



Mesures d'exposition au rayonnement non ionisant Rapport annuel 2022 - Consortium de projet SwissNIS

Aarau, le 30 août 2023

Sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV)

Mentions légales

Mandant : Office fédéral de l'environnement (OFEV), Division Bruit et RNI, CH-3003 Berne
L'OFEV est un office du Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC).

Mandataire : Consortium de projet SwissNIS

TPH
Swiss Tropical and Public Health Institute
Kreuzstrasse 2
4123 Allschwil

G+P
Grolimund + Partner AG
Entfelderstrasse 45
5000 Aarau

FaW
Fields at Work GmbH
Hegibachstrasse 41
8032 Zurich

NED-TECH
NED - TECH AG
Unterholz 26
3380 Wangen an der Aare

Auteur/trice :

Toni Ziegler, G+P, chef de projet
Martin Rössli, TPH, chef de projet adjoint
Dominik Haas, G+P
Nicolas Loizeau, TPH
Marco Zahner, FaW
Christa Stephan, G+P
Johannes Schindler, G+P
Markus Gugler, NED-TECH
Jürg Fröhlich, FaW
Erik Bühlmann, G+P
Michal Kovacik, G+P

Accompagnement de l'OFEV :

Sebastian Egger
Urs Walker
Alexander Reichenbach
Andreas Siegenthaler

Remarque : cette étude/ce rapport a été rédigé(e) sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV). Le mandataire est seul responsable de son contenu.

Version	Date	Auteurs	Description	Distributeur
V 1.0	02.06.2023	Équipe de projet	Rapport annuel 2022	SwissNIS, mandant (OFEV)
V 1.1	30.06.2023	Équipe de projet, OFEV	Commentaires sur la version 1.0	SwissNIS, mandant (OFEV)
V 1.2	30.08.2023	Équipe de projet	Rapport annuel 2022 révisé	SwissNIS, mandant (OFEV)

Contenu

1. Introduction et objectifs	5
2. Concept et méthodes	6
2.1 Concept de mesure	6
2.2 Instruments de mesure	7
2.2.1 Spécifications générales des appareils	7
2.2.2 Nouvelle version de l' ExpoM-RF-Utility	8
2.2.3 Sélection des bandes de fréquences	8
2.2.4 Précision et incertitude de mesure	10
2.2.5 Influence du blindage du corps	11
2.2.6 Correction du « crosstalk »	11
2.3 Mesures	12
2.3.1 Mesures d'itinéraires	12
2.3.2 Mesures spot/habitat	13
2.3.3 Mesures permanentes stationnaires	14
2.4 Sélection des sites de mesure	14
2.4.1 Mesures d'itinéraires en 2022	16
2.4.2 Mesures spot/habitat	18
2.4.3 Mesures permanentes stationnaires	20
2.5 Gestion des données	21
2.5.1 Fichiers de mesure et base de données	21
2.5.2 Préparation des données	22
2.5.3 Statistiques descriptives	24
3. Résultats	27
3.1 Mesures d'itinéraires	27
3.1.1 Aperçu général - Exposition aux HF	27
3.1.2 Aperçu général - Exposition aux BF	33
3.1.3 Analyses supplémentaires à bord des trains - exposition aux HF et aux BF	37
3.1.4 Analyses supplémentaires dans les écoles - exposition aux HF et aux BF	38
3.2 Mesures spot/habitat	43
3.2.1 Exposition aux HF	43
3.2.2 Exposition aux BF	46
3.3 Mesures permanentes stationnaires	49
4. Discussion	50
4.1 Mesures d'itinéraires	50
4.1.1 Mesures générales d'itinéraires	50
4.1.2 Mesures dans les trains	51

4.1.3 Mesures dans les écoles	51
4.1.4 Comparaison 2021/2022 des mesures d'itinéraires	52
4.2 Mesures spot/habitat.....	53
4.3 Limitations	55
5. Bibliographie	56
6. Sources de données	58
I Glossaire	59
II Liste des communes d'implantation des microenvironnements	61
III Données statistiques des mesures d'itinéraires	65
IV Données statistiques des mesures de spots	79
V Liste des sites de mesures spot	87

1. Introduction et objectifs

Depuis la révision de l'ordonnance sur la protection contre le rayonnement non ionisant (ORNI) d'avril 2019, l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) est explicitement chargé de relever périodiquement l'exposition de la population au rayonnement non ionisant (RNI) et d'établir une vue d'ensemble nationale (art. 19b, al. 1, ORNI) [1]. A cette fin, l'OFEV a lancé en 2020 un appel d'offres pour un projet de collecte de données de mesure représentatives de l'exposition de la population suisse au rayonnement non ionisant dans sa vie quotidienne.

Le présent document est le rapport annuel 2022 sur la collecte des données de mesure, rédigé par le consortium de projet qui a remporté l'appel d'offres.

L'objectif principal de ce rapport annuel est de décrire les mesures effectuées en 2022 dans le cadre du monitoring de l'exposition au RNI en Suisse. Le rapport annuel 2022 décrit d'une part le concept de base et le mode de collecte des données et présente d'autre part les résultats des mesures effectuées en 2022. Comme il s'agit du deuxième rapport annuel pendant la durée de la collecte des données et qu'il est prévu de répéter les mesures tous les 2 ans, les comparaisons avec les données de mesure de 2021 ne sont pas possibles ou seulement de manière très limitée.

Tableau 1 : Concept de mesure, étendue et rythme de répétition des campagnes de mesure

Méthode de mesure	Nombre d'unités	2021	2022	2023	2024	2025
Mesures d'itinéraires	300 microenvironnements	50%	50%	50%	50%	50%
Mesures spot/habitat	100 appartements	20%	20%	20%	20%	20%
Mesures permanentes stationnaires	5 sites			100%	100%	

Les mesures d'itinéraires présentent les données d'un total de 150 microenvironnements, 90 lieux publics et de nombreux moyens de transport en commun, collectées en 2022. De plus, les mesures d'itinéraires déjà analysées dans le rapport annuel 2021 ont été complétées par une analyse de l'exposition dans les trains en fonction de l'occupation des trains ainsi que par une analyse approfondie pour les écoles.

En ce qui concerne les mesures spot/habitat, les données présentées dans ce rapport annuel concernent 26 sites qui ont été mesurés entre 2021 et mars 2023. Dans ce cas, l'échantillon a été complété par des mesures effectuées au 1er trimestre 2023, car moins de mesures que prévu ont pu être réalisées en 2021/2022 en raison des restrictions imposées par la pandémie.

Le prochain rapport annuel (2023) se concentrera davantage sur les changements temporels, puisqu'il sera possible de comparer les mesures 2023-2021 et que des mesures stationnaires à long terme de toute l'année 2023 seront disponibles.

Au cours de la durée du projet, la base de données sera constamment élargie et résumée dans des rapports annuels et comparée aux données des années précédentes afin d'évaluer l'évolution des immissions dans le temps.

2. Concept et méthodes

Ce chapitre décrit le concept et les méthodes utilisés pour les mesures qui sont prévues pour toute la durée du projet, soit cinq ans. Le premier rapport annuel 2021 [2] décrivait de manière très détaillée la méthodologie et le concept. Dans le présent rapport annuel 2022, seuls les éléments les plus importants, nécessaires à la compréhension des résultats décrits, sont encore rapportés et l'accent est mis sur les adaptations et les développements ultérieurs du concept de mesure.

2.1 Concept de mesure

Le concept de mesure est pour l'essentiel le même que celui décrit dans le rapport annuel 2021 [2]. Le concept des mesures d'exposition au rayonnement non ionisant documenté dans le présent rapport comprend trois méthodes de mesure complémentaires :

1. "Mesures d'itinéraires"

Les mesures d'itinéraires sont effectuées à l'aide d'appareils portables sur des parcours de mesure définis et seront répétées tous les deux ans. Les parcours de mesure sont situés dans des "microenvironnements" préalablement sélectionnés. Au total, des mesures sont effectuées dans 300 microenvironnements en Suisse, qui sont classés en 11 types (cf. Tableau 6). Au sein de chaque microenvironnement, les mesures sont effectuées à l'extérieur, ce qui correspond au type de microenvironnement proprement dit (p. ex. centres urbains, zones industrielles), mais aussi dans des zones publiques (p. ex. gares, restaurants, supermarchés, écoles) et lors du transfert entre les microenvironnements ou des mesures dans de nombreux moyens de transport public (trains régionaux/intercités, trams, bus). Dans la suite de ce document, nous utiliserons le terme général d'"environnement de mesure". Les microenvironnements sont sélectionnés à l'aide de systèmes d'information géographique (SIG) sur la base de différents critères afin que le total des microenvironnements soit bien représentatif de la population suisse. Par rapport au rapport annuel 2021, les types de microenvironnements sont passés de 9 à 11 et les mesures dans les écoles ont été intégrées dans le concept de mesure.

2. "Mesures spot/habitat"

Pendant toute la durée du projet, au moins 100 habitations sont sélectionnées comme "lieux à utilisation sensible" (LUS) se trouvant à proximité d'au moins une source de RNI et dans lesquels on peut donc s'attendre à des intensités de champ supérieures à la moyenne. Cela permet de recenser les situations d'exposition typiques à proximité des sources de RNI concernées, dans des lieux où les personnes séjournent souvent et longtemps. En même temps, ces habitations sont choisies de manière quasi aléatoire par rapport à d'autres sources de RNI et présentent ainsi des situations d'exposition représentatives pour ces sources.

3. "Mesures stationnaires permanentes"

Afin de mettre en évidence les variations saisonnières et journalières ainsi que les tendances temporelles de l'exposition au RNI, des mesures stationnaires permanentes sont effectuées sur cinq sites sélectionnés pendant au moins deux ans (à partir du 1.1.2023).

Les méthodes de mesure et les critères de sélection des lieux de mesure sont décrits ci-dessous. Les mesures saisissent de manière ciblée les parts de rayonnement qui proviennent de l'environnement, mais pas celles qui sont générées par le propre téléphone mobile. Les opérateurs de téléphonie mobile ne sont pas informés du lieu et du moment où les mesures sont effectuées.

2.2 Instruments de mesure

Pour les mesures, des exposimètres portables avec enregistreur de données intégré de Fields at Work sont utilisés. La mesure des champs magnétiques à basse fréquence (CM-BF) est réalisée par l'appareil ExpoM-ELF, tandis que pour les champs électromagnétiques à haute fréquence (CEM-HF), on utilise des appareils ExpoM-RF de la dernière génération (révision 4).

Les appareils de mesure ExpoM (Figure 1) sont compacts et légers et disposent d'un enregistreur GPS intégré. Ils conviennent donc particulièrement bien aux mesures d'itinéraires. Cependant, les mesures spot et les mesures stationnaires effectuées dans le cadre de ce projet peuvent également être réalisées avec ces appareils, ce qui garantit une comparabilité optimale de tous les résultats de mesure.



Figure 1: Appareils de mesure utilisés : ExpoM-ELF (à gauche) et ExpoM-RF 4 (à droite)

Les appareils de mesure de la famille ExpoM sont utilisés dans le monde entier et ont été utilisés ces dernières années pour de nombreuses études et campagnes de mesure en Suisse et à l'étranger.

2.2.1 Spécifications générales des appareils

L'ExpoM-ELF est un appareil de mesure de champ magnétique à 3 axes qui couvre la gamme de fréquences de DC à 100 kHz et qui peut détecter des intensités de champ magnétique jusqu'à $\pm 1500 \mu\text{T}$ dans la sensibilité standard. Les mesures sont effectuées dans le domaine temporel et contiennent donc le plus haut degré d'information possible. Les évaluations sélectives de bande sont effectuées à l'aide d'un traitement numérique du signal (FFT) a posteriori des mesures du domaine temporel.

L'ExpoM-RF4 est un exposimètre configurable et sélectif en bande pour les champs électromagnétiques haute fréquence de 50 MHz à 6 GHz et enregistre l'intensité de champ électrique en V/m. Trois répartitions de sensibilité (6, 20 et 50 V/m) sont disponibles. L'appareil mesure de manière sélective dans une bande passante sélectionnable de 35, 75 ou 100 MHz. Il est possible de définir des bandes avec des fréquences centrales quelconques dans la répartition de mesure spécifiée. L'ExpoM-RF prélève à chaque intervalle de mesure un échantillon des immissions dans toutes les bandes préconfigurées. La valeur efficace (RMS) ainsi que la valeur de crête (dit « peak ») momentanée (maximum) sont déterminées et enregistrées à partir de ces échantillons (d'une durée de mesure d'environ 50 ms chacun).

Les spécifications détaillées des deux appareils se trouvent sur les pages correspondantes du site web de Fields at Work (www.fieldsatwork.ch).

2.2.2 Nouvelle version de l' ExpoM-RF-Utility

En avril 2023, une nouvelle version de l'utilitaire ExpoM-RF a été publiée, qui contient une amélioration de l'algorithme de calcul des valeurs d'intensité de champ RMS à partir des données brutes de l'appareil de mesure. Lors de l'étalonnage, les appareils de mesure sont calibrés avec un certain nombre d'intensités de champ de référence. Dans le cas de l'ExpoM-RF, ces intensités de champ de référence sont situées à des intervalles de 5 dB, à partir de 0.0011 V/m. Les points entre ces intensités de champ de référence sont déterminés par calcul. Il s'agit d'une procédure d'interpolation. Les valeurs de mesure déterminées par calcul présentent un certain écart par rapport aux intensités de champ réelles. Ces écarts sont indiqués comme faisant partie de l'incertitude de mesure. Le nouvel algorithme réduit cet écart et assure également une meilleure comparabilité avec les mesures de la version précédente de l'ExpoM-RF.

Le nouvel algorithme entraîne une correction systématique des valeurs de mesure RMS par rapport à la version précédente, entre 5 et 10%. Les écarts de la nouvelle version se situent dans les limites de l'incertitude de mesure initialement estimée. Les valeurs de peak ne sont pas affectées par la mise à jour, car un autre algorithme est utilisé, pour lequel aucune adaptation n'est nécessaire.

2.2.3 Sélection des bandes de fréquences

Pour ce projet, une sélection de 35 bandes de fréquences dans le domaine CEM-HF a été effectuée, couvrant tous les services importants de radiodiffusion, de téléphonie mobile et de télécommunication sans fil ainsi que les immissions de RNI dues aux infrastructures. Les 35 bandes de fréquences HF sont étalonnées individuellement pour chaque ExpoM-RF dans la chambre de mesure anéchoïque (champ lointain). Les bandes de fréquences HF sont présentées dans le Tableau 2 et correspondent dans une large mesure à des services spécifiques. Les explications relatives aux abréviations figurent dans le glossaire (annexe I). L'ExpoM-ELF est étalonné dans un montage spécialement conçu à cet effet. Les principales bandes de fréquences BF sont le courant ferroviaire (16.7 Hz), l'alimentation électrique (50 Hz), et le courant ondulé du tram (300 Hz), ainsi que leurs harmoniques et sont présentées dans le Tableau 3. Le réglage des bandes BF a été révisé en 2022, ce qui explique les légères différences par rapport à la liste figurant dans le rapport 2021. La largeur de bande pour la détection des composantes du courant ferroviaire (bande BF n°2) a été augmentée de 2 Hz à 4 Hz et la largeur de bande des bandes BF voisines 1 et 3 a été réduite en conséquence. Cette adaptation a permis d'éliminer les petits effets de diaphonie des composantes de courant ferroviaire sur les bandes voisines.

Tableau 2: Liste des bandes de fréquences HF.

CEM-HF N° de bande	Description	Fréquence centrale en MHz	Largeur de bande en MHz	Catégorie de service
1	Radio FM	97.75	35	broadcast
2	DAB/DAB	202	75	broadcast
3	Polycom / TETRAPOL	385	35	infrastructure
4	TETRAPOL, amateur, ISM 433	422.5	35	ISM, public
5	PMR/PAMR (radio d'entreprise)	452.5	35	infrastructure
6	Broadcasting CH (1)	507.5	75	broadcast
7	Broadcasting CH (2)	583.5	75	broadcast
8	Broadcasting CH (3)	659.5	75	broadcast
9	Mobile 700 UL (CH)	718	35	cellular uplink

CEM-HF N° de bande	Description	Fréquence centrale en MHz	Largeur de bande en MHz	Catégorie de service
10	Mobile 700 TDD (CH, Sunrise)	748	35	cellular TDD
11	Mobile 700 DL (CH)	770.5	35	cellular downlink
12	Mobile 800 downlink	808.5	35	cellular downlink
13	Mobile 800 uplink	847	35	cellular uplink
14	Mobile 900 uplink	897.5	35	cellular uplink
15	Mobile 900 downlink	942.5	35	cellular downlink
16	Mobile 1400 SDL (CH)	1479.5	75	cellular downlink
17	Mobile 1800 uplink	1747.5	75	cellular uplink
18	Mobile 1800 downlink	1842.5	75	cellular downlink
19	DECT	1897.5	35	
20	Mobile 2100 uplink	1957	75	cellular uplink
21	Mobile 2100 downlink	2145	75	cellular downlink
22	ISM 2.4 GHz	2438	100	WiFi
23	Mobile 2600 uplink	2535	75	cellular uplink
24	Mobile 2600 TDD (Swisscom)	2592.5	35	cellular TDD
25	Mobile 2600 downlink	2657	75	cellular downlink
26	Mobile 3500 (1)*	3475	100	cellular TDD
27	Mobile 3500 (2)*	3605	100	cellular TDD
28	Mobile 3500 (3)*	3735	100	cellular TDD
29	WiFi 5 GHz (1)	5200	100	WiFi
30	WiFi 5 GHz (2)	5325	100	WiFi
31	WiFi 5 GHz (3)	5450	100	WiFi
32	WiFi 5 GHz (4)	5575	100	WiFi
33	WiFi 5 GHz (5)	5700	100	WiFi
34	WiFi / SRD 5,8 GHz (1)	5825	100	WiFi
35	WiFi / SRD 5,8 GHz (2)	5950	100	WiFi

*Les fréquences centrales et les largeurs de bande ont été choisies de manière à ce que la répartition de fréquences de 3400 à 3800 MHz soit représentée sans faille en tenant compte du crosstalk.

Tableau 3: Liste des bandes de fréquences BF.

CM-BF N° de bande	Description	Fréquence centrale en Hz	Largeur de bande en Hz	Catégorie de service
1	Bande LF 5 à 14 Hz	9.5	9	
2	Courant ferroviaire (16.7 Hz), 15 à 18 Hz	16.5	4	Transports publics
3	Bande LF 19 à 48 Hz en µT	33.5	29	Bande intermédiaire non spécifique
4	Tension de réseau AC (50 Hz), 49 à 51 Hz	50	2	Réseau électrique
5	Bande LF 52 à 98 Hz	75	46	Bande intermédiaire non spécifique
6	Tension du réseau premier harmonique, 99 à 101 Hz	100	2	Réseau électrique
7	bande LF 102 à 148 Hz	125	46	Bande intermédiaire non spécifique

CM-BF N° de bande	Description	Fréquence centrale en Hz	Largeur de bande en Hz	Catégorie de service
8	Tension du réseau deuxième harmonique, 149 à 151 Hz	150	2	Réseau électrique
9	Bande LF 152 à 298 Hz	225	146	Bande intermédiaire non spécifique
10	Courant de tram (DC avec courant ondulé, 300 Hz), 299 à 301 Hz	300	2	Transports publics
11	Bande LF 302 à 598 Hz	450	296	Bande intermédiaire non spécifique
12	Courant de tram premier harmonique, 599 à 601	600	2	Transports publics
13	Bande LF 602 à 898 Hz	750	296	Bande intermédiaire non spécifique
14	Courant de tram deuxième harmonique, 899 à 901 Hz	900	2	Transports publics
15	bande LF 902 à 1000 Hz	951	98	Bande intermédiaire non spécifique
16	Bande HF - 1 à 5 kHz	3000	4000	Bloc de fréquence non spécifique
17	Bande HF 5,1 à 10 kHz	7550	4900	Bloc de fréquence non spécifique
18	Bande HF 10.1 à 15 kHz	12550	4900	Bloc de fréquence non spécifique
19	Bande HF 15,1 à 20 kHz	17550	4900	Bloc de fréquence non spécifique
20	Bande HF 20.1 à 25 kHz	22550	4900	Bloc de fréquence non spécifique
21	Bande HF 25,1 à 30 kHz	27550	4900	Bloc de fréquence non spécifique
22	Bande HF 30.1 à 35,1 kHz	32600	5000	Bloc de fréquence non spécifique
23	Bande HF 35,1 à 40 kHz	37550	4900	Bloc de fréquence non spécifique
24	Bande HF 40.1 à 45 kHz	42550	4900	Bloc de fréquence non spécifique
25	Bande HF 45,1 à 50 kHz	47550	4900	Bloc de fréquence non spécifique
26	Bande HF 50.1 à 55 kHz	52550	4900	Bloc de fréquence non spécifique
27	Bande HF 55,1 à 60 kHz	57550	4900	Bloc de fréquence non spécifique
28	Bande HF 60.1 à 65 kHz	62550	4900	Bloc de fréquence non spécifique
29	Bande HF 65,1 à 70 kHz	67550	4900	Bloc de fréquence non spécifique
30	Bande HF 70.1 à 75 kHz	72550	4900	Bloc de fréquence non spécifique
31	Bande HF 75,1 à 80 kHz	77550	4900	Bloc de fréquence non spécifique
32	Bande HF 80.1 à 85 kHz	82550	4900	Bloc de fréquence non spécifique
33	Bande HF 85,1 à 90 kHz	87550	4900	Bloc de fréquence non spécifique
34	Bande HF 90.1 à 95 kHz	92550	4900	Bloc de fréquence non spécifique
35	Bande HF 95,1 à 100 kHz	97550	4900	Bloc de fréquence non spécifique

2.2.4 Précision et incertitude de mesure

Le tableau suivant énumère les incertitudes de mesure des deux appareils de mesure. L'analyse d'incertitude de l'ExpoM-ELF se réfère à la mesure de champs alternatifs, c'est-à-dire que la composante DC n'est pas prise en compte.

Tableau 4: Précision de mesure des instruments de mesure utilisés. Le calcul de l'incertitude combinée tient compte de la répartition des différentes contributions selon les directives GUM établies [6].

Grandeur d'influence	Description	Distribution	Contribution ExpoM-ELF	Contribution ExpoM-RF
Calibrage	Incertitudes des intensités de champ de référence pendant les mesures d'étalonnage dues à la structure et aux appareils de mesure	Normal	3.7%	10.7%
Réponse en fréquence	Variation des constantes d'étalonnage lors de mesures en dehors des points de fréquence étalonnés	Egal	5.0%	28.3%
Non-linéarité	Variation des constantes d'étalonnage lors de mesures en dehors des valeurs d'amplitude étalonnées / interpolation	Egal	1.0%	5.8%
Anisotropie	Dépendances directionnelles Sensibilité de l'instrument de mesure	Egal	1.0%	49.6%
Résolution	Erreurs numériques d'arrondi et de décalage	Egal A venir	0.5%	3.0%
Température	Incertitude due à la dérive thermique des capteurs et de l'électronique	Egal	2.5%	10%
Répétabilité	Variations aléatoires (bruit)	Normal	0.5%	1.0%
TOTAL	Incertitude de mesure combinée (Intervalle de confiance de 95%)		3.9% / 0.33 dB	34.1% / 2.6 dB

Tableau 4 montre que dans le domaine BF, l'incertitude de mesure est faible. L'écart attendu est de 3.9%. Dans le domaine HF, l'incertitude est nettement plus grande, avec $\pm 34.1\%$. Ceci est prévisible du point de vue de la technique de mesure. Il faut souligner que cette incertitude de mesure se rapporte à une seule valeur de mesure. Toutefois, si l'appareil de mesure est déplacé lors d'une mesure d'itinéraire, les incertitudes sur la valeur moyenne pour le microenvironnement correspondant se compenseront en grande partie. Dans le cas idéal, si toutes les erreurs étaient distribuées normalement de manière aléatoire, l'incertitude serait réduite par la racine du nombre de valeurs de mesure. Ainsi, si l'on suppose 150 valeurs de mesure par microenvironnement (intervalle de mesure de 6 secondes pendant 15 minutes), l'incertitude de mesure de la valeur moyenne serait donc idéalement réduite à $\pm 3\%$. En réalité, ce résultat n'est pas atteint, car certaines des contributions aux erreurs ne sont pas indépendantes. Cela concerne surtout la température, l'étalonnage et en partie la réponse en fréquence. Ainsi, l'incertitude réelle de la valeur moyenne par microenvironnement est de l'ordre de $\pm 10\%$. Cette répartition d'incertitude a été confirmée sur la version précédente de l'appareil lors de mesures parallèles sur le terrain [7].

2.2.5 Influence du blindage du corps

Les appareils ExpoM-RF sont calibrés en usine dans la chambre de mesure anéchoïque en champ libre. L'appareil est alors placé sur une plateforme isolée indépendante, qui a une influence négligeable sur le champ entrant. Dans la pratique, lors des mesures d'itinéraires, l'appareil de mesure est transporté dans un sac à dos et porté à une distance relativement faible (environ 20 cm) du corps. Ces facteurs peuvent influencer dans une certaine mesure l'intensité de champ électromagnétique mesurée par des effets d'atténuation, d'occultation et de réflexion. L'ampleur de ces effets a été étudiée à l'aide du dispositif de mesure utilisé dans le projet pour les mesures d'itinéraires et est décrite en détail dans le rapport annuel 2021 [2].

2.2.6 Correction du « crosstalk »

Le « crosstalk » décrit le fait qu'un signal émis dans une bande de fréquence A est également enregistré dans une bande de fréquence B voisine. Cet effet peut se produire lorsque les deux bandes de fréquences sont suffisamment proches l'une de l'autre pour que le filtrage des fréquences dans l'appareil de mesure

ne puisse pas créer une séparation nette entre les bandes. La description détaillée de cet effet et la correction correspondante des valeurs mesurées sont présentées dans le rapport annuel 2021 [2].

2.3 Mesures

2.3.1 Mesures d'itinéraires

Les mesures d'itinéraires consistent à effectuer des mesures à pied avec des appareils de mesure installés dans un sac à dos, sur des chemins de mesure prédéfinis. Les mesures d'itinéraires sont des mesures de champs électromagnétiques haute fréquence (CEM-HF) et de champs magnétiques basse fréquence (CM-BF) et se composent de trois scénarios ou environnements de mesure :

- **Les microenvironnements** : Les chemins de mesure sont situés dans des "microenvironnements" (zones d'une superficie comprise entre 0.03 et 0.8 km², définies sur la base de données géographiques humaines) qui ont été définis selon la méthode décrite au paragraphe 2.4.2. Dans chaque microenvironnement, un parcours de mesure (itinéraire) d'environ 1 à 1.3 km est défini, de sorte qu'il faut environ 15 minutes pour marcher. Les parcours de mesure sont définis de manière à couvrir autant que possible toute la surface du microenvironnement. De plus amples détails sur les mesures dans les microenvironnements sont disponibles dans le rapport annuel 2021 [2].
- **Les lieux publics** : Les mesures d'exposition sont effectuées dans les lieux publics (par exemple, les arrêts de bus, les gares, les écoles) pendant les déplacements entre les différents microenvironnements. Dans ces lieux, les mesures sont également effectuées à pied afin de couvrir le mieux possible l'ensemble du lieu. Dans les restaurants, le sac à dos est posé sur la chaise devant la personne qui effectue les mesures.
- **Transports publics** : l'exposition dans les transports est enregistrée pendant le temps de trajet (par exemple dans les trains, les bus, les trams). Le sac à dos dans les transports publics est déposé sur un siège s'il y a une place libre. S'il n'y a pas de place libre, le sac à dos est posé sur les genoux, ou si la personne qui mesure ne peut pas s'asseoir, elle se tient debout et porte le sac à dos.

Un protocole d'activité est enregistré à l'aide d'une application pour smartphone. L'application permet de consigner quand et où l'on a commencé et terminé la mesure. Le téléphone portable du technicien de mesure reste en mode avion pendant toute la mesure. Les coordonnées des différents points de mesure sont enregistrées à l'aide du GPS intégré dans les appareils de mesure.

Le setup pour les mesures d'itinéraires est présenté dans la Figure 2. Deux ExpoM-RF4 (appareil de mesure HF) et un ExpoM-ELF (appareil de mesure BF) sont placés dans une mallette à une distance définie du corps, ce qui minimise les interférences mutuelles. Des éléments en mousse garantissent que la position relative des appareils et la distance par rapport au dos de la personne restent constantes et répétables. Les deux ExpoM-RF sont utilisés avec des sensibilités différentes (valeurs de mesure saisies jusqu'à 6 V/m ou 20 V/m). Des informations plus détaillées sur la configuration figurent dans le rapport annuel 2021 [2].



Figure 2: Illustration du setup pour les mesures d'itinéraires. À gauche : Trois appareils de mesure (deux ExpoM-RF4 et un ExpoM-ELF) sont fixés dans une valise remplie de mousse. Centre : La valise est placée dans le sac à dos et fixée avec de la mousse. À droite : la personne chargée des mesures porte le sac à dos contenant les appareils de mesure à une distance de 20 cm de son corps et à une hauteur de 160 cm.

2.3.2 Mesures spot/habitat

Les mesures de logement se composent de trois mesures partielles à chaque lieu de mesure :

- Mesure à court terme : mesure stationnaire pendant 10 min avec un intervalle de mesure de 10s dans le salon sur un trépied non conducteur ("spot-local"). Les appareils de mesure sont placés à un endroit où les habitants passent régulièrement de longs moments, près du canapé ou de la table à manger. La position exacte est choisie de manière à ce que l'on puisse s'attendre à une faible atténuation par rapport aux sources externes (p. ex. vue dégagée sur les antennes de téléphonie mobile ou distance minimale par rapport aux lignes à haute tension).
- Mesure mobile : passage dans tout l'appartement pendant 10 min avec un intervalle de mesure de 6 s. Les appareils de mesure sont fixés sur un support d'épaule non conducteur ("spot-area"). La mesure mobile est effectuée en même temps que la mesure à court terme. L'intervalle de temps de saisie est alors réparti uniformément sur les pièces disponibles.
- Mesure à long terme : mesure stationnaire pendant 24 h avec un intervalle de mesure de 10 s dans la chambre à coucher, à proximité du lit et à la hauteur du lit ("spot-long").

Le setup pour les mesures spot est illustrée dans la Figure 3. Pour toutes les mesures partielles, un ExpoM-ELF et un ExpoM-RF (avec le réglage de sensibilité sensible de 6 V/m) sont utilisés en parallèle. Avant ou entre les mesures, des informations sur le lieu de mesure et les conditions environnementales sont saisies électroniquement sous forme de métadonnées à l'aide d'une application pour smartphone, voir Tableau 42 en annexe. Le téléphone portable du technicien de mesure est en mode avion pendant toute la durée de la mesure.



Figure 3 : Représentation du setup de mesure pour "spot-local" (à gauche), "spot-area" (au milieu) et "spot-24h" (à droite)

2.3.3 Mesures permanentes stationnaires

Pour les mesures stationnaires permanentes, un ExpoM-RF est placé à l'extérieur dans une valise en plastique résistante aux intempéries et relié à un mini-ordinateur par un câble USB. Le mini-ordinateur commande la lecture des données. Une électronique spécialement conçue à cet effet commute entre la lecture des données et la recharge de l'ExpoM-RF. On renonce à l'enregistrement des bandes de basse fréquence, car l'évolution temporelle de ces intensités de champ et les flux de courant dans les réseaux ou les caténaires sont couplés et suivent ainsi des modèles connus ou sont enregistrés par les exploitants. Les mesures permanentes stationnaires enregistrent des valeurs de mesure pendant 12 heures à un intervalle de 10 secondes. Une fois les 12 h écoulées, les données sont lues, ce qui entraîne une interruption de l'enregistrement des données d'environ 1 min.

La fixation de la mallette est réalisée autant que possible avec des matériaux non conducteurs. Les mini-ordinateurs sont reliés à Internet afin de transférer périodiquement les données de mesure dans la base de données. L'accès à Internet est réalisé autant que possible par câble. Lorsque cela n'est pas possible, on utilise le Wi-Fi ou des modems de téléphonie mobile 4G. Comme les mesures d'intensité de champ sont effectuées de manière sélective en termes de fréquence, les émissions qui se produisent pendant la transmission des données de l'appareil de mesure peuvent être supprimées lors de l'évaluation (Wi-Fi ou bandes de liaison montante (uplink)).

2.4 Sélection des sites de mesure

Ce chapitre décrit en résumé les procédures de sélection des sites de mesure pour les trois méthodes de mesure : 1. mesures d'itinéraires, 2. mesures spot/habitat, 3. mesures stationnaires permanentes.

