



Mesures d'exposition aux rayonnements non ionisants  
Rapport annuel 2021 - Consortium de projet  
SwissNIS

Aarau, 24 mai 2022

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 SA  
Unterholz 26  
3380 Wangen an der Aare

### Auteur/trice:

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

Laisser la

Version	Date	Auteurs	Description	Distributeur
V 1.0	18.03.2022	Équipe de projet	Rapport annuel 2021	SwissNIS, mandant (OFEV)
V 1.1	08.04.2022	Équipe de projet/ Mandant	Commentaire du rapport an- nuel 2021 V 1.0	SwissNIS, mandant
V 1.4	24.05.2022	Équipe de projet	Rapport annuel révisé 2021	SwissNIS, mandant

## Contenu

1. Introduction et objectifs .....	5
2. Concept et méthodes .....	6
2.1 Concept de mesure .....	6
2.2 Mesures .....	7
2.2.1 Mesures d'itinéraires .....	7
2.2.2 Mesures spot .....	10
2.2.3 Mesures permanentes stationnaires .....	12
2.3 Sélection des sites de mesure .....	12
2.3.1 Mesures d'itinéraires .....	12
2.3.2 Mesures spot .....	16
2.3.3 Mesures permanentes stationnaires .....	16
2.4 Gestion des données .....	17
2.4.1 Fichiers de mesure et base de données .....	17
2.4.2 Préparation des données .....	18
2.4.3 Statistiques descriptives .....	19
2.5 Instruments de mesure .....	19
2.5.1 Spécifications générales de l'appareil .....	20
2.5.2 Sélection des bandes de fréquences .....	20
2.5.3 Précision de mesure .....	24
2.5.4 Influence du blindage du corps .....	24
2.5.5 Correction crosstalk .....	28
3. Résultats .....	31
3.1 Mesures d'itinéraires .....	31
3.1.1 Environnements de mesure .....	31
3.1.2 Exposition aux HF .....	33
3.1.3 Exposition aux HF par type de source .....	37
3.1.4 Exposition BF .....	39
3.1.5 Exposition BF par type de source .....	41
3.1.6 Exploitation de la valeur limite d'immissions .....	41
3.1.7 Comparaison avec les données de mesure de 2014 .....	42
3.2 Mesures spot .....	44
3.2.1 Exposition totale aux HF .....	44
3.2.2 Exposition totale aux BF .....	45
3.2.3 Exposition aux HF par type de source .....	46
3.2.4 Exposition aux HF par type de source .....	47
3.2.5 Exploitation de la valeur limite d'immissions .....	48

3.2.6 Répartition des sites de mesure pour les mesures ponctuelles .....	48
3.3 Mesures permanentes stationnaires .....	52
3.3.1 Lieux de mesure Mesures permanentes stationnaires .....	52
4. Discussion .....	53
4.1 Représentativité des données.....	54
5. Bibliographie.....	57
6. Sources de données .....	58
I Glossaire .....	59
II Liste des communes d'implantation des microenvironnements.....	61
III Caractéristiques des données de mesure HF-RMS .....	63
IV Comparaison des bandes de fréquences RF-EMF de 2014 et 2021.....	69
V Liste des communes sélectionnées pour les mesures .....	70
VI Liste des sites de mesures spot.....	72
VII Correction crosstalk.....	73

## 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). A cette fin, l'OFEV a lancé en 2020 un appel d'offres pour un projet visant à collecter des données de mesure représentatives de l'exposition de la population suisse au rayonnement non ionisant dans son quotidien.

Le présent document est le rapport annuel 2021 sur la collecte des données de mesure, rédigé par le consortium de projet qui a remporté l'appel d'offres.

Le rapport annuel 2021 décrit d'une part le concept de base et le mode de collecte des données, et présente d'autre part les premiers résultats des mesures effectuées. Comme il s'agit du premier rapport annuel pendant la durée de la collecte des données, les comparaisons avec les données de mesure précédentes ne sont possibles que de manière limitée.

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 procédures des mesures prévues sous une forme uniforme pour toute la durée du projet, soit cinq ans. L'évaluation des données de mesure se fera chaque année et sera résumée dans un rapport annuel.

### 2.1 Concept de mesure

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 mobiles sont effectuées à l'aide d'appareils portables sur des parcours de mesure définis, les mesures étant répétées tous les deux ans. Les parcours de mesure se situent dans des "microenvironnements" préalablement sélectionnés. Au total, des mesures sont effectuées dans 300 microenvironnements en Suisse, classés en 9 types (cf. Tableau 1). Au sein de chaque microenvironnement, des mesures sont effectuées à l'extérieur, ce qui correspond au type de microenvironnement proprement dit (par ex. centres urbains, zones industrielles), mais aussi dans des zones publiques (par ex. gares, restaurants, supermarchés) et lors des transferts entre les microenvironnements 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.

2. "Mesures ponctuelles".

Au moins 100 logements sont sélectionnés comme "lieux à utilisation sensible" (LUS), qui se trouvent 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. On saisit ainsi des situations d'exposition typiques à proximité des sources de RNI concernées, dans des lieux où les gens séjournent souvent et longtemps.

3. "Mesures permanentes stationnaires"

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 5 sites sélectionnés pendant au moins deux ans.

Les procédures de mesure et la méthodologie de sélection des sites de mesure sont décrites ci-dessous.

## 2.2 Mesures

### 2.2.1 Mesures d'itinéraires

Les mesures dites "itinéraires" ou "mesures mobiles" sont des mesures des champs magnétiques basse fréquence (CM-BF) et des champs électromagnétiques haute fréquence (CEM-HF) le long d'un parcours de mesure défini (itinéraire). Les parcours de mesure se situent dans des "microenvironnements" (zones d'une surface d'environ 1 km<sup>2</sup> définies sur la base de caractéristiques géographiques humaines), sélectionnés selon la procédure décrite dans la section 2.3.1 ci-dessous. Pour que les données soient collectées là où la population se trouve réellement, les mesures sont effectuées à pied dans les différents microenvironnements. Les transferts et les arrêts nécessaires entre les différentes mesures d'itinéraires se font en transports publics. Ainsi, des mesures d'exposition supplémentaires sont effectuées chaque jour de mesure dans des espaces publics (transports publics, arrêts et gares, restaurants, lieux culturels, etc.).

Dans chaque microenvironnement, un parcours de mesure d'environ 1 à 1,3 km est défini, ce qui revient à environ 15 minutes de marche. Avec un intervalle de mesure de 6 secondes, environ 150 valeurs de mesure sont enregistrées par microenvironnement. Les parcours de mesure sont définis de manière à couvrir, autant que possible, toute la surface du microenvironnement. Afin que les parcours de mesure restent reproductibles même après plusieurs années et en cas de changement de personnel, les parcours de mesure sont dessinés sur des cartes et le côté gauche de la rue est toujours utilisé. Une application programmée sur un smartphone fonctionnant en mode avion permet d'enregistrer le moment où l'on commence le parcours de mesure, où l'on finit le parcours et où l'on change de moyen de transport (protocole d'activité). Les coordonnées de chaque point de mesure sont enregistrées à l'aide du GPS intégré dans les appareils de mesure. Les mesures sont en principe effectuées pendant les heures de bureau.

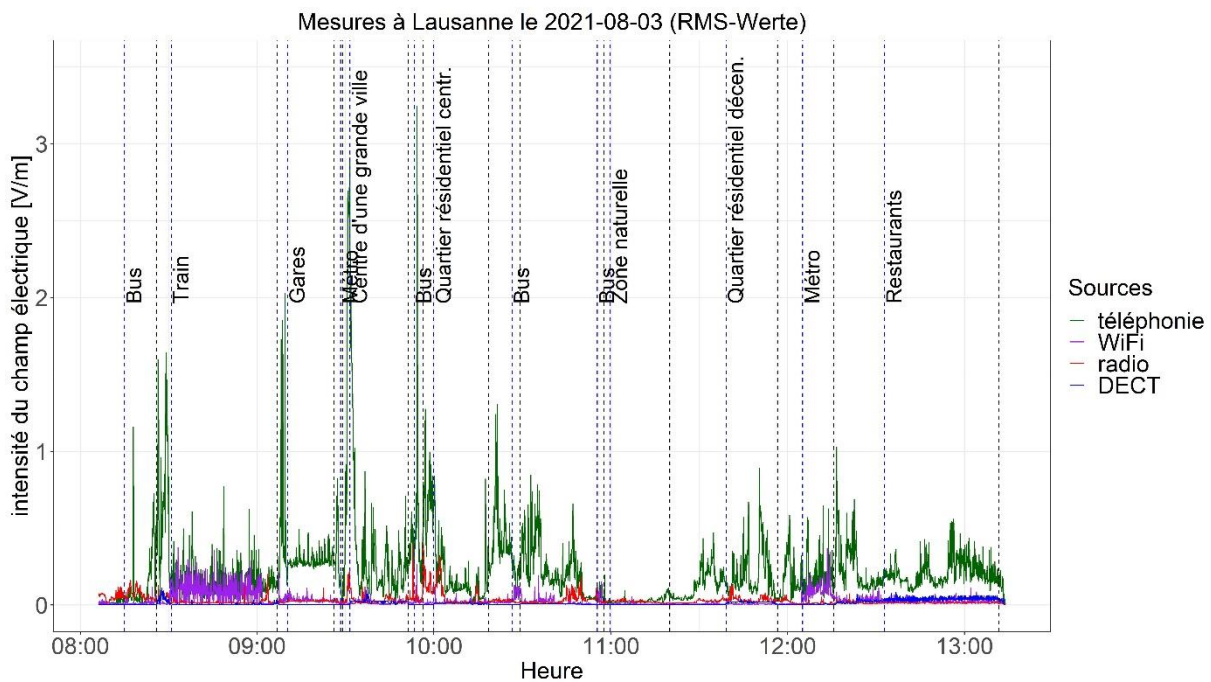
La mise en place des appareils de mesure pour les mesures d'itinéraires est représentée dans la figure 1. Les deux appareils de mesure HF (ExpoM-RF4) et l'appareil de mesure BF (ExpoM-ELF) sont fixés dans une mallette et suffisamment éloignés l'un de l'autre pour qu'ils ne s'influencent pas mutuellement. Les deux appareils de mesure HF sont utilisés avec des sensibilités différentes (valeurs de mesure saisies jusqu'à 6 V/m ou 20 V/m). La mallette est rangée dans un sac à dos porté lors des mesures ou déposé sur un siège dans les transports publics.



Figure 1: Mise en place des appareils de mesure pour la mesure de l'itinéraire

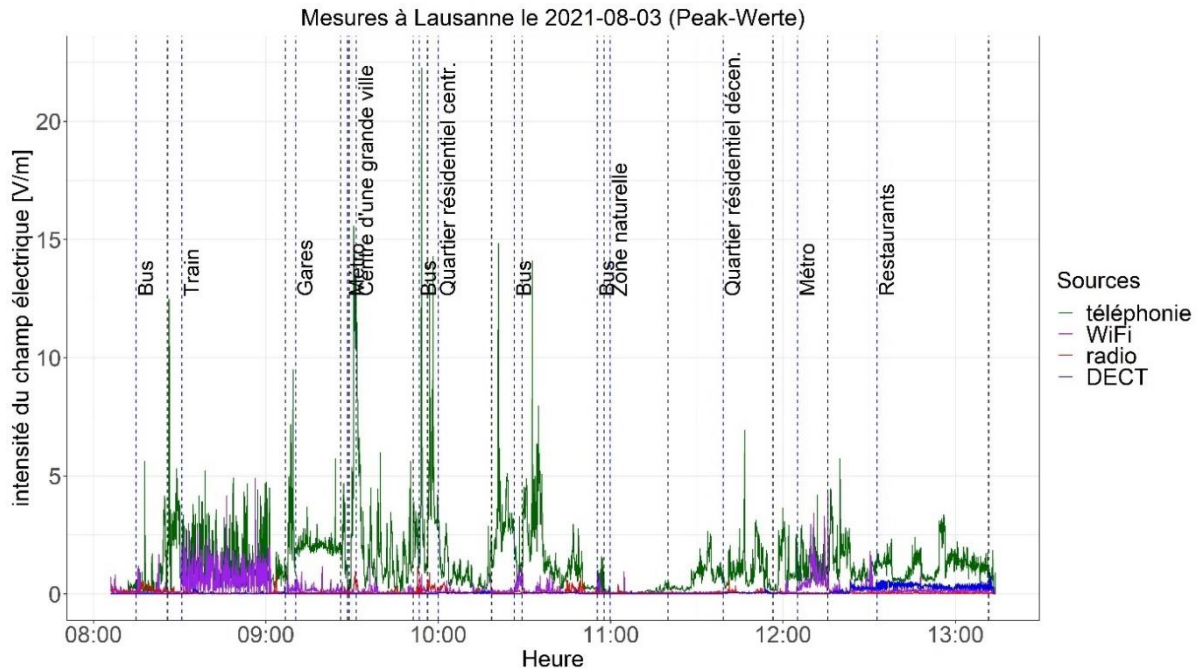
Des courbes de mesure pour une mesure d'itinéraire à Lausanne le matin du 03.08.2021 sont présentés dans la Figure 2. Les résultats de mesure sont présentés pour A) l'exposition aux HF (valeurs RMS), B) l'exposition aux HF (valeurs de pic) et C) l'exposition aux BF (valeurs RMS). Les appareils ont été allumés peu après 8 heures au point de départ, puis nous avons noté à l'aide d'une application pour smartphone l'heure à laquelle nous avons pris le bus à 8h14 (ligne bleue en pointillés) et l'heure à laquelle nous l'avons quitté à 8h24 (ligne noire en pointillés). Nous avons ainsi noté le début et la fin de chaque type d'environnement de mesure. Nous avons ensuite pris le train de 8h31 pour nous rendre à Lausanne, où nous avons défini quatre microenvironnements (centre d'une grande ville, quartier résidentiel central, zone naturelle, quartier résidentiel décentralisé). Les transferts entre les différents environnements de mesure ont été effectués en bus, en métro ou à pied. Après avoir effectué les mesures dans un restaurant, nous avons poursuivi les mesures l'après-midi.

A. Exposition HF, valeurs RMS





B. Exposition aux HF, valeurs de crête



C. Exposition aux BF, valeurs RMS

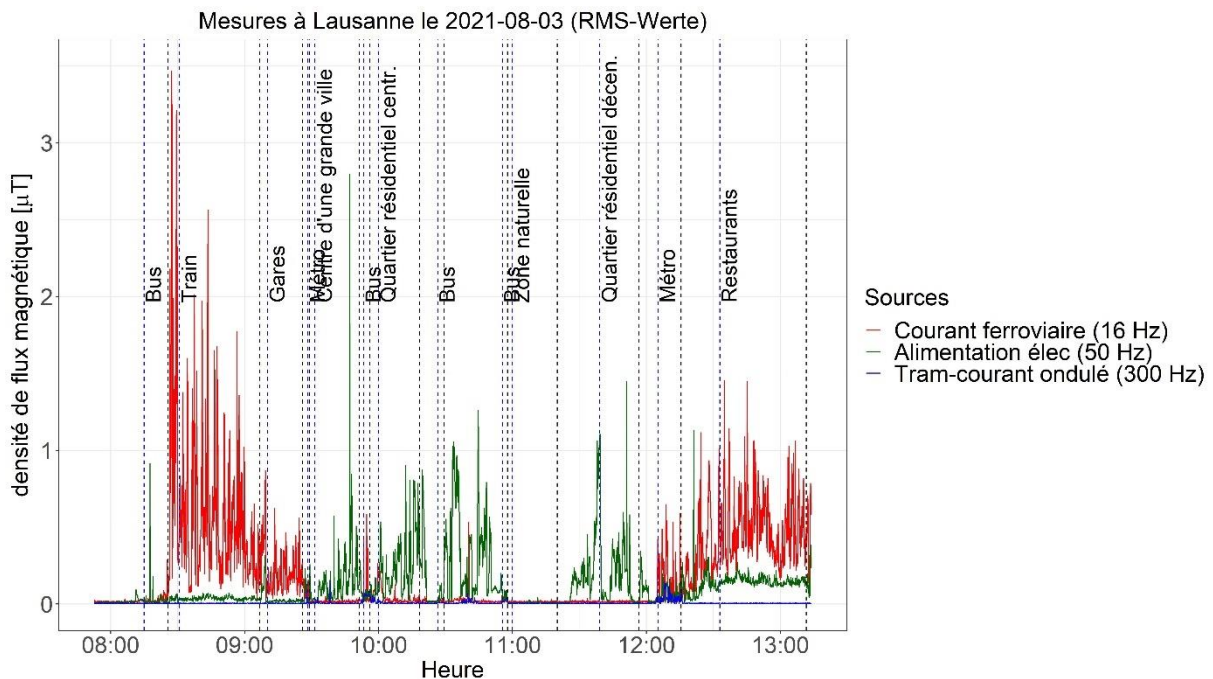


Figure 2: Exemple de courbes de mesure à Lausanne le 03.08.2021 pour les différentes sources d'exposition (HF : téléphonie mobile, WiFi, radiodiffusion et DECT) et BF : courant ferroviaire, alimentation électrique, courant ondulé des trams) : A) Exposition HF, valeurs RMS ; B) exposition HF, valeurs de crête ; C) exposition BF, valeurs RMS. Les lignes bleues et noires indiquent respectivement le début et la fin de l'enregistrement d'un type d'environnement de mesure (p. ex. bus, train, gare, etc.).

## 2.2.2 Mesures spot

Les mesures ponctuelles se composent de trois volets pour chaque site de mesure :

- Mesure stationnaire pendant 10 min avec un intervalle de mesure de 10 s 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 près de la table à manger. La position exacte est choisie de telle sorte que l'atténuation des sources externes soit faible (p. ex. vue dégagée sur les antennes de téléphonie mobile ou distance minimale par rapport aux lignes à haute tension).
- Mesure mobile en parcourant l'ensemble de l'appartement pendant 10 min avec un intervalle de mesure de 6 s avec fixation des appareils de mesure sur un trépied d'épaule non conducteur ("spot-area"). Cette mesure mobile est effectuée en même temps que la mesure fixe.
- Mesure stationnaire pendant 24 h avec un intervalle de mesure de 10 s dans la chambre à coucher à proximité du lit à hauteur de couchage ("spot-long")

Pour ces trois volets de mesure, un ExpoM-ELF et un ExpoM-RF (avec une sensibilité de 6 V/m) sont utilisés en parallèle.

Avant ou entre les mesures, les 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.



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

Pour illustrer la variabilité des mesures ponctuelles, l'évolution temporelle des valeurs mesurées pendant 24 h dans un appartement situé à proximité d'une ligne de chemin de fer à voie unique et d'une antenne de téléphonie mobile est illustré dans les

## Champ magnétique basse fréquence

Exemple de courbe pour 24h

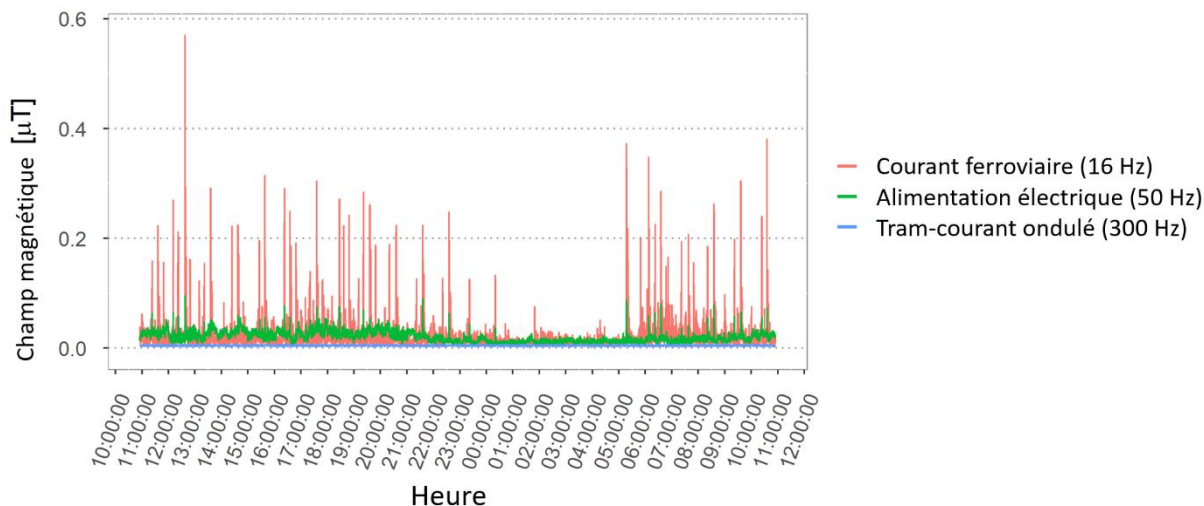


Figure 4 et Figure 5.

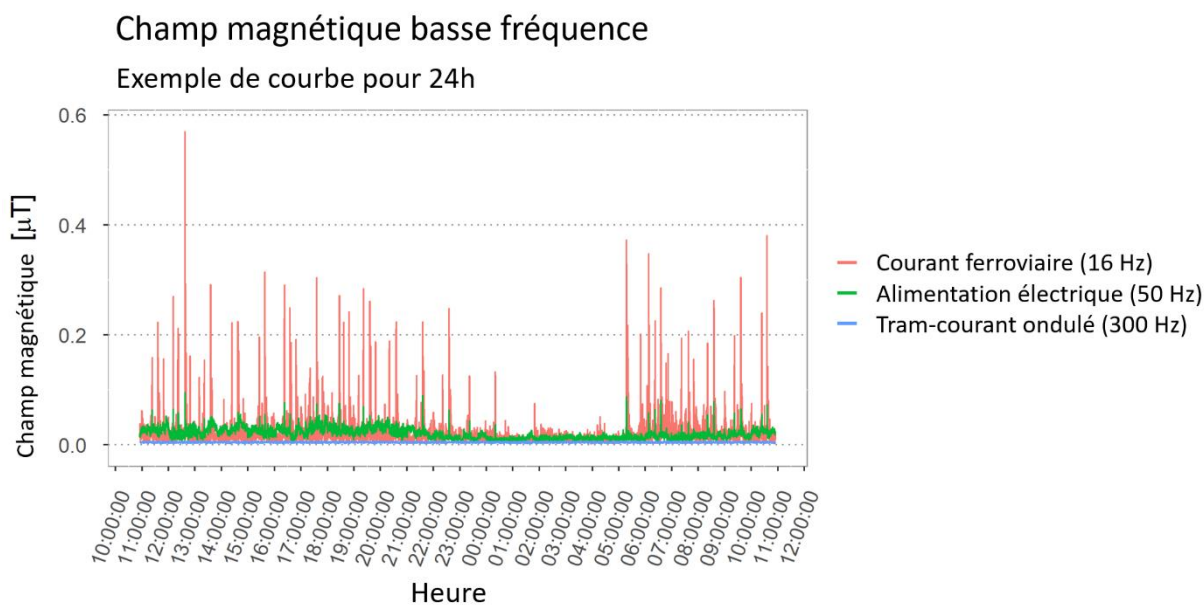


Figure 4: Exemple d'évolution du champ magnétique basse fréquence (valeurs rms) dans une habitation située à proximité d'une ligne de chemin de fer.

