603.x.
- Reid, K. J., L. L. McGee-Koch, and P. C. Zee. 2011. "Cognition in circadian rhythm sleep disorders." *Prog Brain Res* 190:3-20. doi: 10.1016/b978-0-444-53817-8.00001-3.
- Richards, E. J. 2006. "Inherited epigenetic variation--revisiting soft inheritance." *Nat Rev Genet* 7 (5):395-401. doi: 10.1038/nrg1834.
- Ricœur, P. . 1994. "La souffrance n'est pas la douleur." *Revue Autrement/Mutations* n°142, 58-69.
- Ring, A., C. F. Dowrick, G. M. Humphris, J. Davies, and P. Salmon. 2005. "The somatising effect of clinical consultation: what patients and doctors say and do not say when patients present medically unexplained physical symptoms." *Soc Sci Med* 61 (7):1505-15. doi: 10.1016/j.socscimed.2005.03.014.
- Robbins, J. M., and L. J. Kirmayer. 1991. "Attributions of common somatic symptoms." *Psychol Med* 21 (4):1029-45.
- Robinson, M. E., J. G. Craggs, D. D. Price, W. M. Perlstein, and R. Staud. 2011. "Gray matter volumes of pain-related brain areas are decreased in fibromyalgia syndrome." *Journal of Pain* 12 (4):436-443. doi: 10.1016/j.jpain.2010.10.003.
- Röösli, M. 2008a. "Radiofrequency electromagnetic field exposure and non-specific symptoms of ill health: a systematic review." *Environ Res* 107 (2):277-87. doi: 10.1016/j.envres.2008.02.003.
- Röösli, M., E. Mohler, and P. Frei. 2010a. "Sense and sensibility in the context of radiofrequency electromagnetic field exposure." *Comptes Rendus Physique* 11 (9-10):576-584. doi: 10.1016/j.crhy.2010.10.007.
- Röösli, M., M. Moser, Y. Baldinini, M. Meier, and C. Braun-Fahrlander. 2004. "Symptoms of ill health ascribed to electromagnetic field exposure--a questionnaire survey." *Int J Hyg Environ Health* 207 (2):141-50. doi: 10.1078/1438-4639-00269.
- Röösli, Martin , Patrizia Frei, Heinz Bolliger-Salzmann, Jürgen Barth, Michaela Hlavica, and Anke Huss. 2011. "Umweltmedizinische Beratungsstruktur im Praxisalltag : Machbarkeit, Bedarf und Nutzen - Begleitstudie."
- Rubin, G. J., A. J. Cleare, and S. Wessely. 2008. "Psychological factors associated with self-reported sensitivity to mobile phones." *Journal of Psychosomatic Research* 64 (1):1-9. doi: 10.1016/j.jpsychores.2007.05.006.
- Rubin, G. J., A. J. Cleare, and S. Wessely. 2012a. "Letter to the editor: Electromagnetic hypersensitivity." *International Journal of Neuroscience* 122 (7):401. doi: 10.3109/00207454.2011.648763.
- Rubin, G. J., A. J. Cleare, and S. Wessely. 2012b. "Right to reply: Correspondence about electromagnetic hypersensitivity." *International Journal of Neuroscience* 122 (7):404. doi: 10.3109/00207454.2012.654414.
- Rubin, G. J., J. Das Munshi, and S. Wessely. 2005. "Electromagnetic hypersensitivity: A systematic review of provocation studies." *Psychosomatic Medicine* 67 (2):224-232. doi: 10.1097/01.psy.0000155664.13300.64.
- Rubin, G. J., J. Das Munshi, and S. Wessely. 2006a. "A systematic review of treatments for electromagnetic hypersensitivity." *Psychotherapy and Psychosomatics* 75 (1):12-18. doi: 10.1159/000089222.
- Rubin, G. J., G. Hahn, B. S. Everitt, A. J. Cleare, and S. Wessely. 2006b. "Are some people sensitive to mobile phone signals? Within participants double blind randomised provocation study." *British Medical Journal* 332 (7546):886-889. doi: 10.1136/bmj.38765.519850.55.
- Rubin, G. J., R. Nieto-Hernandez, and S. Wessely. 2010. "Idiopathic environmental intolerance attributed to electromagnetic fields (formerly 'electromagnetic hypersensitivity'): An updated systematic review of provocation studies." *Bioelectromagnetics* 31 (1):1-11. doi: 10.1002/bem.20536.
- Rudenko, A., and L. H. Tsai. 2014. "Epigenetic modifications in the nervous system and their impact upon cognitive impairments." *Neuropharmacology* 80:70-82. doi: 10.1016/j.neuropharm.2014.01.043.
- Sack, R. L., D. Auckley, R. R. Auger, M. A. Carskadon, K. P. Wright, Jr., M. V. Vitiello, and I. V. Zhdanova. 2007. "Circadian rhythm sleep disorders: part I, basic principles, shift work and jet lag disorders. An American Academy of Sleep Medicine review." *Sleep* 30 (11):1460-83.

- Salford, L. G., A. E. Brun, J. L. Eberhardt, L. Malmgren, and B. R. Persson. 2003. "Nerve cell damage in mammalian brain after exposure to microwaves from GSM mobile phones." *Environ Health Perspect* 111 (7):881-3; discussion A408.
- Salkovskis, P. M., K. A. Rimes, H. M. Warwick, and D. M. Clark. 2002. "The Health Anxiety Inventory: development and validation of scales for the measurement of health anxiety and hypochondriasis." *Psychol Med* 32 (5):843-53.
- Sancar, A. 2004. "Regulation of the mammalian circadian clock by cryptochrome." *Journal of Biological Chemistry* 279 (33):34079-34082. doi: 10.1074/jbc.R400016200.
- Sandström, M., E. Lyskov, A. Berglund, S. Medvedev, and K. H. Mild. 1997. "Neurophysiological effects of flickering light in patients with perceived electrical hypersensitivity." *J Occup Environ Med* 39 (1):15-22.
- Sandström, M., E. Lyskov, R. Hörnsten, K. H. Mild, U. Wiklund, P. Rask, V. Klucharev, B. Stenberg, and P. Bjerle. 2003. "Holter ECG monitoring in patients with perceived electrical hypersensitivity." *International Journal of Psychophysiology* 49 (3):227-235. doi: 10.1016/S0167-8760(03)00145-4.
- Schalling, D., B. Cronholm, M. Asberg, and S. Espmark. 1973. "Ratings of psychic and somatic anxiety indicants. Interrater reliability and relations to personality variables." *Acta Psychiatr Scand* 49 (3):353-68.
- Schedlowski, M., P. Enck, W. Rief, and U. Bingel. 2015. "Neuro-Bio-Behavioral Mechanisms of Placebo and Nocebo Responses: Implications for Clinical Trials and Clinical Practice." *Pharmacol Rev* 67 (3):697-730. doi: 10.1124/pr.114.009423.
- Scheier, M. F., C. S. Carver, and M. W. Bridges. 1994. "Distinguishing optimism from neuroticism (and trait anxiety, self-mastery, and self-esteem): a reevaluation of the Life Orientation Test." *J Pers Soc Psychol* 67 (6):1063-78.
- Schliephake, E. 1932. "Arbeitsergebnisse auf dem Kurzwellengebiet – Vortrag von der Berliner Medizinischen Gesellschaft am 15 VI 1932." *Deutsche Medizinische Wochenschrift* N°32.
- Schmid, M. R., S. P. Loughran, S. J. Regel, M. Murbach, A. Bratic Grunauer, T. Rusterholz, A. Bersagliere, N. Kuster, and P. Achermann. 2012. "Sleep EEG alterations: effects of different pulse-modulated radio frequency electromagnetic fields." *J Sleep Res* 21 (1):50-8. doi: 10.1111/j.1365-2869.2011.00918.x.
- Schmitt, B. E., M. Gugger, K. Augustiny, C. Bassetti, and B. P. Radanov. 2000. "[Prevalence of sleep disorders in an employed Swiss population: results of a questionnaire survey]." *Schweiz Med Wochenschr* 130 (21):772-8.
- Schoeni, A., K. Roser, and M. Roosli. 2015. "Memory performance, wireless communication and exposure to radiofrequency electromagnetic fields: A prospective cohort study in adolescents." *Environ Int* 85:343-51. doi: 10.1016/j.envint.2015.09.025.
- Schooneveld, H and Kuiper J. 2007. *Electrohypersensitivity (EHS) in the Netherlands – A Questionnaire survey*: Stichting EHS (Dutch EHS Foundation) All rights reserved.
- Schreier, N., A. Huss, and M. Rösli. 2006. "The prevalence of symptoms attributed to electromagnetic field exposure: A cross-sectional representative survey in Switzerland." *Sozial- und Präventivmedizin* 51 (4):202-209. doi: 10.1007/s00038-006-5061-2.
- Schröttner, J., and N. Leitgeb. 2008. "Sensitivity to electricity - Temporal changes in Austria." *BMC Public Health* 8. doi: 10.1186/1471-2458-8-310.
- Schröttner, J., N. Leitgeb, and L. Hillert. 2007. "Investigation of electric current perception thresholds of different EHS groups." *Bioelectromagnetics* 28 (3):208-13. doi: 10.1002/bem.20294.
- Seitz, H., D. Stinner, T. Eikmann, C. Herr, and M. Roosli. 2005. "Electromagnetic hypersensitivity (EHS) and subjective health complaints associated with electromagnetic fields of mobile phone communication - a literature review published between 2000 and 2004." *Sci Total Environ* 349 (1-3):45-55. doi: 10.1016/j.scitotenv.2005.05.009.
- Selmaoui, B., and Y. Touitou. 2003. "Reproducibility of the circadian rhythms of serum cortisol and melatonin in healthy subjects: a study of three different 24-h cycles over six weeks." *Life Sci* 73 (26):3339-49.
- Sheehan, D. V., Y. Lecrubier, K. H. Sheehan, P. Amorim, J. Janavs, E. Weiller, T. Hergueta, R. Baker, and G. C. Dunbar. 1998. "The Mini-International Neuropsychiatric Interview (M.I.N.I.): the development

- and validation of a structured diagnostic psychiatric interview for DSM-IV and ICD-10." *J Clin Psychiatry* 59 Suppl 20:22-33;quiz 34-57.
- Shellock, F. G., and J. V. Crues. 2004. "MR procedures: biologic effects, safety, and patient care." *Radiology* 232 (3):635-52. doi: 10.1148/radiol.2323030830.
- Shimosako, N., and J. R. Kerr. 2014. "Use of single-nucleotide polymorphisms (SNPs) to distinguish gene expression subtypes of chronic fatigue syndrome/myalgic encephalomyelitis (CFS/ME)." *J Clin Pathol* 67 (12):1078-83. doi: 10.1136/jclinpath-2014-202597.
- Singh, S., K. V. Mani, and N. Kapoor. 2015. "Effect of occupational EMF exposure from radar at two different frequency bands on plasma melatonin and serotonin levels." *Int J Radiat Biol* 91 (5):426-34. doi: 10.3109/09553002.2015.1004466.
- Sirav, B., and N. Seyhan. 2009. "Blood-brain barrier disruption by continuous-wave radio frequency radiation." *Electromagn Biol Med* 28 (2):215-22.
- Sirav, B., and N. Seyhan. 2011. "Effects of radiofrequency radiation exposure on blood-brain barrier permeability in male and female rats." *Electromagn Biol Med* 30 (4):253-60. doi: 10.3109/15368378.2011.600167.
- Sirav, B., and N. Seyhan. 2016. "Effects of GSM modulated radio-frequency electromagnetic radiation on permeability of blood-brain barrier in male & female rats." *J Chem Neuroanat* 75 (Pt B):123-7. doi: 10.1016/j.jchemneu.2015.12.010.
- Sneider, J. T., D. A. Hamilton, J. E. Cohen-Gilbert, D. J. Crowley, I. M. Rosso, and M. M. Silveri. 2015. "Sex differences in spatial navigation and perception in human adolescents and emerging adults." *Behavioural Processes* 111:42-50. doi: 10.1016/j.beproc.2014.11.015.
- Soderqvist, F., M. Carlberg, and L. Hardell. 2009a. "Use of wireless telephones and serum S100B levels: a descriptive cross-sectional study among healthy Swedish adults aged 18-65 years." *Sci Total Environ* 407 (2):798-805. doi: 10.1016/j.scitotenv.2008.09.051.
- Soderqvist, F., M. Carlberg, and L. Hardell. 2009b. "Mobile and cordless telephones, serum transthyretin and the blood-cerebrospinal fluid barrier: a cross-sectional study." *Environ Health* 8:19. doi: 10.1186/1476-069x-8-19.
- Soderqvist, F., M. Carlberg, and L. Hardell. 2015. "Biomarkers in volunteers exposed to mobile phone radiation." *Toxicol Lett* 235 (2):140-6. doi: 10.1016/j.toxlet.2015.03.016.
- Soderqvist, F., M. Carlberg, H. Zetterberg, and L. Hardell. 2012. "Use of wireless phones and serum beta-trace protein in randomly recruited persons aged 18-65 years: a cross-sectional study." *Electromagn Biol Med* 31 (4):416-24. doi: 10.3109/15368378.2012.683224.
- Solov'yov, I. A., H. Mouritsen, and K. Schulten. 2010. "Acuity of a cryptochrome and vision-based magnetoreception system in birds." *Biophys J* 99 (1):40-9. doi: 10.1016/j.bpj.2010.03.053.
- Spielberger, CD, RL Gorsuch, R Lushene, PR Vagg, and GA. Jacobs. 1983. "Manual for the State-Trait Anxiety Inventory. ." *Consulting Psychologists Press, Inc.; Palo Alto, CA: 1983.*
- Spielberger, CD, and SJ. Sydeman. 1994. "State-Trait anxiety inventory and State-Trait anger expression inventory. ." In ME Maruish (éd.) *The use for psychological testing for treatment planning and outcome assessment* (pp. 292-321). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Stam, R. 2010. "Electromagnetic fields and the blood-brain barrier." *Brain Res Rev* 65 (1):80-97. doi: 10.1016/j.brainresrev.2010.06.001.
- Stansfeld, S. A., C. R. Clark, L. M. Jenkins, and A. Tarnopolsky. 1985. "Sensitivity to noise in a community sample: I. Measurement of psychiatric disorder and personality." *Psychological Medicine* 15 (2):243-254. doi: 10.1017/S0033291700023527.
- Staudenmayer, H. 2006. "Idiopathic Environmental Intolerance (IEI) : A Causation Analysis." In Mild KH, Repacholi M, Van Deventer E, Ravazzani P ed. *Electromagnetic Hypersensitivity. Proc. Int Workshop on EMF Hypersensitivity. WHO Library, 2006, pp 39-53.*
- Steiner, Edith, Bernhard Aufderreggen, Hansjörg Bhend, Yvonne Gilli, Peter Kälin, and Cornelia Semadeni. 2013. "Erfahrungen des Pilotprojektes „Umweltmedizinisches Beratungsnetz" des Vereins Ärztinnen und Ärzte für Umweltschutz (AefU)." *Therapeutische Umschau*. doi: 10.1024/0040-5930/a000473.
- Stenberg, B. 2006. *Characterizing electrical hypersensitivity*: In Mild KH, Repacholi M, Van Deventer E, Ravazzani P ed. *Electromagnetic Hypersensitivity. Proc. Int Workshop on EMF Hypersensitivity. WHO Library, 2006, pp 29-38.*

- Stenberg, B., J. Bergdahl, B. Edvardsson, N. Eriksson, G. Linden, and L. Widman. 2002. "Medical and social prognosis for patients with perceived hypersensitivity to electricity and skin symptoms related to the use of visual display terminals." *Scand J Work Environ Health* 28 (5):349-57.
- Steyer, R, P Schwenkmezger, P Notz, and M Eid. 1997. "The multi-dimensional well-being questionnaire (MDBF) [Der Mehrdimensionale Befindlichkeitsfragebogen (MDBF).]" *Göttingen: Hogrefe*. p36 (German).
- Stovner, L. J., G. Oftedal, A. Straume, and A. Johnsson. 2008. "Nocebo as headache trigger: evidence from a sham-controlled provocation study with RF fields." *Acta Neurol Scand Suppl* 188:67-71. doi: 10.1111/j.1600-0404.2008.01035.x.
- Summerfield, C., and F. P. de Lange. 2014. "Expectation in perceptual decision making: neural and computational mechanisms." *Nat Rev Neurosci* 15 (11):745-56. doi: 10.1038/nrn3838.
- Szemerszky, R., Z. Dömötör, T. Berkes, and F. Köteles. 2016. "Attribution-Based Nocebo Effects. Perceived Effects of a Placebo Pill and a Sham Magnetic Field on Cognitive Performance and Somatic Symptoms." *International Journal of Behavioral Medicine* 23 (2):204-213. doi: 10.1007/s12529-015-9511-1.
- Szemerszky, R., M. Gubányi, D. Árvai, Z. Dömötör, and F. Köteles. 2015. "Is There a Connection Between Electrosensitivity and Electrosensibility? A Replication Study." *International Journal of Behavioral Medicine* 22 (6):755-763. doi: 10.1007/s12529-015-9477-z.
- Szemerszky, R., F. Koteles, R. Lihi, and G. Bardos. 2010. "Polluted places or polluted minds? An experimental sham-exposure study on background psychological factors of symptom formation in 'Idiopathic Environmental Intolerance attributed to electromagnetic fields'." *Int J Hyg Environ Health* 213 (5):387-94. doi: 10.1016/j.ijheh.2010.05.001.
- Szemerszky, R., F. Köteles, R. Lihi, and G. Bárdos. 2010. "Polluted places or polluted minds? An experimental sham-exposure study on background psychological factors of symptom formation in 'Idiopathic Environmental Intolerance attributed to electromagnetic fields'." *International Journal of Hygiene and Environmental Health* 213 (5):387-394. doi: 10.1016/j.ijheh.2010.05.001.
- Szermerszky, R, K. Ferenc, and B. György. 2009. "Non-specific symptoms attributed to environmental electromagnetic load and the psychological background of symptom production." *Magyar Pszichologiai Szemle* 64 (3):553-571. doi: 10.1556/MPSzle.64.2009.3.6.
- Taheri, S., C. Gasparovic, N. J. Shah, and G. A. Rosenberg. 2011. "Quantitative measurement of blood-brain barrier permeability in human using dynamic contrast-enhanced MRI with fast T1 mapping." *Magn Reson Med* 65 (4):1036-42. doi: 10.1002/mrm.22686.
- Tamer, A., H. Gündüz, and S. Özyildirim. 2009. "The cardiac effects of a mobile phone positioned closest to the heart." *Anadolu Kardiyoloji Dergisi* 9 (5):380-384.
- Tang, J., Y. Zhang, L. Yang, Q. Chen, L. Tan, S. Zuo, H. Feng, Z. Chen, and G. Zhu. 2015. "Exposure to 900 MHz electromagnetic fields activates the mcp-1/ERK pathway and causes blood-brain barrier damage and cognitive impairment in rats." *Brain Res* 1601:92-101. doi: 10.1016/j.brainres.2015.01.019.
- Theorell, T., A. Perski, T. Akerstedt, F. Sigala, G. Ahlberg-Hultén, J. Svensson, and P. Eneroth. 1988. "Changes in job strain in relation to changes in physiological state. A longitudinal study." *Scand J Work Environ Health* 14 (3):189-96.
- Thoss, F., and B. Bartsch. 2003. "The human visual threshold depends on direction and strength of a weak magnetic field." *Journal of Comparative Physiology A: Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology* 189 (10):777-779. doi: 10.1007/s00359-003-0450-y.
- Tjonn, HH. 1984. "Report of facial rashes among VDU operators in Norway." In: Pearce BG, editor. *Health hazards of VDT's*. Chichester (UK): John Wiley & Sons, 1984:17-23.
- Tomruk, A., G. Guler, and A. S. Dincel. 2010. "The influence of 1800 MHz GSM-like signals on hepatic oxidative DNA and lipid damage in nonpregnant, pregnant, and newly born rabbits." *Cell Biochem Biophys* 56 (1):39-47. doi: 10.1007/s12013-009-9068-1.
- Touitou, Y., and B. Selmaoui. 2012. "The effects of extremely low-frequency magnetic fields on melatonin and cortisol, two marker rhythms of the circadian system." *Dialogues Clin Neurosci* 14 (4):381-99.
- Tuengler, A., and L. von Klitzing. 2013. "Hypothesis on how to measure electromagnetic hypersensitivity." *Electromagn Biol Med* 32 (3):281-90. doi: 10.3109/15368378.2012.712586.
- UIT. 2012. "Règlement des radiocommunications."

- UMRESTTE, Ifsttar et Université Claude Bernard Lyon 1. 2016. Étude sur l'EHS auprès de médecins généralistes de la région Rhône-Alpes. Contrat de recherche et développement (CRD) financé par l'Anses: UMRESTTE - Unité Mixte de Recherche Épidémiologique et de Surveillance Transport Travail Environnement.
- Van Den Bulck, J. 2007. "Adolescent use of mobile phones for calling and for sending text messages after lights out: Results from a prospective cohort study with a one-year follow-up." *Sleep* 30 (9):1220-1223.
- Van Dongen, D., T. Smid, and D. R. M. Timmermans. 2014. "Symptom attribution and risk perception in individuals with idiopathic environmental intolerance to electromagnetic fields and in the general population." *Perspectives in Public Health* 134 (3):160-168. doi: 10.1177/1757913913492931.
- Van Etten, M. L., and S. Taylor. 1998. "Comparative Efficacy of Treatments for Post-traumatic Stress Disorder: A Meta-Analysis." *Clinical Psychology and Psychotherapy* 5 (3):126-144.
- van Moorselaar, I., P. Slottje, P. Heller, R. van Strien, H. Kromhout, M. Murbach, N. Kuster, R. Vermeulen, and A. Huss. 2017. "Effects of personalised exposure on self-rated electromagnetic hypersensitivity and sensibility - A double-blind randomised controlled trial." *Environ Int* 99:255-262. doi: 10.1016/j.envint.2016.11.031.
- Vanderstraeten, J., L. Verschaeve, H. Burda, C. Bouland, and C. de Brouwer. 2012. "Health effects of extremely low-frequency magnetic fields: Reconsidering the melatonin hypothesis in the light of current data on magnetoreception." *Journal of Applied Toxicology* 32 (12):952-958. doi: 10.1002/jat.2761.
- Vecchio, F., C. Babiloni, F. Ferreri, P. Buffo, G. Cibelli, G. Curcio, S. van Dijkman, J. M. Melgari, F. Giambattistelli, and P. M. Rossini. 2010. "Mobile phone emission modulates inter-hemispheric functional coupling of EEG alpha rhythms in elderly compared to young subjects." *Clin Neurophysiol* 121 (2):163-71. doi: 10.1016/j.clinph.2009.11.002.
- Volkow, N. D., D. Tomasi, G. J. Wang, J. S. Fowler, F. Telang, R. Wang, D. Alexoff, J. Logan, C. Wong, K. Pradhan, E. C. Caparelli, Y. Ma, and M. Jayne. 2010. "Effects of low-field magnetic stimulation on brain glucose metabolism." *Neuroimage* 51 (2):623-8. doi: 10.1016/j.neuroimage.2010.02.015.
- Vorobyov, V., B. Janać, V. Pešić, and Z. Prolić. 2010. "Repeated exposure to low-level extremely low frequency-modulated microwaves affects cortex-hypothalamus interplay in freely moving rats: EEG study." *International Journal of Radiation Biology* 86 (5):376-383. doi: 10.3109/09553000903567938.
- Wallace, D., S. Eltiti, A. Ridgewell, K. Garner, R. Russo, F. Sepulveda, S. Walker, T. Quinlan, S. Dudley, S. Maung, R. Deeble, and E. Fox. 2010. "Do TETRA (Airwave) base station signals have a short-term impact on health and well-being? a randomized double-blind provocation study." *Environmental Health Perspectives* 118 (6):735-741. doi: 10.1289/ehp.0901416.
- Wallace, D., S. Eltiti, A. Ridgewell, K. Garner, R. Russo, F. Sepulveda, S. Walker, T. Quinlan, S. Dudley, S. Maung, R. Deeble, and E. Fox. 2012. "Cognitive and physiological responses in humans exposed to a TETRA base station signal in relation to perceived electromagnetic hypersensitivity." *Bioelectromagnetics* 33 (1):23-39. doi: 10.1002/bem.20681.
- Wang, L. F., X. Li, Y. B. Gao, S. M. Wang, L. Zhao, J. Dong, B. W. Yao, X. P. Xu, G. M. Chang, H. M. Zhou, X. J. Hu, and R. Y. Peng. 2015. "Activation of VEGF/Fik-1-ERK Pathway Induced Blood-Brain Barrier Injury After Microwave Exposure." *Mol Neurobiol* 52 (1):478-91. doi: 10.1007/s12035-014-8848-9.
- Waterhouse, J. . 2010. *Circadian rhythms and cognition* Prog Brain Res 2010, 185 : 131-153.
- Wenzel, F., J. Reissenweber, and E. David. 2005. "Cutaneous microcirculation is not altered by a weak 50 Hz magnetic field." *Biomed Tech (Berl)* 50 (1-2):14-8. doi: 10.1515/bmt.2005.003.
- Wessely, S. 1990. "Old wine in new bottles: neurasthenia and 'ME'." *Psychol Med* 20 (1):35-53.
- Westby, G. W. M., and K. J. Partridge. 1986. "Human homing: Still no evidence despite geomagnetic controls." *Journal of Experimental Biology* VOL. 120:325-331.
- Wilén, J., A. Johansson, N. Kalezic, E. Lyskov, and M. Sandström. 2006. "Psychophysiological tests and provocation of subjects with mobile phone related symptoms." *Bioelectromagnetics* 27 (3):204-214. doi: 10.1002/bem.20195.

