



CSTB
le futur en construction



Campagne nationale de mesure des radiofréquences dans les écoles

Convention DGPR-CSTB n°2201026654

Sutharsini SIVANANTHAM, Claire DASSONVILLE, François GAUDAIRE, Corinne MANDIN
Direction Santé – Confort

Rapport référencé CSTB-DSC/2013-033

SOMMAIRE

1	Contexte et objectifs	5
2	Méthode de collecte et d'exploitation des données	6
2.1	Constitution de l'échantillon	6
2.1.1	Recrutement des établissements scolaires	6
2.1.2	Extrapolation des résultats bruts au parc national des écoles	6
2.2	Réalisation des mesures de radiofréquences	6
2.3	Base de données fournie par l'Agence nationale des fréquences (ANFR)	7
2.4	Vérification de la conformité aux valeurs limites réglementaires	8
2.5	Méthodes statistiques utilisées	8
3	Niveaux de radiofréquences dans les écoles en France	9
3.1	Niveaux de radiofréquences à l'intérieur des bâtiments scolaires	10
3.2	Niveaux de radiofréquences à l'extérieur des bâtiments scolaires	11
4	Déterminants des niveaux de radiofréquences dans les écoles	14
4.1	Identification des potentiels facteurs explicatifs	14
4.2	Analyse des corrélations	16
4.3	Modèle explicatif du niveau de radiofréquences	18
5	Conclusion	19
5.1	Niveaux de radiofréquences	19
5.2	Analyse des radiofréquences par service	19
5.3	Déterminants des niveaux de radiofréquences	19
6	Références	20
	ANNEXES	21

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Liste des données fournies par l'ANFR	7
Tableau 2. Distribution des niveaux intérieurs de radiofréquences dans le parc des écoles en France métropolitaine (n=67299)	10
Tableau 3. Distribution des niveaux de radiofréquences à l'extérieur des bâtiments scolaires, échantillon non redressé (n=73)	12
Tableau 4. Niveaux médians de radiofréquences selon les variables explicatives, dans le parc national des écoles en France métropolitaine (n=67299) (cas A du protocole de mesure de l'ANFR (ANFR, DR15)).....	15
Tableau 5. Synthèse des corrélations entre le niveau de radiofréquences et ses facteurs explicatifs.	17
Tableau 6. Nombre moyen pondéré d'émetteurs selon leur distance aux écoles et le type d'environnement (n=67299)	17
Tableau 7. Modèle de régression linéaire multivariée du niveau intérieur de radiofréquences (échantillon redressé) (n=67299)	18
Tableau 8. Analyse des corrélations entre la non-réponse et les variables auxiliaires.....	23
Tableau 9. Corrélation entre la réponse des écoles et la distance à l'émetteur le plus proche.....	24
Tableau 10. Distribution des écoles en fonction du type de recrutement	24
Tableau 11. Analyse des corrélations entre le volontariat et les variables auxiliaires.....	24
Tableau 12. Modèle logistique estimant la probabilité de volontariat.....	25
Tableau 13. Tests de comparaison des distributions des niveaux de radiofréquences (V/m) en fonction du lieu de mesure (extérieur/intérieur).....	25
Tableau 14. Comparaison entre les marges tirées de l'échantillon (avec la pondération initiale) et les marges dans la population (marges du calage).....	26
Tableau 15. Comparaison entre les marges finales dans l'échantillon (avec la pondération finale) et les marges dans la population (marges du calage)	26
Tableau 16. Distribution des niveaux intérieurs de radiofréquences sur l'échantillon non redressé (n=225)	31
Tableau 17. Distribution des variables explicatives quantitatives sur l'échantillon non redressé (n=225)	28
Tableau 18. Distribution des variables explicatives quantitatives sur l'échantillon redressé (n=67299)	28
Tableau 19. Distribution des variables explicatives qualitatives.....	29
Tableau 20. Corrélations entre le niveau global de radiofréquences et les variables explicatives quantitatives (test de Spearman) (n=67299)	30
Tableau 21. Corrélations entre le niveau global de radiofréquences et les variables explicatives qualitatives (test de Kruskal Wallis) (n=67299).....	30
Tableau 22. Modèle de régression linéaire multivariée du niveau intérieur de radiofréquences (échantillon non-redressé) (n=225).....	32

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Valeurs limites réglementaires fixées en France par le décret du 3 mai 2002 n° 2002-775....	8
Figure 2. Répartition géographique des 298 écoles ayant participé à la campagne de mesure des radiofréquences selon leur type d'environnement (rural/urbain)	9
Figure 3. Synthèse des contributeurs principaux des niveaux intérieurs de radiofréquences selon la typologie de l'environnement (n=67299)	11
Figure 4. Synthèse des contributeurs principaux des niveaux extérieurs de radiofréquences selon la typologie de l'environnement (n=73)	13
Figure 5. Echantillon des écoles commun à l'échantillon de la CNE et à la campagne CEM	22
Figure 6. Zones climatiques de la France métropolitaine (RT 2012).....	33

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1. Analyse des biais et redressement de l'échantillon	22
Annexe 2. Méthodes d'analyse statistique pour la recherche des déterminants	27
Annexe 3. Sélection des variables explicatives du niveau de radiofréquences	28
Annexe 4. Analyse descriptive des mesures intérieures de radiofréquences avant redressement	31
Annexe 5. Modélisation des niveaux de radiofréquences sur l'échantillon non redressé	32
Annexe 6. Zones climatiques de la France métropolitaine	33
Annexe 7. Définition du niveau d'atypicité des champs électromagnétiques (ANFR, 2017).....	34

LISTE DES ABREVIATIONS

ANFR : Agence nationale des fréquences
CEM : Champs électromagnétiques
CNE : Campagne nationale « écoles »
DECT : Téléphonie sans fil
GRH : Groupes de réponse homogène
HF : Hautes fréquences (ondes courtes, moyennes et longues)
OQAI : Observatoire de la qualité de l'air intérieur
PMR : réseaux radio professionnels
Radiodiffusion FM : radiodiffusion en modulation de fréquences
RNT : Radio numérique terrestre
TM : Téléphonie mobile (TM « downlink » : émission des antennes vers les terminaux mobiles) dans les différentes bandes de fréquences
TV : Télévision

1 Contexte et objectifs

La mesure de l'exposition de la population aux radiofréquences, notamment des enfants, suscite actuellement de nombreuses questions. Dans les différents lieux de vie fréquentés par les enfants (logement, crèches, établissements scolaires, lieux publics, installations sportives et culturelles, etc.), les niveaux d'ondes électromagnétiques peuvent être très variables (Anses, 2016) et il y a encore peu de données disponibles sur les niveaux de radiofréquences dans ces lieux (Sagar et al, 2017). Par ailleurs, depuis 2002, les établissements scolaires font l'objet d'une réglementation spécifique par rapport à l'exposition liée aux champs électromagnétiques (article 5 du décret n° 2002-775 du 3 mai 2002). Ainsi, à l'installation d'une station de base de téléphonie mobile, les opérateurs et l'Agence Nationale des Fréquences (ANFR) s'assurent qu'au sein des établissements scolaires situés dans un rayon de 100 mètres de l'installation, l'exposition aux champs électromagnétiques émis par l'installation soit aussi faible que possible.

Dans ce contexte, le ministère en charge de l'Environnement a mis en place un **dispositif national de surveillance et de mesure de l'exposition aux ondes électromagnétiques**, par la loi n° 2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement. Ce dispositif est effectif depuis le 1^{er} janvier 2014 et est géré par l'ANFR. Il permet à toute personne physique ou morale de faire mesurer gratuitement l'exposition aux ondes électromagnétiques, aussi bien dans les locaux d'habitation que dans les lieux accessibles au public. **Pour les écoles, une campagne spécifique a été engagée dans le cadre de ce dispositif.** Les mesures de radiofréquences ont été réalisées dans un échantillon d'écoles représentatif du parc d'écoles en France métropolitaine et recrutées à partir de la campagne nationale « écoles » (CNE) de l'Observatoire de la qualité de l'air intérieur (OQAI). L'intégration des mesures de radiofréquences à la campagne de l'OQAI permet, grâce à la méthode de recrutement retenue, d'extrapoler les mesures réalisées dans l'échantillon à l'ensemble du parc des écoles maternelles et élémentaires de France métropolitaine.

Les mesures de radiofréquences ont été effectuées selon les versions 3.0 puis 3.1 du protocole de mesure de l'ANFR (ANFR, DR15) par des laboratoires accrédités et indépendants.

Les objectifs de la campagne de mesure des radiofréquences dans les écoles étaient de :

- contrôler la conformité de l'exposition des écoles aux valeurs limites réglementaires ;
- réaliser un état descriptif des niveaux d'exposition aux radiofréquences dans les écoles maternelles et élémentaires en France ;
- rechercher les déterminants de ces niveaux à partir des caractéristiques des bâtiments scolaires, de leur environnement et des émetteurs de radiofréquences situés autour des écoles.

2 Méthode de collecte et d'exploitation des données

2.1 Constitution de l'échantillon

2.1.1 Recrutement des établissements scolaires

Le recrutement des écoles a été réalisé par Sepia Santé entre mai 2014 et juin 2017. Les 308 établissements scolaires ayant participé à la campagne de mesure de la qualité de l'air intérieur dans les écoles de l'OQAI (CNE) ont été sollicités pour participer à la campagne de mesure des radiofréquences. Ces établissements avaient été tirés au sort selon un plan de sondage permettant l'extrapolation des mesures réalisées à l'ensemble des écoles de France métropolitaine. Afin d'accélérer le recrutement et de compléter l'échantillon, des écoles volontaires ont aussi été incluses. **Au total, 298 écoles ont accepté de participer à la campagne de mesure** des radiofréquences : 199 écoles de la CNE (65 %) et 99 établissements volontaires.

2.1.2 Extrapolation des résultats bruts au parc national des écoles

Le mode de recrutement des écoles par tirage aléatoire stratifié dans la base nationale des établissements scolaires permet d'attribuer à chaque école un poids de sondage, autrement dit un nombre d'écoles considéré représentatif au regard de certaines caractéristiques comme le niveau scolaire et la densité urbaine, du parc des écoles en France métropolitaine. Ce mode de recrutement permet d'exprimer les résultats bruts (mesurés dans l'échantillon) à l'échelle du parc des écoles. L'inclusion d'écoles volontaires dans l'échantillon a néanmoins introduit un biais de volontariat, qu'il convient d'étudier. Pour évaluer ce biais, les caractéristiques des écoles volontaires ont été comparées à celles des écoles initialement recrutées dans le cadre de la CNE. Les analyses statistiques montrent que le volontariat est corrélé au type d'environnement des écoles : les écoles situées en milieu urbain se portent davantage volontaires aux mesures de radiofréquences que les écoles en milieu rural. Ce biais a été réduit par une correction des poids de sondage appliquée pour le redressement de l'échantillon par le type d'environnement. La méthode suivie pour le calcul des poids de sondage et le redressement est présentée en Annexe 1.