2.4.1 La représentativité des mesures d'itinéraires

Figure 4 montre la répartition des 300 microenvironnements mesurés entre 2021 et 2023 dans toute la Suisse.

Aperçu des mesures d'itinéraires (Etat: Mai 2023)

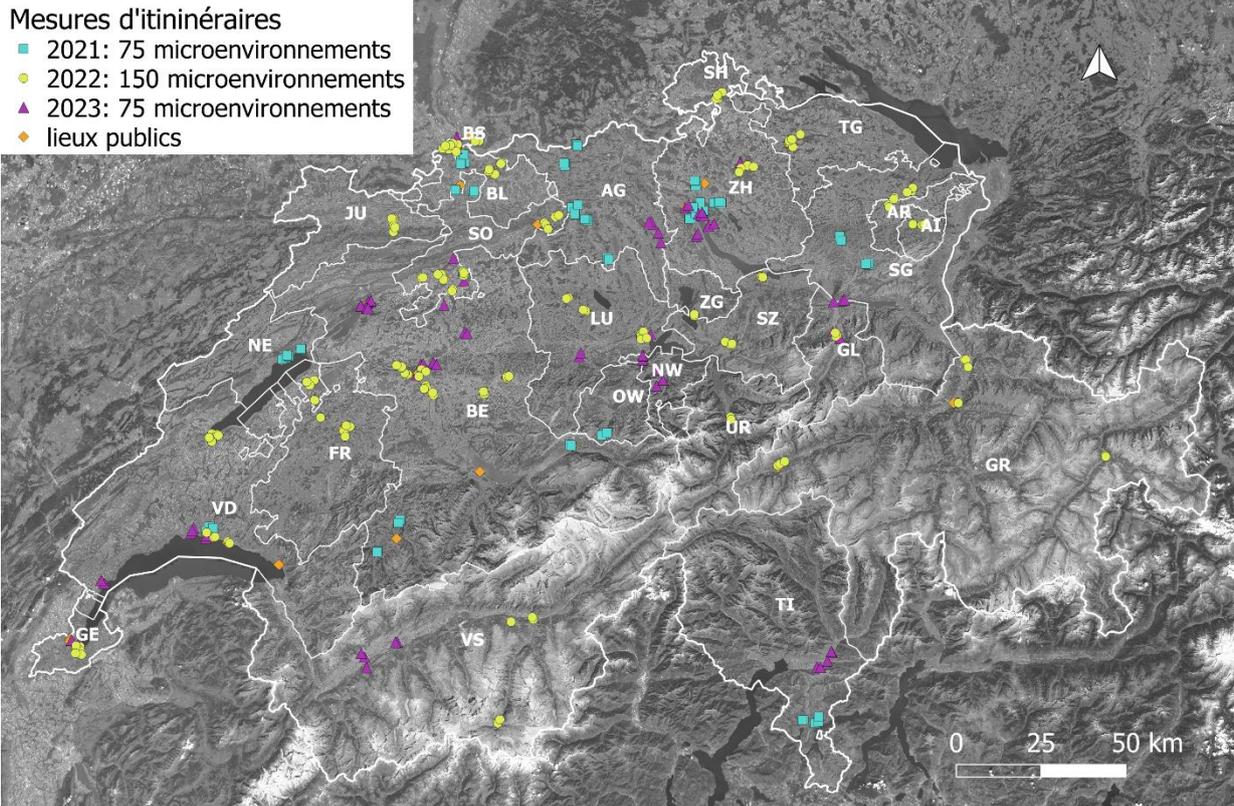


Figure 4: Carte des sites de mesures d'itinéraires (2021-2023). Dans ce rapport, les données de 150 microenvironnements de 2022 sont analysées (carrés jaunes). Les mesures d'itinéraires pour l'année 2021 (carrés bleus) ont été publiées dans le rapport annuel 2021, les mesures d'itinéraires pour l'année 2023 (triangles violets) seront publiées dans le rapport annuel 2023. Les mesures spot/habitat ont été définies en grande partie à l'intérieur de ces microenvironnements. Source de la carte : Arrière-plan - Swisstopo, <https://wmts.geo.admin.ch>.

La représentativité des 300 microenvironnements par rapport à la population suisse exposée aux sources de RNI est présentée dans le Tableau 5. Le pourcentage de la population suisse vivant dans un rayon donné autour d'une source de RNI est comparé au pourcentage de la population vivant à l'intérieur des microenvironnements dans un rayon donné autour d'une source de RNI dans le Tableau 5. Notre échantillon de 300 microenvironnements est sur-représentatif en termes d'exposition de la population aux antennes de téléphonie mobile (39.2% dans les 300 microenvironnements vs 13.7% en Suisse), car les villes urbaines ont été volontairement plus échantillonnées. Les autres sources de RNI sont équitablement représentées, ainsi que tous les cantons, régions linguistiques, et typologies de communes [3] avec des différences minimales.

Tableau 5: Aperçu des pourcentages de population résidant à proximité des principales sources de RNI dans toute la Suisse par rapport à la population résidant dans les 300 microenvironnements sélectionnés aux mêmes sources de RNI. (Etat : avril 2023).

Sources RNI	Nombre de personnes vivant à proximité d'une source de RNI	[%]	Nombre de personnes vivant à proximité d'une source de RNI	[%]
	En Suisse		Dans les 300 microenvironnements	
Antenne de téléphonie mobile	1175841	13.7	108724	39.2

(rayon compris entre 20 m et 150 m)				
Émetteurs radio/TV (rayon entre 200 m et 2 km)	23059	0.3	3238	1.2
Ligne à haute tension 36-150 kV (rayon de 100 m)	166568	1.9	3997	1.4
Ligne à haute tension 200 ou 380kV (rayon de 200 m)	171524	2.0	4343	1.6
Ligne de chemin de fer/tram (rayon de 20 m à 100 m)	828987	9.6	31619	11.4

Pour les mesures effectuées dans les lieux publics, le comportement habituel de la population a été pris en compte dans la mesure du possible. Ainsi, des mesures ont été effectuées dans des restaurants pendant la "pointe de midi" (téléphonie mobile, alimentation électrique) et peuvent donc être considérées comme représentatives. Toutefois, le fait d'utiliser de préférence les transports en commun pour se rendre dans les lieux publics (p. ex. restaurants) situés à proximité des gares n'est pas représentatif. Dans ces environnements de mesure, la part du champ magnétique du courant ferroviaire devrait être proportionnellement plus importante. On peut donc supposer que l'exposition dans ces lieux publics est quelque peu surestimée.

2.4.2 Mesures d'itinéraires en 2022

Ce rapport rapporte les données des mesures d'itinéraires effectuées en 2022 comprenant 150 microenvironnements (sur un total de 300 entre 2021 et 2023). La répartition de ces 150 microenvironnements est représentée en jaune dans la Figure 4. Quatre campagnes de mesures d'itinéraires ont été réalisées en 2022 :

1. 26 janv. - 15 fév. 2022
2. 26 avril - 18 mai 2022
3. 27 juil. - 12 août 2022
4. 25 oct. - 14 nov. 2022

Chaque campagne de mesure se compose de 7 à 8 jours de mesure pendant la journée, du lundi au vendredi (sauf jours fériés). Les mesures ont été effectuées entre 07h00 et 20h20. En 2022, 150 microenvironnements, 90 espaces publics et de nombreux transports en commun ont été mesurés.

Les 150 microenvironnements ont été regroupés en 11 types de microenvironnements : 10 centres-villes urbains, 10 quartiers résidentiels centraux urbains, 18 quartiers résidentiels non-centraux urbains, 21 centres-villes suburbains, 29 quartiers résidentiels suburbains, 13 centres-villes ruraux, 19 quartier résidentiels ruraux, 14 zones industrielles, 4 zones sportives et de loisirs, 9 zones agricoles, et 3 zones naturelles. Dans le rapport annuel 2021 [2], deux types de microenvironnement ont été désignés comme "centre-ville" et "quartier résidentiel". Dans le présent rapport, ces microenvironnements sont divisés en deux catégories : "suburbain" et "rural". La définition des microenvironnements est présentée dans le Tableau 6. Le nombre de microenvironnements et de lieux publics par municipalité est indiqué dans les Tableau 12 resp. Tableau 13.

Tableau 6: Définition, nombre d'échantillons et description des 11 types de microenvironnements en 2022.

Microenvironnement	Nombre (N)	Description
centre-ville urbain	10	Centre d'une grande ville, typiquement dans les centres-villes avec des bâtiments de grande hauteur (>4 étages)
quartier résidentiel central urbain	10	à proximité d'un centre-ville urbain avec des structures de bâtiments étroites et des hauteurs de bâtiments élevées (> 4 étages)
quartier résidentiel non-central urbain	18	à la périphérie d'un centre-ville urbain, avec une proportion d'espaces verts plus élevée qu'au centre et des bâtiments de hauteur moyenne (2-3 étages)
centre-ville suburbain	21	Centre suburbain, y compris les magasins et les restaurants, avec des bâtiments de 3-4 étages.
quartier résidentiel suburbain	29	Quartier résidentiel suburbain composée principalement d'appartements ou de maisons avec appartements
centre-ville rural	13	Centre du village, y compris les commerces et les restaurants, avec des bâtiments de 2 à 3 étages.
quartier résidentiel rural	19	Quartier résidentiel rural, composée principalement d'appartements ou de maisons
zone industrielle	14	Bâtiments commerciaux ou de production, indépendamment de la typologie des villes
zone de sport et de loisirs	4	Parcs urbains et terrains de sport dans les villes
zone agricole	9	Terres cultivées comme les champs ou les vignobles
zone naturelle	3	Forêts, prairies ou réserves naturelles

De même, nous avons regroupé les espaces publics en 8 types d'environnement de mesure : 29 gares, 23 arrêts de bus, 5 arrêts de tram, 11 supermarchés, 19 restaurants, 6 hautes écoles (EPF, UNI, HES), 5 écoles (deux primaires et deux secondaires, et un gymnase) et 1 bibliothèque.

Une analyse supplémentaire est effectuée dans les trains et l'exposition en fonction de l'occupation est analysée. Lors des mesures effectuées dans les trains, l'occupation a été jugée élevée, moyenne ou faible. L'occupation est définie par le nombre de places assises occupées autour de la personne mesurée pendant la mesure. Une occupation élevée, moyenne ou faible correspond respectivement à 75-100%, 25-75% et 0-25% des places assises occupées.

Une analyse supplémentaire sera effectuée dans les écoles. Dans le cadre de l'ensemble du projet (2021-2025), au moins 9 écoles feront l'objet de mesures, qui seront répétées après 2 ans. En 2022, des mesures ont été effectuées dans 5 écoles (deux écoles primaires, deux écoles secondaires, un gymnase). Dans chaque école, au moins trois situations de mesure différentes sont mesurées pendant 10 à 15 minutes pendant les heures de classe :

- Dans la cour d'école (intérieure ou extérieure) en dehors de la pause sans élèves
- Dans la cour d'école (intérieure ou extérieure) pendant la pause avec les élèves
- Dans les couloirs

Les mesures ne sont pas effectuées dans les salles de classe afin de ne pas perturber le fonctionnement de l'école. Il n'y a que peu de raisons de penser que l'exposition ambiante dans les salles de classe diffère sensiblement de celle dans les couloirs. Par ailleurs, d'autres études en cours s'intéressent à la mesure de l'exposition personnelle des élèves (p. ex. "Auswirkungen der Immissionen von Mobilfunkbasstationen

und Radiosensender auf das Befinden, Verhalten und kognitive Fähigkeiten von Jugendlichen : prospektive Kohortenstudie mit eingebetteter Panelstudie" [4]).

2.4.3 Mesures spot/habitat

Pour une sélection représentative des mesures dans les habitations privées, un échantillon aléatoire serait en principe souhaitable. Mais cela aurait l'inconvénient de manquer des situations de forte exposition, qui sont rares, vu le nombre relativement faible de logements sélectionnés. C'est pourquoi une double stratégie est appliquée lors de la sélection. Pour s'assurer que les expositions élevées dues à différents types de sources de RNI sont prises en compte, on recherche de manière ciblée les habitations où l'on peut s'attendre à des intensités de champ supérieures à la moyenne du fait de la proximité spatiale d'une source de RNI (p. ex. proximité d'une ligne de chemin de fer) due à cette source "primaire". Par rapport à d'autres sources de RNI "secondaires", le logement en question est toutefois choisi de manière quasi aléatoire. On peut donc supposer que l'ensemble de l'échantillon des sites de mesure spot concernant les sources secondaires externes de RNI est distribué de manière approximativement représentative de l'exposition de la population résidentielle dans les microenvironnements avec mesures spot. Dans la mesure du possible, les critères suivants ont été pris en compte lors de la sélection des sites :

- Le site est situé dans un microenvironnement
- A une certaine distance de la source primaire sélectionnée
- Au moins un site dans chaque canton
- Prise en compte des différents types de maisons

Les différents sites ont été sélectionnés de manière ciblée par rapport aux situations sources suivantes :

Tableau 7: Répartition des sites sélectionnés par rapport à une source primaire de RNI supposée avoir une influence sur la situation d'exposition.

Source primaire	Sous-type (p. ex. puissance d'émission / tension)	Distance [m]	Nombre prévu jusqu'en 2025	Nombre mesuré *)
Téléphonie mobile	Téléphonie mobile	50-150	32	11
Radio/TV	Jusqu'à 10 kW	100	5	0
	>10 à 50 kW	500	3	0
	de 50 à 200 kW	2'000	3	1
Électricité	Lignes à très haute tension 220/380 kV	200	7	4
	Lignes à haute tension 36-150kV	100	7	1
	Lignes à haute tension 1-36kV	50	5	0
	Lignes à basse tension 240/400V	20	3	0
	Sous-stations	200	2	0
	Postes de transformation	20	3	1
Chemin de fer	Une seule voie	50	7	3
	Deux voies	100	11	3
	Tunnel à une voie	50	3	1
	Tunnel à deux voies	100	4	0
	Tram	20	5	1
Total			100	26

*) total jusqu'au T1 / 2023 inclus

Pour chaque site, trois à cinq bâtiments sont définis, pour lesquels des contacts sont pris avec les propriétaires. La raison en est que tous les propriétaires ne peuvent pas être contactés ou ne souhaitent pas

autoriser les mesures dans leurs appartements. Pour une vingtaine de points de mesure dans des immeubles collectifs, il est prévu de mesurer à chaque fois sur deux étages. Il en résultera donc, d'ici fin 2025, un total d'environ 120 mesures spot sur 100 sites. Fin mars 2023, 31 mesures spot avaient été effectuées sur 26 sites.

L'information sur le type de maison est tirée du Registre des bâtiments et des logements (RegBL) de l'Office fédéral de la statistique (OFS), sur la base de la catégorie de bâtiment (GKAT ; contient des informations sur l'utilisation résidentielle) et de la classe de bâtiment (GKLAS ; contient des informations sur la classification des bâtiments) :

- Maison individuelle : bâtiment d'habitation avec un seul appartement
- Immeuble collectif : bâtiment d'habitation comprenant deux logements ou plus
- Usage résidentiel partiel : bâtiments d'habitation avec deux logements ou plus, qui contiennent également des locaux commerciaux selon le RegBL
- Ferme : bâtiment agricole à usage d'habitation

La Figure 5 montre le nombre de mesures réparties par type de maison pour les mesures déjà effectuées (vert), ainsi que le nombre total de mesures visé dans chaque cas pour obtenir un échantillon représentatif de la situation de logement de la population suisse (orange) :

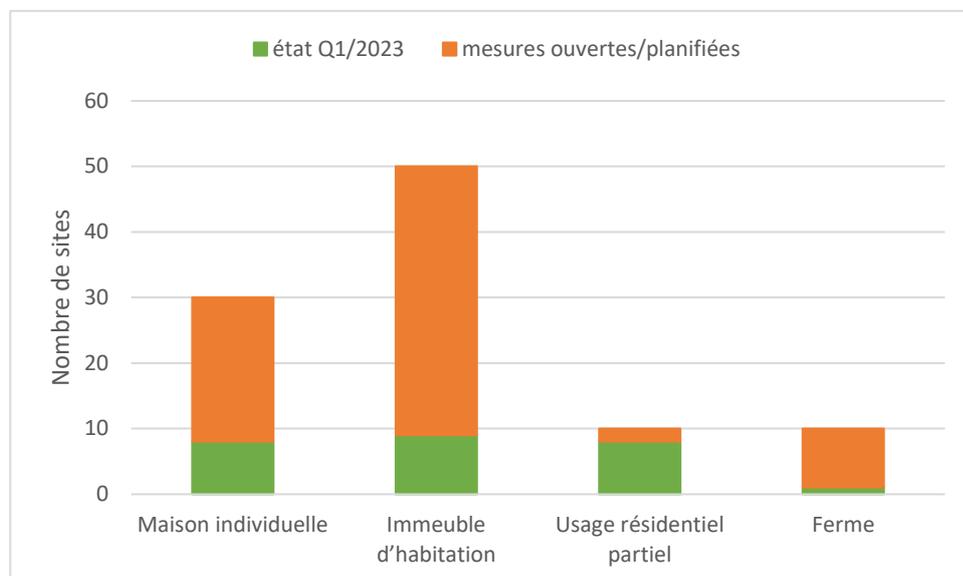


Figure 5: Répartition des points de mesure spot par type de bâtiment et état de mesure : déjà effectué (vert), en cours ou planifié (orange)

Aperçu des mesures spot (Etat: Mai 2023)

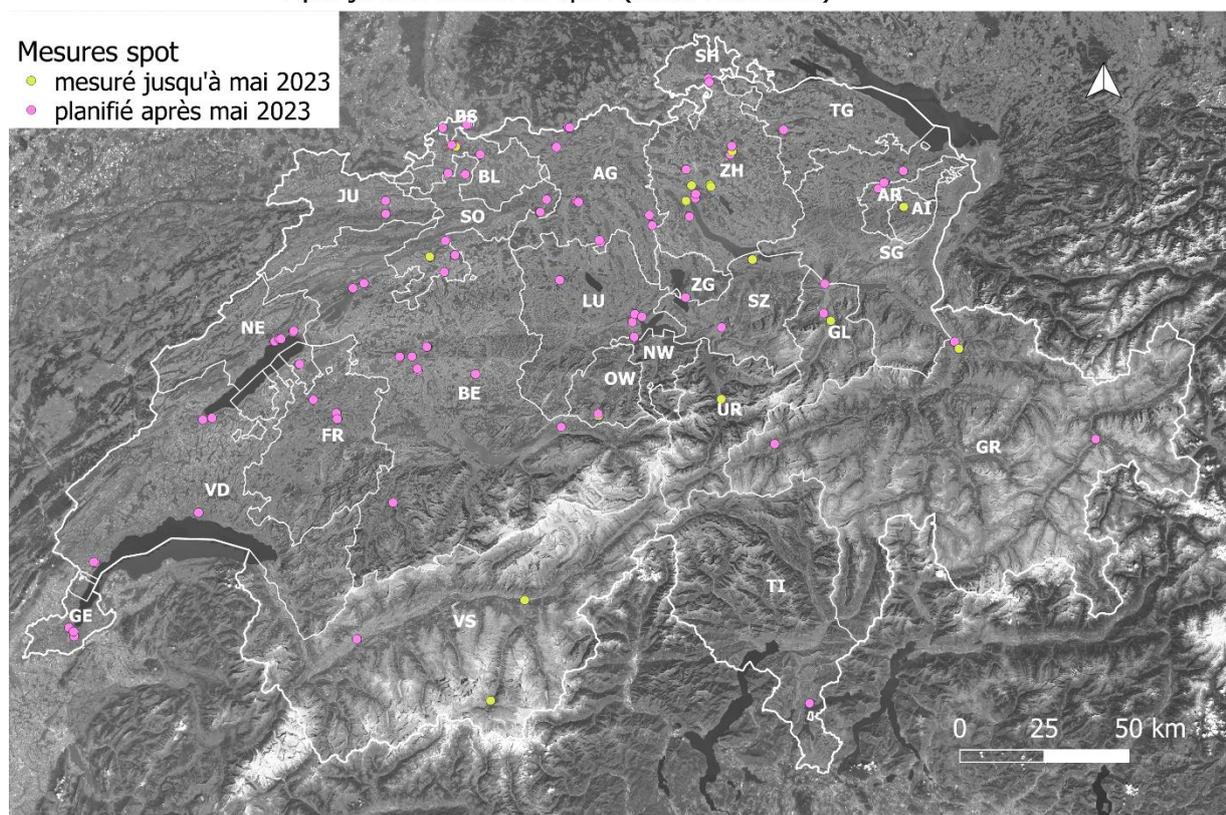


Figure 6: Répartition des 100 sites de mesure spot/habitat qui seront mesurés entre 2021 et 2025 dans toute la Suisse, les sites mesurés avant 2023 étant représentés en jaune et les sites mesurés après 2023 en rose. Des informations détaillées sur les sites et le type de bâtiment des données disponibles jusqu'à la date d'évaluation peuvent être consultées dans le tableau ci-dessous. Tableau 41 en annexe. Source de la carte : Arrière-plan - Swisstopo, <https://wmts.geo.admin.ch>

2.4.4 Mesures permanentes stationnaires

Les mesures fixes permanentes sont exploitées sur des sites d'entreprises du consortium du projet afin de pouvoir garantir la sécurité (dommage, accessibilité, effets perturbateurs) et la maintenance (infrastructure, alimentation électrique, connexion Internet). Les sites ont été choisis en fonction des sources de HF à proximité des sites et de la typologie de la communauté. Les sites de mesure sur lesquels des mesures permanentes fixes sont effectuées sont présentés dans le Tableau 8 et dans la Figure 7. Outre les différentes typologies de communes, différentes situations de sources sont également couvertes : les sites de Deitingen et d'Aarau se caractérisent par de nombreuses sources HF proches, les sites d>Allschwil et de Zürich sont dans la zone d'influence d'antennes TV/radio de grande puissance. Pour les sites d>Allschwil, de Zürich et d'Aarau, des zones publiques et des LUS se trouvent à proximité immédiate. De plus, les cinq sites sont situés aussi bien dans des zones à très forte densité de population que dans des zones peu peuplées.

Les cinq stations de mesure sont opérationnelles depuis le 1er janvier 2023 et enregistrent en continu les immissions HF.

Aperçu des mesures permanentes stationnaires

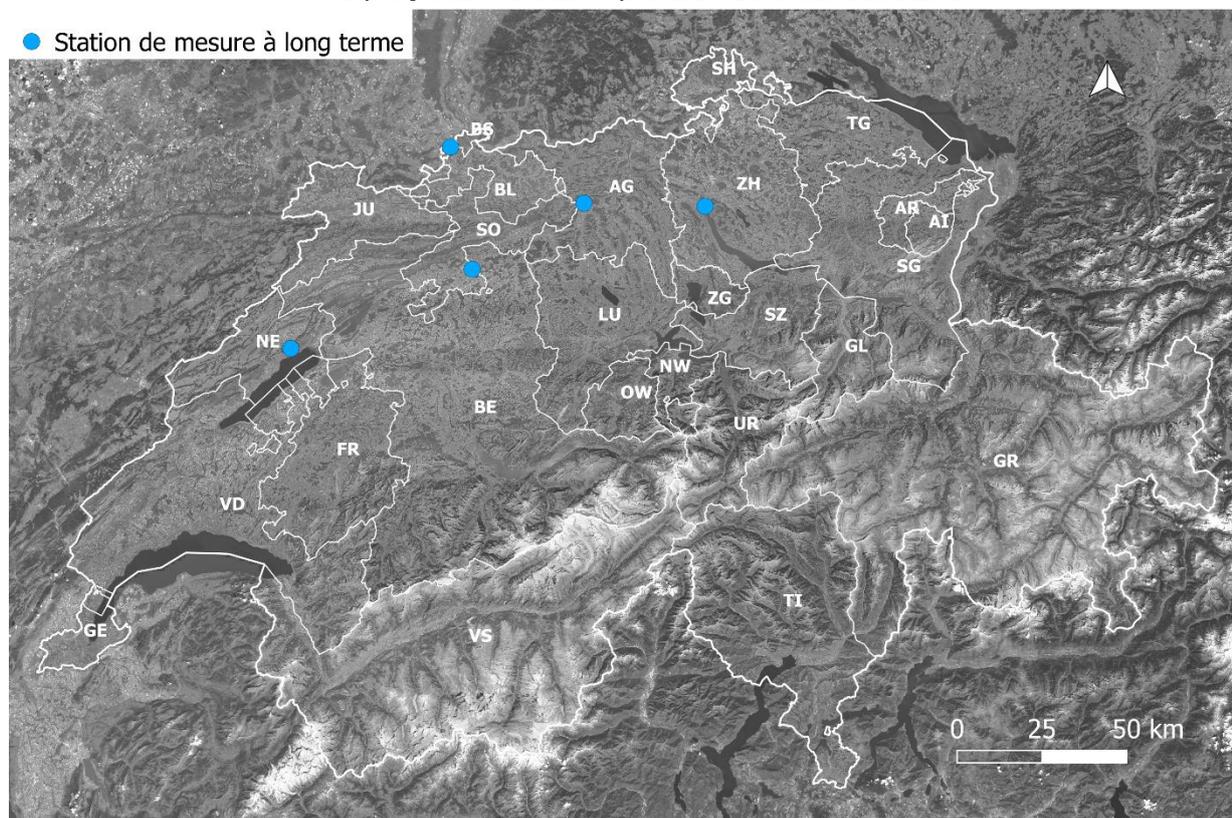


Figure 7: Carte de la Suisse avec les 5 sites de mesure (points bleus) pour les mesures stationnaires permanentes. Source arrière-plan : Swisstopo, <https://wmts.geo.admin.ch>

Tableau 8: Sites pour les mesures permanentes stationnaires.

Site de mesure	Adresse	Position de l'instrument de mesure	Typologie des villes
Fields at Work - Centre ETH Bâtiment ET	Gloriastrasse 35 8092 Zürich	Sur le toit	Centre-ville urbain
Swiss TPH - Belo Horizonte	Rue de la Croix 2 4123 Allschwil	Sur le toit	Zone industrielle
G+P - Aarau	Entfelderstrasse 45 5000 Aarau	Sur le toit	Quartier résidentiel central urbain
G+P - Deitingen	Schachenstrasse 5 4543 Deitingen	Terrasse sur le toit	Quartier résidentiel urbain non-central
G+P - Neuchâtel	Avenue du Peyrou 8 2000 Neuchâtel	Terrasse sur le toit	Quartier résidentiel central urbain

2.5 Gestion des données

2.5.1 Fichiers de mesure et base de données

Les données brutes générées par les mesures peuvent être classées en deux catégories : Les données de mesure et les métadonnées. Les données de mesure sont saisies au niveau du point de mesure et contiennent les valeurs de mesure BF et HF. Les métadonnées décrivent les données de la mesure, comme par exemple les informations sur l'appareil de mesure ou le site de mesure, et sont collectées au

niveau de la mesure. Pour représenter cela et permettre, outre la sauvegarde, le suivi et la documentation nécessaires, l'agrégation des données, les données sont gérées dans une base de données centrale. Comme le montre la Figure 8 celle-ci se compose de trois niveaux :

- Niveau 0 : Stockage des données des fichiers bruts dans un répertoire FTP. Il s'agit d'une part de l'interface d'importation des données de mesure générées par les instruments de mesure et d'autres métadonnées compilées, et d'autre part de la documentation des données brutes originales non modifiées ("raw"). Dans une étape de prétraitement, ces fichiers bruts sont préparés pour chaque mesure (attribution aux mesures, horodatage, signal GPS, etc.) et sont ainsi ("pro") prêts à être importés dans le niveau 1.
- Niveau 1 : stockage de données regroupées et unifiées dans trois tableaux (voir Figure dataElf", "dataRf" et "metaMeas") d'une base de données MySQL. Après la lecture automatisée depuis le niveau 0. les données de mesure sont préparées et traitées ici (voir section 2.5.2). Cette opération est effectuée par des scripts R externes. Un suivi direct de toutes les opérations sur les données est assuré d'une part par la gestion intégrée des versions, d'autre part par la sauvegarde redondante (pas d'écrasement) des données générées. En plus du traitement automatisé des données, des tests manuels sont effectués pour contrôler la qualité.
- Niveau 2 : niveau d'agrégation de la base de données MySQL. Les données préparées du niveau 1 sont filtrées en fonction des analyses souhaitées et agrégées dans l'espace, dans le temps ou par catégorie, etc. Cela donne la possibilité de générer et de sauvegarder périodiquement des analyses comparatives reproductibles.

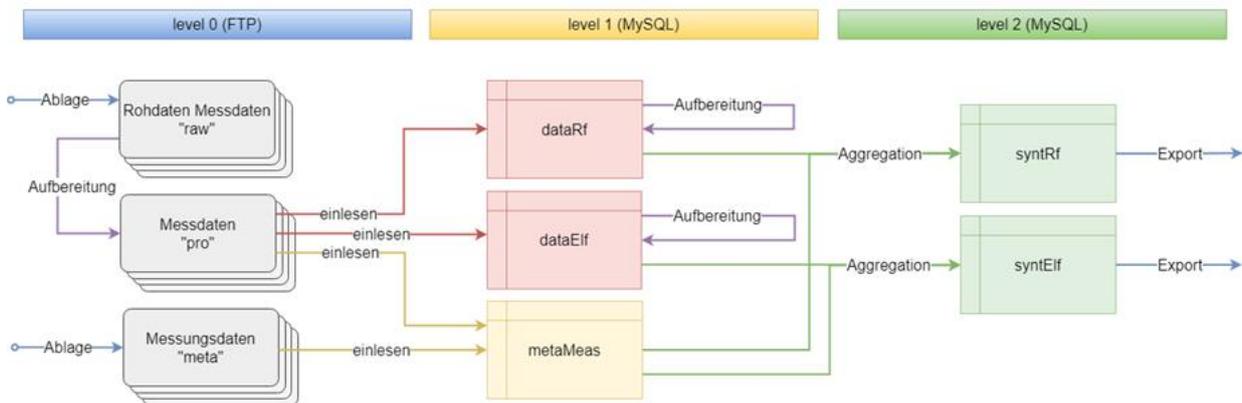


Figure 8: Schéma simplifié de la structure de la base de données

2.5.2 Préparation des données

La préparation des données et l'analyse des mesures d'itinéraires et de spots sont fondamentalement identiques. Pour les mesures d'itinéraires, on utilise le protocole d'activité (cf. section 2.3.1), les données de mesure sont attribuées au microenvironnement correspondant et stockées en conséquence dans la base de données. Pour les mesures spot/habitat, les données sont attribuées de manière analogue aux trois mesures partielles. Dans un premier temps, on vérifie visuellement la plausibilité des données et on identifie les erreurs dans le déroulement de la mesure (comme par exemple l'interruption du processus de mesure). Ensuite, à l'aide d'analyses de corrélation selon [5] pour corriger une éventuelle diaphonie (crosstalk) entre des bandes de fréquences voisines (pour une description détaillée de la correction du crosstalk, voir le chapitre 2.2.6). Pour la suite de l'analyse des données, les bandes sont agrégées en

différents groupes de fréquences et additionnées au carré à l'intérieur de ceux-ci. La définition des groupes de fréquences se fait sur la base de leur application technique ou de leur origine.

Les bandes HF ont été réparties en sept groupes. Les numéros de ces bandes de fréquences sont indiqués dans le Tableau 2:

- Radiodiffusion : cette catégorie comprend la radio, le DAB, la TV dans les bandes de fréquences 1 à 8.
- Téléphonie mobile Uplink (émissions des appareils terminaux) : Cela correspond aux numéros de bande 9, 13, 14, 17, 20, 23.
- Téléphonie mobile Downlink (émissions des stations de base) : Cela correspond aux numéros de bande 11, 12, 15, 16, 18, 21, 25.
- Téléphonie mobile TDD : les bandes de fréquences TDD (Time Division Duplexing) (743-753 MHz, 2570-2615 MHz et 3500-3800 MHz), qui sont utilisées de manière décalée dans le temps pour la liaison montante (Uplink) et la liaison descendante (Downlink), constituent un cas particulier. Cela signifie qu'en raison de la fréquence, aucune répartition entre le Down- et l'Uplink n'est possible. On peut supposer que lors de mesures à l'extérieur (sans téléphone portable personnel), l'exposition est dominée par la liaison descendante, alors que dans les transports publics et dans les espaces intérieurs accessibles au public, l'Uplink devrait également jouer un rôle important. Cela correspond aux numéros de bande 10, 24, 26, 27, 28.
- WLAN : Les numéros de bande 22 et de 29 à 35.
- Téléphone sans fil (DECT) : le numéro de bande 19.
- CEM-HF totale¹ ($E_{res,i}$): Somme quadratique de toutes les bandes mesurées :

$$E_{res,i} = \sqrt{\sum_{f \in \{1, \dots, 35\}} E_{f,i}^2} \quad (1)$$

Où

- $E_{f,i}$ représente une valeur HF de l'intensité de champ électrique au point i avec la bande de fréquence numéro f ;
- $E_{res,i}$ représente la résultante de l'intensité de champ électrique au point i .