- Williams, W. M., M. Del Cerro, and S. M. Michaelson. 1984b. "Effect of 2450 MHz microwave energy on the blood-brain barrier to hydrophilic molecules. B. Effect on the permeability to HRP." *Brain Research* 319 (2):171-181.
- Williams, W. M., W. Hoss, M. Formaniak, and S. M. Michaelson. 1984a. "Effect of 2450 MHz microwave energy on the blood-brain barrier to hydrophilic molecules. A. Effect on the permeability to sodium fluorescein." *Brain Res* 319 (2):165-70.
- Wiltschko, W., and R. Wiltschko. 2005. "Magnetic orientation and magnetoreception in birds and other animals." *Journal of Comparative Physiology A: Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology* 191 (8):675-693. doi: 10.1007/s00359-005-0627-7.
- Winklhofer, M. 2012. "Physiology. An avian magnetometer." *Science* 336 (6084):991-2. doi: 10.1126/science.1223786.
- Witthoft, M., and G. J. Rubin. 2013. "Are media warnings about the adverse health effects of modern life self-fulfilling? An experimental study on idiopathic environmental intolerance attributed to electromagnetic fields (IEI-EMF)." *J Psychosom Res* 74 (3):206-12. doi: 10.1016/j.jpsychores.2012.12.002.
- Wolburg, H., and A. Lippoldt. 2002. "Tight junctions of the blood-brain barrier: Development, composition and regulation." *Vascular Pharmacology* 38 (6):323-337. doi: 10.1016/S1537-1891(02)00200-8.
- Wolf, M., G. S. van Doorn, and F. J. Weissing. 2008. "Evolutionary emergence of responsive and unresponsive personalities." *Proc Natl Acad Sci U S A* 105 (41):15825-30. doi: 10.1073/pnas.0805473105.
- Wolfe, F., H. A. Smythe, M. B. Yunus, R. M. Bennett, C. Bombardier, D. L. Goldenberg, P. Tugwell, S. M. Campbell, M. Abeles, P. Clark, and et al. 1990. "The American College of Rheumatology 1990 Criteria for the Classification of Fibromyalgia. Report of the Multicenter Criteria Committee." *Arthritis Rheum* 33 (2):160-72.
- Wood, A. W., S. P. Loughran, and C. Stough. 2006. "Does evening exposure to mobile phone radiation affect subsequent melatonin production?" *Int J Radiat Biol* 82 (2):69-76. doi: 10.1080/09553000600599775.
- Woolley, D. G., B. Vermaercke, H. O. de Beeck, J. Wagemans, I. Gantois, R. D'Hooge, S. P. Swinnen, and N. Wenderoth. 2010. "Sex differences in human virtual water maze performance: Novel measures reveal the relative contribution of directional responding and spatial knowledge." *Behavioural Brain Research* 208 (2):408-414. doi: 10.1016/j.bbr.2009.12.019.
- Xu, S., Z. Zhou, L. Zhang, Z. Yu, W. Zhang, Y. Wang, X. Wang, M. Li, Y. Chen, C. Chen, M. He, G. Zhang, and M. Zhong. 2010. "Exposure to 1800 MHz radiofrequency radiation induces oxidative damage to mitochondrial DNA in primary cultured neurons." *Brain Res* 1311:189-96. doi: 10.1016/j.brainres.2009.10.062.
- Yilmaz, D., and M. Yildiz. 2010. "Analysis of the mobile phone effect on the heart rate variability by using the largest Lyapunov exponent." *Journal of Medical Systems* 34 (6):1097-1103. doi: 10.1007/s10916-009-9328-z.
- Zelinski, E. L., S. H. Deibel, and R. J. McDonald. 2014. "The trouble with circadian clock dysfunction: Multiple deleterious effects on the brain and body." *Neuroscience and Biobehavioral Reviews* 40:80-101. doi: 10.1016/j.neubiorev.2014.01.007.
- Zhou, J. X., G. R. Ding, J. Zhang, Y. C. Zhou, Y. J. Zhang, and G. Z. Guo. 2013. "Detrimental effect of electromagnetic pulse exposure on permeability of in vitro blood-brain-barrier model." *Biomed Environ Sci* 26 (2):128-37. doi: 10.3967/0895-3988.2013.02.007.
- Zimmer, D. B., E. H. Cornwall, A. Landar, and W. Song. 1995. "The S100 protein family: History, function, and expression." *Brain Research Bulletin* 37 (4):417-429. doi: 10.1016/0361-9230(95)00040-2.
- Zorach, R. Glaser. . 1971. Bibliography of Reported Phenomena ('Effects') and clinical manifestations attributed to microwave and radio-frequency radiation. Naval Medical Research Institute. Bethesda, Maryland, USA.
- Zwamborn, Vossen, van Leersum, Ouwens, and Mäkel. 2003. Effects of global communication system radiofrequency fields on well being and cognitive functions of human subjects with and without subjective complaints. In *Rapport TNO*.

11.2 Références citées mais non publiées à ce jour

CSTB. 2015. "Evaluation de l'efficacité des dispositifs de protection utilisés contre les champs électromagnétiques". Contrat de recherche et développement (CRD) financé par l'Anses (réf : n° 2015-CRD-07).

Enquête auprès de personnes se déclarant EHS favorables à l'établissement d'une zone blanche. 2015. Analyse statistique des données issues du rapport de stage de Marine Viet de l'école AgroParisTech. "Electrohypersensibilité, zones blanches et prise en charge des sujets EHS".

EVIREF (Réponses physiologiques d'adaptation ou d'évitement du rat juvénile exposé aux ondes radiofréquences type antenne relais) – Projet financé dans le cadre du Programme national de recherche Environnement-Santé Travail (PNR EST) n° EST-2013/2/09.

UMRESTTE (Unité Mixte de Recherche Épidémiologique et de Surveillance Transport Travail Environnement), Ifsttar et Université Claude Bernard Lyon 1. 2016. "Étude sur l'EHS auprès de médecins généralistes de la région Rhône-Alpes". Contrat de recherche et développement (CRD) financé par l'Anses (réf : n° 2015-CRD-14).

11.3 Normes

Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (C95.1-2005). Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic fields 3 kHz to 300 GHz.

NF X 50-110 (mai 2003) Qualité en expertise – Prescriptions générales de compétence pour une expertise. AFNOR (indice de classement X 50-110).

Norme AECTP 250 (*Allied environmental conditions and tests publication*) – *Electrical and electromagnetic environmental conditions* - Edition 2 – January 2011 – LEAFLET 254 ATMOSPHERIC ELECTRICITY AND LIGHTNING.

Norme EN 50065-1 : 2011 (transmission de signaux sur les réseaux électriques basse tension dans la bande de fréquences de 3 kHz à 148,5 kHz - Partie 1 : Règles générales, bandes de fréquences et perturbations électromagnétiques).

11.4 Législation et réglementation

DIRECTIVE 2013/35/UE DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL, du 26 juin 2013 ; concernant les prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux agents physiques (champs électromagnétiques) (vingtième directive particulière au sens de l'article 16, paragraphe 1, de la directive 89/391/CEE) et abrogeant la directive 2004/40/CE.

Décret n° 2002-775 du 3 mai 2002 pris en application du 12° de l'article L. 32 du code des postes et télécommunications et relatif aux valeurs limites d'exposition du public aux champs électromagnétiques émis par les équipements utilisés dans les réseaux de télécommunication ou par les installations radioélectriques. (NOR: INDI0220135D. Version consolidée au 5 mai 2002).

Loi n° 2015-136 du 9 février 2015 relative à la sobriété, à la transparence, à l'information et à la concertation en matière d'exposition aux ondes électromagnétiques, dite « loi Abeille ».

Loi n° 2010-1657 du 29 décembre 2010 de finances pour 2011.

ANNEXES

Annexe 1 : L'IRM utilise trois types de champs magnétiques ou électromagnétiques

Champs magnétiques statiques

Les champs magnétiques statiques utilisés en IRM sont compris entre 0,1 et 11 Tesla (T) ; la plupart des appareils corps entier ont des champs de 1,5 ou de 3,0 T. Les champs plus faibles sont utilisés dans des appareils ouverts, destinés à l'exploration des membres. Les champs plus élevés sont le propre des appareils de recherche.

Les effets biologiques à court-terme des expositions à ces champs ont fait l'objet de très nombreuses recherches portant sur la morphologie et la croissance cellulaire, les cellules reproductrices et la tératogénicité, la structure de l'ADN et l'expression des gènes, le développement pré- et post-natal, la perméabilité de la barrière hémato-encéphalique, l'activité nerveuse, les fonctions cognitives et le comportement, la dynamique cardiovasculaire, les index hématologiques, la régulation thermique, les rythmes circadiens, les réponses immunitaires et autres processus biologiques (voir référence dans (Shellock and Crues 2004)). La plupart de ces études ont conclu à l'absence d'effet nocif notable. Les quelques études rapportant la présence de tels effets n'ont pas été confirmées. Les effets à long-terme sont moins bien connus (voir référence dans Shellock & Crues, 2004), mais ne semblent pas préoccupants. Il n'y a pas de preuve d'un effet cumulatif des expositions aux champs magnétiques statiques. Cependant, il n'y a pas non plus d'étude soigneusement contrôlée qui démontre l'innocuité absolue de ces expositions.

Gradients de champs magnétiques

Les gradients de champs magnétiques dans l'espace sont le fait de trois paires de bobines métalliques placées autour du tunnel de l'aimant qui génère le champ statique. Le passage d'un courant électrique dans ces bobines crée des variations spatiales d'intensité du champ magnétique dans le tunnel. Chaque paire de bobines fait varier le champ magnétique selon un axe spécifique (droite-gauche, avant-arrière, haut-bas). On peut ainsi sélectionner une épaisseur et un plan de coupe (transversal, frontal, sagittal ou oblique) et déterminer la localisation spatiale des signaux dans ce plan. Les interactions entre ces gradients de champs magnétiques et les tissus biologiques dépendent de nombreux facteurs : la fréquence fondamentale du champ, les densités de flux maximale et moyenne, la présence de fréquences harmoniques, la forme du signal et sa polarité, la distribution du courant dans le corps et la sensibilité des membranes cellulaires (voir référence dans Shellock & Crues, 2004). L'intensité des gradients spatiaux de champ magnétique est de l'ordre de quelques dizaines de mT/m.

À certains niveaux d'exposition, ces gradients peuvent provoquer des stimulations des nerfs périphériques, perçues comme des sensations de picotement ou de tapotement. À des niveaux d'exposition de plus de 50 %-100 % au dessus du seuil de perception, ils peuvent engendrer un inconfort ou même des douleurs. Les expositions à des niveaux extrêmement élevés (plus d'un ordre de grandeur que ceux utilisés dans les appareils du commerce) peuvent induire une stimulation cardiaque. Toutefois, aucun accident de ce type n'a été rapporté jusqu'à présent. En revanche, l'activation des gradients de champ électromagnétique pendant le déroulement de l'examen est à l'origine de bruits qui constituent l'effet indésirable le mieux établi des examens IRM. Outre le désagrément, voire la pénibilité qu'ils provoquent et les difficultés de communication avec les manipulateurs et les médecins qu'ils peuvent engendrer, ces bruits ont été la cause de quelques rares cas de surdité (Mollasadeghi *et al.* 2013). Toutefois, ces inconvénients peuvent être facilement évités par l'utilisation de protections auditives et de moyens de communication adaptés.

Champs magnétiques radiofréquences

Les champs magnétiques radiofréquences ont pour but d'induire des variations brusques de ce champ pour changer l'orientation des moments magnétiques des noyaux. Leurs fréquences doivent être adaptées à la densité de flux du champ magnétique statique et aux noyaux « *MR active* ». Ainsi, pour l'hydrogène, la fréquence doit être de 42,57 MHz par Tesla. Ces expositions aux radiofréquences sont intenses, mais extrêmement brèves (impulsion).

Annexe 2 : Comparaison des symptômes utilisés pour le diagnostic de l'EHS dans cinq questionnaires différents

La symptomatologie fonctionnelle de l'EHS est, d'après les descriptions qui en sont faites dans la littérature, riche et variée. Dans sa revue générale sur la question, Irvine (2005) relève 45 symptômes extraits de 5 articles²²³. Les deux propositions de questionnaire standardisé en comprennent 36 pour l'un (Frick *et al.*, 2002) et 39 pour l'autre (Eltiti *et al.*, 2007) et 33 pour le questionnaire en langue française utilisé dans le PHRC de l'Hôpital Cochin. En croisant ces quatre listes (*cf.* Tableau 11), on obtient un total de 85 symptômes dont :

- sept (8,3 %) seulement sont communs aux quatre listes : « fatigue, épuisement », « maux de tête », « troubles de la mémoire », « difficultés de concentration », « anxiété-stress », « essoufflement », « palpitations ».
- dix (11,8 %) sont communs à trois listes (« troubles du sommeil », « sensation de nez bouché », « sensations d'instabilité, vertiges », « douleurs, tension musculaire », « douleurs articulaires », « nausées », « sensation de tête lourde », « peau sèche », « rash, éruption », « rougeurs cutanées »),
- vingt-sept sont communs à deux listes :
 - symptômes ORL : « toux », « écoulement nasal antérieur », « perturbations de l'olfaction », « douleurs d'oreille », « sifflements ou sonnerie dans l'oreille », « sensation de chaleur dans l'oreille », « perturbations du goût » ;
 - symptômes nerveux : « nervosité, agitation », « irritabilité, crises de colères », « dépression, crise de larmes », « tremblements », « céphalées sourdes », « sensation de chaleur dans la tête » ;
 - symptômes cutanés : « enflure cutanée, urticaire », « démangeaisons », « douleurs cutanées », « sensation de brûlure cutanée », « irritation cutanée », « sueurs, transpiration accrue » ;
 - symptômes musculaires : « faiblesse musculaire », « douleurs dorsales, lombaires », « douleurs thoraciques » ;
 - symptômes oculaires : « flou visuel », « sécheresse des yeux » ;
 - symptômes au niveau de l'appareil digestif : « douleurs ou crampes abdominales », « ballonnements abdominaux » ;
 - Autres : « douleurs dentaires inexplicables ».
- quarante-et-un (48,2 %) sur une seule liste : 14 (sur 36, soit 38,9 %) dans la liste de Frick *et al.*, 8 (sur 45, soit 17,8 %) dans celle d'Irvine, 7 (sur 39, soit 17,9 %) dans celle d'Eltiti *et al.*, et 12 (sur 33, soit 36,4 %) dans la liste utilisée dans le PHRC.

Ces questionnaires ne permettent pas de classer différentes populations (se déclarant EHS ou non), ils permettent un simple état des lieux. Ils ne préjugent en rien de la fréquence et de la sévérité respective de ces symptômes chez les personnes se déclarant EHS. Cependant, l'importance des divergences entre les principaux auteurs qui ont abordé la question de l'EHS permet de mieux comprendre qu'il n'ait pas été possible jusqu'à présent d'élaborer un tableau clinique caractéristique de l'EHS.

Cette synthèse est une illustration de l'hétérogénéité des approches adoptées par toutes ces études et de l'impossibilité qui en résulte d'en dégager un tableau clinique précis.

²²³ Ces 5 articles sont ceux de Bergdahl (1995) qui rapporte 23 symptômes, (Bergdahl, Tillberg, and Stenman 1998) qui en rapportent 11, Hillert *et al.* (1999) qui en rapportent 16, (Stenberg *et al.* 2002) qui en rapportent 16 également, et Rööslé *et al.* (2004) qui en rapportent 18. Ces listes de symptômes se recoupent en grande partie. Seuls trois symptômes sont communs aux cinq listes : "fatigue", "étourdissement/vertiges" et "céphalées".

Tableau 11 : liste des symptômes utilisés dans les principaux questionnaires servant à décrire l'EHS

Auteurs :	QEESI	Frick et al	Irvine	Eltiti et al.	PHRC	pas dans	seul dans	seul dans	seul dans	seul dans	seul dans
	1999 ⁽¹⁾	2002 ⁽²⁾	2005 ⁽³⁾	2007 ⁽⁴⁾	2011 ⁽⁵⁾	QEESI	QEESI	Frick	Irvine	Eltiti	Crasson
Etat général											
1. Fatigue, Epuisement		1	1	1	1	1					
Feebleness		1				1		1			
2. Baisse (ou perte) de l'appétit					1	1					1
3. Amaigrissement											
4. Prise de poids											
5. Troubles du sommeil		1	1	1		1					
6. Somnolence diurne		1				1		1			
7. Sensation de malaise, d'inconfort					1	1					1
8. Bouffées de chaleur (feeling too hot)		1				1		1			
1. Troubles musculosquelettiques											
9. Douleurs, tensions musculaires	1	1	1	1		1					
10. Crampes musculaires	1	1				1					
11. Raideurs musculaires	1						1				
12. Faiblesse musculaire	1		1	1		1					
13. Douleurs articulaires	1		1	1	1	1					
14. Raideurs articulaires	1						1				
15. Ankylose dans les bras et les doigts					1	1					1
16. Gonflements articulaires		1						1			
17. Douleurs dorsales, lombaires			1	1		1					
2. Muqueuses et troubles respiratoires											
18. Brûlure ou irritation des yeux	1		1			1					
19. Flou visuel		1			1	1					
20. Sécheresse des yeux			1		1	1					
21. Yeux gonflés		1				1		1			
22. Papillotements (flickering)		1				1		1			
23. Essoufflement	1	1	1	1	1	1					
24. Toux	1			1	1	1					
25. Mucosités	1						1				
26. Ecoulement nasal postérieur	1						1				
27. Infections respiratoires	1						1				
28. Sensation de nez bouché			1	1	1	1					
29. Ecoulement nasal antérieur			1	1		1					
30. Perturbations de l'olfaction			1	1		1					
31. Douleurs thoraciques		1		1		1					
32. Incapacité à respirer profondément					1	1					1
33. Respiration accélérée ou plus profonde					1	1					1

Auteurs :	QEESI	Frick et al	Irvine	Eltiti et al.	PHRC	pas dans	seul dans	seul dans	seul dans	seul dans	seul dans
	1999 ⁽¹⁾	2002 ⁽²⁾	2005 ⁽³⁾	2007 ⁽⁴⁾	2011 ⁽⁵⁾	QEESI	QEESI	Frick	Irvine	Eltiti	Crasson
3. Symptômes cardio-thoraciques											
33. Rythme cardiaque accéléré	1	1				1					
34. Rythme irrégulier, extrasystoles	1	1				1					
35. Palpitations	1	1	1	1	1	1					
36. Gêne dans la poitrine/Douleurs cardiaques	1			1		1					
37. Augmentation pression artérielle		1				1		1			
4. Troubles gastro-intestinaux											
38. Douleurs ou crampes abdominales	1	1			1	1			1		
39. Ballonnements abdominaux	1	1			1	1					
40. Nausées	1	1	1		1	1					
41. Vomissements		1				1		1			
42. Diarrhée	1						1				
43. Constipation	1						1				
44. Mouvements intestinaux irréguliers		1				1		1			
5. Ralentissement intellectuel											
45. Difficultés de concentration	1	1	1	1	1	1					
46. Troubles de la mémoire	1	1	1	1	1	1					
47. Impression de déconnexion	1			1		1					
48. Difficultés à prendre des décisions	1						1				
49. Difficultés à focaliser l'attention				1		1				1	
50. Pensée brumeuse, confusion				1		1				1	
51. Manque du mot					1	1					1
6. Instabilité de l'humeur											
52. Anxiété, stress	1	1	1	1	1	1					
53. Nervosité, agitation		1	1			1					
54. Irritabilité, crise de colère	1		1		1	1					
55. Dépression, crises de larmes	1		1	1		1					
56. Désintérêt pour activités habituelles	1						1				
57. Se sentir séparé de son corps					1	1					1
58. Sensation de déjà vu					1	1					1

Auteurs :	QEESI	Frick et al	Irvine	Eltiti et al.	PHRC	pas dans	seul dans	seul dans	seul dans	seul dans	seul dans
	1999 ⁽¹⁾	2002 ⁽²⁾	2005 ⁽³⁾	2007 ⁽⁴⁾	2011 ⁽⁵⁾	QEESI	QEESI	Frick	Irvine	Eltiti	Crasson
7. Problèmes d'équilibre et de coordination											
59. Engourdissement ou picotement	1	1				1					
60. Difficulté d'accommodation oculaire	1						1				
61. Tremblements		1	1			1					
62. Douleurs d'oreille			1	1		1					
63. Sensation d'oreille bouchée				1		1				1	
64. Sifflements ou sonnerie dans l'oreille			1	1		1					
65. Sensation de chaleur dans l'oreille			1	1		1					
66. Sensation d'instabilité, vertiges		1	1		1	1					
67. Sensibilité accrue au bruit					1	1					1
8. Maux de tête											
68. Maux de tête	1	1	1	1	1	1					
69. Sensation de tête lourde	1		1	1	1	1					
70. Visage congestionné	1						1				
71. Céphalées sourdes				1		1				1	
72. Migraines				1		1				1	
73. Sensation de chaleur dans la tête				1	1	1					
74. Douleur aiguë dans la tête				1		1				1	
75. Douleur de la nuque		1				1		1			
9. Symptômes cutanés											
76. Peau sèche	1	1	1	1		1					
77. Enflure cutanée, urticaire	1		1	1		1					
78. Rash, éruption	1	1	1	1		1					
79. Démangeaisons		1	1			1					
80. Perte de cheveux		1				1		1			
81. Douleurs cutanées			1	1		1					
82. Sensation de brûlure cutanée			1	1		1					
83. Irritation cutanée			1	1		1					
84. Rougeurs cutanées			1	1	1	1					
85. Sueurs, transpiration accrue			1		1	1					

Auteurs :	QEESI	Frick et al	Irvine	Eltiti et al.	PHRC	pas dans	seul dans	seul dans	seul dans	seul dans	seul dans
	1999 ⁽¹⁾	2002 ⁽²⁾	2005 ⁽³⁾	2007 ⁽⁴⁾	2011 ⁽⁵⁾	QEESI	QEESI	Frick	Irvine	Eltiti	Crasson
10. Troubles génito-urinaires											
86. Douleurs pelviennes	1						1				
87. Besoin d'uriner fréquemment	1						1				
88. Troubles des règles	1		1			1					
89. Perturbations du goût			1	1		1					
90. Chaleur buccale			1			1			1		
91. Sécheresse buccale			1			1			1		
92. Hypersalivation			1			1			1		
93. Douleur dentaire inexpliquée		1	1			1					
94. Aphtes			1			1			1		
95. Gêne temporo-maxillaire			1			1			1		
96. Fourmillements autour de la bouche					1	1					1
97. Fourmillements dans les doigts					1	1					1
98. Froideur des pieds et des mains					1	1					1
	40	36	45	39	33	84	13	11	6	6	12
	QEESI	Frick	Irvine	Eltiti	PHRC	pas dans	seul dans	seul dans	seul dans	seul dans	seul dans
						QEESI	QEESI	Frick	Irvine	Eltiti	Crasson

(1) (Miller and Prihoda 1999).

(2) (Frick, Rehm, and Eichhammer 2002).

(3) (Irvine 2005b).

(4) (Eltiti *et al.* 2007b).

(5) PHRC « Evaluation d'une prise en charge thérapeutique spécialisée des patients atteints du syndrome d'intolérance environnementale idiopathique attribuée aux champs électromagnétiques (IEI-CEM) » Responsables : Pr D. Choudat et Dr L. Bensefa.

Annexe 3 : Questions adressées par l'Anses au P^r Belpomme le 26 juin 2014

Depuis quand vous intéressez-vous aux personnes se plaignant d'hypersensibilité électromagnétique ?

Comment en êtes-vous venu à vous intéresser à ces personnes ?