## Champ électrique haute fréquence

Exemple de courbe pour 24h

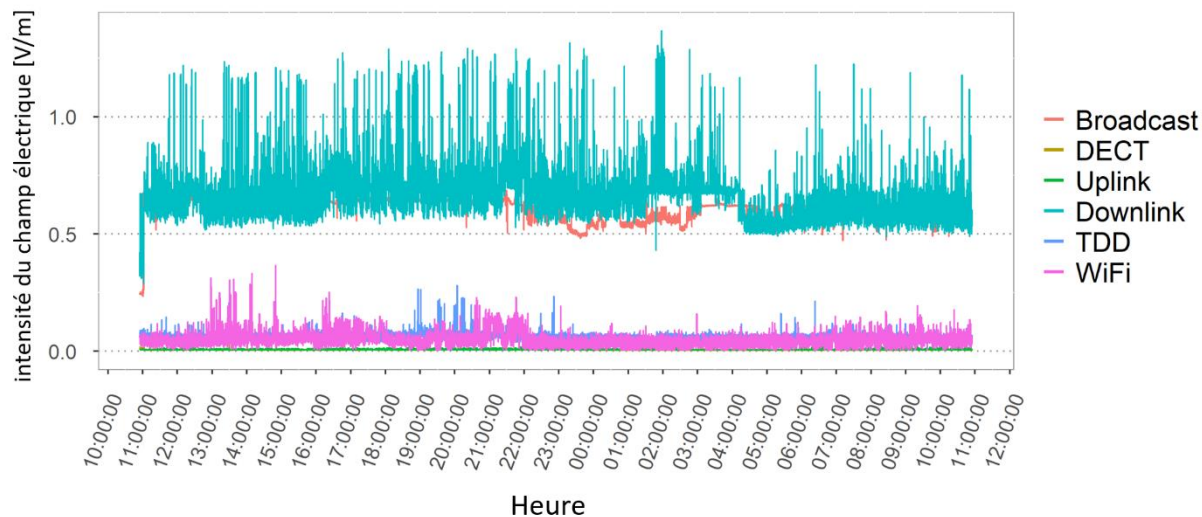


Figure 5: Exemple d'évolution du champ électrique haute fréquence (valeurs rms) dans un appartement situé à proximité d'une antenne de téléphonie mobile.

### **2.2.3 Mesures permanentes stationnaires**

Pour les mesures stationnaires permanentes, un appareil ExpoM-RF est placé à l'extérieur dans une mallette en plastique résistante aux intempéries et relié par un câble USB à un mini-ordinateur servant à la lecture des données et à l'alimentation électrique. 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 dans la mesure du possible avec des matériaux non conducteurs et doit être effectuée sur chaque site en tenant compte des conditions individuelles.

## **2.3 Sélection des sites de mesure**

Ce chapitre décrit en résumé les procédures de sélection des sites de mesure pour les trois méthodes de mesure.

### **2.3.1 Mesures d'itinéraires**

Dans le cadre de ce monitoring, 300 microenvironnements sont visités deux fois à des intervalles exacts de deux ans et mesurés sur les mêmes parcours. Dans un premier temps, des "communes d'implantation" ont été sélectionnées parmi les 25 typologies de communes selon la classification de l'Office fédéral de la statistique (Office fédéral de la statistique, 2012) dans le but de représenter leur part de population respective, à l'exception des neuf plus grandes villes qui ont toutes été délibérément sélectionnées (Zurich, Lausanne, Lugano, Genève, Bâle, Berne, Winterthur, Lucerne, Saint-Gall). Des communes ont été sélectionnées dans toutes les régions linguistiques, ainsi que les communes de la campagne de mesure de 2014 (Röösli M. F. M., 2015) à des fins de comparaison. Ainsi, 70 communes (annexe V) ont été sélectionnées (état au 22.04.2022) et représentées dans la figure 6.



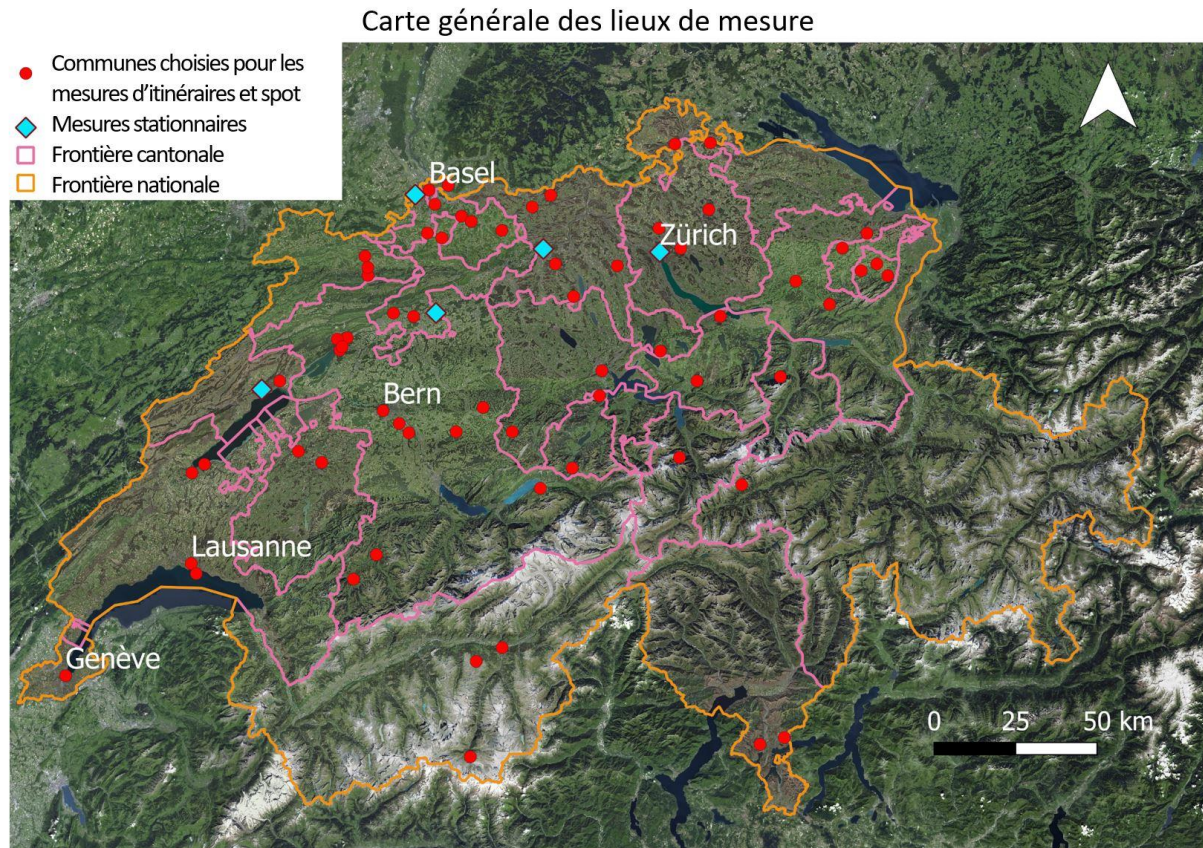


Figure 6: Carte de la Suisse avec les 70 communes (état au 22.04.2022) sélectionnées pour les mesures d'itinéraires et les mesures spot, ainsi que les 5 sites de mesure pour les mesures stationnaires permanentes. Source : <https://wmts.geo.admin.ch>, fond de carte

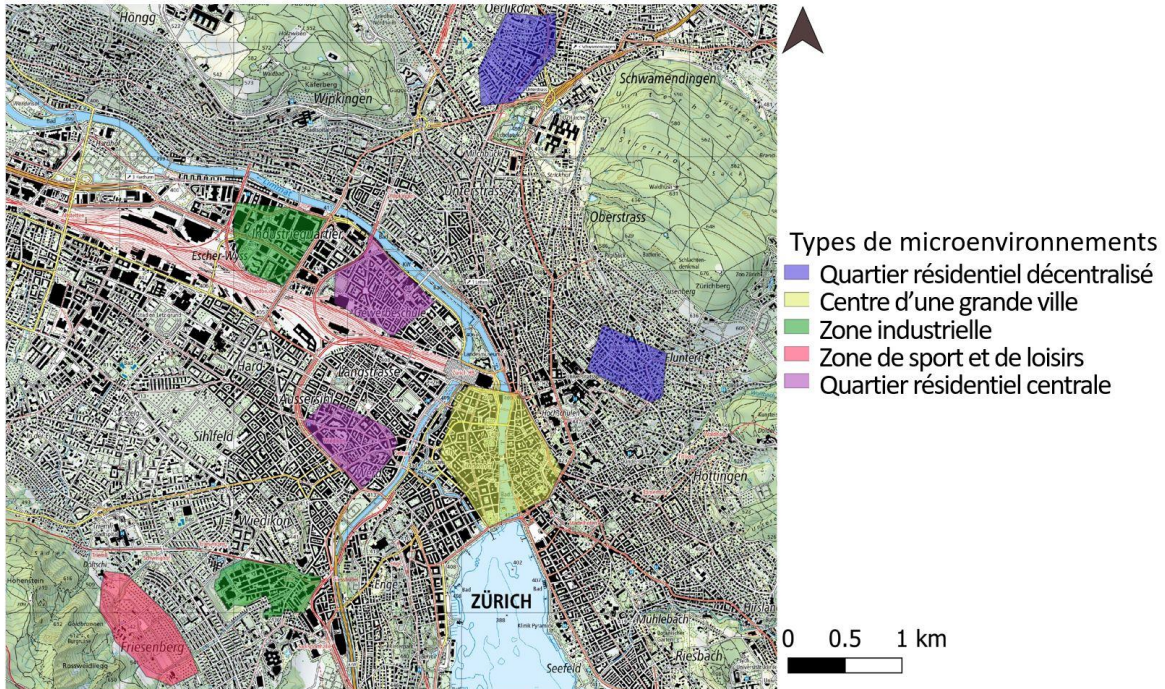
La définition et la sélection des microenvironnements à l'intérieur des communes se basent sur des données SIG étendues et sur des analyses SIG effectuées de manière itérative pour chaque campagne de mesure. Le set de données "Corine Land Cover (CLC)" de la Suisse<sup>1</sup> constitue le point de départ pour la définition des zones de microenvironnements possibles d'une aire d'environ 1 km<sup>2</sup>. Sur la base des classes CLC, 9 zones typiques ont été définies comme types de microenvironnements dans lesquels la population suisse séjourne régulièrement, cf. Tableau 1. Après avoir défini un microenvironnement, il est ensuite possible de planifier un parcours pour la mesure de l'itinéraire. Ce parcours doit couvrir l'aire de la manière la plus régulière possible, les possibilités étant limitées par la configuration spécifique des routes, raison pour laquelle il n'est pas possible de définir une procédure

<sup>1</sup> Inventaire de la couverture terrestre dans 44 classes : <https://www.wsl.ch/en/projects/corine-switzerland.html>



quantitative valable de manière générale.

### Situation des microenvironnements dans la ville de Zürich



### Trajet de mesure au sein d'un microenvironnement dans la ville de Zurich

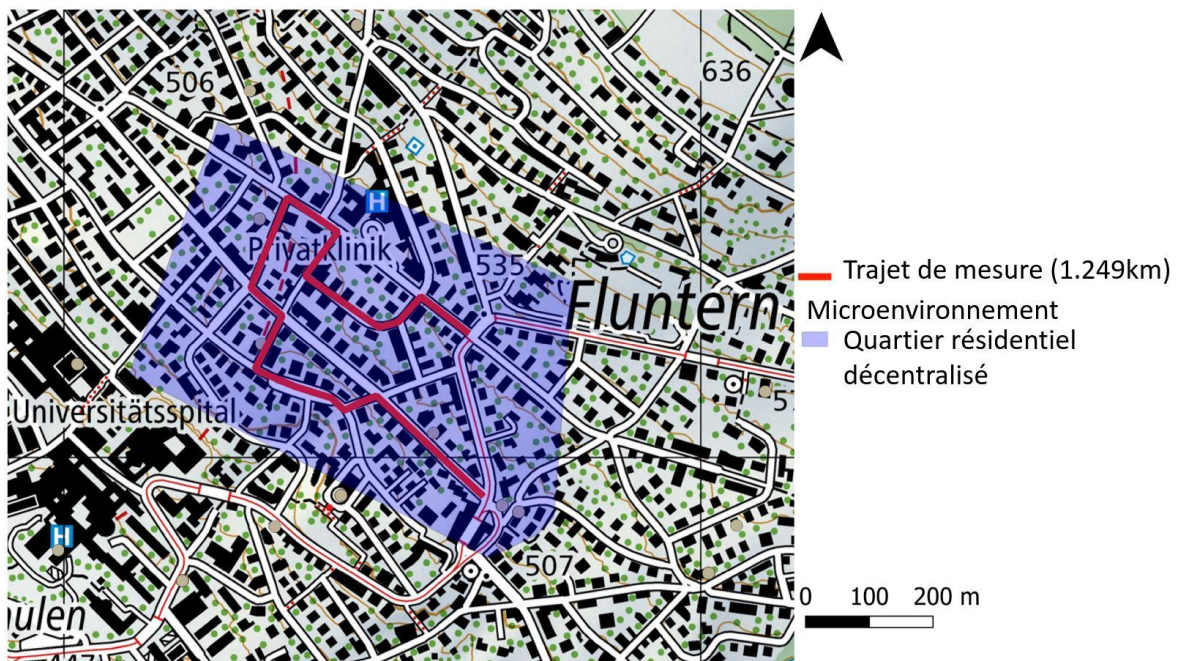


Figure 7 montre, à titre d'exemple, des microenvironnements et un itinéraire de mesure à Zurich.

Les types de microenvironnement "centre d'une grande ville", "quartier résidentiel central" et "quartier résidentiel décentralisé" ont été définis exclusivement pour des parties de villes appartenant aux typo-

logies de communes de l'OFS "ville-centre d'une grande agglomération" et "ville-centre d'une agglomération moyenne" et concernent donc des communes d'agglomérations comptant au moins 50'000 habitants. Pour cette catégorie, les 9 plus grandes villes suisses ont été sélectionnées. Les autres types de microenvironnement concernent soit des communes plus petites, soit sont indépendants du nombre d'habitants (p. ex. zone industrielle).

Tableau 1: Description des 9 types de microenvironnement.

Types de micro-environnement	Classe CLC	Description
Centre d'une grande ville	111	vieille ville, partie historique, cinéma, bars, restaurants, hôtels, peu de trafic routier, zone piétonne
Quartier résidentiel central	111	Proche du centre, structure étroite, à mi-distance du centre-ville, peu de trafic routier
Quartier résidentiel décentralisé	112	Proportion relativement importante d'espaces verts par rapport aux zones résidentielles centrales
Zone industrielle	121	Industrie, quartier des affaires
Centre-ville (ou centre du village)	112	Place du marché, vieille ville
Quartier résidentiel	112	En dehors du centre-ville
Zone de sport/loisirs	141/142	Terrain de sport, parcs, plage
Zone naturelle	311-321	Forêt, prairie
Zone agricole	211-243	Terres arables, cultures permanentes, pâturages

Comme la mesure des itinéraires doit permettre de saisir l'exposition typique au RNI de la population suisse dans les espaces publics extérieurs, le choix des microenvironnements doit être représentatif de la population. La représentativité en termes de sources typiques de RNI et de statistiques générales sur la population est calculée à l'aide de SIG et mise à jour périodiquement. Les résultats servent à la sélection détaillée des microenvironnements possibles. Pour ce faire, on calcule pour tous les paramètres étudiés, la part de la population résidant dans tous les microenvironnements et "affecté" par le paramètre en question. Cette valeur est à chaque fois comparée à la part moyenne de la population de l'ensemble de la Suisse qui est concernée par le même paramètre<sup>2</sup>. Le point de départ de la sélection d'autres microenvironnements étant les 49 microenvironnements existants de l'étude pilote de 2014 (Röösli M. F. M., 2015), également inclus dans cette étude. Les paramètres suivants sont pris en compte dans l'analyse de la représentativité :

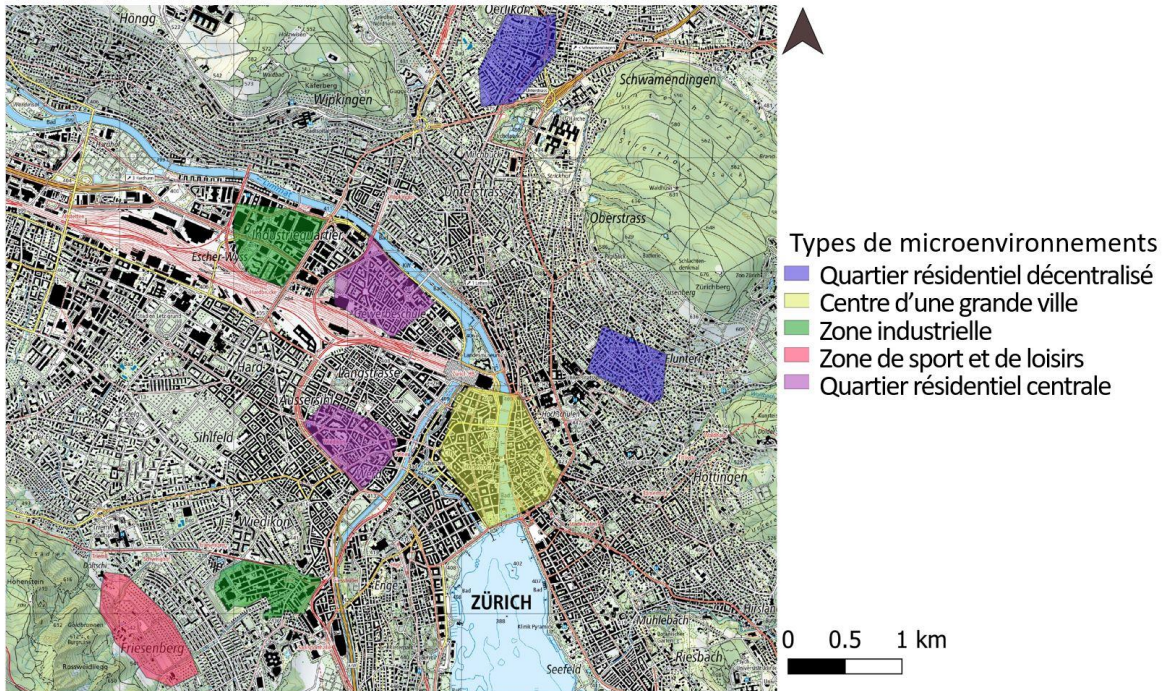
- Sources de RNI : Stations de téléphonie mobile (par classe de puissance d'émission et par technologie), émetteurs radio et TV (par classe de puissance d'émission), lignes à haute tension (par classe de tension), lignes de train et de tram (par type et par classe de voie).
- Statistiques démographiques : typologie des communes (selon l'OFS), Corinne Land Cover Type, cantons (au moins un microenvironnement par canton), région linguistique (+ au moins un microenvironnement par région linguistique). En outre, les neuf plus grandes villes doivent être représentées par au moins un microenvironnement.

De cette manière, 35 à 40 microenvironnements sont définis lors de quatre campagnes annuelles de mesures d'itinéraires.

<sup>2</sup> Exemples : "Combien de personnes vivent [en Suisse / dans les microenvironnements choisis] à moins de 50 m d'au moins une antenne 4G d'une puissance d'émission comprise entre 100 et 1000 W ?"; "Combien de personnes vivent [en Suisse / dans les microenvironnements choisis] dans une commune de type 113 de l'OFS (ville-centre d'une grande agglomération) ?"



Situation des microenvironnements dans la ville de Zürich



Trajet de mesure au sein d'un microenvironnement dans la ville de Zurich

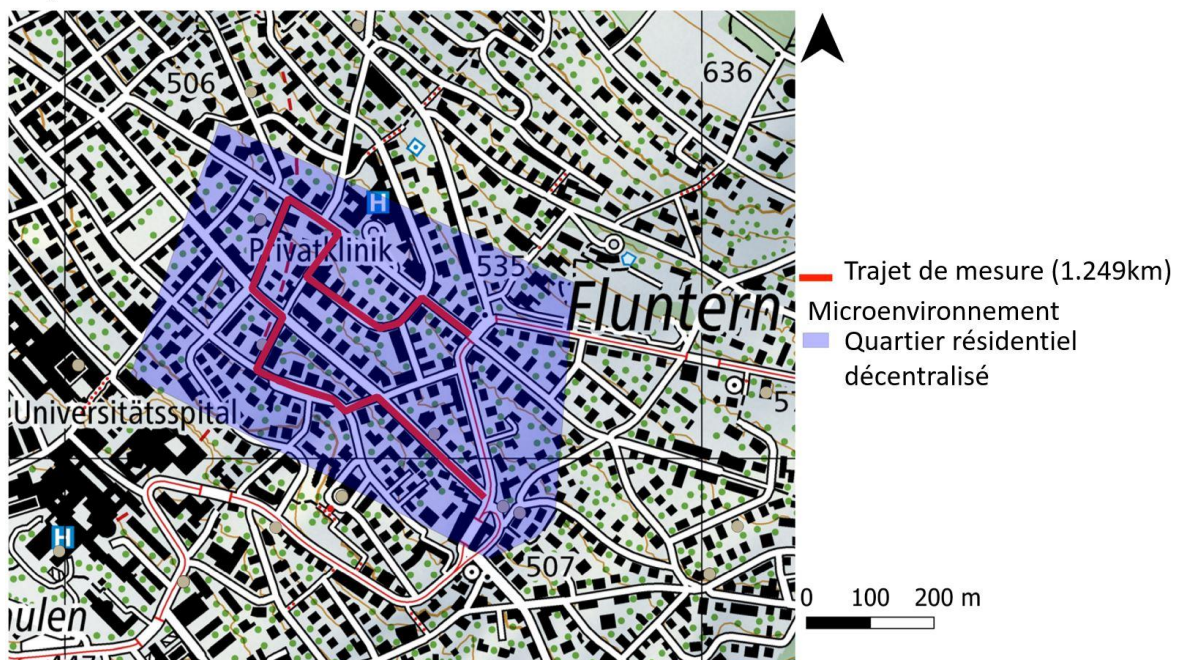


Figure 7: Exemple de microenvironnements de la ville de Zurich (en haut), exemple d'itinéraire de mesure au sein d'un microenvironnement (en bas). Source : <https://wmts.geo.admin.ch> , carte nationale : 1:25000

### 2.3.2 Mesures spot

Les mesures spot sont effectuées dans des appartements ou des maisons d'habitation privés et couvrent donc des situations très individuelles. Pour obtenir un échantillon représentatif, il serait en principe souhaitable de procéder à un échantillonnage aléatoire. Cela aurait toutefois l'inconvénient de laisser passer des situations d'exposition élevée et rares, compte tenu du nombre relativement faible d'habitations sélectionnées. C'est pourquoi une double stratégie est appliquée lors de la sélection. Afin de s'assurer que les expositions élevées provenant de différents types de sources (cf. Tableau 9), on recherche de manière ciblée les habitations où l'on peut s'attendre à des intensités de champ supérieures à la moyenne en raison de la proximité spatiale d'une source de RNI (par exemple, 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 lieux de mesure spot concernant les sources secondaires externes de RNI est distribué de manière approximativement représentative de l'exposition de la population résidente dans les microenvironnements où sont effectuées les mesures spot. Les critères suivants sont utilisés pour définir les propositions de sites pour les mesures spot :

1. Les sites de mesure doivent être situés dans un microenvironnement de mesure d'itinéraires afin de pouvoir être comparés.
2. Les lieux de mesure doivent se trouver à une distance définie spécifiquement pour chaque source ("périmètre d'influence") d'au moins une source de RNI "déterminante".
3. Pendant toute la durée du projet, on veillera à ce que tant les types de logements que les types de sources de RNI déterminants soient représentés de manière statistiquement appropriée dans les lieux de mesure.

Les types de logements et de sources ainsi que les périmètres d'influence sont présentés au chapitre 3.2.6.

### 2.3.3 Mesures permanentes stationnaires

Les mesures fixes permanentes sont exploitées sur des sites du consortium du projet afin de pouvoir garantir la sécurité (dommages, vandalisme, accessibilité, effets perturbateurs) et la maintenance (infrastructure, alimentation électrique, connexion Internet).

Les sites ont été sélectionnés en fonction des sources de HF situées à proximité des sites et de la typologie des communes.

## 2.4 Gestion des données

### 2.4.1 Fichiers de mesure et base de données

Les données brutes générées lors des mesures peuvent être classées en deux catégories : Les données de mesure au niveau des points de mesure (BF et HF ou ExpoM-ELF et ExpoM-RF) et les métadonnées au niveau des mesures (informations sur les appareils de mesure, informations sur les mesures, paramètres SIG). Pour représenter cela et permettre, en plus de la sauvegarde, du suivi et de la documentation nécessaires, des agrégations de données, les données sont gérées dans une base de données centrale. Comme indiqué dans la Figure 8 schématiquement, 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 appareils de mesure et d'autres métadonnées compilées, et d'autre part de la documentation des données brutes originales non modifiées ("raw"). Lors d'une étape de prétraitement, ces fichiers bruts sont préparés de manière spécifique aux mesures (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 tables ("dataElf", "dataRf" et "metaMeas") d'une base de données MySQL. Après la lecture automatisée à partir du niveau 0, les données de mesure sont préparées ici et des corrections sont apportées pour les erreurs systématiques connues (voir section 2.4.2) sont effectuées. Ceci est réalisé par des scripts R externes (voir aussi le chapitre 2.4.2), 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 (et supérieur) : 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.