¹ Il convient de noter que cette forme de calcul de la moyenne n'est physiquement pertinente que pour les valeurs efficaces (RMS). Pour simplifier la présentation, nous utiliserons néanmoins la même méthode pour calculer les sommes ou les moyennes des valeurs de crête (peak). Cependant, les valeurs de crête de différentes fréquences apparaissent en général à différents moments au cours d'un intervalle de mesure. Cela signifie d'une part que la somme des valeurs de crête pour différentes fréquences conduit à une surestimation des valeurs de crête indiquées. D'autre part, il convient de noter que pendant un intervalle de mesure de six secondes, toutes les bandes de fréquence sont balayées les unes après les autres. Ainsi, des peaks de courte durée peuvent être manqués, ce qui contribue à une sous-estimation des valeurs de peaks. La procédure choisie a l'avantage de constituer une mesure robuste qui reflète de manière pertinente la dynamique temporelle typique entre la valeur moyenne et les valeurs de crête (facteur dit de crête).

Pour les champs magnétiques à basse fréquence, le regroupement de fréquences suivant est effectué (numéros de bande selon Tableau 3) :

- Courant ferroviaire : la bande principale correspond à la bande numéro 2 et l'harmonique se trouve à l'intérieur de la bande numéro 3. On a renoncé à créer une bande spécifique pour l'harmonique, car son amplitude était négligeable lors des mesures de test.
- Courant domestique : la bande principale correspond à la bande numéro 4 et les harmoniques sont les bandes numéro 6 et 8.
- Courant ondulé Tram (courant triphasé redressé) : la bande principale correspond au numéro de bande 10 et les harmoniques sont les numéros de bande 12 et 14.
- Total CM-BF ($B_{res,i}$): Cela correspond à la somme quadratique des trois groupes de bandes précédents, c'est-à-dire sans tenir compte des bandes intermédiaires non spécifiques :

$$B_{res,i} = \sqrt{\sum_{f \in \{2,4,6,8,10,12,14\}} B_{f,i}^2} \quad (2)$$

où

- $B_{f,i}$ représente une valeur BF de la densité de flux magnétique au point i avec la bande de fréquence numéro f ;
- $B_{res,i}$ représente la résultante de la densité de flux magnétique au point i .

2.5.3 Statistiques descriptives

Pour les mesures HF, l'analyse des données est effectuée à la fois pour les valeurs RMS et les valeurs de crête (« peak »), ainsi que séparément pour chaque bande de fréquence fonctionnelle. Pour les mesures BF, les valeurs RMS sont mesurées et analysées. Comme on ne sait pas quelles données d'exposition sont les plus pertinents sur le plan biologique, une multitude de mesures d'exposition possibles sont évaluées. Toutes les données sont agrégées par type d'environnement de mesure ou par source primaire et la distribution des mesures est montrée avec des « boxplots » pour les valeurs HF (RMS et peak) et les valeurs BF (RMS). Les statistiques cumulatives suivantes sont calculées pour les données agrégées par type d'environnement de mesure : Minimum, maximum, différents percentiles (05e, 25e, 50e (médiane), 75e, 95e), moyennes arithmétiques et quadratiques. La moyenne arithmétique et la moyenne quadratique (RMS) pour les valeurs HF ainsi que pour les valeurs BF sont calculées selon les équations (3), (4), (5) et (6).

$$\bar{E} = \frac{1}{n} \sum_i^n E_{res,i} \quad (3)$$

$$E^{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_i^n E_{res,i}^2} \quad (4)$$

$$\bar{E} = \frac{1}{n} \sum_i^n E_{res,i} \quad (5)$$

$$B^{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_i^n B_{res,i}^2} \quad (6)$$

où

- n représente le nombre de données collectées dans l'environnement de mesure ;
- $E_{res,i}$ représente la résultante de l'intensité de champ électrique au point i ;
- \bar{E} est la valeur moyenne arithmétique de l'intensité de champ électrique dans l'environnement de mesure ;
- E^{RMS} est la valeur moyenne quadratique de l'intensité de champ électrique dans l'environnement de mesure ;
- $B_{res,i}$ représente la résultante de la densité de flux magnétique au point i ;
- \bar{B} est la valeur moyenne arithmétique de la densité de flux magnétique dans l'environnement de mesure ;
- B^{RMS} est la valeur moyenne quadratique de la densité de flux magnétique dans l'environnement de mesure ;

La contribution moyenne des sources pour un groupe de fréquences donné est déterminée comme suit :

$$prop_{HF\ source} = \frac{\frac{1}{n} \sum_i^n E_{HF\ source,i}^2}{E^{RMS^2}} \quad (7)$$

$$prop_{NF\ Quelle} = \frac{\frac{1}{n} \sum_i^n B_{NF\ source,i}^2}{B^{RMS^2}} \quad (8)$$

où

- n représente le nombre de données collectées dans l'environnement de mesure ;
- E^{RMS} est la valeur moyenne quadratique de l'intensité de champ électrique dans l'environnement de mesure ;
- $E_{HF\ source,i}$ désigne la résultante de l'intensité de champ électrique correspondant au groupe de fréquences défini au chapitre 2.4.2 (par ex. liaison descendante, liaison montante, TDD, radiodiffusion, WLAN, DECT) ;

- $prop_{HF\ source}$ est la contribution moyenne du groupe de fréquences HF au champ électrique total dans un environnement de mesure ;
- B^{RMS} est la valeur moyenne quadratique de la densité de flux magnétique dans l'environnement de mesure ;
- $B_{NF\ source,i}$ désigne la résultante de la densité de flux magnétique correspondant au groupe de fréquences défini au chapitre 2.4.2 (par ex. courant ferroviaire, alimentation électrique, courant ondulé des trams) ;
- $prop_{HF\ source}$ est la contribution moyenne du groupe de fréquences BF à la densité de flux magnétique totale dans un environnement de mesure ;

En plus des analyses descriptives par type d'environnement de mesure/source primaire, la moyenne quadratique de l'intensité de champ électrique selon l'équation (4) et la moyenne arithmétique de la densité de flux magnétique selon l'équation (5) ont également été calculées pour chaque environnement de mesure/source primaire. Parmi les N environnements de mesure du même type, on représente ensuite le minimum, le maximum et la moyenne arithmétique de la valeur moyenne quadratique de l'intensité de champ électrique (9) et la moyenne arithmétique de la valeur moyenne de la densité de flux magnétique (10).

$$\overline{E_{ME}} = \frac{1}{N_{tot}} \sum_{N=1}^{N_{tot}} E_N^{RMS} \quad (9)$$

$$\overline{B_{ME}} = \frac{1}{N_{tot}} \sum_{N=1}^{N_{tot}} \overline{B}_N \quad (10)$$

où

- N_{tot} est le nombre d'environnements de mesure du même type ;
- E_N^{RMS} est la valeur moyenne quadratique de l'intensité de champ électrique dans l'environnement de mesure N
- $\overline{E_{ME}}$ est la moyenne arithmétique des E_N^{RMS} d'un type d'environnement de mesure (ME) ;
- \overline{B}_N est la valeur moyenne arithmétique de la densité de flux magnétique dans l'environnement de mesure N
- $\overline{B_{ME}}$ est la moyenne arithmétique des \overline{B}_N d'un type d'environnement de mesure (ME) ;

3. Résultats

3.1 Mesures d'itinéraires

Ce chapitre analyse les mesures effectuées dans 150 microenvironnements, dans des lieux publics et dans les transports en 2022. Un aperçu général est donné pour les mesures d'exposition aux HF et aux BF représentant l'ensemble des mesures effectuées. Une analyse plus détaillée de certains lieux spécifiques (train par occupation, écoles) est donnée pour les mesures HF et BF. Une comparaison de toutes les mesures avec les valeurs limites d'immissions (VLI) est ensuite effectuée.

3.1.1 Aperçu général - Exposition aux HF

Figure 9 et Figure 10 montrent, sur le côté gauche, sous forme de «boxplot», la répartition des valeurs RMS ou des valeurs de crête (peak) par type d'environnement de mesure. Sur le côté droit, les contributions relatives moyennes des six sources HF sont colorées : Downlink (orange), Uplink (bleu foncé), Time Division Duplex TDD (violet), Radiodiffusion (vert), WLAN (bleu clair), DECT (rouge).

Dans les microenvironnements, les valeurs médianes les plus élevées ont été mesurées dans les zones industrielles (RMS : 0.29 V/m, peak : 1.71 V/m), suivies par les centres-villes urbains (RMS : 0.24 V/m, peak : 1.21 V/m) et les quartiers résidentiels urbains centraux (RMS : 0.20 V/m : peak : 1.10 V/m). Les valeurs médianes diminuent à mesure que l'urbanisation diminue. Les valeurs médianes les plus basses ont été mesurées dans les centres-villes ruraux (RMS : 0.08 V/m : peak : 0.30 V/m) et dans les zones naturelles (RMS : 0.07 V/m : peak : 0.22 V/m). Dans les lieux publics, les valeurs médianes sont les plus élevées aux arrêts de tram (RMS : 0.38 V/m, peak : 1.96 V/m) et aux arrêts de bus (RMS : 0.35 V/m, peak : 1.83 V/m), notamment parce que ces lieux se trouvent à l'extérieur. En revanche, les valeurs médianes dans les supermarchés (RMS : 0.06 V/m, peak : 0.46 V/m) et les bibliothèques (RMS : 0.05 V/m, peak : 0.23 V/m) sont relativement faibles, car ils se trouvent dans des espaces fermés. En ce qui concerne les transports en commun, les valeurs RMS et les valeurs de crête médianes sont similaires dans le métro, le tram et les trains (RMS : 0.24-0.29 V/m, crête : 1.50-1.58 V/m).

Dans la plupart des types d'environnement de mesure, la plus grande partie des sources de CEM-HF est le Downlink (RMS : 39-96%, peak : 62-94%). L'Uplink a une part relativement élevée dans le métro (RMS : 67%, peak : 67%) et les trains (RMS : 35%, peak : 29%). La contribution du WLAN était la plus élevée dans le métro (RMS : 22%, peak : 24%) et la bibliothèque (RMS : 23%, peak : 89%), avec des proportions encore plus élevées pour les valeurs de peak dans la bibliothèque. Le Time Division Duplex (TDD), dans le contexte de la 5G, a généralement une contribution relativement faible dans tous les microenvironnements. La contribution TDD la plus élevée a été observée dans les bus, les trams et les trains (RMS : <6%, peak : 19-27%), tandis que la proportion est plus élevée pour les valeurs de peak, ce qui reflète une plus grande dynamique de la technologie mobile 5G. Les DECT (téléphones sans fil) sont négligeables dans tous les environnements de mesure (<1%), sauf dans les centres-villes urbains (RMS : 12%, peak : 0%) et les supermarchés (RMS : 11%, peak : 10%). La radiodiffusion, principalement le Digital Audio Broadcasting (DAB) et la modulation de fréquence (FM), domine dans les centres-villes ruraux (RMS : 48%, peak : 26%) - mais ici en raison de la faible contribution de l'exposition au Downlink - et dans les zones agricoles (RMS : 97%, peak : 95%). La contribution élevée de la radiodiffusion dans les zones agricoles est due aux zones à forte exposition à la radiodiffusion, qui sont décrites plus en détail à la fin de ce chapitre.

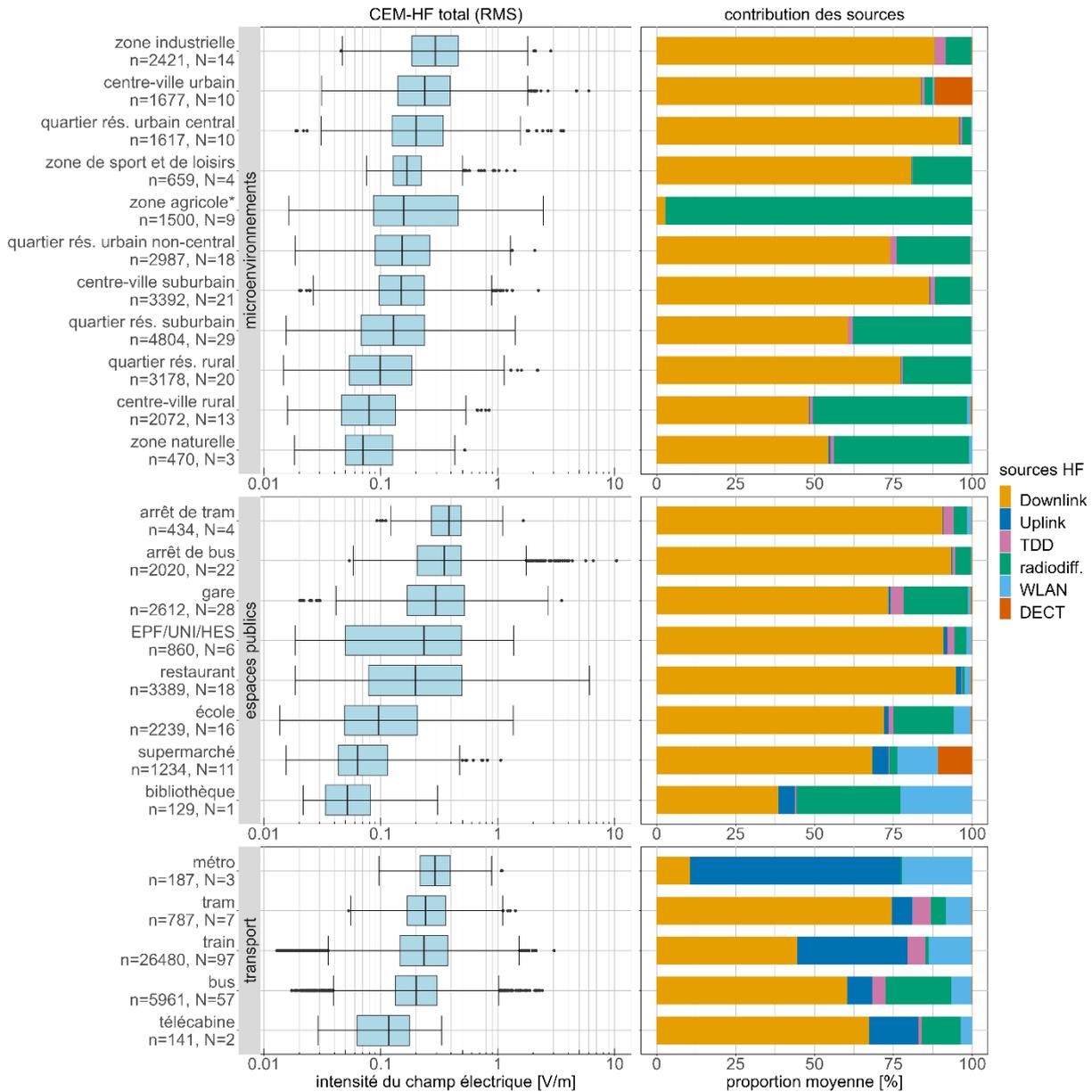


Figure 9: A gauche : Distribution des valeurs de mesure RMS CEM-HF en 2022 par type d'environnement de mesure. La ligne médiane, les boîtes, les "whiskers" et les points indiquent respectivement la médiane, les 25e et 75e percentiles, 1,5 fois l'écart interquartile (1,5*IQR) et les « outliers ». A droite : la contribution moyenne des sources pour chaque type d'environnement de mesure. Les groupes de bandes de fréquences suivants sont pris en compte : Downlink, Uplink, Time Division Duplexing (TDD), diffusion, WLAN et téléphones sans fil (DECT). "n" désigne le nombre de points de données par type d'environnement de mesure. "N" désigne le nombre d'environnements de mesure mesurés du même type. Les données statistiques et les contributions des sources sont présentées dans le Tableau 14, resp. Tableau 15.

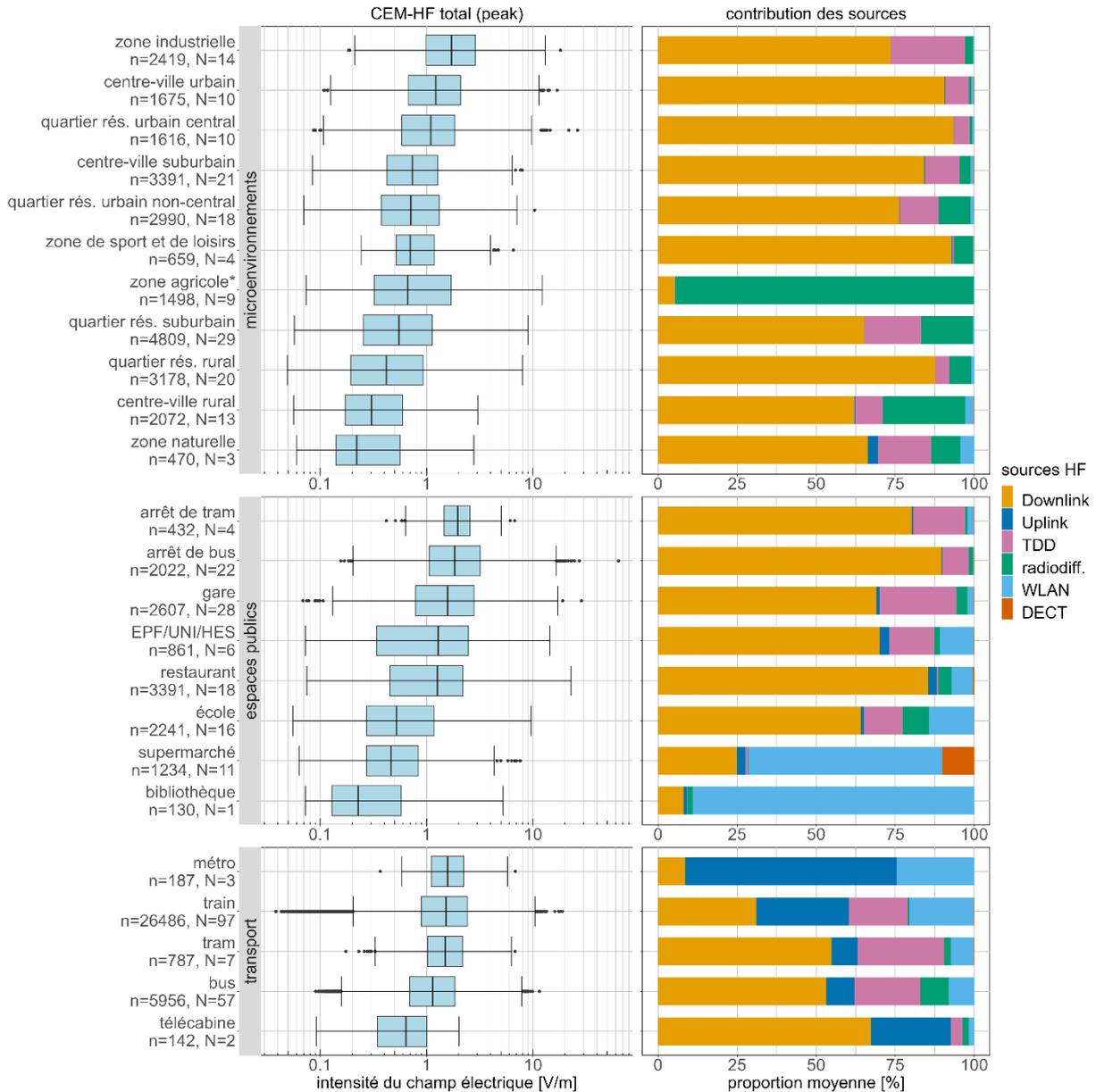


Figure 10: A gauche : Distribution des mesures de CEM-HF de crête en 2022 par type d'environnement de mesure. La ligne médiane, les boîtes, les "whiskers" et les points indiquent respectivement la médiane, les 25e et 75e percentiles, 1.5 fois l'écart interquartile (1.5*IQR) et les « outliers ». A droite : la contribution moyenne des sources pour chaque type d'environnement de mesure. Les groupes de bandes de fréquences suivants sont pris en compte : Downlink, Uplink, Time Division Duplexing (TDD), diffusion, WLAN et téléphones sans fil (DECT). "n" désigne le nombre de points de données par type d'environnement de mesure. "N" désigne le nombre d'environnements de mesure mesurés du même type. Les données statistiques et les contributions des sources sont présentées dans le Tableau 16 resp. Tableau 17.

Figure 11 et Figure 12 montrent les répartitions de l'exposition moyenne de l'exposition totale aux HF pour les valeurs RMS et les valeurs de crête par type d'environnement de mesure. Le minimum (carré bleu) et le maximum (triangle rouge) indiquent respectivement la valeur RMS la plus basse et la plus élevée par environnement de mesure individuel. La moyenne des valeurs RMS (losange noir) est calculée selon l'équation (9).

Dans les microenvironnements, les valeurs moyennes les plus élevées de l'exposition moyenne ont été mesurées dans les centres-villes urbains (RMS : 0.46 V/m, peak : 2.52 V/m). L'exposition moyenne maximale se trouve dans une zone agricole avec un émetteur radio (RMS : 1.26 V/m, peak : 5.71 V/m). Les mesures effectuées dans les zones agricoles sont décrites en détail à la fin de ce chapitre. Dans les zones publiques, la valeur moyenne la plus élevée de l'exposition moyenne a été mesurée aux arrêts de bus (RMS : 0.54 V/m, peak : 2.52 V/m). L'exposition moyenne maximale se trouve également dans un arrêt de bus (RMS : 2.09 V/m, peak : 12.38 V/m). Dans les transports publics, l'exposition moyenne est la plus élevée dans les métros (RMS : 0.37 V/m, peak : 2.02 V/m) et les trains (RMS : 0.34 V/m, peak : 2.10 V/m). En général, le même ordre d'exposition que dans la Figure 9 et dans la Figure 10 est observé, bien que la méthode de calcul soit différente.

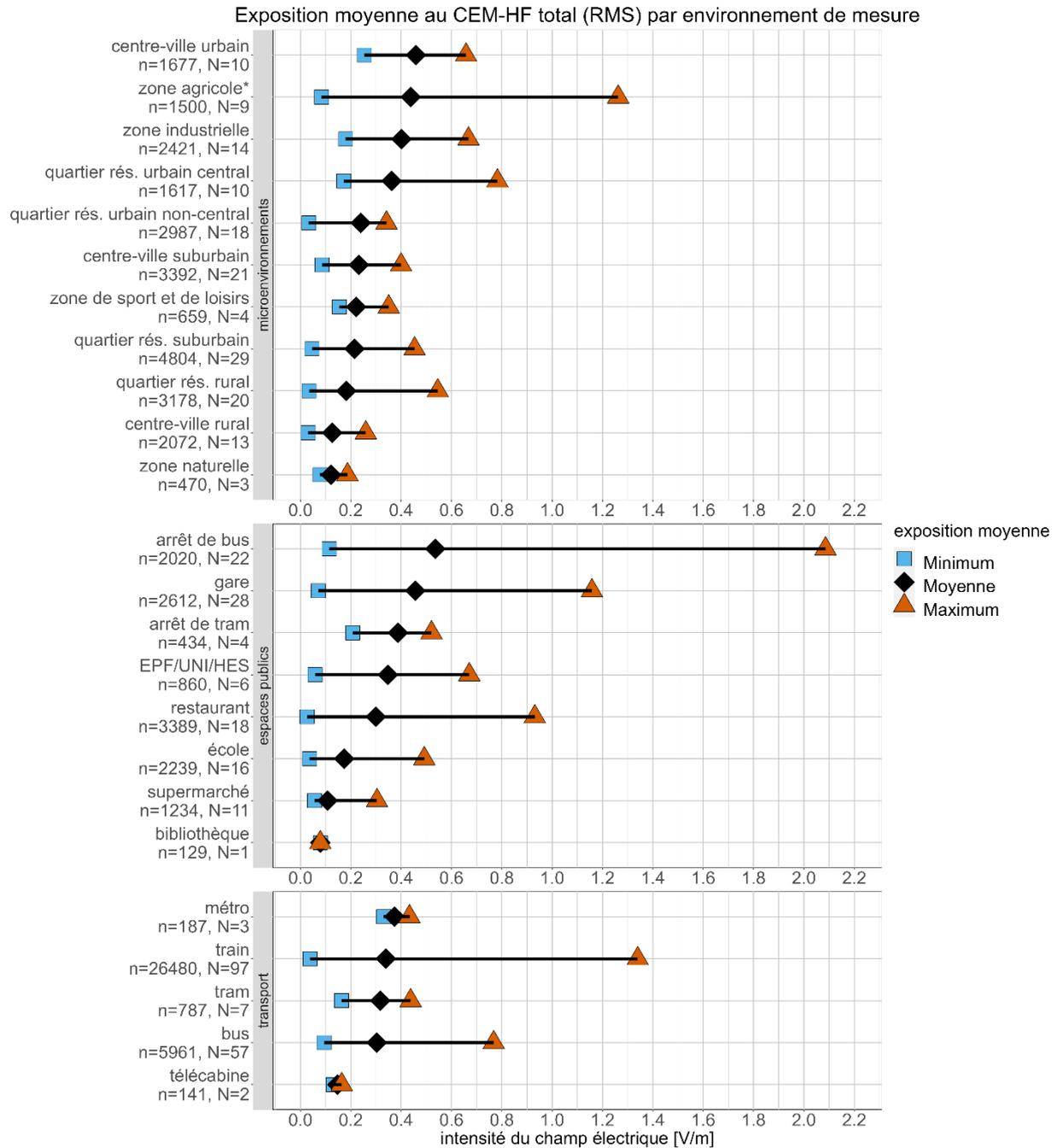


Figure 11: Répartition de l'exposition moyenne des mesures RMS CEM-HF des différents environnements de mesure. La valeur moyenne de la valeur efficace (losange noir) est calculée selon l'équation (9). Le minimum (carré bleu) et le maximum (triangle rouge) indiquent respectivement la valeur RMS la plus basse et la plus élevée par environnement de mesure individuel. "n" désigne le nombre de points de données par type d'environnement de mesure. "N" désigne le nombre d'environnements de mesure mesurés du même type. Les données sont présentées dans le Tableau 18.

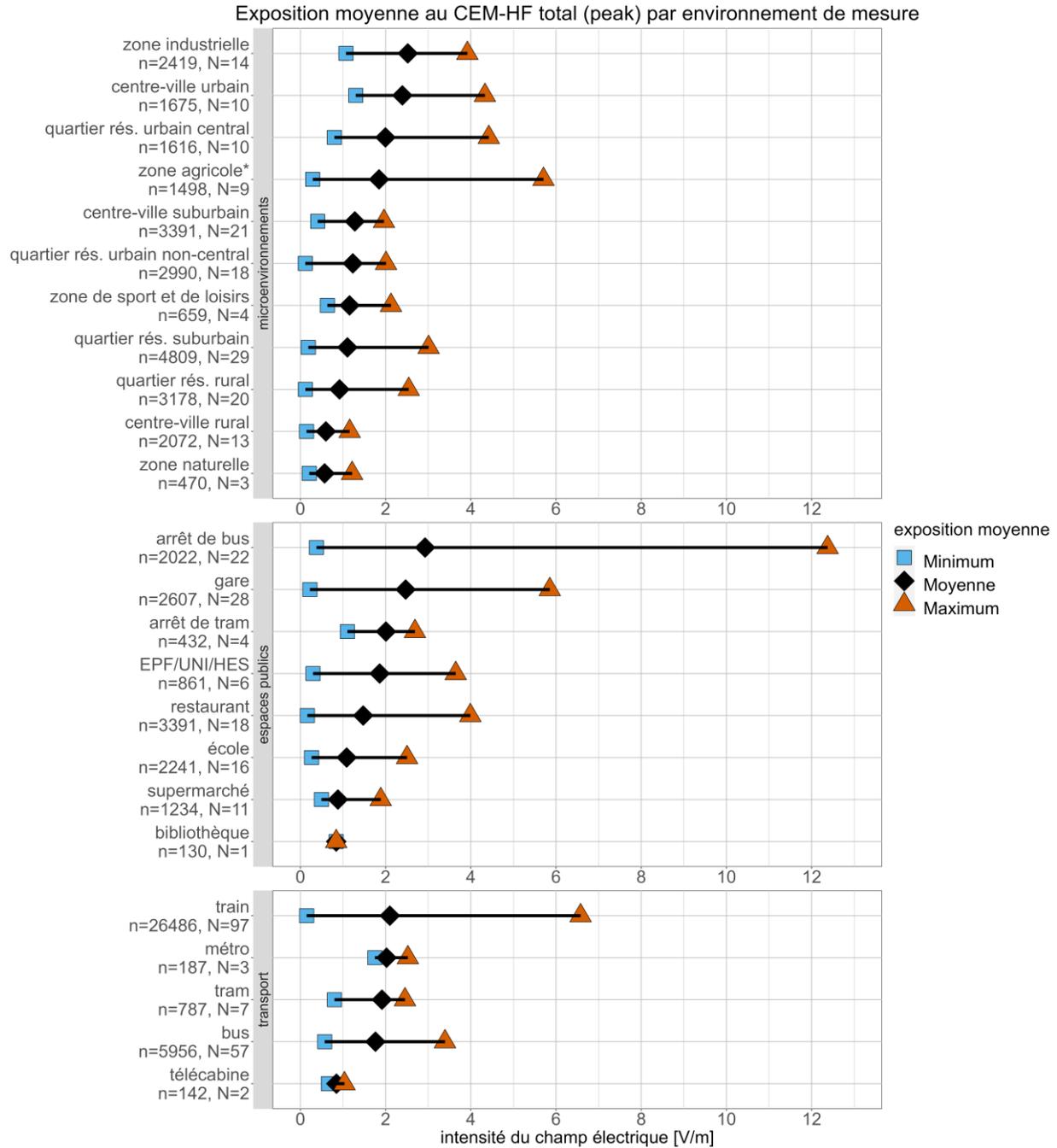


Figure 12: Répartition de l'exposition moyenne des mesures CEM-HF de crête des différents environnements de mesure. La valeur moyenne de la valeur efficace (losange noir) est calculée selon l'équation (9). Le minimum (carré bleu) et le maximum (triangle rouge) indiquent respectivement la valeur RMS la plus basse et la plus élevée par environnement de mesure individuel. "n" désigne le nombre de points de données par type d'environnement de mesure. "N" désigne le nombre d'environnements de mesure mesurés du même type. Les données sont présentées dans Tableau 19.