Vocabulaire

En 2004, l'OMS a proposé de remplacer le terme d'hypersensibilité électromagnétique par celui d'« intolérance environnementale idiopathique », qu'elle avait créé quelques années plus tôt pour remplacer celui de syndrome d'intolérance aux odeurs chimiques, en y ajoutant « attribué aux champs électromagnétiques ».

Pourquoi utilisez-vous un terme qui vous est propre, « syndrome d'intolérance aux champs électromagnétiques », pour qualifier les personnes qui se plaignent de troubles fonctionnels qu'ils imputent à une exposition à des champs électromagnétiques ?

Quelle différence faites-vous entre l'électro-sensibilité et l'électro-hypersensibilité ?

Sur quoi basez-vous, en l'absence de toute publication personnelle, la description de votre syndrome ?

Diagnostic de l'EHS

Les patients qui viennent vous consulter ont-ils déjà établi leur autodiagnostic (ils se déclarent EHS et c'est pour cela qu'ils viennent vous voir), ou bien souffrent-ils de maux mystérieux et c'est vous qui établissez le diagnostic ? Dans ce cas, quels sont vos critères ?

Quels sont les symptômes de l'EHS ?

Parmi ces critères, quelle importance attachez-vous à la caractérisation de l'exposition (en volt/mètre par exemple) ?

Quelles sont les émissions radioélectriques dont se plaignent les personnes se déclarant EHS ?

Quand ils racontent leur parcours, vos patients font-ils souvent allusion à des événements déclencheurs ? Mettent-ils en avant des facteurs prédisposants ?

Si vous deviez faire ressortir un point commun (symptôme ou parcours par exemple) entre toutes les personnes se déclarant EHS vues en consultation, quel serait-il ?

Combien de patients avez-vous diagnostiqués au total ? 88 personnes lors de l'audition de 2009, 204 vues en consultation en 2010, qu'en est-il aujourd'hui ?

En dehors de l'écho Doppler cérébral, sur quels examens repose votre diagnostic ?

Quelles sont les données cliniques et biologiques que vous utilisez pour établir le diagnostic ? Comment les interprétez-vous ?

Quelles sont les publications sur lesquelles repose votre diagnostic ?

Causalité

De quelles informations disposez-vous sur la causalité de l'EHS ?

Comment expliquez-vous le rôle des « magnétosomes » dans l'origine du syndrome ?

L'EHS est-elle liée à une concentration de polluants dans l'organisme selon vous ? Lesquels (polybrominates diphenyl ether (PBDE), métabolite MC6 du chlordane) (cf. Hardelle, Biology & Medicine, 2008) ? Avez-vous réalisé des mesures de ces polluants ? Avez-vous validé cette hypothèse ?

Quelles sont les publications permettant d'établir un lien de causalité d'après vous ?

Examens médicaux

Comment fonctionne l'échodoppler cérébral pulsé ?

Avez-vous pu acquérir l'IRM moléculaire ?

Avez-vous poursuivi les études de l'analyse thermographique par infrarouges ?

Avez-vous dosé la S100B ?

Avez-vous dosé l'o-myéline ?

Avez-vous dosé l'histamine ?

Avez-vous dosé les protéines de stress HSP70 et HSP27 ?

Avez-vous mené des études sur les liens de cause à effet entre champs EM et symptômes en cage de Faraday (avec la Pitié Salpêtrière et le CNRS) ?

Où en sont vos recherches sur les causes génétiques et acquises de l'EHS (en cours en 2010) ?

Quels sont les éléments qui vous permettent de suspecter un facteur génétique ?

Allez-vous publier vos travaux ?

Prise en charge des patients

Dans quel cadre les prenez-vous en charge ?

Les avez-vous traités et, si oui, combien, comment et avec quels résultats ?

Avez-vous pu avoir un suivi des patients que vous n'avez pas traités et, si oui, combien et avec quels résultats ?

Évolution

Comment l'intolérance évolue-t-elle ?

Quels liens avez-vous établi avec d'autres maladies ?

Lors de l'une de vos présentations, vous avez dit :

« Pour la sclérose en plaques, (...) j'ai deux cas de sclérose en plaques, non pas déclenchées par le CEM mais dont une poussée a été indiscutablement déclenchée par un portable. Ces deux cas vont être rapportés dans notre prochaine publication car ceci est essentiel. »

Qu'en est-il ? Avez-vous publié vos résultats ?

Quelles sont les maladies vers lesquelles l'intolérance peut évoluer (Alzheimer, sclérose, cancer, etc.) ? Quels sont les marqueurs qui indiquent cela d'après vous ?

Où en sont vos recherches sur la mesure du rythme cardiaque des patients ?

Autres questions

Qu'est ce que les actions auprès de la sécurité sociale ont donné ?

Qu'en est-il de la sortie du rapport descriptif, « feuille de route de la maladie à l'usage des médecins traitants » ?

Quels sont vos travaux en cours ? Allez-vous les publier ?

Annexe 4 : Analyse de l'article Belpomme et al. (2015) par le GT « RF et santé »

Étant donné le nombre de paramètres biologiques analysés et le nombre élevé de personnes se déclarant EHS et / ou MCS²²⁴ (n = 1 216) incluses dans l'étude de Belpomme et al. (2015) ;

étant donné la place médiatique occupée par le Pr Belpomme sur la question de l'EHS depuis la fin des années 2000 ;

étant donné son refus d'être auditionné par le GT de l'Anses et les attentes des personnes se déclarant EHS vis-à-vis de ses travaux de recherche ;

étant donné, enfin, la qualité de sa publication ;

le GT a accordé une attention particulière à sa première publication sur le sujet et lui a consacré une annexe pour présenter les principales limites de l'article en question ci-après :

Concernant la sélection des sujets, 1 216 patients se déclarant EHS et / ou SIOC ont été vus en consultation. Toutefois, l'analyse ne porte que sur 839 patients (521 se déclarant EHS, 52 SIOC et 154 EHS+SIOC), il n'y a aucune explication sur le fait que 377 patients aient été écartés de l'analyse. Les critères de sélection de ces 839 patients ne sont pas clairs. Pour caractériser les sujets SIOC, les auteurs utilisent six critères de sélection (définis dans la référence 3 de l'article : MCS, 1999), auxquels ils ajoutent un 7^{ème} critère sur la cessation subjective de la perception des odeurs. Ils affirment ainsi distinguer les personnes se déclarant EHS des SIOC, sur la base de ce 7^{ème} critère, établi à partir d'observations réalisées uniquement par les auteurs, dans le cadre d'une étude de faisabilité non publiée. Tout l'article repose sur cette affirmation selon laquelle les personnes se déclarant EHS se distingueraient des SIOC du fait d'anomalies du système olfactif. Par ailleurs, concernant la sélection des sujets, il n'est pas possible de savoir quelles sont les caractéristiques des 377 sujets qui ont été éliminés de l'analyse. De plus, l'inclusion des sujets est d'autant plus étrange que deux cas malades d'Alzheimer ont été découverts après inclusion, alors que les personnes souffrant de troubles neurologiques ont été exclues de l'étude (aucune information n'est donnée sur les tests réalisés pour exclure les cas de personnes souffrant de troubles neurologiques).

Il n'y a pas de population témoin, ce qui n'est pas un problème majeur si l'on se réfère aux niveaux biologiques des biomarqueurs étudiés dans la population générale (non-EHS), mais il manque la distribution des valeurs mesurées. Il n'est pas possible de connaître la distribution des résultats des dosages biologiques (tableaux 3, 4 et 5 de l'article). Seule la fourchette des résultats dépassant la valeur normale est donnée. Il suffit qu'il y ait un seul point atypique qui écarte l'intervalle des valeurs mesurées pour donner l'impression que toutes les valeurs sont très en dehors de celui-ci. A minima, la médiane aurait dû être donnée pour chaque biomarqueur mesuré. L'absence de groupe témoin est, en revanche, rédhibitoire pour les résultats de la tomosphygmographie ultrasonore pulsée, car cette technique, décrite dans les années 1980, ne fait plus l'objet de publication depuis cette époque (voir commentaires concernant l'utilisation de cette technique ci-après).

En outre, l'âge médian de la population étudiée est de 47 ans, compris entre 16 et 83 ans (voir pyramide des âges sur la figure 3, sur laquelle il manque l'échelle des ordonnées). Or, les valeurs moyennes des dosages biologiques réalisés sont dépendantes de l'âge. Il aurait été nécessaire de comparer les résultats avec ceux d'une population témoin appariée en âge ou, a minima, une présentation des résultats par tranche d'âge.

On relève dans les tableaux 3, 4 et 5 de l'article reproduits ci-après des erreurs de calcul sur les pourcentages (les erreurs sont corrigées en gras). Les pourcentages donnés dans les tableaux 3, 4 et 5 ne sont pas informatifs, il aurait mieux valu calculer la spécificité²²⁵ et la sensibilité²²⁶ par

²²⁴ MCS : *multiple chemical sensitivities*, équivalent du terme SIOC en français.

²²⁵ Spécificité : capacité d'un test à donner un résultat négatif lorsque l'hypothèse n'est pas vérifiée.

²²⁶ Sensibilité : capacité d'un test à donner un résultat positif lorsqu'une hypothèse est vérifiée.

rapport à un test *gold standard*²²⁷. Au total, il y a une dizaine d'erreurs dans ces trois tableaux. Ne seront utilisés ci-dessous que les pourcentages corrigés (**en gras** dans les tableaux 3, 4 et 5 selon la numérotation originale de l'article).

Table 3 (numérotation originale): **High-sensitivity C reactive protein (hs-CRP), immunoglobulin E (IgE), vitamin D2-D3 and histamine in the peripheral blood of EHS and/or MCS self-reporting patients.**

Patients groups	EHS	MCS	EHS/MCS
n	521	52	154
hs-CRP	78 (14.97%)	3 (~~13.46~~ 5,77%)	22 (14.2 9%)
>3 mg/L	[3.27–51.91]	[3.5–10]	[3.27–21.61]
Vitamine D	33 (6.33%)	5 (9.62%)	16 (10.39%)
<10 ng/mL	[4.81–9.70]	[4.80–8.00]	[7.10–9.90]
Vitamine D	300 (57.58%)	25 (48.0 8%)	92 (59.74%)
≥10 ng/mL and <30 ng/mL	[10.40–29.70]	[10.70–27.90]	[15.00–28.60]
Histamine	182/491 (37, 07%)	18/44 (~~36.7~~ 40,91%)	59/142 (41.5 5%)
>10 nmol/L	[10.08–360.00]	[10.80–90.00]	[10.10–1797.50]
IgE	115 (22.07%)	8 (15.38%)	38 (24.68%)
>100 UI/mL	[101–1387.60]	[131.10–294.87]	[103.30–1200.00]

Source : Belpomme et al. (2015)

Remarque : Les erreurs de calcul relevées ci-dessus dans la version initiale du présent rapport, mise en consultation publique en juillet 2016, ont été corrigées depuis dans un *Corrigendum* publié en octobre 2016 (Belpomme, Campagnac, and Irigaray 2016).

Les auteurs annoncent que, d'après le tableau 3, 25,3 % des cas investigués (184 patients au total) manqueraient de vitamine D. Les détails donnés dans le texte sont les suivants : 121 (EHS) (23,2 %), 12 (SIOC) (23,1 %) et 51 (EHS/SIOC) (33,1 %). Les valeurs du texte ne correspondent pas du tout à celles du tableau 3 de l'article, qui sont toutes inférieures : 33 EHS (6,3 %), 5 SIOC (9,62 %) et 16 EHS/SIOC (10,39 %). De plus, l'interprétation du statut vitaminique d'une population est difficile et seul l'état de « carence » est aujourd'hui corrélé à un état clinique particulier (augmentation du risque de pathologies osseuses). Quant à la notion de « déficience » (qui se distingue de la carence) en vitamine D, qui est couramment utilisée, elle ne s'accompagne pas de manifestation clinique particulière et n'est pas associée à un risque pour la santé identifié. En France, la prévalence des déficiences sévères en vitamine D (< 5 ng/mL) serait quasi nulle et celle des déficiences modérées (entre 5 et 10 ng/mL) s'élèverait à 4,4 % des adultes²²⁸.

²²⁷ En médecine ou en statistique, un *gold standard* est un test qui fait référence dans un domaine pour établir la validité d'un fait.

²²⁸ Unité de surveillance et d'épidémiologie nutritionnelle (Usen). Étude nationale nutrition santé, ENNS, 2006. Situation nutritionnelle en France en 2006 selon les indicateurs d'objectif et les repères du Programme national nutrition santé (PNNS). In *VERSUS* - Paris 13 - Cnam : 2007. Disponible à : <http://www.invs.santepubliquefrance.fr>, dossier thématique « Maladies chroniques et traumatismes / Nutrition et santé ».

Table 4 (numérotation originale): **Protein S100 β and nitrotyrosin (NTT) in the peripheral blood of EHS and/or MCS self-reporting patients**

Patients groups	EHS	MCS	EHS/MCS
n	521	52	154
S100 β	73/495 (14.7%)	6/51 (~~19.7~~ 11,8 %)	28/142 (~~19.7~~ 19,7 %)
>0.105 μ g/L	[0.105–2.090]	[0.110–0.500]	[0.110–0.470]
NTT	77/259 (29.7%)	6/29 (~~26~~ 20,7 %)	22/76 (28.9%)
>0.9 μ g/mL	[0.92–8.20]	[1.10–3.10]	[0.91–3.10]
Increased S100B and/or NTT	133/250 (53.2%)	12/22 (54.5%)	46/73 (63%)
Increased histamine, S100B and/or NTT	220/327 (~~71.8~~ 67,3 %)	27/36 (75%)	91/125 (~~79.1~~ 72,8 %)

Source : Belpomme et al. (2015)

Remarque : Les erreurs de calcul relevées ci-dessus dans la version initiale du présent rapport, mise en consultation publique en juillet 2016, ont été corrigées depuis dans un *Corrigendum* publié en octobre 2016 (Belpomme, Campagnac, and Irigaray 2016).

Concernant la barrière hémato-encéphalique, les auteurs ont dosé trois marqueurs ayant des significations différentes : la protéine S100 β , la nitrotyrosine et l'histamine. Il n'est pas possible de connaître précisément combien de patients ont eu un dosage des trois marqueurs à la fois. La protéine S100 β est une protéine exprimée au niveau des astrocytes péricapillaires. Sa concentration sérique est un indicateur de perméabilité de la BHE validé par rapport aux techniques d'imagerie, IRM et scanner X. Le seuil au-dessus duquel les auteurs ont considéré que cette concentration est anormalement élevée est inférieur à celui de 0,12 ng/mL défini par les auteurs de la méthode (Marchi et al., 2013). En conséquence, les pourcentages de sujets ayant une augmentation de la concentration sérique de cette protéine sont certainement plus bas que ceux, déjà faibles, qui ressortent de l'étude (14,7 % pour les sujets se déclarant EHS, 11,8 % pour les sujets SIOC et 19,7 % pour les sujets se déclarant EHS et SIOC). De plus, la protéine S100 β est aussi exprimée dans le cœur et les reins (Zimmer et al. 1995), ce qui rend possible le fait que l'augmentation de sa concentration sérique soit due à des facteurs sans relation avec l'intégrité de la BHE.

La nitrotyrosine est impliquée dans les mécanismes de stress oxydant par lequel l'histamine augmente la perméabilité de la BHE. Sa concentration sérique n'a cependant pas été validée comme indicateur de cette perméabilité par rapport aux techniques d'imagerie cérébrale, chez l'homme. Les auteurs ne donnent pas la référence du seuil au-dessus duquel ils ont considéré que cette concentration sérique était augmentée. Quelles que soient ces réserves, le pourcentage de sujets ayant une concentration sérique élevée de nitrotyrosine est environ deux fois plus élevé que le pourcentage de sujets ayant une concentration sérique de protéine S100 β élevée. Il est cependant toujours inférieur à 30 %, quel que soit le groupe de sujets.

L'histamine est un médiateur chimique présent dans tous les tissus du corps humain et notamment dans les poumons, le foie, la peau et les parois de l'estomac. Elle intervient dans de nombreux processus, dont les plus importants sont la réponse immunitaire, la régulation acide de l'estomac et le contrôle de l'éveil. Elle exerce ses effets via l'activation de quatre récepteurs H1, H2, H3 et H4 qui sont exprimés à la surface de différentes cellules. C'est ainsi que la stimulation des cellules endothéliales via les récepteurs H1 conduit à l'augmentation de la perméabilité vasculaire, dans tout l'organisme comme au niveau cérébral. Au niveau sanguin, on distingue l'histamine plasmatique, dont la concentration est très faible, et l'histaminémie, qui comprend l'histamine contenue dans les polynucléaires basophiles circulants. Il semble que ce soit l'histaminémie qui ait été dosée dans le présent article. Les valeurs normales varient avec la technique utilisée. Celle-ci n'est pas précisée dans l'article. Quoiqu'il en soit, les auteurs rapportent une augmentation de l'histaminémie chez moins de la moitié des sujets : 37,07 % chez les personnes se déclarant EHS, 40,91 % chez les sujets SIOC et 41,55 % chez les personnes se déclarant EHS et SIOC.

Dans l'ensemble, les pourcentages de sujets présentant une augmentation des marqueurs de perturbation de la BHE sont plutôt faibles et ne permettent pas d'expliquer l'EHS par une

augmentation de la perméabilité de la BHE. Chez la majorité des nombreux sujets inclus dans cette étude, la valeur de ces marqueurs est normale. Leur addition ne modifie en rien ces constatations.

Les auteurs indiquent aussi, dans le tableau 4, les pourcentages de sujets présentant une augmentation (1) des concentrations sériques de protéine S100 β et / ou de nitrotyrosine, et (2) des concentrations sériques d'histamine et / ou de l'histaminémie. Ces amalgames n'ont guère de sens physiopathologique dans la mesure où ces dosages traduisent des phénomènes de nature différente. L'augmentation de la concentration de la protéine S100 β traduit le passage d'une molécule « intracérébrale » dans le sang, phénomène secondaire à une altération de la BHE, alors que l'histamine circulante est la cause de cette altération. Il aurait été plus informatif d'indiquer les pourcentages de sujets présentant deux augmentations (protéine S100 β et nitrotyrosine, protéine S100 β et histaminémie, nitrotyrosine et histaminémie).

Au total, les imprécisions relatives aux techniques de dosage et aux valeurs de référence utilisées d'une part, les modalités de présentation des résultats d'autre part, font que ces résultats, sans être dénués d'intérêt, sont à considérer comme des résultats préliminaires, à interpréter avec la plus grande prudence. Ils demandent à être confirmés en utilisant des méthodes de dosage validées et bien décrites et des valeurs de référence établies à partir d'une population témoin de sujets appariés sur l'âge et le genre.

En attendant, un traitement mieux adapté des nombreuses données recueillies pourrait permettre de décrire un ou plusieurs sous-groupe(s) de personnes se déclarant EHS ayant des caractéristiques physiopathologiques différentes. Enfin, il ne faut pas oublier que ces dosages sanguins ne constituent que des approches indirectes du phénomène et n'ont, en particulier, aucune valeur localisatrice. Seules des techniques d'imagerie cérébrale adéquates peuvent apporter la preuve de l'existence et de la localisation d'une augmentation de la perméabilité de la BHE chez l'Homme.

Table 5 (numérotation originale): HSP70 and HSP27 chaperone proteins and anti-O-myelin autoantibodies in the peripheral blood of EHS and/or MCS self-reporting patients

Patients groups	EHS	MCS	EHS/MCS
n	521	52	154
Hsp 70	91/486 (18.7%)	4/52 (7.7%)	36/142 (25.4%)
>5 ng/mL	[5.90–11.20]	[7.10–7.70]	[5.20–32.20]
Hsp 27	123/476 (25.8%)	6/52 (11.5%)	42/132 (31.8%)
>5 ng/mL	[5.20–11.20]	[5.90–9.20]	[5.10–25.00]
Hsp70 and/or Hsp27	162/487 (33.3%)	9/52 (17.3%)	56/142 (39.4%)
Anti-O-myelin autoantibodies	109/477 (22.9%)	8/47 (17%)	33/140 (23.6%)

Source : Belpomme et al. (2015)

Remarque : Les erreurs de calcul relevées ci-dessus dans la version initiale du présent rapport, mise en consultation publique en juillet 2016, ont été corrigées depuis dans un *Corrigendum* publié en octobre 2016 (Belpomme, Campagnac, and Irigaray 2016).

Il n'est pas possible de savoir précisément combien de patients ont eu un dosage des trois marqueurs Hsp 70, Hsp 27 et auto-anticorps Anti-O-myelin à la fois.

L'étude ne permet de faire aucun lien entre les biomarqueurs et l'intensité des différents types de symptômes des personnes se déclarant EHS et / ou SIOC. Pour cela, il aurait fallu créer des catégories, même relativement grossière, en fonction de l'intensité des symptômes. Cela aurait permis de donner un argument en faveur d'une éventuelle association entre biomarqueurs et symptômes.

De l'aveu même des auteurs, la spécificité de chacun des tests biologiques effectués séparément est nulle. Dans 20 à 30 % des cas, aucune augmentation des concentrations en histamine, protéine S100 β et / ou NTT n'a été observée, ce qui signifie que pour ces cas, le diagnostic d'EHS et / ou de SIOC ne peut pas être objectivé par ces biomarqueurs (les auteurs proposent alors d'utiliser la technique de tomosphygmographie discutée ci-après).

En outre, même considérés dans leur ensemble, les différents biomarqueurs utilisés ne peuvent pas permettre le diagnostic d'EHS et / ou de SIOC.

L'article de Belpomme *et al.* (2015) ne permet en aucun cas d'établir un lien entre une anomalie quantitative des biomarqueurs analysés et l'origine des symptômes. Certes, cet article montre que les sujets inclus dans l'étude présentent des anomalies biologiques, mais en aucun cas il n'explique la causalité de leurs troubles.

Les auteurs laissent entendre qu'il existe un lien avéré entre les concentrations en protéine C réactive (hs-CRP) et la maladie d'Alzheimer²²⁹, suggérant que l'EHS puisse évoluer vers la maladie d'Alzheimer. Il n'y a que 14,97 % des personnes se déclarant EHS qui montrent une augmentation de la concentration de CRP. Ce résultat est difficile à interpréter dans la mesure où l'on ne connaît pas l'âge de chacune des personnes se déclarant EHS qui participe à l'étude.

Concernant la technique tomosphygmographique ultrasonore, les auteurs déclarent avoir utilisé une méthode spécifiquement mise en place pour explorer le débit sanguin dans le lobe temporal des patients, mais ils ne donnent aucune indication sur le matériel utilisé (s'agit-il d'un prototype ou d'un appareil du commerce ?), ni sur les modalités de son utilisation. Une technique de tomosphygmométrie ultrasonore cérébrale a bien été décrite il y a quarante ans (Lepetit *et al.*, 1976), mais elle n'a donné lieu qu'à quatre publications en langue française entre 1983 et 1986 (Lajoix *et al.*, 1983 ; Parini *et al.*, 1984 ; Dany *et al.*, 1985 ; Texier *et al.*, 1986). Il n'en est plus fait mention, dans les revues générales sur la neurosonologie²³⁰ des dix dernières années. Aucune de ces revues ne cite la technique de tomosphygmographie. En revanche, elles décrivent une autre technique d'exploration ultrasonore de la circulation sanguine du cerveau, la vélocimétrie transcrânienne Doppler (Aaslid *et al.*, 1982), ses améliorations successives et ses nombreuses applications. Cette technique, qui permet de mesurer la vitesse du sang dans les grosses artères cérébrales et non dans des « tranches » tomographiques de tissu cérébral, comme dans la tomosphygmographie, semble avoir supplanté définitivement cette dernière.

Quoiqu'il en soit, la technique et le protocole de mesure utilisés par les auteurs n'ont jamais fait l'objet d'une publication dans un journal scientifique à comité de lecture. Ils n'ont donc par conséquent jamais été répliqués par d'autres équipes et n'ont pas fait l'objet d'une validation. Les auteurs disent avoir comparé leurs données à des valeurs de référence obtenues antérieurement chez 141 sujets normaux. Bien que cela ne soit pas dit explicitement dans l'article, ces valeurs de référence semblent avoir été tirées de l'article de Parini *et al.* (1984), cité ci-dessus et référencé sous le numéro 24 dans la bibliographie de l'article. Si tel est bien le cas, la question se pose de savoir si les deux séries de mesure ont été faites, à trente ans de distance, (1) avec le même appareil, ce qui pose la question de sa maintenance, ou avec des appareils différents, ce qui pose des problèmes d'étalonnage, et (2) par les mêmes opérateurs ou par l'un des cosignataires de l'article.