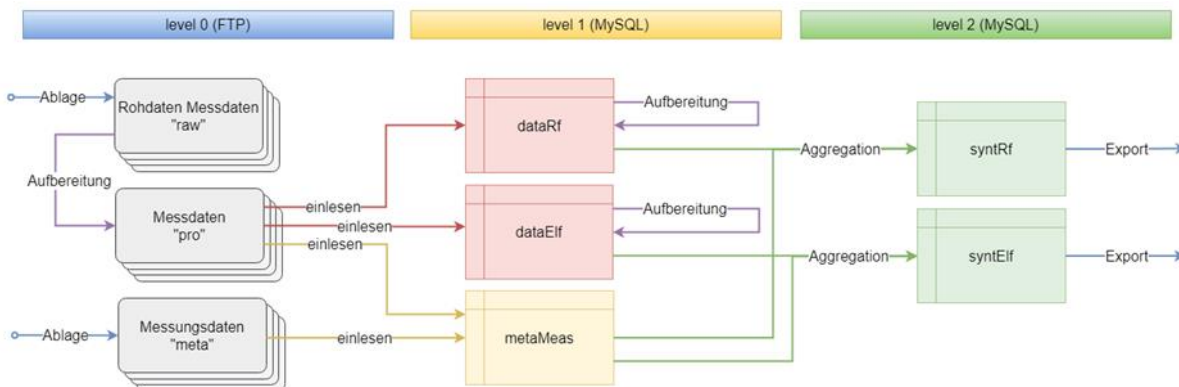


Figure 8: Schéma simplifié de la structure de la base de données



## 2.4.2 Préparation des données

La préparation et l'analyse des données des mesures d'itinéraires et de spots sont fondamentalement identiques. Pour les mesures d'itinéraires, les données de mesure sont attribuées au bon microenvironnement à l'aide du protocole d'activité (voir section 2.2.1) et stockées en conséquence dans la base de données ; pour les mesures ponctuelles, les données sont attribuées de manière analogue aux trois mesures partielles. Dans un premier temps, la plausibilité des données est vérifiée visuellement et les erreurs dans le processus de mesure (comme l'interruption du processus de mesure) sont identifiées. Ensuite, les éventuelles diaphonies (crosstalk) entre bandes de fréquences voisines sont corrigées à l'aide d'analyses de corrélation selon Eeftens M. S. B., 2018 (pour une description détaillée de la correction de la crosstalk, voir le chapitre 2.5.5). Pour la suite de l'analyse des données, les bandes sont réparties en différents groupes de fréquences et additionnées au carré à l'intérieur de ceux-ci. Les groupes de fréquences ont été définis en fonction de leur application technique ou de leur origine.

Les bandes HF ont été réparties en 7 groupes. Les numéros correspondent aux bandes de fréquences indiquées dans le Tableau 2:

- Radiodiffusion : cette catégorie comprend la radio, le DAB, la TV dans les bandes 1 à 8.
- Liaison montante de téléphonie mobile (terminaux) : Cela correspond aux numéros de bande 9, 13, 14, 17, 20, 23
- Liaison descendante de la téléphonie mobile (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 et la liaison descendante, constituent un cas particulier. Cela signifie qu'en raison de la fréquence, aucune répartition fonctionnelle en liaison montante et descendante n'est possible. On peut supposer que lors des mesures en extérieur, l'exposition est dominée par la liaison descendante, alors que dans les transports publics et dans les espaces intérieurs accessibles au public, la liaison montante devrait également jouer un rôle important. Cela correspond aux numéros de bande 10, 24, 26, 27, 28
- W-LAN : les numéros de bande 22 et de 29 à 35
- Téléphone sans fil : le numéro de bande 19
- RF-EMF totale : la somme totale de toutes les bandes

Pour les champs magnétiques à basse fréquence, le regroupement de fréquences suivant est effectué:

- Courant ferroviaire : la bande principale correspond à la bande numéro 2 et l'harmonique se trouve dans 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 de tram (courant triphasé redressé) : la bande principale correspond à la bande numéro 10 et les harmoniques sont les bandes numéros 12 et 14.
- CM-BF totale : cela correspond à la somme des trois groupes précédents, c'est-à-dire sans tenir compte des bandes intermédiaires non spécifiques.

### 2.4.3 Statistiques descriptives

Toutes les évaluations des mesures RF sont effectuées avec la densité de flux de puissance, puis transformées en intensité de champ électrique (V/m) pour les rapports. Pour les mesures RF, l'analyse des données est effectuée à la fois pour les valeurs RMS et pour les valeurs de crête, ainsi que séparément pour chaque bande de fréquence fonctionnelle. Comme on ne sait pas quels paramètres d'exposition sont les plus pertinents sur le plan biologique, un grand nombre de mesures d'exposition possibles sont évaluées. Pour ce faire, toutes les données d'une période de référence par type de microenvironnement sont agrégées et les statistiques cumulatives suivantes sont calculées : Minimum, médiane, moyenne arithmétique, maximum et différents quantiles (05<sup>e</sup>, 25<sup>e</sup>, 75<sup>e</sup> et 95<sup>e</sup>).

Notons que lorsque le terme de valeur moyenne est utilisé ci-après pour les données CEM-HF, on parle de la valeur moyenne arithmétique de la densité de flux de puissance, qui est ensuite transformée en intensité de champ électrique. Il en va de même pour le calcul de sommes sur différentes fréquences. 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. Cependant, les valeurs de crête de différentes fréquences apparaissent généralement à différents moments au cours d'un intervalle de mesure. Cela signifie que la somme des valeurs de crête pour différentes fréquences conduit à une surestimation des valeurs de crête indiquées. Il convient toutefois de noter que pendant un intervalle de mesure de six secondes, toutes les bandes de fréquence sont balayées les unes après les autres. Il est donc possible que des pics de courte durée soient manqués, ce qui contribue à une sous-estimation des valeurs de pics. 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 de crête).

### 2.5 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 couverte par l'appareil ExpoM-ELF tandis que pour les champs électromagnétiques à haute fréquence (EMF-HF), des appareils ExpoM-RF de la dernière génération sont utilisés (Version 4).

Les appareils de mesure ExpoM (Figure 9) sont compacts et légers et disposent d'un enregistreur GPS intégré. Ils conviennent donc particulièrement bien aux mesures mobiles. Les mesures spot et les mesures stationnaires prévues dans le cadre de ce projet peuvent toutefois également être effectuées avec ces appareils, ce qui garantit une comparabilité optimale de tous les résultats de mesure.



Figure 9: 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.

### 2.5.1 Spécifications générales de l'appareil

L'ExpoM-ELF est un appareil de mesure de champ magnétique à 3 axes couvrant 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) ultérieure des mesures dans le domaine temporel.

L'ExpoM-RF 4 est un exposimètre configurable et sélectif de bande pour les champs électromagnétiques haute fréquence de 50 MHz à 6 GHz et enregistre l'intensité de champ électrique en V/m. Trois plages 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 plage de mesure spécifiée. L'ExpoM-RF prélève à chaque intervalle de mesure un échantillon des immissions dans toutes les bandes préconfigurées (voir Tableau 2). La valeur efficace (RMS) ainsi que la valeur de crête 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 produits correspondantes du site web de Fields at Work ([www.fieldsatwork.ch](http://www.fieldsatwork.ch)).

### 2.5.2 Sélection des bandes de fréquences

Pour ce projet, une sélection de 35 bandes de fréquences dans les domaines CM-BF et EMF-HF a été effectuée, couvrant tous les services de radiodiffusion, de téléphonie mobile et de télécommunication sans fil importants ainsi que les immissions RNI dues aux infrastructures. Les 35 bandes de fréquences sont étalonnées individuellement pour chaque appareil dans la chambre de mesure sans écho (champ lointain).

Les bandes de fréquences HF sont énumérées 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).

Les bandes BF sont indiquées dans le Tableau 3. En Suisse, la grande majorité des chemins de fer à courant alternatif sont exploités avec une fréquence de 16,7 Hz. Le courant de l'alimentation générale présente une fréquence de 50 Hz. Les trams, les trolleybus et certaines lignes de trains fonctionnent avec du courant continu. Comme celui-ci est normalement produit par un redressement de courant alternatif triphasé (avec une fréquence de 50 Hz), une composante de courant alternatif de 300 Hz (6 fois 50 Hz) peut être superposée au courant continu (appelé courant ondulé), comme indiqué dans la Figure 10 de manière qualitative. Dans le Tableau 3 on trouve, avec le courant de traction (16 à 17 Hz), la tension du réseau (50 Hz), le courant triphasé redressé (300 Hz, "tram") ainsi que leurs harmoniques partielles, quelques bandes de fréquences spécifiques couvrant les champs de sources largement répandues. Le reste du spectre entre 5 Hz et 100 kHz est couvert par des bandes intermédiaires non spécifiques et est entièrement enregistré. En mars 2022, ces bandes non spécifiques ne sont pas prises en compte dans l'évaluation des données, car aucun signal significatif n'a pu y être détecté dans le cadre des évaluations effectuées jusqu'à présent. Les données sont néanmoins entièrement contenues dans la base de données et peuvent être exploitées en cas de besoin. De même, les données brutes des appareils de mesure sont stockées dans le système de fichiers, ce qui rendrait techniquement possible une évaluation ultérieure d'autres bandes de fréquences.

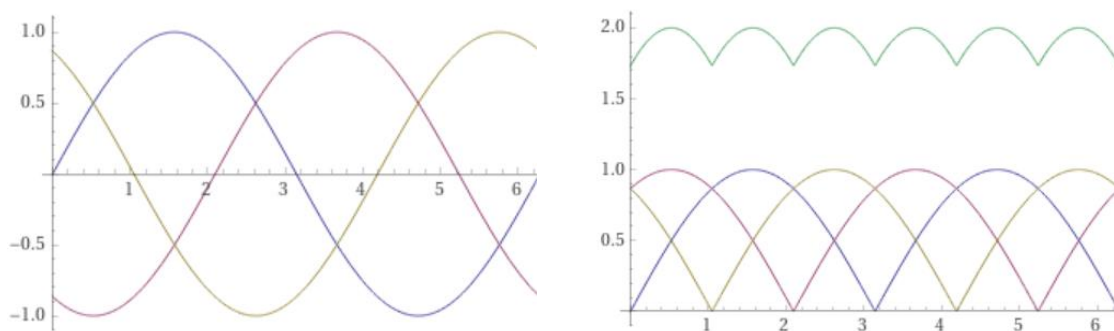


Figure 10: Illustration qualitative de la composante alternative du courant triphasé redressé : les trois phases du courant triphasé correspondent à trois sinusoïdes déphasées de 120° chacune (graphique de gauche). Ces trois tensions alternatives peuvent être redressées (correspondant à la valeur absolue des sinusoïdes dans la moitié inférieure du graphique de droite). Si l'on additionne ces tensions, on obtient une tension continue avec une structure d'ondulation de six fois la fréquence fondamentale (courbe verte dans le graphique de droite).

Tableau 2: Liste des bandes de fréquences HF.

n° bande CEM-HF	Description	Fréquence centrale en MHz	Bande passante en MHz	Service Catégorie
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	liaison montante cellulaire
10	Mobile 700 TDD (CH, Sunrise)	748	35	TDD cellulaire
11	Mobile 700 DL (CH)	770.5	35	lien de téléchargement cellulaire
12	Mobile 800 DL	808.5	35	lien de téléchargement cellulaire
13	Mobile 800 UL	847	35	liaison montante cellulaire
14	Mobile 900 UL	897.5	35	liaison montante cellulaire
15	Mobile 900 DL	942.5	35	lien de téléchargement cellulaire
16	Mobile 1400 SDL (CH)	1479.5	75	lien de téléchargement cellulaire
17	Mobile 1800 UL	1747.5	75	liaison montante cellulaire
18	Mobile 1800 DL	1842.5	75	liaison montante cellulaire
19	DECT	1897.5	35	
20	Mobile 2100 UL	1957	75	liaison montante cellulaire
21	Mobile 2100 DL	2145	75	lien de téléchargement cellulaire
22	ISM 2.4 GHz	2438	100	WiFi
23	Mobile 2600 DL	2535	75	liaison montante cellulaire
24	Mobile 2600 TDD (Swisscom)	2592.5	35	TDD cellulaire
25	Mobile 2600 DL	2657	75	lien de téléchargement cellulaire
26	Mobile 3500 (1)*	3475	100	TDD cellulaire
27	Mobile 3500 (2)*	3605	100	TDD cellulaire
28	Mobile 3500 (3)*	3735	100	TDD cellulaire
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 en tenant compte du crosstalk, pour que la plage de fréquences de 3400 à 3800 MHz soit représentée sans faille.



Tableau 3: Liste des bandes de fréquences BF.

n° bande CM-BF	Description	Fréquence centrale en Hz	Largeur de bande en Hz	Catégorie de service
1	Bande LF 5 à 15 Hz	10	10	
2	Courant ferroviaire, 16 à 17 Hz	16.5	1	Transports publics
3	Bande LF 18 à 48 Hz en $\mu$ T	33	30	Bande intermédiaire non spécifique
4	Tension de réseau AC, 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
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 d'ondulation), 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

### 2.5.3 Précision 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 établies du GUM (JCGM, 2008).

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	A venir :	5.0%	28.3%
Non-linéarité	Variation des constantes d'étalonnage lors de mesures en dehors des valeurs d'amplitude étalonnées / interpolation	A venir :	1.0%	5.8%
Anisotropie	Sensibilité directionnelle de l'instrument de mesure	A venir :	1.0%	49.6%
Résolution	Erreurs numériques d'arrondi et de décalage	A venir :	0.5%	3.0%
Température	Incertitude due à la dérive thermique des capteurs et de l'électronique	A venir :	2.5%	10%
Répétabilité	Variations aléatoires (bruit)	Normal	0.5%	1.0%
<b>TOTAL</b>	<b>Incertitude de mesure combinée (intervalle de confiance de 95%)</b>		<b>3,9% / 0,33 dB</b>	<b>34,1% / 2,6 dB</b>

Le Tableau 4 indique que dans la zone 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 plage d'incertitude a été confirmée sur la version précédente de l'appareil lors de mesures parallèles sur le terrain. (Eeftens M. D. S., 2020).

### 2.5.4 Influence du blindage du corps

Les appareils ExpoM-RF sont calibrés en usine dans la chambre de mesure sans écho en champ libre. L'appareil est alors placé sur une plateforme isolée indépendante, qui exerce une influence négligeable sur le champ entrant. Cependant, 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. Pour

ce faire, les différences dans l'intensité de champ moyenne enregistrée ont été déterminées lorsque les appareils de mesure sont exposés dans différentes conditions et directions d'incidence. Les mesures ont été effectuées dans le sens de conditions extrêmes contrôlées dans la chambre de mesure sans écho. Dans les situations quotidiennes, les effets d'ombre sont atténués par la présence de plusieurs sources/directions d'incidence et de réflexions dans l'environnement.

**Les fréquences** : Le montage calibré dans la chambre de mesure sans écho a une limite de fréquence inférieure de 350 MHz. Il faut donc renoncer à une évaluation des deux bandes de fréquences les plus basses de la liste SwissNIS (97,75 MHz et 202 MHz). Les 33 bandes restantes, de 385 à 5950 MHz inclus, ont toutes été prises en compte dans cette évaluation.

**Intensité de champ** : comme les influences relatives sont principalement étudiées dans le cadre de ce rapport, l'intensité de champ absolue ne joue pas un rôle décisif. L'intensité de champ de 0,875 V/m a été choisie telle que les valeurs mesurées se situent dans la plage de mesure optimale des appareils de mesure.

**Orientation et polarisation** : les mesures ont été effectuées dans quatre directions avec deux polarisations chacune (8 mesures au total par scénario). Comme le sac à dos a une orientation clairement définie lors de son utilisation, les mesures ont été limitées à quatre directions d'incidence latérales. Celles-ci sont représentées dans les images suivantes (aussi bien pour le sac à dos que pour la valise de mesure qui y est emballée). La définition de la direction de polarisation est en outre visible sur les images. Il y a polarisation verticale lorsque le champ E est orienté parallèlement au côté le plus long du sac à dos/de la valise.



Figure 11: Désignations et orientation de la mallette de mesure et du sac à dos avec définition de la polarisation du champ incident

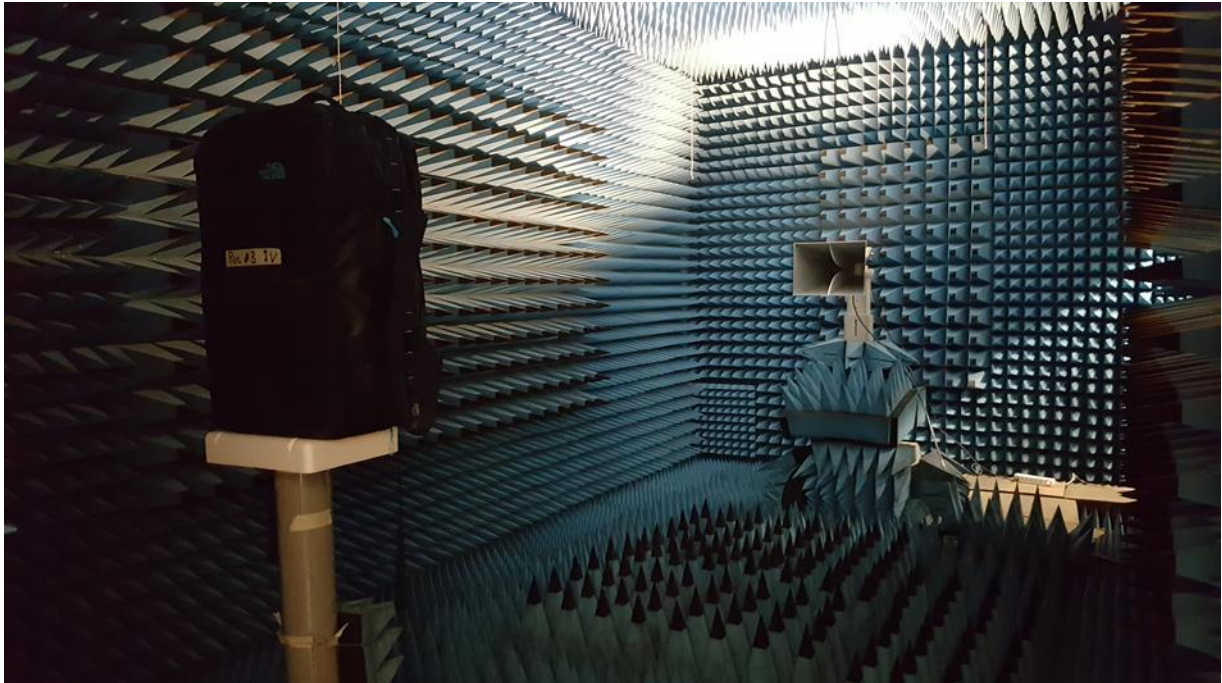


Figure 12: Installation dans la chambre sans écho

**Résultats** : Les graphiques suivants résument les différences mesurées par rapport à la situation de référence (appareil ExpoM-RF en champ libre). Les cercles colorés représentent les différences relatives des mesures individuelles (8 directions d'incidence), tandis que les points noirs représentent la différence relative après calcul de la moyenne pour toutes les directions d'incidence.

Dans une première mesure (Figure 13), l'influence du sac à dos de mesure a été considérée de manière isolée. Le tissu, les pièces en plastique et la proximité des deux autres appareils de mesure dans la mallette entraînent un décalage de la sensibilité directionnelle. Cet effet est particulièrement marqué vers 500-700 MHz ainsi que vers 3,5 GHz. Toutefois, si l'on considère la valeur moyenne sur toutes les directions, il n'y a pas d'écarts systématiques notables (-1,2% en moyenne sur toutes les fréquences). Les valeurs extrêmes sont respectivement de -8,5% et +12%. Des écarts de cet ordre de grandeur peuvent également provenir de légères différences dans le positionnement des appareils de mesure.

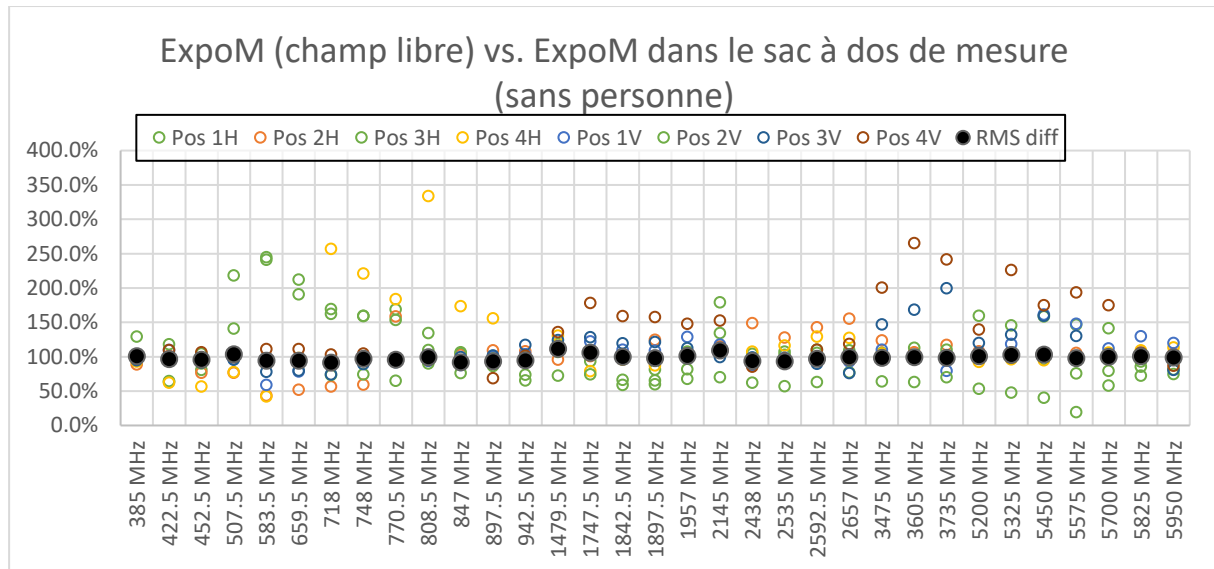


Figure 13: Décalage relatif des valeurs mesurées lorsque l'ExpoM-RF se trouve dans le sac à dos de mesure (sans personne).

Lorsque le sac à dos est porté par une seule personne, les effets sont, comme on pouvait s'y attendre, plus importants (Figure 14). Selon la fréquence, on peut maintenant observer des décalages plus marqués dans les valeurs moyennes (valeurs extrêmes -32% ou +18%). L'écart moyen sur toutes les fréquences est de -11,6%, ce qui indique une légère sous-estimation systématique.