2.2 Réalisation des mesures de radiofréquences

Les mesures de radiofréquences ont été réalisées dans 298 écoles par les laboratoires Aexpertise et Exem, entre septembre 2014 et novembre 2017 selon les versions 3.0 puis 3.1 du protocole de mesure de l'ANFR (ANFR, DR15).

Le protocole de mesure comprend trois étapes. Dans un premier temps, le niveau d'exposition global est mesuré à différents emplacements de l'école à l'aide d'une sonde large bande d'une sensibilité de 0,38 V/m. Ce relevé dit intermédiaire est effectué à une hauteur de 150 cm et permet de déterminer le point de niveau de champ électrique maximum. Dans un deuxième temps, le niveau d'exposition global est mesuré à trois hauteurs différentes à l'emplacement du niveau maximum relevé, ou éventuellement à un emplacement pertinent demandé par l'école. Une moyenne spatiale des trois mesures est calculée (cas A). Enfin, une mesure détaillée des niveaux de champ électrique par type d'émetteur et bande de fréquences est réalisée à l'aide d'un analyseur de spectre à l'emplacement défini précédemment (cas B).

L'analyseur de spectre utilisé par le laboratoire Aexpertise détecte les niveaux de radiofréquences supérieurs à 0,01 V/m et l'appareil utilisé par le laboratoire Exem détecte les niveaux supérieurs à 0,05 V/m.

Le protocole de mesure couvre l'ensemble des émissions radioélectriques de 100 kHz à 300 GHz. Les principaux services pris en compte sont la téléphonie mobile (TM « downlink » : émission des antennes vers les terminaux mobiles) dans les différentes bandes de fréquences, la radiodiffusion FM, la radio numérique terrestre (RNT), la télévision (TV), les réseaux radio professionnels (PMR), les services HF (ondes courtes, moyennes et longues), les radars, le Wifi et la téléphonie sans fil (DECT).

2.3 Base de données fournie par l'Agence nationale des fréquences (ANFR)

Les données de mesure ont été collectées et mises à disposition par l'ANFR. Elles sont présentées dans le Tableau 1.

Tableau 1. Liste des données fournies par l'ANFR

Variables
Date de mesure
Nom du laboratoire qui a réalisé les mesures
Lieu de mesure : intérieur ou extérieur
Adresse du lieu de mesure
Commune du lieu de mesure
Longitude du lieu de mesure
Latitude du lieu de mesure
Environnement du lieu de mesure
Type de résultat : cas A ou cas B
Nombre d'installations visibles
Distance de l'installation la plus proche
Hauteur de l'installation la plus proche
Type de l'installation la plus proche
Distance de l'installation la plus loin
Hauteur de l'installation la plus loin
Type de l'installation la plus loin
Valeur globale de radiofréquence (V/M)
DECT (V/M) : téléphonie fixe sans fil
FM RNT (V/M) : radiodiffusion
HF (V/M)
PMR (V/M) : réseaux radio professionnels
PMR BALISES (V/M)
RADAR BALISES (V/M)
RADAR BLR (V/M)
TM 700 (V/M) : téléphonie mobile 700Mhz
TM 800 (V/M) : téléphonie mobile 800Mhz
TM 900 (V/M) : téléphonie mobile 900Mhz
TM 1800 (V/M) : téléphonie mobile 1800Mhz
TM 2100 (V/M) : téléphonie mobile 2100Mhz
TM 2600 (V/M) : téléphonie mobile 2600Mhz
TV (V/M)
WIFI (V/M)

2.4 Vérification de la conformité aux valeurs limites réglementaires

La campagne vise également à contrôler la conformité des expositions des écoles aux valeurs limites réglementaires. Ces valeurs limites sont fixées par le décret n° 2002-775 du 3 mai 2002, qui reprend la recommandation européenne 1999/519/CE du Conseil du 12 juillet 1999. Elles sont comprises entre 28 V/m et 87 V/m selon les fréquences (Figure 1).

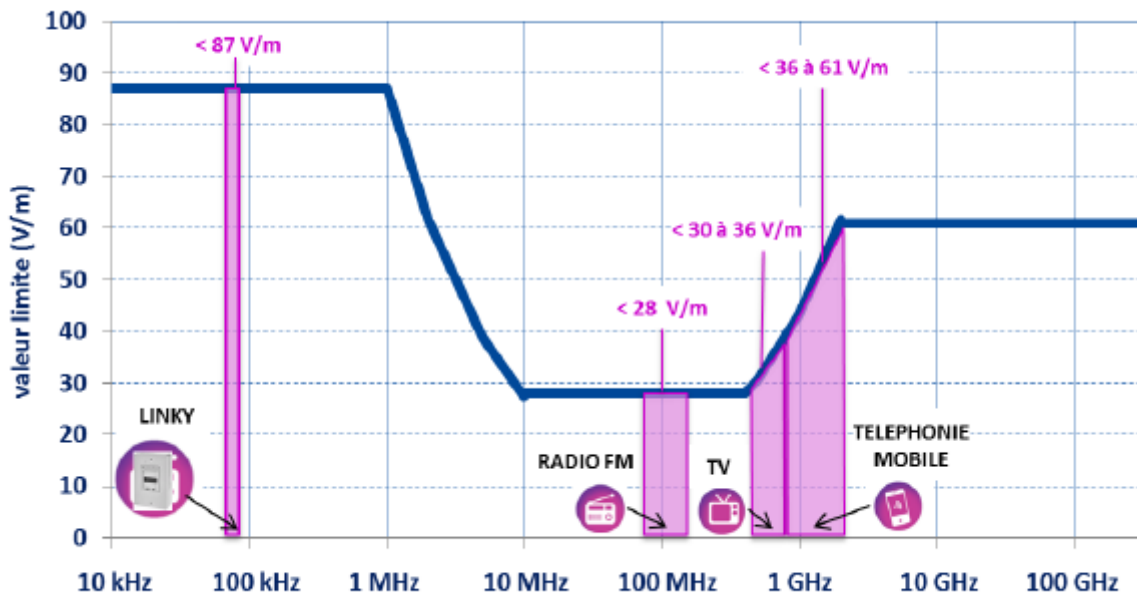


Figure 1. Valeurs limites réglementaires fixées en France par le décret du 3 mai 2002 n° 2002-775

2.5 Méthodes statistiques utilisées

Dans un premier temps, des statistiques descriptives ont été réalisées : minimum, moyenne, médiane, maximum, etc. Puis, une recherche des facteurs influençant les niveaux de radiofréquences en fonction des caractéristiques de l'environnement, du bâtiment où la mesure a été réalisée et des émetteurs de radiofréquences à proximité du point de mesure a été réalisée. Des informations détaillées relatives aux méthodes statistiques déployées sont fournies en Annexe 2 et Annexe 3.

3 Niveaux de radiofréquences dans les écoles en France

Les niveaux de radiofréquences globaux et détaillés par source ont été mesurés dans les 298 écoles participant à la campagne. Ces écoles sont réparties sur l'ensemble du territoire métropolitain français comme illustré sur la Figure 2.

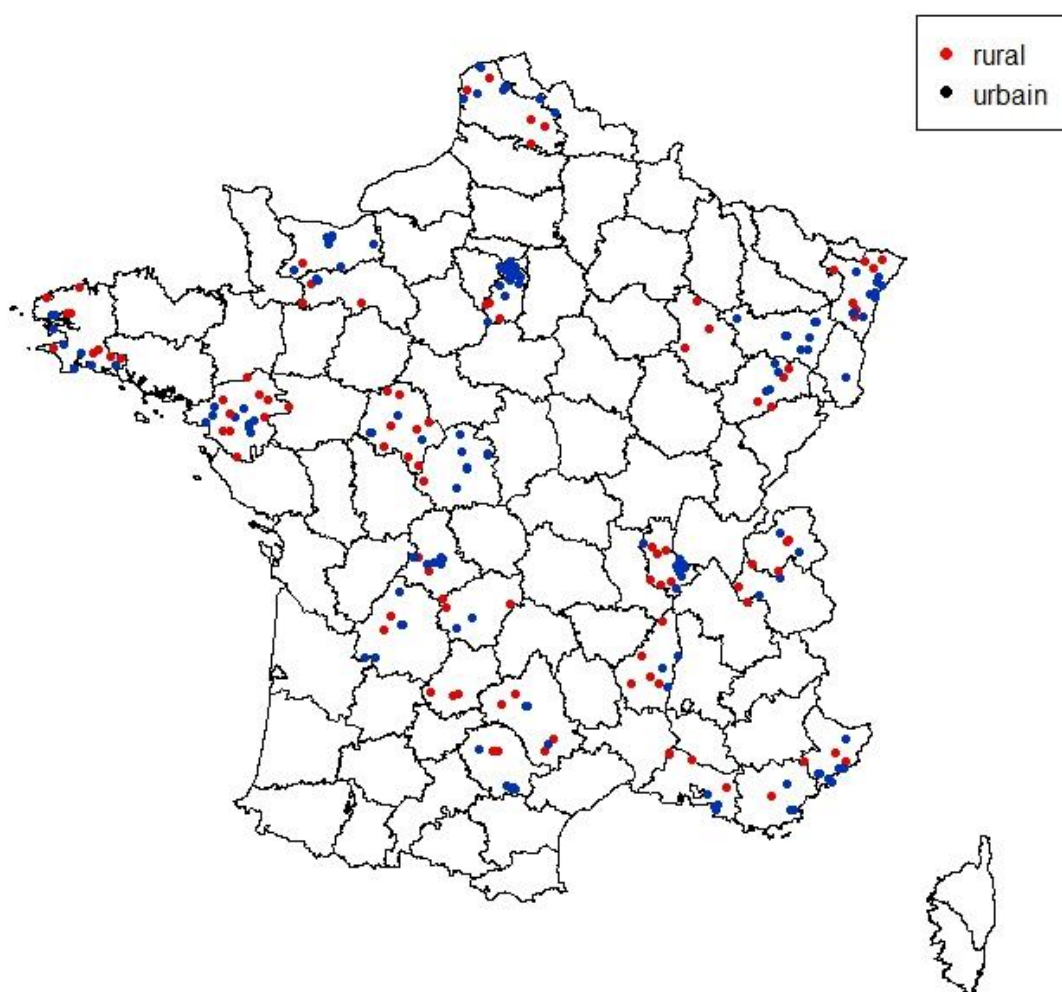


Figure 2. Répartition géographique des 298 écoles ayant participé à la campagne de mesure des radiofréquences selon leur type d'environnement (rural/urbain)

Les mesures ont été réalisées à l'intérieur pour 225 écoles et à l'extérieur, généralement dans la cour, pour 73 écoles. Les analyses statistiques montrent que les mesures intérieures et extérieures sont statistiquement significativement différentes, les niveaux extérieurs étant plus élevés que les niveaux intérieurs. Les mesures intérieures et extérieures ont donc été analysées séparément.