Des réserves doivent également être faites en ce qui concerne l'utilisation de l'index de pulsatilité. Cet index est certes utilisé, bien qu'accessoirement, dans les techniques de vélocimétrie ultrasonore. Il est alors calculé, pour un vaisseau donné, en divisant la différence entre vitesse systolique et vitesse diastolique par la vitesse moyenne, elle-même calculée en ajoutant à la vitesse diastolique un tiers de la différence entre vitesse systolique et vitesse diastolique. Il sert alors d'index de résistance vasculaire périphérique, celle-ci étant considérée comme augmentée lorsqu'il est supérieur à 1,2 et atteint des valeurs pouvant aller jusqu'à 3. Il s'agit donc d'un index indirect sur lequel se répercutent les erreurs commises en mesurant directement les paramètres entrant dans son calcul. L'index de pulsatilité utilisé dans cette étude a-t-il été calculé selon la même formule ? Les auteurs ne fournissent aucune information sur ce point. Si tel était le cas, la

²²⁹ On admet actuellement que, dans la population générale, la fréquence de la maladie d'Alzheimer après 65 ans est de 2 à 4 % et de 15 % à 80 ans (www.inserm.fr/thematiques/neurosciences-sciences-cognitives).

²³⁰ Sharma *et al.*, 2007 ; Tsivgoulis *et al.*, 2009 ; Yeo *et al.*, 2010 ; Alexandrov and the American Society of Neuroimaging Practice Guidelines Committee, 2012 ; Topcuoglu *et al.*, 2012 ; Bathala *et al.*, 2013 ; Wojczal *et al.*, 2015.

mesure des vitesses, effectuée dans des « tranches » de cerveau contenant des artères, des capillaires et des veines, serait plus problématique que celles effectuées dans les artères et la valeur de l'index de pulsatilité moins fiable. Mais, la figure 2 (page 255) suggère qu'il pourrait en être autrement, car elle comporte une échelle de graduation de l'index de pulsatilité qui s'étend de 0 à 20, ce qui n'est pas cohérent avec les valeurs d'index de pulsatilité indiquées plus haut pour la technique de vélocimétrie transcrânienne (de l'ordre de 1 jusqu'à 3). Cette même figure 2 montre que les index de pulsatilité des personnes se déclarant EHS seraient diminués dans les régions paramédianes par rapport à ceux des témoins, alors que les index de pulsatilité mesurés par la vélocimétrie ultrasonore Doppler augmentent avec l'augmentation pathologique de la résistance vasculaire cérébrale. Les résultats semblent incohérents. Toujours sur la figure 2, la signification des colonnes hachurées n'est pas indiquée. Représentent-elles des valeurs inférieures à la normalité (et alors, comment ont-elles été calculées ?) ou bien des valeurs normales (dans ce cas, le témoin (A) est largement au-dessus des valeurs et diffère autant de la « normalité » que la personne se déclarant EHS (B). Au total, cette figure 2, qui est la seule présentation des résultats, est ininterprétable au regard des données scientifiques acquises.

Belpomme *et al.* (2015) déclarent observer une abolition de la pulsatilité cérébrale : *"we found that in comparison to normal subject, cerebral pulsatility in EHS and/or MCS patients was decreased or even completely abolished in one or the two temporal lobes (Figure 2) suggesting that BBF might be specifically decreased or abolished in this brain area"* (p260). Cette affirmation est en total désaccord avec les données les plus solidement établies sur la circulation sanguine et le métabolisme énergétique du cerveau. En effet, une revue complète et détaillée (Heiss 2014) des très nombreux travaux en tomographie d'émission de positons, chez l'animal et chez l'Homme, montre (1) qu'un arrêt complet du débit sanguin cérébral (DSC) entraîne un épuisement complet du métabolisme énergétique cérébral et une perte de connaissance en moins de 10 secondes, (2) qu'une diminution localisée du DSC au-dessous du seuil de 12 mL/100g de substance cérébrale/min entraîne des lésions de nécrose irréversible et (3) qu'une diminution localisée du DSC comprise entre 12 et 22 mL/100g/min, désignée sous le terme de pénombre ischémique, entraîne un déficit de l'approvisionnement énergétique du tissu cérébral, un arrêt du fonctionnement cérébral accompagné d'une symptomatologie neurologique lourde, et une mort tissulaire si elle se prolonge au-delà de 24 heures. Lorsque le DSC est supérieur à 22 mL/100g/min, ce qui correspond à une diminution de l'ordre de 55 % par rapport à la valeur normale de 50 mL/100g/min, l'augmentation des capacités d'extraction cérébrale d'oxygène et de glucose permet d'assurer un métabolisme énergétique cérébral normal.

Enfin, il est bien établi que le crâne n'est perméable aux faisceaux d'ultrasons qu'au niveau de sa partie la plus mince, située dans la fosse temporale et appelée « fenêtre acoustique ». Or celle-ci est imperméable dans 10 % des cas, surtout chez les personnes âgées, car le crâne s'épaissit avec l'âge, et partiellement perméable dans dix autres pourcents des cas. Il est donc impossible qu'un examen tomosphygmographique satisfaisant ait été obtenu chez les 727 sujets inclus dans l'étude, à moins d'admettre que ces sujets aient été sélectionnés sur le critère de perméabilité de la fenêtre temporale, ce qui n'est pas précisé dans l'article.

Pour toutes ces raisons, les résultats et les conclusions de cette étude ne sauraient être utilisés, autrement que comme pistes de recherches à explorer ou éléments à répliquer par d'autres études. Toutefois, il pourrait en être autrement si les problèmes décrits ci-dessus étaient clairement explicités et les résultats validés dans un article publié dans un journal de neurosonologie doté d'un comité de lecture (*peer review*). Pour l'instant, il ne saurait être question de reconnaître en quoi que ce soit la tomosphygmographie cérébrale ultrasonore pulsée comme un test diagnostique de l'EHS.

En outre, l'article comporte des erreurs d'interprétation des références bibliographiques. Belpomme *et al.* (2015) citent l'article de Dik *et al.* (2005) (référence 64, p257) à l'appui de l'affirmation : *"since hs-CRP is considered as a biomarker of age-related cognitive decline or dementia, and more particularly of Alzheimer's disease"*, alors que dans leur article, ces auteurs concluent par *"This population-based study showed that the serum inflammatory protein alpha1-antichymotrypsin is associated with cognitive decline in older persons, whereas C-reactive protein, interleukin-6, and albumin are not"* [Dik *et al.*, 2005].

Belpomme *et al.* (2015) citent également l'article de Stam *et al.* (2010) (référence 170, p264) à l'appui de l'affirmation : *"However, the BBB cannot protect the brain against EMFs"*. Or, ces auteurs indiquent dans leur revue que : *"The balance of experimental evidence does not support an effect of 'non-thermal' radiofrequency fields with microwave and mobile phone frequencies on BBB permeability"*.

Enfin, d'un point de vue socio-économique, la tomosphygmographie qui n'est pas remboursée par la sécurité sociale, est très onéreuse. Elle ne peut être utilisée qu'à des fins de recherche. Son utilisation dans un cadre thérapeutique nécessiterait donc l'adaptation du cadre légal de sa mise en œuvre.

À noter que, durant la période d'ouverture de la consultation publique, le P^r Belpomme a adressé par voie postale un document à l'Anses (qui sort du cadre de la consultation publique), dans lequel il critique, non seulement l'analyse faite de son article de 2015 (au § 6.1.3 et en Annexe 4 du rapport) dans le pré-rapport d'expertise, mais aussi le contenu de ce pré-rapport dans son ensemble, ainsi que la compétence de ses auteurs.

L'Anses rappelle que les désaccords entre chercheurs ont souvent accompagné le progrès des connaissances scientifiques et que la meilleure façon de les résoudre est de poursuivre les expérimentations.

L'Anses a donc décidé de ne pas répondre au P^r Belpomme, mais d'appeler à la réplication des travaux de ce dernier par des équipes indépendantes, notamment en ce qui concerne le débit sanguin, le métabolisme énergétique du cerveau, et la tomosphygmographie cérébrale. Étant donné la large publicité extrascientifique dont ces travaux ont bénéficié, l'Anses a placé cette réplication parmi les priorités de ses recommandations de recherche sur l'EHS (voir § 10.2 des recommandations).

Annexe 5 : Échelle de mesure des personnes hypersensibles « *Highly Sensitive Person Scale* » ou HSP par Aron et Aron (1997)

1. Vous sentez-vous facilement submergé ou agressé par des stimuli sensoriels intenses ?
2. Semblez-vous conscient des détails infimes de votre environnement ?
3. L'humeur des autres vous affecte-t-elle ?
4. Avez-vous tendance à être plus sensible à la douleur ?
5. Éprouvez-vous le besoin, les jours où vous êtes très occupé, de vous mettre en retrait, au lit, ou dans une pièce sombre, ou dans n'importe quel lieu où vous pourriez bénéficier d'un peu d'intimité et de soulagement, soustrait aux stimulations ?
6. Êtes-vous particulièrement sensible aux effets de la caféine ?
7. Vous sentez-vous facilement submergé ou agressé par des éléments comme la lumière intense, les fortes odeurs, les tissus rugueux ou le bruit d'une sirène proche ?
8. Avez-vous une vie intérieure riche et complexe ?
9. Les bruits forts vous incommode-t-ils ?
10. L'art ou la musique sont-ils susceptibles de provoquer chez vous de fortes émotions ?
11. Votre système nerveux vous semble-t-il parfois si épuisé que vous n'avez pas d'autre alternative que de vous libérer de vous-même ?
12. Êtes-vous consciencieux ?
13. Sursautez-vous facilement ?
14. Vous sentez-vous nerveux ou irrité lorsque vous avez beaucoup de choses à faire en peu de temps ?
15. Lorsque les gens autour de vous se sentent mal à l'aise dans un environnement physique, avez-vous tendance à savoir ce qu'il faut faire pour améliorer leur confort (ex. modifier l'éclairage ou changer le siège sur lequel ils sont installés) ?
16. Êtes-vous agacé lorsque les gens essaient de vous faire faire trop de choses en même temps ?
17. Essayez-vous au maximum d'éviter de faire des erreurs ou d'oublier des choses ?
18. Êtes-vous soucieux d'éviter les films ou émissions TV violents ?
19. Ressentez-vous une stimulation ou excitation déplaisante lorsqu'il se passe beaucoup de choses autour de vous ?
20. Le fait d'avoir très faim induit-il chez vous une forte réaction, perturbant votre concentration ou affectant votre humeur ?
21. Les changements dans votre vie vous déstabilisent-ils ?
22. Remarquez-vous et appréciez-vous les senteurs/parfums, goûts, sons, ou œuvres d'art raffinés et délicats ?
23. Trouvez-vous désagréable d'avoir un emploi du temps très chargé ?
24. Est-ce pour vous une priorité essentielle d'organiser votre vie afin d'éviter les situations perturbantes ou oppressantes ?
25. Êtes-vous gêné par des stimuli intenses, comme des bruits forts ou des scènes chaotiques ?
26. Lorsque vous êtes en situation de compétition ou que vous êtes observé pendant la réalisation d'une tâche, devenez-vous si nerveux ou tremblez-vous tellement que votre performance est bien plus mauvaise qu'elle ne le serait d'ordinaire ?
27. Lorsque vous étiez enfant, vos parents ou professeurs vous percevaient-ils comme sensible ou timide ?

Annexe 6 : Valeurs limites d'exposition, recommandations et lignes directrices pour la limitation de l'exposition aux champs électromagnétiques

I. Des effets sanitaires aux valeurs limites d'exposition recommandées

Un champ électromagnétique, dû à la présence de charges électriques, résulte du couplage entre un champ électrique et un champ magnétique. Les variations du champ électromagnétique se propagent dans l'espace sous forme d'ondes dites électromagnétiques en transportant de l'énergie dans cet espace, c'est ce qu'on appelle le rayonnement électromagnétique.

L'intensité du champ auquel est soumis un objet ou un organisme vivant diminue généralement quand sa distance par rapport à la source augmente. En espace libre, à une distance suffisamment grande de la source, l'intensité du champ diminue de façon inversement proportionnelle au carré de la distance, les champs électriques et magnétiques sont alors orthogonaux.

La profondeur de pénétration des rayonnements dans l'organisme est inversement proportionnelle à leur fréquence (quelques centimètres (cm) pour les bandes de la téléphonie mobile) ; c'est ce que l'on appelle « l'effet de peau ». Les basses fréquences (qui correspondent à des longueurs d'ondes très grandes par rapport aux dimensions du corps humain) traversent l'organisme plus facilement que les hautes fréquences (radiofréquences) qui, elles, ne pénètrent que superficiellement dans le corps. Au-dessus de 10 GHz, les champs ne sont absorbés²³¹ qu'au niveau de la peau, comme le champ créé par la lumière du soleil qui a un spectre, bien sûr, au-delà de la radioélectricité, avec des énergies bien supérieures²³².

L'effet de peau des tissus (δ) dépend de leur permittivité et de leur conductivité. Pour des matériaux faiblement conducteurs (non métalliques), en hautes fréquences, elle est donnée par l'expression ci-après (Griffiths, 1989) :

$$\delta = \frac{1}{\omega} \left[\left(\frac{\mu\epsilon}{2} \right) \left\{ \left[1 + \left[\frac{\sigma(\omega)}{\omega\epsilon} \right]^2 \right]^{1/2} - 1 \right\} \right]^{-1/2}$$

avec :

ω : la pulsation,

ϵ : la permittivité,

σ : la conductivité,

μ : la perméabilité magnétique.

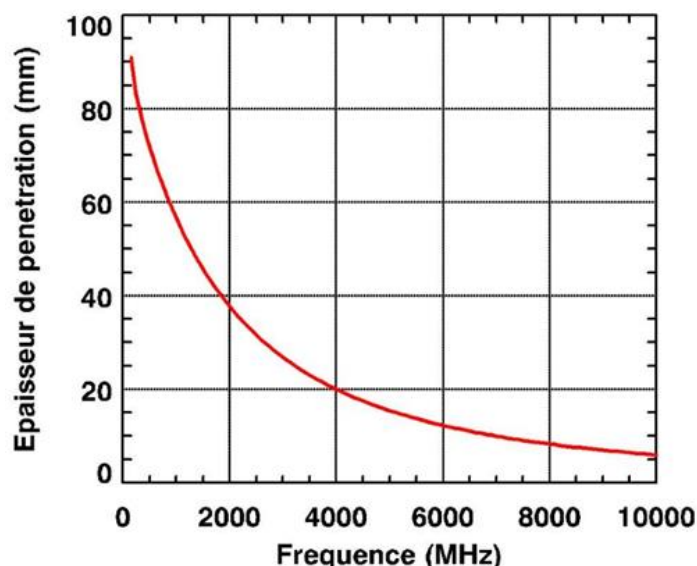
Dans les milieux biologiques, la perméabilité magnétique (μ) est sensiblement la même que dans le vide ($4\pi 10^{-7}$), alors que ϵ et σ dépendent de la fréquence.

La Figure 21 illustre ce phénomène d'effet de peau en fonction de la fréquence.

²³¹ L'absorbance des photons dépend de leur niveau d'énergie (cf. formule de la note de bas de page n° 232) : les rayons X et gamma sont dits ionisants et sont pénétrants, c'est-à-dire qu'ils peuvent traverser la matière. Le pouvoir de pénétration dépend du type de rayonnement et du pouvoir d'arrêt de la matière. Les autres rayonnements sont appelés rayonnements non ionisants et comprennent les ondes électromagnétiques les moins énergétiques : la limite se situe au niveau de la bande la plus énergétique de l'ultraviolet.

²³² Les photons d'un signal électromagnétique transportent une énergie proportionnelle à la fréquence :

$E = h.V$; constante de Planck $h = 6,62.10^{-34}$ J.s, V la fréquence en Hz.



Source : CEA, 2016

Figure 21 : absorption sélective du corps humain (ou effet de peau) selon la fréquence

Il faut noter que, dans la bande des extrêmement basses fréquences, le corps humain est un bon conducteur. Le champ électrique externe est quasi perpendiculaire à la surface du corps, il pénètre donc très peu : le champ interne est cinq à six ordres d'amplitude plus petit que le champ électrique externe. Le champ magnétique, en revanche, n'est pas modifié (la perméabilité magnétique des tissus est égale à celle de l'air) (*Environmental Health Criteria* 238, *ELF*, OMS).

À ce jour, les organismes ayant produit des valeurs limites d'exposition (Icnirp, IEEE, etc.) considèrent que les seuls effets avérés des champs électromagnétiques sur la santé humaine sont des effets immédiats et à court terme. Il s'agit essentiellement d'effets biologiques directs (dits « effets thermiques ») dus aux champs électromagnétiques de fortes intensités. Ils consistent, selon la fréquence, en la stimulation des muscles ou des nerfs périphériques ou en l'élévation de température des tissus résultant de l'absorption d'énergie pendant l'exposition. À noter que le contact avec des objets conducteurs peut également provoquer des chocs électriques et des brûlures.

Ainsi, seuls les effets à court terme ont été retenus comme fondements pour les valeurs limites d'exposition reprises dans la plupart des recommandations ou directives pour la limitation des expositions aux champs électromagnétiques. Ces effets peuvent être classés en deux grandes catégories : les effets indirects et les effets directs.

I.1 Effets indirects

Un champ électromagnétique induit des courants électriques sur les objets conducteurs (tels que les véhicules ou les clôtures par exemple). Lorsqu'une personne touche ou saisit un objet conducteur sans être munie de gants de protection, un courant peut circuler entre cet objet et le sol à travers la personne. L'intensité de ce courant dépend de l'objet (taille, forme), de la fréquence et de l'intensité du champ, ainsi que de la résistance électrique (impédance) de la personne.

L'impédance dépend de la taille de la personne, de sa masse corporelle et de la composition de son corps (rapport entre la masse maigre et la masse adipeuse), des caractéristiques diélectriques des tissus (muscles, etc.), du type de contact (superficie de contact, c'est-à-dire si la personne touche avec les doigts ou si elle prend l'objet en main), et enfin du type de chaussures qu'elle porte. L'impédance varie aussi avec la fréquence du champ. Le courant de contact circulant dans une personne n'est perçu qu'à partir d'un certain seuil ; à un niveau plus élevé il provoque une douleur et à un niveau encore plus élevé, il peut provoquer une lésion (par exemple : brûlure localisée, tétanie respiratoire, effets cardiaques).

Pour que ces effets soient maîtrisés, des restrictions sont spécifiées en matière de courant de contact.

I.2 Effets directs

L'exposition à des champs électromagnétiques génère des courants à l'intérieur du corps et / ou une absorption d'énergie par les tissus. Lorsque l'énergie absorbée atteint un niveau suffisamment important (voir restrictions de base et niveaux de référence dans l'Encadré 12, p330), sa transformation locale en chaleur peut entraîner, dans les tissus où elle se produit :

- des brûlures superficielles ou profondes en cas de forte densité de courant ;
- une hyperthermie loco-régionale provoquant diverses réponses physiologiques et thermorégulatrices, dont l'intensité dépend de la région du corps exposée ;
- en cas d'exposition accidentelle brève, la création d'un point chaud à l'origine d'une brûlure, éventuellement retardée, difficile à évaluer, faute de pouvoir connaître précisément la répartition énergétique à l'intérieur du corps.

Par ailleurs, en ce qui concerne l'exposition des yeux, le cristallin présente une sensibilité particulière aux ondes en raison de son absence de vascularisation (ce qui limite la dissipation de la chaleur) et de son absorption préférentielle dans sa partie postérieure. Une élévation thermique rapide peut, dans certaines conditions, entraîner une cataracte.

Le Tableau 12 présente une synthèse de ces effets en fonction de la gamme de fréquences.

Tableau 12 : interactions des champs électromagnétiques avec le corps humain

Gamme de fréquences	Mécanisme d'interaction	Effet avéré	Grandeur physique biologique	Grandeur référence de l'exposition
Champ électrique statique	Charges électriques de surface	Sensation désagréable à la surface de la peau, choc électrique	Niveau de champ électrique externe (E)	Niveau de champ électrique (E)
Champ magnétique statique	Induction de champ électrique dans les fluides et les tissus en mouvement	Effets sur le système cardiovasculaire et le système nerveux	Induction magnétique externe (B)	Induction magnétique (B)
Champ électrique en onde entretenue (jusqu'à 10 MHz)	Charges électriques de surface	Sensation désagréable à la surface de la peau, choc électrique, brûlure	Niveau de champ électrique externe (E)	Niveau de champ électrique (E)
	Induction de champ électrique et de courant	Stimulation des cellules nerveuses et musculaires ; effets sur les fonctions du système nerveux	Niveau de champ électrique (E) ou densité de courant (J) dans les tissus	Niveau de champ électrique (E)
Champ magnétique en onde entretenue (jusqu'à 10 MHz)	Induction de champ électrique et de courant	Stimulation des cellules nerveuses et musculaires ; effets sur les fonctions du système nerveux	Niveau de champ électrique (E) ou densité de courant (J) dans les tissus	Induction magnétique (B)

Gamme de fréquences	Mécanisme d'interaction	Effet avéré	Grandeur physique biologique	Grandeur référence de l'exposition
Champ électromagnétique (100 kHz – 300 GHz)	Induction de champ électrique et de courant ; absorption d'énergie par le corps	Elévation de température excessive, choc électrique et brûlure	Débit d'absorption spécifique (DAS)	Niveaux de champs électrique (E) et magnétique (H) Densité de puissance
	Absorption d'énergie en surface pour $F > 10$ GHz	Elévation de température en surface	Densité de puissance (S)	Densité de puissance (S)
	Onde de propagation thermoacoustique pour des impulsions $< 30 \mu s$, de 300 MHz à 6 GHz	Troubles de l'audition	Absorption spécifique (SA)	Densité de puissance crête

Source : (Icnirp 2002).

Les commentaires suivants peuvent être apportés :

1. En matière de champs magnétiques, dans la gamme de fréquences de 1 Hz à 10 MHz, les courants induits dans l'organisme peuvent entraîner une stimulation électrique douloureuse ou une réaction aversive. Dans la plage des très basses fréquences de 4 Hz à 1 kHz, ces effets apparaissent en liaison avec des densités de courant induit supérieures à 100 mA/m² (valeur efficace). Dans cette gamme de fréquences et en tenant compte d'un facteur de sécurité de 10, l'Icnirp, suivant l'IRPA, avait proposé en 1998 une valeur limite de courant induit de 10 mA/m² pour le groupe des professionnels. Au-delà de 1 kHz, la valeur limite augmente en fonction de f [Hz]/100. Pour les fréquences supérieures à 10 MHz, aucune valeur limite n'est spécifiée (Icnirp, 1998).

En 2010, l'Icnirp a publié une nouvelle directive qui, pour les gammes 1 Hz – 100 kHz et 100 kHz – 10 MHz, ne prend plus en compte la densité de courant induit comme paramètre représentatif des restrictions de base, mais le champ électrique interne induit dans le corps humain (Icnirp 2010).

2. Jusqu'à 100 kHz, l'exposition n'entraîne qu'une faible absorption d'énergie (tout dépend cependant de la puissance émise à l'origine) et aucune élévation de température significative.
3. Entre 100 kHz et 10 GHz, les valeurs limites d'exposition sont fondées sur le réchauffement des tissus sous-cutanés dans diverses parties du corps. Les molécules qui constituent notre organisme sont souvent chargées avec des moments dipolaires électriques (ce qui signifie que leur comportement est similaire à celui d'un dipôle électrique, c'est le cas pour l'eau) et la membrane des cellules elle-même (dont le rôle est de limiter et de contrôler les échanges entre l'intérieur et l'extérieur des cellules) est un diélectrique séparant deux milieux conducteurs ($\sigma_{\text{int}} \approx \sigma_{\text{ext}} \approx 1,2$ S/m). Sous l'action d'un champ électrique, les molécules avec des moments dipolaires s'orientent. L'apparition de la polarisation d'orientation apparaît dans un délai très court pour l'eau (de l'ordre de la pico seconde) et la puissance absorbée par l'eau va être notamment proportionnelle au carré de l'intensité du champ électrique comme l'est le DAS (débit d'absorption spécifique). Un DAS corps entier de 4 W/kg est considéré par l'Icnirp comme le seuil au-delà duquel une hyperthermie se produit ; il sert depuis 1982 de base aux lignes directrices de protection des personnes contre l'exposition aux ondes radiofréquences. D'après l'IRPA, un DAS de 4 W/kg dans

une gamme de fréquences de 10 MHz à 6 GHz entraîne une augmentation de 1°C de la température corporelle après environ 30 minutes d'exposition continue au rayonnement. L'Icnirp reprend les mêmes valeurs dans ses recommandations (cf. paragraphes suivants).

4. Autres effets : Les champs magnétiques pulsés peuvent produire d'autres effets tels que la perception acoustique d'impulsions micro-ondes. L'absorption de l'onde au niveau du liquide céphalo-rachidien donne lieu à une onde acoustique qui se propage à l'intérieur du crâne et provoque l'audition d'un son décrit comme un bourdonnement, un cliquètement, un sifflement ou un crépitement selon les caractéristiques du champ pulsé. Pour que ces effets soient maîtrisés, des restrictions sont spécifiées en matière d'absorption spécifique de l'énergie (AS).