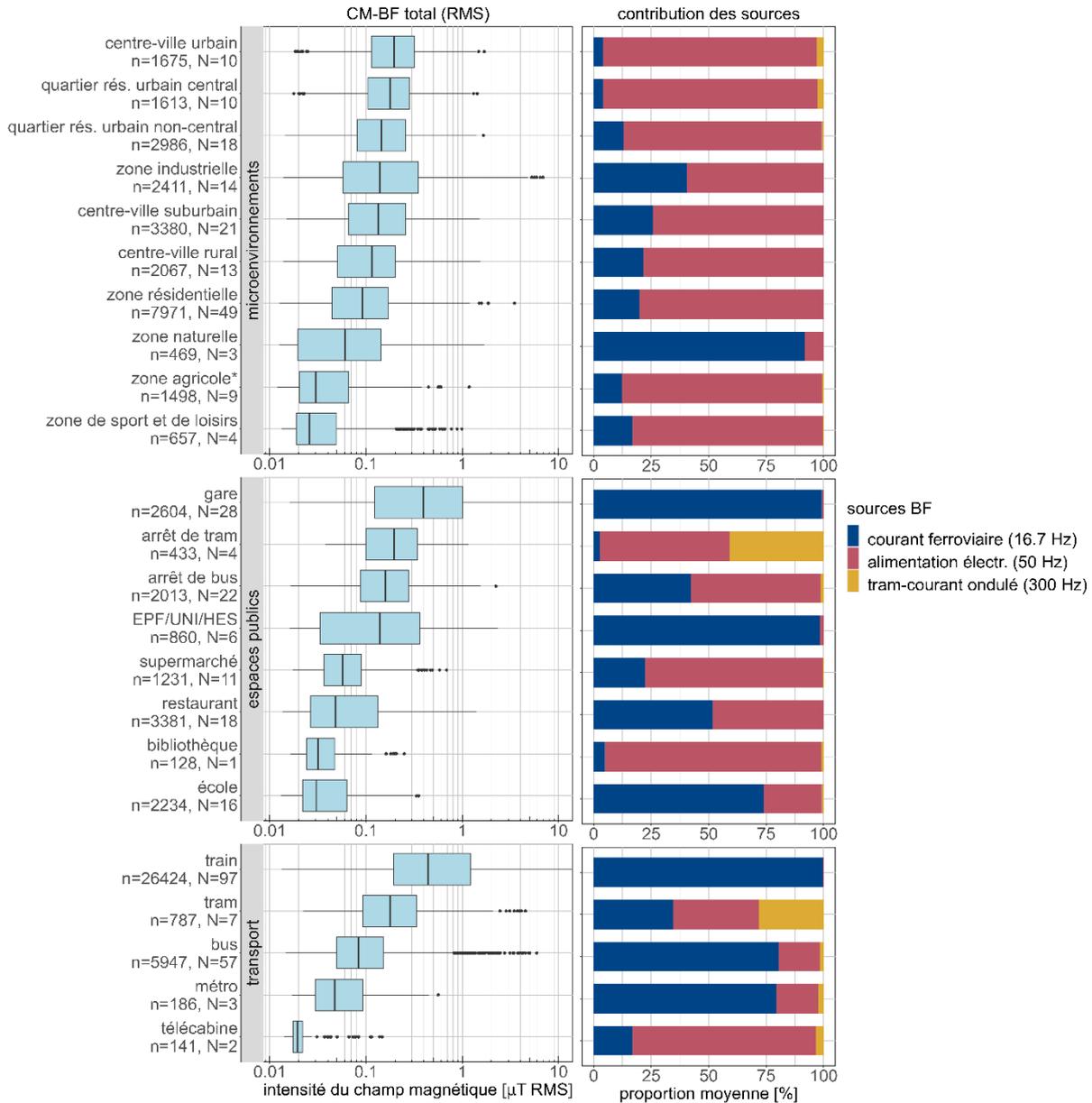
*Zone agricole : sur les neuf zones agricoles mesurées, trois zones ont été mesurées au sol près d'un émetteur de radiodiffusion d'une puissance comprise entre 300 W et 181 kW. Dans les tableaux 20, 21 et 22 de l'annexe, ces trois zones ont été distinguées des six zones agricoles sans émetteur de radiodiffusion. Toutes les valeurs statistiques sont de deux à huit fois plus importantes pour les zones agricoles avec un émetteur de radiodiffusion que sans antenne. Par exemple, la valeur médiane (RMS) pour les zones agricoles sans émetteur de radiodiffusion est de 0.11 V/m et de 0.79 V/m pour les zones agricoles avec émetteur de radiodiffusion (Tableau 20). La contribution à la radiodiffusion (RMS) dans les zones agricoles est de 42% sans antenne, et de 100% avec antenne (Tableau 21). L'exposition moyenne dans les zones agricoles sans émetteur de radiodiffusion était également six fois plus faible qu'au sol avec un émetteur de radiodiffusion, avec respectivement 0.15 V/m et 1.07 V/m (Tableau 22).

3.1.2 Aperçu général - Exposition aux BF

La Figure 13 montre, à gauche, la distribution des valeurs efficaces par type d'environnement de mesure sous forme de «boxplot». Sur le côté droit, les contributions relatives moyennes des trois principales sources de rayonnement basse fréquence sont colorées : Courant ferroviaire (jaune), alimentation électrique (rose) et courant ondulé du tram (violet).

Dans les microenvironnements, les valeurs médianes les plus élevées ont été mesurées dans les centres-villes urbains (0.19 μ T), suivis par les quartiers résidentiels centraux urbains (0.18 μ T) et les zones industrielles (0.14 μ T). Les valeurs médianes ont tendance à diminuer à mesure que l'urbanisation diminue. Les valeurs médianes les plus faibles ont été mesurées dans les zones agricoles et les zones de sport et de loisirs (0.03 μ T). Dans les zones publiques, les valeurs médianes sont les plus élevées dans les gares (0.39 μ T) et les arrêts de tram (0.20 μ T), tandis que les valeurs médianes sont relativement faibles dans les bibliothèques et les écoles (0.03 μ T). Dans les transports publics, les valeurs médianes sont les plus élevées dans les trains (0.44 μ T).

La contribution de l'électricité est dominante dans tous les microenvironnements (60-93%), à l'exception des zones naturelles (8%). La contribution du courant ferroviaire est la plus élevée dans les trains (100%) et les gares (99%) en raison de la proximité des lignes de courant ferroviaire. La contribution du courant ondulé du tram est de 28% dans les trams et de 41% aux arrêts de tram.



La Figure 14 montre les répartitions de l'exposition moyenne de l'ensemble des BF par type d'environnement de mesure. Le minimum (carré bleu) et le maximum (triangle rouge) indiquent respectivement la valeur moyenne la plus basse et la plus élevée par environnement de mesure individuel. La moyenne des valeurs moyennes (losange noir) est calculée selon l'équation (10).

Dans les microenvironnements, l'exposition moyenne a été mesurée dans les zones industrielles (0.34 μT). L'exposition moyenne maximale se trouve également dans une zone industrielle (1.48 μT) à proximité d'une centrale électrique. Dans les lieux publics, l'exposition moyenne la plus élevée a été mesurée dans les gares (0.34 μT), l'exposition moyenne maximale atteignant 6.26 μT . Dans les transports publics, l'exposition moyenne la plus élevée est enregistrée dans les trains (1.23 μT), l'exposition moyenne maximale s'étendant jusqu'à 8.99 μT . En général, le même ordre d'exposition que dans la Figure 13 est observé, bien que la méthode de calcul diffère.

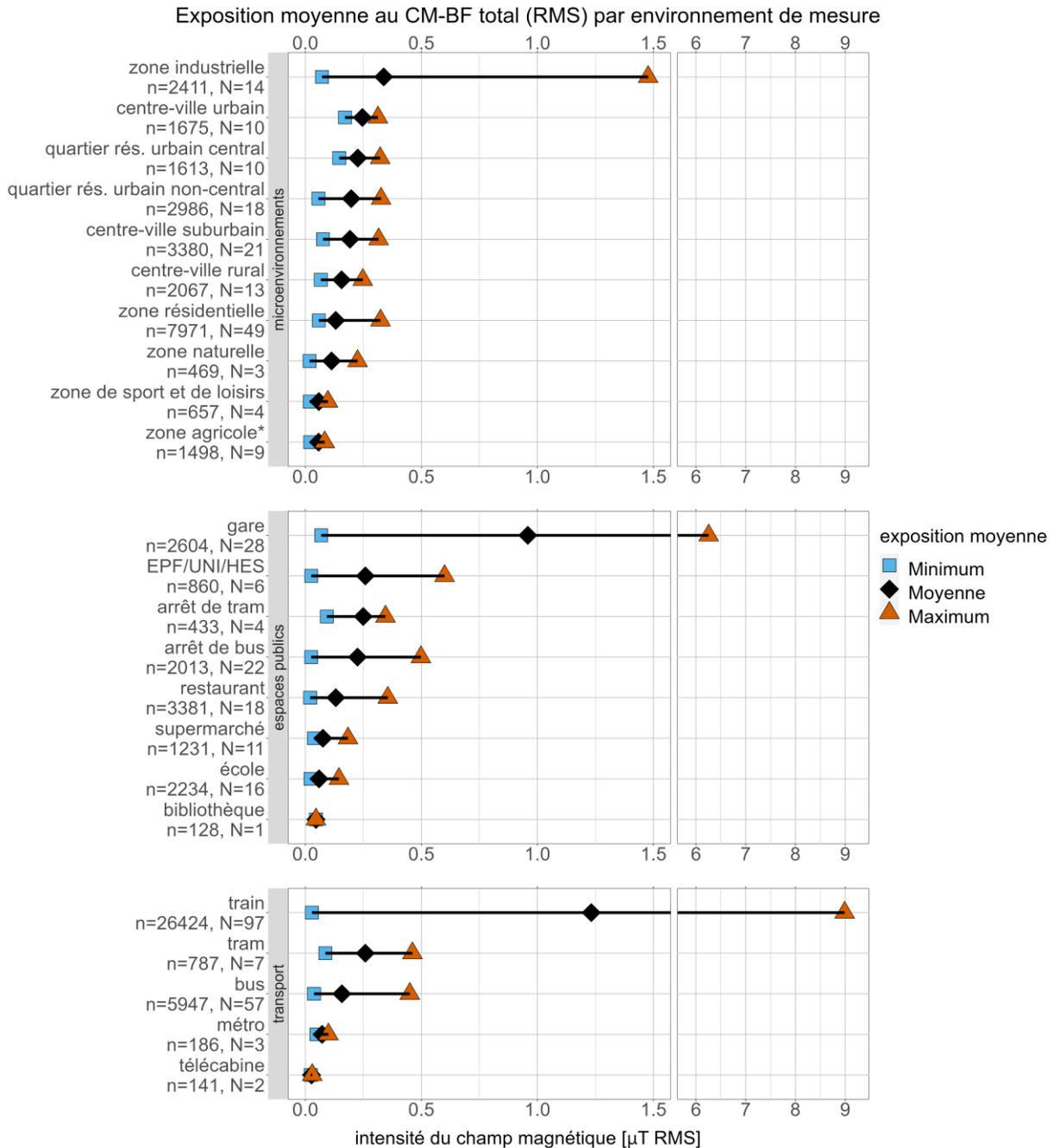


Figure 14: Répartition de l'exposition moyenne des mesures CM-BF des différents environnements de mesure. La valeur moyenne de la moyenne arithmétique (losange noir) est calculée selon l'équation (10). Le minimum (carré bleu) et le maximum (triangle rouge) indiquent respectivement les valeurs moyennes arithmétiques les plus basses et les plus élevées par environnement de mesure individuel. "n" désigne le nombre de points de données par type d'environnement de mesure. "N" désigne le nombre d'environnements de mesure mesurés du même type. L'axe des x est tronqué entre 1.5 μT et 6,0 μT afin de faire apparaître les valeurs maximales. Les données sont présentées dans Tableau 25 sont présentés.

3.1.3 Analyses supplémentaires à bord des trains - exposition aux HF et aux BF

Une analyse supplémentaire a été réalisée pour les mesures effectuées dans les trains en 2022, où les valeurs ont été analysées en fonction de l'occupation : élevée, moyenne et basse.

La Figure 15 montre sur le côté gauche, sous forme de «boxplot», la répartition de l'exposition aux HF des valeurs RMS (en haut) ou des valeurs de crête (en bas) selon l'occupation du train. Sur le côté droit, les contributions relatives moyennes des six sources HF sont colorées : Downlink (orange), Uplink (bleu foncé), Time Division Duplex TDD (violet), radiodiffusion (vert), WLAN (bleu clair), DECT (rouge). Il apparaît que l'exposition aux HF est la plus élevée lorsque l'occupation est importante (médiane RMS : 0.44 V/m, peak : 3.01 V/m). Dans ce cas, l'Uplink, qui est liée à la transmission des appareils sans fil des passagers, contribue à 54% lorsque l'occupation est "élevée". Pour les valeurs de crête, le TDD contribue à 34% de l'occupation "élevée". Pour une occupation moyenne et basse, les médianes RMS sont de 0.31 V/m et 0.17 V/m respectivement.

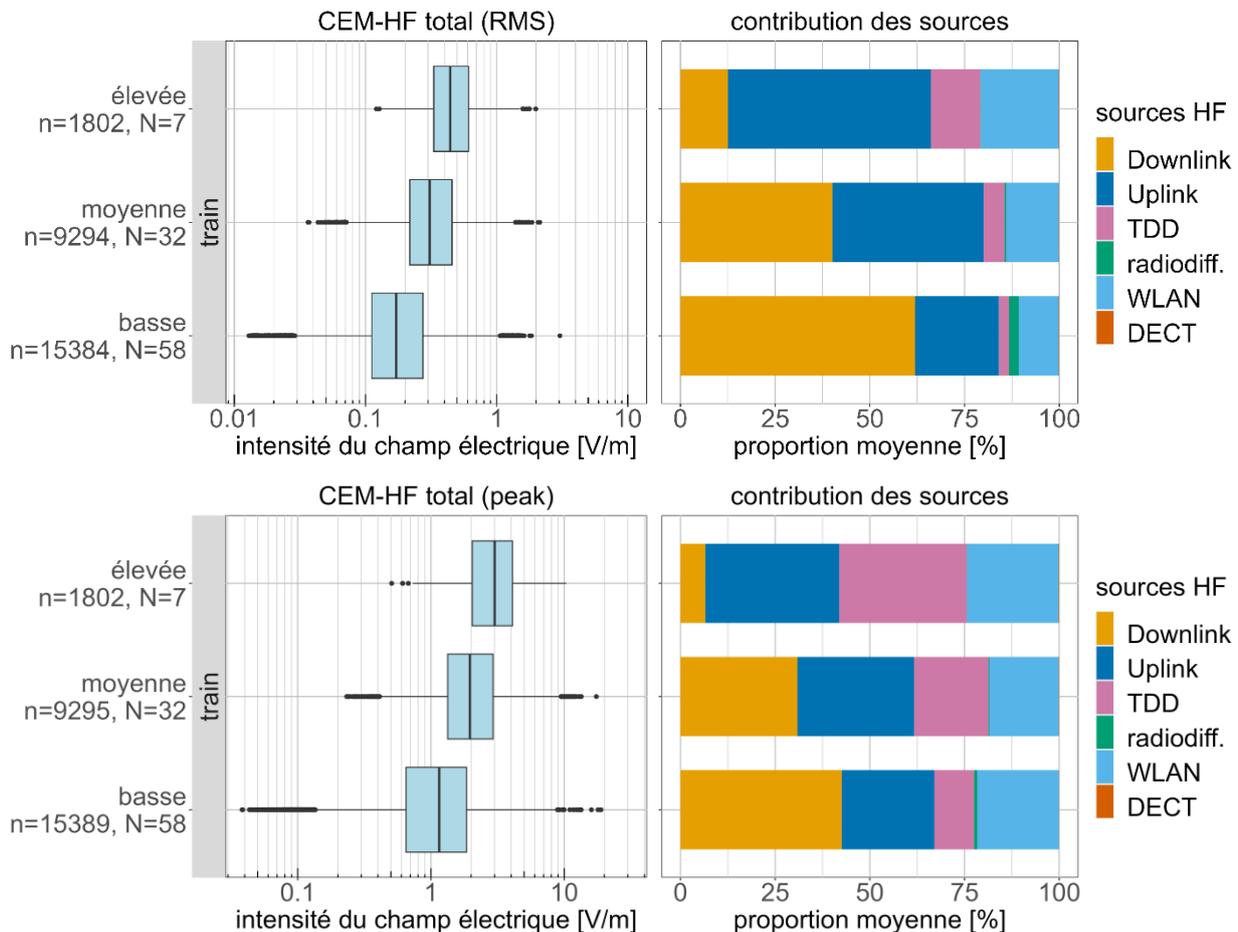


Figure 15 : A gauche : Distribution des valeurs de mesure RMS (en haut) et Peak (en bas) CEM-HF selon l'occupation des trains en 2022. La ligne médiane, les boîtes, les "whiskers" et les points indiquent respectivement la médiane, les 25e et 75e percentiles, 1.5 fois l'écart interquartile (1.5*IQR) et les «outliers». A droite : la contribution moyenne des sources pour chaque type d'environnement de mesure. Les groupes de bandes de fréquences suivants sont pris en compte : Downlink, Uplink, Time Division Duplexing (TDD), diffusion, WLAN et téléphones sans fil (DECT). "n" désigne le nombre de points de données par type d'environnement de mesure. "N" désigne le nombre d'environnements de mesure mesurés du même type. Les données statistiques et les contributions des sources sont présentées dans le Tableau 26 resp. Tableau 27.

Figure 16 montre, à gauche, sous forme de «boxplot», la distribution de l'exposition aux BF des valeurs RMS par type d'environnement de mesure. Sur le côté droit, les contributions relatives moyennes des trois principales sources de rayonnement basse fréquence sont colorées : Courant ferroviaire (jaune), alimentation électrique (rose) et courant ondulé des trams (violet). La médiane est la plus élevée lorsque l'occupation est faible (0.51 μT) et similaire lorsque l'occupation est moyenne ou élevée (0.37 μT). Sans surprise, le train contribue à 100% à l'exposition.

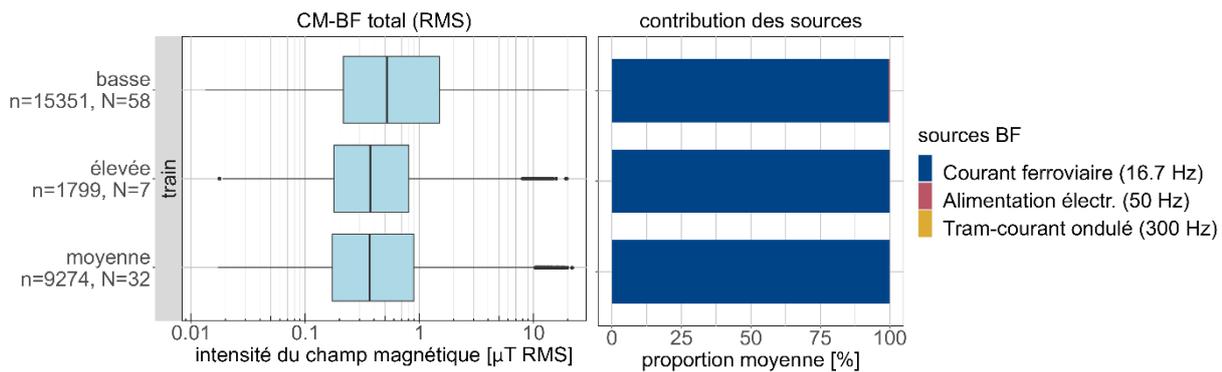


Figure 16: A gauche : Distribution des mesures CM-BF en 2022 par type d'environnement de mesure. La ligne médiane, les boîtes, les "whiskers" et les points indiquent respectivement la médiane, les 25e et 75e percentiles, 1.5 fois l'écart interquartile (1.5*IQR) et les «outliers». A droite : la contribution moyenne des sources pour chaque type d'environnement de mesure. Les groupes de bandes de fréquences suivants sont pris en compte : Courant ferroviaire (16,7 Hz), alimentation électrique (50 Hz), et courant ondulé du tram (300 Hz) avec leurs harmoniques respectives. "n" désigne le nombre de points de données par type d'environnement de mesure. "N" désigne le nombre d'environnements de mesure mesurés du même type. Les données statistiques et les contributions des sources sont présentées dans le Tableau 28 resp. Tableau 29.

3.1.4 Analyses supplémentaires dans les écoles - exposition aux HF et aux BF

Une analyse complémentaire a été réalisée dans le cadre des mesures effectuées en 2022 dans deux écoles primaires, deux collèges et un gymnase, où l'exposition aux HF et aux BF a été mesurée. Dans la cour d'école (intérieure ou extérieure) avec et sans les élèves, ainsi que dans les couloirs également.

La Figure 17 montre, sur le côté gauche sous forme de «boxplot», la répartition de l'exposition aux HF des valeurs RMS (en haut) et des valeurs de crête (en bas) dans les écoles. Sur le côté droit, les contributions relatives moyennes des six sources HF sont colorées : Downlink (orange), Uplink (bleu foncé), Time Division Duplex TDD (violet), Radio (vert), WLAN (bleu clair), DECT (rouge). L'exposition est légèrement plus élevée dans les zones extérieures ("cour - extérieure") qu'à l'intérieur du bâtiment ("cour - intérieure", "couloir"). De plus, l'exposition est légèrement plus élevée dans les cours d'école avec élèves que dans les cours d'école sans élèves (p. ex. "Cour - extérieure avec élèves" : RMS : 0.20 V/m, peak : 1.12 V/m | "Cour - extérieure sans élèves" : RMS : 0.10 V/m, peak : 0.52 V/m). Dans les cours d'école à l'extérieur, les plus grandes contributions au rayonnement proviennent des installations de téléphonie mobile (contribution Downlink : RMS : 73 -78%, peak : 69 -79%), suivies des installations de radiodiffusion (RMS : 18 - 21%, peak : 2%). Dans les cours d'école intérieures, les plus grandes contributions au rayonnement proviennent du WLAN (RMS : 69 - 90%, peak : 96 - 100%), mais à un niveau bas, car l'exposition moyenne à l'intérieur du bâtiment est globalement faible (RMS : 0.04 - 0.13 V/m). Pendant les pauses à l'intérieur du bâtiment (c.-à-d. "cour - intérieure avec élèves), les élèves contribuent légèrement à l'augmentation de l'exposition en utilisant activement leur téléphone portable (contribution Uplink : RMS : 30%, peak : 4%).

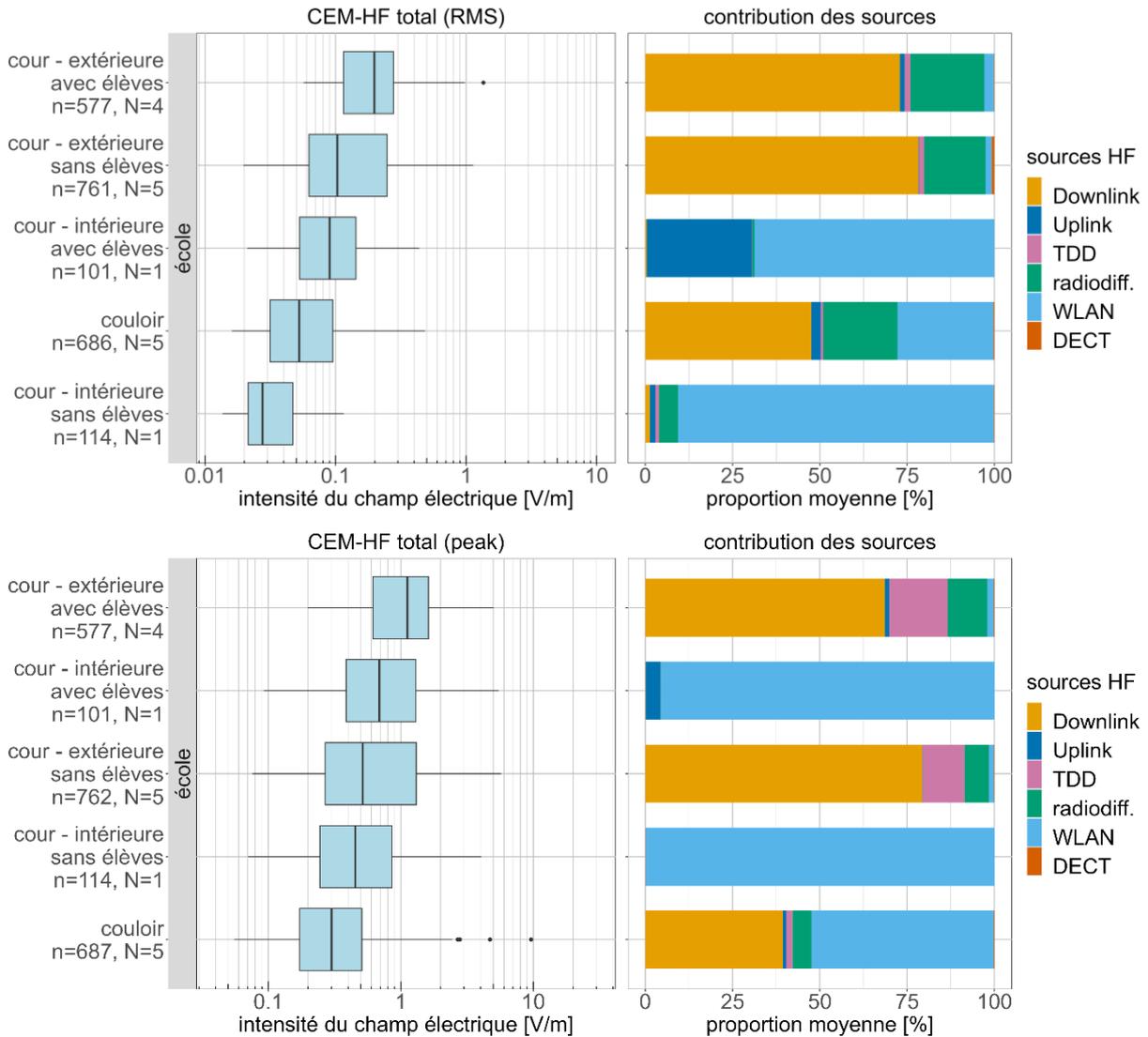


Figure 17: A gauche : Distribution des mesures de CEM-HF RMS (en haut) et de crête (en bas) dans les écoles en 2022. La ligne médiane, les boîtes, les "whiskers" et les points indiquent respectivement la médiane, les 25e et 75e percentiles, 1.5 fois l'écart interquartile (1.5*IQR) et les «outliers». A droite : la contribution moyenne des sources pour chaque type d'environnement de mesure. Les groupes de bandes de fréquences suivants sont pris en compte : Downlink, Uplink, Time Division Duplexing (TDD), diffusion, WLAN et téléphones sans fil (DECT). "n" désigne le nombre de points de données par type d'environnement de mesure. "N" désigne le nombre d'environnements de mesure mesurés du même type. Les données statistiques et les contributions des sources sont présentées dans le Tableau 30 , resp. Tableau 31.

Figure 18 montre à gauche, sous forme de «boxplot», la répartition des valeurs RMS par type d'environnement de mesure. Sur le côté droit, les contributions relatives moyennes des trois principales sources de rayonnement basse fréquence sont colorées : Courant ferroviaire (jaune), alimentation électrique (rose) et courant ondulé des trams (violet). En général, les valeurs médianes de l'exposition aux CM-BF dans les écoles sont les plus faibles de toutes les zones publiques mesurées. Les valeurs médianes les plus élevées se trouvent dans la "cour - intérieure avec élèves" (0.05 µT), mais cela dépend de l'endroit où se trouve l'école mesurée et non du fait que les élèves sont à l'intérieur ou à l'extérieur. Les valeurs médianes des expositions aux CM-BF se situent toutes entre 0.03 et 0.05 µT.

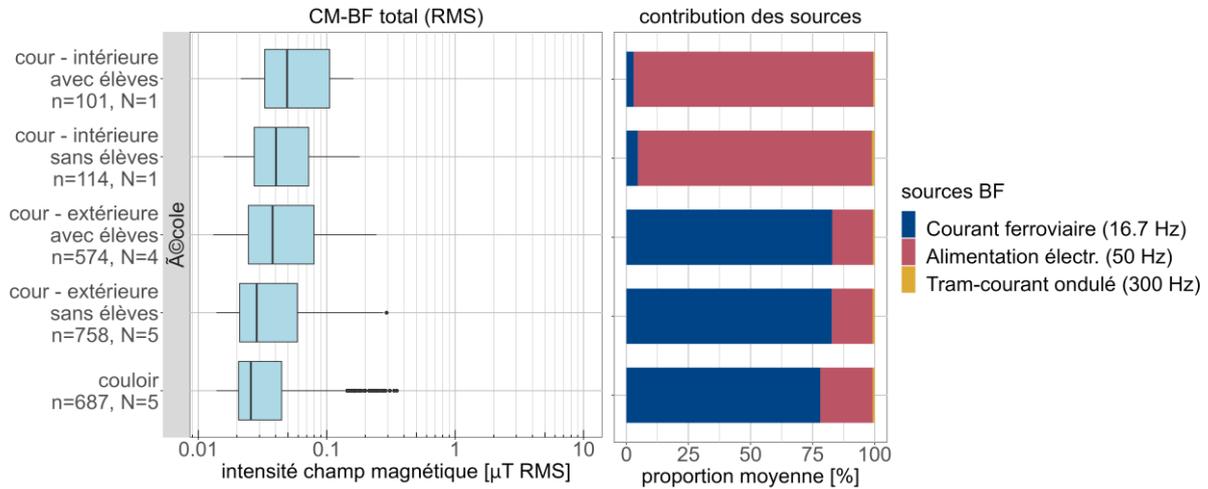


Figure 18: A gauche : Distribution des mesures CM-BF en 2022 par type d'environnement de mesure. La ligne médiane, les boîtes, les "whiskers" et les points indiquent respectivement la médiane, les 25e et 75e percentiles, 1.5 fois l'écart interquartile (1.5*IQR) et les «outliers». A droite : la contribution moyenne des sources pour chaque type d'environnement de mesure. Les groupes de bandes de fréquences suivants sont pris en compte : Courant ferroviaire (16,7 Hz), alimentation électrique (50 Hz), et courant ondulé du tram (300 Hz) avec leurs harmoniques respectives. "n" désigne le nombre de points de données par type d'environnement de mesure. "N" désigne le nombre d'environnements de mesure mesurés du même type. Les données statistiques et les contributions des sources sont présentées dans le Tableau 32 et Tableau 33

3.1.5 l'épuisement de la valeur limite d'immissions (VLI)

Épuisement de la valeur limite d'immissions (VLI)
Somme selon l'annexe 2 de l'ORNI

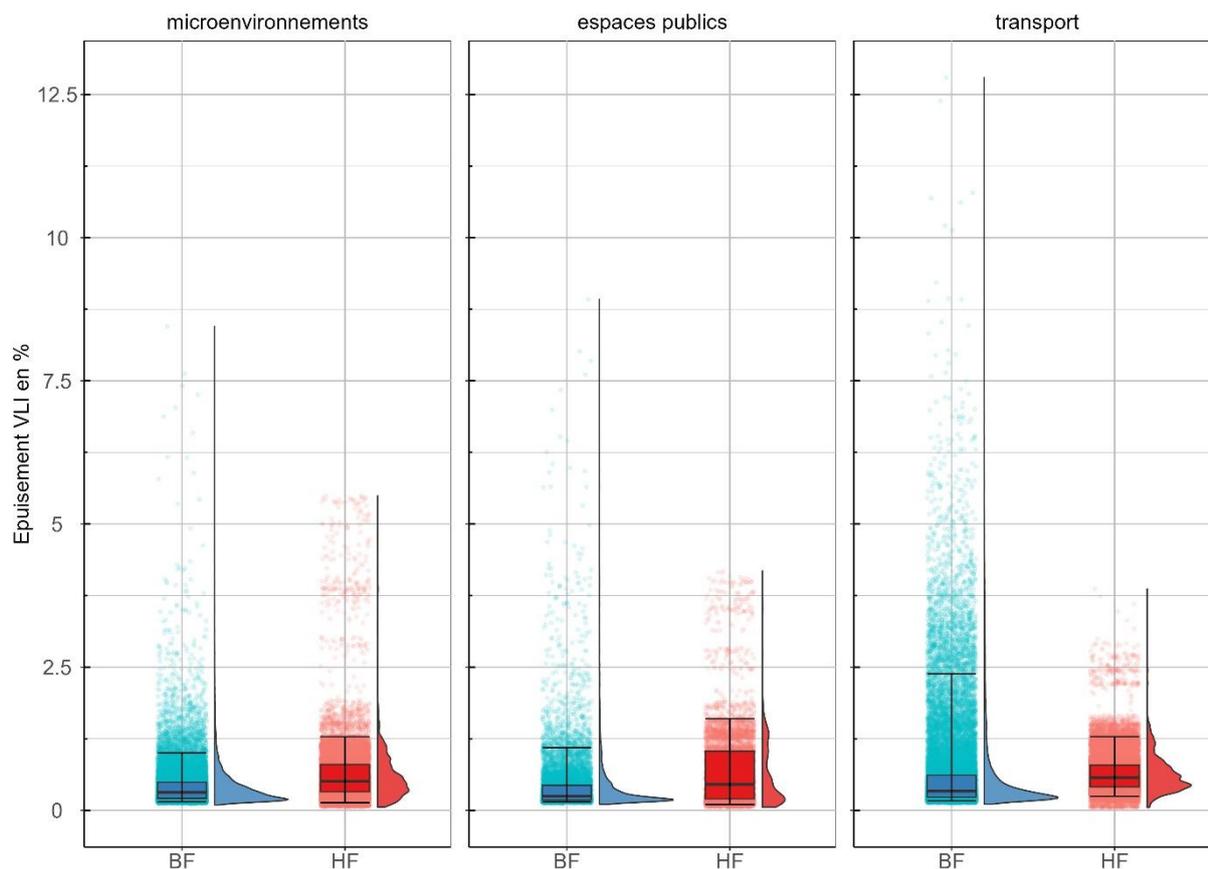


Figure 19 montre l'épuisement de la valeur limite d'immissions (VLI) pour les valeurs BF (bleu) et les valeurs HF (rouge), calculées selon la prescription de sommation de l'ORNI [1]. Toutes les données ont été regroupées selon les trois types de mesures (microenvironnements, espaces publics, transports publics). La valeur d'immissions maximale autorisée est un scalaire et à la valeur 100%. Toutes les valeurs inférieures à 100% respectent les valeurs limites d'immissions selon l'ORNI. Les valeurs maximales sont de 13% au maximum pour les valeurs BF et de 6% au maximum pour les valeurs HF. Les valeurs médianes des valeurs d'épuisement des VLI sont toutes inférieures à 1%.