3.1 Niveaux de radiofréquences à l'intérieur des bâtiments scolaires

L'échantillon des mesures intérieures de radiofréquences a été redressé à l'échelle nationale à l'aide de techniques statistiques détaillées en Annexe 1. Les statistiques descriptives sont ainsi présentées pour le parc national des écoles en France métropolitaine (n=67299) (Tableau 2). L'analyse réalisée sur l'échantillon non redressé (n=225) est disponible en Annexe 4.

Le niveau moyen de radiofréquences dans le parc national des écoles est de 0,23 V/m. Le niveau médian de radiofréquences est de 0,16 V/m. Le niveau maximal mesuré est de 0,98 V/m : ce niveau est bien inférieur au niveau d'atypicité de l'ANFR de 6 V/m (Annexe 7) et au niveau limite réglementaire de 28 V/m.

La médiane des niveaux de radiofréquences dans les écoles est inférieure à la valeur de 0,38 V/m, médiane des 2 993 mesures de la campagne de l'ANFR réalisée dans les locaux d'habitation et lieux accessibles au public en 2016 dans le cadre du dispositif de surveillance (ANFR, 2017). Ce résultat n'est pas vérifié statistiquement puisque les mesures d'exposition du public réalisées par l'ANFR ne sont pas représentatives du territoire.

Tableau 2. Distribution des niveaux intérieurs de radiofréquences dans le parc des écoles en France métropolitaine (n=67299)

Variables	Effectif	Moyenne +/- ET	Min	P25	Médiane	P75	Max
Niveau global de radiofréquences (V/m)	67 299	0,23 +/- 0,17	0,06	0,12	0,16	0,25	0,98
Niveau de radiofréquences des TM 700 (V/m)	172	0,17 +/- 0	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
Niveau de radiofréquences des TM 800 (V/m)	9 895	0,17 +/- 0,12	< seuil de détection	0,06	0,16	0,21	0,44
Niveau de radiofréquences des TM 900 (V/m)	17 181	0,19 +/- 0,15	< seuil de détection	0,08	0,17	0,24	0,67
Niveau de radiofréquences des TM 1800 (V/m)	12 594	0,14 +/- 0,11	< seuil de détection	< seuil de détection	0,11	0,22	0,51
Niveau de radiofréquences des TM 2100 (V/m)	13 853	0,15 +/- 0,08	< seuil de détection	0,08	0,14	0,21	0,45
Niveau de radiofréquences des TM 2600 (V/m)	2 547	0,14 +/- 0,06	0,05	0,10	0,15	0,18	0,24
Niveau de radiofréquences des FM RNT (V/m)	8 867	0,09 +/- 0,08	< seuil de détection	< seuil de détection	0,08	0,11	0,41
Niveau de radiofréquences des TV (V/m)	1 670	0,08 +/- 0,05	< seuil de détection	0,05	0,05	0,14	0,14
Niveau de radiofréquences des DECT (V/m)	5 760	0,17 +/- 0,19	< seuil de détection	0,07	0,11	0,18	0,77
Niveau de radiofréquences des HF (V/m)	16 572	0,1 +/- 0,05	< seuil de détection	0,07	0,08	0,10	0,25
Niveau de radiofréquences des PMR (V/m)	1 629	< seuil de détection	< seuil de détection	< seuil de détection	< seuil de détection	< seuil de détection	< seuil de détection
Niveau de radiofréquences des PMR BALISES (V/m)	1 423	0,08 +/- 0	0,07	0,08	0,08	0,08	0,08
Niveau de radiofréquences des RADAR BALISES (V/m)	-	-	-	-	-	-	-
Niveau de radiofréquences des RADAR BLR (V/m)	7 793	0,11 +/- 0,09	< seuil de détection	0,05	0,06	0,22	0,32
Niveau de radiofréquences du Wifi (V/m)	20 004	0,11 +/- 0	< seuil de détection	0,05	0,07	0,12	0,72

Note : seuil de sensibilité typique des sondes large bande = 0,38 V/m ; seuil maximal de détection des analyseurs de spectre utilisés = 0,05 V/m. P25 = 25^{ème} percentile ; P75 = 75^{ème} percentile.

Les niveaux de radiofréquences les plus élevés proviennent de la téléphonie sans fil (DECT) et de la téléphonie mobile (TM). Parmi les différentes bandes de fréquences de la téléphonie mobile, la bande 900 MHz (TM 900), correspondant aux technologies 2G, 3G et 4G, est la plus détectée (dans 17181 écoles sur 67299, soit 26 % des écoles) comme déjà observé par l'ANFR dans sa campagne de mesure de 2016 (ANFR, 2017).

L'analyse détaillée des contributeurs principaux des niveaux de radiofréquences est présentée sur la Figure 3. Dans 40 % des cas, aucune source de radiofréquences significative n'a été détectée (niveaux inférieurs au seuil de détection de l'appareil de mesure). Cette tendance est plus marquée en milieu rural (50 %) qu'en urbain (32 %). La téléphonie mobile est le contributeur principal de l'exposition détectée en milieu urbain (38 %) tandis que le Wifi et les services « HF » sont les contributeurs principaux des radiofréquences détectées en milieu rural (respectivement 22 % et 18 %).

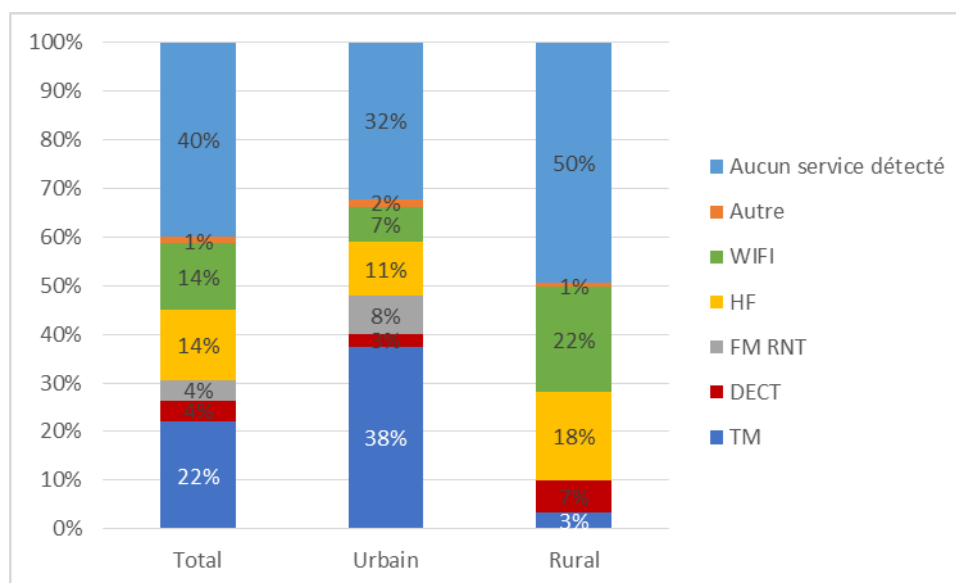


Figure 3. Synthèse des contributeurs principaux des niveaux intérieurs de radiofréquences selon la typologie de l'environnement (n=67299)

Note : TM = téléphonie mobile ; DECT = téléphonie sans fil ; FM RNT = radiodiffusion en modulation de fréquences et radio numérique terrestre ; HF = services hautes fréquences (ondes courtes, moyennes et longues) ; Autre = TV, réseaux radio professionnels (PMR) et radars.

3.2 Niveaux de radiofréquences à l'extérieur des bâtiments scolaires

Les techniques statistiques de redressement n'ont pas été appliquées à l'échantillon des mesures extérieures en raison de l'effectif insuffisant pour garantir une représentativité de l'échantillon à l'échelle nationale (Annexe 1).

Le niveau moyen de radiofréquences mesuré à l'extérieur des bâtiments scolaires est de 0,40 V/m (Tableau 3). Le niveau médian de radiofréquences est de 0,27 V/m. Le niveau maximal mesuré est de 3 V/m : ce niveau est inférieur au niveau d'atypicité de l'ANFR de 6 V/m (Annexe 7) et au niveau limite réglementaire de 28 V/m. Les niveaux de radiofréquences les plus élevés proviennent de la téléphonie mobile (TM). La téléphonie mobile et les émetteurs de hautes fréquences sont les principales sources de radiofréquences mesurées à l'extérieur. Parmi les différentes bandes de fréquences de la téléphonie mobile, la bande 900 MHz (TM 900) est la plus détectée (dans 39 écoles sur 73, soit 53 % des écoles) et est à l'origine des niveaux de radiofréquences les plus élevés (niveau moyen de 0,27 V/m).

Tableau 3. Distribution des niveaux de radiofréquences à l'extérieur des bâtiments scolaires, échantillon non redressé (n=73)

Variables	Effectif	Moyenne +/- ET	Min	P25	Médiane	P75	Max
Niveau global de radiofréquences (V/m)	73	0,4 +/- 0,41	< seuil de détection	0,16	0,27	0,55	3,00
Niveau de radiofréquences des TM 700 (V/m)	-	-	-	-	-	-	-
Niveau de radiofréquences des TM 800 (V/m)	25	0,21 +/- 0,16	< seuil de détection	0,08	0,17	0,31	0,69
Niveau de radiofréquences des TM 900 (V/m)	39	0,27 +/- 0,26	< seuil de détection	0,11	0,21	0,30	1,48
Niveau de radiofréquences des TM 1800 (V/m)	28	0,21 +/- 0,23	0,05	0,09	0,13	0,26	1,21
Niveau de radiofréquences des TM 2100 (V/m)	33	0,22 +/- 0,26	< seuil de détection	0,08	0,14	0,27	1,42
Niveau de radiofréquences des TM 2600 (V/m)	10	0,17 +/- 0,17	0,05	0,06	0,09	0,20	0,56
Niveau de radiofréquences des FM RNT (V/m)	17	0,16 +/- 0,17	< seuil de détection	0,05	0,10	0,13	0,59
Niveau de radiofréquences des TV (V/m)	3	0,07 +/- 0,03	< seuil de détection	< seuil de détection	0,07	0,09	0,09
Niveau de radiofréquences des DECT (V/m)	1	< seuil de détection	< seuil de détection	< seuil de détection	< seuil de détection	< seuil de détection	< seuil de détection
Niveau de radiofréquences des HF (V/m)	21	0,13 +/- 0,07	0,06	0,09	0,11	0,14	0,38
Niveau de radiofréquences des PMR (V/m)	1	0,12 +/- 0	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
Niveau de radiofréquences des PMR BALISES (V/m)	2	0,11 +/- 0,01	0,10	0,10	0,11	0,12	0,12
Niveau de radiofréquences des RADAR BALISES (V/m)	-	-	-	-	-	-	-
Niveau de radiofréquences des RADAR BLR (V/m)	12	0,1 +/- 0,09	< seuil de détection	0,05	0,05	0,13	0,33
Niveau de radiofréquences du Wifi (V/m)	9	< seuil de détection	< seuil de détection	< seuil de détection	< seuil de détection	< seuil de détection	0,06

Note : seuil de sensibilité typique des sondes large bande = 0,38 V/m ; seuil maximal de détection des analyseurs de spectre utilisés = 0,05 V/m.