II. Recommandations et lignes directrices pour la limitation de l'exposition aux champs électromagnétiques

L'approche générale de l'Icnirp pour la protection contre les rayonnements non ionisants a été publiée dans un article en 1998 (Icnirp 1998) ; elle concerne l'ensemble des fréquences jusqu'à 300 GHz. D'autres publications concernant notamment le domaine des basses fréquences ont fait l'objet d'articles scientifiques publiés par cette Commission en 2003 (Icnirp 2003) et 2010 (Icnirp 2010). L'Icnirp examine dans ces publications l'ensemble des effets sur la santé documentés dans la littérature, mais ne considère que ceux avérés pour établir des limites d'exposition. Un effet sanitaire est considéré avéré lorsque les effets biologiques²³³ observés dépassent les limites d'adaptation du système biologique considéré. Il sort du cadre des réponses adaptatives physiologiques, de l'homéostasie, sous l'action de l'agent extérieur. Le jugement dépend de la qualité, de la reproductibilité et de la cohérence des études. Les résultats obtenus sur des cellules *in-vitro* ne sont pas retenus, car l'Icnirp considère que les réponses biologiques observées n'ont pas été démontrées dans des expérimentations *in vivo*, et donc qu'ils ne sont pas suffisamment pertinents pour pouvoir servir de base à l'évaluation des effets sanitaires potentiels.

Selon l'Icnirp, la limitation des effets liés à l'exposition aux rayonnements non ionisants doit être fondée sur l'observation des effets sanitaires avérés. Cette limitation est appelée « restriction de base ». Les grandeurs physiques utilisées pour cette restriction de base sont, en fonction de la fréquence : la densité de courant, le débit d'absorption spécifique ou la densité de puissance. La protection contre les effets sanitaires des champs électromagnétiques est assurée par le non dépassement de ces restrictions de base. L'Icnirp considère par ailleurs qu'il n'y a aujourd'hui pas de preuves scientifiques convaincantes, dans les domaines de l'épidémiologie et de la biologie, permettant de conclure à l'existence d'effets sanitaires à long terme comme le cancer ou des pathologies dégénératives.

Les recommandations éditées par l'Icnirp sont donc données en termes de « restrictions de base » et de « niveaux de référence » dérivés de ces dernières (cf. Encadré 12).

²³³ Les effets biologiques sont des changements d'ordre biochimique, physiologique ou comportemental qui sont induits dans une cellule, un tissu ou un organisme en réponse à une stimulation extérieure. Un effet biologique, habituellement réversible, se situe dans les limites de la régulation interne de l'organisme (homéostasie).

Encadré 12 : restrictions de base et niveaux de référence selon l'Icnirp (Icnirp Guidelines 1998 et 2010)**Les restrictions de base**

Ce terme couvre la valeur mesurée des champs électrique, magnétique et électromagnétique dont il est démontré qu'ils entraînent des effets sanitaires sur l'organisme humain. En fonction de la gamme de fréquence du rayonnement incident sur le corps, ces restrictions de base sont présentées sous forme d'induction magnétique (B), de champ électrique (E), de densité de courant induit (J), de débit d'absorption spécifique (DAS) ou encore de densité de puissance (S). L'induction magnétique et la densité de puissance peuvent être facilement mesurées à l'emplacement de la personne exposée, mais ce n'est pas le cas pour les autres grandeurs qui ne sont accessibles qu'à l'intérieur du corps.

Les restrictions de base sont des exigences ou des valeurs spécifiées de grandeurs étroitement liées à la maîtrise des effets des rayonnements électromagnétiques. Leurs valeurs limites, qui incluent cependant des facteurs de sécurité importants, ne doivent pas être dépassées.

Les niveaux de référence

La quantification des restrictions de base s'avère difficilement réalisable en pratique, car elle doit être généralement évaluée à l'intérieur du corps humain (la plupart du temps par simulation numérique à partir d'une mesure externe). Des études expérimentales ont été réalisées et ont finalement conduit à adopter des niveaux, dits « de référence », plus facilement mesurables et dont le respect permet d'atteindre l'objectif de sécurité poursuivi.

Ces paramètres sont connus sous l'appellation de « niveaux de référence » et sont fondés soit sur des modèles mathématiques de l'absorption par le corps humain de l'énergie électromagnétique, soit sur l'extrapolation de données empiriques mesurées par exemple sur un mannequin présentant les mêmes caractéristiques physiologiques.

Les niveaux de référence sont des simulations des niveaux d'environnement électromagnétique exprimés en valeur de champ électrique, de champ magnétique, de densité de puissance et de courant, qui permettent de vérifier la conformité aux restrictions de base et d'évaluer ainsi les effets des rayonnements électromagnétiques. Ces niveaux tiennent compte de marges de sécurité établies en considérant un large éventail de situations d'exposition possibles, avec l'objectif que dans les configurations d'exposition usuelles, le respect des niveaux de référence entraîne obligatoirement le respect des restrictions de base correspondantes. Les niveaux de référence sont employés pour évaluer de manière pratique l'exposition et déterminer si les restrictions de base sont respectées. Certaines valeurs de référence sont déduites par mesure ou calcul des restrictions de base appropriées, d'autres prennent en compte les risques indirects dus à l'exposition au champ électromagnétique. Les paramètres significatifs sont le champ électrique (E), le champ magnétique (H), l'induction magnétique (B), la densité de puissance (S) et le courant passant à travers l'organisme (Ii). Les paramètres prenant en compte les effets d'une exposition indirecte sont le courant de contact du corps (Ic) et, dans le cas des champs pulsés, l'absorption spécifique (AS). Tous ces niveaux sont donnés pour deux catégories : « public » et « travailleur ».

Les niveaux d'exposition tolérés pour le public sont inférieurs à ceux acceptés pour la population des travailleurs, car il est considéré qu'un travailleur a la connaissance (et donc une meilleure maîtrise) de l'environnement électromagnétique dans lequel il se trouve, ce qui n'est pas le cas d'une personne publique soumise à une exposition, en dehors de sa volonté, par conséquent sans la maîtrise de la durée d'exposition. Par ailleurs, il est considéré que l'âge et l'état de santé des personnes dans la catégorie « public » sont plus variables (enfants, personnes âgées, malades, etc.) que dans la catégorie « travailleur ».

On notera que l'Anses, dans son avis publié le 8 juillet 2016 s'appuyant sur le rapport d'expertise consacré à l'exposition des enfants aux radiofréquences, a souligné que, dans certaines circonstances, les niveaux de référence pouvaient être inadaptés pour les enfants, occasionnant un dépassement des restrictions de base (Anses, 2016),

L'objectif principal des lignes directrices pour la protection contre les rayonnements non ionisants jusqu'à 300 GHz (Icnirp, 1998 et Icnirp, 2010) est d'établir des limites d'exposition aux ondes électromagnétiques pour se protéger de leurs effets néfastes connus sur la santé, en prenant en compte l'ensemble des fréquences des champs variables dans le temps jusqu'aux premières longueurs d'ondes des rayonnements infrarouges. Ce document décrit les études prises en compte portant sur les effets directs et indirects des champs électromagnétiques, c'est à dire les

effets de l'interaction directe des champs avec le corps et les effets indirects qui font intervenir des interactions avec un objet à un potentiel électrique différent du corps.

À partir de l'analyse des résultats des études expérimentales et épidémiologiques, des restrictions de base pour l'exposition et des niveaux de référence pour l'évaluation pratique du risque sont proposés et les lignes directrices devant s'appliquer à l'exposition professionnelle et du public sont données. Différentes bases scientifiques ont été utilisées dans le développement des limites d'exposition de base pour les différentes gammes de fréquence :

- entre 1 Hz et 10 MHz, des restrictions de base sur la densité de courant pour prévenir les effets sur les fonctions du système nerveux central ;
- entre 100 kHz et 10 GHz, des restrictions de base sur le DAS pour empêcher l'échauffement excessif du corps entier et localement des tissus ;
- entre 100 kHz et 10 MHz, des restrictions de base sont fournies à la fois sur la densité de courant et le DAS ;
- entre 10 GHz et 300 GHz, des restrictions de base sur la densité de puissance pour empêcher un échauffement excessif des tissus ou près de la surface du corps.

En 2010, l'Icnirp a proposé de nouveaux indicateurs d'exposition pour les restrictions de base, en séparant les effets sur les tissus du système nerveux central de la tête d'une part, et les effets sur les autres tissus de la tête et du corps. Les restrictions de base s'expriment désormais en champ électrique interne (en V/m), aussi bien pour les professionnels que pour la population générale.

Jusqu'à 100 kHz, l'Icnirp considère que les risques sont liés à des réponses transitoires du système nerveux comme des stimulations des systèmes nerveux central et périphérique.

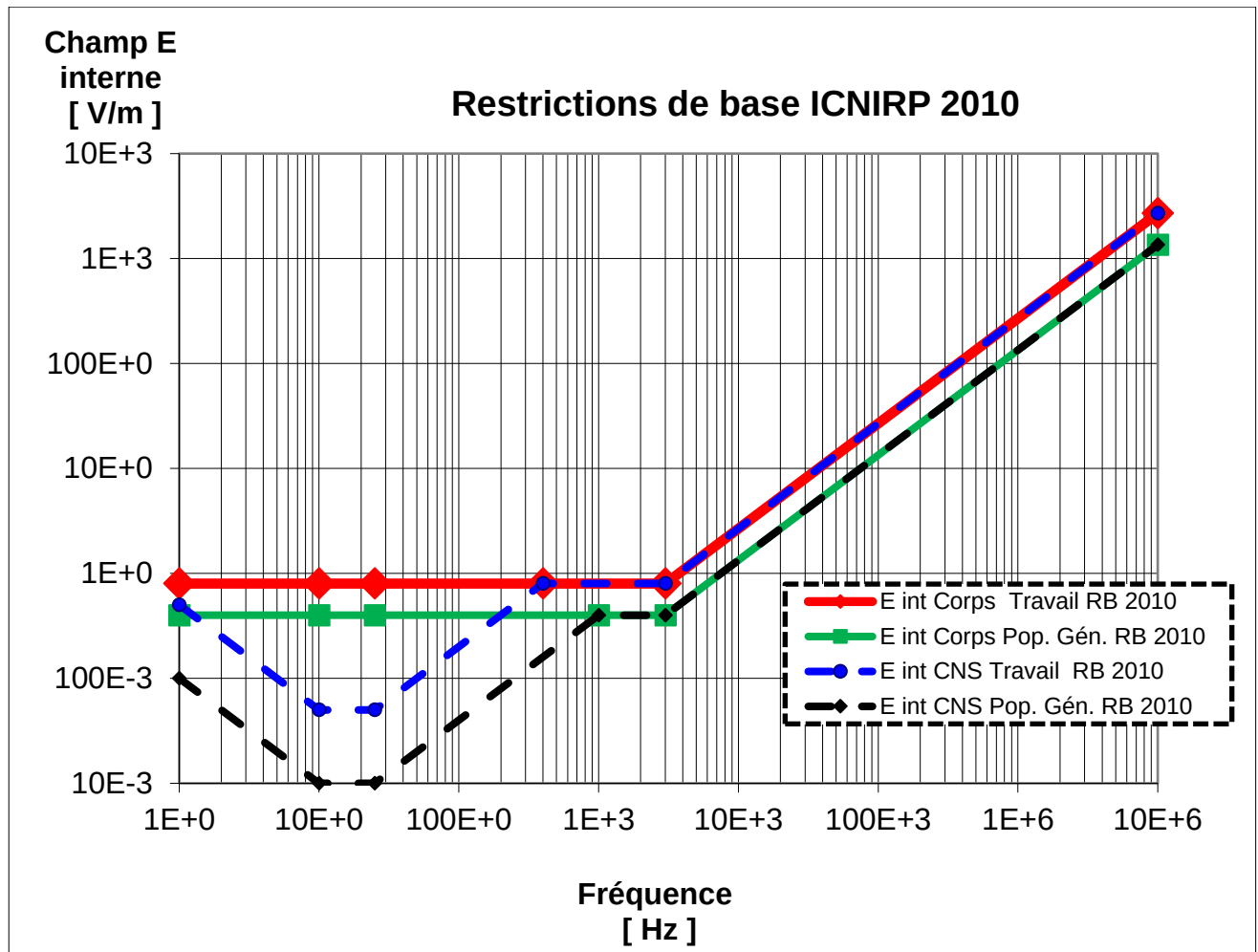
L'exposition professionnelle devrait ainsi être limitée, dans la bande de fréquences 10 Hz – 25 Hz, au champs qui induisent des champs électriques internes dans les tissus du système nerveux central de la tête inférieurs à 50 mV/m, pour éviter de provoquer l'apparition phosphènes au niveau de la rétine (perception de phénomènes lumineux). Cette restriction permettrait également de prévenir d'éventuels effets transitoires sur les fonctions cérébrales. Le seuil d'apparition de ces phosphènes augmente rapidement avec la fréquence. Aux fréquences supérieures à 400 Hz, les limites sur la stimulation nerveuse périphérique s'appliquent pour toutes les parties du corps.

L'exposition dans des environnements contrôlés, où les travailleurs sont informés des effets transitoires possibles de cette exposition, devrait être limitée aux champs qui induisent des champs électriques dans la tête et le corps inférieurs à 800 mV/m, pour éviter la stimulation nerveuse centrale et périphérique. Un facteur de réduction de 5 a été appliqué à un seuil de stimulation de 4 V/m pour tenir compte d'incertitudes. Ces restrictions s'appliquent jusqu'à 3 kHz.

Pour la population générale, un facteur de réduction supplémentaire de 5 est appliqué, conduisant à une restriction de base de 10 mV/m entre 10 et 25 Hz. À 1 000 Hz, un facteur de réduction de 10 conduit à une restriction de base de 400 mV/m, qui doit être appliqué à tous les tissus de toutes les parties du corps (cf. Figure 22).

Par ailleurs, les effets biologiques et sanitaires avérés dans la gamme de fréquences de 10 MHz à quelques GHz sont consécutifs à une élévation de température du corps de plus de 1°C. Cette augmentation de la température résulte de l'exposition des individus à un DAS corps entier d'environ 4 W/kg pendant environ 30 minutes. Un DAS corps entier moyen de 0,4 W/kg a donc été choisi comme étant la restriction qui fournit une protection adéquate pour l'exposition professionnelle, en se basant uniquement sur les effets thermiques (Icnirp, 1998). Un facteur de sécurité supplémentaire de 5 est mis en place pour l'exposition du public, ce qui donne une limite moyenne de l'ensemble du corps de 0,08 W/kg. Enfin, les restrictions de base pour les densités de puissance pour les fréquences de 10 à 300 GHz sont de 50 W/m² pour les professionnels et de 10 W/m² pour le grand public.

Les niveaux de référence sont ensuite déterminés pour les expositions des professionnels et de la population générale sur toute la gamme de fréquence et donnent les valeurs limites des champs électrique et magnétique.



Source : Icnirp, 2010

Figure 22 : restrictions de base pour la population générale et les travailleurs en fonction de la fréquence

Annexe 7 : Questionnaires et échelles de somatisation utilisés dans les publications analysées pour recueillir les symptômes subjectifs des personnes se déclarant EHS

Patient Health Questionnaire Somatic Symptom Severity Scale (PHQ-15) (Kroenke *et al.*, 2002) : échelle comportant 15 items qui mesurent la prévalence des symptômes physiques les plus communs (maux de tête, nausées, etc.) ressentis par le sujet au cours des 4 dernières semaines ;

Somatosensory Amplification Scale (SSAS) (Barsky *et al.*, 1988, 1990) : échelle qui compte 10 items qui mesurent la tendance du sujet à expérimenter des sensations somatiques ressenties comme intenses, délétères et perturbantes, sans toutefois constituer des signaux de phénomènes pathologiques. Elle sert à caractériser l'hypocondrie, la fibromyalgie, un trouble dépressif majeur et certains troubles de l'anxiété notamment ;

Regensburg-EMF-complaint-list (ou échelle de Ratisbonne) : échelle de langue allemande, élaborée à partir d'études décrivant la symptomatologie fonctionnelle de l'EHS (Frick *et al.*, 2002). Elle comprend 36 symptômes, notés de 0 (absent) à 3 (sévère). Après validation (Frick *et al.*, 2006), un score d'au moins 19 (correspondant au tiers supérieur observé dans la population générale) a été proposé comme critère d'inclusion dans les études ;

20-item symptom checklist (Szemerszky, Koteles, *et al.* 2010) : liste comportant 19 symptômes somatiques souvent mentionnés et expérimentés en relation avec le système nerveux central (maux de tête, vertiges, irritabilité, agitation, étourdissements, fatigue), les fonctions viscérales (palpitations, essoufflement, sensations de brûlures cardiaques, nausées, douleurs abdominales, tension musculaire, tremblements), les organes sensoriels (congestion nasale, sécheresse de la bouche, acouphènes, vision brouillée), les problèmes cutanés (sueurs, peau froide, démangeaisons, sensations sur la peau, fourmillements) basés sur des résultats de la littérature (Seitz *et al.* 2005, Eltiti *et al.* 2007a, Rössli *et al.* 2004, Rössli 2008a, Rubin, Cleare, and Wessely 2008, Koteles and Bardos 2009, Szemerszky, Ferenc, and György 2009) et une « autre » catégorie de symptômes non répertoriés parmi les précédents. L'échelle comporte 5 points : 0 = certainement pas, 1 = probablement pas, 2 = peut-être, 3 = probablement, 4 = sûrement ;

Von Zerssen somatic complaint list (von Zerssen D. *Complaint list. Manual*, Weinheim, Beltz, 1976) : liste largement utilisée dans les pays de langue allemande, comprenant 24 items et couvrant une large gamme de symptômes non spécifiques. La sévérité de chaque symptôme est mesurée sur une échelle de 4 points (pas du tout, rarement, moyennement, souvent).

Annexe 8 : Les questionnaires/questions d'évaluation subjective des troubles du sommeil

Il existe de nombreux questionnaires ou parties de questionnaires permettant d'explorer la façon dont les sujets perçoivent la qualité de leur sommeil, la fréquence et l'intensité de ses troubles, ainsi que la qualité de leur vigilance. Un certain nombre d'articles mentionnent un questionnaire, éventuellement validé en interne (par les auteurs), mais ne donnent pas de précision sur le contenu des questions en relation avec le sommeil et ses troubles. Ne seront présentées ci-dessous que les échelles validées qui ont été utilisées dans des études portant sur des personnes se déclarant EHS. Elles sont de deux sortes : les échelles de sommeil proprement dites et les échelles de somnolence diurne.

Les échelles de sommeil proprement dites

L'échelle de Pittsburgh ou index de qualité du sommeil de Pittsburgh (PSQI) (Buysse *et al.* 1989) est une échelle de référence au plan international. Elle a trait aux habitudes de sommeil pendant le dernier mois. Elle comprend 11 questions. Certaines sont simples comme l'heure du coucher, le nombre de minutes avant endormissement, l'heure habituelle du lever, le nombre d'heures de sommeil effectif, la qualité globale du sommeil et la prise de médicaments pour faciliter le sommeil. D'autres sont plus complexes et concernent les troubles du sommeil évalués par le sujet lui-même (9 sous-items) et, le cas échéant, par le conjoint ou un camarade de chambre (5 sous-items). Enfin, deux questions explorent la somnolence diurne. La quantification des réponses permet d'obtenir un score global.

Le Karolinska Sleep Diary (KSD) (Åkerstedt *et al.* 1994a, 1994b) est un questionnaire d'usage plus restreint. Proposé par Åkerstedt *et al.* (1994), il comprend sept questions simples : la facilité d'endormissement, la qualité du sommeil, sa continuité, son calme, son caractère récupérateur, la facilité du réveil et le caractère suffisant du sommeil. Ici aussi la quantification des réponses (de 0 à 5) permet de calculer un score global.

Le Swiss Health Survey (SHS) est une étude de la population suisse (*cross sectional*) réalisée tous les 5 ans depuis 1992 par l'Office fédéral suisse de statistiques mandaté par le gouvernement suisse. Les données sont anonymes et n'impliquent pas le consentement d'un comité d'éthique. Le SHS consiste en une interview téléphonique et un questionnaire écrit. Les diverses questions posées touchent à de nombreux aspects de la santé (nourriture, activité physique, surpoids, diabète, vitalité, énergie, régime alimentaire, etc.) dont certaines ciblent en particulier le sommeil et ses troubles. Celles-ci permettent de répondre, par exemple sur la durée du sommeil : courte (< 7h) ou longue (> 9h), et sur l'initiation et le maintien du sommeil avec les problèmes d'endormissement, d'éveils nocturnes et les éveils précoces. Des questions spécifiques visent à identifier l'existence d'une pathologie du sommeil comme les apnées obstructives, le syndrome des jambes sans repos ou encore la narcolepsie. Un score supérieur à 8 indique des troubles du sommeil.

Les échelles de somnolence diurne

L'échelle de somnolence d'Epworth (ESS) (Johns 1991) comprend 8 questions notées par le sujet de 0 à 3 (0 : exclu, 1 : pas impossible ; 2 : probable et 3 : systématique). Les sujets doivent répondre à la question : 'Quelle chance avez-vous de somnoler ou de vous endormir, pas simplement de vous sentir fatigué(e) dans les situations suivantes ? Huit différentes situations sont proposées comme 'assis en train de lire'. Un score = 0 signifie l'absence de somnolence diurne, un score supérieur à 10 indique une somnolence excessive pendant la journée et un score = 21 une somnolence diurne très excessive.

La Karolinska sleepiness scale (KSS), élaborée par Åkerstedt et Gillberg (1990), propose au sujet d'auto-évaluer sa somnolence diurne sur une échelle de 1 (très alerte) à 9 (très somnolent/fait des efforts pour rester éveillé) (Åkerstedt and Gillberg 1990).

Toutes ces échelles sont largement utilisées en pratique, car elles sont simples à mettre en œuvre. Cependant, elles ne donnent qu'un reflet subjectif du phénomène, qui n'est pas toujours confirmé par les examens objectifs (polysomnographiques ou actigraphiques) qui permettent d'analyser les modifications de la structure du sommeil, ou par le test standard (*Multiple sleep test latency*) (Carskadon and Dement 1977, Carskadon *et al.* 1986), qui permet d'objectiver les endormissements diurnes excessifs²³⁴, ainsi que leur sévérité.

²³⁴ cf. définition des endormissements diurnes excessifs en note de bas de page n°188, p212.

Annexe 9 : Questionnaires explorant la notion de bien-être

Questionnaire on Current Disposition (QCD) (Muller and Basler, 1993) : mesure le bien-être subjectif à travers de courts intervalles de test-retest en utilisant 6 items bipolaires (tension-calme, appréhension-non perturbé, inquiet-non concerné, anxieux-détendu, sceptique-non sceptique, mal à l'aise-confortable) ;

Questionnaire to include Other factors (QOF) : questionnaire élaboré par Regel et al. (2006) pour compléter l'exploration de l'état de bien-être. Il comporte des items tels que la durée du sommeil, la qualité de la nuit précédant l'entretien, l'état enrhumé ou non, la quantité d'alcool, de caféine ou de médicaments consommée le jour précédant l'expérimentation, les douleurs (pré-) menstruelles et les événements stressants ;

Well Being questionnaire (Bulpitt and Fletcher, 1990) : questionnaire comportant 23 items destinés à apprécier la qualité de vie, notamment, l'anxiété, la dépression, l'hostilité et des symptômes somatiques ;

En examinant des critères internationalement reconnus pour la dépression et l'anxiété (classifications DSM²³⁵ et ICD²³⁶) et en définissant l'opposé de chaque symptôme, Huppert and So (2013) ont identifié dix critères de bien-être : 1) le sens de l'accomplissement, 2) la stabilité émotionnelle, 3) l'engagement ou attrait à apprendre des choses nouvelles, 4) le sentiment d'accomplir dans sa vie des choses valables et intéressantes, 5) l'optimisme, 6) l'émotion positive i.e. le bonheur ressenti, 7) la relation positive par rapport aux autres (les autres s'intéressent réellement à moi et prennent soin de moi), 8) la résilience (quand les choses vont mal, combien de temps faut-il pour un retour à la normale ?), 9) l'estime de soi, 10) la vitalité ou énergie. Ces critères incluent des aspects à la fois hédonistes et eudynamiques du bien-être.

²³⁵ *Diagnostic and Statistical Manual of mental disorders (DSM)* : manuel diagnostique et statistique des troubles mentaux, ouvrage de référence publié par la société américaine de psychiatrie. La cinquième édition, DSM V, a été publiée en mai 2013.

²³⁶ *International statistical Classification of Diseases and related health problems (ICD)* : classification statistique internationale des maladies et problèmes de santé connexes, publiée par l'OMS et mondialement utilisée pour l'enregistrement des causes de morbidité et mortalité dans le domaine de la médecine.