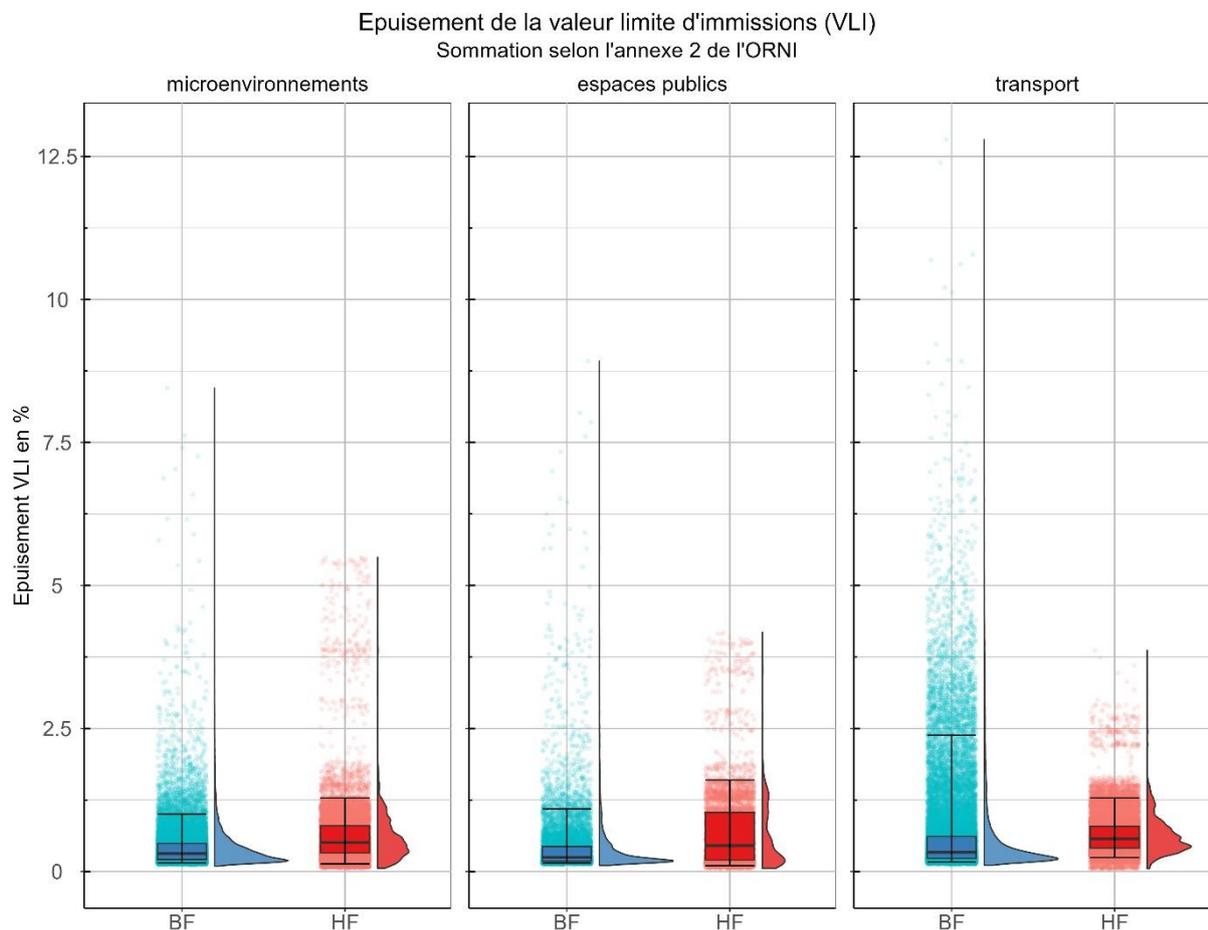


Figure 19: Répartition statistique de l'épuisement de la valeur limite d'immissions sur l'ensemble des points de mesure. Les différentes fréquences ont été additionnées selon la règle de sommation (ORNI, annexe 2). Dans les diagrammes, les différentes valeurs mesurées (pour les BF) ou les différentes valeurs moyennes sur 6 minutes (pour les HF) sont représentées à gauche sous forme de points (jitterplot). Dans le «boxplot» superposé, la ligne médiane indique la médiane, les boîtes les 25e et 75e percentiles et la zone les 5e et 95e percentiles des différentes valeurs mesurées. Les courbes représentées respectivement à droite montrent la répartition de la fréquence des différentes valeurs mesurées (pour les BF) ou des moyennes sur 6 minutes (pour les HF). L'échelle du diagramme est limitée aux valeurs disponibles (taux d'utilisation maximal d'environ 13%) afin de rendre visible la structure des valeurs.

Parmi toutes les valeurs HF mesurées, aucune ne dépasse la valeur limite d'immissions en vigueur. Parmi toutes les valeurs mesurées pour les BF, une seule dépasse la VLI et se situe à 173%. Elle a été exclue de l'analyse des données et du graphique ci-dessus et sera traitée comme une valeur aberrante et examinée plus en détail. Cette valeur a été mesurée dans une bibliothèque dans la bande de fréquences de 899-901 Hz. Dans cette bande, la troisième harmonique du courant de tram est mesurable. Dans ce cas, en raison de l'intensité de champ inhabituellement élevée et de la forme atypique, on peut supposer que cette mesure n'est pas liée au courant de tram et elle peut être attribuée à une source BF non identifiée ou à un artefact de mesure.

3.2 Mesures spot/habitat

3.2.1 Exposition aux HF

La distribution des valeurs RMS CEM-HF mesurées pour tous les logements est présentée dans la Figure 20. Les mesures partielles, composées de mesures à long terme, de mesures mobiles et de mesures à court terme sont analysées séparément. De plus, des analyses séparées ont été effectuées pour les sites avec et sans source primaire. Les sites situés à proximité d'une source primaire montrent des expositions typiques à proximité de la source en question. Les sites sans source primaire correspondent à une répartition représentative des situations d'exposition au RNI en Suisse. La partie droite du graphique présente les contributions moyennes des sources à l'intensité de champ totale.

Pour les logements situés à proximité d'émetteurs radio/TV, un seul jeu de données est disponible (N = 1). Cela limite fortement la pertinence de la distribution. Pour cette catégorie, il n'est pas encore possible de conclure à une exposition caractéristique de la source. Le petit nombre de jeux de données se traduit par de petites valeurs pour l'écart interquartile (IQR).

Pour les mesures de courte durée, les sites de mesure situés à proximité de stations de téléphonie mobile présentent une valeur médiane de l'intensité de champ électrique totale de 0.16 V/m. La contribution en pourcentage de l'intensité de champ électrique totale se répartit principalement dans les groupes de services suivants : Downlink : 78%, radiodiffusion : 9%, WLAN : 9%. Un site de mesure situé à proximité d'un émetteur radio/TV présente la plus grande valeur médiane de l'intensité de champ électrique totale (0.26 V/m). Les contributions des sources suivantes y ont été déterminées, classées par ordre décroissant de grandeur : Radio : 51%, WLAN : 45%. Pour les immeubles qui ne sont pas situés à proximité d'une des sources susmentionnées, la valeur médiane est de 0.13 V/m. En ce qui concerne le champ électrique, le choix du site peut donc être considéré comme aléatoire. Les contributions de champ résultent principalement des groupes suivants : WLAN : 36%, radiodiffusion : 27%, downlink : 26% et DECT : 10%.

Pour les mesures d'itinéraires, les sites situés à proximité d'antennes de téléphonie mobile présentent une valeur médiane de 0.13 V/m, ce qui est également la plus grande valeur de ce type de mesure partielle. Les deux plus grandes sources dans cette catégorie sont le downlink avec 79% et la radiodiffusion avec 13%. Pour une mesure à proximité d'installations de radiodiffusion, la médiane est de 0.12 V/m. Les plus grandes contributions proviennent des catégories radiodiffusion avec 62% et WLAN avec 30%. Les logements de la catégorie "pas de source primaire HF" présentent une médiane d'exposition de 0.08 V/m. Les plus grandes contributions des sources sont : Downlink: 46%, radiodiffusion: 31% et WLAN: 17%.

Pour les mesures à long terme, les sites de mesure situés à proximité de stations de téléphonie mobile présentent la médiane la plus élevée, soit 0.12 V/m. La source principale est le downlink avec 93%. La mesure à long terme sur un site avec un émetteur de radiodiffusion présente une médiane de l'intensité de champ électrique totale de 0.07 V/m. La radiodiffusion sur ce site contribue majoritairement à l'intensité de champ avec 64%, suivie par le DECT avec 13% et le WLAN avec 13%. La catégorie "pas de source primaire HF" présente une intensité de champ médiane de 0.08 V/m. Le downlink et la radiodiffusion constituent les contributions principales avec 54% et 42%, respectivement.

Les données statistiques présentées dans la Figure 20 se trouvent en annexe, regroupées selon les mesures partielles (Tableau 34 et Tableau 35).

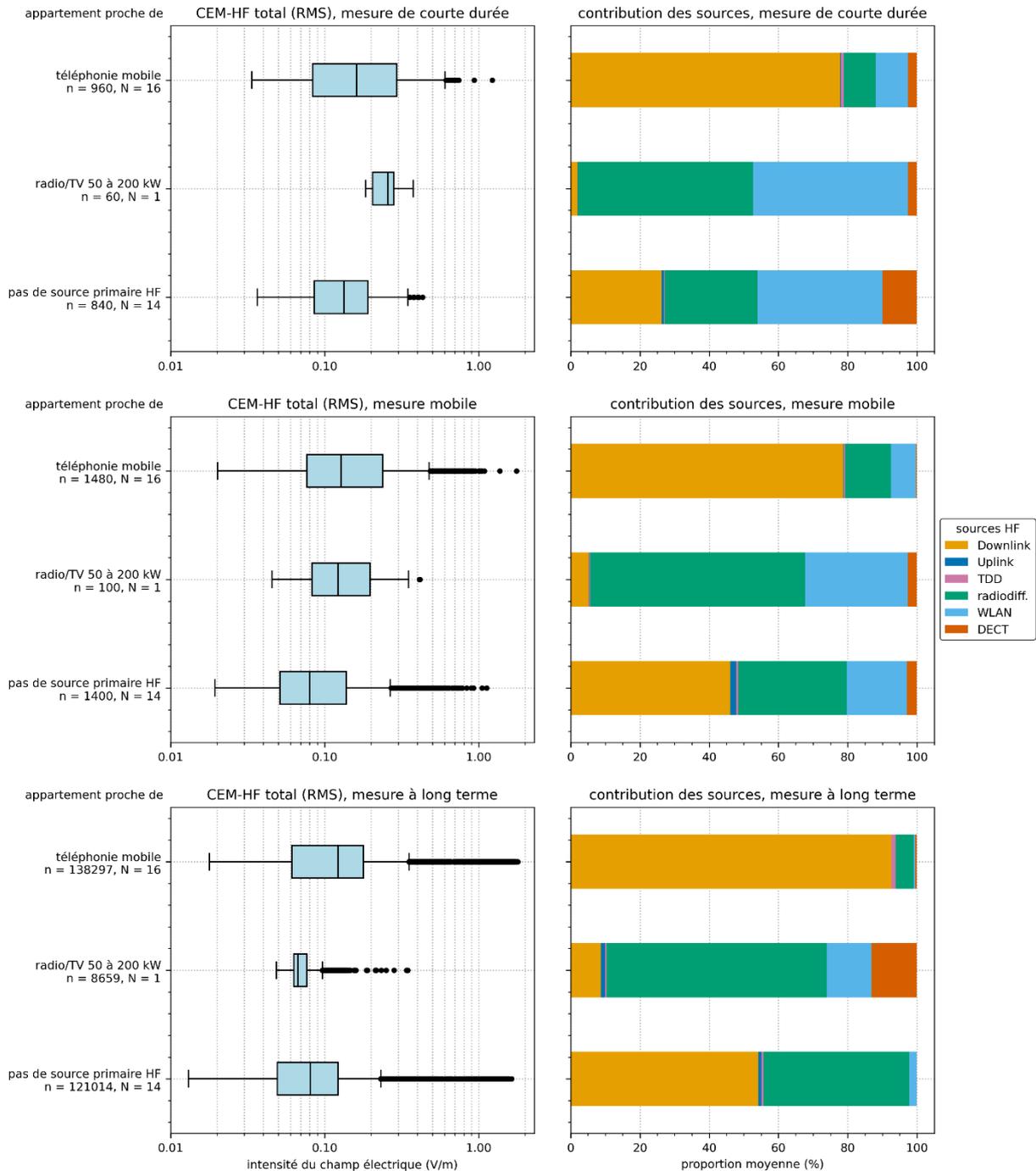


Figure 20: Répartition des valeurs CEM-HF totales (RMS) des mesures spot calculées à l'aide de l'équation (1), regroupées par mesure partielle (mesure de courte durée, mesure mobile et mesure de longue durée) et par source primaire HF à proximité du lieu de mesure. Pour les immeubles qui ne se trouvent pas à proximité de l'une des sources HF mentionnées, il convient de choisir la catégorie "aucune source primaire HF". La ligne médiane indique la médiane et la barre bleue les 25e et 75e percentiles. Les «outliers» se situent en dehors de la zone 1.5*IQR (distance interquartile) et sont représentées par des points individuels. n désigne le nombre de points de données et N le nombre de sites de mesure. Pour tous les sites de mesure avec un certain type de source primaire, la contribution moyenne des groupes de bandes de fréquences par rapport à l'intensité de champ totale moyenne est indiquée, voir équation (7). Une distinction est faite entre le Downlink,

Uplink, Time-Division-Duplex (TDD), radiodiffusion, WLAN et DECT. Les données statistiques se trouvent dans le Tableau 34 et Tableau 35.

Les Figure 21 et Figure 22 montrent la répartition des moyennes quadratiques (RMS, voir équation (4)) de l'intensité de champ électrique totale (voir équation (1)) pour les mesures RMS et de peaks, regroupées par source primaire. De plus, la moyenne arithmétique des moyennes quadratiques est également représentée pour chaque catégorie de source primaire, voir équation (9). Par rapport aux valeurs médianes de la Figure 20, les valeurs moyennes des valeurs RMS sont décalées vers des intensités de champ plus élevées. Les valeurs de crête dans la Figure 22 sont plus élevées que les valeurs RMS de la Figure 21 et donnent une indication sur les peaks d'intensité de champ maximaux qui se sont produits pendant la mesure. L'ensemble des données pour la catégorie de sources primaires "radio/TV 50 à 200 kW" ne comprend qu'une seule mesure. C'est pourquoi aucune fourchette ne peut être représentée et que le minimum, la moyenne et le maximum des valeurs moyennes d'exposition sont les mêmes. La tendance des valeurs moyennes est généralement similaire à celui des valeurs médianes de la Figure 20.

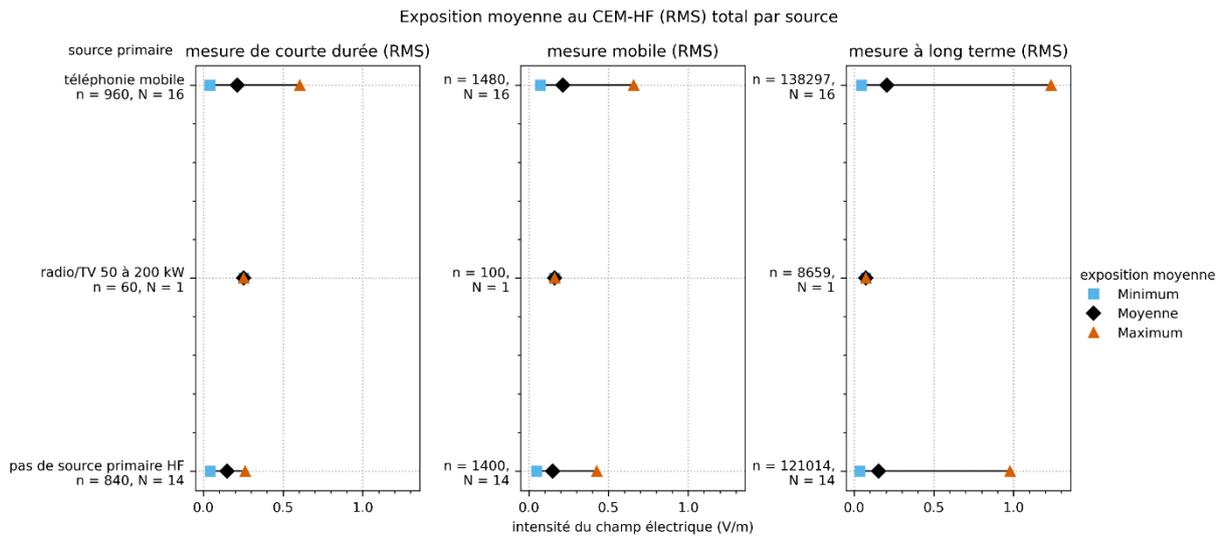


Figure 21: répartition de la moyenne quadratique (RMS) de l'intensité de champ électrique totale calculée selon l'équation (4) pour chaque mesure au sein d'une catégorie de sources primaires. Des points de données RMS ont été utilisés pour le calcul. Le losange indique la moyenne arithmétique de toutes les valeurs RMS d'intensité de champ totale appartenant à un type de source, voir équation (9). Les limites de gauche et de droite indiquent la force la plus basse et la plus haute du champ total RMS de toutes les mesures de la catégorie. Le nombre de points de mesure est désigné par n et le nombre de mesures de site est exprimé par N. Les données de la figure se trouvent dans le Tableau 36 de l'annexe.

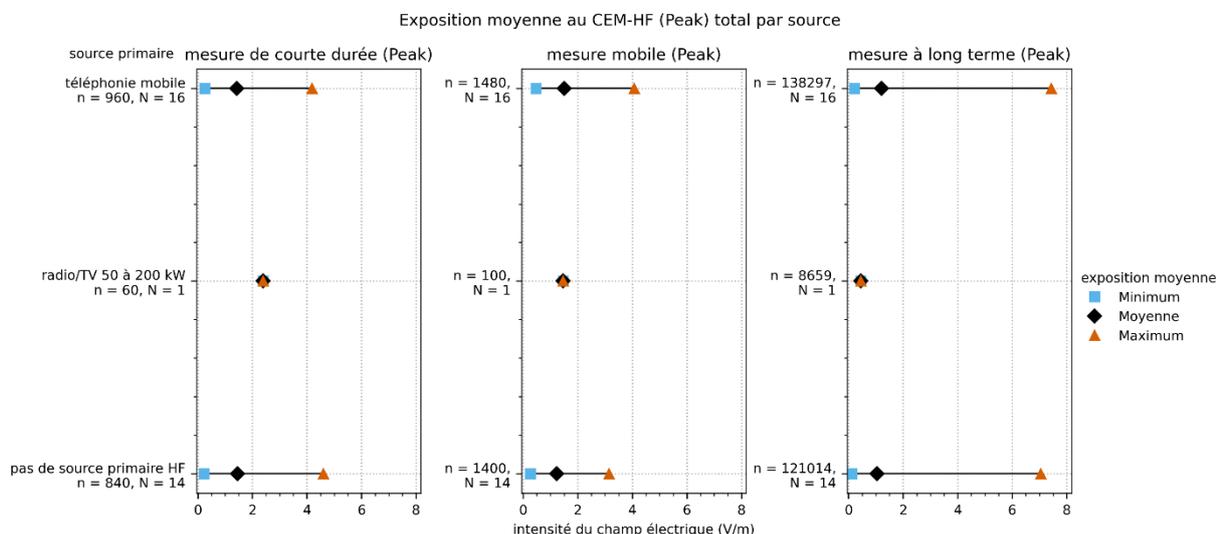


Figure 22: répartition de la moyenne quadratique (RMS) de l'intensité de champ électrique totale calculée selon l'équation (4) pour chaque mesure au sein d'une catégorie de sources primaires. Les valeurs de crête ont été utilisées pour le calcul. Le losange indique la moyenne arithmétique de toutes les moyennes quadratiques d'intensité de champ totale appartenant à un type de source, voir équation (9). Les limites de gauche et de droite indiquent la puissance la plus faible et la plus élevée du champ total RMS de toutes les mesures de la catégorie. Le nombre de points de mesure est désigné par n et le nombre de mesures de site est exprimé par N. Les données du tableau se trouvent dans le Tableau 37 en annexe.

3.2.2 Exposition aux BF

La distribution de la densité de flux magnétique totale de tous les points de mesure RMS CM-BF est représentée dans la Figure 23. Les données de la mesure à court terme, de la mesure mobile et de la mesure à long terme sont évaluées séparément. Les données statistiques des distributions sont présentées dans le Tableau 38. La contribution en pourcentage des sources à la densité de flux magnétique totale est indiquée dans la colonne de droite de la Figure 23 et les données correspondantes sont présentées dans le Tableau 39. En fonction de l'analyse présentée dans le Tableau 3, les contributions des sources sont attribuées aux catégories ligne ferroviaire, alimentation électrique et courant ondulé du tram. La mesure à court terme et la mesure mobile sont effectuées simultanément, mais dans des locaux différents. La mesure à long terme a également lieu pendant la nuit.

Il convient de noter que les données relatives aux différentes sources primaires du champ magnétique présentées dans la Figure 23 proviennent de mesures effectuées sur un à trois sites de mesure et n'ont donc pas encore de caractère représentatif. Les répartitions représentées sont donc encore fortement influencées par les sites de mesure respectifs et il n'est pas encore possible de tirer des conclusions fiables sur les répartitions d'exposition attendues. Seules les mesures effectuées en l'absence de sources primaires de BF présentent un nombre de mesures suffisamment important pour pouvoir en déduire des valeurs données.

Lors de la mesure de courte durée, la valeur médiane dans les locaux de séjour fréquent est de 0.10 μT pour les lignes de chemin de fer à deux voies. Pour les lignes de chemin de fer à une voie, la médiane est réduite de moitié, à 0.05 μT . La mesure individuelle avec une ligne de chemin de fer dans un tunnel à voie unique sous l'immeuble conduit à la médiane d'exposition la plus élevée pour les lignes de chemin de fer de cette catégorie de mesure partielle, soit 0.25 μT . Cette valeur élevée, malgré une ligne à voie unique, est probablement due à la proximité immédiate de la ligne de contact avec la propriété. Les

valeurs médianes de la mesure mobile sont par ailleurs identiques pour ces trois catégories de sources primaires. Pour les mesures de longue durée, les valeurs ne sont que légèrement inférieures avec 0.07 μT pour les mesures à proximité des lignes de chemin de fer à deux voies, 0.05 μT à proximité des lignes de chemin de fer à une voie et 0.18 μT pour la mesure individuelle avec tunnel. Pour les trois sources primaires, le courant de voie unique fournit le plus grand pourcentage de la densité de flux magnétique totale. Pour la source primaire "ligne ferroviaire à deux voies", ce taux atteint presque 100%. Le modèle de répartition est similaire pour toutes les mesures partielles.

La mesure individuelle d'un appartement situé à proximité d'une ligne de tram présente une médiane de 0.04 μT pour la mesure à court terme. Pour la mesure mobile, la médiane s'élève à 0.06 μT et à 0.09 μT pour la mesure à long terme. L'histogramme des contributions des sources montre que l'environnement de mesure se trouve également à proximité d'une ligne ferroviaire, qui fournit la plus grande contribution, suivie par les contributions de l'alimentation électrique. La contribution du courant ferroviaire est particulièrement importante avec 79% pendant la mesure à long terme. Sur l'ensemble des trois mesures partielles, le courant ondulé du tram mesuré ne représente qu'entre 3 et 4% pour les sources situées à proximité des lignes de tram. Pour toutes les autres sources, les contributions sont négligeables dans les bandes de fréquence du courant ondulé du tram, ce qui indique l'absence de lignes de tram sur les sites de mesure.

Pour les immeubles situés à proximité de lignes aériennes de 220/380 kV, la valeur médiane la plus élevée a été mesurée et se situe entre 0.27 et 0.33 V/m pour les trois mesures partielles. Les valeurs maximales mesurées se situent entre 1.7 et 2.1 μT . La répartition est influencée de manière déterminante par une mesure lors de laquelle des valeurs mesurées supérieures à la valeur limite de l'installation de 1 μT fixée à titre préventif par l'ORNI ont été constatées. Pour toutes les mesures partielles, la part de la source provenant de l'alimentation électrique est de 100%. Les deux mesures effectuées à proximité de lignes aériennes de 36 à 150 kV se traduisent par des valeurs médianes plus faibles que pour les lignes à très haute tension. Les valeurs médianes pour les trois mesures partielles se situent entre 0.07 et 0.09 μT . Les valeurs médianes d'une mesure individuelle à proximité d'un poste de transformation se situent également dans une répartition identique, entre 0.07 et 0.09 μT . En ce qui concerne la composition de la densité de flux magnétique totale, une tendance similaire se dessine pour les deux sources primaires. Les pourcentages de l'alimentation électrique dominent avec 65-75% pour la catégorie "ligne aérienne 36-150kV" et avec 76-88% pour la station transformatrice.

Pour les immeubles qui ne se trouvent pas à proximité d'une source BF, la valeur médiane de la densité de flux magnétique totale est de 0.05 μT pour toutes les mesures partielles et est donc inférieure à celle de la plupart des sites avec une source primaire BF. Les valeurs maximales peuvent toutefois être aussi élevées que sur les sites avec une source primaire BF. Pour le courant ferroviaire, la part de la densité de flux totale se situe entre 54% et 67% selon les mesures partielles et les parts de l'alimentation électrique se situent entre 33% et 46%. Les contributions des lignes de tram n'ont pas été observées lors des 17 mesures.

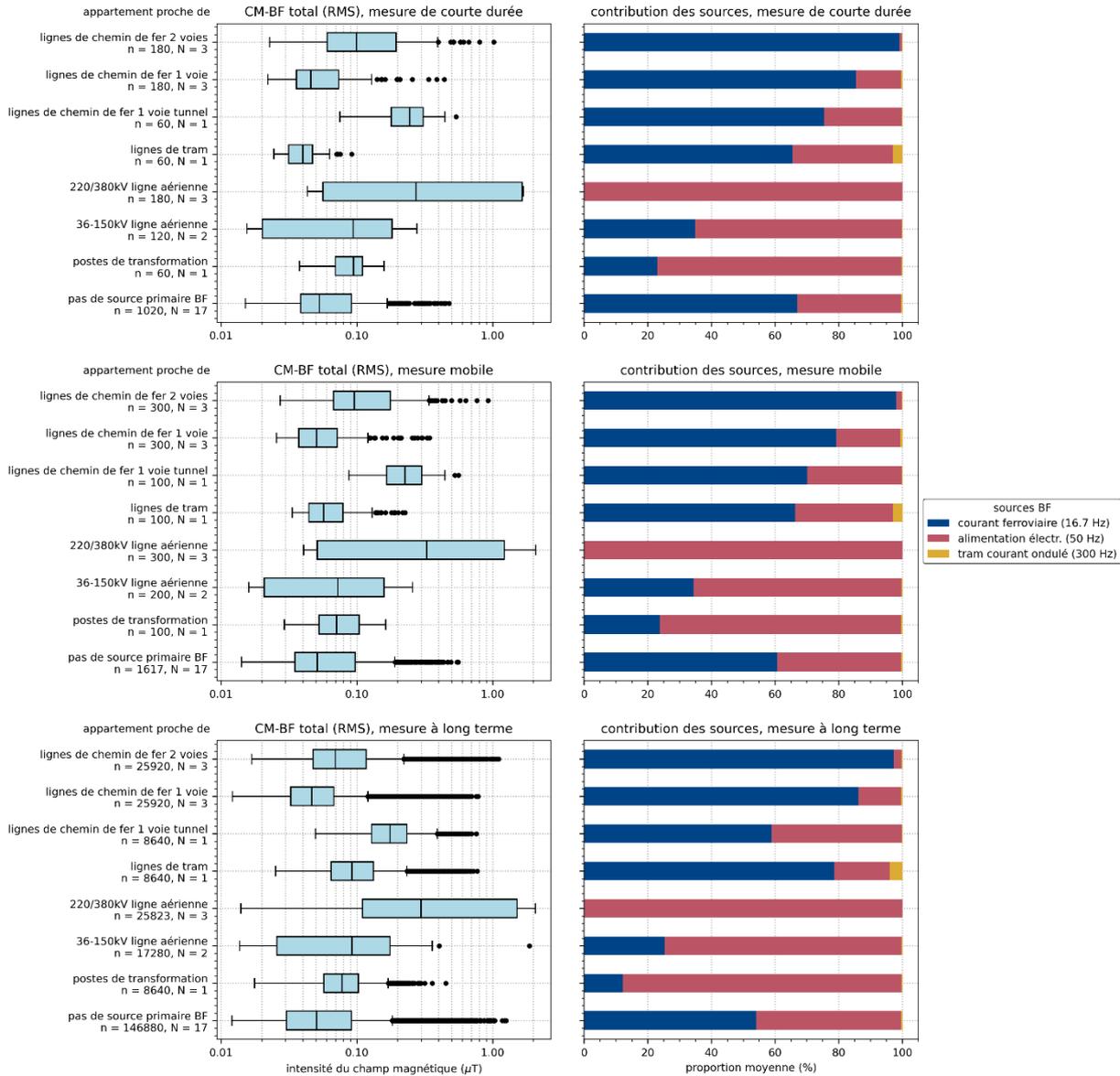


Figure 23: Distribution des valeurs RMS CM-BF des mesures spot calculées avec l'équation (2), regroupées par mesure partielle (mesure à court terme, mesure mobile et mesure à long terme) et par source primaire NF à proximité du lieu de mesure. Pour les logements qui ne se trouvent pas à proximité de l'une des sources BF énumérées, il convient de choisir la catégorie "aucune source primaire BF". La ligne médiane indique la médiane, la barre bleue les 25e et 75e percentiles. Les «outliers» se situent en dehors de la zone 1.5*IQR (écart interquartile) et sont représentées par des points individuels. Le nombre de points de données utilisés est indiqué par n sous la désignation de la source. Le nombre de mesures effectuées sur des sites utilisant la même source primaire est désigné par N. Sur la droite, la contribution moyenne des sources à la densité de flux totale est indiquée pour tous les types de sources primaires, voir l'équation (8). Les données statistiques sont présentées dans le Tableau 38 et Tableau 39 de l'annexe.

L'exposition moyenne de la densité de flux magnétique totale à basse fréquence est représentée dans la Figure 24 pour chaque source primaire. La moyenne arithmétique de la densité de flux magnétique résultante est calculée pour chaque mesure selon l'équation (5). Les valeurs moyennes sont ensuite

regroupées par source primaire et le minimum, la moyenne arithmétique (voir équation (10)) et le maximum sont calculés au sein du groupe de sources primaires. Cela permet de savoir sur quelle répartition s'étend l'exposition moyenne. Une valeur caractéristique pour chaque groupe de sources primaires est donnée par la moyenne de la densité de flux totale moyenne des différentes mesures effectuées dans le groupe. Comparée aux valeurs médianes présentées dans Figure 23 on obtient un modèle similaire. Dans ce type d'évaluation, les valeurs moyennes sont toutefois décalées vers des densités de flux magnétique plus élevées. Les valeurs maximales élevées pour la catégorie de sources primaires "lignes aériennes 220/380 kV" sont également visibles dans cette évaluation.

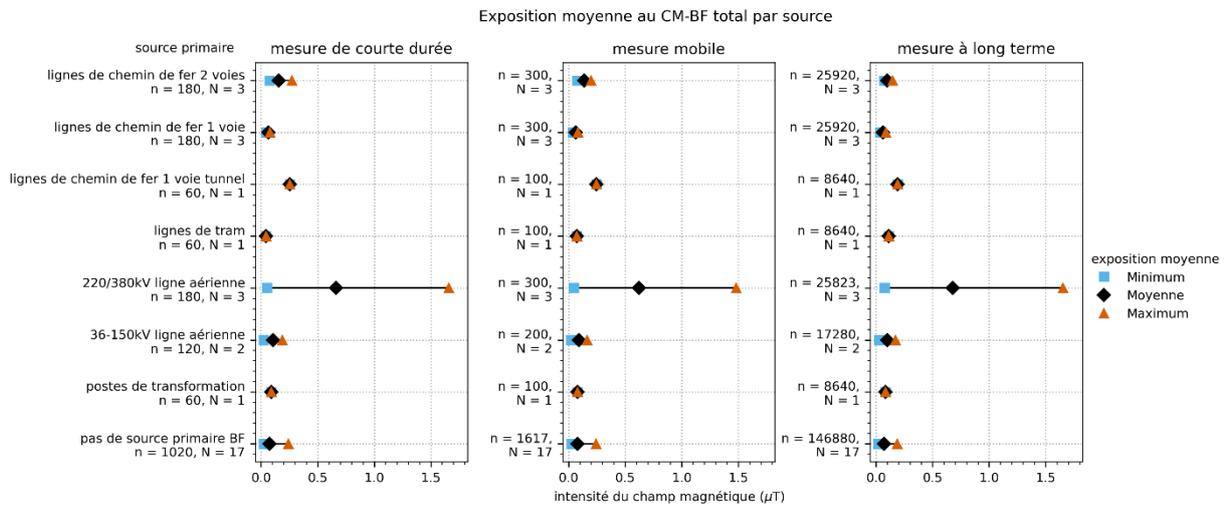


Figure 24: Répartition de la densité de flux magnétique totale CM-BF calculée selon l'équation (5) pour chaque source primaire. Le losange indique la moyenne arithmétique de toutes les densités de flux totales appartenant à un type de source, voir équation (10). Les limites gauche et droite indiquent l'intensité la plus faible et la plus élevée de la densité de flux totale. Le nombre de points de mesure est désigné par n et le nombre de mesures de site est exprimé par N. Les données sont présentées dans le Tableau 40 de l'annexe.