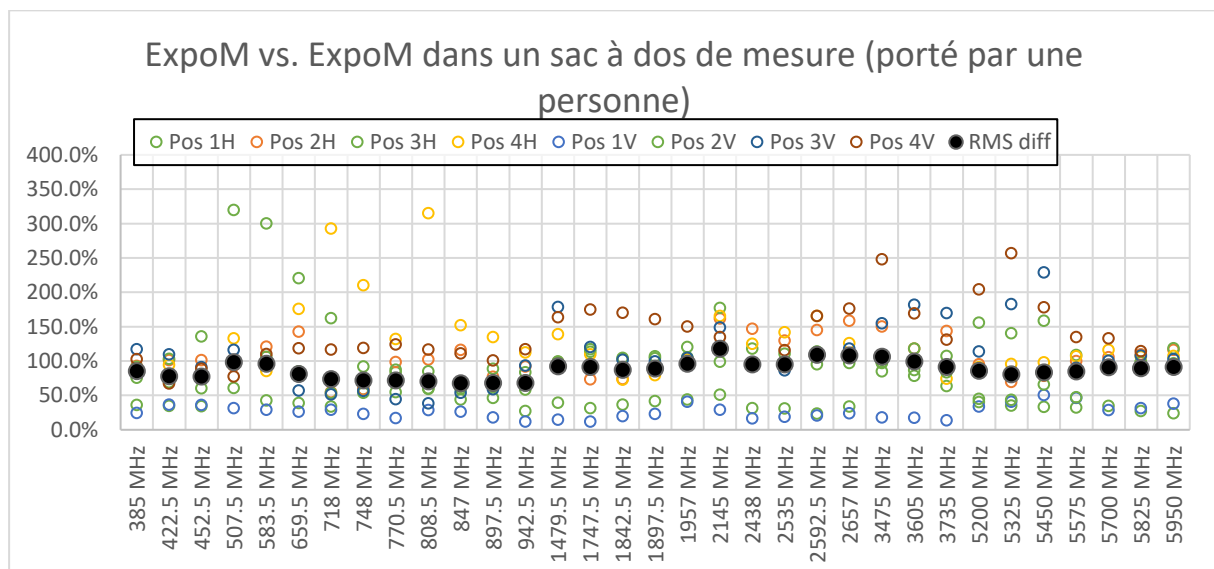


Figure 14: Décalage relatif des valeurs mesurées lorsque l'ExpoM-RF se trouve dans le sac à dos de mesure porté par une personne.

Les résultats des mesures dans la chambre sans écho indiquent que le montage de mesure pour les mesures mobiles peut éventuellement conduire à une légère sous-estimation systématique des intensités de champ mesurées. Toutefois, ces résultats sont basés sur un montage de laboratoire avec des hypothèses simplifiées et un nombre limité de directions d'incidence du champ électromagnétique.



L'écart moyen est considéré comme acceptable, c'est pourquoi on renonce à des corrections systématiques des valeurs mesurées. Si de telles corrections étaient introduites, les valeurs devraient être validées par une mesure en laboratoire à résolution plus fine (plus de directions d'incidence et de variations) ainsi que par des comparaisons empiriques sur des mesures d'itinéraires réels en fonction de la fréquence (par exemple personne avec un sac à dos de mesure vs appareil de mesure individuel à une distance nettement plus grande de la personne). Sinon, le risque serait de fausser les valeurs de mesure avec de prétendus facteurs de correction influencés par le dispositif de mesure.

### 2.5.5 Correction crosstalk

Le crosstalk décrit le fait qu'un signal émis dans une bande de fréquence A ("agresseur") est également enregistré dans une bande de fréquence B voisine ("victime"). 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.

Dans les mesures à haute fréquence, le crosstalk est présent dans certaines bandes de fréquences avec un écart de fréquence relativement faible ou avec un chevauchement. Les paires de bandes pour lesquelles une correction du crosstalk doit être appliquée sont déterminées par le coefficient de corrélation (corrélation de Pearson) entre ces bandes, l'écart de fréquence entre les différentes bandes et la corrélation qualitative des sources RNI (application similaire ou différente). Parmi les 34 paires de bandes voisines, 4 paires de bandes ont été sélectionnées et présentées dans le Tableau 5, qui remplissent les critères définis pour l'application d'une correction crosstalk.

Tableau 5: \*Paires de bandes sélectionnées pour l'application des corrections crosstalk avec les critères décisifs de sélection.

No.	Bande 1*	Bande 2*	Critères décisifs
1	8-Broadcasting CH (3)	9-Mobile 700 UL (CH)	Corrélation de Pearson > 0,36 Espacement des fréquences : 3,5 MHz Non corrélé (radiodiffusion / téléphones portables)
2	9-Mobile 700 UL (CH)	10-Mobile 700 TDD (CH, Sunrise)	Corrélation de Pearson > 0,22 Espacement des fréquences : -5 MHz application corrélée (téléphonie mobile)
3	10-Mobile 700 TDD (CH, Sunrise)	11-Mobile 700 DL (CH)	Corrélation de Pearson > 0,20 Espacement des fréquences : -12,5 MHz application corrélée (téléphonie mobile)
4	18-Mobile 1800 DL	19-DECT	Corrélation de Pearson > 0,66 Distance de fréquence : 0 MHz Non corrélé (antennes de téléphonie mobile / téléphones fixes)

Pour effectuer la correction crosstalk des données CEM-HF, un script R développé par Eftens M. S. B. (2018) a été utilisé. L'algorithme de correction se compose des étapes suivantes :

1. Définition des clusters pouvant donner lieu à des crosstalk. Le début et la fin de nouveaux clusters coïncident avec un changement soudain de la valeur absolue d'une bande ou du rapport entre la bande victime et la bande agresseur. Ce changement est appelé rate-of-change (ROC) et un facteur de 10 (valeurs RMS) ou de 50 (valeurs

de crête) en 24 secondes a été fixé comme valeur seuil pour un changement "soudain".

2. Si, au sein de tels clusters, le niveau de corrélation entre les deux bandes est supérieur à un seuil défini (0,2 pour les sources non corrélées ou 0,4 pour les sources corrélées), une valeur de substitution est attribuée à la bande victime. Le niveau d'exposition typique dans chaque environnement de mesure et pour chaque bande de fréquence est calculé comme valeur de substitution : la médiane de l'exposition dans cette bande de fréquence parmi les valeurs mesurées qui ne remplissent pas les critères de correction et qui ont été recueillies dans le même environnement de mesure. Les corrections n'ont été effectuées que lorsque la valeur de substitution est inférieure à la valeur mesurée, de sorte que l'exposition n'est jamais corrigée à la hausse.

Dans le Tableau 6 les effets de la correction appliquée aux bandes sélectionnées sont présentés à titre d'exemple pour l'ensemble des données des deux premières campagnes de mesures d'itinéraires. Par exemple, 53,7 % des points de données DECT RMS ont été corrigés, ce qui entraîne une réduction de 53,7 % de l'exposition moyenne au DECT pour les valeurs RMS (Tableau 6), alors que seulement 0,4 % des points de données Mobile 1800 DL sont corrigés et que la réduction de l'exposition dans cette bande est de 1,6 % pour les valeurs RMS. L'annexe VII montre la réduction totale de l'exposition (en valeur absolue et en pourcentage) après application de la correction crosstalk pour les paires de bandes sélectionnées pour chaque type d'environnement de mesure. La correction réduit l'exposition totale moyenne aux RF pour chaque type d'environnement de mesure de 0 % à 3,8 % pour les valeurs RMS et les valeurs de crête. Le service DECT est le plus touché par la correction crosstalk, suivi du service TDD. Pour les autres services (liaison descendante, liaison montante, diffusion), l'effet de la correction est très limité.

La grande réduction de l'exposition DECT lors des mesures d'itinéraires est due au fait que des téléphones sans fil émettent dans la bande DECT, lesquels sont principalement utilisés à l'intérieur, alors que les mesures d'itinéraires ont principalement lieu à l'extérieur. Les "vraies" valeurs de mesure DECT sont donc très faibles lors des mesures d'itinéraires, de sorte qu'une contribution due au crosstalk peut être proportionnellement importante.

Tableau 6: Résultats de la correction crosstalk pour les paires de bandes N sélectionnées : A) valeurs RMS (N = 102726) B) valeurs de crête (N = 102739). Pour chaque bande, la moyenne non corrigée et la moyenne corrigée sont indiquées, ainsi que la réduction moyenne (en pourcentage et en valeur absolue).

A)

No.	Bande 1	Bande 2	valeur seuil de corrélation	valeur moyenne non corrigée bande 1 [V/m]	moyenne non corrigée bande 2 [V/m]	valeur moyenne corrigée bande 1 [V/m]	valeur moyenne corrigée bande 2 [V/m]	Proportion de points de données corrigés	Proportion de points de données corrigés	Réduction moyenne bande 1 [%]	Réduction moyenne bande 2 [%]	Ecart moyen de la bande 1 [V/m]	Ecart moyen de la bande 2 [V/m]
1	8-Broadcasting CH (3)	9-Mobile 700 UL (CH)	0.2	0.005	0.017	0.004	0.017	2.5	0.2	21.8	0.0	0.001	0.000
2	9-Mobile 700 UL (CH)	10-Mobile 700 TDD (CH, Sunrise)	0.4	0.017	0.010	0.017	0.009	0.4	1.7	0.2	11.8	0.000	0.001
3	10-Mobile 700 TDD (CH, Sunrise)	11-Mobile 700 DL (CH)	0.4	0.010	0.050	0.008	0.050	22.8	0.2	18.6	0.0	0.002	0.000
4	18-Mobile 1800 DL	19-DECT	0.2	0.122	0.061	0.121	0.028	0.4	53.7	1.6	53.7	0.002	0.032

B)

No.	Volume 1	Volume 2	Valeur seuil de corrélation	valeur moyenne non corrigée bande 1 [V/m]	moyenne non corrigée bande 2 [V/m]	valeur moyenne corrigée bande 1 [V/m]	valeur moyenne corrigée bande 2 [V/m]	Proportion de points de données corrects	Proportion de points de données corrects	Réduction moyenne bande 1 [%]	Réduction moyenne bande 2 [%]	Ecart moyen de la bande 1 [V/m]	Ecart moyen de la bande 2 [V/m]
1	8-Broadcasting CH (3)	9-Mobile 700 UL (CH)	0.2	0.056	0.183	0.044	0.183	5.6	3.2	21.6	0.1	0.012	0.000
2	9-Mobile 700 UL (CH)	10-Mobile 700 TDD (CH, Sunrise)	0.4	0.183	0.113	0.183	0.092	2.0	2.6	0.1	18.8	0.000	0.021
3	10-Mobile 700 TDD (CH, Sunrise)	11-Mobile 700 DL (CH)	0.4	0.113	0.401	0.091	0.400	29.9	0.3	19.7	0.1	0.022	0.001
4	18-Mobile 1800 DL	19-DECT	0.2	0.636	0.265	0.635	0.082	0.5	54.4	0.2	69.1	0.001	0.184



### 3 Résultats

#### 3.1 Mesures d'itinéraires

##### 3.1.1 Environnements de mesure

En 2021, deux campagnes de mesures d'itinéraires ont été réalisées. La première campagne a duré du 21.07 au 20.08 et la seconde du 26.10 au 11.10. Au total, 75 microenvironnements ont été mesurés et leur répartition est illustré dans la Figure 15. En plus des parcours de mesure à 'extérieur proprement dits, des mesures ont également été effectuées dans 53 espaces publics intérieurs et des données de mesure ont été collectées dans les transports en commun pendant une durée d'environ 32 heures.

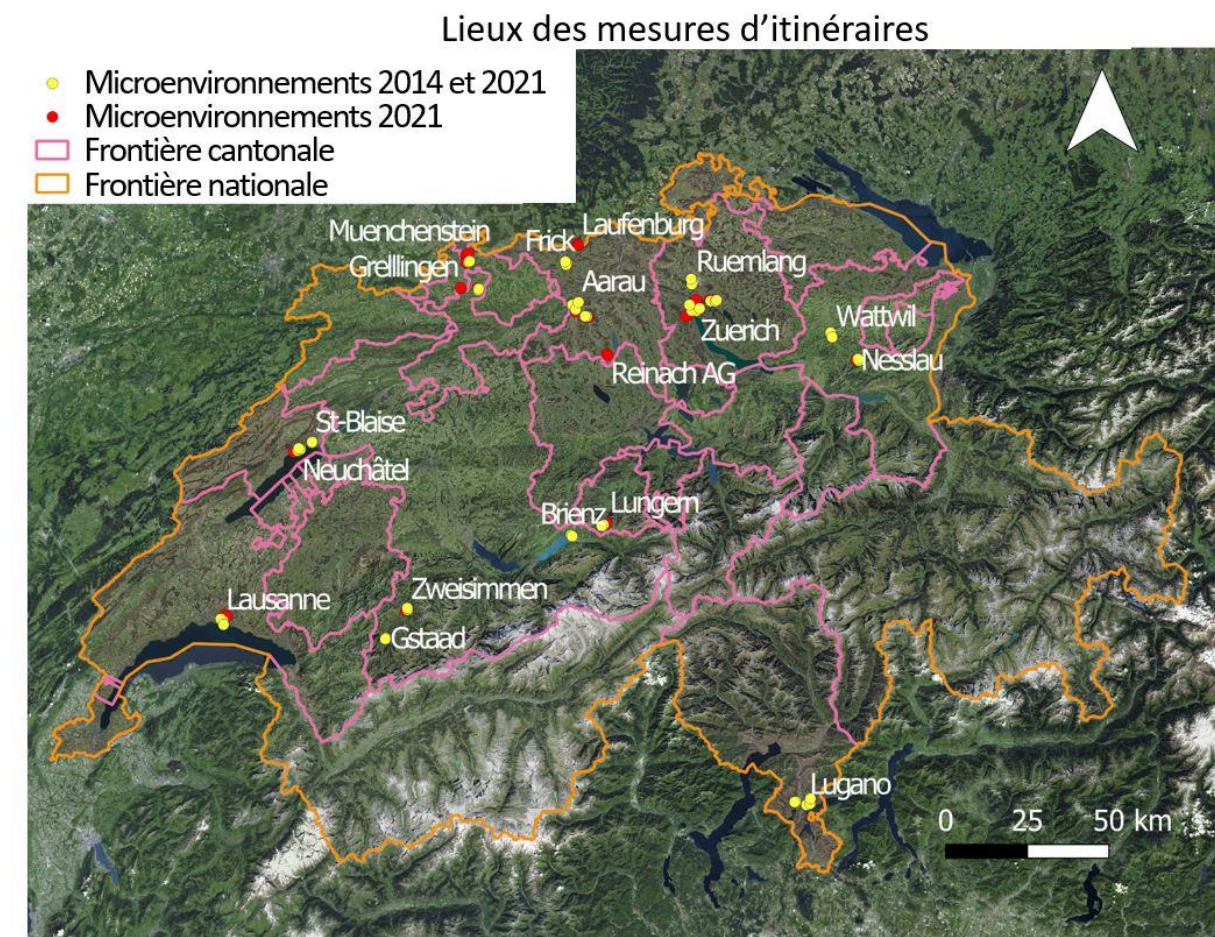


Figure 15: Carte des emplacements des mesures d'itinéraires effectuées en 2014 et 2021. Source : <https://wmnts.geo.admin.ch>

Le Tableau 7 montre le nombre total de points de mesure RMS enregistrés avec une durée de mesure d'au moins 5 minutes par environnement de mesure, la durée de mesure et le nombre d'environnements mesurés pour chaque type d'environnement de mesure pour l'appareil RF. Le nombre exact de points de mesure diffère légèrement entre l'appareil RF pour les valeurs de crête et l'appareil ELF, car les appareils ne peuvent pas être activés et désactivés exactement en même temps.

Une liste des communes visitées avec leur classification typologique OFS et les microenvironnements qui y sont définis se trouve dans le Tableau 8.

Tableau 7: Nombre de points de mesure RMS avec une durée de mesure d'au moins 5 minutes, temps de mesure et micro-environnements mesurés par type de micro-environnements pour l'appareil RF.

	Type de microenvironnement / type d'environnement de mesure	Points de mesure	Durée de la mesure	Environnements mesurés
1	Train	17994	29:59:24	62
2	Tram	501	00:50:06	5
3	Bus	1098	01:49:48	11
4	Metro	105	00:10:30	1
5	Télécabine	439	00:43:54	2
6	Centre d'une grande ville	977	01:37:42	5
7	Quartier résidentiel central	1015	01:41:30	6
8	Quartier résidentiel décentralisé	1504	02:30:24	8
9	Centre-ville	2797	04:39:42	17
10	Quartier résidentiell	3413	05:41:18	20
11	Zone industrielle	1366	02:16:36	8
12	Zone de sport/loisirs	554	00:55:24	3
13	Zone agricole	633	01:03:18	3
14	Zone naturelle	940	01:34:00	5
15	Gare	1582	02:38:12	17
16	Arrêt de tramway	284	00:28:24	5
17	Arrêt de bus	544	00:54:24	7
18	Aéroport	174	00:17:24	1
19	Supermarché	670	01:07:00	5
20	Restaurants	4409	07:20:54	13
21	Musée	529	00:52:54	1
22	Campus universitaire (ETH/UNI/HES)	403	00:40:18	3
23	Bibliothèque	151	00:15:06	1

Une répartition détaillée du nombre d'environnements de mesure par type d'environnement et par commune d'implantation est disponible en annexe II pour les microenvironnements proprement dits et les espaces publics.

Tableau 8: Liste des communes visitées, le nombre N de microenvironnements visités et leur classification typologique OFS (Office fédéral de la statistique, 2012).

Commune		N	Typologie des communes selon l'OFS
Aarau	GT	5	Ville-centre d'une agglomération de taille moyenne (121)
Bioggio	TI	2	Commune urbaine d'emploi d'une agglomération de taille moyenne (122)
Brienz (BE)	BE	2	Commune touristique d'un centre rural (314)
Dübendorf	ZH	5	Commune urbaine d'emploi d'une grande agglomération (112)
Frick	GT	3	Commune industrielle d'un centre rural (316)
Gränichen	GT	3	Commune résidentielle urbaine d'une agglomération de taille moyenne (123)
Grellingen	BL	2	Commune industrielle périurbaine de moyenne densité (226)
Saanen	BE	2	Commune touristique d'un centre rural (314)
Laufenburg	GT	3	Commune industrielle rurale située au centre (326)
Lausanne	VD	5	Ville-centre d'une grande agglomération (111)
Lugano	TI	3	Ville-centre d'une agglomération de taille moyenne (121)
Lungern	BE	3	Commune rurale périphérique mixte (338)
Münchenstein	BL	6	Commune urbaine d'emploi d'une grande agglomération (112)
Nesslau	SG	3	Commune rurale et centrale de services (327)
Neuchâtel	NE	4	Ville-centre d'une agglomération de taille moyenne (121)
Reinach (AG)	GT	2	Commune industrielle urbaine d'une petite agglomération ou en dehors d'une agglomération (136)
Rümlang	ZH	3	Commune industrielle périurbaine à haute densité (216)
Seewen	BL	3	Commune périurbaine de services à faible densité (237)
Saint-Blaise	NE	2	Commune résidentielle urbaine d'une agglomération de taille moyenne (123)
Wattwil	SG	3	Commune industrielle urbaine d'une petite agglomération ou en dehors d'une agglomération (136)
Zurich	ZH	8	Ville-centre d'une grande agglomération (111)
Zweisimmen	BE	3	Commune rurale périphérique mixte (338)

### 3.1.2 Exposition aux HF

La distribution des valeurs moyennes de l'exposition totale aux HF par type d'environnement de mesure pour tous les points de mesure est présentée dans la Figure 16 (moyenne des valeurs efficaces RMS) et dans la Figure 17 (valeur moyenne des valeurs de pic), les valeurs moyennes étant calculées comme dans la section 2.4.3 décrites ci-dessus sont calculées avec la densité de flux de puissance. Les valeurs moyennes pour chaque type d'environnement de mesure sont calculées en moyenne par environnement de mesure et ne prennent en compte que les mesures d'une durée d'au moins 5 minutes. Les expositions moyennes sont toutes inférieures à 0,67 V/m (valeurs efficaces RMS). Les valeurs ont tendance à être plus élevées à proximité des transports publics (gare, arrêts de bus, aéroport) ainsi que dans les zones industrielles, sportives et de loisirs. Par rapport à la variabilité au sein du même type d'environnement de mesure, les différences entre les environnements de mesure sont plutôt faibles. En ce qui concerne les valeurs de pic, on observe un schéma similaire, simplement à un niveau plus élevé. La moyenne des valeurs de pic se situe au maximum à 4,2 V/m (arrêt de tram). Les dispersions des valeurs mesurées sur l'ensemble des mesures pour les valeurs RMS et de pic (sans agrégation par environnement de mesure) peuvent être consultées aux Figure 18 et Figure 19.

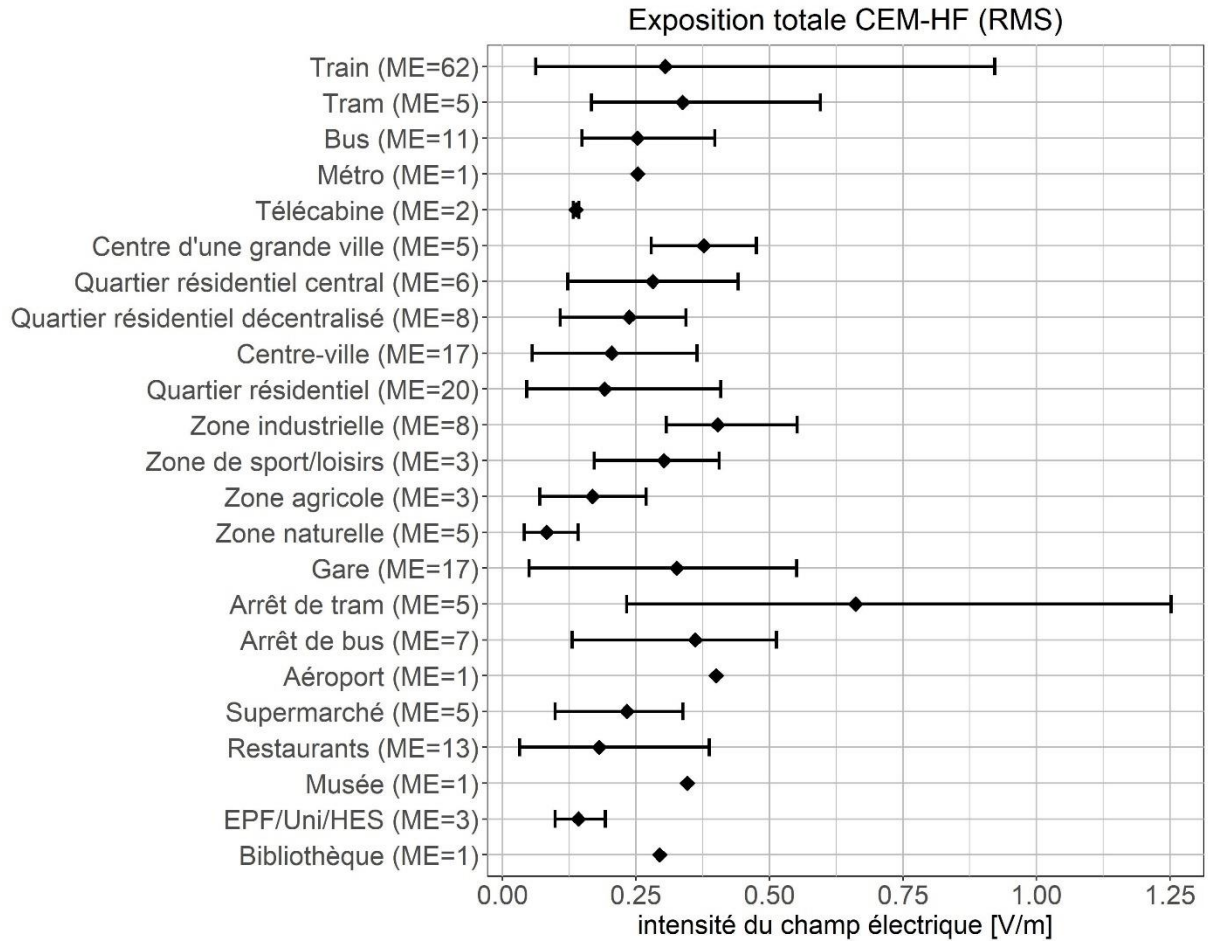


Figure 16: Comparaison des mesures RMS CEM-HF des différents environnements de mesure. Le losange indique la valeur moyenne de toutes les mesures par type d'environnement de mesure. L'étendue montre la valeur moyenne la plus basse et la plus haute pour chaque environnement de mesure. "ME" désigne le nombre d'environnements de mesure inclus.