Annexe 10 : Les maladies du système nerveux autonome (SNA) et leurs symptômes

Le système nerveux autonome (SNA) est le siège de fréquents dérèglements pathologiques (voir Tableau 13) primaires (maladies neurologiques avec atteinte du SNA : maladie de Parkinson, démences à corps de Lewy, atrophies multisystématisées, etc.) ou secondaires (diabète, amylose, insuffisance rénale, etc.). Dans les maladies cardiovasculaires et le diabète, l'existence d'une dysfonction végétative (dysautonomie) a été montrée comme étant associée à un risque accru de morbidité cardiovasculaire ou de mortalité toute cause.

Tableau 13 : classification des principales maladies du système nerveux autonome

Dysautonomies	primaires	« Pure autonomic failure » Atrophies multisystématisées Maladie de Parkinson Maladie des corps de Lewy Dysautonomie familiale (syndrome de Riley Day) Déficit en dopamine β -hydroxylase	
	secondaires	Métaboliques	Diabète sucré Insuffisance rénale chronique Carence en vitamine B12
		Inflammatoires	Syndrome de Guillain Barré Pandysautonomies aiguës et subaiguës Myélites
		Infectieuses	Tétanos Infection VIH Maladie de Chagas Botulisme
		Néoplasiques	Syndromes paranéoplasiques Tumeurs de la fosse postérieures Dysautonomie post radique
		Traumatiques	Lésions médullaires traumatiques Sympathectomies
	<u>Médicaments et toxiques</u>	Effet direct Par l'intermédiaire d'une polyneuropathie	
	<u>Syncopes neurogéniques</u>	Vasovagales Hypersensibilité du sinus carotidien Syncopes situationnelles	
	<u>Syndrome de tachycardie posturale</u>		

Source : d'après Mathias CJ, J Neurol Neurosurg Psychiatry 2003

Les symptômes des dysautonomies sont variables en fonction de l'organe et ne feront pas l'objet d'une présentation détaillée dans ce document. On peut cependant citer :

- Les signes cardiovasculaires très fréquents mais non spécifiques. On distingue l'*hypotension orthostatique* (diminution d'au moins 20 mm Hg de la pression artérielle (PA) systolique et de 10 mm Hg de la PA diastolique dans les 3 minutes suivant le lever) fréquemment associée à une *hypertension artérielle de décubitus (HTAD)*, l'*hypotension post-prandiale* (diminution d'au moins 20 mm Hg de la PA systolique dans les 90 mm suivant la prise alimentaire), le *syndrome de tachycardie posturale* (augmentation de la fréquence cardiaque > 30 bpm lors du lever ou une fréquence cardiaque > 120 bpm sans chute concomitante de la pression artérielle) et enfin les *maaises et syncopes « vagues »* ;

- Les signes cutanés à type de troubles de la sudation (hyperhidrose ou hypohidrose) généralisés ou focalisés souvent bien décrits par le patient ;
- Les signes oculaires : l'altération des fibres nerveuses végétatives à destinée pupillaire peut être responsable d'un défaut d'accommodation à l'obscurité ou d'une anisocorie (syndrome de Claude Bernard-Horner, syndrome d'Addie).
- Les troubles génito-urinaires : ils seront évoqués devant un retard de perception du besoin d'uriner, une dysurie, une pollakiurie et une perception de résidu post-mictionnel suggérant une vessie hypoactive, hypocontractile et hypoesthésique ou au contraire un besoin précoce et impérieux avec fuites d'urines suggérant une vessie hyperactive, hypercontractile ;
- Les troubles sexuels (difficulté de maintien d'une érection, incapacité totale d'érection, anorgasmie, etc.) sont souvent d'installation précoce au cours des dysautonomies et doivent être systématiquement recherchés ;
- Les troubles digestifs : une diarrhée souvent impérieuse, à prédominance nocturne, associée ou non à une incontinence anale ainsi qu'une constipation ou l'alternance diarrhée-constipation peuvent être le témoin d'une atteinte autonome digestive.

Annexe 11 : Quelques techniques de mesure de l'activité du système nerveux autonome (SNA)

Les **méthodes dites « de référence »** : Il s'agit de techniques directes parmi lesquelles figurent l'enregistrement microneurographique des fibres neurovégétatives sympathiques et la technique de *spill-over* de noradrénaline quantifiant la libération d'un traceur radioactif en fonction de l'activité des terminaisons nerveuses sympathiques. Ces techniques, considérées comme le *gold standard* dans le domaine, sont réservées à certains laboratoires en raison de la difficulté de leur mise en œuvre. On peut également mesurer l'activité vagale par enregistrement direct de l'activité électrique du nerf pneumogastrique.

Les **techniques « indirectes »**, comme la mesure des catécholamines plasmatiques, la scintigraphie à la métaiodobenzylguanidine (MIBG), l'imagerie par tomographie d'émission de positons (TEP) des récepteurs FluoroDopa, etc. Cependant, les techniques les plus précises reposent sur des tests mesurant les modifications des paramètres cardiovasculaires lors de stimulations physiologiques ou pharmacologiques bien codifiées et sur un enregistrement continu de la pression artérielle et / ou de la fréquence cardiaque. Les tests les plus courants composent la batterie d'Ewing : épreuve de respiration profonde à 6 cycles/min, manœuvre de Valsalva (40 mmHg pendant 15 secondes), épreuve de contraction isométrique (30 % de la force maximale pendant 3 min), quantification de l'adaptation posturale de la fréquence cardiaque (rapport 30/15 : valeur de l'intervalle RR au 30^{ème} battement après le lever / valeur intervalle RR au 15^{ème} battement après le lever) et de la pression artérielle. Cet intervalle correspond à la période cardiaque, c'est-à-dire au temps séparant deux battements. Ces tests sont utilisés pour le diagnostic positif de dysautonomie et / ou pour apprécier l'apport respectif d'une dysfonction parasympathique ou orthosympathique.

Comme ces tests nécessitent un équipement sophistiqué et un laboratoire adapté, on a cherché d'autres moyens plus simples et rapides pour évaluer l'activité du SNA telles que l'analyse de la variabilité sinusale qui fait l'objet, dans le contexte de ce rapport, d'un paragraphe individualisé.

L'analyse de la variabilité sinusale de la fréquence cardiaque (*Heart Rate Variability* ou *HRV*) est un des moyens les plus couramment utilisés à ce jour pour apprécier l'activité conjointe des deux systèmes orthosympathique et parasympathique sur le nœud sinusal. L'intérêt de cette méthode est qu'elle est non invasive et ne nécessite qu'un simple enregistrement de l'ECG de surface de durée limitée à quelques minutes (cependant on utilise parfois des analyses de ce type sur des enregistrements holter ECG des 24 heures). L'analyse est faite soit dans le domaine temporel avec la quantification d'index reflétant l'activité vagale ou sympathique (SDNN²³⁷, PNN50²³⁸, RMSSD²³⁹, etc.), soit dans le domaine fréquentiel (analyse spectrale). De très nombreuses études ont montré les déterminants de ces index mais aussi leur importance pronostique, en particulier dans les maladies cardiovasculaires. La mise au point d'algorithmes simplifiés permettant l'analyse spectrale de la variabilité sinusale explique son succès. Brièvement, on connaît plusieurs bandes d'énergie dépendant du SNA : la bande de haute fréquence (HF : 150 - 400 mHz) est centrée par la fréquence respiratoire et reflète l'activité vagale à destinée du nœud sinusal ; la bande de basse fréquence (LF : 50 - 150 mHz) regroupe les effets des deux systèmes ortho et parasympathiques sur le nœud sinusal. La signification biologique des bandes de très basses fréquences reste imparfaitement connue, mais pourrait relever des propriétés intrinsèques du tissu cardiaque et / ou de l'environnement hormonal et / ou de la contrainte thermique. En pratique, le paramètre le plus utilisé est le rapport LF/HF supposé refléter la balance sympathovagale. Il est à noter que l'analyse de la variabilité sinusale de la fréquence cardiaque,

²³⁷ SDNN : déviation standard de la moyenne des intervalles RR.

²³⁸ pNN50 : nombre d'intervalle RR successifs et supérieurs à 50ms divisé par le nombre d'intervalles total.

²³⁹ RMSSD : racine carrée des différences au carré des intervalles RR successifs.

en particulier dans le domaine fréquentiel, ne peut s'envisager qu'à partir d'enregistrements de l'ECG réalisés dans des conditions de stabilité (cette méthode est peu adaptée à l'analyse de changements dynamiques) et chez des patients en rythme sinusal ne présentant pas de troubles du rythme cardiaque.

Cependant, les conditions de réalisation du recueil du signal (filtrage manuel des données, fréquence d'échantillonnage, stabilité du signal), la longueur des séries retenues pour l'analyse, la technique de décomposition spectrale utilisée (transformée rapide de Fourier ou auto-régression), le choix des bandes d'énergie reflétant la modulation vagale et / ou sympathique de la variabilité sinusale (ainsi que leur mode d'expression : unités normalisées ou puissance spectrale) conditionnent le résultat obtenu et sont, pour certaines, particulièrement opérateur-dépendantes.

D'autres méthodes d'analyse de la variabilité de la fréquence cardiaque ou HRV basées sur la quantification de l'entropie ou du chaos sont disponibles. La signification physiologique de ces paramètres reste encore le plus souvent mal connue bien que certaines approches aient été montrées comme utiles pour prédire par exemple la survenue de troubles graves du rythme cardiaque.

La mesure des conductances électrodermales (ou réponses sympathiques cutanées, RSC) repose sur la détection de courants électriques à la surface de la peau, reflétant l'activité des glandes sudoripares (la sueur est riche en ions chlorures) dont l'activité est régulée par le SNA et en particulier la composante somatique du système nerveux sympathique. De très nombreuses méthodes relativement simples d'utilisation sont disponibles pour enregistrer ces conductances ce qui explique la large utilisation de cette technique pour évaluer l'activité du SNA. Il existe par ailleurs des méthodes directes permettant la quantification de la sécrétion sudorale mais ces techniques ne seront pas discutées dans le cadre de ce rapport. On mesure couramment plusieurs paramètres de conductance : le délai d'apparition, l'amplitude de la réponse et sa symétrie. Outre le fait qu'elle n'explore que le versant orthosympathique du SNA, la mesure des paramètres de conductance électrodermale est soumise à de très nombreux facteurs de variation au sein d'une population mais aussi chez un même individu rendant son interprétation difficile.

Annexe 12 : Les tests d'évaluation des fonctions cognitives chez l'être humain

L'attention

La 'Letter Cancellation Task' (LCT) ou expérience de détection de lettres comprend 50 x 18 matrices de lettres capitales imprimées sur papier standard et existe en plusieurs versions (Casagrande *et al.*, 1997). Trois lettres cibles sont utilisées et chacune de ces lettres apparaît 100 fois, permettant 300 '*hits*' possibles. Une ligne d'essai au début de chaque test est complétée avant de réaliser la tâche d'attention. Les sujets reçoivent l'instruction de lire les lettres et de marquer ou cocher les lettres cibles de la gauche vers la droite, du haut en bas aussi rapidement et justement que possible en 90 secondes. Le score est égal au nombre de '*hits*' – (lettres manquées + fautes).

Le Digital Symbol Substitution Test (DSST) évalue l'attention soutenue, la vitesse de réponse ainsi que la coordination visuo-motrice. La tâche consiste, par exemple, à associer neuf symboles avec les chiffres de 1 à 9, le sujet doit remplacer 100 nombres par les symboles correspondant en un temps limité.

Le Visual Selective Attention Task (VERSUSAT) propose sur un écran, une combinaison au hasard (randomisée) de 4 lettres et ou croix dans un carré, par exemple. Les lettres cibles « U » et « F » apparaissent sur l'écran en diagonale depuis le haut à gauche vers le bas à droite. Les sujets doivent appuyer sur la touche « Y » pour 'yes' quand une des deux cibles apparaît et « N » pour 'no' quand aucune de ces lettres n'est présentée.

La mémoire à court terme et la mémoire de travail

Ces deux formes de mémoire partagent le fait qu'elles ont une capacité limitée (ou empan mnésique) et permettent le maintien d'informations de façon temporaire (quelques secondes à minutes). Si au cours de ce maintien éphémère en mémoire, l'information est manipulée mentalement et fait l'objet d'une opération cognitive (ex : mathématique ou logique) on parle alors de mémoire de travail. Les tests de mémoire à court terme (MCT) ont pour but de mesurer l'empan mnésique, c'est-à-dire le nombre d'items que le sujet est capable de restituer immédiatement après qu'ils lui aient été présentés. Ils sont de deux ordres, selon qu'ils explorent la MCT verbale ou la MCT visuo-spatiale. Le plus connu est l'empan verbal, qui mesure la MCT verbale et constitue un sous-test de l'échelle d'intelligence pour adulte de Wechsler ou WAIS pour Wechsler Adult Intelligence Scale. Il consiste à lire au sujet des listes de lettres, de mots ou de chiffres de longueurs croissantes (deux essais pour chaque longueur entre 2 et 9) et à lui demander de les répéter dans le même ordre (WAIS forward ou WAIS-F). L'empan direct est le nombre d'items de la liste qui a pu être restitué au moins une fois. On présente ensuite une autre liste, de même nature que la première, en demandant au sujet de répéter les items dans l'ordre inverse, c'est l'empan inverse (WAIS backward WAIS-R ou backward digit span task [Bspan]) qui teste la mémoire de travail. Par exemple, le test consiste en quinze essais et chaque essai comprend six chiffres de 1 à 9, choisis au hasard. Les sujets doivent se souvenir des chiffres et les écrire dans l'ordre inverse de celui de la séquence. Un point est attribué pour chaque chiffre rappelé dans la position correcte et le score varie de 0 et 90. Ces empan ont généralement une valeur de 7 ± 2 . Un autre test de mémoire à court terme consiste à montrer au sujet sept chiffres qui apparaissent pendant une seconde chacun, et les sujets ont ensuite dix secondes pour écrire les chiffres dans leur ordre d'apparition (digit span task, DS).

Le test 'Operation Span task' (OSPAN) ou tâche d'empan d'opération est un test de mémoire de travail qui demande au sujet de résoudre des opérations ou calculs mathématiques pendant qu'il doit se souvenir de mots. Le test comprend par exemple, vingt ensembles de séquences de calculs-mots qui sont organisés en nombres de deux à cinq. La longueur des séries est ordonnée de manière aléatoire pour éviter la mise en place de stratégies de mémoire de la taille de la série. Chaque séquence d'opération-mot consiste en une équation à résoudre suivie d'un mot. L'opération est une multiplication ou une division entre parenthèse suivie d'une soustraction ou

une addition. Exemple '(4/1)-3 = 2 yes/no ? – Stream'. Le sujet a cinq secondes pour visualiser le problème, trois secondes pour entourer la réponse 'yes' ou 'no' et une seconde pour voir le mot à rappeler. À la fin de chaque série, le sujet doit rappeler les mots dans l'ordre. Un point est attribué pour chaque opération réussie, un point pour chaque mot correctement rappelé à la bonne position et un point pour chaque séquence de mémoire où tous les mots sont correctement rappelés dans la bonne position. La durée du test est de 20 minutes.

L'arithmétique mentale ou MA (Mental Arithmetic) est une tâche cognitive nécessaire à la composante exécutive de la mémoire de travail. Elle consiste par exemple en séries de deux nombres présentés au sujet qui doit les additionner ou les soustraire.

Le « *N-Back* » est un test mesurant le contrôle exécutif permettant la mise à jour des informations en mémoire de travail. Il consiste par exemple, en la présentation d'une série de stimuli (lettres, etc.) sur un écran à un rythme constant et la tâche consiste pour le sujet à indiquer quand le stimulus est le même que celui présenté *n* fois plus tôt dans la séquence, soit 1, 2 ou plus : 1-Back, 2-Back, etc. Le facteur *n* peut être ajusté pour rendre la tâche plus ou moins difficile. Ce test permet également de mesurer les temps de réaction.

Le PCRT ou *precued choice reaction time task* est un test qui mesure un temps de réaction (RT). Le sujet est assis face à un écran et dispose d'un tapis de réponse avec deux boutons de départ et deux boutons cibles. Sur l'écran apparaît un indice qui indique au sujet soit i) l'absence d'information, ii) une information partielle, iii) la main à utiliser (droite ou gauche) ou iv) l'information sur le bouton à presser et la main à utiliser. Après un intervalle de 2-3 secondes randomisé, le signal -go- demande au sujet de presser le bouton de départ avec une main et de presser le bouton cible avec la même main. Chaque bloc de test comprend trente-deux essais d'une durée de 6-7 minutes. Le temps de réaction est mesuré entre le début de l'essai (bip sonore) et l'appui sur la touche de départ.

La mémoire spatiale

Le test du labyrinthe aquatique virtuel est inspiré du test de la piscine de Morris développé par Richard Morris en 1982 pour le rat. Chez l'Homme, il est présenté sur un écran d'ordinateur et consiste en l'apprentissage de la localisation d'une plateforme invisible fixe dans un bassin circulaire aquatique à l'aide d'indices spatiaux distaux situés sur les quatre murs qui constituent l'environnement. En fonction du protocole, ce test permet d'étudier la mémoire spatiale à court terme au cours de séances d'apprentissage successives où la distance pour rejoindre la plateforme qui est déplacée régulièrement (ex : après deux essais dans une session de dix essais consécutifs ou chaque jour avec deux essais/session/jour), représente un indice du degré d'apprentissage : celle-ci diminuant avec le nombre des séances. Ce test est également utilisé pour évaluer la mémoire à long terme (plusieurs heures, 24 heures le plus souvent). Dans ce cas, un test de rappel est effectué à l'endroit de la plateforme (restée fixe pendant toute la durée de l'apprentissage), après qu'elle ait été retirée de la piscine. Le temps passé dans le quadrant virtuel qui contenait la plateforme (quadrant cible) permet d'évaluer le souvenir de la localisation de la plateforme : un sujet qui se souvient naviguera significativement plus de temps dans le quadrant cible par rapport aux trois autres quadrants virtuels de la piscine.

Annexe 13 : Instruments ou tests psychométriques validés et utilisés dans l'étude des composantes psychiques de l'EHS

Les études portant sur les fonctions affectives et conatives²⁴⁰ des personnes se déclarant EHS ont essentiellement utilisé des instruments psychométriques. Seule l'étude de Brandt *et al.* (2009) fait exception. Ces instruments psychométriques sont des questionnaires permettant d'évaluer quantitativement les caractéristiques psychiques d'un individu ou d'un groupe d'individus. Fondamentalement, cette évaluation ne peut être faite que par rapport à une norme, établie à partir d'un groupe de référence ou population d'échantillonnage. Celle-ci doit avoir un effectif suffisamment élevé (entre 100 et 1 000 sujets) et être la plus représentative possible de la population dont sont extraits les individus ou groupes d'individus dont on souhaite évaluer les performances. Cependant, les populations d'échantillonnage servent aussi à définir, item par item et globalement, les qualités psychométriques essentielles de chaque instrument de mesure, sa reproductibilité, sa sensibilité et sa validité. La reproductibilité est la capacité à donner le même résultat, lors de passations successives, si le caractère mesuré n'a pas varié : elle s'apprécie le plus souvent par la méthode du test-retest. La sensibilité est la capacité de l'instrument à distinguer deux individus ; elle est fonction du nombre d'échelons, ou de classes, que comporte l'échelle de mesure, et aussi de la fidélité. La validité comprend la validité prédictive et la validité de contenu. La validité prédictive est la capacité d'un instrument psychométrique à prédire correctement un évènement futur. Elle se mesure statistiquement par le degré de probabilité qui lie la note obtenue à cet instrument et la survenue d'un résultat à un critère ultérieur. Elle n'a pas de valeur explicative et ne peut être interprétée comme traduisant une relation de cause à effet. La validité de contenu est la plus importante et, en même temps, la plus difficile à apprécier. Les items sont satisfaisants quand ils mesurent ce qu'ils doivent mesurer (p.e ; l'item "Je me fais beaucoup de souci" est un bon indicateur de l'anxiété). D'autres sont défectueux si personne ne sait répondre à l'item. La validité de contenu est généralement approchée par la corrélation entre les résultats au test et les résultats obtenus par les mêmes sujets à d'autres tests, censés mesurer les mêmes caractéristiques (validité concourante). Il existe également des mesures de « consistance interne » (homogénéité du contenu), la plus connue étant le coefficient alpha de Cronbach. Certains instruments comprennent une échelle de sincérité destinée à dépister les personnes qui ne répondent pas authentiquement aux questions. Il est nécessaire de réactualiser les étalonnages et souvent le contenu des tests pour que l'évaluation demeure cohérente et efficace. Les tests sont modifiés en fonction de l'époque, la culture, il faut parfois remplacer des items, reconceptualiser les tests.

Les instruments psychométriques sont très nombreux et se recoupent en grande partie. Ne seront décrits ci-dessous que ceux qui ont été utilisés dans l'étude des fonctions psychiques de personnes se déclarant EHS. Ceci ne veut pas dire qu'il s'agit d'instruments construits pour étudier les personnes se déclarant EHS. Bien au contraire, il s'agit d'instruments très largement utilisés en médecine et en dehors de la médecine.

Pour les besoins de l'exposé, ces tests psychométriques seront classés en instruments de mesure (1) de la personnalité et (2) des troubles psychiatriques, ces deux grandes catégories étant elles-mêmes subdivisées en instruments de mesure généraux et de mesure spécifiques.

1. Instruments de mesure de la personnalité.

En psychologie et psychiatrie, on définit la personnalité comme étant l'ensemble des attitudes, comportements et valeurs qui caractérisent un individu et le rend psychologiquement, intellectuellement, et moralement différent des autres. Les tests dits « de personnalité » ont été conçus pour explorer les fonctions conatives et affectives dans l'ensemble de la population, aussi bien chez les sujets supposés sains que chez les malades. On peut les diviser en tests de personnalité généraux qui se proposent de décrire tous les aspects de la personnalité d'une

²⁴⁰ Conative : qui se rapporte à la volonté et à l'effort.

personne ou d'un groupe de personnes, et les tests de personnalité "spécifiques", qui se proposent d'en explorer un aspect particulier.

1.1. Les tests de personnalité globaux

Le premier de ces questionnaires a été proposé, en 1949, par RB Cattell. Il s'agit du questionnaire 16PF qui n'a pas été utilisé chez des personnes se déclarant EHS, mais qui mérite d'être décrit succinctement car il est à l'origine d'un questionnaire simplifié, le NEO-PI-R qui a été utilisé (Goldberg 1993). Élaboré grâce à des études de terrain (à partir d'une liste de 4 500 adjectifs regroupés en 171 familles) et à un traitement des données par analyse factorielle, il a identifié seize facteurs primaires ou traits de personnalité sensés donner une description complète de la personnalité d'un individu. Il comprend 185 items (10 à 15 par facteurs), a connu cinq éditions jusqu'en 1993, a été traduit et validé en de très nombreuses langues, et fait actuellement l'objet d'une commercialisation. Il est moins utilisé en médecine de nos jours, mais semble être considéré comme un test de choix dans l'entreprise. Dans un second temps, Cattell les a regroupés en cinq facteurs "globaux" (extraversion, indépendance, force de caractère ou d'esprit, *self-control*, anxiété), regroupement qui a joué un rôle important dans l'élaboration des tests dits « *big five* ».

Les tests du *big five* sont, au contraire, le fruit d'un travail collectif (Goldberg *et al.*, 1993). Ils ont fait l'objet de très nombreux travaux méthodologiques de validation et sont aujourd'hui reconnus comme un standard d'analyse de la personnalité. Ils distinguent cinq grandes dimensions de traits : l'ouverture, l'extraversion, l'amabilité, l'application, la stabilité émotionnelle ou névrosisme, qui sont différentes des cinq facteurs secondaires de Cattell, mais sont fortement corrélées à eux. Il existe de nombreux questionnaires permettant d'évaluer ces cinq dimensions, dont le NEO-PI-R et le FFI.

Les échelles de personnalité du *Karolinska Institute* (Schalling *et al.* 1973) sont au nombre de 15, classées en cinq groupes. Le premier groupe inclut trois échelles : d'impulsivité, d'évitement de la monotonie et de détachement. Le deuxième groupe inclut deux échelles : de désirabilité sociale et de socialisation. Le troisième groupe est divisé en deux sous-groupes, un premier de deux échelles : d'anxiété somatique et de tension, et un second de trois échelles : d'anxiété psychique, de psychasthénie et d'inhibition de l'agression. Le quatrième groupe inclut deux échelles : de suspicion et de culpabilité, et le cinquième trois échelles : d'agression indirecte, d'agression verbale et d'irritabilité. Elle est surtout utilisée dans les pays scandinaves.