3.3 Mesures permanentes stationnaires

Les cinq stations de mesure des mesures stationnaires permanentes sont opérationnelles depuis le 1er janvier 2023 et mesurent en continu les immissions HF. Les résultats seront présentés et discutés dans le rapport annuel 2023.

4. Discussion

L'objectif principal de ce rapport annuel était de décrire les mesures effectuées dans le cadre du suivi de l'exposition au RNI en Suisse. Pour les mesures d'itinéraires, les données d'un total de 150 microenvironnements, 90 lieux publics et de nombreux moyens de transport public, collectées en 2022, sont présentées. En outre, les données déjà publiées dans le rapport annuel 2021 [2] ont été complétées par une analyse de l'occupation des trains et une analyse approfondie des écoles. En ce qui concerne les mesures spot, les données présentées dans ce rapport annuel concernent 26 sites qui ont été mesurés entre 2021 et mars 2023. Ici, l'échantillon a été complété par des mesures effectuées au 1er trimestre 2023, car moins de mesures que prévu ont pu être réalisées en 2022 en raison des restrictions liées à la pandémie.

4.1 Mesures d'itinéraires

En 2022, nous avons collecté des données dans 150 microenvironnements, dans 90 lieux publics ainsi que dans 5 écoles et de nombreux transports en commun.

4.1.1 Mesures générales d'itinéraires

Pour les mesures d'itinéraires, les valeurs médianes des CEM-HF (RMS) varient entre 0.07 V/m dans les zones naturelles à 0.29 V/m dans les zones industrielles (Figure 9). Les valeurs médianes des CEM-HF (RMS) tendent à augmenter avec l'urbanisation. Le 95e percentile (Q95) le plus élevé se situe à 0.88 V/m dans les centres-villes urbains. Dans les lieux publics, les valeurs médianes des CEM-HF (RMS) varient entre 0.05 V/m dans une bibliothèque à 0.38 V/m aux arrêts de tram. Les arrêts de transports publics présentent des valeurs médianes plus élevées (HF : 0.29 - 0.38 V/m) que les zones à l'intérieur telles que les supermarchés ou les écoles (HF : 0.05 - 0.09 V/m) où une partie des émissions des antennes de téléphonie mobile sont absorbés par les murs. Dans les transports publics, les valeurs médianes des CEM-HF (RMS) varient de 0.12 V/m dans un télécabine à 0.29 V/m dans le métro. Les valeurs rapportées ici sont comparables aux études menées à l'étranger [8-10].

En ce qui concerne les CM-BF, les valeurs médianes (RMS) pour les mesures d'itinéraires vont de 0.03 μ T dans les zones agricoles à 0.19 μ T dans les centres-villes urbains (Figure 13). Les valeurs médianes des CM-BF (RMS) augmentent généralement avec l'urbanisation. Les peaks les plus élevés ont été observés dans les zones industrielles. Le 95e percentile (Q95) est de 1.52 μ T. Cela s'explique par une mesure effectuée à proximité d'une centrale électrique (avec une exposition moyenne maximale aux CM-BF : 1.48 μ T), où passent plusieurs lignes à haute tension. Dans les lieux publics, les valeurs médianes des CM-BF (RMS) vont de 0.03 μ T dans les écoles à 0.39 μ T dans les gares. Dans les transports publics, les valeurs médianes de la CM-BF (RMS) vont de 0.02 μ T dans un télécabine à 0.44 μ T dans les trains. Les valeurs de crête (95e percentile) sont également les plus élevées dans les trains (5.87 μ T) et les gares (2.99 μ T). La comparabilité des mesures de BF au niveau international est limitée en raison du faible nombre d'études sur le sujet.

La valeur limite d'immissions a été épuisée au maximum à 13% et 6% respectivement lors des mesures BF et HF.

4.1.2 Mesures dans les trains

Les évaluations supplémentaires comprenaient les résultats des mesures de BF et HF dans les trains selon trois catégories d'occupation : élevée, moyenne, basse.

En comparaison avec d'autres environnements de mesure, l'exposition moyenne aux HF dans les trains se situe à un niveau élevé, soit 0.32 V/m (Figure 17). L'exposition aux HF dans les trains a tendance à augmenter avec le nombre de personnes à bord des trains, car le nombre de personnes augmente également le nombre de sources HF actives dans les trains. Les résultats de cette analyse confirment la tendance qui a été observée dans d'autres études scientifiques [10]. Les valeurs médianes HF de l'occupation des trains (RMS : 0.17 V/m en cas de faible occupation à 0.44 V/m en cas de forte occupation) sont comparables à celles d'une étude européenne [11], dans laquelle l'exposition personnelle de 37 enfants a été mesurée dans des trains entre 2014 et 2016 avec une valeur médiane de 0.38 V/m.

L'exposition moyenne de l'exposition aux CM-BF dans les trains est de 1.23 μ T, ce qui est la valeur la plus élevée par rapport à tous les autres environnements de mesure et peut atteindre 8.99 μ T (Figure 18). Comme prévu, l'exposition aux CM-BF ne dépend pas de l'occupation des trains, car aucune source de BF n'est ajoutée ou supprimée en raison de l'occupation. Bien que relativement peu d'études récentes aient mesuré l'exposition aux CM-BF dans les trains [12], une étude iranienne de 2017 a mesuré l'exposition dans la cabine d'un conducteur de train avec une valeur moyenne de 1.47 μ T, avec des peaks allant jusqu'à 7.90 μ T [13], comparable à nos résultats.

4.1.3 Mesures dans les écoles

Les évaluations complémentaires comprenaient les résultats des mesures BF et HF dans cinq écoles (deux écoles primaires, deux écoles secondaires, un gymnase). Les mesures ont été effectuées dans les cours d'école intérieures ou extérieures ainsi que dans les couloirs, là où cela était possible. Aucune mesure spécifique n'a été effectuée dans les salles de classe. L'exposition mesurée dans les écoles se situe nettement en dessous des valeurs limites.

En comparaison avec d'autres mesures effectuées dans l'espace public, l'exposition moyenne de CEM-HF dans les écoles se situe à un niveau bas, soit 0.17 V/m (Figure 17). La fourchette de l'exposition moyenne dans les écoles coïncide avec l'exposition dans les espaces publics. Dans les cours d'école extérieures, la majeure partie de l'exposition provient des installations de téléphonie mobile (Downlink : 73-78%) à un niveau bas. A l'intérieur du bâtiment, l'exposition totale est encore réduite, la majeure partie de l'exposition provenant alors du WLAN (69-90%). Pendant les pauses, la part de rayonnement due aux téléphones portables actifs augmente légèrement (Uplink : 30%).

Les niveaux de CEM-HF mesurés dans les écoles sont similaires à ceux d'autres études internationales. Dans le cadre de l'étude SCAMP [14] des mesures de CEM-HF ont été effectuées chez 188 jeunes de Londres entre 2015 et 2018. Dans cette étude, les valeurs médianes d'exposition aux CEM-HF dans les écoles étaient de 0.19 V/m. Cela correspond aux valeurs médianes les plus élevées mesurées ici dans la "cour - extérieur avec élèves" (médiane RMS : 0.20 V/m). Dans 102 écoles primaires d'Amsterdam [15] une exposition moyenne de 0.16 V/m a été mesurée dans des salles de classe sans élèves. Ce résultat se situe entre nos mesures dans la "cour - intérieure avec élèves" (RMS-HF : 0.13 V/m) et dans la "cour - extérieure avec élèves" (RMS HF : 0.29 V/m).

En comparaison avec d'autres mesures effectuées dans le domaine public, l'exposition moyenne aux BF dans les écoles se situe à un niveau bas de 0.06 μ T (Figure 18). La fourchette de l'exposition moyenne

dans les écoles coïncide avec l'exposition dans les espaces publics. Il existe peu d'études sur l'exposition aux CM-BF dans les écoles. Nos résultats sont similaires à ceux d'une étude espagnole [16], dans laquelle l'exposition moyenne dans 26 écoles a été mesurée Dans la cour d'école (intérieure ou extérieure) et dans les salles de classe entre 0.015 μT et 0.017 μT respectivement. Ces résultats se situent dans la fourchette inférieure de l'exposition moyenne aux BF mesurée ici (0.06 μT).

4.1.4 Comparaison 2021/2022 des mesures d'itinéraires

Le Tableau 9 montre les valeurs médianes HF et BF (RMS) des environnements de mesure en 2021 et 2022. Dans l'ensemble, les valeurs HF et BF mesurées en 2021 et 2022 sont similaires dans la plupart des environnements de mesure. Pour les valeurs HF, les plus grandes différences ont été observées dans les "EPF/UNI/HES" avec une différence absolue de 0.14 V/m et dans les restaurants avec 0.10 V/m, ce qui peut s'expliquer en partie par des lieux de mesure différents. En ce qui concerne les transports publics, des valeurs HF plus élevées en 2022 sont généralement observés, ce qui pourrait en partie s'expliquer par le fait que les mesures ont plus souvent été effectuées dans des transports publics plus fréquentés en 2022 qu'en 2021, où l'occupation était un peu plus faible suite à la pandémie. Le fait que les valeurs mesurées pour chaque type d'environnement de mesure soient similaires en 2021 et 2022 montre que les données collectées sont représentatives des lieux concernés.

Tableau 9: Comparaison entre les données disponibles en 2021 [2] et 2022, les valeurs médianes HF et BF mesurées pour les mesures d'itinéraires. La comparaison dans le temps est toutefois limitée, car ce ne sont pas les mêmes environnements qui ont été mesurés.

Environnement de mesure	Valeurs médianes HF (RMS) (V/m)		Valeurs médianes BF (RMS) (μT)	
	2021	2022	2021	2022
Zone industrielle	0.30	0.29	0.11	0.14
Centre-ville urbain	0.19	0.24	0.17	0.19
Quartier résidentiel central urbain	0.18	0.20	0.17	0.18
Zone de sport et de loisirs	0.25	0.17	0.03	0.03
zone agricole (sans émetteur de radiodiffusion)	0.07	0.11	0.02	0.03
Centre-ville (suburbain + rural)	0.11	0.08-0.15	0.13	0.12-0.13
Quartier résidentiel non-central urbain	0.14	0.15	0.16	0.14
Quartier résidentiel (suburbain + rural)	0.09	0.10-0.13	0.12	0.09
Zone naturelle	0.05	0.07	0.02	0.06
Environnement de mesure	Valeurs médianes HF (RMS) (V/m)		Valeurs médianes BF (RMS) (μT)	
Arrêt de tram	0.39	0.38	0.34	0.20
Arrêt de bus	0.33	0.35	0.15	0.16
Gare ferroviaire	0.25	0.29	0.19	0.39
EPF/UNI/HES	0.09	0.23	0.05	0.14
Restaurant	0.10	0.20	0.07	0.05
Supermarché	0.09	0.06	0.05	0.06
Bibliothèque	0.20	0.05	0.05	0.03

Environnement de mesure	Valeurs médianes HF (RMS) (V/m)		Valeurs médianes BF (RMS) (μ T)	
	2021	2022	2021	2022
	Valeurs médianes HF (RMS) (V/m)		Valeurs médianes BF (RMS) (μ T)	
Environnement de mesure	2021	2022	2021	2022
Metro	0.19	0.29	0.12	0.05
Tram	0.18	0.24	0.15	0.18
Train	0.20	0.24	0.42	0.44
Bus	0.14	0.20	0.08	0.08
Télécabine	0.08	0.12	0.02	0.02

4.2 Mesures spot/habitat

Les mesures spot s'intéressent à la question de l'exposition aux CEM-HF et aux CM-BF à laquelle sont soumis les habitants vivant à proximité de sources externes de CEM. Pour ce faire, les mesures sont délibérément effectuées dans des lieux où les personnes séjournent pendant une période prolongée. Pour que les distributions montrent des valeurs représentatives de l'exposition attendue dans les habitations, un nombre suffisamment important de mesures est nécessaire pour chaque type de source primaire. Ce n'est pas encore le cas partout pour les données disponibles jusqu'en mars 2023.

Il n'existe qu'un seul jeu de données (N=1) pour les mesures de CEM-HF à proximité d'émetteurs radio/TV. Les résultats de cette source primaire ne fournissent donc pas encore de valeurs représentatives de l'exposition attendue et ne seront pas pris en compte dans la discussion qui suit.

Lors des mesures de courte durée dans des locaux où l'on séjourne longtemps, les valeurs de mesure CEM-HF sont généralement plus basses qu'à l'extérieur lors des mesures d'itinéraires. Cela est probablement dû en premier lieu à l'absorption des ondes par le bâtiment. Pour les habitations sans source de CEM-HF primaire, les valeurs médianes de CEM-HF (0.13 V/m) ne sont que légèrement inférieures à celles des lieux choisis en raison de leur proximité avec une station de base de téléphonie mobile (0.16 V/m). Cependant, la variabilité de l'exposition est plus élevée. Ainsi, il ressort du Tableau 34 que l'écart interquartile pour les environnements de mesure à proximité de stations de téléphonie mobile (0.21 V/m) est nettement plus grand que celui de 0.10 V/m en l'absence de sources primaires HF. Le 95e percentile est également plus élevé (0.57 V/m) que pour les sites choisis au hasard par rapport à la téléphonie mobile (0.27 V/m). La même image se dégage des mesures d'itinéraires effectuées dans les habitations. La valeur médiane pour les lieux où la téléphonie mobile est la source primaire est de 0.13 V/m et de 0.08 V/m pour la catégorie "pas de source primaire HF". Les distances interquartiles diffèrent également avec 0.16 V/m ("téléphonie mobile") et 0.09 V/m ("pas de source primaire HF"). Lors des mesures de longue durée sur 24 heures, ces différences sont également visibles au niveau des valeurs médianes avec 0.12 V/m ("téléphonie mobile") ou 0.08 V/m ("pas de source primaire HF") et des distances interquartiles (0.12 V/m pour les habitations situées à proximité d'une station de téléphonie mobile et avec 0.07 V/m lorsqu'il n'y a pas de source primaire HF). Cela montre que, par rapport à l'absence d'une source primaire HF, les logements situés à proximité d'antennes de téléphonie mobile peuvent connaître des situations d'exposition plus élevées. L'exposition mesurée dans les habitations dépend, outre de l'atténuation du bâtiment, de la distance à la source, de l'atténuation due aux obstacles, de la puissance d'émission effective ainsi que de la disposition spatiale du lieu de mesure par rapport à la source. La

présence d'une source de téléphonie mobile n'entraîne donc pas nécessairement une forte exposition dans le LUS, mais peut, en cas de conjonction défavorable des facteurs susmentionnés, se traduire par une situation d'exposition accrue.

Si l'on compare les valeurs médianes au sein d'une source primaire sur les trois mesures partielles (mesure à court terme, mesure mobile et mesure à long terme), on constate une légère diminution entre la mesure à court terme et les deux autres mesures partielles. Les valeurs médianes des mesures d'itinéraires et des mesures à long terme sont presque identiques au sein de la catégorie des sources primaires.

En cas de source primaire "téléphonie mobile", le Downlink contribue de manière déterminante à l'intensité totale du champ, suivie de la catégorie radiodiffusion et, pour les mesures de courte durée effectuées le plus souvent dans le salon, également du WLAN. En l'absence de sources HF primaires, la composition du champ total CEM-HF varie davantage, mais est également dominée par le Downlink et la radiodiffusion et le WLAN. Lors des mesures de longue durée dans la chambre à coucher, le WLAN ne contribue plus que faiblement. Lors des mesures d'itinéraires, différentes pièces de l'immeuble sont traversées, ce qui entraîne une couverture WLAN et DECT plus ou moins prononcée, mais globalement plus faible que lors des mesures à court terme. Cela indique que les points d'accès WLAN et les téléphones DECT sont principalement placés dans des pièces où ils sont souvent et longtemps présents, et non dans la chambre à coucher. Cela explique aussi en partie les valeurs de mesure CEM-HF plus élevées lors des mesures à court terme par rapport aux mesures d'itinéraires et à long terme. Pour les mesures d'itinéraires, il faut tenir compte du fait qu'il faut s'attendre à une sous-estimation d'environ 10% de l'exposition en raison du blindage du corps (voir ci-dessous). L'Uplink et le TDD contribuent à moins de 2% de l'intensité de champ totale pour toutes les mesures partielles et pour tous les types d'environnement de mesure.

Le nombre de mesures effectuées sur des sites ayant la même source primaire varie entre une et trois mesures. Avec une taille d'échantillon petite, les distributions peuvent être fortement influencées par les conditions des différents sites de mesure. Au fur et à mesure de l'avancement du monitoring, on peut s'attendre à des données plus robustes sur la répartition de l'exposition dans les différents logements.

Les valeurs médianes de la densité de flux magnétique totale pour les mesures à court terme vont de 0.04 à 0.27 μT , pour les mesures d'itinéraires de 0.05 à 0.33 μT et pour les mesures à long terme de 0.05 à 0.18 μT . Ces valeurs de mesure des BF sont comparables aux mesures d'exposition effectuées en 2012/13 en Suisse et en Italie dans 246 chambres à coucher [17]. Dans cette étude, la valeur moyenne de la densité de flux magnétique était de 0.06 μT , et la valeur maximale était de 0.7 μT .

Comme on pouvait s'y attendre, les valeurs CM-BF les plus élevées ont été mesurées dans les habitations situées à proximité de la source primaire "ligne aérienne 220 / 380 kV". Les maxima s'élèvent à 1.7 μT et sont donc supérieurs à la valeur limite de l'installation de 1 μT fixée à titre préventif par l'ORNI pour les (nouvelles) lignes de transport d'électricité dans des lieux tels que les habitations, les écoles ou les hôpitaux. La valeur limite de l'installation est une valeur limite préventive. Elle vise à maintenir à un niveau bas l'exposition à long terme dans les lieux où les gens séjournent régulièrement pendant une longue période et à réduire ainsi le risque d'éventuelles conséquences pour la santé qui ne sont pas encore identifiables aujourd'hui. La valeur limite de l'installation est environ 100 fois plus basse que la valeur limite d'immissions, qui protège contre les effets sur la santé scientifiquement prouvés. La valeur limite de l'installation s'applique au rayonnement d'une seule installation. Lors des présentes mesures,

l'exposition totale, qui provient de toutes les sources, a été enregistrée. La contribution exacte de la ligne à haute tension ne peut pas être déterminée. Il convient également de noter que la valeur limite de l'installation ne s'applique qu'aux nouvelles lignes à haute tension et non aux anciennes, c'est-à-dire à celles qui étaient déjà en service avant l'entrée en vigueur de l'ORNI le 1er février 2000. Si les anciennes lignes de transport dépassent la valeur limite de l'installation, il faut optimiser ce que l'on appelle l'ordre des phases. Cela permet de réduire l'extension spatiale du champ magnétique. Il n'y a pas d'autres exigences. Si une ancienne ligne ne respecte pas la valeur limite de l'installation même après optimisation des phases, cela est toléré [18].

4.3 Limitations

Afin de réduire autant que possible l'effet de l'absorption du corps, les exposimètres HF sont installés dans un sac à dos à 20 cm du corps, les ExpoM-RF se trouvant au niveau du haut du dos. Cette approche sous-estime néanmoins d'environ 10 % les valeurs moyennes réelles des CEM-HF sans aucune influence du corps, qui ont été déterminées par des mesures dans la chambre anéchoïque. Cette valeur est expliquée plus en détail dans le rapport annuel 2021 [2]. Les appareils ExpoM-ELF ne sont pas influencés par le blindage du corps. L'avantage de la configuration de mesure réside dans le fait qu'elle permet de collecter un grand nombre de données. Les déplacements dans les environnements de mesure sont similaires à ceux de la population dans la vie quotidienne.

La comparaison des résultats des mesures d'itinéraires de cette année avec les environnements de mesure du rapport 2021 ne permet pas de tirer des conclusions sur l'évolution temporelle des immissions de CEM, car les mesures n'ont pas été effectuées aux mêmes endroits. Une analyse de l'évolution temporelle des immissions de CEM entre 2021 et 2023 sera publiée dans le rapport de l'année prochaine, sur la base des données des mesures d'itinéraires effectuées dans les mêmes lieux de mesure.

Les valeurs de CEM-HF obtenues lors de ce suivi de l'exposition représentent un niveau de base auquel la population suisse est exposée en permanence par une source éloignée du corps. Cependant, ces valeurs ne reflètent pas l'exposition totale de la population qui utilise des appareils personnels sans fil. Par conséquent, l'exposition personnelle est plus élevée que les valeurs documentées dans cette étude [19].

En résumé, les valeurs mesurées sont nettement inférieures aux valeurs limites d'immissions, qui sont déterminantes en ce qui concerne les effets sur la santé. Dans l'ensemble, la compréhension de l'exposition au RNI dans la vie quotidienne est nettement améliorée par ces résultats et ceux attendus à l'avenir.

5. Bibliographie

- [1] Office fédéral de l'environnement, "Ordonnance sur la protection contre le rayonnement non ionisant," 2022. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2000/38/de>.
- [2] SwissNIS, "Mesures d'exposition aux rayonnements non ionisants - Rapport annuel 2021 - Consortium de projet SwissNIS", Office fédéral de l'environnement (OFEV), 2022. Accessed : 5 Jun 2023. [En ligne]. Disponible : <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/elektrosmog/fachinformationen/elektrosmog-belastung/nis-expositionsmessungen.html>
- [3] Office fédéral de la statistique, "Typologie des communes et typologie ville/campagne," 2012 [En ligne]. Disponible sur : <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/raum-umwelt/nomenklaturen/gemtyp.html>.
- [4] Office fédéral de l'environnement. "Recherche sur les effets des RNI sur la santé et l'environnement - Effets des immissions des stations de base de téléphonie mobile et des émetteurs radio sur l'état d'esprit, le comportement et les capacités cognitives des jeunes : étude de cohorte prospective avec étude de panel intégrée". <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/elektrosmog/fachinformationen/forschung.htm#-224531633> (accessed 2023).
- [5] M. Eeftens, B. Struchen, K. Roser, M. Zahner, J. Frohlich, and M. Roosli, "Dealing with crosstalk in electromagnetic field measurements of portable devices," *Bioelectromagnetics*, vol. 39, no. 7, pp. 529-538, Oct 2018, doi : 10.1002/bem.22142.
- [6] Joint Committee for Guides in Metrology, "Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement " JCGM, 2008. [En ligne]. Available: https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM_100_2008_E.pdf/cb0ef43f-baa5-11cf-3f85-4dcd86f77bd6.
- [7] M. Eeftens, S. Dongus, A. Burgler, M. Roosli, and A. team, "A real-world quality assessment study in six ExpoM-RF measurement devices," *Environ Res*, vol. 182, p. 109049, Mar 2020. doi : 10.1016/j.envres.2019.109049.
- [8] H. Jalilian, M. Eeftens, M. Ziaei, et M. Roosli, "Public exposure to radiofrequency electromagnetic fields in everyday microenvironments : An updated systematic review for Europe," *Environ Res*, vol. 176, p. 108517, Sep 2019, doi : 10.1016/j.envres.2019.05.048.
- [9] S. Sagar *et al.*, "Radiofrequency electromagnetic field exposure in everyday microenvironments in Europe : A systematic literature review", *J Expo Sci Environ Epidemiol*, vol. 28, no. 2, pp. 147-160. Mar 2018, doi : 10.1038/jes.2017.13.
- [10] M. Velghe, W. Joseph, S. Debouvere, R. Aminzadeh, L. Martens, and A. Thielens, "Characterisation of spatial and temporal variability of RF-EMF exposure levels in urban environments in Flanders, Belgium," *Environ Res*, vol. 175, pp. 351-366, Aug 2019, doi : 10.1016/j.envres.2019.05.027.
- [11] L. E. Birks *et al.*, "Spatial and temporal variability of personal environmental exposure to radio frequency electromagnetic fields in children in Europe", *Environ Int*, vol. 117, pp. 204-214, Aug 2018, doi : 10.1016/j.envint.2018.04.026.
- [12] M. Bonato, E. Chiaramello, M. Parazzini, P. Gajsek, and P. Ravazzani, "Extremely Low Frequency Electric and Magnetic Fields Exposure : Survey of Recent Findings," (en anglais), *Ieee J Electromag Rf*, May 1 2023, doi : 10.1109/Jerm.2023.3268555.
- [13] H. Jalilian, K. Najafi, M. Monazzam, Y. Khosravi, et Z. Zamanian, "Assessment of static and extremely low-frequency magnetic fields in the electric-powered trains," *International Journal of Occupational Hygiene*, vol. 9, no. 2, pp. 105-112, 2017.
- [14] C. Schmutz *et al.*, "Personal radiofrequency electromagnetic field exposure of adolescents in the Greater London area in the SCAMP cohort and the association with restrictions on permitted use

- of mobile communication technologies at school and at home," *Environ Res*, vol. 212, no. Pt B, p. 113252, Sep 2022, doi : 10.1016/j.envres.2022.113252.
- [15] L. van Wel, R. Vermeulen, M. van Eijsden, T. Vrijkotte, H. Kromhout, et A. Huss, "Radiofrequency exposure levels in Amsterdam schools," *Bioelectromagnetics*, vol. 38, no. 5, pp. 397-400. Jul 2017, doi : 10.1002/bem.22053.
- [16] M. Gallastegi *et al.*, "Exposure to extremely low and intermediate-frequency magnetic and electric fields among children from the INMA-Gipuzkoa cohort," (en anglais), *Environmental Research*, vol. 157, pp. 190-197, Aug 2017, doi : 10.1016/j.envres.2017.05.027.
- [17] B. Struchen, I. Liorni, M. Parazzini, S. Gangler, P. Ravazzani, et M. Roosli, "Analysis of personal and bedroom exposure to ELF-MFs in children in Italy and Switzerland", *J Expo Sci Environ Epidemiol*, vol. 26, no. 6, pp. 586-596, Nov 2016, doi : 10.1038/jes.2015.80.
- [18] A. Reichenbach, "Electrosmog dans l'environnement", *Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage OFEFP*, 2005. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/elektrosmog/publikationen-studien/publikationen/elektrosmog-in-der-umwelt.html>.
- [19] L. van Wel *et al.*, "Radio-frequency electromagnetic field exposure and contribution of sources in the general population : an organ-specific integrative exposure assessment", *J Expo Sci Environ Epidemiol*, vol. 31, no. 6, pp. 999-1007, Nov 2021, doi : 10.1038/s41370-021-00287-8.

6. Sources de données

Tableau 10: Jeux de données utilisés pour la planification des parcours et des sites de mesure, avec leurs sources d'approvisionnement et leur licence.

Informations	Source	Licence
Emplacements des antennes de téléphonie mobile	geo.admin.ch	Public
Sites des stations de radio	geo.admin.ch	Public
Coordonnées Lignes à haute tension	<ul style="list-style-type: none"> - Swissgrid SA - Axpo Grid AG - Primeo Energie - Groupe E SA - openinframap.org 	Avec accord d'utilisation des données ou public
Coordonnées des lignes de chemin de fer	geo.admin.ch (SwissTLM3D)	Public
Typologie des communes OFS	Atlas de l'OFS	Public
Typologie des communes ARE	geo.admin.ch	Public
Zones à bâtir	geo.admin.ch	Public
Typologie des paysages	geo.admin.ch	Public
Limites communales	geo.admin.ch	Public
CORINE Couverture terrestre	wsl.ch	Public
Registre des bâtiments et des logements (RBL) (contient des informations sur la population)	OFS	Contrat d'utilisation des données
Statistiques sur les bâtiments et les logements (SBL)	OFS	Contrat d'utilisation des données

Annexe

I Glossaire

Tableau 11: Glossaire

Désignation	Description
AC	Alternating Current : courant alternatif
BF	Basse fréquence, utilisée comme synonyme d'ELF dans le présent rapport.
CEM	Champ électromagnétique : terme générique pour les champs électromagnétiques et leurs interactions.
DAB	Digital Audio Broadcasting : norme de transmission numérique pour la radio.
DC	Direct Current : courant continu
DECT	Digital Enhanced Cordless Telecommunications : norme de communication radio, principalement utilisée pour les téléphones sans fil.
Downlink (DL)	La liaison descendante : Flux de données de l'antenne de téléphonie mobile vers le téléphone portable
ELF	Extremely low Frequency : répartitions de fréquences de 3 à 30 Hz (selon la définition de l'Union internationale des télécommunications). Dans le présent rapport, ce terme est utilisé pour désigner toutes les fréquences inférieures à 100 kHz.
FFT	Fast Fourier Transform : terme générique pour les méthodes mathématiques de conversion de signaux entre l'espace temporel et l'espace fréquentiel.
FM	Modulation de fréquence : procédé permettant d'appliquer un signal utile à un signal porteur en modifiant la fréquence du signal porteur.
GPS	Global Positioning System : service de localisation basé sur les satellites
HF	Haute fréquence, utilisée comme synonyme de RF dans le présent rapport.
IGW	Valeur limite d'immissions
IQR	Interquartile Range : répartitions interquartile (.75 percentile - .25 percentile)
ISM	Industrial, Scientific and Medical band : bandes de fréquences sans licence utilisées pour un grand nombre d'appareils techniques (par ex. Bluetooth, WiFi, four à micro-ondes).
ME	Micro Environment / Microenvironnement
MySQL	Système de gestion de base de données d'Oracle
OFEV	Office fédéral de l'environnement
OFS	Office fédéral de la statistique
PAM/PAMR	Professional mobile radio : Systèmes de communication radio
Peak	Valeur de crête (maximum)
Polycom	Réseau radio suisse basé sur Tetrapol, système radio national officiel des autorités pour la police, les services de secours, etc.
R	Langage de programmation libre pour les applications statistiques
RF	Radio frequency : gamme de fréquences non clairement définie (principalement) dans les bandes MHz et GHz, utilisée pour la plupart des technologies de communication.
RMS	root mean square : valeur mathématique efficace de l'intensité de champ alternatif.
RNI	Rayonnement non ionisant
SIG	Système d'information géographique
TDD	Time-division duplexing : Procédé de transmission dans lequel le flux de données entre deux appareils (par exemple un téléphone mobile et une antenne de téléphonie mobile) est décalé dans le temps dans les deux directions (liaison montante et liaison descendante) avec la même fréquence.
Tetrapol	Système radio numérique développé pour le domaine d'application de la sécurité publique.

Désignation	Description
TV	Television : services de télévision
Uplink (UL)	Liaison montante : Flux de données du téléphone mobile vers l'antenne de téléphonie mobile
WiFi	Consortium d'entreprises pour la certification des appareils WLAN, utilisé dans le langage courant comme synonyme de WLAN.
WLAN	Wireless Local Area Network : réseaux locaux sans fil

II Liste des communes d'implantation des microenvironnements

Tableau 12: Liste des communes avec le nombre total de microenvironnements par commune et répartis par type de microenvironnement.