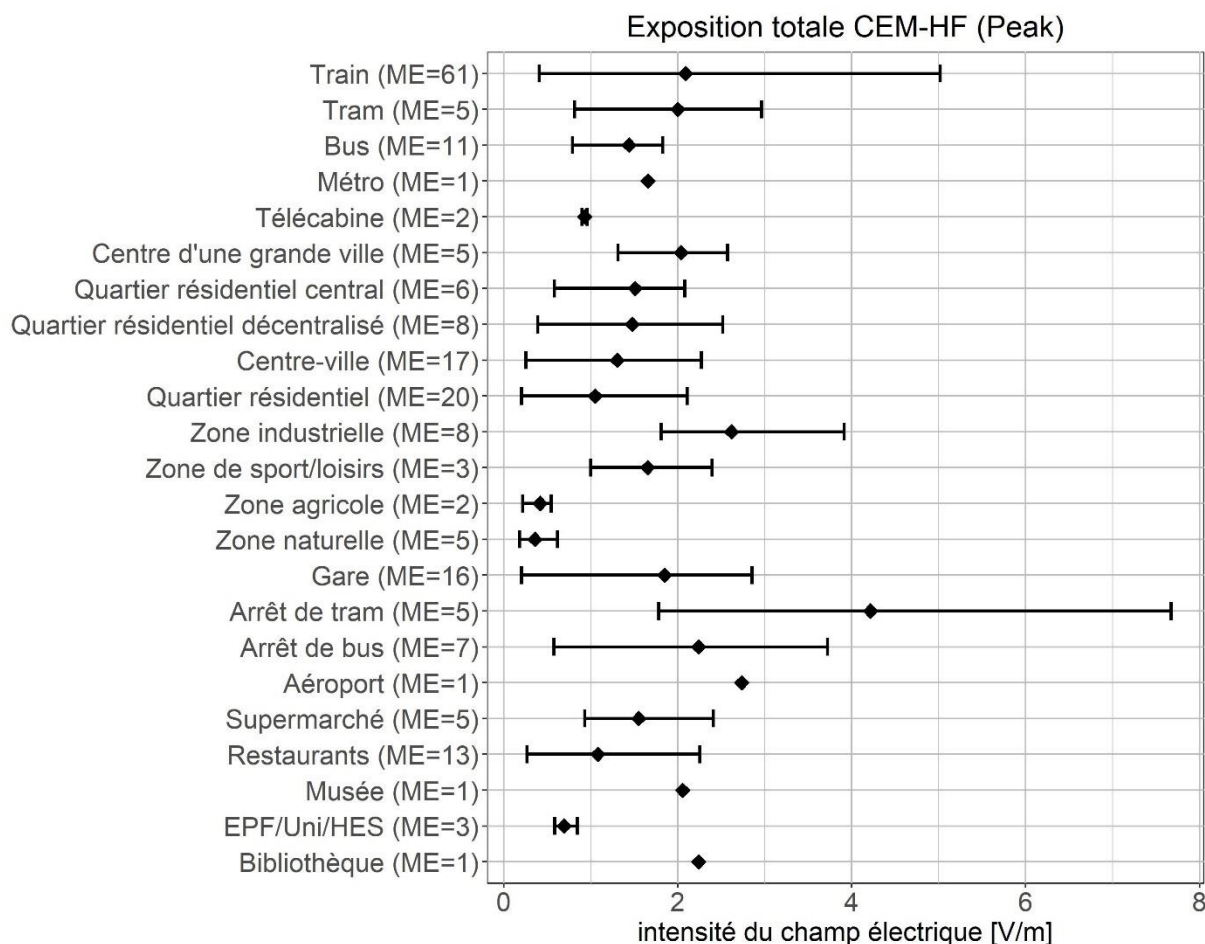


Figure 17: Comparaison des mesures de pic CEM-HF des différents environnements de mesure. Le losange indique la valeur moyenne de toutes les mesures par type d'environnement de mesure. L'étendue montre la valeur moyenne la plus basse et la plus haute pour chaque environnement de mesure. "ME" désigne le nombre d'environnements de mesure inclus.



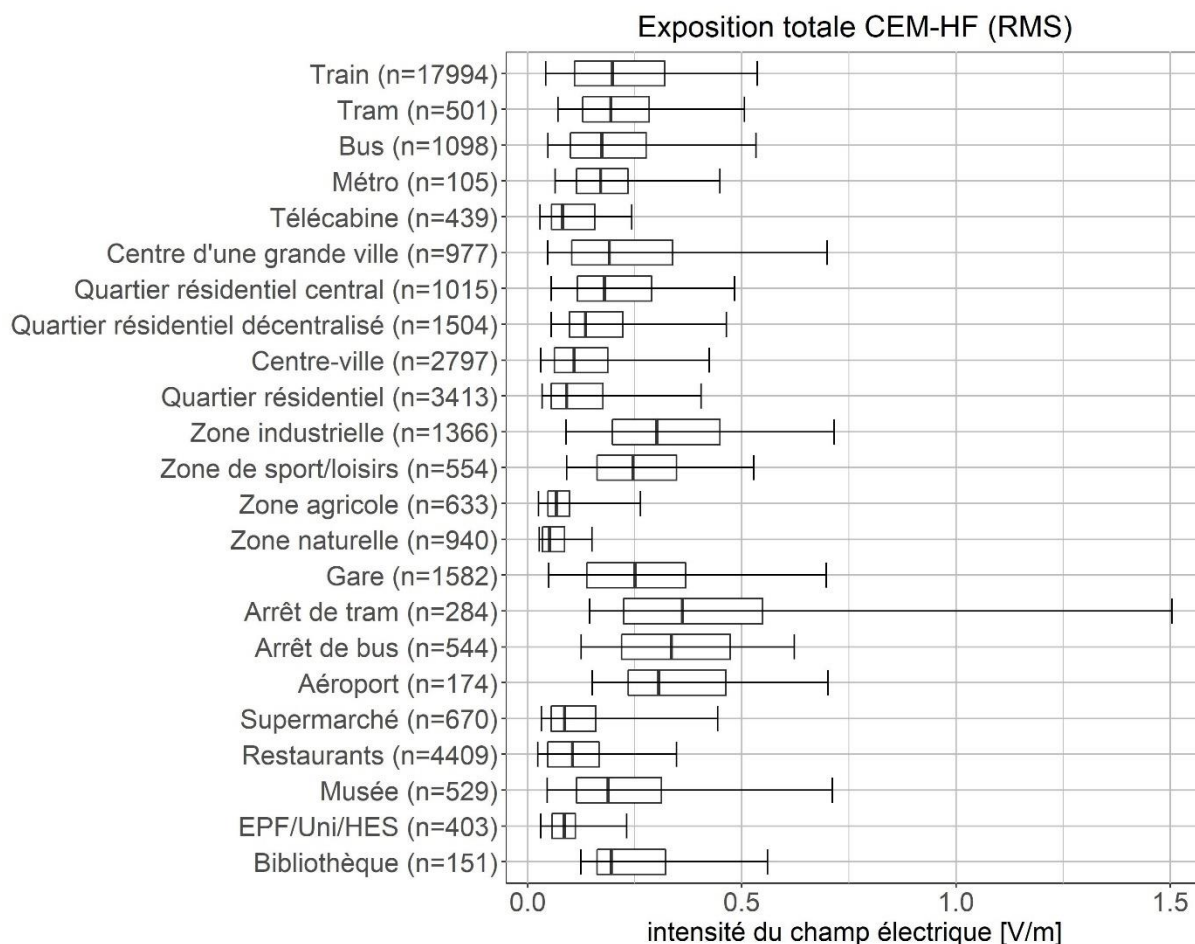


Figure 18: Dispersion des mesures RMS CEM-HF des différents environnements de mesure. La ligne centrale indique la médiane, les boîtes les 25e et 75e percentiles et la zone les 5e et 95e percentiles par type d'environnement de mesure. "n" indique le nombre de points de données par type d'environnement de mesure.

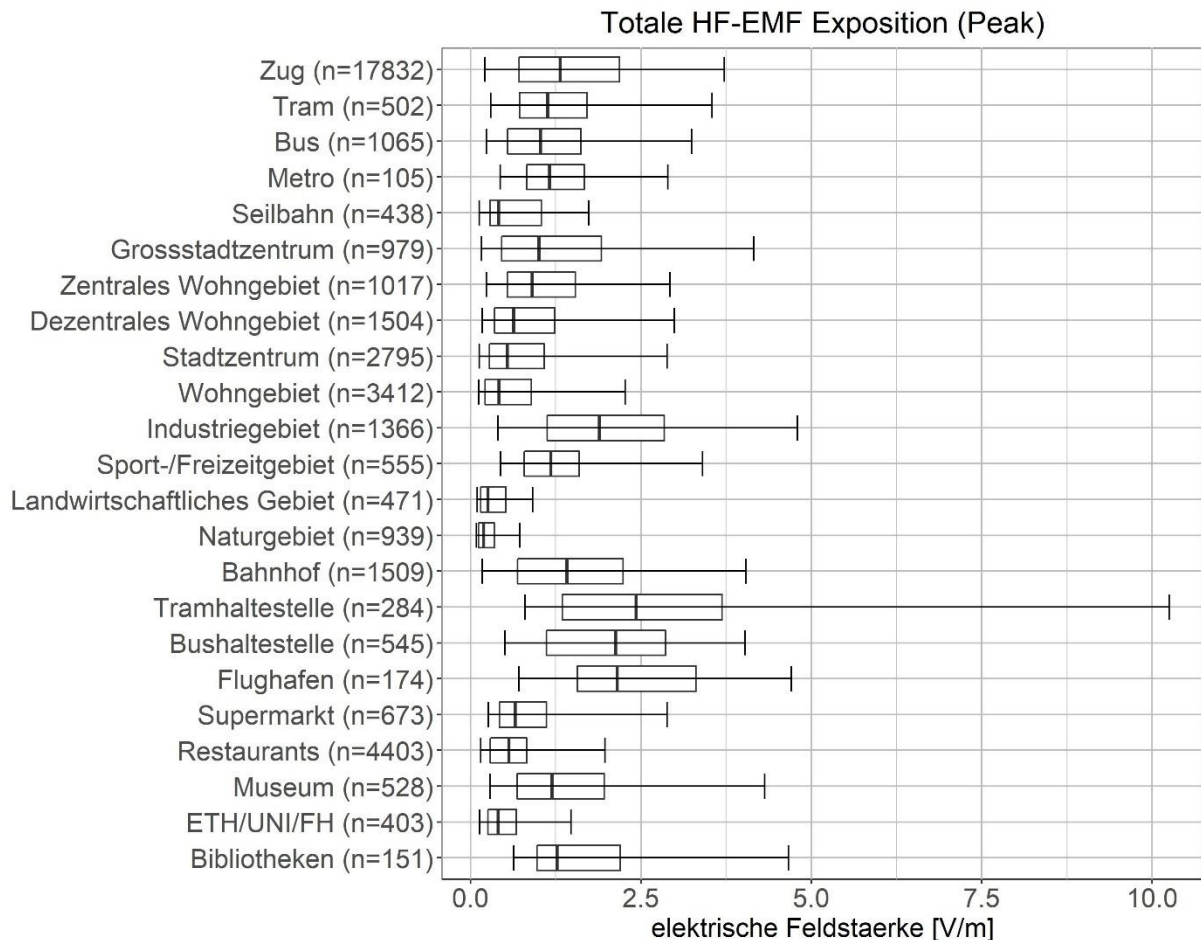


Figure 19: Dispersion des mesures CEM-HF de pic des différents environnements de mesure. La ligne centrale représente la médiane, les boîtes les 25e et 75e percentiles et la zone les 5e et 95e percentiles par type d'environnement de mesure. "n" désigne le nombre de points de données par type d'environnement de mesure.

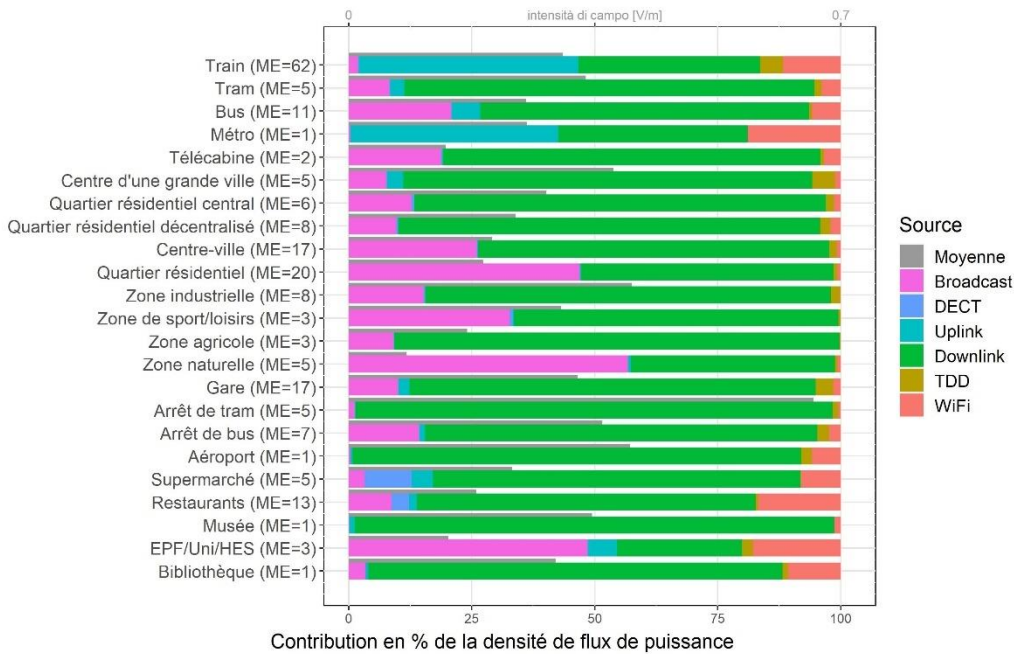
### 3.1.3 Exposition aux HF par type de source

La contribution des différentes sources de CEM dans l'exposition totale aux HF est représentée ci-dessous, répartie par environnement de mesure. La Figure 20 représente les contributions A) des valeurs RMS et B) des valeurs de pic. Pour la représentation, les valeurs moyennes par environnement de mesure ont d'abord été calculées à partir des données de mesure, puis la moyenne a été calculée par type d'environnement de mesure sur les différents environnements de mesure. Seules les mesures d'une durée d'au moins 5 minutes dans le même environnement de mesure ont été prises en compte. Pour la majorité des environnements de mesure, la principale source d'exposition est le "downlink" (antennes de téléphonie mobile). Pour le métro, la source d'exposition principale est la "liaison montante" (téléphones mobiles) et pour les zones naturelles et les universités, c'est la "radiodiffusion".

L'annexe III présente, à titre d'exemple pour les données de mesure RMS CEM-HF, des caractéristiques statistiques sur les valeurs de mesure saisies selon le type d'environnement de mesure et les catégories de service (broadcast, uplink, downlink, TDD, WLAN) dans le Tableau 17 à Tableau 21.

A)

Contribution des différentes sources au CEM total à haute fréquence



B)

Contribution des différentes sources au CEM total à haute fréquence

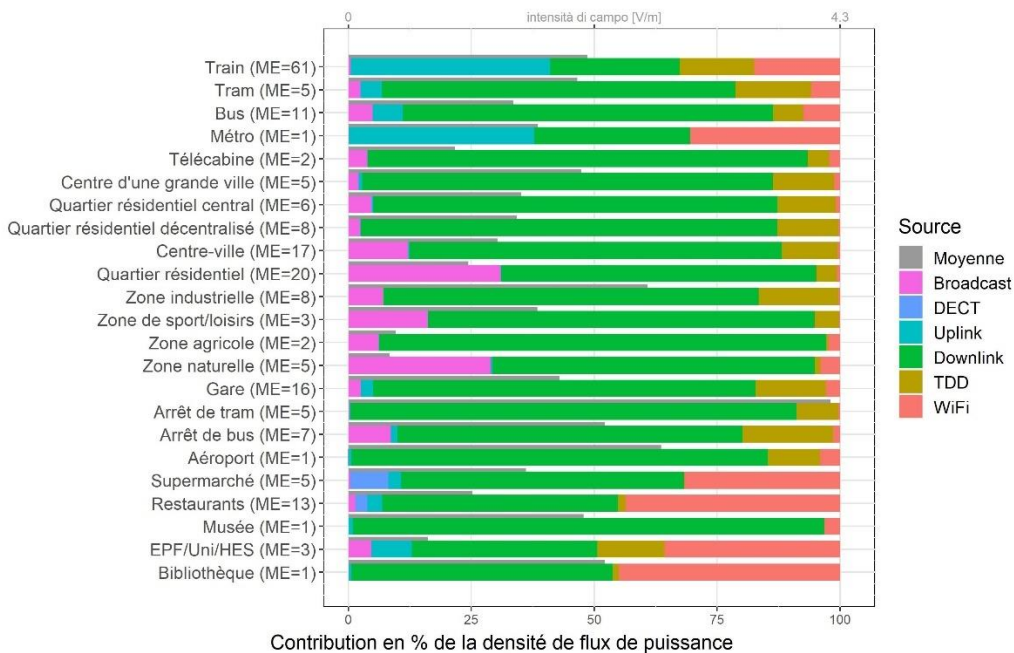


Figure 20: Axe des x inférieur : contribution des différentes sources de CEM par rapport à l'ensemble des CEM-HF, moyennée sur tous les points de mesure par type d'environnement de mesure : A) RMS. Valeurs RMS, B) Valeurs de pic. "ME" indique le nombre d'environnements de mesure avec une durée de mesure d'au moins 5 minutes. Axe supérieur des x : la moyenne correspond à la moyenne de l'ensemble des CEM-HF.

### 3.1.4 Exposition BF

La moyenne de la somme des trois principales sources d'exposition aux CM-BF (courant ferroviaire, courant domestique, courant des tramways) et des harmoniques correspondantes a été calculée pour chaque type d'environnement de mesure et présenté dans la Figure 21. Les valeurs moyennes pour chaque type d'environnement de mesure sont calculées en moyenne par environnement de mesure et ne prennent en compte que les mesures d'une durée d'au moins 5 minutes. L'exposition moyenne la plus élevée aux CM-BF a été mesurée avec une moyenne de 1.20  $\mu\text{T}$  dans les trains, suivis des gares, des arrêts de bus et de tram et du tram. La dispersion des valeurs mesurées sur l'ensemble des mesures pour l'exposition aux BF (sans agrégation par environnement de mesure) peut être consultée dans la figure 22.

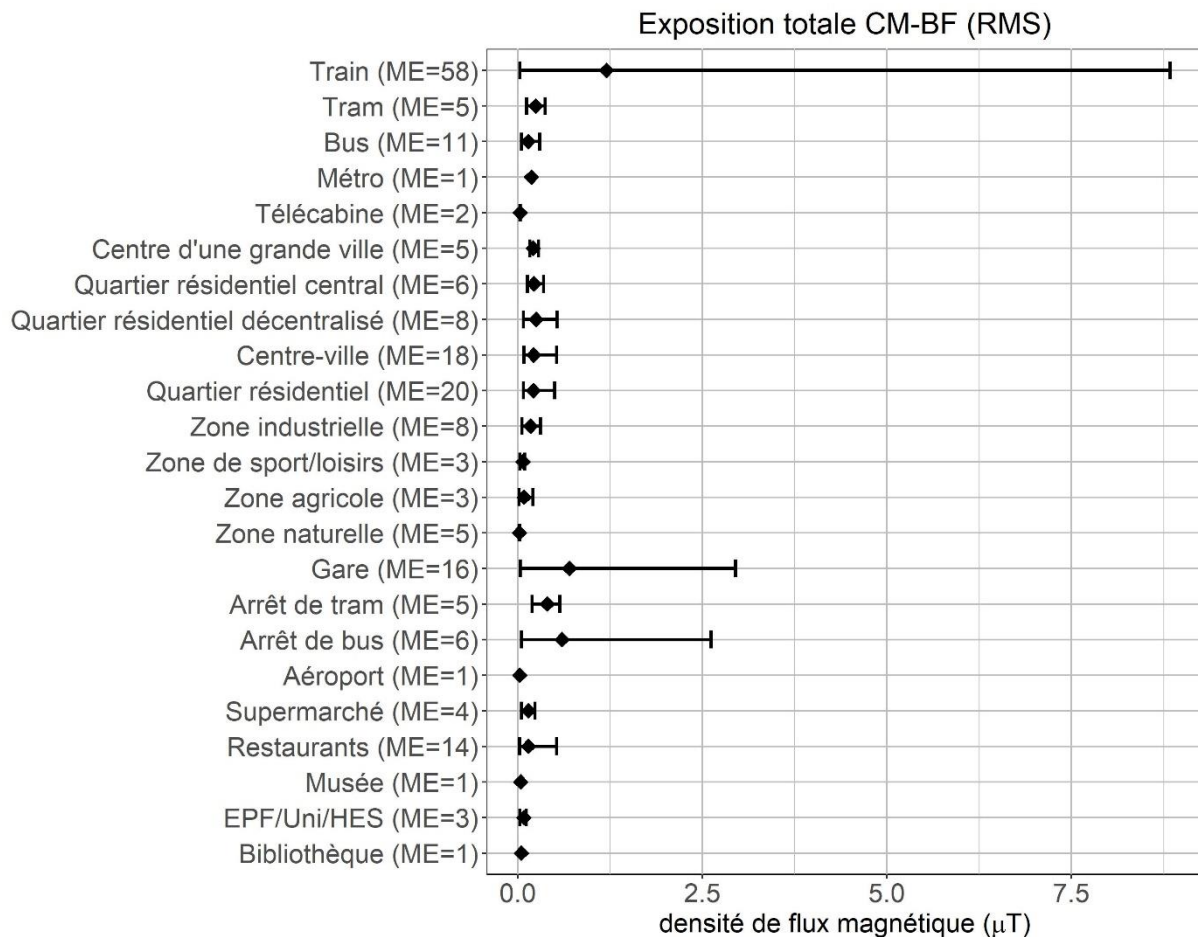


Figure 21: Comparaison des mesures de CM-BF par environnements de mesure. Le losange indique la valeur moyenne de toutes les mesures par type d'environnement de mesure. L'étendue montre la valeur moyenne la plus basse et la plus haute pour chaque environnement de mesure. "ME" désigne le nombre d'environnements de mesure inclus.

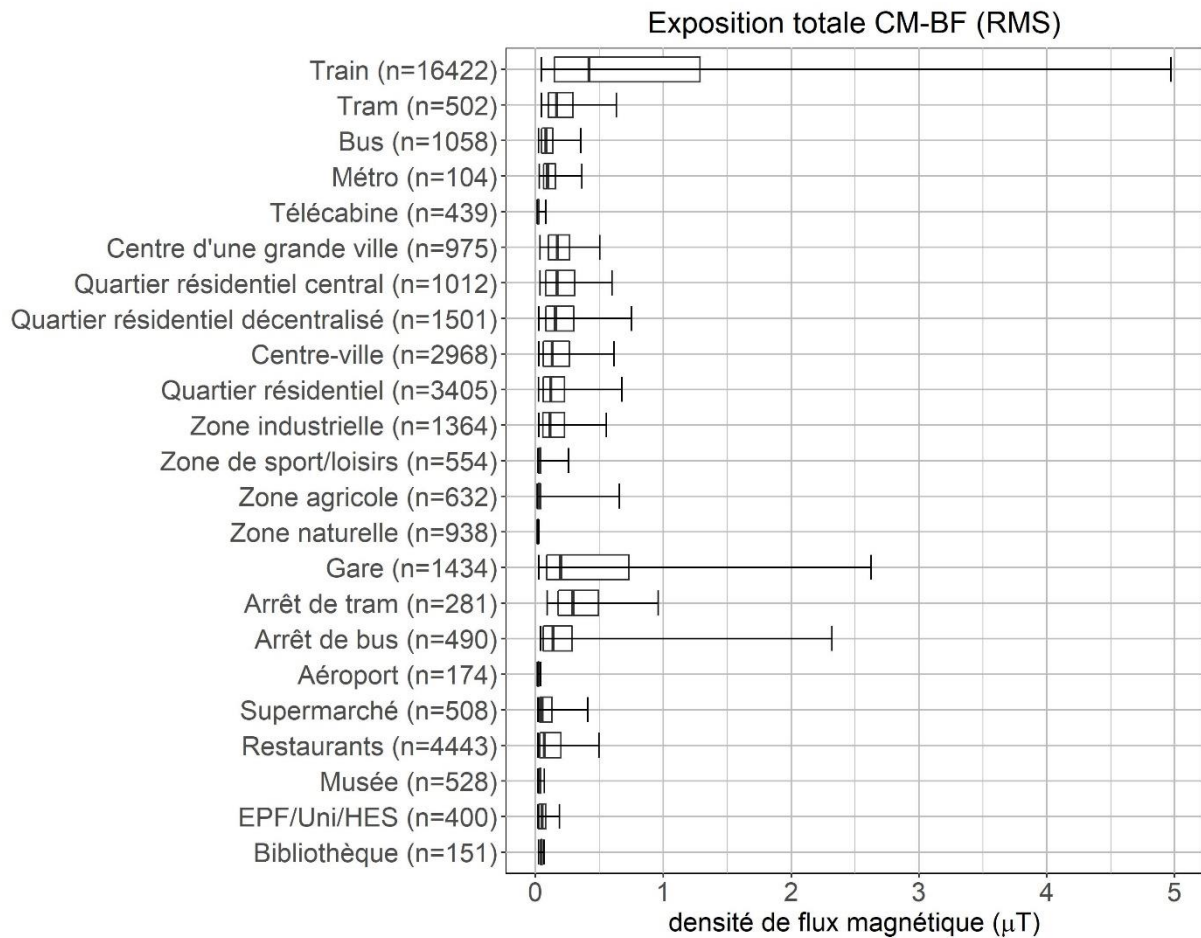


Figure 22: Dispersion des mesures CM-BF pour différents environnements de mesure. La ligne centrale représente la médiane, les boîtes les 25e et 75e percentiles et la zone les 5e et 95e percentiles par type d'environnement de mesure. "n" désigne le nombre de points de données par type d'environnement de mesure.