P25 = 25^{ème} percentile ; P75 = 75^{ème} percentile.

L'analyse détaillée des contributeurs principaux des niveaux extérieurs de radiofréquences est présentée sur la Figure 4. Dans 29 % des cas, aucune source significative de radiofréquences n'a été détectée (niveaux inférieurs au seuil de détection de l'appareil de mesure). Cette tendance est plus marquée en milieu rural (40 %) qu'en milieu urbain (23 %). La téléphonie mobile est le contributeur principal de l'exposition détectée en milieu urbain (60 %) tandis que les services « HF » sont les contributeurs principaux des radiofréquences détectées en milieu rural (32 %). En environnement extérieur, le Wifi ne contribue que marginalement aux niveaux de radiofréquences contrairement à ce qui a été observé en environnement intérieur.

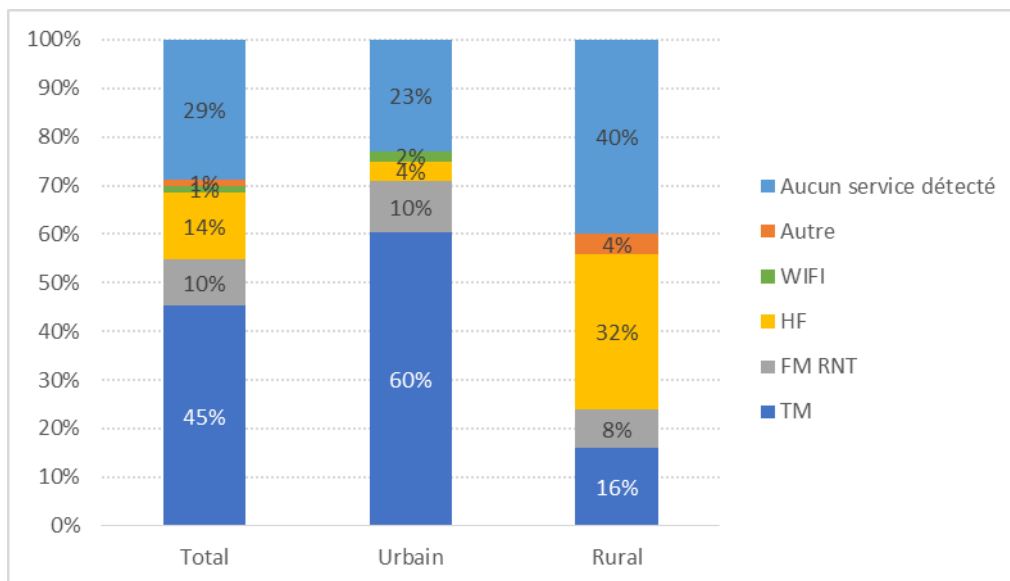


Figure 4. Synthèse des contributeurs principaux des niveaux extérieurs de radiofréquences selon la typologie de l'environnement (n=73)

Note : TM = téléphonie mobile ; FM RNT = radiodiffusion en modulation de fréquence et radio numérique terrestre ; HF = services hautes fréquences (ondes courtes, moyennes et longues) ; Autre = téléphonie sans fil (DECT), TV, réseaux radio professionnels (PMR) et radars.

4 Déterminants des niveaux de radiofréquences dans les écoles

La recherche des facteurs d'influence ou déterminants des niveaux de radiofréquences a été réalisée sur l'échantillon des mesures intérieures. Les résultats obtenus sur l'échantillon redressé (n=67299 écoles) sont présentés ci-dessous et les résultats obtenus sur l'échantillon non-redressé (n=225 écoles) sont disponibles en Annexe 5. L'échantillon des mesures extérieures n'a pas été exploité pour cette étude car sa petite taille (n=73 écoles) ne permet pas de garantir la significativité et la robustesse des analyses.

4.1 Identification des potentiels facteurs explicatifs

Les potentiels facteurs explicatifs du niveau de radiofréquences ont été présélectionnés à dire d'expert sur la base des données disponibles. Ces facteurs sont les suivants :

- caractéristiques de l'environnement :
 - zone climatique au sens de la réglementation thermique 2012. Cette variable est utilisée ici pour étudier l'influence de la zone géographique (Annexe 6) ;
 - type d'environnement (urbain/rural).

- caractéristiques du bâtiment :
 - type d'établissement (école maternelle/élémentaire) ;
 - période de construction ;
 - type de matériaux de construction des murs ;
 - type de vitrage.

- caractéristiques des émetteurs de radiofréquences (=supports radioélectriques) :
 - distance à l'émetteur de radiofréquences le plus proche ;
 - hauteur de l'émetteur de radiofréquences le plus proche ;
 - nombre d'émetteurs dans un rayon de 5 km autour de l'école ;
 - technologie de l'émetteur le plus proche ;
 - orientation horizontale de l'émetteur (azimut) ;
 - service détecté (téléphonie mobile, radiodiffusion, TV, etc.) ;
 - présence d'émetteurs visibles depuis le point de mesure (oui/non) ;
 - type de l'émetteur visible le plus proche ;
 - type de l'émetteur visible le plus éloigné.

Les niveaux médians de radiofréquences en fonction de chaque variable explicative sont présentés dans le Tableau 4.

Tableau 4. Niveaux médians de radiofréquences selon les variables explicatives, dans le parc national des écoles en France métropolitaine (n=67299) (cas A du protocole de mesure de l'ANFR (ANFR, DR15))

Variables explicatives	Modalités	Nb d'écoles	% d'écoles	Niveaux médians de radiofréquences (V/m)
Zone climatique (Annexe 6)	H1a_hidf	11 418	17,0%	0,15
	H1a_idf	7 732	11,5%	0,28
	H1b	8 776	13,0%	0,20
	H1c	11 514	17,1%	0,12
	H2a	4 717	7,0%	0,14
	H2b	8 565	12,7%	0,14
	H2c	7 241	10,8%	0,15
	H2d	2 085	3,1%	0,35
Type d'environnement	H3	5 251	7,8%	0,25
	Rural	30 501	45,3%	0,15
Type d'établissement	Urbain	36 798	54,7%	0,18
	Ecole élémentaire	35 390	52,6%	0,16
Période de construction du bâtiment	Ecole maternelle	31 909	47,4%	0,16
	Après 1949	4 948	7,4%	0,17
	Avant 1949	11 129	16,5%	0,17
Matériau de construction du bâtiment	Non renseigné	51 222	76,1%	0,16
	Béton / Parpaing	23 025	34,2%	0,16
	Pierre	14 538	21,6%	0,16
Type de vitrage du bâtiment	Autre ou non renseigné	29 735	44,2%	0,16
	Simple	7 455	11,1%	0,19
	Double	37 158	55,2%	0,16
Technologie	Non renseigné	22 686	33,7%	0,16
	2-3G	10 418	15,5%	0,20
	4G	41 862	62,2%	0,16
Détection de radiofréquences provenant de la téléphonie mobile	Non renseigné	15 019	22,3%	0,15
	Non	46 764	69,5%	0,15
Détection de radiofréquences provenant de la radio et TV	Oui	20 535	30,5%	0,28
	Non	57 690	85,7%	0,16
Détection de radiofréquences provenant d'un autre service	Oui	9 609	14,3%	0,24
	Non	37 274	55,4%	0,15
Présence d'émetteurs* visibles depuis le point de mesure	Oui	30 025	44,6%	0,20
	Non	54 461	80,9%	0,15
Type de l'émetteur* visible le plus proche	Oui	12 838	19,1%	0,38
	Autre	1 510	2,2%	0,20
	Radio ou TV	303	0,5%	0,57
	Téléphonie mobile	11 024	16,4%	0,38
Type de l'émetteur* visible le plus éloigné	Installation non visible	54 461	80,9%	0,15
	Autre	1 343	2,0%	0,20
	Radio ou TV	303	0,5%	0,57
	Téléphonie mobile	11 191	16,6%	0,38
	Installation non visible	54 461	80,9%	0,15

Variables explicatives	Modalités	Nb d'écoles	% d'écoles	Niveaux médians de radiofréquences (V/m)
Distance à l'émetteur* le plus proche (m)	<= 500 m	31 815	47,3%	0,23
	> 500 m	35 484	52,7%	0,14
Hauteur de l'émetteur* le plus proche (m)	<= 30 m	38 488	57,2%	0,17
	> 30 m	28 811	42,8%	0,16
Angle entre l'école et l'orientation horizontale de l'émetteur* (azimut en degrés)	< 20°	36 496	54,2%	0,16
	>= 20°	30 803	45,8%	0,17
Nb émetteurs* à moins de 100 m	0	62 278	92,5%	0,16
	Entre 1 et 3	5 021	7,5%	0,45
Nb émetteurs* à moins de 200 m	0	53 728	79,8%	0,15
	Entre 1 et 4	13 308	19,8%	0,26
	>= 5	263	0,4%	0,27
Nb émetteurs* à moins de 500 m	0	35 484	52,7%	0,14
	Entre 1 et 4	21 785	32,4%	0,20
	Entre 5 et 9	5 695	8,5%	0,43
	>= 10	4 335	6,4%	0,24
Nb émetteurs* à moins de 1 km	0	22 134	32,9%	0,13
	Entre 1 et 4	24 617	36,6%	0,16
	Entre 5 et 9	6 534	9,7%	0,16
	>= 10	14 014	20,8%	0,28
Nb émetteurs* à moins de 2 km	0	10 220	15,2%	0,16
	Entre 1 et 4	27 008	40,1%	0,15
	Entre 5 et 9	5 136	7,6%	0,15
	>= 10	24 935	37,1%	0,23
Nb émetteurs* à moins de 3 km	0	3 586	5,3%	0,21
	Entre 1 et 4	28 429	42,2%	0,15
	Entre 5 et 9	7 374	11,0%	0,16
	>= 10	27 910	41,5%	0,22
Nb émetteurs* à moins de 5 km	0	250	0,4%	0,17
	Entre 1 et 4	15 058	22,4%	0,15
	Entre 5 et 9	12 833	19,1%	0,16
	>= 10	39 159	58,2%	0,19

Note : Idf = Ile-de-France ; Nb = nombre

** Emetteur correspond au support radioélectrique.*

Parmi ces variables, certaines ne sont pas exploitables à cause de valeurs manquantes et/ou d'une mauvaise répartition des effectifs. Une sélection de variables a été réalisée sur la base de ces critères et est disponible en Annexe 3.

4.2 Analyse des corrélations

Les liens statistiques entre les niveaux de radiofréquences et les variables explicatives ont été explorés par le biais d'analyses de corrélations. Les méthodes appliquées sont présentées en Annexe 2.