Commune	Canton	Zone industrielle	Centre-ville urbain	Quartier résidentiel central urbain	Quartier résidentiel non-central urbain	centre-ville suburbain	quartier résidentiel suburbain	centre-ville rural	quartier résidentiel rural	zone agricole	Zone de sport et de loisirs	Zone naturelle	Zone agricole avec station de radiodiffusion	Total
Allschwil	BL	1				1								2
Appenzell	AI							1						1
Arisdorf	BL							1	1					2
Avenches	VD							1	1					2
Bâle	BS		1	2	4									7
Belp	BE					1	1							2
Berne	BE	2	1	2	2						1			8
Bettingen	BS					1							1	2
Bourg-en-Lavaux	VD							1		1				2
Bowil	BE							1	1					2
Buttisholz	LU							1	1	1				3
Chatillon	JU							1						1
Cheseaux-Noreaz	VD						1					1		2
Coire	GR		1											1
Deitingen	SO							1	2					3
Delemont	JU	1				1	1							3
Disentis	GR							1	1	1				3
Dulliken	SO						2						1	3
Erstfeld	UR					1	1							2
Ettiswil	LU							1	1					2
Felben	TG							1						1
Frauenfeld	TG	1				1	1				1			4
Freienbach	SZ					1	1							2
Fribourg	FR		1	1	1					1				4
Geneve	GE	1	1	1	2									5
Gerlafingen	SO					1	1							2
Glaris	GL					1	2							3
Gonten	AI									1				1

Commune	Canton	Zone industrielle	Centre-ville urbain	Quartier résidentiel central urbain	Quartier résidentiel non-central urbain	centre-ville suburbain	quartier résidentiel suburbain	centre-ville rural	quartier résidentiel rural	zone agricole	Zone de sport et de loisirs	Zone naturelle	Zone agricole avec station de radiodiffusion	Total
Grolley	FR								1					1
Herisau	AR					1	1							2
Kehrsatz	BE					1	2							3
Landquart	GR					1	2							3
Langnau	BE	1						1	1					3
Lausanne	VD	1												1
Liestal	BL	1				1	2							4
Lucerne	LU		1	1	2						1			5
Marly	FR						1							1
Neuhausen	SH	1				1	1					1		4
Niedergoesgen	SO	1				1								2
Pully	VD					1	1							2
Rossemaison	JU								1			1		2
Ruete	AI								1					1
Schaffhouse	SH		1											1
Schwyz	SZ					1	2							3
Selzach	SO							1	1					2
Soleure	SO		1	1	2									4
Saint-Gall	SG	1	1	1	3									6
Unterbaech	VS								1					1
Viège	VS					1	1							2
Vully-les-Lacs	VD							1	1				1	3
Walchwil	ZG							1	1					2
Winterthur	ZH	1	1	1	2									5
Wohlen	BE					1	2							3
Yverdon	VD	1				1	1				1			4
Zermatt	VS					1	2							3
Zernez	GR							1	1					2
Total		14	10	10	18	21	29	13	19	6	4	3	3	150

Environnements de mesure des espaces publics

Tableau 13: Liste des communes avec le nombre total de types d'environnement de mesure par commune et répartis par type d'environnement de mesure, respectivement par espaces publics.

Commune	Canton	Gare ferroviaire	Arrêt de tram	Arrêt de bus	EPF/JNI/HES	Supermarché	Restaurant	Bibliothèque	Total
Allschwil	BL	0	0	0	0	0	1	0	1
Appenzell	AI	1	0	0	0	0	1	0	2
Arisdorf	BL	0	0	0	0	0	1	0	1
Bâle	BS	2	2	0	0	0	0	0	4
Belp	BE	1	0	0	0	0	1	0	2
Berne	BE	5	1	0	0	0	0	0	6
Bourg-en-Lavaux	VD	1	0	0	0	0	0	0	1
Bowil	BE	1	0	0	0	0	1	0	2
Coire	GR	0	0	1	3	0	0	0	4
Delemont	JU	0	0	0	0	1	2	0	3
Disentis	GR	1	0	0	0	1	0	0	2
Erstfeld	UR	0	0	0	0	1	0	0	1
Ettiswil	LU	0	0	1	0	0	0	0	1
Frauenfeld	TG	0	0	0	0	1	2	0	3
Freienbach	SZ	1	0	1	0	0	0	0	2
Fribourg	FR	0	0	3	0	0	1	0	4
Geneve	GE	3	1	0	0	0	0	1	5
Glaris	GL	1	0	0	0	1	0	0	2
Grolley	FR	1	0	0	0	0	0	0	1
Landquart	GR	0	0	0	0	1	0	0	1
Langnau	BE	1	0	0	0	0	0	0	1
Lausanne	VD	1	0	1	0	0	1	0	3
Liestal	BL	2	0	1	0	1	0	0	4
Lucerne	LU	0	0	2	0	0	0	0	2
Neuhausen	SH	0	0	1	0	0	0	0	1
Oltén	SO	0	0	0	3	0	0	0	3
Riehen	BS	0	0	2	0	0	0	0	2
Ruete	AI	0	0	0	0	1	0	0	1
Schaffhouse	SH	0	0	1	0	0	1	0	2
Schwyz	SZ	0	0	2	0	0	1	0	3
Soleure	SO	2	0	0	0	1	1	0	4
Saint-Gall	SG	1	0	2	0	0	2	0	5

Commune	Canton	Gare ferroviaire	Arrêt de tram	Arrêt de bus	EPF/UNI/HES	Supermarché	Restaurant	Bibliothèque	Total
Viège	VS	1	0	0	0	0	0	0	1
Winterthur	ZH	1	0	2	0	1	0	0	4
Wohlen	BE	0	0	2	0	1	1	0	4
Yverdon	VD	1	0	0	0	0	1	0	2
Total		28	4	22	6	11	18	1	90

III Données statistiques des mesures d'itinéraires

3.1.1 Aperçu général - Exposition aux HF

Tableau 14: Données statistiques (en V/m) de l'exposition totale aux CEM-HF (RMS). "n" désigne le nombre de points de données par type d'environnement de mesure. "N" désigne le nombre d'environnements de mesure du même type mesurés.

	Environnement de mesure	N	n	min	Q05	Q25	Médiane	Q75	Q95	max
Microenvironnements	Zone industrielle	14	2421	0.05	0.10	0.18	0.29	0.46	0.80	2.85
	Centre-ville urbain	10	1677	0.03	0.06	0.14	0.24	0.39	0.88	6.02
	quartier résidentiel central urbain	10	1617	0.02	0.06	0.12	0.20	0.34	0.69	3.66
	Zone de sport et de loisirs	4	659	0.08	0.10	0.13	0.17	0.22	0.40	1.40
	zone agricole*	9	1500	0.02	0.03	0.09	0.16	0.46	1.55	2.46
	centre-ville suburbain	21	3392	0.02	0.05	0.10	0.15	0.24	0.49	2.23
	quartier résidentiel non-central urbain	18	2987	0.02	0.04	0.09	0.15	0.26	0.51	2.08
	quartier résidentiel suburbain	29	4804	0.02	0.03	0.07	0.13	0.24	0.51	1.41
	quartier résidentiel rural	20	3178	0.01	0.02	0.05	0.10	0.19	0.45	2.21
	centre-ville rural	13	2072	0.02	0.03	0.05	0.08	0.13	0.28	0.84
Zone naturelle	3	470	0.02	0.03	0.05	0.07	0.13	0.27	0.52	
	Environnement de mesure	N	n	min	Q05	Q25	Médiane	Q75	Q95	max
espaces publics	Arrêt de tram	4	434	0.09	0.16	0.27	0.38	0.49	0.67	1.65
	Arrêt de bus	22	2020	0.05	0.11	0.21	0.35	0.49	1.21	10.39
	Gare ferroviaire	28	2612	0.02	0.07	0.17	0.29	0.52	1.12	3.53
	EPF/UNI/HES	6	860	0.02	0.03	0.05	0.23	0.49	0.84	1.37
	Restaurant	18	3389	0.02	0.04	0.08	0.20	0.49	0.91	6.11
	École	16	2239	0.01	0.02	0.05	0.10	0.21	0.43	1.36
	Supermarché	11	1234	0.02	0.02	0.04	0.06	0.11	0.26	1.06
	Bibliothèque	1	129	0.02	0.02	0.03	0.05	0.08	0.14	0.31
	Environnement de mesure	N	n	min	Q05	Q25	Médiane	Q75	Q95	max
transport	Metro	3	187	0.10	0.13	0.22	0.29	0.39	0.70	1.09
	Tram	97	787	0.05	0.10	0.17	0.24	0.36	0.62	1.42
	Train	7	26480	0.01	0.06	0.15	0.24	0.37	0.70	3.04
	Bus	57	5961	0.02	0.06	0.13	0.20	0.30	0.60	2.41
	Télécabine	2	141	0.03	0.03	0.06	0.12	0.18	0.26	0.33

Tableau 15: Contribution moyenne (%) des différentes sources HF (DL = downlink, UL = uplink, TDD = time division duplex) à l'exposition totale aux CEM-HF (RMS). RMS (V/m) désigne la valeur moyenne quadratique calculée selon l'équation (4). "N" désigne le nombre d'environnements de mesure mesurés du même type. "n" désigne le nombre de points de données par type d'environnement de mesure.

	Environnement de mesure	N	n	RMS (V/m)	DL (%)	UL (%)	TDD (%)	Radiodiffusion (%)	WLAN (%)	DECT (%)
Microenvironnements	Zone industrielle	14	2421	0.43	88.0	0.1	3.4	8.2	0.2	0.1
	Centre-ville urbain	10	1677	0.48	83.8	0.1	0.9	2.7	0.5	12.0
	quartier résidentiel central urbain	10	1617	0.4	95.8	0.3	0.7	2.8	0.4	0.1
	Zone de sport et de loisirs	4	659	0.24	80.8	0.1	0.2	18.7	0.2	0.0
	zone agricole*	9	1500	0.62	2.7	0.0	0.0	97.2	0.0	0.0
	centre-ville suburbain	21	3392	0.25	74.0	0.1	2.0	23.3	0.5	0.1
	quartier résidentiel non-central urbain	18	2987	0.26	86.5	0.1	1.4	11.2	0.6	0.1
	quartier résidentiel suburbain	29	4804	0.24	60.6	0.1	1.3	37.5	0.4	0.1
	quartier résidentiel rural	20	3178	0.22	77.3	0.1	0.6	21.6	0.3	0.0
	centre-ville rural	13	2072	0.14	48.2	0.2	1.1	48.9	1.1	0.5
Zone naturelle	3	470	0.13	54.5	0.5	1.0	42.9	1.0	0.0	
	Environnement de mesure	N	n	RMS (V/m)	DL (%)	UL (%)	TDD (%)	Radiodiffusion (%)	WLAN (%)	DECT (%)
espaces publics	Arrêt de tram	4	434	0.43	90.7	0.1	3.2	4.4	1.4	0.3
	Arrêt de bus	22	2020	0.73	93.4	0.3	0.8	5.1	0.3	0.2
	Gare ferroviaire	28	2612	0.54	73.4	0.7	4.0	20.5	0.9	0.4
	EPF/UNI/HES	6	860	0.42	91.0	1.1	2.3	3.8	1.6	0.2
	Restaurant	18	3389	0.43	94.9	1.6	0.2	0.9	1.8	0.5
	École	16	2239	0.21	72.0	1.5	1.5	19.3	5.4	0.4
	Supermarché	11	1234	0.13	68.3	5.2	0.3	2.5	12.8	10.9
	Bibliothèque	1	129	0.08	38.6	5.3	0.4	33.1	22.6	0.1
		Environnement de mesure	N	n	RMS (V/m)	DL (%)	UL (%)	TDD (%)	Radiodiffusion (%)	WLAN (%)
transport	Metro	3	187	0.37	10.6	66.6	0.0	0.6	22.2	0.0
	Tram	97	787	0.36	74.4	6.7	5.8	4.7	8.1	0.3
	Train	7	26480	0.34	44.5	35.0	5.6	1.2	13.6	0.1
	Bus	57	5961	0.32	60.3	8.0	4.2	20.9	6.5	0.2
	Télécabine	2	141	0.15	67.3	15.7	1.1	12.4	3.5	0.1

Tableau 16: Données statistiques (en V/m) de l'exposition totale aux CEM-HF (peak). "n" désigne le nombre de points de données par type d'environnement de mesure. "N" désigne le nombre d'environnements de mesure du même type.

	Environnement de mesure	N	n	min	Q05	Q25	Médiane	Q75	Q95	max
Microenvironnements	Zone industrielle	14	2419	0.18	0.50	1.00	1.71	2.88	5.12	18.13
	centre-ville urbain	10	1675	0.11	0.25	0.68	1.21	2.10	5.23	16.89
	quartier résidentiel central urbain	10	1616	0.09	0.26	0.58	1.10	1.84	3.71	26.25
	centre-ville suburbain	21	3391	0.08	0.20	0.42	0.74	1.28	2.80	7.92
	quartier résidentiel non-central urbain	18	2990	0.07	0.12	0.38	0.71	1.31	2.73	10.38
	Zone de sport et de loisirs	4	659	0.24	0.38	0.52	0.70	1.18	2.90	6.53
	zone agricole*	9	1498	0.07	0.12	0.32	0.67	1.70	6.96	12.27
	quartier résidentiel suburbain	29	4809	0.06	0.11	0.26	0.55	1.13	2.80	9.01
	quartier résidentiel rural	20	3178	0.05	0.09	0.19	0.42	0.93	2.49	8.00
	centre-ville rural	13	2072	0.06	0.10	0.17	0.30	0.59	1.47	3.05
	Zone naturelle	3	470	0.06	0.10	0.14	0.22	0.57	1.77	2.80
espaces publics	Environnement de mesure	N	n	min	Q05	Q25	Médiane	Q75	Q95	max
	Arrêt de tram	4	432	0.42	0.76	1.47	1.96	2.56	3.46	6.73
	Arrêt de bus	22	2022	0.16	0.41	1.06	1.83	3.19	6.49	63.66
	Gare ferroviaire	28	2607	0.07	0.34	0.79	1.58	2.80	5.68	28.50
	EPF/UNI/HES	6	861	0.07	0.15	0.34	1.29	2.46	4.28	14.44
	Restaurant	18	3391	0.08	0.15	0.45	1.26	2.20	3.69	22.64
	École	16	2241	0.06	0.11	0.27	0.52	1.18	2.65	9.61
	Supermarché	11	1234	0.06	0.13	0.27	0.46	0.84	1.85	7.59
Bibliothèque	1	130	0.07	0.09	0.13	0.23	0.58	1.54	5.25	
Moyens de transport	Environnement de mesure	N	n	min	Q05	Q25	Médiane	Q75	Q95	max
	Metro	3	187	0.37	0.75	1.11	1.58	2.25	3.41	6.82
	Train	97	26486	0.03	0.31	0.90	1.52	2.41	4.58	18.88
	Tram	7	787	0.17	0.48	1.02	1.50	2.18	3.66	6.78
	Bus	57	5956	0.09	0.28	0.69	1.14	1.84	3.57	11.49
	Télécabine	2	142	0.09	0.11	0.35	0.64	1.01	1.58	2.01

Tableau 17: Contribution moyenne (%) des différentes sources HF (DL = downlink, UL = uplink, TDD = time division duplex) à l'exposition totale aux CEM-HF (peak). RMS (V/m) désigne la valeur moyenne quadratique calculée selon l'équation (4). "N" désigne le nombre d'environnements de mesure mesurés du même type. "n" désigne le nombre de points de données par type d'environnement de mesure.

	Environnement de mesure	N	n	RMS (V/m)	DL (%)	UL (%)	TDD (%)	Radiodiffusion (%)	WLAN (%)	DECT (%)
Microenvironnements	Zone industrielle	14	2419	2.68	73.6	0.0	23.5	2.6	0.3	0.1
	centre-ville urbain	10	1675	2.58	90.7	0.2	7.5	0.7	0.9	0.1
	quartier résidentiel central urbain	10	1616	2.20	93.5	0.1	4.9	1.0	0.6	0.0
	centre-ville suburbain	21	3391	1.35	84.2	0.2	11.0	3.4	1.1	0.2
	quartier résidentiel non-central urbain	18	2990	1.32	76.4	0.1	12.3	10.1	1.1	0.1
	Zone de sport et de loisirs	4	659	1.31	92.7	0.4	0.5	5.9	0.4	0.1
	zone agricole*	9	1498	2.68	5.2	0.0	0.1	94.6	0.1	0.0
	quartier résidentiel suburbain	29	4809	1.30	65.1	0.0	17.9	16.4	0.4	0.0
	quartier résidentiel rural	20	3178	1.12	87.7	0.1	4.3	7.0	0.9	0.0
	centre-ville rural	13	2072	0.67	62.0	0.3	8.8	26.1	2.6	0.2
	Zone naturelle	3	470	0.72	66.3	3.3	16.9	9.2	4.4	0.0
espaces publics	Environnement de mesure	N	n	RMS (V/m)	DL (%)	UL (%)	TDD (%)	Radiodiffusion (%)	WLAN (%)	DECT (%)
	Arrêt de tram	4	432	2.22	80.3	0.3	16.5	0.6	2.1	0.2
	Arrêt de bus	22	2022	4.14	89.6	0.3	8.3	1.3	0.3	0.2
	Gare ferroviaire	28	2607	2.94	69.1	1.0	24.3	3.5	1.9	0.2
	EPF/UNI/HES	6	861	2.14	70.1	3.0	14.2	1.9	10.7	0.1
	Restaurant	18	3391	2.05	85.5	2.7	0.4	4.2	6.7	0.5
	École	16	2241	1.23	64.2	1.0	12.2	8.3	14.3	0.1
	Supermarché	11	1234	1.02	25.0	2.6	0.7	0.3	61.2	10.2
	Bibliothèque	1	130	0.84	8.2	1.0	0.1	1.7	89.0	0.0
Moyens de transport	Environnement de mesure	N	n	RMS (V/m)	DL (%)	UL (%)	TDD (%)	Radiodiffusion (%)	WLAN (%)	DECT (%)
	Metro	3	187	2.04	8.6	66.9	0.0	0.1	24.4	0.0
	Train	97	26486	2.33	31.0	29.3	18.7	0.4	20.5	0.1
	Tram	7	787	1.98	54.8	8.3	27.4	2.1	7.3	0.2
	Bus	57	5956	1.84	53.2	8.9	20.8	9.1	8.0	0.0
	Télécabine	2	142	0.85	67.3	25.3	3.8	1.9	1.7	0.0

Tableau 18: Répartitions de l'exposition moyenne des mesures RMS CEM-HF des différents environnements de mesure. La valeur moyenne de la valeur efficace est calculée selon l'équation (9). Le minimum et le maximum indiquent respectivement la valeur RMS la plus basse et la plus élevée pour chaque environnement de mesure. "N" désigne le nombre d'environnements de mesure du même type.

	Environnement de mesure	N	Min (V/m)	Valeurs moyennes de la RMS (V/m)	Max (V/m)
Microenvironnements	centre-ville urbain	10	0.25	0.46	0.66
	zone agricole*	9	0.08	0.44	1.26
	Zone industrielle	14	0.18	0.40	0.67
	quartier résidentiel central urbain	10	0.17	0.36	0.78
	quartier résidentiel non-central urbain	18	0.03	0.24	0.34
	centre-ville suburbain	21	0.09	0.23	0.40
	Zone de sport et de loisirs	4	0.15	0.22	0.35
	quartier résidentiel suburbain	29	0.05	0.21	0.45
	quartier résidentiel rural	20	0.03	0.18	0.55
	centre-ville rural	13	0.03	0.13	0.26
Zone naturelle	3	0.08	0.12	0.19	
espaces publics	Environnement de mesure	N	Min (V/m)	Valeurs moyennes de la RMS (V/m)	Max (V/m)
	Arrêt de bus	22	0.11	0.54	2.09
	Gare ferroviaire	28	0.07	0.46	1.16
	Arrêt de tram	4	0.21	0.39	0.52
	EPF/UNI/HES	6	0.06	0.35	0.67
	Restaurant	18	0.03	0.30	0.93
	École	16	0.04	0.17	0.49
	Supermarché	11	0.06	0.11	0.3
	Bibliothèque	1	0.08	0.08	0.08
Moyens de transport	Environnement de mesure	N	Min (V/m)	Valeurs moyennes de la RMS (V/m)	Max (V/m)
	Metro	3	0.33	0.37	0.43
	Tram	97	0.04	0.34	1.34
	Train	7	0.16	0.32	0.44
	Bus	57	0.09	0.3	0.77
	Télécabine	2	0.13	0.15	0.16

Tableau 19: Répartitions de l'exposition moyenne des mesures CEM-HF de crête des différents environnements de mesure. La valeur moyenne est calculée selon l'équation (9). Le minimum et le maximum indiquent respectivement la valeur moyenne effective la plus basse et la plus élevée par environnement de mesure individuel. "N" désigne le nombre d'environnements de mesure mesurés du même type.

	Environnement de mesure	N	Min (V/m)	Valeurs moyennes de la RMS (V/m)	Max (V/m)
Microenvironnements	Zone industrielle	14	1.07	2.52	3.92
	centre-ville urbain	10	1.30	2.39	4.33
	quartier résidentiel central urbain	10	0.80	2.00	4.42
	zone agricole*	9	0.29	1.84	5.71
	centre-ville suburbain	21	0.40	1.28	1.96
	quartier résidentiel non-central urbain	18	0.11	1.23	2.01
	Zone de sport et de loisirs	4	0.63	1.15	2.13
	quartier résidentiel suburbain	29	0.19	1.10	3.01
	quartier résidentiel rural	20	0.12	0.92	2.54
	centre-ville rural	13	0.14	0.60	1.16
	Zone naturelle	3	0.21	0.57	1.21
espaces publics	Environnement de mesure	N	Min (V/m)	Valeurs moyennes de la RMS (V/m)	Max (V/m)
	Arrêt de bus	22	0.38	2.93	12.38
	Gare ferroviaire	28	0.22	2.47	5.85
	Arrêt de tram	4	1.10	2.01	2.69
	EPF/UNI/HES	6	0.30	1.86	3.65
	Restaurant	18	0.16	1.47	3.99
	École	16	0.26	1.09	2.50
	Supermarché	11	0.49	0.88	1.89
	Bibliothèque	1	0.84	0.84	0.84
Moyens de transport	Environnement de mesure	N	Min (V/m)	Valeurs moyennes de la RMS (V/m)	Max (V/m)
	Train	97	0.15	2.10	6.58
	Metro	3	1.75	2.02	2.52
	Tram	7	0.80	1.91	2.45
	Bus	57	0.57	1.76	3.39
	Télécabine	2	0.66	0.85	1.03

Tableau 20: Données statistiques (en V/m) de l'exposition totale aux CEM-HF dans les zones agricoles (RMS et peak). "n" désigne le nombre de points de données par type d'environnement de mesure. "N" désigne le nombre d'environnements de mesure du même type mesurés.

zone agricole* RMS	N	n	min	Q05	Q25	Médiane	Q75	Q95	max
zone agricole avec émetteur de radiodiffusion	3	485	0.08	0.17	0.48	0.79	1.33	1.88	2.46
zone agricole sans émetteur de radiodiffusion	6	1015	0.02	0.03	0.07	0.11	0.16	0.31	0.53
zone agricole* peak	N	n	min	Q05	Q25	Médiane	Q75	Q95	max
zone agricole avec émetteur de radiodiffusion	3	484	0.12	0.38	1.29	2.81	5.71	8.84	12.27
zone agricole sans émetteur de radiodiffusion	6	1014	0.07	0.11	0.23	0.44	0.83	1.62	3.40

Tableau 21: Contribution moyenne (%) des différentes sources HF (DL = downlink, UL = uplink, TDD = time division duplex) à l'exposition totale aux CEM-HF (RMS et peak) dans les zones agricoles. RMS (V/m) désigne la valeur moyenne quadratique calculée selon l'équation (4). "N" désigne le nombre d'environnements de mesure mesurés du même type. "n" désigne le nombre de points de données par type d'environnement de mesure.

zone agricole* RMS	N	n	RMS (V/m)	DL (%)	UL (%)	TDD (%)	Radiodiffusion (%)	WLAN (%)	DECT (%)
zone agricole avec émetteur de radiodiffusion	3	485	1.07	0.3	0.0	0.0	99.7	0.0	0.0
zone agricole sans émetteur de radiodiffusion	6	1015	0.15	56.9	0.1	0.4	42.1	0.4	0.1
zone agricole* peak	N	n	RMS (V/m)	DL (%)	UL (%)	TDD (%)	Radiodiffusion (%)	WLAN (%)	DECT (%)
zone agricole avec émetteur de radiodiffusion	3	484	4.57	0.9	0.0	0.0	99.1	0.0	0.0
zone agricole sans émetteur de radiodiffusion	6	1014	0.80	76.6	0.0	0.8	20.2	1.6	0.0

Tableau 22: Répartitions de l'exposition moyenne des mesures RMS et Peak CEM-HF dans les zones agricoles. La valeur moyenne est calculée selon l'équation (9). Le minimum et le maximum indiquent respectivement la valeur moyenne effective la plus basse et la plus élevée par environnement de mesure individuel. "N" désigne le nombre d'environnements de mesure mesurés du même type.

zone agricole* RMS	N	Min (V/m)	Valeurs moyennes de la RMS (V/m)	Max (V/m)
zone agricole avec émetteur de radiodiffusion	3	0.59	1.02	1.26
zone agricole sans émetteur de radiodiffusion	20	0.03	0.18	0.55
zone agricole* peak	N	Min (V/m)	Valeurs moyennes de la RMS (V/m)	Max (V/m)
zone agricole avec émetteur de radiodiffusion	3	1.19	4.10	5.71
zone agricole sans émetteur de radiodiffusion	6	0.29	0.72	1.21

3.1.2 Aperçu général - Exposition aux BF

Tableau 23: Données statistiques (en μT) de l'exposition totale aux CM-BF. "n" désigne le nombre de points de données par type d'environnement de mesure. "N" désigne le nombre d'environnements de mesure du même type.

	Environnement de mesure	N	n	min	Q05	Q25	Médiane	Q75	Q95	max
Microenvironnements	centre-ville urbain	10	1675	0.02	0.05	0.11	0.19	0.32	0.62	1.69
	quartier résidentiel central urbain	10	1613	0.02	0.05	0.10	0.18	0.28	0.57	1.43
	Zone industrielle	14	2411	0.01	0.02	0.06	0.14	0.35	1.52	6.87
	quartier résidentiel non-central urbain	18	2986	0.01	0.03	0.08	0.14	0.26	0.54	1.66
	centre-ville suburbain	21	3380	0.02	0.03	0.07	0.13	0.26	0.55	1.52
	centre-ville rural	13	2067	0.01	0.02	0.05	0.12	0.20	0.44	1.53
	quartier résidentiel rural	20	3177	0.01	0.02	0.04	0.09	0.16	0.33	3.49
	quartier résidentiel suburbain	29	4794	0.01	0.02	0.04	0.09	0.18	0.40	1.87
	Zone naturelle	3	469	0.01	0.02	0.02	0.06	0.14	0.35	1.69
	Zone de sport et de loisirs	4	657	0.01	0.02	0.02	0.03	0.05	0.23	0.99
	zone agricole*	9	1498	0.01	0.02	0.02	0.03	0.07	0.18	1.18
espaces publics	Environnement de mesure	N	n	min	Q05	Q25	Médiane	Q75	Q95	max
	Gare ferroviaire	28	2604	0.02	0.04	0.12	0.39	1.00	2.99	16.26
	Arrêt de tram	4	433	0.04	0.06	0.10	0.20	0.34	0.54	1.16
	Arrêt de bus	22	2013	0.02	0.03	0.09	0.16	0.28	0.60	2.23
	EPF/UNI/HES	6	860	0.02	0.02	0.03	0.14	0.36	0.87	2.35
	Supermarché	11	1231	0.02	0.02	0.04	0.06	0.09	0.20	0.69
	Restaurant	18	3381	0.01	0.02	0.03	0.05	0.13	0.45	1.40
	Bibliothèque	1	128	0.02	0.02	0.02	0.03	0.05	0.15	0.25
	École	16	2234	0.01	0.02	0.02	0.03	0.06	0.16	0.35
Moyens de transport	Environnement de mesure	N	n	min	Q05	Q25	Médiane	Q75	Q95	max
	Train	97	26424	0.01	0.06	0.20	0.44	1.21	5.87	21.77
	Tram	7	787	0.02	0.05	0.09	0.18	0.34	1.02	4.52
	Bus	57	5947	0.01	0.03	0.05	0.08	0.15	0.46	5.94
	Metro	3	186	0.02	0.02	0.03	0.05	0.09	0.20	0.56
	Télécabine	2	141	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.08	0.15

Tableau 24: Contribution moyenne (%) des différentes sources de BF (courant ferroviaire, alimentation électrique, courant ondulé des trams) à l'exposition totale aux CM-BF RMS (μT) désigne la valeur moyenne quadratique calculée selon l'équation (6). "N" désigne le nombre d'environnements de mesure du même type. "n" désigne le nombre de points de données par type d'environnement de mesure.

	Environnement de mesure	N	n	RMS (μT)	Courant ferroviaire (16.7 Hz)	Alimentation électrique (50 Hz)	Courant ondulé du tram (300 Hz)
Microenvironnements	centre-ville urbain	10	1675	0.31	3.9	93.2	3.0
	quartier résidentiel central urbain	10	1613	0.28	4.1	93.3	2.6
	Zone industrielle	14	2411	0.71	12.9	86.3	0.7
	quartier résidentiel non-central urbain	18	2986	0.26	40.6	59.4	0.0
	centre-ville suburbain	21	3380	0.26	25.8	74.1	0.1
	centre-ville rural	13	2067	0.22	21.7	78.2	0.1
	quartier résidentiel rural	20	3177	0.18	9.6	90.3	0.1
	quartier résidentiel suburbain	29	4794	0.20	40.1	59.8	0.1
	Zone naturelle	3	469	0.20	91.9	8.0	0.1
	Zone de sport et de loisirs	4	657	0.12	12.3	87.0	0.7
zone agricole*	9	1498	0.09	16.8	82.9	0.3	
espaces publics	Environnement de mesure	N	n	RMS (μT)	Courant ferroviaire (16.7 Hz)	Alimentation électrique (50 Hz)	Courant ondulé du tram (300 Hz)
	Gare ferroviaire	28	2604	1.60	99.2	0.8	0.0
	Arrêt de tram	4	433	0.29	2.7	56.5	40.8
	Arrêt de bus	22	2013	0.30	42.3	56.4	1.3
	EPF/UNI/HES	6	860	0.39	98.2	1.8	0.0
	Supermarché	11	1231	0.10	22.4	77.2	0.4
	Restaurant	18	3381	0.19	51.7	48.2	0.1
	Bibliothèque	1	128	0.06	4.9	94.1	1.0
	École	16	2234	0.07	74.0	25.2	0.8
Moyens de transport	Environnement de mesure	N	n	RMS (μT)	Courant ferroviaire (16.7 Hz)	Alimentation électrique (50 Hz)	Courant ondulé du tram (300 Hz)
	Train	97	26424	2.47	99.7	0.3	0.0
	Tram	7	787	0.55	34.5	37.4	28.2
	Bus	57	5947	0.32	80.4	17.9	1.7
	Metro	3	186	0.11	79.5	18.1	2.4
	Télécabine	2	141	0.03	16.9	79.7	3.4

Tableau 25: Répartitions de l'exposition moyenne des mesures CM-BF des différents environnements de mesure. La valeur moyenne est calculée selon l'équation (10). Le minimum et le maximum indiquent respectivement la valeur moyenne la plus basse et la plus élevée pour chaque environnement de mesure. "N" désigne le nombre de microenvironnements du même type.

	Environnement de mesure	N	Minimum de la moyenne arithmétique (μT)	Moyenne de la moyenne arithmétique (μT)	Maximum de la moyenne arithmétique (μT)
Microenvironnements	Zone industrielle	14	0.07	0.34	1.48
	centre-ville urbain	10	0.17	0.25	0.31
	quartier résidentiel central urbain	10	0.15	0.23	0.32
	quartier résidentiel non-central urbain	18	0.06	0.20	0.33
	centre-ville suburbain	21	0.08	0.19	0.32
	centre-ville rural	13	0.07	0.16	0.25
	quartier résidentiel suburbain	29	0.06	0.14	0.32
	quartier résidentiel rural	20	0.07	0.12	0.32
	Zone naturelle	3	0.02	0.11	0.22
	zone agricole*	9	0.02	0.06	0.08
Zone de sport et de loisirs	4	0.02	0.06	0.10	
espaces publics	Environnement de mesure	N	Minimum de la moyenne arithmétique (μT)	Moyenne de la moyenne arithmétique (μT)	Maximum de la moyenne arithmétique (μT)
	Gare ferroviaire	28	0.07	0.96	6.26
	EPF/UNI/HES	6	0.03	0.26	0.60
	Arrêt de tram	4	0.09	0.25	0.35
	Arrêt de bus	22	0.03	0.22	0.50
	Restaurant	18	0.02	0.13	0.36
	Supermarché	11	0.04	0.08	0.18
	École	16	0.02	0.06	0.14
	Bibliothèque	1	0.05	0.05	0.05
Moyens de transport	Environnement de mesure	N	Minimum de la moyenne arithmétique (μT)	Moyenne de la moyenne arithmétique (μT)	Maximum de la moyenne arithmétique (μT)
	Train	97	0.03	1.23	8.99
	Tram	7	0.09	0.26	0.46
	Bus	57	0.04	0.16	0.45
	Metro	3	0.05	0.07	0.10
	Télécabine	2	0.02	0.03	0.03

3.1.3 tableau Analyses supplémentaires à bord des trains - exposition aux HF et aux BF

Tableau 26: Données statistiques (en V/m) de l'exposition totale aux CEM-HF RMS (en haut) et Peak (en bas) selon l'occupation du train. "n" désigne le nombre de points de données par type d'environnement de mesure. "N" désigne le nombre d'environnements de mesure mesurés du même type.