Le questionnaire de Personnalité d'Eysenck (*Eysenck Personality Questionnaire*, EPQ) est rappelé brièvement ici car certains de ses items ont été utilisés par Bergdahl (1995), avec d'autres items extraits du *Cesareck Marke Personality Schedule*, pour élaborer une échelle de personnalité comportant des facteurs de personnalité jugés pertinents, mais non couverts par les échelles du *Karolinska Institutet*. HJ Eysenck est, avec Cattell, l'un des deux principaux pionniers des questionnaires de personnalité basés sur la théorie des traits. Entre 1952 et 1985, il a construit cinq questionnaires successifs, c'est la version de 1975 qui a été partiellement utilisée par Bergdahl. Aucune de ces versions n'a été utilisée chez des personnes se déclarant EHS. Le questionnaire de personnalité de Cesareck Marke est un questionnaire ancien, peu utilisé et apparemment abandonné (références anciennes et très peu nombreuses). L'échelle élaborée par Bergdahl, qui comprend 29 items notés de 1 à 15, ne semble pas avoir été validée. L'auteur ne fait pas état d'une validation du test qu'il a composé lui-même à partir de fragment d'autres tests.

Le *Temperament and Character Inventory* (TCI) de Cloninger est un test différent des précédents. Alors que ces derniers ont été élaborés à partir d'analyses uniquement phénotypiques, lexicales notamment, le TCI a été construit sur la base d'un modèle psychobiologique ambitieux dans la mesure où il intègre plusieurs hypothèses (familiales et génétiques, développementales, comportementales chez l'animal et chez l'homme, neurophysiologiques). Ce modèle, dû également à Cloninger, considère que la personnalité comprend deux composantes fondamentales, le tempérament et le caractère. Le tempérament, qui décrit qualitativement les dimensions psychobiologiques de la personnalité, est essentiellement inné. Le caractère, qui reflète le niveau d'adaptation et de maturité du sujet et ainsi l'éventuelle nature pathologique de la personnalité, est essentiellement acquis. Le tempérament comprend lui-même quatre dimensions reposant sur l'activité d'un système neuronal, biochimique et comportemental particulier et donc indépendantes l'une de l'autre : la recherche de nouveauté, l'évitement du danger, la dépendance

à la récompense et la persistance ou persévérance. Des études de validation et d'application ont confirmé la nature indépendante de ces dimensions, leur influence génétique, leur bonne consistance interne aussi bien dans des populations de patients que dans des populations générales de langues et de cultures différentes, leur stabilité globale dans le temps indépendamment des troubles psychopathologiques, et leur valeur prédictive dans divers contextes psychiatriques et médicaux. Le caractère comprend trois dimensions sensibles à l'environnement et à l'apprentissage qui évoluent dans le temps : la détermination, qui correspond à la maturité individuelle, la coopération, qui correspond à la maturité sociale, et la transcendance, qui correspond à la maturité spirituelle. Il existe plusieurs versions du TCI, variables selon leur longueur et le mode de réponse (TCI à 226 items le plus souvent, et une version *TCI-Revised* à 240 items). Plusieurs études de validation française ont été publiées (Pelissolo *et al.*, 2000 et 2005), de même que dans de nombreuses autres langues dont le suédois.

1.2. Les tests de personnalité spécifiques

Le *Life Orientation Test – Revised* (LOT-R) a pour but de mesurer l'optimisme en comparaison avec le pessimisme. Il comprend 10 items - 3 pour mesurer l'optimisme (items 1, 4 et 10), 3 pour mesurer le pessimisme (items 3, 7 et 9) et 4 servant de "remplissage neutre" (items 2, 5, 6 et 8) – notés de la façon suivante : 0 = je ne suis pas du tout d'accord, 1 = je ne suis pas d'accord, 2 = je ne suis ni d'accord, ni pas d'accord, 3 = je suis d'accord, 4 = je suis tout à fait d'accord (Scheier, Carver, and Bridges 1994).

Bien que le LOTR soit largement utilisé et qu'il a été démontré qu'il est un instrument pertinent en psychométrie, il faut noter que des études ont suggéré que ce test est plus vulnérable à la simulation de bons résultats que d'autres échelles d'optimisme (Terril, Friedman, *et al.* 2002 cité par *Psychological Testing: Principles, Applications, and Issues* Par Robert M. Kaplan, Dennis P. Saccuzzo).

Le *Coping Resource Inventory* (CRI, Hammer 1988) est un test qui a été développé pour mesurer les capacités (ressources) et les stratégies d'adaptation d'un individu face au stress. Son utilisateur (Bergdahl, 2004) en fait une description partielle, le présentant comme un questionnaire de 60 items répartis en cinq échelles explorant cinq domaines : cognitif (COG), social (SOC), émotionnel (EMO), spirituel/philosophique (SP) et physique (PHY), qui mesurent respectivement la capacité d'un individu à garder un sens positif de sa propre valeur et envers les autres (COG), le degré de son investissement dans la sphère sociale (SOC), sa capacité d'accepter et d'exprimer un éventail d'affects (EMO), son degré d'adhésion à des valeurs religieuses, familiales et culturelles traditionnelles (SP), et le degré de son comportement favorable à la santé (PHY). Un score total est obtenu en additionnant des scores obtenus aux cinq échelles. Pour son auteur, le CRI aurait une reproductibilité et une validité élevée. Cependant, l'utilisateur ne précise pas le modèle sur lequel repose l'instrument, ses modalités pratiques (système de notation des items notamment) et, surtout, les références aux études de validation de la version traduite.

La *Structural Analysis of Social Behaviour* (SASB) (Benjamin 1974) a été utilisée pour évaluer l'image de soi chez des personnes se déclarant EHS. Cette approche repose sur une théorie de la relation interpersonnelle dans laquelle la personnalité est définie de façon dynamique par la façon dont elle se traite elle-même. Elle comprend deux dimensions, l'affiliation (amour-haine) et l'interdépendance (spontanéité-contrôle) qui sont mesurées à l'aide d'une liste de déclarations notées chacune entre 0 et 100, en fonction de son adéquation avec l'intéressé. L'analyse des données fait apparaître huit *clusters* décrivant la façon dont le sujet se traite lui-même. Dans l'étude des personnes se déclarant EHS, seuls quatre *clusters* ont été utilisés, les *clusters* spontanés, contrôlés, positifs et négatifs. Pour son auteur, le SASB a une reproductibilité test-retest et une cohérence interne élevée.

1.3. Remarques et synthèse

Ces différents tests se recoupent largement entre eux et ont connu, pour la plupart, des versions successives. Cependant, il n'existe toujours pas d'accord sur le nombre de dimensions fondamentales de la personnalité : cinq pour Cattell et le *Big Five*, trois pour Eysenck, sept pour

Cloninger (sans compter les 16 facteurs primaires de Cattell et les 15 échelles du *Karolinska Institutet*). Le modèle à 5 facteurs a tout de même tendance à s'imposer pour l'étude des personnalités non pathologiques (psychologie du travail notamment), avec plus de diversités pour l'étude des personnalités pathologiques en médecine (modèle à 5 ou 7 facteurs).

2. Instruments de mesure des troubles psychiatriques

Comme les instruments de mesure de la personnalité, les instruments d'évaluation des troubles psychiatriques comprennent des tests généraux et des tests spécifiques de diagnostic psychiatrique.

2.1. Tests généraux de mesure des troubles psychiatriques

Il existe de nombreux tests de diagnostic psychiatrique, quatre ont été utilisés pour étudier les troubles mentaux chez des personnes se déclarant EHS. Certains sont des instruments d'évaluation par un clinicien, d'autres des questionnaires auxquels les sujets répondent seuls.

La version courte du *Composite International Diagnostic Interview (CIDI-SF)* de l'Organisation mondiale de la santé est une version simplifiée de la *World Mental Health Composite International Diagnostic Interview (WMH-CIDI)*, mise au point par Kessler en 1998 à la demande de l'*US National Center for Health Interview survey (NHIS)*. Bien que largement utilisée dans de nombreux pays, elle n'a jamais été validée. Elle a donc été abandonnée en 2007, au profit du MINI (cf. ci-dessous) par son auteur et l'OMS. Cependant, les échelles d'anxiété et de dépression majeure ont été appliquées par Landgrebe *et al.* (2008) chez des personnes se déclarant EHS en comparaison avec des témoins.

Le *Mini-International Neuropsychiatric Interview (MINI)* a été développé (Sheehan *et al.* 1998) et validé pour permettre de structurer un entretien diagnostique compatible avec les critères diagnostiques du DSM-III-R (puis IV) de l'Association nord-américaine de psychiatrie et de la CIM-10 (Classification internationale des maladies). Il comprend un questionnaire de 120 items, mis à jour en fonction de l'évolution de ces classifications et appelant des réponses par « oui » ou « non ». Prévu pour être administré par un clinicien en face-à-face, ce questionnaire peut aussi être auto-administré. Il est divisé en 16 modules, qui peuvent être administrés séparément et qui correspondent aux troubles suivants : épisode dépressif majeur, dysthymie, risque suicidaire, épisode (hypo)maniaque / trouble bipolaire, trouble panique, agoraphobie, phobie sociale, trouble obsessionnel compulsif, état de stress post-traumatique, alcool (dépendance/abus), drogues (dépendance/abus), troubles psychotiques, anorexie mentale, boulimie mentale, anxiété généralisée, troubles de la personnalité antisociale. Ce test a été traduit et validé en de nombreuses langues. Ses limites sont de ne pas permettre l'évaluation de la sévérité des symptômes, ni leur retentissement fonctionnel.

Le *General Health Questionnaire (GHQ-12)* (Goldberg 1992) a été développé comme test de dépistage des affections psychiatriques non psychotiques en pratique clinique. Il comprend 12 questions : « avez-vous pu vous concentrer sur ce que vous faisiez ? », « vos soucis vous ont-ils empêché de dormir ? », « avez-vous eu le sentiment de jouer un rôle utile ? », « vous êtes-vous senti capable de prendre des décisions ? », « vous êtes-vous senti constamment sous pression ? », « Avez-vous senti que vous ne pouviez pas surmonter vos difficultés ? », « avez-vous pu prendre du plaisir à vos activités quotidiennes ? », « avez-vous pu faire face à vos problèmes ? », « vous êtes-vous senti malheureux, déprimé ? », « avez-vous perdu confiance en vous ? », « avez-vous pensé que vous ne valez rien ? », « vous êtes-vous senti relativement heureux dans l'ensemble ? ». Une note 0 ou 1 est attribuée à chaque question en fonction du choix du sujet entre quatre réponses proposées pour chaque question. Une note totale ≥ 4 indique la présence d'une affection psychiatrique non psychotique. Ce test a fait l'objet de nombreux travaux méthodologiques qui ont permis d'établir sa validité et sa fiabilité en plusieurs langues et d'éliminer les biais de calcul qu'il pouvait comporter. Il s'agit d'un test unidimensionnel, abondamment utilisé en clinique et en recherche. Cependant, il s'agit d'un test sommaire, ne permettant pas de diagnostic précis et nécessitant, quand il est positif, la poursuite des investigations.

La *Symptom Checklist 90 (SCL 90-R)* est un auto-questionnaire de 90 items notés sur 5 niveaux ((0 = pas du tout ; 1 = un peu ; 2 = modérément ; 3 = beaucoup ; 4 = extrêmement) conçus pour

évaluer de manière rapide, la détresse psychologique et le profil psychopathologique à partir de neuf échelles symptomatiques : somatisation (SOM), Obsession-Compulsion –O-C), Traits sensitifs (SEN), Dépression (DEP), Anxiété ((ANX), Hostilité (HOS), Anxiété phobique (PHOB) Idéations paranoïaques (PAR) ; Traits psychotiques (PSY). L'outil fournit également 3 indices globaux : un indice global de gravité (IGG), un indice des symptômes rapportés (ISR) et le nombre de symptômes rapportés (NSR). Suffisamment sensible pour être utilisé dans le suivi des patients, cet instrument a été largement validé et utilisé dans le monde. Seules les sous-échelles ANX, DEP et SOM ont été appliquées chez des personnes se déclarant EHS.

La *Brief Symptom rating scale-5 (BSRS-5)* est un autre test de dépistage des affections psychiatriques non psychotiques. Il s'agit d'un test inspiré de la BSRS-50, elle-même constituée de 10 dimensions de symptômes psychiatriques dérivées de la *Symptom Checklist 90-révisée (SCL 90-R)*. La BSRS-5 comprend 5 items (anxiété, dépression, hostilité, sensibilité interpersonnelle et symptômes supplémentaires) notés par les sujets sur une échelle allant de 0 (pas du tout), à 1 (un petit peu), 2 (modérément), 3 (passablement) ou 4 (extrêmement) en fonction de l'inconfort qu'ils leur ont procuré. Un score global de 6 constitue un *cut-off* validé pour l'identification des cas psychiatriques. Ces items sont ceux qui corréleront le mieux avec les dimensions correspondantes de la BSRS-50. Cette dernière comprend en outre 5 dimensions (troubles obsessionnels compulsifs, anxiété phobique, mode de pensée paranoïaque, état psychotique) qui correspondent à des troubles mentaux plus sévères que les items de la BSRS-5 et qui, contrairement à ces derniers, sont rarement réactionnels. Bien que cette échelle ait obtenu, dans la détection des cas psychiatriques, une sensibilité de 78,9 %, une spécificité de 74,3 %, une valeur prédictive de positivité de 69,9% et une valeur prédictive de négativité de 82,3 %, elle n'a pas été utilisée en dehors de Taïwan. De plus, comme la GHQ-12, elle ne fournit pas de diagnostic précis et nécessite, lorsqu'elle est positive, la poursuite des investigations.

2.2. Tests spécifiques de troubles psychiatriques

Le *State-Trait Anxiety Inventory (STAI)* (Spielberger *et al.* 1983) est un questionnaire d'auto-évaluation de l'anxiété. Son intérêt est de distinguer l'anxiété "état" (*state*), qui correspond à l'anxiété du sujet au moment du test et l'anxiété "trait" (*trait*) qui correspond à l'anxiété ressentie habituellement par le sujet. En pratique, il comprend deux séries de 20 items chacune, une pour l'anxiété "état" et l'autre pour l'anxiété "trait". Chaque item est noté de 1 à 4, 4 étant le degré le plus fort d'anxiété. La passation demande 20 minutes au maximum. En faisant la somme des 20 notes, on obtient un score compris entre 20 et 80 pour chaque échelle. Ce score permet de classer les sujets ou les groupes de sujets sur cinq niveaux d'anxiété : très faible (≤ 35), faible (= 36 à 45), moyen (= 46 à 55), élevé (= 56 à 65) et très élevé (> 65). Ce test a été traduit et validé en de nombreuses langues. Une version plus récente, le STAI-forme Y (Spielberger and Sydeman 1994), a amélioré les propriétés psychométriques du test ; elle est actuellement la plus utilisée.

L'inventaire de dépression de Beck (*Beck depression inventory*, BDI) est un des tests les plus connus et les plus utilisés dans le monde, aussi bien pour les soins que pour la recherche. Il s'agit d'un auto-questionnaire à choix multiples de 21 questions, qui permet d'obtenir un score global de dépression. Ce dernier est d'autant plus élevé que la dépression est sévère. Il existe plusieurs échelles d'évaluation. Grosso-modo, un score inférieur à 11 signifie une absence de dépression, un score compris entre 11 et 20 une dépression légère, un score entre 21 et 30, une dépression d'intensité moyenne et un score supérieur à 30 une dépression sévère. Il existe trois versions successives du BDI datant successivement de 1961, 1978 et 1996.

Le *Profile of Mood State (POMS)* est un instrument de mesure de l'humeur largement utilisé en psychologie. La validité de sa version japonaise a été établie en population générale (Yokoyama *et al.*, 1990). Il comprend 65 items et permet l'évaluation simultanée sur 5 niveaux (0 = pas du tout ; 1 = un peu ; 2 = modérément ; 3 = beaucoup ; 4 = extrêmement fréquent) de 6 échelles de l'humeur : Tension-Anxiété (T-A), Dépression (D), Colère-Hostilité (C-H), Vigueur (V), Fatigue (F) et Confusion (C).

L'échelle des préoccupations de santé liées à la vie moderne (*Modern Health Worries, MHW*) (Petrie *et al.* 2001) est une échelle destinée à mesurer les inquiétudes des personnes à l'égard de

la nature possiblement nocive pour la santé des caractéristiques de la vie moderne. Elle comprend 25 items notés de 0 (pas d'inquiétude) à 4 (inquiétude extrême) et répartis entre quatre sous-échelles : pollution environnementale, interventions toxiques, nourriture malsaine et radiations.

Le *General Perceived Stress Questionnaire (PSQ)* (Levenstein *et al.* 1993) est un outil d'évaluation du stress développé pour fournir un outil de recherche sur les affections psychosomatiques. Il a été élaboré en collaboration avec des patients. Il comprend 30 items, notés de 1 à 4 en fonction de leur fréquence (1 = presque jamais ; 2 = quelquefois ; 3 = souvent ; 4 = habituellement) au cours des 1 à 2 années précédentes. Il permet de calculer un index [Index PSQ = (score brut – 30) / 90], dont la valeur est comprise entre 0 et 1 avec une valeur moyenne dans la population générale de $0,30 \pm 0,15$ (Kocalevent *et al.*, 2007). Sa reproductibilité (0,82) et sa cohérence interne (coefficient $\alpha > 0,9$) sont excellentes. Il est corrélé ($r = 0,73$) avec l'échelle de stress perçu de Cohen, qui lui est antérieure (1988) et reste plus utilisé. Une analyse en composantes principales a montré qu'il comprenait sept facteurs : harcèlement, surcharge, irritabilité, manque de joie, fatigue, préoccupations et tension, le premier et le dernier étant associés à des problèmes de santé.

Le *Shirom-Melamed Burnout Questionnaire (SMBQ)* (Melamed *et al.* 1992) est un des deux instruments les plus utilisés pour évaluer le *burnout* (Lundgren-Nilsson *et al.* 2012). Il est construit selon le concept selon lequel la composante centrale du *burnout* comprend un épuisement émotionnel, une fatigue physique et une lassitude cognitive. Il comprend 14 items notés de 1 à 7 en fonction de leur fréquence (1 = jamais ou presque jamais ; 7 = toujours ou presque toujours). Sa consistance interne est excellente (coefficient α de Cronbach = 0,92). Sa valeur moyenne dans la population générale est de $2,13 \pm 0,79$.

Ces tests ne remplacent pas l'entretien en tête à tête entre un patient et un psychologue pour une étude de personnalité ou un psychiatre pour un diagnostic psychiatrique. Néanmoins, ils sont utiles et indispensables en matière de recherche (ils sont standardisés, apportent une quantification que n'apporte pas l'entretien, permettent des comparaisons entre groupes ou entre sujets, etc.).

Annexe 14 : Les mécanismes de l'effet *nocebo* : stress, conditionnement et attribution causale

Les trois notions de stress, de conditionnement et d'attribution causale concernent les mécanismes qui sous-tendent l'effet *nocebo*. Le stress, ou syndrome général d'adaptation, est considéré comme constituant l'étape terminale de ces mécanismes, celle qui est responsable de troubles organiques et de symptômes. Les différentes formes de conditionnement sont les mécanismes par lesquels des facteurs psychiques peuvent déclencher la réaction de stress. Tout récemment, l'attribution causale a été évoquée comme étant un mécanisme pouvant générer un effet *nocebo*, sans nécessiter une réaction de stress. Pour l'instant, cette dernière hypothèse est insuffisamment argumentée.

La notion de stress

La notion de stress, développée par H. Selye, est fondée sur la démonstration que, physiologiquement, le corps répond de manière non-spécifique et pratiquement de la même façon aux agressions physiques, environnementales ou psychologiques. Ce syndrome général d'adaptation se déclenche automatiquement dès que l'homéostasie est perturbée. Il comprend trois phases successives, d'alarme, de résistance et d'épuisement. La réaction d'alarme est celle d'un organisme soumis à un stimulus stressant (un événement quelconque) auquel il n'est pas encore adapté. L'agression entraîne d'abord un état de choc, plus ou moins intense et plus ou moins durable, au cours duquel les capacités adaptatives sont diminuées. Cette situation est détectée par l'hypothalamus et d'autres structures nerveuses sous-jacentes qui déclenchent, par la voie du système nerveux autonome (orthosympathique) (cf. § 7.4), une stimulation de la glande médullosurrénale et une sécrétion, par cette dernière, d'adrénaline et de noradrénaline dans le sang. Ces hormones augmentent la pression artérielle, accélèrent les rythmes cardiaque et respiratoire, puis augmentent la glycémie, modifications qui fournissent l'énergie nécessaire aux comportements de fuite ou de lutte qui constituent l'adaptation psychiques aux agressions externes. Si le stimulus stressant persiste, l'organisme entre dans la phase de résistance. L'axe hypothalamo-hypophyso-surrénalien, déjà activé lors de la phase d'alarme, prend le relais de la réponse adrénergique et, par le jeu d'une cascade de sécrétions hormonales, entraîne une sécrétion d'hormones métaboliques - glucocorticoïdes (cortisone et hydrocortisone) et minéralocorticoïdes (aldostérone et corticostérone) - par la glande corticosurrénale. Les premières sont un facteur plus économique et plus durable d'augmentation de la glycémie que l'adrénaline ; à fortes doses, elles ont des effets antalgiques, antiallergiques et antiinflammatoires et inhibent le système immunitaire. Les secondes contribuent à maintenir l'équilibre ionique de l'organisme. Toutes ces réactions sont bénéfiques à l'organisme en lui fournissant l'énergie nécessaire à l'élimination du stimulus stressant et au maintien de l'homéostasie. Toutefois, si le stimulus stressant est trop intense ou persiste au-delà de certaines limites, l'organisme entre en phase d'épuisement. Ses réserves énergétiques deviennent insuffisantes pour répondre aux besoins et ses défenses immunitaires diminuent, rendant l'organisme plus sensible à de nouvelles agressions externes. Une réaction adrénergique peut encore se produire, mais ne peut pallier au manque de ressources. Cet épuisement a des effets physiopathologiques, mais aussi psychiques. Les effets physiopathologiques peuvent concerner tous les organes, en fonction de leur état initial, et conduire soit à une aggravation d'une maladie préexistante, soit au déclenchement d'une nouvelle maladie. Les effets psychiques et comportementaux (anxiété, colère, dépression, troubles du comportement alimentaire, prise de toxiques) seraient dus, pour l'essentiel, à un effet délétère du cortisol sur le cerveau. Toutefois, les réactions d'une personne à un stimulus stressant sont modulées, non seulement par le contexte, mais aussi par son état somatique et psychique.

La notion de conditionnement

Le terme conditionnement recouvre plusieurs concepts (Mirabel-Sarron, 2015) :

1. Le « **conditionnement classique** » ou de type I a été décrit par Pavlov en 1927 sous le terme de « réaction conditionnelle de salivation » chez le chien. La présentation de la nourriture (stimulus inconditionnel) à un chien provoque une réaction de salivation. L'association d'un son

(stimulus conditionnel) à la nourriture et la répétition de cette association aboutit à ce que la seule émission du son, sans présentation de nourriture, crée la réaction conditionnelle de salivation, telle qu'elle existe lors de la présentation de la nourriture. Si la présentation du stimulus son n'est pas renforcée par une nouvelle association avec le stimulus inconditionnel (nourriture), alors la réaction conditionnelle de salivation au seul son disparaît progressivement. C'est le phénomène dit d'extinction, ou inhibition interne du conditionnement, si la liaison n'est pas renforcée régulièrement. Alors le stimulus conditionnel perd son statut et redevient stimulation neutre. Des études sur le long terme ont permis à Pavlov de mettre en évidence l'existence de différences typologiques entre individus (à milieu externe égal et à histoire comportementale similaire, il est possible d'observer des réponses différentes d'un individu à l'autre). Ce schéma expérimental pavlovien du principe d'acquisition d'un comportement repose sur l'association des stimuli et implique que les liaisons formées soient temporaires. Les réponses sont sous la dépendance d'une stimulation qui précède la réponse.

Ce processus est très puissant chez l'être humain, il conditionne l'acquisition de nos goûts et dégoûts alimentaires ; il est impliqué dans la plupart des phobies, et autres manifestations émotionnelles.

2. Le conditionnement de type II, ou « **conditionnement opérant** », a été décrit par Skinner en 1953. Ce dernier a énoncé une deuxième loi d'apprentissage des comportements selon laquelle le sujet agit sur son milieu en opposition au conditionnement classique où il répond à une situation qui implique une réaction physiologique. Dans cette loi, interviennent des renforcements, soit positifs (tout stimulus, mais généralement agréable, intervenant à la suite d'un comportement et augmentant la probabilité que ce comportement se répète), soit négatifs (tout stimulus, généralement désagréable, intervenant à la suite d'un comportement et dont la suppression augmente la probabilité que ce comportement se répète). Pour Skinner, le milieu environnant agit surtout sur des organismes « opérant » (en action) et joue un rôle dans la sélection des conduites.