Les résultats montrent que les niveaux de radiofréquences sont significativement corrélés à :

- la distance à l'émetteur le plus proche ;
- le nombre d'émetteurs sur un rayon de 5 km autour de l'école ;
- les services à l'origine des radiofréquences ;
- la présence d'émetteurs visibles depuis le point de mesure ;
- le type d'environnement ;
- le type de vitrage.

La nature et la force de leurs liens statistiques sont détaillées dans le Tableau 5.

Tableau 5. Synthèse des corrélations entre le niveau de radiofréquences et ses facteurs explicatifs

Facteur explicatif	Nature de la corrélation	Force du lien statistique
Distance à l'émetteur* de radiofréquences le plus proche	Plus l'émetteur* est proche de l'école et plus le niveau de radiofréquences est élevé.	Très forte corrélation
Nombre d'émetteurs* sur un rayon de 5 km autour de l'école	Plus le nombre d'émetteurs* proches de l'école est important et plus le niveau de radiofréquences est élevé.	Très forte corrélation
Service détecté (téléphonie mobile, radiodiffusion, etc.)	La téléphonie mobile est le principal contributeur des niveaux de radiofréquences.	Très forte corrélation
Présence d'émetteurs* visibles depuis le point de mesure	Les niveaux de radiofréquences mesurés sont significativement plus élevés lorsqu'il existe des émetteurs* visibles depuis le point de mesure.	Très forte corrélation
Type d'environnement	Les niveaux de radiofréquences sont plus élevés en milieu urbain.	Forte corrélation
Type de vitrage	Les niveaux de radiofréquences sont plus faibles dans les salles de classes disposant de double vitrage.	Corrélation modérée

* Emetteur correspond au support radioélectrique.

Il est à noter que le nombre d'émetteurs à proximité des écoles est significativement plus élevé en milieu urbain (Tableau 6). Ces deux variables sont fortement corrélées.

Tableau 6. Nombre moyen pondéré d'émetteurs selon leur distance aux écoles et le type d'environnement (n=67299)

Environnement	Nb écoles	Inf. 100 m	De 100 à 200 m	De 200 à 500 m	De 500 m à 1 km	De 1 à 2 km	De 2 à 3 km	De 3 à 5 km
Urbain	36 798	0	0	3	11	39	55	126
Rural	30 501	0	0	0	0	1	1	5
Total	67 299	0	0	2	6	22	31	71

Note : Nb = nombre.

Aide à la lecture du Tableau 6 : le Tableau 4 indique que pour 92,5 % des écoles, aucun émetteur de radiofréquences n'est situé à moins de 100 m de l'école et que pour 7,5 % des écoles, 1 à 3 émetteurs sont situés à moins de 100 m de l'école. Ainsi, le nombre pondéré d'émetteurs situés à moins de 100 m des écoles est en moyenne de 0.

4.3 Modèle explicatif du niveau de radiofréquences

Les variables très fortement corrélées aux niveaux de radiofréquences ont été retenues dans le modèle explicatif du niveau de radiofréquences, obtenu par régression linéaire multivariée. Ce modèle est présenté dans le Tableau 7.

Tableau 7. Modèle de régression linéaire multivariée du niveau intérieur de radiofréquences (échantillon redressé) (n=67299)

Variable	Coefficient estimé	Ecart-type	p-value
Constante	0,15	0,01	<,0001
Emetteurs* visibles depuis le point de mesure	0,20	0,02	<,0001
Détection de radiofréquences provenant de la téléphonie mobile	0,09	0,02	<,0001
Nb émetteurs à moins de 500 m	0,01	0,00	<,0001

* Emetteur correspond au support radioélectrique.

Le coefficient de détermination R^2 ajusté du modèle, qui en définit sa performance, est de 0,49. Ce paramètre, compris entre 0 et 1, mesure l'adéquation du modèle avec les données qui ont permis de l'établir. Dans le contexte des évaluations des déterminants environnementaux des expositions humaines, un R^2 ajusté égal à 0,49 est considéré comme indicateur d'un modèle assez satisfaisant.

La présence d'émetteurs visibles depuis le point de mesure est un bon indicateur du niveau élevé de radiofréquences. La détection de radiofréquences provenant de la téléphonie mobile présage également des niveaux de radiofréquences plus élevés. Enfin, plus le nombre d'émetteurs de radiofréquences à moins de 500 mètres est élevé, plus le niveau de radiofréquences sera élevé dans l'établissement.

Toutefois, ces résultats sont à considérer avec précaution en raison du nombre limité de variables explicatives testées. De plus, certaines variables jugées pertinentes à dire d'expert n'ont pas été retenues car les données étaient incomplètes. Par exemple, concernant l'orientation de l'émetteur, seul son azimut (orientation horizontale) est disponible tandis que son inclinaison (orientation verticale ou tilt global en degrés) est une donnée manquante. Ainsi, cette variable d'influence potentiellement majeure n'a pas pu être introduite dans le modèle (Annexe 3).

5 Conclusion

5.1 Niveaux de radiofréquences

Les niveaux de radiofréquences dans les écoles maternelles et écoles élémentaires en France métropolitaine sont faibles et en-deçà des valeurs limites réglementaires.

Les niveaux extérieurs sont significativement plus élevés que les niveaux intérieurs : leurs valeurs moyennes sont respectivement de 0,40 et 0,23 V/m. Les niveaux extérieurs restent néanmoins en-deçà des valeurs limites réglementaires. Les niveaux moyens extérieurs et intérieurs représentent respectivement 1,4 et 0,8 % de la valeur limite d'exposition (28 V/m).

Les niveaux de radiofréquences sont similaires entre les écoles maternelles et élémentaires.

5.2 Analyse des radiofréquences par service

L'analyse détaillée des principaux contributeurs montrent qu'en milieu rural, aucun service n'est détecté à l'intérieur et l'extérieur de la moitié des écoles environ (respectivement 50 et 40 %). Lorsqu'un service est détecté à l'intérieur, il s'agit principalement du Wifi et des services « HF ». Les services détectés à l'extérieur sont principalement les services « HF » et la téléphonie mobile.

En revanche, en milieu urbain, aucun service n'est détecté à l'intérieur dans environ un tiers des bâtiments scolaires et dans moins d'un quart dans la cour. Le principal contributeur des niveaux intérieurs et extérieurs constitue la téléphonie mobile.

5.3 Déterminants des niveaux de radiofréquences

Il ressort de la recherche des déterminants que les niveaux intérieurs élevés de radiofréquences sont corrélés à la présence et au nombre d'émetteurs dans un rayon de 500 mètres autour de l'école. Il aurait été intéressant de pouvoir compléter ces variables avec l'information sur l'orientation des émetteurs mais celle-ci étant incomplète, elle n'a pas pu être intégrée aux analyses.

Le type de vitrage du bâtiment, simple ou double, influe également sur les niveaux intérieurs ; les niveaux sont plus faibles dans les bâtiments présentant un double vitrage. Cependant, cette variable présentant de nombreuses valeurs manquantes n'a pas été retenue dans le modèle explicatif des niveaux intérieurs de radiofréquences dans les écoles.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient monsieur Dragan JOVANOVIC (ANFR) pour son appui à la fourniture et à l'exploitation des données.

6 Références

ANFR (Agence nationale des fréquences). Document ANFR/ DR-15-3. Protocole de mesure visant à vérifier pour les stations émettrices fixes, le respect des limitations, en termes de niveaux de référence, de l'exposition du public aux champs électromagnétiques prévues par le décret n° 2002-775 du 3 mai 2002. Mai 2011. Version 3.0. 19 p.

ANFR (Agence nationale des fréquences). Document ANFR/ DR-15-3.1. Protocole de mesure visant à vérifier sur site pour les stations émettrices fixes, le respect des limitations, en termes de niveaux de référence, de l'exposition du public aux champs électromagnétiques prévues par le décret n° 2002-775 du 3 mai 2002. Juillet 2015. Version 3.1. 16 p.

ANFR (Agence nationale des fréquences). 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. Octobre 2017. 16 p.

ANFR (Agence nationale des fréquences). Recensement des points atypiques. Décembre 2017. 12 p.

ANFR (Agence nationale des fréquences). Etude de l'exposition du public aux ondes radioélectriques. Analyse des résultats de mesures d'exposition du public aux ondes électromagnétiques réalisées en 2017 sur plus de 1 000 places de mairies. Avril 2018. 13 p.

Anses (Agence nationale de sécurité sanitaire). Radiofréquences et santé des enfants. Avis et rapport d'expertise collective. Maisons-Alfort, 2016, 274 p.

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

Sagar S, Dongus S, Schoeni A, Roser K, Eeftens M, Struchen B, Foerster M, Meier N, Adem S and Rösli M. Radiofrequency electromagnetic field exposure in everyday microenvironments in Europe: A systematic literature review. *J Expo Sci Environ Epidemiol*. 2018 ; 28(2): 147-160.

Sumer (Surveillance médicale des expositions aux risques professionnels). Méthodologie de redressement des données de l'enquête Sumer 2010. 2011 ; 33 p. Disponible : <http://dares.travail-emploi.gouv.fr/dares-etudes-et-statistiques/enquetes-de-a-a-z/article/surveillance-medicale-des-expositions-aux-risques-professionnels-sumer-edition>

ANNEXES

Annexe 1. Analyse des biais et redressement de l'échantillon

Le redressement est une technique statistique qui permet d'affecter des poids de sondage aux écoles sélectionnées afin d'obtenir un échantillon représentatif du parc national des écoles en France.

Le redressement a été effectué selon les étapes suivantes : analyse des biais d'échantillonnage puis méthode par calage sur marge.

Deux biais d'échantillonnage ont pu être identifiés :

- un biais de non-réponse puisque plus du tiers des écoles de la CNE n'ont pas participé à la campagne CEM ;
- et un biais de volontariat : des écoles non-recrutées pour la CNE se sont portées volontaires.

Un biais de mesure a également été identifié : le protocole spécifie que les mesures doivent être réalisées à l'intérieur des établissements, or certaines mesures ont été réalisées à l'extérieur.

1. Biais de non-réponse

Seules 65 % des écoles de la CNE ont accepté de participer à la campagne CEM et cela introduit potentiellement un biais de non-réponse.