En comparant la Figure 21 avec Figure 22 on remarque que la valeur moyenne la plus élevée d'une mesure dans un train est supérieure au 95e percentile de toutes les valeurs mesurées dans les trains. Cela s'explique par le fait qu'une séquence de mesure relativement courte avec une intensité de champ élevée dans un train est certes représentée par une valeur moyenne élevée dans la Figure 21 mais se situe dans l'ensemble des mesures au-dessus du 95e percentile et n'est donc pas représentée dans la Figure 22. Cela peut être le cas lors d'un court trajet en RER, qui présente une part importante de phases d'accélération et de freinage.



### 3.1.5 Exposition BF par type de source

La Figure 23 représente la part des différentes sources de CEM dans l'exposition aux BF, répartie par environnement de mesure. Pour la représentation, les valeurs moyennes par environnement de mesure ont d'abord été calculées à partir des données de mesure, puis la moyenne a été calculée par type d'environnement de mesure sur les différents environnements de mesure.

Comme l'accès aux mesures d'itinéraires s'est fait exclusivement par les transports publics, certains des types d'environnement de mesure mentionnés se trouvaient proportionnellement plus souvent à proximité des gares (p. ex. arrêts de bus ou restaurants). Par conséquent, ces types d'environnement de mesure présentent en moyenne une part de courant ferroviaire plus élevée que celle à laquelle on pourrait s'attendre si les sites de mesure étaient choisis de manière totalement aléatoire.

Contribution des différentes sources au CEM total à basse fréquence

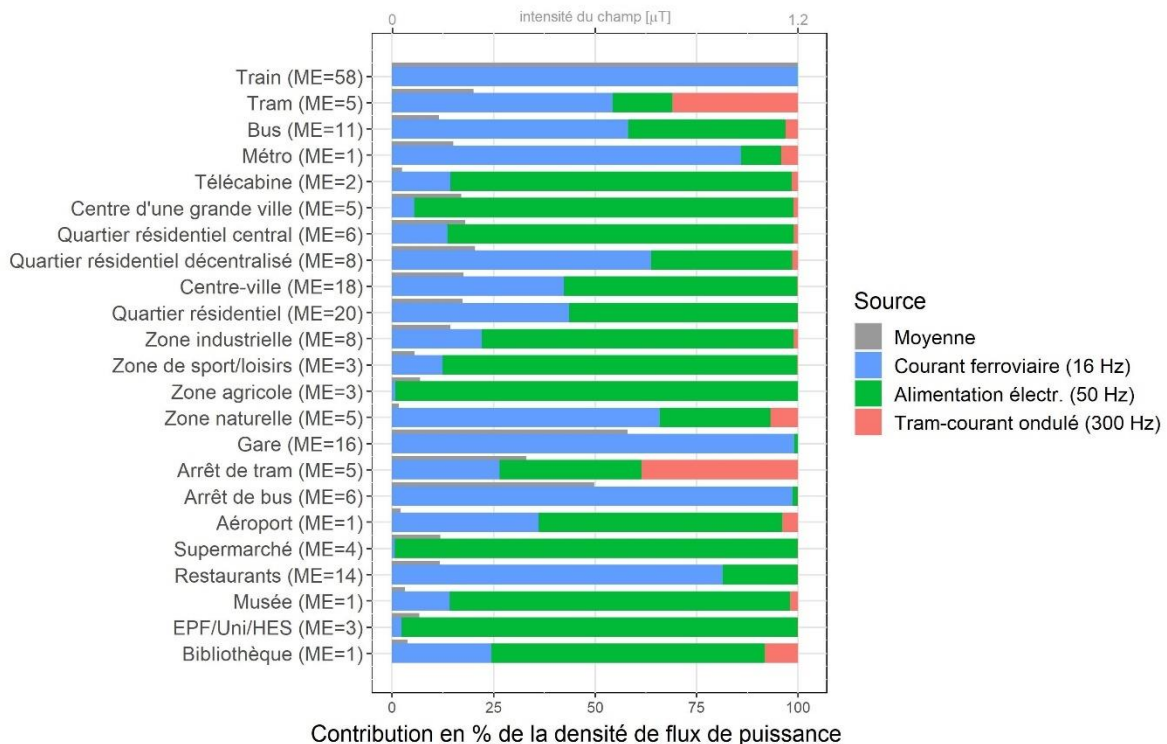


Figure 23: Axe des X inférieur : part des différentes sources de CEM par rapport à l'ensemble des CM-BF (RMS), moyennée sur tous les points de mesure par type d'environnement de mesure. "ME" indique le nombre d'environnements de mesure avec une durée de mesure d'au moins 5 minutes. Axe des x supérieur : la somme correspond à la moyenne des CM-BF totales provenant des sources.

### 3.1.6 Exploitation de la valeur limite d'immissions

L'exploitation de la valeur limite d'immissions (VLI), calculée conformément à la prescription de sommation de l'ORNI, est représenté dans la Figure 24 pour les points de mesure d'une durée d'au moins 6 minutes. Pour les données RMS HF, une moyenne quadratique mobile de 6 minutes a été calculée pour chaque mesure. L'exploitation de la VLI sur toutes les bandes de fréquence a ensuite été calculée pour chaque moment de mesure. Afin de représenter la dispersion statistique de l'exploitation de la valeur limite, aucun autre regroupement n'a été effectué par environnement de mesure ou source

de RNI, c'est-à-dire que les moments de mesure sont inclus individuellement dans le graphique. Alors que pour les données HF, les mesures comportant moins de 6 min de données de mesure ont été filtrées, pour les données BF, toutes les mesures sont incluses, car l'ORNI ne prévoit pas de calcul de moyenne pour ces fréquences.

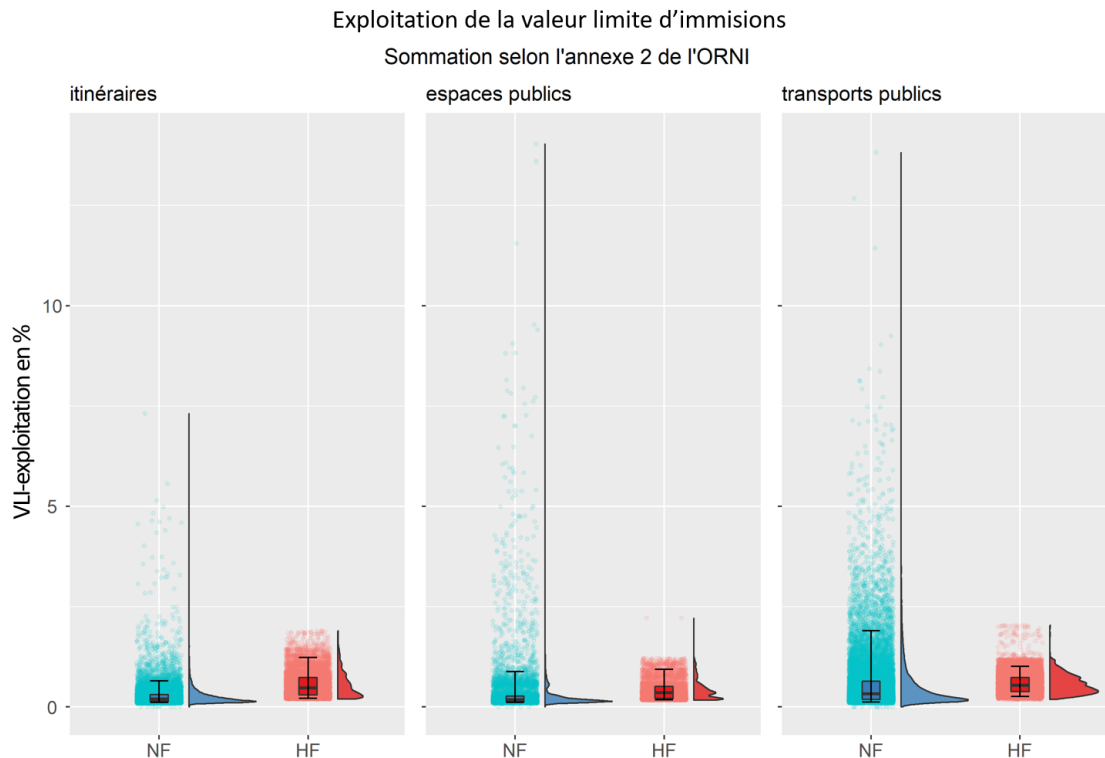


Figure 24: Distribution statistique de l'exploitation de la valeur limite d'immissions (VLI) sur les points de mesure avec une durée de mesure d'au moins 6 minutes par environnement de mesure (sans calcul de la moyenne). Les différentes fréquences ont été additionnées selon la règle de sommation (ORNI, annexe 2). Dans les diagrammes, les différentes valeurs mesurées (pour les BF) ou les différentes valeurs moyennes de 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 cases 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).

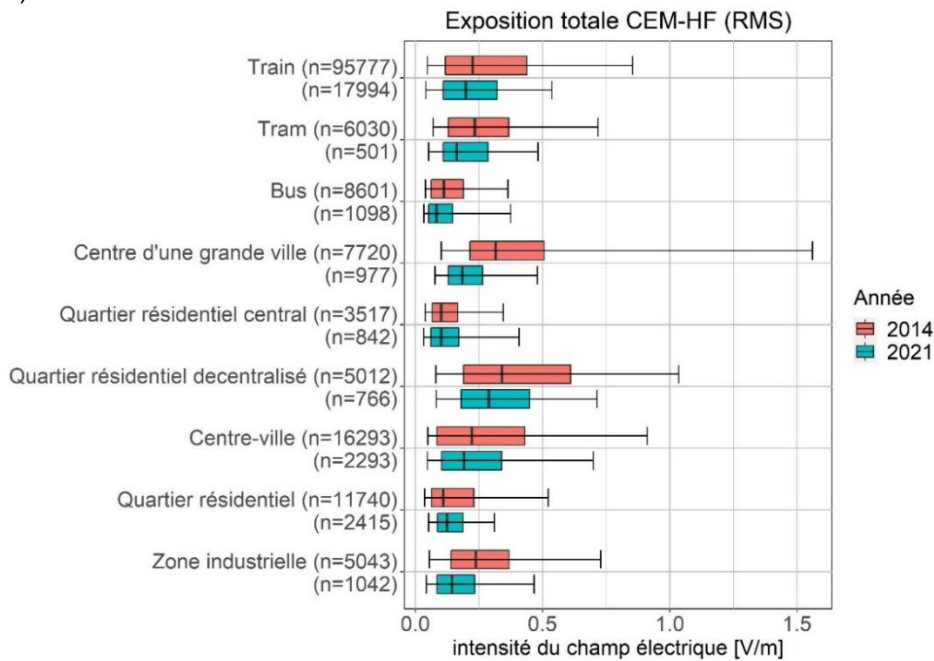
L'échelle du diagramme est limitée aux valeurs disponibles (utilisation maximale d'environ 15%) afin de rendre visible la structure des valeurs.

### 3.1.7 Comparaison avec les données de mesure de 2014

La Figure 25 montre une comparaison des mesures de 2021 avec celles de 2014 (Röösli M. F. M., 2015) dans les mêmes microenvironnements pour A) l'exposition totale et B) l'exposition aux CEM-HF de la téléphonie mobile. On remarque que les valeurs de 2021 sont inférieures à celles de 2014. La comparaison a été effectuée pour les CEM-HF totaux et pour la somme quadratique de toutes les bandes de fréquences de téléphonie mobile. Il convient de noter que, d'une part, il existe des différences dans les bandes de fréquences mesurées et que, d'autre part, davantage de bandes de fréquences sont utilisées aujourd'hui (2021) pour la téléphonie mobile qu'en 2014. La comparaison tient compte de toutes les fréquences de téléphonie mobile dans les données de 2021 afin de prendre en considération un éventuel déplacement de la puissance d'émission vers de nouvelles fréquences. Une

comparaison des bandes de fréquences mesurées lors des deux campagnes de mesure est disponible à l'annexe IV.

A)



B)

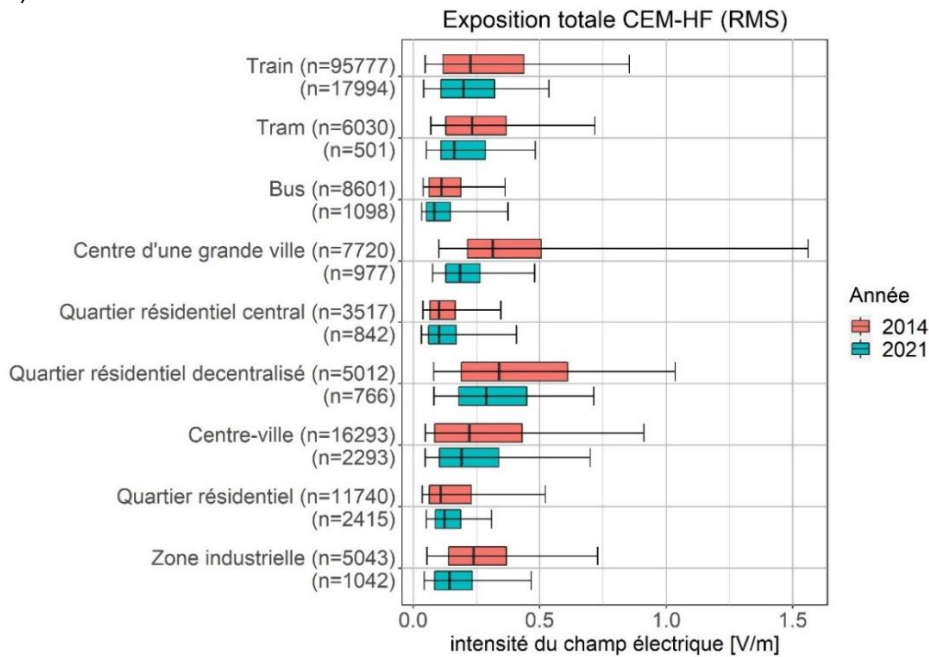


Figure 25: Comparaison des A) totaux B) exposition aux CEM-HF de téléphonie mobiles par type d'environnement de mesure pour les mesures de 2021 avec les mesures de 2014. La ligne médiane indique la médiane, les boîtes les 25e et 75e percentiles et la zone les 5e et 95e percentiles par type d'environnement de mesure. "n" indique le nombre de points de données par type d'environnement de mesure.

### 3.2 Mesures spot

Jusqu'à la rédaction du rapport (état au 18 mars 2022), 4 mesures ponctuelles ont pu être réalisées. La base de données ne permet donc pas encore de tirer des conclusions sur la répartition statistique de la pollution dans les logements. Les illustrations présentées correspondent aux données de mesure actuellement disponibles et seront actualisées au fur et à mesure de l'élargissement de la base de données.

#### 3.2.1 Exposition totale aux HF

La dispersion des valeurs mesurées sur l'ensemble des mesures (sans agrégation par site de mesure) est illustrée dans la Figure 26 (valeurs efficaces RMS) et la Figure 27 (valeurs de pic). Les données sont regroupées selon la source de RNI déterminante et la mesure partielle spot.

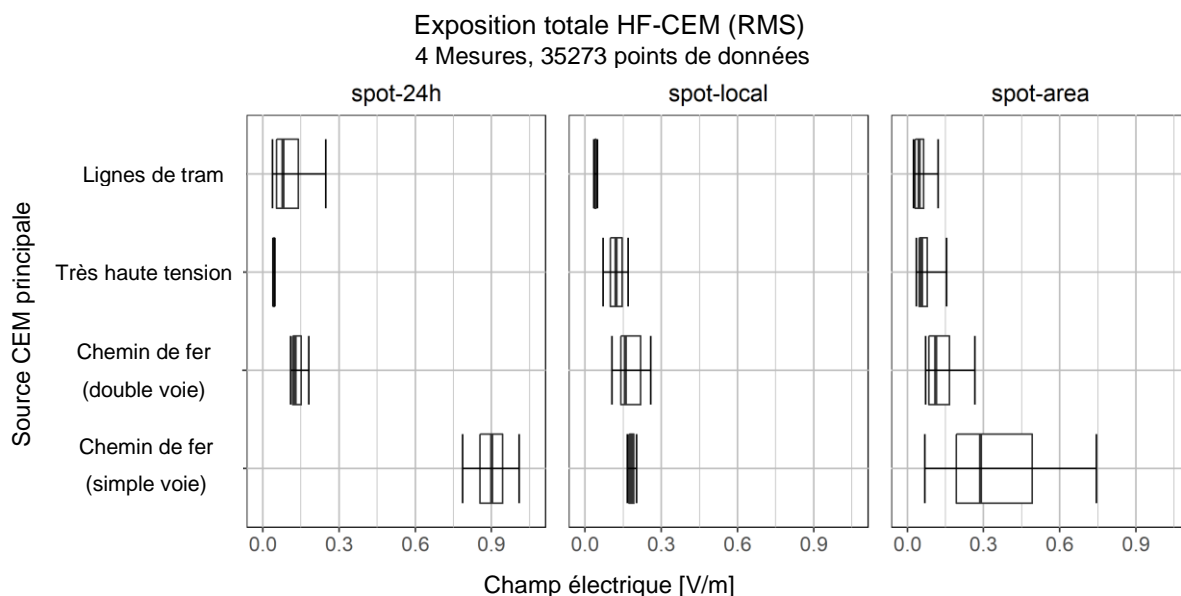


Figure 26: Dispersion des valeurs RMS CEM-HF des mesures spot, répartie par mesure partielle (24h, local, area) et par source primaire de CEM dans les environs du site de mesure. La ligne centrale indique la médiane, les boîtes les 25e et 75e percentiles et la zone les 5e et 95e percentiles.

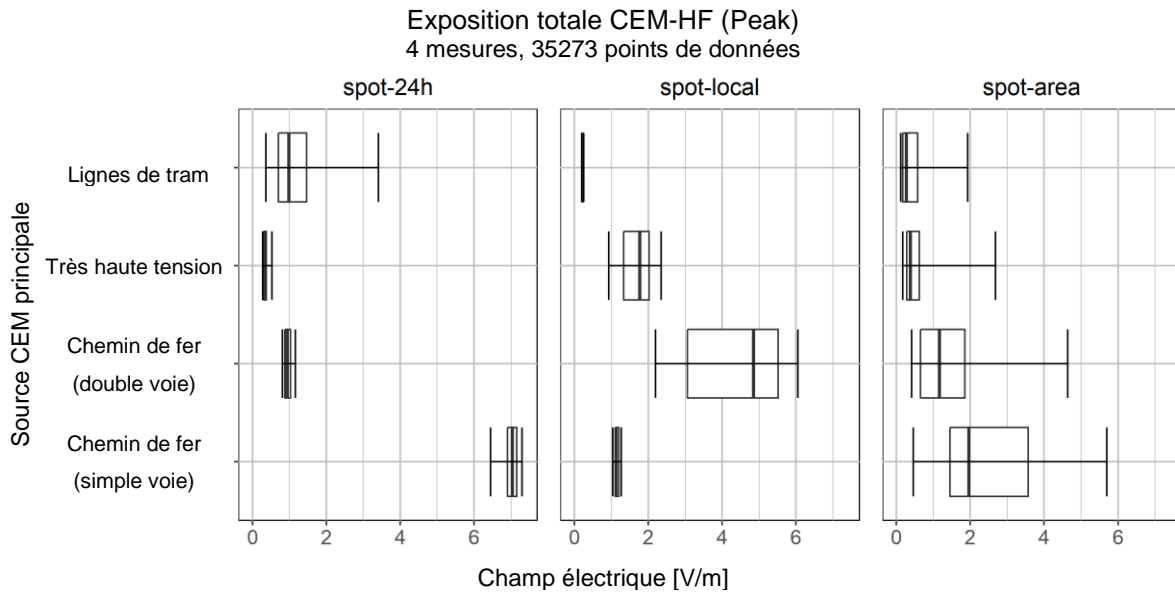


Figure 27: Dispersion des valeurs de pic des CEM-HF des mesures spot, répartie en fonction des mesures partielles (24h, local, area) et de la source primaire de CEM dans les environs du site de mesure. La ligne centrale indique la médiane, les boîtes les 25e et 75e percentiles et la zone les 5e et 95e percentiles.

### 3.2.2 Exposition totale aux BF

La dispersion des valeurs mesurées sur l'ensemble des mesures (sans agrégation par site de mesure) est illustrée dans la Figure 28. Les données sont regroupées selon la source de RNI déterminante et les 3 volets de mesure spot.

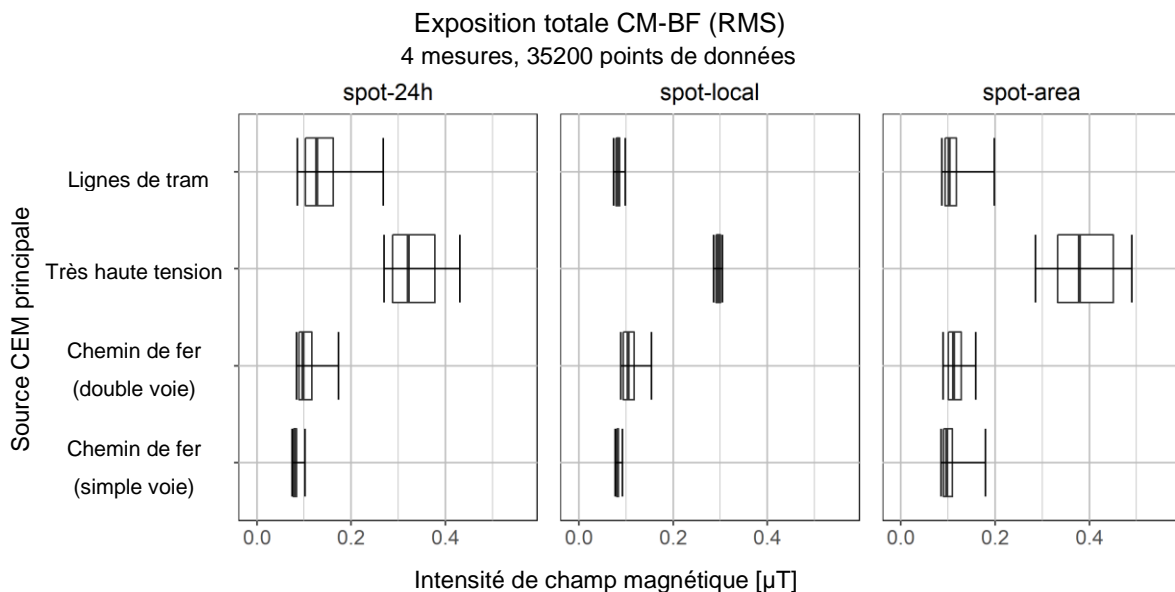


Figure 28: Dispersion des valeurs RMS CM-BF des mesures spot, réparties par volet de mesure (24h, local, area) et par source primaire de CEM dans les environs du site de mesure. La ligne centrale indique la médiane, les boîtes les 25e et 75e percentiles et la zone les 5e et 95e percentiles.