Occupation du train RMS	N	n	min	Q05	Q25	Médiane	Q75	Q95	max
élevée	7	1802	0.12	0.22	0.33	0.44	0.61	0.94	1.99
moyenne	32	9294	0.04	0.14	0.22	0.31	0.46	0.74	2.13
basse	58	15384	0.01	0.04	0.11	0.17	0.27	0.53	3.04
Occupation du train Peak	N	n	min	Q05	Q25	Médiane	Q75	Q95	max
élevée	7	1802	0.51	1.24	2.04	3.01	4.09	6.38	10.37
moyenne	32	9295	0.23	0.79	1.34	1.96	2.92	4.97	17.42
basse	58	15389	0.03	0.17	0.65	1.15	1.85	3.29	18.88

Tableau 27: Contribution moyenne (%) des différentes sources HF (DL = downlink, UL = uplink, TDD = time division duplex) à l'exposition totale aux CEM-HF (RMS et peak) selon l'occupation du train. RMS (V/m) désigne la valeur moyenne quadratique calculée selon l'équation (4). "N" désigne le nombre d'environnements de mesure mesurés du même type. "n" désigne le nombre de points de données par type d'environnement de mesure.

Occupation du train RMS	N	n	RMS (V/m)	DL (%)	UL (%)	TDD (%)	Radiodiffusion (%)	WLAN (%)	DECT (%)
élevée	7	1802	0.55	12.6	53.6	13.0	0.1	20.6	0.1
moyenne	32	9294	0.41	40.1	39.9	5.6	0.4	13.9	0.1
basse	58	15384	0.30	61.9	22.2	2.7	2.5	10.6	0.1
Occupation du train Peak	N	n	RMS (V/m)	DL (%)	UL (%)	TDD (%)	Radiodiffusion (%)	WLAN (%)	DECT (%)
élevée	7	1802	3.67	6.5	35.4	33.7	0.0	24.2	0.1
moyenne	32	9295	2.69	30.9	30.8	19.6	0.2	18.3	0.1
basse	58	15389	1.84	42.6	24.5	10.5	0.9	21.6	0.1

Tableau 28: Données statistiques (en μT) de l'exposition totale aux CM-BF selon l'occupation du train. "n" désigne le nombre de points de données selon l'occupation du train. "N" désigne le nombre d'environnements de mesure mesurés du même type.

Occupation du train NF	N	n	min	Q05	Q25	Médiane	Q75	Q95	max
basse	58	15351	0.01	0.06	0.22	0.52	1.51	5.88	20.33
élevée	7	1799	0.02	0.06	0.18	0.37	0.81	5.70	19.51
moyenne	32	9274	0.02	0.07	0.17	0.37	0.89	5.87	21.77

Tableau 29: Contribution moyenne (%) des différentes sources de BF (courant ferroviaire, alimentation électrique, courant ondulé des trams) à l'exposition totale aux CM-BF selon l'occupation des trains. RMS (μT) désigne la valeur moyenne quadratique calculée selon l'équation (6). "N" désigne le nombre d'environnements de mesure du même type mesurés. "n" désigne le nombre de points de données par type d'environnement de mesure.

Occupation du train NF	N	n	RMS (μT)	Courant ferroviaire	Alimentation électrique	Courant ondulé du tram
basse	58	15351	2.47	99.8	0.2	0.0
élevée	7	1799	2.47	99.6	0.4	0.0

moyenne	32	9274	2.48	99.9	0.1	0.0
---------	----	------	------	------	-----	-----

3.1.4 Analyses supplémentaires dans les écoles - exposition aux HF et aux BF

Tableau 30: Données statistiques (en V/m) de l'exposition totale aux CEM-HF RMS (en haut) et de crête (en bas) dans les écoles. "n" désigne le nombre de points de données par type d'environnement de mesure. "N" désigne le nombre d'environnements de mesure mesurés du même type.

École RMS	N	n	min	Q05	Q25	Médiane	Q75	Q95	max
Cour - extérieure avec élèves.	4	577	0.06	0.08	0.12	0.20	0.28	0.60	1.36
Cour - extérieure sans élèves.	5	761	0.02	0.03	0.06	0.10	0.25	0.47	1.13
Cour - intérieure avec des élèves.	1	101	0.02	0.03	0.05	0.09	0.14	0.25	0.44
Couloir	5	686	0.02	0.02	0.03	0.05	0.10	0.19	0.49
Cour - intérieure sans élèves.	1	114	0.01	0.02	0.02	0.03	0.05	0.09	0.12
École Peak	N	n	min	Q05	Q25	Médiane	Q75	Q95	max
Cour - extérieure avec élèves.	4	577	0.20	0.37	0.62	1.12	1.62	3.50	5.02
Cour - intérieure avec des élèves.	1	101	0.09	0.21	0.39	0.69	1.30	2.61	5.49
Cour - extérieure sans élèves.	5	762	0.08	0.11	0.27	0.52	1.31	2.70	5.72
Cour - intérieure sans élèves.	1	114	0.07	0.10	0.25	0.45	0.86	1.83	4.05
Couloir	4	687	0.06	0.09	0.17	0.30	0.51	1.07	9.61

Tableau 31: Contribution moyenne (%) des différentes sources HF (DL = downlink, UL = uplink, TDD = time division duplex) à l'exposition totale aux CEM-HF (RMS et peak) dans les écoles. RMS (V/m) désigne la valeur moyenne quadratique calculée selon l'équation (4). "N" désigne le nombre d'environnements de mesure mesurés du même type. "n" désigne le nombre de points de données par type d'environnement de mesure.

École RMS	N	n	RMS (V/m)	DL (%)	UL (%)	TDD (%)	Radiodiffusion (%)	WLAN (%)	DECT (%)
Cour - extérieure avec élèves.	4	577	0.29	72.9	1.3	1.7	21.2	2.7	0.2
Cour - extérieure sans élèves.	5	761	0.23	78.2	0.1	1.5	17.6	1.8	0.7
Cour - intérieure avec des élèves.	1	101	0.13	0.4	30.1	0.1	0.6	68.7	0.0
Couloir	5	686	0.09	47.5	2.7	0.7	21.3	27.5	0.3
Cour - intérieure sans élèves.	1	114	0.04	1.3	1.6	1.0	5.4	90.4	0.2
École Peak	N	n	RMS (V/m)	DL (%)	UL (%)	TDD (%)	Radiodiffusion (%)	WLAN (%)	DECT (%)
Cour - extérieure avec élèves.	4	577	1.63	68.6	1.3	16.7	11.4	1.9	0.1
Cour - intérieure avec des élèves.	1	101	1.34	0.1	4.2	0.0	0.1	95.6	0.0
Cour - extérieure sans élèves.	5	762	1.28	79.3	0.1	12.0	6.9	1.5	0.1
Cour - intérieure sans élèves.	1	114	0.94	0.0	0.1	0.1	0.1	99.7	0.0
Couloir	5	687	0.67	39.4	0.9	1.8	5.5	52.2	0.2

Tableau 32: Données statistiques (en μT) de l'exposition totale aux CM-BF dans les écoles. "n" désigne le nombre de points de données dans les écoles. "N" désigne le nombre d'environnements de mesure du même type.

École NF	N	n	min	Q05	Q25	Médiane	Q75	Q95	max
Cour - intérieure avec élèves.	1	101	0.02	0.02	0.03	0.05	0.11	0.13	0.16
Cour - intérieure sans élèves.	1	114	0.02	0.02	0.03	0.04	0.07	0.12	0.18
Cour - extérieure avec des élèves.	4	574	0.01	0.02	0.02	0.04	0.08	0.16	0.24
Couloir	5	687	0.01	0.02	0.02	0.03	0.04	0.17	0.35
Cour - extérieure sans élèves.	5	758	0.01	0.02	0.02	0.03	0.06	0.16	0.29

Tableau 33: Contribution moyenne (%) des différentes sources de BF (courant ferroviaire, alimentation électrique, courant ondulé des trams) à l'exposition totale aux CM-BF dans les écoles. RMS (μT) désigne la valeur moyenne quadratique calculée selon l'équation (6). "N" désigne le nombre d'environnements de mesure du même type mesurés. "n" désigne le nombre de points de données par type d'environnement de mesure.

École NF	N	n	RMS (μT)	Courant ferroviaire	Alimentation électrique	Courant ondulé du tram
Cour - intérieure avec élèves.	1	101	0.08	2.9	96.5	0.6
Cour - intérieure sans élèves.	1	114	0.06	82.7	16.5	0.8
Cour - extérieure avec des élèves.	4	574	0.08	82.9	16.4	0.7
Couloir	5	687	0.07	78.1	21.1	0.8
Cour - extérieure sans élèves.	5	758	0.07	4.6	94.3	1.0

IV Données statistiques des mesures de spots

4.1 Données statistiques de l'exposition aux HF

Tableau 34: Données statistiques de la distribution de l'intensité de champ électrique totale RMS HF pour toutes les mesures partielles, comme indiqué dans la partie gauche de la Figure 20. Le calcul est basé sur l'équation (1). N désigne le nombre de mesures de site et le nombre de points de données évalués par source primaire est listé sous n. L'écart interquartile (IQR) désigne l'intervalle dans lequel se trouvent 50% des valeurs moyennes des données. Les quantiles sont désignés par Q.

				Exposition aux CEM-HF (RMS) (V/m)							
Mesure de courte durée	Source primaire	N	n	min	Q05	Q25	Médiane	Q75	Q95	max	IQR
		Téléphonie mobile	16	960	0.03	0.04	0.08	0.16	0.29	0.57	1.23
	Radio/TV 50 à 200 kW	1	60	0.19	0.19	0.2	0.26	0.28	0.31	0.38	0.08
	pas de source primaire HF	14	840	0.04	0.04	0.09	0.13	0.19	0.27	0.43	0.10
mesure mobile	Source primaire	N	n	min	Q05	Q25	Médiane	Q75	Q95	max	IQR
	Téléphonie mobile	16	1480	0.02	0.04	0.08	0.13	0.24	0.6	1.76	0.16
	Radio/TV 50 à 200 kW	1	100	0.05	0.05	0.08	0.12	0.2	0.27	0.42	0.12
	pas de source primaire HF	14	1400	0.02	0.03	0.05	0.08	0.14	0.39	1.13	0.09
Mesure à long terme	Source primaire	N	n	min	Q05	Q25	Médiane	Q75	Q95	max	IQR
	Téléphonie mobile	16	138297	0.02	0.04	0.06	0.12	0.18	0.88	1.79	0.12
	Radio/TV 50 à 200 kW	1	8659	0.05	0.06	0.06	0.07	0.08	0.09	0.35	0.02
	pas de source primaire HF	14	121014	0.01	0.03	0.05	0.08	0.12	0.93	1.63	0.07

Tableau 35: Contributions en pourcentage des différents groupes de services de radiocommunication à l'intensité de champ électrique totale, comme indiqué dans la partie droite de la Figure 20. Le calcul est effectué selon l'équation (7). Les groupes de bandes de fréquences suivants sont pris en compte : Downlink (DL), Uplink (UL), Time-Division-Duplex (TDD), radiodiffusion, WLAN et DECT. N désigne le nombre de mesures de site et le nombre de points de données évalués par source primaire est répertorié sous n. La moyenne quadratique (RMS) de l'intensité totale du champ est calculée à l'aide de l'équation (4).

Mesure de courte durée	Source primaire	N	n	RMS (V/m)	DL (%)	UL (%)	TDD (%)	Radiodiffusion (%)	WLAN (%)	DECT (%)
		Téléphonie mobile	16	960	0.27	77.8	0.4	0.7	9.3	9.3
	Radio/TV 50 à 200 kW	1	60	0.25	2	0.1	0	50.5	44.8	2.6
	pas de source primaire HF	14	840	0.16	26.3	0.7	0.2	26.8	36	10
mesure	Source primaire	N	n	RMS (V/m)	DL (%)	UL (%)	TDD (%)	Radiodiffusion (%)	WLAN (%)	DECT (%)

	Téléphonie mobile	16	1480	0.27	78.7	0.1	0.5	13.2	7.2	0.3
	Radio/TV 50 à 200 kW	1	100	0.16	5.3	0.1	0.2	62	29.7	2.7
	pas de source primaire HF	14	1400	0.18	46.1	1.7	0.6	31.3	17.4	2.9
Mesure à long terme	Source primaire	N	n	RMS (V/m)	DL (%)	UL (%)	TDD (%)	Radiodif-fusion (%)	WLAN (%)	DECT (%)
	Téléphonie mobile	16	138297	0.35	92.7	0.1	1.1	5.2	0.4	0.5
	Radio/TV 50 à 200 kW	1	8659	0.07	8.8	1.2	0.4	63.7	12.9	13.1
	pas de source primaire HF	14	121014	0.28	54.1	1	0.5	42.1	2.1	0.1

Tableau 36: Minimum, moyenne et maximum de la moyenne quadratique (RMS) de toutes les mesures au sein d'une catégorie de sources primaires. Les valeurs RMS sont calculées selon l'équation (4) et la moyenne est calculée selon l'équation (9). Les valeurs RMS mesurées par l'ExpoM-RF ont été utilisées comme base. Les données sont présentées dans la Figure 21. Le nombre de points de mesure est désigné par n et le nombre de mesures de site est exprimé par N.

Mesure de courte durée	Source primaire	N	n	Min (V/m)	Valeur moyenne du RMS (V/m)	Max (V/m)
	Téléphonie mobile	16	960	0.04	0.21	0.61
	Radio/TV 50 à 200 kW	1	60	0.25	0.25	0.25
	pas de source primaire HF	14	840	0.04	0.15	0.26
mesure mobile	Source primaire	N	n	Min (V/m)	Valeur moyenne du RMS (V/m)	Max (V/m)
	Téléphonie mobile	16	1480	0.07	0.21	0.66
	Radio/TV 50 à 200 kW	1	100	0.16	0.16	0.16
	pas de source primaire HF	14	1400	0.05	0.15	0.43
Mesure à long terme	Source primaire	N	n	Min (V/m)	Valeur moyenne du RMS (V/m)	Max (V/m)
	Téléphonie mobile	16	138297	0.05	0.2	1.23
	Radio/TV 50 à 200 kW	1	8659	0.07	0.07	0.07
	pas de source primaire HF	14	121014	0.03	0.15	0.98

Tableau 37: Minimum, moyenne et maximum de la moyenne quadratique de toutes les mesures au sein d'une catégorie de sources primaires. Les valeurs RMS sont calculées selon l'équation (4) et la moyenne est calculée selon l'équation (9). Les valeurs de mesure des peaks de l'ExpoM-RF ont été utilisées comme base. Les données sont présentées dans la Figure 22. Le nombre de points de mesure est désigné par n et le nombre de mesures de site est exprimé par N.

Mesure de courte durée	Source primaire	N	n	Min (V/m)	Valeur moyenne du RMS (V/m)	Max (V/m)
	Téléphonie mobile	16	960	0.26	1.42	4.19
Radio/TV 50 à 200 kW	1	60	2.4	2.4	2.4	
pas de source primaire HF	14	840	0.22	1.46	4.6	
mesure mobile	Source primaire	N	n	Min (V/m)	Valeur moyenne du RMS (V/m)	Max (V/m)
	Téléphonie mobile	16	1480	0.47	1.5	4.07
	Radio/TV 50 à 200 kW	1	100	1.47	1.47	1.47
	pas de source primaire HF	14	1400	0.26	1.23	3.15
Mesure à long terme	Source primaire	N	n	Min (V/m)	Valeur moyenne du RMS (V/m)	Max (V/m)
	Téléphonie mobile	16	138297	0.21	1.21	7.43
	Radio/TV 50 à 200 kW	1	8659	0.46	0.46	0.46
	pas de source primaire HF	14	121014	0.12	1.05	7.04

4.2 Données statistiques de l'exposition aux BF

Tableau 38: Données statistiques de la distribution de la densité de flux magnétique totale CM-BF pour toutes les mesures partielles, comme indiqué dans la partie gauche de la Figure 23. Le calcul est basé sur l'équation (2). N désigne le nombre de mesures de lieux de mesure le nombre de points de données évalués par source primaire est listé sous n. L'écart interquartile (IQR) désigne l'intervalle dans lequel se trouvent 50% des valeurs moyennes des données. Les quantiles sont désignés par Q.

				Exposition aux CM-BF (μ T)							
	Source primaire	N	n	min	Q05	Q25	Médi- ane	Q75	Q95	max	IQR
				Mesure de courte durée	Lignes de chemin de fer 2 voies	3	180	0.02	0.04	0.06	0.1
Lignes de chemin de fer 1 voie	3	180	0.02		0.03	0.04	0.05	0.07	0.15	0.44	0.03
Lignes de chemin de fer 1 voie Tunnel	1	60	0.08		0.12	0.18	0.25	0.31	0.42	0.54	0.13
Lignes de tram	1	60	0.02		0.02	0.03	0.04	0.05	0.07	0.09	0.02
220/380kV ligne aérienne	3	180	0.04		0.05	0.06	0.27	1.65	1.67	1.68	1.59
36-150kV ligne aérienne	2	120	0.02		0.02	0.02	0.09	0.18	0.23	0.28	0.16
Postes de transformation	1	60	0.04		0.04	0.07	0.09	0.11	0.14	0.16	0.04
pas de source primaire BF	17	1020	0.02		0.02	0.04	0.05	0.09	0.19	0.48	0.05
mesure mobile	Source primaire	N	n		min	Q05	Q25	Médi- ane	Q75	Q95	max
	Lignes de chemin de fer 2 voies	3	300	0.03	0.04	0.07	0.1	0.18	0.35	0.93	0.11
	Lignes de chemin de fer 1 voie	3	300	0.03	0.03	0.04	0.05	0.07	0.13	0.34	0.03
	Lignes de chemin de fer 1 voie Tunnel	1	100	0.09	0.13	0.17	0.23	0.3	0.4	0.56	0.13
	Lignes de tram	1	100	0.03	0.04	0.04	0.06	0.08	0.18	0.23	0.04
	220/380kV ligne aérienne	3	300	0.04	0.04	0.05	0.33	1.22	1.85	2.07	1.17
	36-150kV ligne aérienne	2	200	0.02	0.02	0.02	0.07	0.16	0.21	0.26	0.14
	Postes de transformation	1	100	0.03	0.04	0.05	0.07	0.1	0.13	0.16	0.05
	pas de source primaire BF	17	1617	0.01	0.02	0.04	0.05	0.1	0.21	0.56	0.06
Mesure à long terme	Source primaire	N	n	min	Q05	Q25	Médi- ane	Q75	Q95	max	IQR
	Lignes de chemin de fer 2 voies	3	25920	0.02	0.03	0.05	0.07	0.12	0.28	1.11	0.07
	Lignes de chemin de fer 1 voie	3	25920	0.01	0.02	0.03	0.05	0.07	0.16	0.78	0.04

Lignes de chemin de fer 1 voie Tunnel	1	8640	0.05	0.1	0.13	0.18	0.23	0.34	0.76	0.1
Lignes de tram	1	8640	0.03	0.04	0.06	0.09	0.13	0.25	0.77	0.07
220/380kV ligne aérienne	3	25823	0.01	0.03	0.11	0.3	1.51	1.86	2.07	1.4
36-150kV ligne aérienne	2	17280	0.01	0.02	0.03	0.09	0.18	0.22	1.87	0.15
Postes de transformation	1	8640	0.02	0.04	0.06	0.08	0.1	0.15	0.45	0.04
pas de source primaire BF	17	146880	0.01	0.02	0.03	0.05	0.09	0.19	1.26	0.06

Tableau 39: Contributions en pourcentage des différentes sources CM-BF à la densité de flux magnétique totale, comme indiqué dans la partie droite de la Figure 23. Le calcul est effectué selon l'équation (8). Les catégories de sources suivantes sont prises en compte : Courant ferroviaire, alimentation électrique et courant ondulé des trams. N désigne le nombre de mesures de site et le nombre de points de données évalués par source primaire est répertorié sous n. La valeur moyenne quadratique (RMS) de la densité de flux magnétique totale est calculée à l'aide de l'équation (6).

	Source primaire	N	n	RMS (μ T)	Courant ferroviaire (%)	Alimentation électrique (%)	Courant ondulé du tram (%)
Mesure de courte durée	Lignes de chemin de fer 2 voies	3	180	0.22	99.2	0.7	0.1
	Lignes de chemin de fer 1 voie	3	180	0.09	85.5	14	0.5
	Lignes de chemin de fer 1 voie Tunnel	1	60	0.27	75.5	24.5	0
	Lignes de tram	1	60	0.04	65.5	31.6	3
	220/380kV ligne aérienne	3	180	0.97	0	100	0
	36-150kV ligne aérienne	2	120	0.13	34.9	64.9	0.2
	Postes de transformation	1	60	0.1	23.1	76.7	0.2
	pas de source primaire BF	17	1020	0.1	66.9	32.7	0.4
mesure mobile	Source primaire	N	n	RMS (μ T)	Courant ferroviaire (%)	Alimentation électrique (%)	Courant ondulé du tram (%)
	Lignes de chemin de fer 2 voies	3	300	0.18	98.1	1.8	0.1
	Lignes de chemin de fer 1 voie	3	300	0.08	79.2	20.2	0.6
	Lignes de chemin de fer 1 voie Tunnel	1	100	0.26	70.1	29.8	0.1

	Lignes de tram	1	100	0.09	66.4	30.7	3
	220/380kV ligne aérienne	3	300	0.9	0	100	0
	36-150kV ligne aérienne	2	200	0.12	34.4	65.3	0.3
	Postes de transformation	1	100	0.08	23.7	75.9	0.4
	pas de source primaire BF	17	1617	0.11	60.7	38.9	0.4
Mesure à long terme	Source primaire	N	n	RMS (μ T)	Courant ferrovi- aire (%)	Alimenta- tion électrique (%)	Courant ondulé du tram (%)
	Lignes de chemin de fer 2 voies	3	25920	0.14	97.4	2.4	0.2
	Lignes de chemin de fer 1 voie	3	25920	0.09	86.3	13.2	0.5
	Lignes de chemin de fer 1 voie Tunnel	1	8640	0.21	58.9	41	0.1
	Lignes de tram	1	8640	0.13	78.7	17.4	4
	220/380kV ligne aérienne	3	25823	0.97	0	100	0
	36-150kV ligne aérienne	2	17280	0.13	25.3	74.5	0.2
	Postes de transformation	1	8640	0.09	12.2	87.5	0.3
	pas de source primaire BF	17	146880	0.1	54	45.6	0.4

Tableau 40: Minimum, moyenne et maximum de la moyenne arithmétique de la densité de flux magnétique pour chaque source primaire. Le calcul des moyennes arithmétiques s'effectue ici selon l'équation (5) et la valeur moyenne est calculée selon l'équation (10). Les données sont représentées dans Figure 24 sont représentées. Le nombre de points de mesure est désigné par n et le nombre de mesures du site est exprimé par N.

Mesure de courte durée	Source primaire	N	n	Minimum de la moyenne arithmétique (μ T)	Moyenne de la moyenne arithmétique (μ T)	Maximum de la moyenne arithmétique (μ T)
	Lignes de chemin de fer 2 voies	3	180	0.07	0.16	0.27
	Lignes de chemin de fer 1 voie	3	180	0.05	0.07	0.08
	Lignes de chemin de fer 1 voie Tunnel	1	60	0.25	0.25	0.25
	Lignes de tram	1	60	0.04	0.04	0.04

	220/380kV ligne aérienne	3	180	0.05	0.66	1.66
	36-150kV ligne aérienne	2	120	0.02	0.1	0.19
	Postes de transformation	1	60	0.09	0.09	0.09
	pas de source primaire BF	17	1020	0.03	0.07	0.24
mesure mobile	Source primaire	N	n	Minimum de la moyenne arithmétique (μT)	Moyenne de la moyenne arithmétique (μT)	Maximum de la moyenne arithmétique (μT)
	Lignes de chemin de fer 2 voies	3	300	0.08	0.14	0.2
	Lignes de chemin de fer 1 voie	3	300	0.04	0.06	0.08
	Lignes de chemin de fer 1 voie Tunnel	1	100	0.25	0.25	0.25
	Lignes de tram	1	100	0.07	0.07	0.07
	220/380kV ligne aérienne	3	300	0.05	0.62	1.48
	36-150kV ligne aérienne	2	200	0.02	0.09	0.16
	Postes de transformation	1	100	0.08	0.08	0.08
	pas de source primaire BF	17	1617	0.02	0.08	0.24
Mesure à long terme	Source primaire	N	n	Minimum de la moyenne arithmétique (μT)	Moyenne de la moyenne arithmétique (μT)	Maximum de la moyenne arithmétique (μT)
	Lignes de chemin de fer 2 voies	3	25920	0.07	0.1	0.15
	Lignes de chemin de fer 1 voie	3	25920	0.04	0.06	0.09
	Lignes de chemin de fer 1 voie Tunnel	1	8640	0.19	0.19	0.19
	Lignes de tram	1	8640	0.11	0.11	0.11

	220/380kV ligne aérienne	3	25823	0.07	0.68	1.65
	36-150kV ligne aérienne	2	17280	0.03	0.1	0.17
	Postes de transformation	1	8640	0.08	0.08	0.08
	pas de source primaire BF	17	146880	0.02	0.07	0.19

V Liste des sites de mesures spot

Tableau 41: Liste des mesures spot avec la commune d'implantation, l'ID du microenvironnement et l'utilisation du bâtiment.

ID du spot	Commune	Source primaire	Type de maison	Utilisation du bâtiment Lieu de mesure	Utilisation du bâtiment en haut	Utilisation du bâtiment en bas
spot_SN025	Gonten	36-150kV ligne aérienne	Maison individuelle	Habitat	Habitat	Cave
spot_mp001	Lungern	220/380kV ligne aérienne	Ferme	Habitat	Habitat	sans sous-sol
spot_mp002	Münchenstein	220/380kV ligne aérienne	Maison individuelle	Habitat	Habitat	sans sous-sol
spot_mp003	Münchenstein	Lignes de tram	MFH	Habitat	Habitat	Habitat
spot_mp005	Dübendorf	Lignes de chemin de fer 2 voies	Maison bifamiliale	Habitat	Habitat	Cave
spot_mp013	Zurich	Téléphonie mobile	MFH	Habitat	aucun	Habitat
spot_mp013A	Zurich	Téléphonie mobile	MFH	Habitat	Habitat	Cave
spot_mp017	Dübendorf	Téléphonie mobile	MFH	Habitat	Habitat	Habitat
spot_mp017A	Dübendorf	Téléphonie mobile	MFH	Habitat	Habitat	Habitat
spot_mp018	Zurich	Téléphonie mobile	MFH	Habitat	aucun	Habitat
spot_mp018A	Zurich	Téléphonie mobile	MFH	Habitat	Habitat	Cave
spot_mp019	Soleure	Lignes de chemin de fer 1 voie	Maison individuelle	Habitat	Habitat	Habitat
spot_mp020	Zermatt	Lignes de chemin de fer 1 voie	MFH	Habitat	Comble	Habitat
spot_mp021	Deitingen	Lignes de chemin de fer 2 voies	MFH	Habitat	Comble	Habitat
spot_mp024	Schwyz	Téléphonie mobile	autre	Habitat	aucun	Habitat
spot_mp032	Herisau	Téléphonie mobile	Maison mitoyenne	Habitat	Comble	Habitat
spot_mp033	Brienz	Téléphonie mobile	Maison individuelle	Habitat	Habitat	Habitat
spot_mp034	Winterthur	Téléphonie mobile	MFH	Habitat	Comble	Habitat
spot_mp034A	Winterthur	Téléphonie mobile	MFH	Habitat	Habitat	Cave
spot_mp040	Landquart	Téléphonie mobile	MFH	Habitat	Habitat	Habitat
spot_mp041	Ersfeld	Lignes de chemin de fer 2 voies	Maison individuelle	Habitat	Habitat	Cave
spot_mp043	Pfäffikon	Téléphonie mobile	MFH	Habitat	Habitat	Habitat
spot_mp044	Saint-Gall	Téléphonie mobile	MFH	Habitat	Habitat	Habitat
spot_mp046	Ennenda	Lignes de chemin de fer 1 voie	Maison mitoyenne	Habitat	Habitat	Habitat
spot_mp050	Disentis	Lignes de chemin de fer 1 voie Tunnel	Maison bifamiliale	Habitat	Habitat	Cave
spot_mp052	Viège	Téléphonie mobile	MFH	Habitat	aucun	Habitat
spot_mp052A	Viège	Téléphonie mobile	MFH	Habitat	Habitat	Bureau
spot_mp054	Zernez	36-150kV ligne aérienne	Maison individuelle	Habitat	Habitat	Habitat
spot_mp055	Winterthur	220/380kV ligne aérienne	Maison mitoyenne	Habitat	Comble	Habitat
spot_mp061	Soleure	Postes de transformation	MFH	Habitat	Habitat	Cave
spot_mp064	Igis	Radio/TV 50 à 200 kW	Maison individuelle	Habitat	Habitat	sans sous-sol

Tableau 42: Liste des informations détaillées sur les mesures. Pour les mesures de courte durée, l'étage ainsi que l'utilisation de la pièce sont indiqués. Pour les mesures d'itinéraires, le nombre d'étages et de pièces traversés est indiqué. Les mesures de longue durée ont généralement lieu dans la chambre à coucher. Le tableau contient des indications sur l'étage et la position de l'appareil de mesure. Les types d'étages suivants ont été pris en compte : DG (combles), EG (rez-de-chaussée), OG (étage supérieur), UG (sous-sol).

ID du spot	Étage Mesure de courte durée	Utilisation de l'espace Mesure à court terme	Nombre d'étages mesure mobile	Nombre de chambres mesure mobile	Étage Mesure à long terme	Position de l'instrument de mesure Mesure à long terme
spot_SN025	CE	Habitat	3	10	OG1	Table de nuit
spot_mp001	OG1	autre	2	2	OG1	autre
spot_mp002	CE	Habitat	3	8	OG1	Chaise à côté du lit
spot_mp003	OG1	Habitat	1	5	OG1	Sol à côté du lit
spot_mp005	CE	Habitat	1	9	CE	Table de nuit
spot_mp013	DG	Habitat	1	6	DG	Table de nuit
spot_mp013A	CE	Bureau/Salle de travail	1	2	CE	Chaise à côté du lit
spot_mp017	OG4	Habitat	2	5	OG4	Structure arrière pour le lit
spot_mp017A	UG2	Bureau/Salle de travail	1	5	OG2	Table de nuit
spot_mp018	OG6	Habitat	1	4	OG6	Table de nuit
spot_mp018A	CE	Habitat	2	10	CE	Table de nuit
spot_mp019	CE	Habitat	4	10	OG1	Boîte en carton à côté du lit
spot_mp020	OG3	Habitat	1	3	OG3	Structure arrière pour le lit
spot_mp021	OG1	Habitat	1	5	OG1	Structure arrière pour le lit
spot_mp024	DG	Habitat	1	10	DG	Table de nuit
spot_mp032	OG1	Habitat	2	6	OG1	Table de nuit
spot_mp033	DG	Habitat	2	5	DG	Table de nuit
spot_mp034	DG	Chambre à coucher	1	5	DG	Table de nuit
spot_mp034A	CE	Chambre à coucher	1	4	CE	Table de nuit
spot_mp040	OG4	Habitat	1	5	OG4	Chaise à côté du lit
spot_mp041	OG1	Habitat	1	7	CE	Table de nuit
spot_mp043	DG	Habitat	1	9	DG	Boîte en carton à côté du lit
spot_mp044	OG2	Habitat	2	7	OG2	Table de nuit
spot_mp046	OG1	Habitat	2	8	OG2	Table de nuit
spot_mp050	CE	Habitat	1	4	CE	Table de nuit
spot_mp052	DG	Habitat	1	9	DG	Table de nuit
spot_mp052A	OG1	Habitat	1	8	OG1	autre
spot_mp054	OG1	Habitat	2	10	CE	Table de nuit
spot_mp055	CE	Habitat	3	6	DG	Table de nuit

ID du spot	Étage Mesure de courte durée	Utilisation de l'espace Mesure à court terme	Nombre d'étages mesure mobile	Nombre de chambres mesure mobile	Étage Mesure à long terme	Position de l'instrument de mesure Mesure à long terme
spot_mp061	CE	Habitat	1	4	CE	Table de nuit
spot_mp064	OG1	Habitat	2	10	CE	Table de nuit