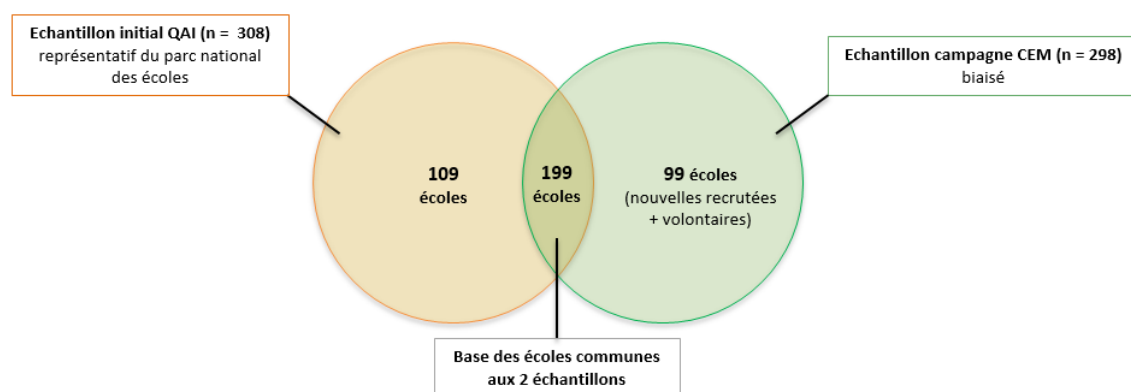


Figure 5. Echantillon des écoles commun à l'échantillon de la CNE et à la campagne CEM

L'analyse du biais de non-réponse a été réalisée sur les 308 écoles recrutées pour la CNE à l'aide de la méthode des groupes de réponse homogènes (GRH) (Enquête Sumer, 2010).

Cette méthode consiste à regrouper les écoles ayant des caractéristiques communes et conduisant à un comportement de réponse similaire. Les probabilités de réponse sont estimées au sein des groupes formés et permettent d'ajuster les poids de sondage, de manière à corriger le biais de non-réponse. En revanche, ce traitement modifie le plan de sondage initial.

La représentativité de l'échantillon à l'échelle du parc national des écoles est de nouveau obtenue grâce à un redressement par calage sur marges (Enquête Sumer, 2010), à l'aide de variables explicatives de la non-réponse et de variables auxiliaires ayant servi à la construction du plan de sondage. Pour ce faire, les distributions de ces variables à l'échelle du parc national des écoles doivent être connues. Or, parmi les variables à disposition, seules les variables suivantes répondent à cette condition :

- la zone climatique (H1a ; H2a, H1b ; H1c ; H2b ; H2c ; H2d ; H3) ;
- le type d'environnement : urbain ou rural ;
- le type d'établissement : école maternelle ou élémentaire.

Pour identifier les variables explicatives de la non-réponse et constituer les GRH, les analyses suivantes sont réalisées :

- une analyse des corrélations entre la non-réponse et les 3 variables citées ci-dessus ;
- une régression logistique pour modéliser la non-réponse en fonction de ces 3 variables.

L'analyse des corrélations est réalisée à l'aide de l'indicateur de corrélation « V de Cramer ». Le « V de Cramer » est une mesure normalisée du Chi-2, qui ne dépend pas du nombre d'observations utilisées dans l'analyse. Il mesure l'intensité de corrélation entre deux variables qualitatives. Sa valeur absolue est comprise entre 0 (liaison nulle) et 1 (liaison parfaite), elle sera interprétée en fonction des seuils indicatifs suivants :

$ V\text{-Cramer} \geq 0,4$	très forte corrélation
$0,2 \leq V\text{-Cramer} < 0,4$	forte corrélation
$0,1 \leq V\text{-Cramer} < 0,2$	faible corrélation
$0,05 \leq V\text{-Cramer} < 0,1$	très faible corrélation
$ V\text{-Cramer} < 0,05$	absence de corrélation

Les résultats montrent que la non-réponse présente une légère corrélation avec la zone climatique. Les deux autres variables ne sont pas corrélées à la non-réponse (Tableau 8).

Tableau 8. Analyse des corrélations entre la non-réponse et les variables auxiliaires

Variables	V-Cramer	Conclusion
Zone climatique	0,17	Faible corrélation entre la non-réponse et la zone climatique
Type d'environnement	0,01	Absence de corrélation entre la non-réponse et le type d'environnement
Type d'établissement	0,05	Absence de corrélation entre la non-réponse et le type d'établissement

Ces résultats sont confirmés par la régression logistique (Tableau 9) : aucune des variables n'est retenue dans le modèle explicatif de la non-réponse. La zone climatique qui a une faible corrélation n'est pas retenue parce qu'elle présente un grand nombre de modalités (8) et des faibles effectifs, ces conditions ne permettant pas de vérifier la significativité des résultats.

Les variables à disposition ne permettent donc pas de définir les groupes homogènes de risque, afin de mesurer et corriger le biais de non-réponse.

En revanche, le modèle de régression logistique montre que la non-réponse est significativement corrélée à la distance à l'émetteur d'ondes électromagnétiques le plus proche : plus les écoles sont proches des émetteurs et meilleur est le taux de réponses positives. Elles sont surreprésentées dans l'échantillon. Toutefois, ce biais ne peut pas être corrigé car la distribution de cette variable est inconnue à l'échelle nationale.

Tableau 9. Corrélation entre la réponse des écoles et la distance à l'émetteur le plus proche

Distance en mètres de l'école par rapport à l'émetteur	Effectif	Moyenne +/- ET	Minimum	Médiane	Maximum	Régression logistique Non répondants vs répondants	
						Coefficient	p-value
Répondants CEM	199	840 +/-951	36	440	5892	-0,00016	0,09
Non répondants CEM	109	1157+/-2007	33	586	15786		

2. Biais de volontariat

Pour compenser le rétrécissement de l'échantillon dû à la non-réponse, 99 nouvelles écoles ont été recrutées et d'autres se sont portées volontaires pour la campagne CEM (33%%) (Tableau 10). Cela introduit potentiellement un biais de volontariat dans l'échantillon.

Tableau 10. Distribution des écoles en fonction du type de recrutement

	Nombre d'écoles	% écoles
Ecoles recrutées pour la CNE	199	67%
Nouveaux recrutements + Volontaires	99	33%
Total écoles CEM	298	100%

Pour mesurer et corriger ce biais, les caractéristiques des écoles initialement recrutées dans la CNE sont comparées à celles des écoles nouvellement recrutées et volontaires. Les variables discriminant ces deux groupes d'écoles seront utilisées pour corriger le biais de volontariat par la méthode de calage sur marges, sous condition que leurs distributions à l'échelle du parc national des écoles soient connues. Or, parmi les variables à disposition, comme précédemment seules les variables suivantes répondent à cette condition : la zone climatique, le type d'environnement et le type d'école.

Pour identifier les variables explicatives du volontariat, les analyses suivantes sont réalisées :

- une analyse des corrélations entre le volontariat et les 3 variables citées ci-dessus ;
- une régression logistique pour modéliser le volontariat en fonction de ces 3 variables.

Les résultats montrent que les trois variables étudiées sont faiblement corrélées au volontariat (Tableau 11).

Tableau 11. Analyse des corrélations entre le volontariat et les variables auxiliaires

Variables	V-Cramer	Conclusion
Zone climatique	0,10	Très faible corrélation entre le volontariat et la zone climatique
Type d'environnement	0,16	Faible corrélation entre le volontariat et le type d'environnement
Type d'établissement	0,10	Très faible corrélation entre le volontariat et le type d'établissement

La régression logistique suggère de ne retenir que le type d'environnement dans le modèle explicatif du volontariat : les écoles en milieu urbaine se portent davantage volontaires que les écoles en milieu rural (Tableau 12). Le redressement de l'échantillon par le type d'environnement permettra de réduire le biais de volontariat.

Tableau 12. Modèle logistique estimant la probabilité de volontariat

Paramètre	Modalité	Degré de liberté	Coefficient estimé	Ecart-type	Chi-2	p-value
Constante		1	-0,47	0,15	10,39	0,00
Type d'environnement	rural	1	-0,77	0,28	7,46	0,01
	urbain	0	0,00	-	-	-

Note : le seuil de significativité = 20%.

3. Biais lié aux conditions de mesure

Comme le montre le Tableau 13, les mesures extérieures de radiofréquences sont significativement plus élevées que les mesures intérieures. Ces 2 types de mesure seront donc étudiés séparément. Pour ce faire, les écoles seront réparties en 2 groupes en fonction du lieu de mesure.

Les mesures extérieures ont été faites dans 73 établissements. La petite taille de cet échantillon ne permet pas un redressement des données à l'échelle nationale. Ainsi, le redressement n'est réalisé que sur l'échantillon des écoles disposant de mesures intérieures.

On note que le niveau médian de radiofréquences à l'extérieur des écoles, égal à 0,27 V/m, est légèrement supérieur au niveau médian de 0,23 V/m observé dans la campagne des 1076 mesures réalisées par l'ANFR sur les places de mairies en 2017 (ANFR, 2018). La proximité des émetteurs est un déterminant des niveaux de radiofréquences. La distance moyenne des écoles à l'émetteur le plus proche est corrélée au type d'environnement (distance plus faible en milieu urbain ; test de Kruskal Wallis, p-value = 0,0049). Or, les écoles en milieu urbain sont surreprésentées dans l'échantillon des mesures extérieures (66 % contre 55 % à l'échelle nationale). Les écoles avec un émetteur à moins de 100 m sont ainsi également légèrement surreprésentées dans cet échantillon (11 % contre 8 % dans l'échantillon redressé des mesures intérieures). Ceci pourrait expliquer la valeur supérieure des niveaux de radiofréquences extérieurs observés pour les bâtiments scolaires en comparaison des places de mairies.

Tableau 13. Tests de comparaison des distributions des niveaux de radiofréquences (V/m) en fonction du lieu de mesure (extérieur/intérieur)

Lieu mesure	Effectif	Test de Fisher <i>p</i>	Test de Student <i>p</i>
Extérieur	73	< 0,0001	0,0007
Intérieur	225		
Total	298		

Note : seuil de détection des appareils : 0,05 V/m ; ET : écart-type ; P : percentile

Le test de Fisher repose sur l'égalité des variances et le test de Student sur l'égalité des moyennes. Le seuil de significativité est égal 20%

4. Poids de sondage et redressement

L'échantillon des écoles disposant de mesures intérieures (n=225) a été redressé à l'aide des trois variables de stratification utilisées pour la construction du plan de sondage de la CNE : la zone climatique, le type d'environnement et le type d'école. Ainsi, la structure de l'échantillon redressé sera comparable à l'échantillon des écoles de la CNE et représentatif du parc national des écoles en termes de zone climatique, de type d'environnement et de type d'établissement. De plus, comme montré précédemment, le redressement de l'échantillon par le type d'environnement permettra de réduire le biais de volontariat. L'échantillon a été redressé par la méthode de calage sur marges par « raking ratio » (Enquête Sumer, 2010).