### 3.2.3 Exposition aux HF par type de source

La part des différentes sources de CEM dans l'exposition totale aux HF est représentée ci-dessous, répartie selon le type de source primaire qui a été déterminant pour le choix du site de mesure spot. La Figure 29 représente les proportions des valeurs RMS, et la Figure 30 représente les proportions des valeurs de pic. Pour la représentation, les valeurs moyennes ont d'abord été calculées par mesure à partir des données de mesure, puis la moyenne a été calculée par type de source primaire sur les différentes mesures. Les valeurs moyennes sont calculées comme dans la section 2.4.3 décrites avec la densité de flux de puissance. Comme il n'existe actuellement qu'une seule mesure par type de source, les diagrammes à barres correspondent chacun à une mesure.

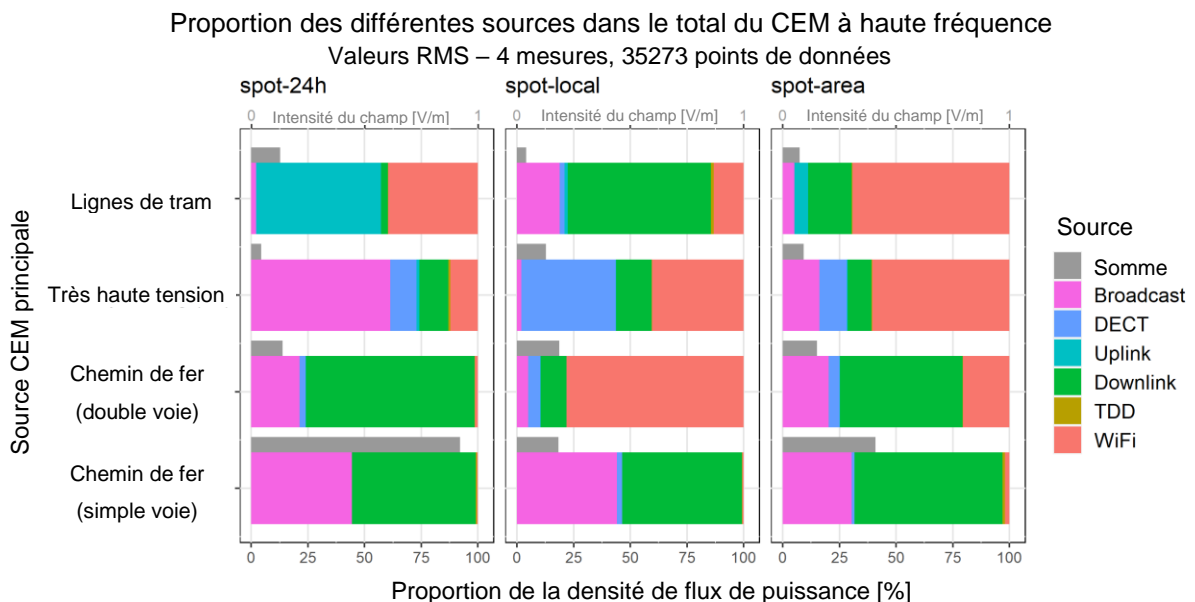


Figure 29: Axe des x inférieur : part des différentes sources pour le CEM-HF total (RMS), moyennée sur tous les points de mesure par mesure et répartie par volet de mesure (24h, local, area) et par source primaire de CEM dans l'environnement du site de mesure. Axe des x supérieur : la somme correspond à la valeur moyenne de l'ensemble des CEM-HF.

### Proportion des différentes sources dans le total du CEM à haute fréquence

Valeurs Peak – 4 mesures, 35273 points de données

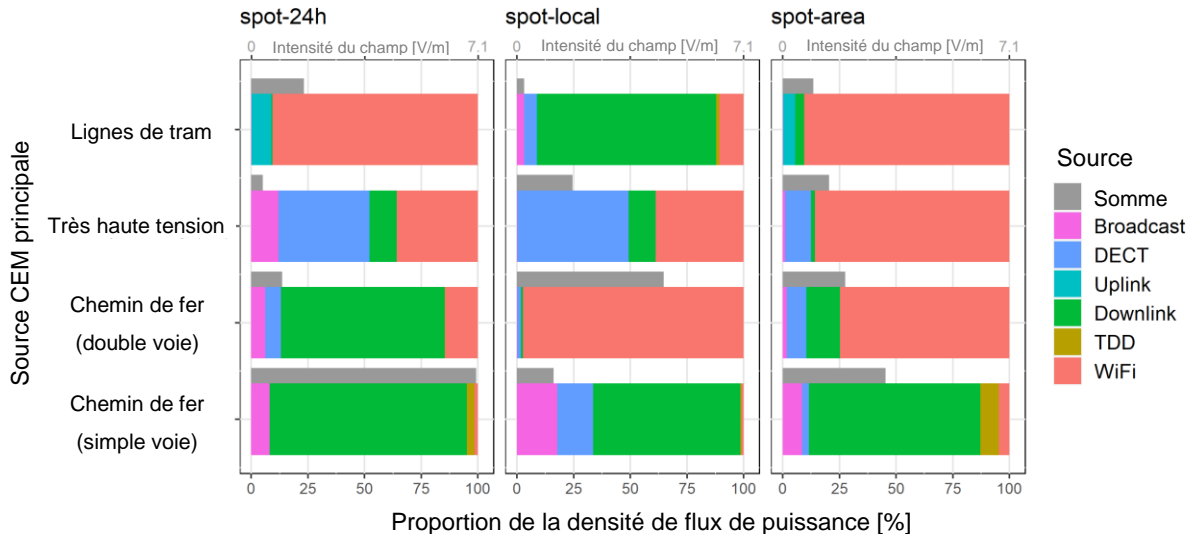


Figure 30: Axe des x inférieur : part des différentes sources pour le CEM-HF total (pic), moyenne calculée sur tous les points de mesure par mesure et répartie par volet de mesure (24h, local, area) et par source primaire de CEM à proximité du site de mesure. Axe x supérieur : la somme correspond à la valeur moyenne de l'ensemble des CEM-HF.

### 3.2.4 Exposition aux BF par type de source

La part des différentes sources de champ magnétique dans l'exposition totale aux BF est représenté dans la Figure 31, répartie selon le type de source primaire qui a été déterminant pour le choix du site pour la mesure spot. Pour la représentation, les valeurs moyennes par mesure ont d'abord été calculées à partir des données de mesure, puis la moyenne par type de source primaire a été calculée sur les différentes mesures. Comme il n'existe actuellement qu'une seule mesure par type de source, le diagramme à barres correspond à une mesure.

### Proportion des différentes sources dans le total du CEM à basse fréquence

Valeurs RMS – 4 Mesures, 35273 points de données

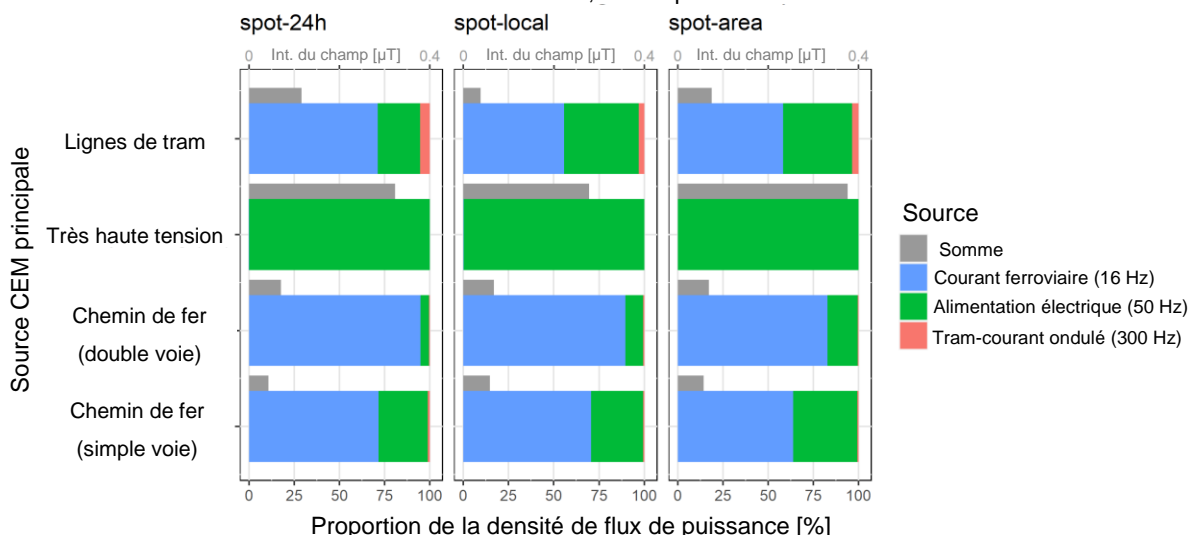


Figure 31: Axe des x inférieur : part des différentes sources dans les CEM totales (RMS), moyennée sur tous les points de mesure par mesure et répartie par volet de mesure (24h, local, area) et par source primaire de CEM dans les environs du site de mesure. Pour le courant domestique et le courant du tram, les deux premières harmoniques sont prises en compte en plus de la fréquence fondamentale. Axe x supérieur : la somme correspond à la valeur moyenne des CEM BF totaux provenant des sources.

### 3.2.5 Exploitation de la valeur limite d'immissions

L'exploitation de la valeur limite d'immissions, calculée conformément à la prescription de sommation de l'ORNI, est représentée dans la Figure 32 pour tous les points de données. Pour les données HF, une moyenne quadratique mobile de 6 minutes a été calculée pour chaque mesure. L'épuisement de la VLI a ensuite été calculé pour chaque moment de mesure sur toutes les bandes de fréquence. Afin de représenter la dispersion statistique de l'épuisement de la valeur limite, aucun autre regroupement n'a été effectué par lieu de mesure ou source de RNI, c'est-à-dire que tous les moments de mesure sont inclus individuellement dans le graphique.

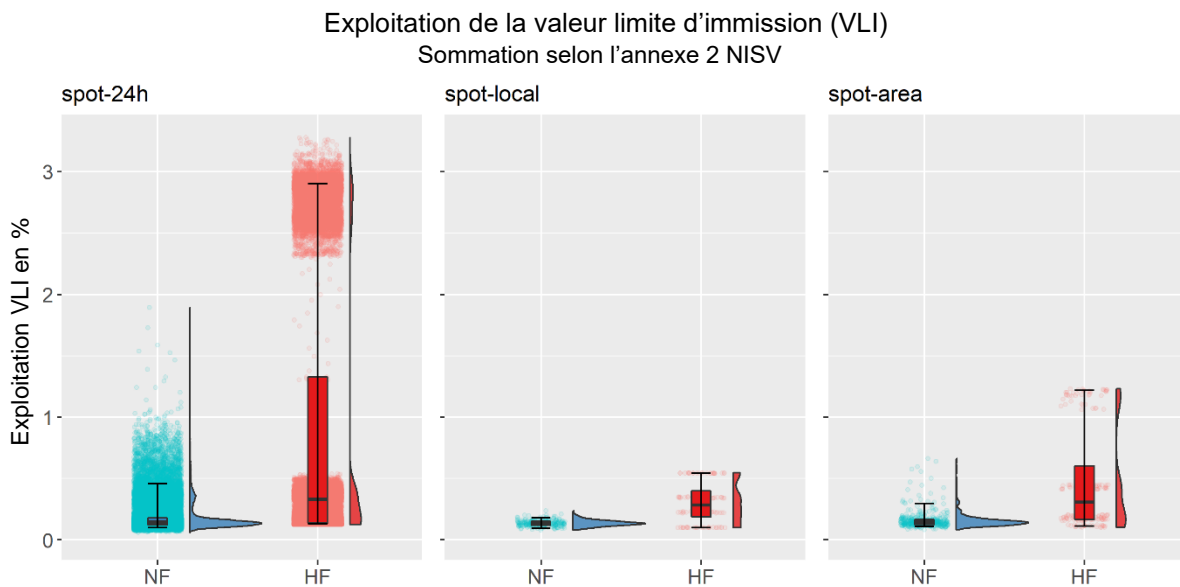


Figure 32: Répartition statistique de l'exploitation de la valeur limite d'immissions sur tous les points de mesure (sans calcul de la moyenne). Les différentes fréquences ont été additionnées selon la règle de sommation (ORNI, annexe 2). Dans les diagrammes, les différentes valeurs mesurées (pour les 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 centrale indique la médiane, les cases 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 (utilisation maximale d'environ 3%) afin de rendre visible la structure des valeurs.

### 3.2.6 Répartition des sites de mesure pour les mesures ponctuelles

La répartition des mesures spot effectuées avec l'état Q1/2022 et des propositions de sites concernant les sources de RNI déterminantes sont présentées dans le Tableau 9. Le Tableau 10 énumère

les types de bâtiments dans lesquels des mesures ponctuelles ont été effectuées. La Figure 33 indique l'emplacement des mesures ponctuelles effectuées en Suisse. Une liste complète de tous les sites de mesure, y compris les microenvironnements correspondants, est disponible dans l'annexe VI.

Tableau 9: Répartition des sites de mesure et propositions de sites pour les mesures spot avec indication des périmètres d'influence, état Q1/2022. Pour les lignes de chemin de fer dans les tunnels, aucun périmètre fixe n'a été défini pour des raisons de faisabilité.

Paramètres Source	Périmètre	Nombre Projet	Nombre Suggestions	Nombre mesuré
Téléphonie mobile petite	50	10	3	0
Téléphonie mobile moyenne	100	10	3	0
Téléphonie mobile grande	150	10	3	0
Radio/TV jusqu'à 10 kW	100	5	1	0
Radio/TV >10 à 50 kW	500	5	0	0
Radio/TV 50 à 200 kW	2000	5	0	0
Lignes à très haute tension 220 /380kV (lignes aériennes)	200	7	2	1
Lignes à très haute tension 220 /380 kV (ligne de terre)	50	3	0	0
Lignes à haute tension 36-150kV (lignes aériennes)	100	5	0	0
Lignes à haute tension 1-36kV (lignes aériennes)	50	5	0	0
Lignes à haute tension 240/400V (lignes aériennes)	20	5	0	0
Sous-stations	200	2	0	0
Postes de transformation	20	3	0	0
Lignes de chemin de fer à voie unique	50	7	4	1
Lignes de chemin de fer à double voie	100	10	4	1
Lignes de chemin de fer à double voie dans les tunnels	-	3	0	0
Lignes de tramway	20	5	1	1
<b>Total</b>		<b>100</b>	<b>21</b>	<b>4</b>

Tableau 10: Répartition des types de bâtiments pour lesquels des mesures spot ont été effectuées, situation au T1/2022.

Type de bâtiment	Nombre Mesures
Maison individuelle	2
Immeuble collectif	1
Avec commerce/industrie	0
Ferme	1



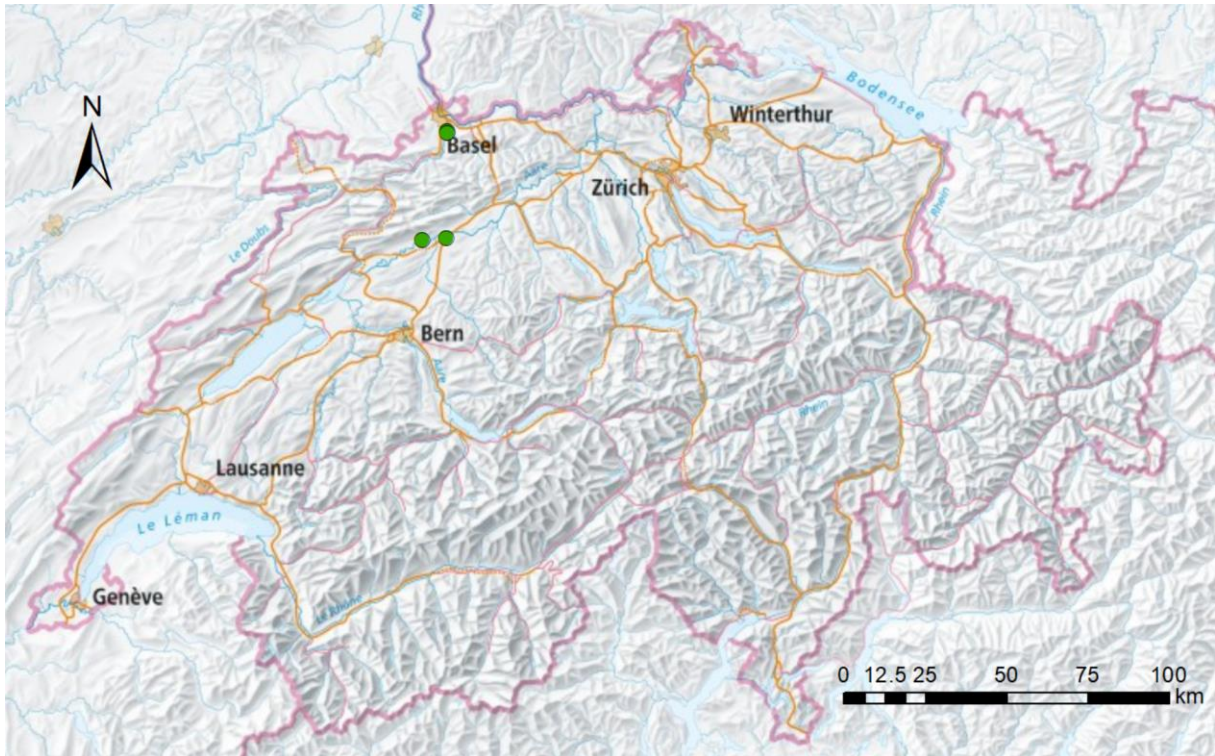


Figure 33: Carte des sites des mesures spot effectuées.

### 3.3 Mesures permanentes stationnaires

Pour les mesures stationnaires permanentes, une mesure test est actuellement en cours (état au 18.03.2022) sur le site de FaW à Zurich. Au cours du deuxième trimestre 2022, les premiers sites de mesure définitifs seront équipés des appareils de mesure pour les mesures fixes permanentes.

#### 3.3.1 Lieux de mesure Mesures permanentes stationnaires

Les sites de mesure où des mesures stationnaires permanentes sont effectuées sont indiqués dans le Tableau 11 et dans la Figure 34.

Tableau 11: Sites pour les mesures permanentes stationnaires.

Site de mesure	Commune d'implantation
Fields at Work - Centre ETH Bâtiment ET	8032 Zurich
Swiss TPH - nouveau bâtiment	4123 Allschwil
G+P - Aarau	5000 Aarau
G+P - Deitingen	4543 Deitingen
G+P - Neuchâtel	2000 Neuchâtel

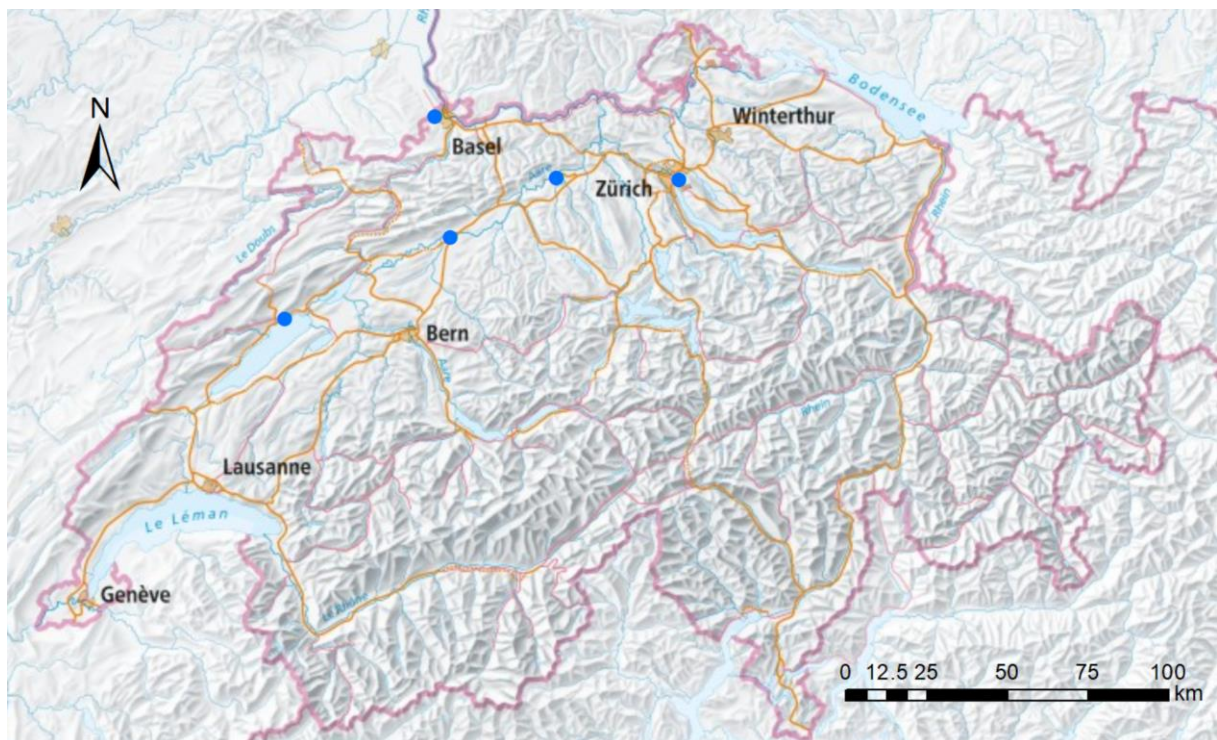


Figure 34: Carte des sites sélectionnés pour les mesures stationnaires permanentes (points bleus).

## 4. Discussion

L'élaboration du concept de mesure, l'établissement des méthodes de mesure et la mise en place de l'infrastructure de données de mesure constituaient les objectifs prioritaires pour 2021. Jusqu'à la rédaction du présent rapport, toutes les méthodes de mesure prévues ont permis de collecter des données (dans le cas des mesures stationnaires permanentes, seulement sur un site test). Au total, 453'959 points de mesure ont ainsi pu être enregistrés depuis le début de la campagne de mesure (état de la banque de données au 18.03.2022), ce qui correspond à un total de 15 millions de valeurs de mesure pour 35 bandes de fréquence mesurées. D'un point de vue technique, il a ainsi été possible de prouver que la méthodologie choisie pour la saisie et le traitement des données conformément au concept de mesure est appropriée. Au cours des années suivantes, d'autres analyses quantitatives des données de mesure seront possibles au fur et à mesure de l'accroissement de la base de données.

Les intensités de champ mesurées au cours de la première année de collecte des données ont atteint au maximum environ 15% de la valeur limite d'immissions dans les zones accessibles au public ; dans la grande majorité des cas, elles se situaient dans une plage de pourcentage basse à un chiffre. Dans les habitations privées mesurées jusqu'à présent, l'exploitation maximale de la valeur limite d'immissions était inférieur à 4%. Le nombre de mesures effectuées dans les habitations est de 4 sur les 100 prévues.