Chez l'Homme, les procédés de renforcement sont très utilisés dans l'éducation des enfants.

3. Le **conditionnement par observation**, ou conditionnement par imitation ou modelage, a été décrit par Bandera en 1980. Pour cet auteur, le comportement humain doit être étudié en termes d'interactions permanente et réciproque entre les déterminants cognitifs, comportementaux et environnementaux. Cette théorie accorde un rôle central aux processus internes de contrôle et d'organisation du comportement : l'observation d'autres individus aux prises avec les mêmes choses ou les mêmes personnes procure une grande source d'apprentissage comportemental.
4. À partir des années 1960, les cognitivistes s'inspirent de la théorie de l'information pour s'opposer à la théorie comportementaliste (*behavioriste*) de Skinner et, plus particulièrement, au concept, développé par ce dernier, de la « boîte noire », inaccessible à l'observation, entre stimuli et réponses. À la place, ils proposent de décrire, étape par étape, le traitement de toutes les informations qui conduit à l'élaboration de représentations mentales (ensembles plus ou moins conscients, organisés et cohérents, d'éléments cognitifs (idées, images mentales, etc.), affectifs et du domaine des valeurs concernant un objet particulier) et l'intervention de ces représentations dans les réponses aux modifications de l'environnement.

L'encodage²⁴¹ neuronal du conditionnement classique pavlovien est différent de celui du conditionnement associé.

²⁴¹ L'encodage consiste en la conversion de l'information par le cerveau sous une forme appropriée au stockage et à la récupération. C'est la première étape de la mémorisation.

La notion d'attribution causale

La notion d'attribution causale a été appliquée à l'étude de l'EHS par Szemerszky *et al.* (2016). Dans leur description de la théorie de l'attribution causale, ils se sont en grande partie inspirés du travail de Robbins et Kirmayer (1991) (Robbins and Kirmayer 1991).

Il s'agit d'une notion de psychologie sociale, selon laquelle tout être humain a une disposition naturelle à attribuer une cause aux phénomènes auxquels il assiste, et ceci d'autant plus qu'il est plus impliqué dans leurs déroulements. Cette disposition répond au besoin de comprendre et de prévoir le monde pour s'y adapter. Elle a donc à la fois une fonction de description et de représentation du réel et de planification des actions. Dans un contexte social, on admet que les attributions comprennent trois dimensions : le lieu (la cause est à l'intérieur ou à l'extérieur de la personne), la « controlabilité » et la stabilité temporelle. Les attributions, particulièrement celles qui nous concernent, sont sujettes à divers biais. Par exemple, nous avons tendance à nous imputer les bons événements et à imputer à des facteurs externes les mauvais événements. De même, pour expliquer le comportement de quelqu'un d'autre, nous surestimons l'importance de ses caractéristiques internes. Les biais d'attribution qui se produisent dans diverses situations sont habituellement considérés comme servant à l'auto-défense, à aider à éviter le sentiment de vulnérabilité ou à maintenir l'estime de soi.

La théorie de l'attribution a été appliquée à la signification donnée aux symptômes par ceux qui les ressentent. Toute sensation de maladie, et même tout symptôme, retient habituellement l'attention de la personne qui les ressent. L'attribution causale représente, au même titre que la nature, le déroulement, les conséquences et la durabilité, une composante importante de la représentation que les profanes se font des maladies. Dans les modèles complexes de la perception des symptômes (Cioffi 1991, Kolk *et al.* 2003, Pennebaker 1982), les symptômes physiques sont compris comme le résultat de processus perceptifs et cognitifs impliquant l'attention, la détection et l'interprétation, c'est-à-dire l'attribution. Ils sont généralement interprétés comme la conséquence de causes mineures et réversibles ; ou bien ils font l'objet d'essais d'interprétation basés sur des concepts physiopathologiques profanes. En attribution sociale, si un événement coïncide régulièrement avec des facteurs de situation, il sera attribué à ces facteurs. En l'absence de tels facteurs, il sera imputé à des caractéristiques personnelles. De même, les symptômes sont habituellement attribués, si possible, à des facteurs de situations, par exemple à des irritants environnementaux, à un surmenage ou à un manque de sommeil. Sinon, les personnes ont tendance à attribuer les symptômes à des facteurs internes. La recherche sur la perception des symptômes a identifié deux catégories de causes internes présumées, les attributions psychologiques ou somatiques, ainsi que des différences individuelles dans la manière d'attribuer.

Une analyse de ce type a été appliquée aux effets indésirables des médicaments. Un certain nombre de ces effets sont dus aux propriétés pharmacologiques du produit. Cependant, un certain nombre d'autres effets ne peuvent être expliqués par les caractéristiques biochimiques des substances actives. Ces derniers effets étant non spécifiques, il a été proposé qu'ils pourraient être la manifestation d'un effet *nocebo*, inverse de l'effet *placebo* qui explique les effets bénéfiques non pharmacologiques des médicaments. Plusieurs études cliniques et expérimentales ont fourni des preuves de l'existence et de l'importance de tels effets *nocebo*. Un des facteurs souvent mentionné pour expliquer la survenue de ces effets non spécifiques est l'attribution causale erronée. La crainte de la maladie et du médicament lui-même, ajoutée au sentiment de vulnérabilité, entraîne des niveaux élevés d'excitation et d'anxiété, ainsi que l'amplification des sensations corporelles bénignes, qui sont attribuées faussement au médicament.

Des symptômes non spécifiques sont également observés dans les syndromes d'intolérance environnementale idiopathique et ont été comparés aux troubles somatoformes (Bailer *et al.* 2005). Sur cette base, Bailer *et al.* (2008) ont proposé un modèle de « causalité cognitive » : un haut niveau de crainte à l'égard des nuisances des facteurs environnementaux entraînerait une amplification des sensations corporelles perçues et leur transformation en symptômes pour lesquels une prise en charge médicale serait recherchée (Bailer, Witthöft, and Rist 2008).

C'est ce modèle que Szemerszky *et al.* (2016) ont appliqué à l'étude de l'EHS (voir § 6.2.1.2.6).

Annexe 15 : Courrier de l'enquête internationale sur l'hypersensibilité aux champs électromagnétiques (EHS)

Maisons-Alfort (France), le 4 juin 2015

L'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses) a mis en place un groupe de travail (GT) « Radiofréquences et santé » en septembre 2011, afin de réaliser une mise à jour régulière relative aux effets sanitaires des radiofréquences.

Ce GT est constitué de 16 experts dans les domaines de la médecine, de la biologie, de la métrologie et de la dosimétrie des champs électromagnétiques, de l'épidémiologie et des sciences sociales.

Depuis la publication de la mise à jour des connaissances sur le thème « radiofréquences et santé » en octobre 2013 (disponible sur Internet²⁴²), le GT a notamment entamé une expertise spécifique sur l'hypersensibilité aux champs électromagnétiques (EHS).

Dans le cadre de cette expertise, l'Anses organise une enquête internationale (une trentaine de pays consultés) visant à mieux connaître le nombre de personnes se déclarant EHS, les dispositions prises en leur faveur et les programmes de recherche sur le sujet dans les différents pays / régions consultés.

Les résultats de ce questionnaire seront exploités dans le cadre du prochain rapport d'expertise du GT « radiofréquences et santé » de l'Anses. Ce rapport fera l'objet d'une consultation publique (en français) fin 2015, avant publication du rapport final sur notre site internet (www.anses.fr) courant 2016.

Merci de bien vouloir répondre aux questions ci-après avant le 15 juillet 2015 et de retourner le formulaire, ainsi que tout document (publication scientifique, rapport d'expertise, programme de recherche, liens vers des sites internet, etc.) que vous jugerez utile de nous communiquer à la Direction de l'évaluation des risques.

L'Anses assure des missions de veille, d'expertise, de recherche et de référence sur un large champ couvrant la santé humaine, la santé et le bien-être animal et la santé végétale. L'Anses évalue de manière transverse les risques et les bénéfices sanitaires en y intégrant l'apport des sciences humaines et sociales, transmet ses avis et recommandations aux pouvoirs publics et rend systématiquement publics ses travaux. C'est un établissement public à caractère administratif placé sous la tutelle des ministères chargés de la Santé, de l'Agriculture, de l'Environnement, du Travail et de la Consommation.

²⁴²<https://www.anses.fr/fr/content/champs-%C3%A9lectromagn%C3%A9tiques-un-dispositif-global-d%E2%80%99expertise>

Questions

1. Est-ce que la question de l'hypersensibilité aux champs électromagnétiques (EHS) est-un sujet de préoccupations (sanitaire, scientifique, politique, médiatique, etc.) dans votre pays / région ?
2. Population concernée
Disposez-vous de données concernant le nombre de personnes déclarées / se déclarant EHS ? Quand, de quelle manière (auto-déclaration, questionnaire de symptômes, etc.) et par qui ces données ont-elles été collectées ? sur la base de quelle définition de l'EHS ?
Avez-vous des informations concernant le profil de ces personnes (âge, genre, activité ou catégorie socio-professionnelle, lieu de résidence, etc.)
Y a-t-il des évolutions constatées ces dernières années concernant le nombre et le profil de ces personnes ? (Avez-vous des données chiffrées ?)
3. Dispositions prises par les pouvoirs publics
Y a-t-il un statut spécifique accordé aux personnes déclarées EHS (e.g. handicap ou autre) dans votre pays / région ?
Sur quels critères et par qui ce statut est-il accordé ?
À quelles dispositions peuvent prétendre les personnes bénéficiant de ce statut (prise en charge médicale, mesures de champs électromagnétiques, subvention d'équipements, indemnités, etc.) ? À quelles conditions sont-elles accordées ?
Avez-vous créé ou préservé des lieux (zones, bâtiments, chambres d'hôpitaux, etc.) de faibles niveaux d'exposition aux champs électromagnétiques ou sans champ électromagnétique (« zones blanches ») ? Comment sont-ils définis et par qui sont-ils gérés ?
De quelles autorités (nationales, régionales, locales, etc.) ces dispositions concernant l'hypersensibilité aux champs électromagnétiques relèvent-elles ?
4. Impact des dispositions prises par les pouvoirs publics
Le cas échéant, que pouvez-vous dire des effets de ces dispositions sur le nombre et la situation des personnes déclarées EHS ?
Comment ces dispositions ont-elles été reçues par les professionnels de santé ? les milieux scientifiques ? les opérateurs de téléphonie ? les associations de personnes se déclarant EHS ? et dans l'opinion publique ?
5. Recherche
Quels sont les principaux projets de recherche récents, en cours ou à venir concernant l'EHS dans votre pays / région ?
Quelles sont pour vous les priorités de recherche concernant l'EHS pour les prochaines années ?

Annexe 16 : verbatim des auditions

Les verbatim ou compte rendu des auditions sont publiés en annexe électronique de ce rapport, disponible sur le site internet de l'Anses.

Annexe 17 : Bilan de la consultation publique et principales modifications du rapport suite à la consultation

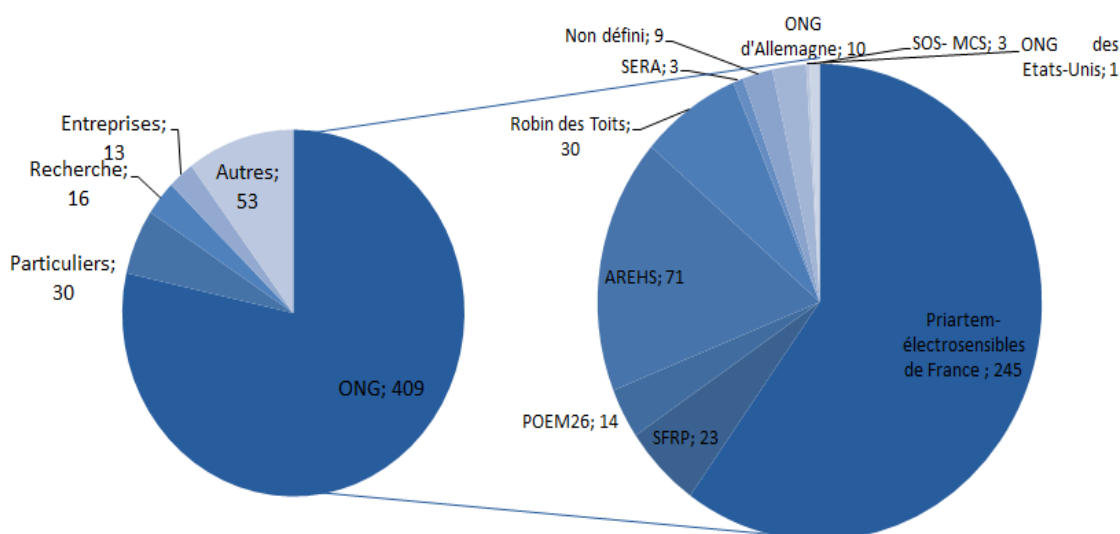
La consultation publique du rapport pré-définitif « Hypersensibilité électromagnétique ou intolérance environnementale idiopathique attribuée aux champs électromagnétiques » a été ouverte du 27 juillet au 15 octobre 2016.

L'Anses tient à remercier toutes les personnes ayant déposé leurs commentaires par l'intermédiaire d'un formulaire en ligne, à savoir 13 organismes et 10 particuliers. Il s'agit de :

- 7 organisations non gouvernementales (ONG) ;
- 3 entreprises ou fédérations d'entreprises ;
- 3 personnes exerçant dans le domaine de la recherche ;
- 10 particuliers.

Au total, 521 commentaires ont été déposés, dont une très large proportion vient des ONG (cf. Figure 23) :

- 409 commentaires d'ONG ;
- 30 de particuliers ;
- 16 de personnes exerçant dans le domaine de la recherche ;
- 13 d'entreprises ou de fédérations d'entreprises ;
- 53 non classés.



AREHS : Association pour la reconnaissance de l'EHS ;

POEM 26 : Prévention ondes électromagnétiques Drôme ;

SERA : Santé Environnement Rhône-Alpes ;

SFRP : Société Française de Radioprotection ;

SOS-MCS : Association Française d'aide et de défense des personnes atteintes du syndrome d'hypersensibilité chimique multiple

Figure 23 : origine des contributions à la consultation publique pour l'ensemble des contributeurs – et pour les ONG

La répartition des commentaires par chapitre du rapport est illustrée sur la Figure 24.

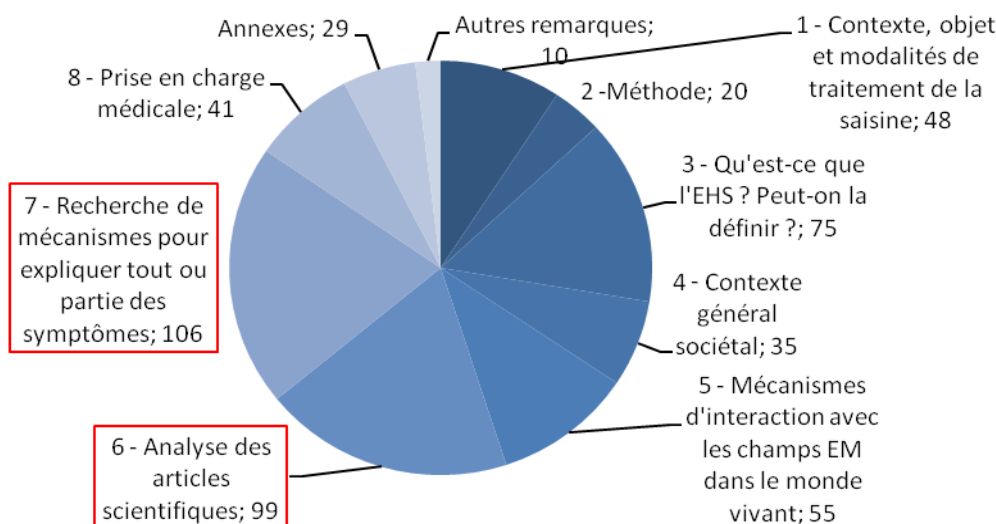


Figure 24 : répartition des commentaires en fonction du chapitre du rapport

Le chapitre 7 sur la « Recherche de mécanismes pour expliquer tout ou partie des symptômes des personnes se déclarant EHS » et le chapitre 6 sur l'« Analyse des articles scientifiques impliquant des personnes se déclarant EHS » sont les deux chapitres les plus commentés (avec respectivement 106 et 99 commentaires).

Les modalités de prise en compte des commentaires reçus pendant la consultation sont présentées au § 2.5.4 du rapport.

Les commentaires ont été classés en sept catégories, chacune appelant à un type de réponse différent :

« Commentaire n'impliquant pas de réponse de l'Agence » : concerne les commentaires formulant une constatation ou une interprétation dont la subjectivité ne permet pas de les inclure au rapport.	A
« Commentaire n'impliquant pas de modification du rapport d'expertise » : concerne les commentaires pertinents, auxquelles une réponse a été formulée, mais ne justifiant pas une modification du rapport.	B
« Commentaire partiellement pris en compte dans le rapport » : concerne les commentaires qui formulent plusieurs idées, dont une a entraîné une modification du rapport d'expertise.	C
« Commentaire pris en compte dans le rapport (ajout) » : concerne les commentaires qui ont impliqué l'ajout de données dans le rapport d'expertise. Cette mention a été appliquée notamment lorsque l'analyse ou la citation d'études scientifiques a été insérée.	D
« Commentaire pris en compte dans le rapport (reformulation) » : concernent certaines phrases ou certains paragraphes qui ont été reformulés.	E
« Commentaire pris en compte dans le rapport (modification) » : concerne les commentaires qui ont impliqué la modification de données dans le rapport d'expertise.	F
« L'Anses prend note du témoignage communiqué / de cette expression, et remercie son auteur »	G

Les commentaires sont présentés dans un tableau, avec l'identité (sauf demande d'anonymat), l'organisme du contributeur et, le cas échéant, des références bibliographiques, ainsi que la réponse de l'Anses (cf. tableau de réponses aux commentaires disponible en version électronique sur le site internet de l'Anses – <http://www.anses.fr>). Étant donné le nombre de commentaires reçus, les réponses ont été formulées de manière concise.

Au final, 146 commentaires ont entraîné une modification, un ajout ou une reformulation dans le rapport d'expertise (catégories C, D et F).

Les références bibliographiques recueillies dans le cadre de la consultation ont été prises en considération aux conditions suivantes :

- qu'elles soient pertinentes et répondent aux critères de sélection présentés au § 2.1.
- qu'elles soient publiées entre 2009 et la date de début de mise en consultation publique du rapport (juillet 2016) ;
- qu'il s'agisse d'articles originaux publiés dans des journaux à comité de lecture indépendant, en langue française ou anglaise.

Toutefois, d'autres publications (antérieures à 2009 ou revues par exemple) ont ponctuellement pu être ajoutées au rapport.

Suite à la consultation publique, le rapport d'expertise a été enrichi d'une soixantaine de références bibliographiques (soit qu'elles aient été proposées par les différents contributeurs, soit qu'elles aient été rajoutées directement par le groupe de travail), clarifié (c'est le cas du § 3.3.2 sur l'IRM, du § 7.5.1 sur la BHE ou de l'hypothèse ii au § 5.2 notamment) et complété (création d'un § 3.8.4 sur l'hypersensibilité, comme trait de personnalité par exemple). Cependant, le fond du rapport n'a pas été transformé.

Annexe 18 : Annexe aux recommandations concernant les protocoles expérimentaux

En premier lieu, il serait nécessaire d'améliorer la méthodologie des études de provocation, les plus à même d'apporter les preuves d'un lien de causalité entre exposition aux champs électromagnétiques et l'EHS, pour éviter les défauts qui leur ont été imputés jusqu'à présent (cf. § 6.2.3).

Études de provocation

Concernant les études de provocation, le groupe de travail recommande :

- d'entreprendre des études sur la base de critères d'inclusion et d'exclusion précis (symptômes, ancienneté des troubles, sévérité, temps de latence d'apparition des symptômes, éventuelles pathologies associées, notamment environnementales, sources incriminées, etc.) qui assurent l'homogénéité du groupe étudié (âge, genre, critères d'inclusion et d'exclusion) ;
- d'inclure un nombre de personnes suffisant, calculé en fonction des travaux publiés antérieurement, en justifiant *a priori* de la robustesse des tests statistiques et, pour le recrutement de ces personnes, de s'appuyer éventuellement sur la cellule de coordination présentée au § 10.1, les CCPP, des consultations multidisciplinaires recevant des personnes se déclarant EHS et / ou des associations ;
- d'associer des tests objectifs (EEG, ECG, marqueurs biologiques, etc.) pouvant permettre de valider les réponses subjectives et d'ouvrir des perspectives de recherche sur les éventuels mécanismes en cause ;
- de conduire les protocoles expérimentaux en double aveugle ;
- de comparer les personnes se déclarant EHS à des témoins appariés le plus soigneusement possible (âge, genre, niveau éducatif, conditions de vie et notamment conditions d'exposition, etc.), témoins présentant ou pas d'autres syndromes d'intolérance environnementale idiopathique ou des syndromes médicalement inexpliqués ;
- d'adapter, dans la mesure du possible, les expositions en fonction des signaux auxquels les personnes se déclarent sensibles ;
- de bien caractériser l'exposition aux champs électromagnétiques plus précisément que par la fréquence porteuse et le DAS (intensité, fréquence porteuse, durée, forme du signal, répétition, etc.) avec une dosimétrie adéquate.

Système nerveux autonome

Concernant les tests explorant le système nerveux autonome pour tenter de diagnostiquer l'EHS, le groupe de travail recommande de :

- respecter le référentiel permettant de normaliser les valeurs limites définissant les différentes bandes de fréquences issues de l'analyse spectrale du signal cardiaque, afin de permettre les comparaisons entre les différentes études ;
- faire ces études en situation de repos et après lever actif ;
- s'intéresser à d'autres aspects plus dynamiques de la variabilité de la fréquence cardiaque²⁴³.

²⁴³ prenant en compte le chaos ou l'entropie par exemple.

Sommeil et rythmes circadiens

Concernant l'étude des troubles du sommeil et les rythmes circadiens chez les personnes se déclarant EHS, le groupe de travail recommande que :

- les troubles du sommeil liés à un facteur de l'environnement soient mieux caractérisés par des critères objectifs²⁴⁴ ;
- les études soient réalisées dans un environnement contrôlé, et / ou complétées par des enregistrements polysomnographiques effectués en ambulatoire sur site ;
- les études polysomnographiques soient effectuées en double aveugle, les personnes se déclarant EHS étant leur propre témoin, ainsi qu'en comparaison avec des personnes non-EHS ;
- les conséquences des troubles du sommeil soient également objectivés par l'étude des endormissements diurnes²⁴⁵ excessifs en mesurant les temps d'endormissements à l'aide de tests standards évaluant la somnolence diurne (décrits en Annexe 8) ;
- des études de prévalence des troubles du sommeil soient incluses dans les études de cohorte réalisées chez les personnes se déclarant EHS ;
- les études sur les rythmes circadiens de sécrétion de la mélatonine, du cortisol ou autres hormones, prennent en compte des facteurs de confusion (ex : masse corporelle, âge, genre, alcool, travail posté et de nuit) qui modulent / affectent les mesures. Ceci est d'autant plus important qu'il existe une grande variabilité interindividuelle et que le contrôle d'un maximum de ces facteurs sera nécessaire à l'interprétation des données et à la comparaison entre groupes de personnes se déclarant EHS et témoins ;
- les études sur les rythmes circadiens explorent les effets des radiofréquences à différentes périodes du cycle, comme suggéré par Qin *et al.*²⁴⁶ (Qin *et al.* 2014).

Hypersensibilité

Concernant l'étude de l'hypersensibilité, le groupe de travail recommande :

- d'utiliser le questionnaire validé d'Aron and Aron (1997) pour caractériser le degré d'hypersensibilité (comme trait de caractère) des personnes se déclarant EHS (cf. Annexe 5) ;
- d'utiliser des tests de personnalité validés, comme le *Minnesota Multiphasic Personality Inventory* (MMPI).

²⁴⁴ tels que ceux définis en 2005 par l'Académie Américaine de Médecine du sommeil en association avec les Sociétés Européenne, Japonaise et d'Amérique Latine du sommeil (voir Encadré 9, p218).

²⁴⁵ Cf. définition des endormissements diurnes excessifs en note de bas de page n°188, p218.

²⁴⁶ Ces auteurs ont montré un effet des radiofréquences sur la production de mélatonine chez le rat, mais uniquement à certaines périodes du cycle.



Agence nationale de sécurité sanitaire
de l'alimentation, de l'environnement et du travail
14 rue Pierre et Marie Curie
94701 Maisons-Alfort Cedex
www.anses.fr /  @Anses_fr