Tableau 14. Comparaison entre les marges tirées de l'échantillon (avec la pondération initiale) et les marges dans la population (marges du calage)

Variables	Modalité	Marge échantillon	Marge population	Pourcentage (%) échantillon	Pourcentage (%) population
Type d'environnement	rural	27 660	30 501	42,2	45,3
	urbain	37 937	36 798	57,8	54,7
Type d'établissement	élémentaire	34 906	35 390	53,2	52,6
	maternelle	30 690	31 909	46,8	47,4
Zone climatique <i>Note : Idf = Ile-de-France</i>	H1a - hors idf	10 531	11 418	16,1	17,0
	H1a - idf	7 629	7 732	11,6	11,5
	H1b	8 776	8 776	13,4	13,0
	H1c	11 514	11 514	17,6	17,1
	H2a	4 717	4 717	7,2	7,0
	H2b	8 565	8 565	13,1	12,7
	H2c	7 241	7 241	11,0	10,8
	H2d	1 417	2 085	2,2	3,1
	H3	5 206	5 251	7,9	7,8

Tableau 15. Comparaison entre les marges finales dans l'échantillon (avec la pondération finale) et les marges dans la population (marges du calage)

Variable	Modalité	Marge échantillon	Marge population	Pourcentage (%) échantillon	Pourcentage (%) population
Type d'environnement	rural	30 501	30 501	45,3	45,3
	urbain	36 798	36 798	54,7	54,7
Type d'établissement	élémentaire	35 390	35 390	52,6	52,6
	maternelle	31 909	31 909	47,4	47,4
Zone climatique <i>Note : Idf = Ile-de-France</i>	H1a - hors idf	11 418	11 418	17,0	17,0
	H1a - idf	7 732	7 732	11,5	11,5
	H1b	8 776	8 776	13,0	13,0
	H1c	11 514	11 514	17,1	17,1
	H2a	4 717	4 717	7,0	7,0
	H2b	8 565	8 565	12,7	12,7
	H2c	7 241	7 241	10,8	10,8
	H2d	2 085	2 085	3,1	3,1
	H3	5 251	5 251	7,8	7,8

Annexe 2. Méthodes d'analyse statistique pour la recherche des déterminants

Le niveau global de radiofréquences est modélisé par régression linéaire multivariée en fonction des caractéristiques de l'environnement, des caractéristiques du bâtiment où la mesure a été réalisée et des caractéristiques des émetteurs de radiofréquences à proximité du point de mesure.

Le modèle est construit en plusieurs étapes :

Pré-sélection *a priori* des variables explicatives. Les variables avec plus de 15 % de valeurs manquantes et les variables avec une mauvaise répartition des effectifs (modalité avec un effectif < 10 %) ne sont pas prises en compte dans la recherche des déterminants.

Pré-sélection statistique des variables explicatives. Cette étape consiste à tester individuellement la corrélation entre chaque variable explicative et le niveau global de radiofréquences. Pour les variables explicatives quantitatives, un test de corrélation de Spearman a été réalisé. Pour les variables explicatives qualitatives, un test de distribution de Kruskal-Wallis a été réalisé. Si le test de corrélation est significatif relativement au seuil d'erreur de 0,20 alors la variable est introduite dans le modèle sous réserve qu'elle ne génère pas de problème de multicolinéarité.

Sélection de variables « pas-à-pas » (STEPWISE), selon le critère du R^2 ajusté (mesure de l'adéquation du modèle avec les données qui ont permis de l'établir, comprise entre 0 et 1). L'objectif de cette recherche est de déterminer par régression linéaire multivariée le modèle explicatif le plus optimal, en tenant compte de la corrélation entre les variables explicatives.

Annexe 3. Sélection des variables explicatives du niveau de radiofréquences

1. Pré-sélection *a priori*

L'analyse des distributions des variables est réalisée sur les échantillons non-redressé et redressé (Tableau 16, Tableau 17 et Tableau 18). Les variables avec plus de 15 % de valeurs manquantes ou avec une mauvaise répartition des effectifs (modalité avec un effectif < 10 %) n'ont pas été prises en compte dans la recherche des déterminants. Ainsi, les variables suivantes ont été ôtées de l'étude :

- la zone climatique ;
- la période de construction du bâtiment ;
- le matériau principal de construction du bâtiment ;
- la technologie de l'émetteur le plus proche ;
- le type de l'installation visible la plus proche ;
- le type de l'installation visible la plus éloignée.

Tableau 16. Distribution des variables explicatives quantitatives sur l'échantillon non redressé (n=225)

Variables	Effectif	Moyenne +/- ET	Min	Max	P25	Médiane	P75
Distance à l'émetteur la plus proche (m)	225	808 +/- 933	36	5 892	235	438	973
Hauteur de l'émetteur la plus proche (m)	225	29 +/- 12	1	64	21	30	38
Nb émetteurs à moins de 100 m	225	0 +/- 0	0	3	0	0	0
Nb émetteurs à moins de 200 m	225	0 +/- 1	0	5	0	0	0
Nb émetteurs à moins de 500 m	225	3 +/- 5	0	32	0	1	2
Nb émetteurs à moins de 1 km	225	10 +/- 19	0	105	1	3	8
Nb émetteurs à moins de 2 km	225	34 +/- 70	0	393	2	6	25
Nb émetteurs à moins de 3 km	225	67 +/- 145	0	760	3	9	37
Nb émetteurs à moins de 5 km	225	150 +/- 336	0	1 740	7	16	75
Angle entre l'école et l'orientation horizontale de l'émetteur proche (azimut en degrés)	225	41 +/- 52	0	306	10	23	51

Tableau 17. Distribution des variables explicatives quantitatives sur l'échantillon redressé (n=67299)

Variables	Effectif	Moyenne +/- ET	Min	Max	P25	Médiane	P75
Distance à l'émetteur la plus proche (m)	67 299	962 +/- 995	36	5 892	257	546	1 494
Hauteur de l'émetteur la plus proche (m)	67 299	29 +/- 0	1	64	20	30	38
Nb émetteurs à moins de 100 m	67 299	0 +/- 0	0	3	0	0	0
Nb émetteurs à moins de 200 m	67 299	0 +/- 1	0	5	0	0	0
Nb émetteurs à moins de 500 m	67 299	2 +/- 5	0	32	0	0	2
Nb émetteurs à moins de 1 km	67 299	8 +/- 17	0	105	0	2	6
Nb émetteurs à moins de 2 km	67 299	30 +/- 64	0	393	1	3	19
Nb émetteurs à moins de 3 km	67 299	61 +/- 133	0	760	2	5	37
Nb émetteurs à moins de 5 km	67 299	132 +/- 297	0	1 740	5	13	75
Angle entre l'école et l'orientation horizontale de l'émetteur proche (azimut en degrés)	67 299	36 +/- 48	0	306	9	20	48

Tableau 18. Distribution des variables explicatives qualitatives

Variable explicative	Modalité	Mesures intérieures Echantillon non redressé		Mesures intérieures Echantillon redressé	
		Nb d'écoles	% d'écoles	Nb d'écoles	% d'écoles
Zone climatique <i>Note : Idf = Ile-de-France</i>	H1a_hidf	24	10,7%	11 418	17,0%
	H1a_idf	27	12,0%	7 732	11,5%
	H1b	32	14,2%	8 776	13,0%
	H1c	44	19,6%	11 514	17,1%
	H2a	17	7,6%	4 717	7,0%
	H2b	33	14,7%	8 565	12,7%
	H2c	29	12,9%	7 241	10,8%
	H2d	2	0,9%	2 085	3,1%
	H3	17	7,6%	5 251	7,8%
Type d'environnement	Rural	73	32,4%	30 501	45,3%
	Urbain	152	67,6%	36 798	54,7%
Type d'établissement	Elémentaire	106	47,1%	35 390	52,6%
	Maternelle	119	52,9%	31 909	47,4%
Période de construction du bâtiment	Après 1949	24	10,7%	4 948	7,4%
	Avant 1949	29	12,9%	11 129	16,5%
	Non renseigné	172	76,4%	51 222	76,1%
Matériau de construction du bâtiment	Béton Parpaing	77	34,2%	23 025	34,2%
	Pierre	38	16,9%	14 538	21,6%
	Autre ou non renseigné	110	48,9%	29 735	44,2%
Type de vitrage du bâtiment	Simple	25	11,1%	7 455	11,1%
	Double	113	50,2%	37 158	55,2%
	Non renseigné	87	38,7%	22 686	33,7%
Technologie	2-3G	25	11,1%	10 418	15,5%
	4G	140	62,2%	41 862	62,2%
	Non renseigné	60	26,7%	15 019	22,3%
Détection de radiofréquence provenant de la téléphonie mobile	Non	148	65,8%	46 764	69,5%
	Oui	77	34,2%	20 535	30,5%
Détection de radiofréquence provenant de la radio et TV	Non	185	82,2%	57 690	85,7%
	Oui	40	17,8%	9 609	14,3%
Détection de radiofréquence provenant d'un autre de service	Non	134	59,6%	37 274	55,4%
	Oui	91	40,4%	30 025	44,6%
Emetteurs visibles depuis le point de mesure	Non	186	82,7%	54 461	80,9%
	Oui	39	17,3%	12 838	19,1%
Type de l'émetteur visible le plus proche	Autre	6	2,7%	1 510	2,2%
	Radio ou TV	2	0,9%	303	0,5%
	Téléphonie mobile	31	13,8%	11 024	16,4%
	Installation non visible	186	82,7%	54 461	80,9%

Variable explicative	Modalité	Mesures intérieures Echantillon non redressé		Mesures intérieures Echantillon redressé	
		Nb d'écoles	% d'écoles	Nb d'écoles	% d'écoles
Type de l'émetteur visible le plus éloigné	Autre	5	2,2%	1 343	2,0%
	Radio ou TV	2	0,9%	303	0,5%
	Téléphonie mobile	32	14,2%	11 191	16,6%
	Installation non visible	186	82,7%	54 461	80,9%

2. Pré-sélection statistique

Un test de corrélation est réalisé entre chaque variable explicative et le niveau global de radiofréquences. Si la p-value du test est inférieure à 0,20, la corrélation entre les variables est significative et la variable explicative est pré-sélectionnée, sous réserve qu'elle ne génère pas de problème de multicolinéarité. Le Tableau 19 et le Tableau 20 présentent cette deuxième étape de construction du modèle.

Tableau 19. Corrélations entre le niveau global de radiofréquences et les variables explicatives quantitatives (test de Spearman) (n=67299)

Variabes	Coefficient de corrélation Rho de Spearman	p-value
Nb émetteurs à moins de 500 m	0,46	<,0006
Distance à l'émetteur la plus proche (m)	-0,44	<,0001
Nb émetteurs à moins de 1 km	0,44	<,0002
Nb émetteurs à moins de 2 km	0,39	<,0004
Nb émetteurs à moins de 3 km	0,38	<,0005
Nb émetteurs à moins de 5 km	0,37	<,0007
Nb émetteurs à moins de 200 m	0,27	<,0003
Nb émetteurs à moins de 100 m	0,20	0,0028
Angle entre l'école et l'orientation horizontale de l'émetteur (azimut en degrés)	0,02	0,7
Hauteur de l'émetteur la plus proche (m)	0,01	0,8

Tableau 20. Corrélations entre le niveau global de radiofréquences et les variables explicatives qualitatives (test de Kruskal Wallis) (n=67299)

	Chi-2	DDL	p-value
Détection de radiofréquences provenant de la téléphonie mobile	57,84	1	<,0001
Installations visibles à proximité	41,36	1	<,0001
Détection de radiofréquences provenant de la radio et TV	20,54	1	<,0001
Type d'environnement	19,58	1	<,0001
Détection de radiofréquences provenant d'un autre service	7,32	1	0,0068
Type de vitrage du bâtiment	3,90	2	0,14

Note : DDL = degrés de liberté

Annexe 4. Analyse descriptive des mesures intérieures de radiofréquences avant redressement

Le niveau moyen de radiofréquences mesuré à l'intérieur des écoles est de 0,23 V/m. Le niveau médian de radiofréquences est de 0,16 V/m. Le niveau maximal mesuré est de 0,98 V/m : ce niveau est bien inférieur au niveau d'atypicité de l'ANFR de 6 V/m (Annexe 7) et au niveau limite réglementaire de 28 V/m (Tableau 21). La médiane est aussi inférieure à celle de 0,38 V/m, observée dans la campagne de 2993 mesures de l'ANFR réalisées en 2016 (ANFR, 2017).

Les niveaux de radiofréquences les plus élevés proviennent de la téléphonie sans fil (DECT) et de la téléphonie mobile (TM). Parmi les différentes bandes de fréquences de la téléphonie mobile, la bande 900 MHz (TM 900) est la plus représentée (détectée dans 68 écoles sur 225, soit 30% des écoles) comme déjà observé par l'ANFR dans sa campagne de mesure de 2016 (ANFR, 2017).

L'impact du redressement de l'échantillon sur la distribution des niveaux de radiofréquences est marginal.

Tableau 21. Distribution des niveaux intérieurs de radiofréquences sur l'échantillon non redressé (n=225)

Variable	Effectif	Moyenne +/- ET	Min	P25	Médiane	P75	Max
Niveau global de radiofréquences (V/m)	225	0,23 +/- 0,17	0,06	0,12	0,16	0,25	0,98
Niveau de radiofréquences des TM 700 (V/m)	1	0,17 +/- 0	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
Niveau de radiofréquences des TM 800 (V/m)	34	0,15 +/- 0,11	< seuil de détection	0,06	0,12	0,21	0,44
Niveau de radiofréquences des TM 900 (V/m)	68	0,17 +/- 0,14	< seuil de détection	0,08	0,14	0,23	0,67
Niveau de radiofréquences des TM 1800 (V/m)	46	0,14 +/- 0,12	< seuil de détection	0,05	0,10	0,22	0,51
Niveau de radiofréquences des TM 2100 (V/m)	52	0,14 +/- 0,09	< seuil de détection	0,07	0,12	0,20	0,45
Niveau de radiofréquences des TM 2600 (V/m)	12	0,14 +/- 0,07	0,05	0,07	0,15	0,19	0,24
Niveau de radiofréquences des FM RNT (V/m)	37	0,11 +/- 0,09	< seuil de détection	0,06	0,10	0,13	0,41
Niveau de radiofréquences des TV (V/m)	5	0,07 +/- 0,04	< seuil de détection	0,05	0,05	0,08	0,14
Niveau de radiofréquences des DECT (V/m)	15	0,19 +/- 0,19	< seuil de détection	0,08	0,14	0,20	0,77
Niveau de radiofréquences des HF (V/m)	53	0,09 +/- 0,05	< seuil de détection	0,07	0,08	0,10	0,25
Niveau de radiofréquences des PMR (V/m)	3	< seuil de détection	< seuil de détection	< seuil de détection	< seuil de détection	< seuil de détection	< seuil de détection
Niveau de radiofréquences des PMR BALISES (V/m)	2	0,08 +/- 0,01	0,07	0,07	0,08	0,08	0,08
Niveau de radiofréquences des RADAR BALISES (V/m)	-	-	-	-	-	-	-
Niveau de radiofréquences des RADAR BLR (V/m)	21	0,08 +/- 0,07	< seuil de détection	0,05	0,05	0,07	0,32
Niveau de radiofréquences du Wifi (V/m)	56	0,11 +/- 0,13	< seuil de détection	< seuil de détection	0,07	0,12	0,72

Note : seuil de sensibilité typique des sondes large bande = 0,38 V/m ; seuil maximal de détection des analyseurs de spectre utilisés = 0,05 V/m.

P : percentile

Annexe 5. Modélisation des niveaux de radiofréquences sur l'échantillon non redressé

Le modèle des niveaux intérieurs de radiofréquences construit sur l'échantillon non redressé est présenté dans le Tableau 22.

La présence d'un émetteur visible depuis le point de mesure est un bon indicateur du niveau élevé de radiofréquences. La détection de radiofréquences issues d'un service autre que la TV et radiodiffusion présage également des niveaux de radiofréquences élevés. Enfin, plus le nombre d'émetteurs de radiofréquences à moins de 500 m est élevé, plus le niveau de radiofréquences sera important.

Toutefois, ces résultats sont à considérer avec précaution en raison des faibles effectifs et du nombre limité de variables explicatives testées. En effet, la performance du modèle est limitée : son coefficient de détermination R^2 ajusté est de 0,41 (mesure de l'adéquation du modèle avec les données qui ont permis de l'établir, comprise entre 0 et 1).

Tableau 22. Modèle de régression linéaire multivariée du niveau intérieur de radiofréquences (échantillon non-redressé) (n=225)

Variable	Coefficient estimé	Ecart-type	p-value
Constante	0,13	0,01	<0,0001
Emetteurs visibles depuis le point de mesure	0,16	0,02	<0,0001
Mesure de radiofréquences provenant de la téléphonie mobile	0,11	0,02	<0,0001
Mesure de radiofréquences provenant d'un service autre que la téléphonie mobile, la TV et la radiodiffusion	0,04	0,02	0,03
Nb émetteurs à moins de 500m	0,01	0,00	<0,001

Annexe 6. Zones climatiques de la France métropolitaine

La campagne nationale de mesure des radiofréquences dans les écoles couvre les 8 zones climatiques de France métropolitaine illustrées sur la Figure 6.

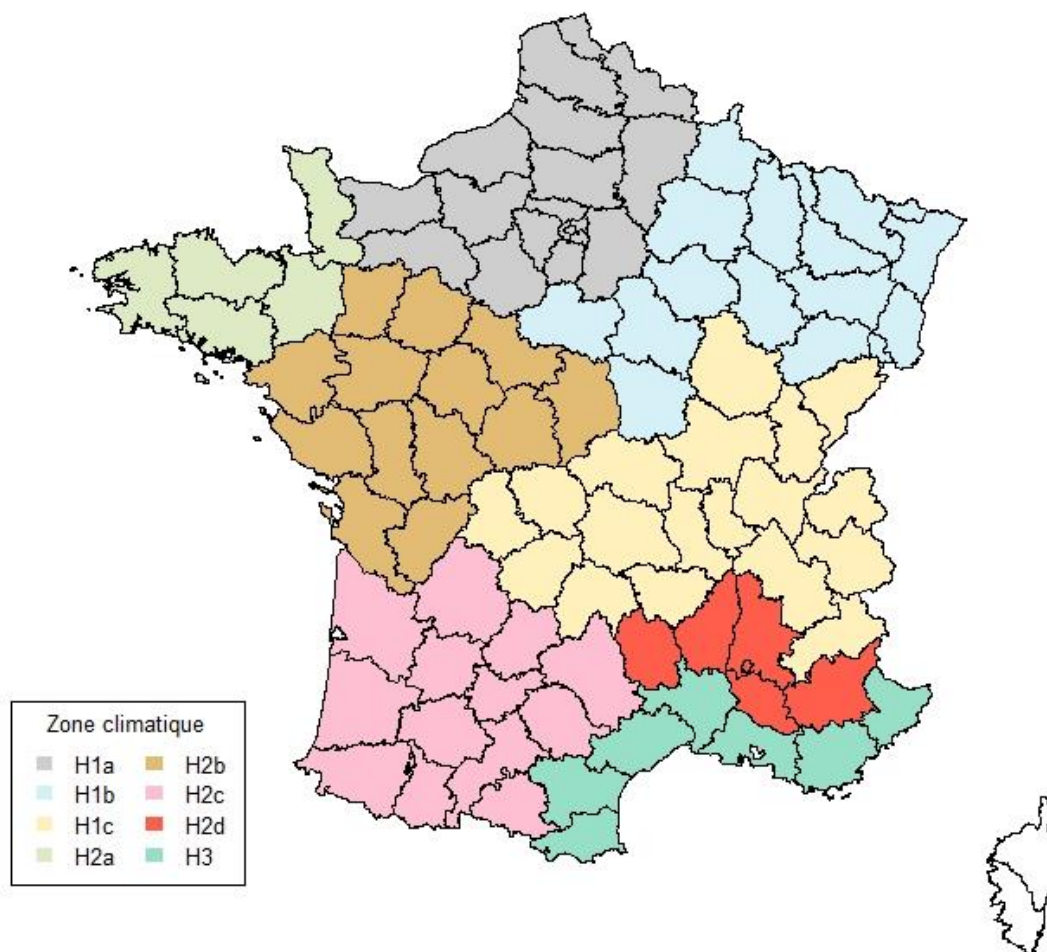


Figure 6. Zones climatiques de la France métropolitaine (RT 2012)

Annexe 7. Définition du niveau d'atypicité des champs électromagnétiques (ANFR, 2017)

Les points atypiques sont définis par la loi n° 2015-136 du 9 février 2015 comme les lieux dans lesquels le niveau d'exposition aux champs électromagnétiques dépasse substantiellement celui généralement observé à l'échelle nationale, conformément aux critères, y compris techniques, déterminés par l'ANFR et révisés régulièrement.

Dans cette démarche initiale, l'ANFR a retenu comme critère un niveau global d'exposition de 6 V/m en se fondant sur les éléments suivants :

- c'est le niveau retenu à partir du protocole ANFR DR 15 v3 pour déclencher un cas B, c'est-à-dire une mesure détaillée de l'exposition, par bande de fréquence, avec un analyseur de spectre. Cette valeur de 6 V/m, correspondant en champ lointain à environ 100 mW/m², est mentionnée également dans la norme NF EN 50492 ;
- l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) indique également sur son site web que l'exposition maximale typique induite par les antennes de la téléphonie mobile ou la radiodiffusion est de 100 mW/m² (soit environ 6 V/m en champ lointain) ;
- ce niveau dépasse substantiellement celui généralement mesuré à l'échelle nationale.

L'ANFR a par ailleurs retenu, concernant les environnements considérés pour les points atypiques, les lieux éligibles au financement par le fonds de mesure prévu par le décret n°2013-1162 du 14 décembre 2013 relatif au dispositif de surveillance et de mesure des ondes électromagnétiques. Il s'agit des locaux d'habitation, des lieux ouverts au public et des lieux accessibles au public se trouvant dans des établissements recevant du public au sens de l'article R. 123-2 du code de la construction et de l'habitation.