Avec des valeurs moyennes de 0,1 à 0,7 V/m (cf. figure 16), les valeurs RMS CEM-HF des mesures d'itinéraires pour les quartiers d'habitation et les zones accessibles au public sont similaires à celles d'études comparables réalisées à l'étranger (Jalilian H., 2019) (Sagar S., 2018). Ainsi, dans 26 études de mesure réalisées entre 2015 et 2018, principalement dans des pays européens, les expositions moyennes pour différents microenvironnements à l'extérieur se situaient entre 0,07 et 1,27 V/m. À l'intérieur, les valeurs moyennes se situaient entre 0,04 et 0,76 V/m et dans les transports publics entre 0,14 et 0,69 V/m. En France, des mesures de CEM-HF ont été effectuées en 2014, 2017 et 2020 sur plus de 1 000 places de mairie, avec une sonde à large bande et séparément pour les bandes de liaison descendante (Agence Nationale des Fréquences, 2020). En 2020, la médiane des immissions totales de CEM HF était de 0,34 V/m dans les zones urbaines et de 0,15 V/m dans les zones rurales. Pour la liaison descendante, la médiane était de 0,30 V/m dans les zones urbaines et de 0,05 V/m dans les zones rurales. Les moyennes arithmétiques des CEM HF étaient de 0,62 V/m dans les zones urbaines (liaison descendante : 0,53 V/m) et de 0,54 V/m dans les zones rurales (liaison descendante : 0,10 V/m). Les valeurs en France ont tendance à être plus élevées que celles mesurées en Suisse. Cela est très probablement dû au fait que les places des mairies sont typiquement situées au centre, alors que les mesures de la présente étude couvrent une zone plus large.

Il existe moins d'études comparatives internationales concernant les mesures des CEM-HF. Les valeurs mesurées sont toutefois comparables aux mesures d'exposition personnelles<sup>3</sup> effectuées en 2012/13 en Suisse et en Italie (Struchen B., 2016). Des valeurs similaires ont également été relevées par le PSI dans les années 90 dans le cadre d'une étude de mesure complète (Bulletin de l'OFEFP 3/95).

---

<sup>3</sup> Les "mesures personnelles" désignent une méthode de mesure dans laquelle une personne porte des appareils de mesure sur elle pendant une certaine période (typiquement quelques jours) et saisit les immissions dans son quotidien individuel. En revanche, dans le cas des mesures par itinéraire, les appareils de mesure sont certes également portés par une personne, mais la mesure est effectuée le long d'un itinéraire choisi au lieu d'être effectuée dans le quotidien d'un individu.



L'ensemble des immissions de CEM-HF mesurées ainsi que les immissions mesurées des stations de base de téléphonie mobile sont comparables à une campagne de mesure réalisée en Suisse en 2014. (Röösli M. F. M., 2015). Selon la Figure 25, les immissions HF-EMF semblent être légèrement inférieures dans la plupart des microenvironnements, ce qui n'est toutefois pas encore vérifié statistiquement. Dans les centres urbains, les valeurs sont restées identiques. Lors de la comparaison des CEM HF totales, il faut tenir compte du fait qu'entre 2014 et 2021, plusieurs bandes de fréquences ont été attribuées à d'autres applications techniques ou que de nouvelles bandes de fréquences ont été attribuées et que, par conséquent, différentes bandes de fréquences ont été mesurées durant les deux périodes de mesure. Lors de la comparaison des fréquences de téléphonie mobile, toutes les bandes de fréquences utilisées à chaque fois ont été prises en compte afin de saisir un éventuel déplacement de la puissance d'émission vers de nouvelles fréquences.

Une raison possible de la légère baisse ou du maintien des valeurs moyennes des immissions entre 2014 et 2021 malgré l'augmentation du trafic de données de téléphonie mobile est l'évolution vers des technologies d'émission plus dynamiques et plus efficaces : alors qu'en 2014, la technologie 2G était encore largement répandue et que la 4G n'en était qu'à ses débuts, fin 2021, seul Sunrise proposait encore des services 2G et la 5G est disponible en de nombreux endroits. La part de la 3G a également diminué depuis, au détriment de la 4G, plus efficace. Les normes modernes de téléphonie mobile permettent aux antennes de téléphonie mobile de réduire la puissance d'émission en fonction du trafic de données/d'appels, lorsque cette puissance n'est pas nécessaire pour répondre à la demande. Il est ainsi possible que les immissions moyennées dans le temps et géographiquement diminuent, même si la quantité de données transmises augmente. Le fait que l'introduction de technologies plus efficaces compense l'augmentation de l'utilisation des données en termes d'exposition a déjà été constaté jusqu'à présent dans des études de mesures personnelles en Suisse. Ainsi, le niveau d'exposition personnelle aux CEM-HF en 2015 était légèrement inférieur à celui d'une étude comparable réalisée en 2007/2008, bien que le volume de données mobiles ait été multiplié par 400 (Röösli M. D. S., 2019). Cette diminution était principalement due à une réduction de l'exposition aux émissions des téléphones sans fil. Toutefois, une légère augmentation de l'exposition à la liaison descendante a été constatée entre 2007/2008 et 2015. Cela correspond également à l'étude de mesure française mentionnée ci-dessus. Dans les zones urbaines, la médiane pour le downlink était de 0,23 V/m en 2014, de 0,27 V/m en 2017 et de 0,30 V/m en 2020. Dans les zones rurales, le downlink n'a guère changé (2014 : 0,06 V/m, 2017 : 0,05 V/m et 2020 : 0,05 V/m). En ce qui concerne l'exposition totale aux CEM HF, la médiane a augmenté de 0,25 V/m à 0,34 V/m dans les zones urbaines et de 0,13 V/m à 0,15 V/m dans les zones rurales entre 2014 et 2020. Étant donné que lors de l'étude de mesure suisse en 2014 (Röösli M. F. M., 2015) la méthode de mesure n'était pas complètement identique, il ne peut pas être totalement exclu que cela exerce une influence sur la tendance temporelle observée. Une interprétation de ces différences est donc encore prématurée et, comparées à l'incertitude de mesure totale, les différences sont faibles pour pouvoir établir des attributions claires quant aux causes des différences. Les données des années suivantes seront désormais plus facilement comparables avec les valeurs mesurées en 2021, car les mesures seront effectuées selon la même procédure.

#### 4.1 Représentativité des données

L'objectif des mesures est de collecter des données représentatives de l'exposition de la population. Cela signifie que les mesures sont effectuées là où les gens se trouvent effectivement au quotidien. Il

s'agit des quartiers résidentiels, des places publiques ainsi que du système de transport public, y compris les arrêts de bus, et des espaces intérieurs accessibles au public (p. ex. supermarchés, restaurants, musées). La représentativité des communes et des microenvironnements sélectionnés a été analysée quantitativement à l'aide de systèmes d'information géographique, en calculant et en comparant des grandeurs caractéristiques pour les communes ou les microenvironnements et pour l'ensemble de la Suisse. Il est par exemple possible de comparer la part de la population urbaine par rapport à la population totale dans tous les microenvironnements et dans l'ensemble de la Suisse. De telles analyses seront également effectuées périodiquement à l'avenir dans le cadre de la planification des microenvironnements et permettront de contrôler en permanence la représentativité des microenvironnements choisis et de corriger les microenvironnements prévus afin de garantir la représentativité de l'ensemble des microenvironnements. Les mesures sur les lieux de travail ont été délibérément évitées, car on s'attend à une forte dispersion sur ces lieux, de sorte qu'une collecte de données représentative serait très difficile à obtenir ou ne pourrait être réalisée qu'avec des échantillons très importants.

La réalisation de mesures d'itinéraires pendant 15 min dans les microenvironnements a pour limite que les variations systématiques des immissions au cours de la journée, de la semaine et de l'année ne peuvent pas être saisies au sein d'un microenvironnement. Ces variations sont toutefois généralement systématiques et seront à l'avenir saisies dans le cadre de ce projet avec les mesures permanentes stationnaires. Typiquement, les immissions sont plus élevées le jour que la nuit, mais avec des différences relativement faibles dans les heures entre 8h00 et 20h00. L'étude conceptuelle a montré que les mesures d'itinéraires à différents moments ne donnent pas lieu à des distorsions systématiques. (Röösli M. F. M., 2015).

Cependant, pour les mesures effectuées dans les transports en commun, l'heure du jour est très influente. Aux heures de pointe, les immissions de CEM-HF sont nettement plus élevées qu'aux heures où les moyens de transport ne sont que faiblement occupés, car les immissions de liaison montante des appareils mobiles des autres voyageurs y contribuent relativement beaucoup (cf. Figure 20). Par rapport à des études antérieures, les immissions mesurées dans les transports publics sont plutôt faibles dans la présente étude. Une explication possible est que, lors de l'accès aux zones de mesure et lors des déplacements entre les zones, les transports publics ont souvent été utilisés en dehors des heures de pointe.

Dans les études de mesure de l'exposition des personnes, il semble que la proportion de déplacements pendant les heures de pointe soit plutôt plus élevée (Birks L.E., 2018). Pour les mesures effectuées à l'intérieur, le modèle de 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 au travail et, par conséquent, de se trouver dans des espaces publics à proximité des gares n'est pas représentatif. Dans ces environnements de mesure, la part du champ magnétique du courant ferroviaire devrait être disproportionnée. Cette restriction ne s'applique toutefois pas aux parcours de mesure généraux au sein des microenvironnements.

Pour la sélection des mesures ponctuelles, une approche différente de celle utilisée pour les mesures d'itinéraires a été adoptée afin d'obtenir une représentativité. Comme expliqué dans la partie méthodologique, une sélection aléatoire aurait l'inconvénient de manquer des situations de forte exposition, qui sont rares, vu le nombre relativement faible d'habitations sélectionnées. Il ne serait donc pas possible



de tirer des conclusions sur des situations typiques lorsqu'une personne habite à proximité d'une source externe. C'est pourquoi on a recherché de manière ciblée les habitations particulièrement touchées par une source de RNI dite primaire. La sélection de ces sources primaires de RNI pour la recherche de sites a été effectuée à l'aide de systèmes d'information géographique, la sélection des habitations situées à proximité a été réalisée à l'aide de photographies aériennes et de prises de vue accessibles au public (Google StreetView). La préférence a été donnée aux bâtiments dont l'usage est facilement reconnaissable (résidentiel ou commercial) et dont les limites sont clairement définies. Ainsi, un logement représente une situation typique de forte exposition en ce qui concerne la source primaire. Pour les autres sources de RNI secondaires, la sélection peut être supposée approximativement aléatoire et donc considérée comme représentative. Pour les sources internes et le comportement des habitants, la sélection est certes entièrement aléatoire, mais la dispersion individuelle peut être très importante, de sorte que pour un échantillon de 100 logements, l'incertitude est relativement grande et des sources intérieures rares peuvent aussi être manquées. A cet égard, il sera intéressant de voir si, après la collecte de toutes les données, une structure claire peut être identifiée dans la répartition des immissions provenant de sources internes dans tous les logements. Pour l'instant, le nombre de mesures ponctuelles effectuées est encore trop faible pour permettre des évaluations séparées. A l'avenir, il est toutefois prévu de procéder à une évaluation pour les situations de forte pollution et pour les situations représentatives.

Les sites des mesures permanentes stationnaires ne sont pas représentatifs de l'ensemble du territoire suisse. L'objectif des mesures n'est toutefois pas la répartition spatiale, mais la saisie de l'évolution temporelle des immissions de RNI sur les différents sites. On suppose que les mesures sont représentatives à cet effet, d'une part parce qu'aucune donnée comparative n'est disponible pour la validation et d'autre part parce que les sites ont été choisis de manière purement aléatoire à cet égard (p. ex. il n'existe aucune information sur des projets de construction ou de transformation d'antennes de téléphonie mobile ou de lignes électriques à proximité des sites de mesure). Si l'on veut viser une représentativité pour l'ensemble de la Suisse, il faudrait augmenter le nombre de sites au niveau des cantons.

En résumé, les premiers résultats montrent que le concept de mesure choisi est utile pour caractériser la situation typique du RNI dans l'environnement. Les valeurs mesurées étaient 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

- Agence Nationale des Fréquences. (2020). *Etude de l'exposition*. France :  
<https://www.anfr.fr/fileadmin/mediatheque/documents/espace/20210716-campagne-mairies-2020.pdf>.
- Birks L.E., S. B.-B.-Z. (2018). Variabilité spatiale et temporelle de l'exposition environnementale personnelle aux champs électromagnétiques de radiofréquence chez les enfants en Europe. *Environnement International*, p. 117 : 204-214.
- Office fédéral de la statistique. (2012). *Typologie des communes et typologie ville/campagne*.
- Eeftens M., D. S. (2020). A real-world quality assessment study in six ExpoM-RF measurement devices. *Environmental Research*, S. 182:109049.
- Eeftens M., S. B. (2018). Traitement de la distorsion dans les mesures de champs électromagnétiques des appareils portables. *Bioelectromagnetics*, S. 39(7) : 529-538.
- Jalilian H., E. M. (2019). Exposition du public aux champs électromagnétiques de radiofréquence dans les microenvironnements quotidiens : une revue systématique mise à jour pour l'Europe. *Environmental Research*, p. 176:108517.
- JCGM, J. C. (2008). *Évaluation des données de mesure - Guide pour l'expression de l'incertitude dans la mesure*. JCGM.
- Röösli M., D. S. (2019). Communication mobile et santé : à quel point sommes-nous irradiés ? *Pratique du médecin de famille*, p. 14 (2) : 41-44.
- Röösli M., F. M. (2015). *Concept d'échantillonnage pour les mesures du rayonnement non ionisant à l'aide d'exposimètres*.  
<https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/elektrosmog/externe-studienberichte/stichprobenkonzeptfuermessungendernichtionisierendenstrahlungmit.pdf>.
- Sagar S., A. S. (2018). Comparaison des niveaux d'exposition aux champs électromagnétiques de radiofréquence dans différents microenvironnements quotidiens dans un contexte international. *Environnement international*, p. 114 : 297-306.
- Struchen B., L. I. (2016). Analysis of personal and bedroom exposure to ELF-MFs in children in Italy and Switzerland. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, p. 26(6):586-596.

## 6. Sources de données

Tableau 12: Sets 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"> <li>- Swissgrid SA</li> <li>- Axpo Grid AG</li> <li>- Primeo Energie</li> <li>- Groupe E SA</li> <li>- openinframap.org</li> </ul>	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 13: Glossaire

Désignation	Description
AC	Alternating Current : courant alternatif
BF	Basse fréquence, utilisé comme synonyme de RF 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.
DL	La liaison descendante : Flux de données de l'antenne de téléphonie mobile vers le téléphone mobile
ELF	Extremely low Frequency : plage 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	Transformée de Fourier rapide : 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, utilisé comme synonyme de RF dans le présent rapport.
ISM	Industrial, Scientific and Medical band : bandes de fréquences sans licence utilisées pour un grand nombre d'appareils techniques (p. ex. Bluetooth, WiFi, four à micro-ondes).
ME	Microenvironnement / Micro-environnement
MySQL	Système de gestion de base de données d'Oracle
NF	Basse fréquence, utilisée comme synonyme d'ELF dans le présent rapport.
NIS	Rayonnement non ionisant
OFEV	Office fédéral de l'environnement
OFS	Office fédéral de la statistique
PAM/PAMR	Professional mobile radio : Systèmes de communication radio
Peak	Valeur de pic (maximum)
Polycom	Réseau radio suisse basé sur Tetrapol, système radio national officiel des autorités pour la police, les services de secours, etc.
R	Langues de programmation libres 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.
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.
TV	Television : services de télévision

Désignation	Description
UL	Liaison montante : Flux de données du téléphone mobile vers l'antenne de téléphonie mobile
VLI	Valeurs limites d'immission
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

Microenvironnements

Tableau 14: Liste des communes d'implantation avec le nombre total de microenvironnements par commune et répartis par type de microenvironnement extérieur.

Commune	Zone naturelle	Agriculture- zone agricole	Sport / Zone de loisirs	Zone industri- elle	Zone résidenti- elle	Centre-ville	Décentralisé Zone résidenti- elle	Centre Zone résidenti- elle	Grande ville centre	Total
Aarau	1			1			1	1	1	5
Bâle										0
Bioggio					1	1				2
Brienz					1	1				2
Duebendorf			1	1	2	1				5
Duggingen										0
Frick				1	1	1				3
Graenichen					2	1				3
Grellingen					1	1				2
Gstaad					1	1				2
Laufenburg	1				1	1				3
Lausanne	1						2	1	1	5
Lugano							1	1	1	3
Lungern		1			1	1				3
Montreux										0
Muenchenstein	1		1	1	2	1				6
Nesslau		1			1	1				3
Neuchatel							2	1	1	4
Reinach					1	1				2
Ruemlang				1	1	1				3
Seewen		1			1	1				3
Spiez										0
Saint-Blaise					1	1				2
Wattwil				1	1	1				3
Yverdon										0
Zurich			1	2			2	2	1	8
Zweisimmen	1				1	1				3
<b>Total</b>	<b>5</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>8</b>	<b>20</b>	<b>17</b>	<b>8</b>	<b>6</b>	<b>5</b>	<b>75</b>

Environnements de mesure en intérieur / zones publiques

Tableau 15: Liste des communes d'implantation avec le nombre total d'environnements de mesure par commune et répartis par type d'environnement intérieur ou public.

Commune	Bibliothèque	EPF/UNI/HES	Musée	Restaurants	Supermarché	Aéroport	Arrêt de bus	Arrêt de tram	Gares	Total
Aarau									2	2
Bâle									1	1
Bioggio									1	1
Brienz				1	1					2
Duebendorf				1	1					2
Duggingen				1						1
Frick							1			1
Graenichen										0
Grellingen				1					1	2
Gstaad									1	1
Laufenburg				1						1
Lausanne			1	1			1		1	4
Lugano				1	1		1		1	4
Lungern										0
Montreux				1					1	2
Muenchenstein				1	1					2
Nesslau									1	1
Neuchatel	1	1					2	1	0	5
Reinach				1						1
Ruemlang										0
Seewen										0
Spiez									2	2
Saint-Blaise										0
Wattwil					1		1			2
Yverdon									1	1
Zurich		2		2		1		4	4	13
Zweisimmen				1					1	2
<b>Total</b>	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>13</b>	<b>5</b>	<b>1</b>	<b>7</b>	<b>5</b>	<b>17</b>	<b>53</b>

### III Caractéristiques des données de mesure HF-RMS

Les quantiles sont indiqués sans agrégation par environnement de mesure. Les moyennes pour chaque type d'environnement de mesure sont calculées par environnement de mesure.

Tableau 16: Paramètres statistiques (en V/m) de l'exposition totale aux CEM HF (RMS).

Microenvironnements	Nombre de mesures	05. Perc.	25. Perc.	Mediane	75. Perc.	95. Perc.	Nombre ME	Moyenne
Train	17994	0.041	0.11	0.199	0.321	0.536	62	0.305
Tram	501	0.077	0.129	0.184	0.264	0.479	5	0.337
Bus	1098	0.043	0.084	0.144	0.234	0.466	11	0.252
Metro	105	0.089	0.144	0.189	0.253	0.463	1	0.253
Télécabine	439	0.029	0.056	0.082	0.156	0.243	2	0.138
Centre d'une grande ville	977	0.047	0.103	0.19	0.338	0.7	5	0.377
Quartier résidentiel central	1015	0.055	0.116	0.18	0.289	0.483	6	0.281
Quartier résidentiel décentralisé	1504	0.055	0.097	0.135	0.222	0.464	8	0.237
Centre-ville	2797	0.031	0.062	0.108	0.187	0.424	17	0.204
Quartier résidentiel	3413	0.034	0.055	0.091	0.176	0.405	20	0.191
Zone industrielle	1366	0.09	0.198	0.301	0.449	0.716	8	0.403
Zone de sport et de loisirs	554	0.091	0.162	0.246	0.347	0.527	3	0.303
Zone agricole	633	0.026	0.048	0.066	0.097	0.264	3	0.169
Zone naturelle	940	0.027	0.035	0.052	0.087	0.15	5	0.083
Gare	1582	0.058	0.146	0.252	0.352	0.599	17	0.326
Arrêt de tramway	284	0.132	0.214	0.388	0.546	1.492	5	0.661
Arrêt de bus	544	0.124	0.214	0.329	0.451	0.623	7	0.361
Aéroport	174	0.151	0.235	0.306	0.463	0.701	1	0.4
Supermarché	670	0.031	0.057	0.093	0.169	0.452	5	0.233
Restaurants	4409	0.024	0.046	0.104	0.167	0.348	13	0.181
Musée	529	0.046	0.114	0.188	0.312	0.711	1	0.346
EPF/UNI/HES	403	0.031	0.056	0.086	0.111	0.231	3	0.142
Bibliothèque	151	0.124	0.162	0.195	0.322	0.561	1	0.294

Tableau 17: Valeurs statistiques (en V/m) de l'exposition aux CEM HF (RMS) par la radiodiffusion : Bandes 01-0098M-fm, 02-0202M-dab, 03-0385M-poly, 04-0423M-ism, 05-0453M-pmr, 06-0508M-tv, 07-0584M-tv, 08-0660M-tv.

Microenvironnements	Nombre de mesures	05. Perc.	25. Perc.	Mediane	75. Perc.	95. Perc.	Nombre ME	Moyenne
Train	17994	0.008	0.01	0.014	0.026	0.075	62	0.042
Tram	501	0.028	0.049	0.069	0.11	0.196	5	0.097
Bus	1098	0.013	0.035	0.05	0.084	0.184	11	0.115
Metro	105	0.008	0.009	0.01	0.014	0.024	1	0.014
Télécabine	439	0.019	0.037	0.045	0.064	0.115	2	0.06
Centre d'une grande ville	977	0.014	0.03	0.043	0.07	0.154	5	0.104
Quartier résidentiel central	1015	0.016	0.042	0.063	0.11	0.209	6	0.101
Quartier résidentiel décentralisé	1504	0.018	0.038	0.052	0.075	0.139	8	0.074
Centre-ville	2797	0.011	0.017	0.037	0.069	0.218	17	0.104
Quartier résidentiel	3413	0.015	0.024	0.039	0.079	0.289	20	0.131
Zone industrielle	1366	0.018	0.037	0.08	0.141	0.35	8	0.157
Zone de sport et de loisirs	554	0.037	0.065	0.119	0.197	0.373	3	0.173
Zone agricole	633	0.01	0.015	0.03	0.05	0.087	3	0.051
Zone naturelle	940	0.015	0.021	0.03	0.064	0.121	5	0.062
Gare	1582	0.012	0.024	0.031	0.078	0.206	17	0.104
Arrêt de tramway	284	0.037	0.051	0.055	0.074	0.127	5	0.073
Arrêt de bus	544	0.02	0.042	0.051	0.128	0.227	7	0.137
Aéroport	174	0.013	0.017	0.023	0.027	0.034	1	0.024
Supermarché	670	0.008	0.009	0.013	0.018	0.067	5	0.042
Restaurants	4409	0.009	0.012	0.023	0.039	0.112	13	0.054
Musée	529	0.007	0.009	0.009	0.012	0.016	1	0.011
EPF/UNI/HES	403	0.012	0.015	0.024	0.042	0.109	3	0.099
Bibliothèque	151	0.042	0.042	0.043	0.045	0.071	1	0.055

Tableau 18: Valeurs statistiques (en V/m) de l'exposition aux CEM HF (RMS) due aux antennes de téléphonie mobile (downlink) : Bandes 11-0771M-dl, 12-0809M-dl, 15-0943M-dl, 16-1480M-sdl, 18-1843M-dl, 21-2145M-dl, 25-2657M-dl.

Microenvironnements	Nombre de mesures	05. Perc.	25. Perc.	Mediane	75. Perc.	95. Perc.	Nombre ME	Moyenne
Train	17994	0.007	0.028	0.088	0.186	0.442	62	0.185
Tram	501	0.023	0.07	0.124	0.206	0.429	5	0.308
Bus	1098	0.007	0.022	0.071	0.181	0.429	11	0.206
Metro	105	0.023	0.04	0.065	0.138	0.343	1	0.157
Télécabine	439	0.018	0.04	0.058	0.137	0.215	2	0.121
Centre d'une grande ville	977	0.02	0.063	0.158	0.293	0.663	5	0.343
Quartier résidentiel central	1015	0.029	0.089	0.145	0.261	0.463	6	0.257
Quartier résidentiel décentralisé	1504	0.018	0.052	0.097	0.203	0.462	8	0.22
Centre-ville	2797	0.02	0.04	0.073	0.141	0.365	17	0.173
Quartier résidentiel	3413	0.017	0.032	0.057	0.109	0.285	20	0.137
Zone industrielle	1366	0.053	0.155	0.245	0.394	0.695	8	0.366
Zone de sport et de loisirs	554	0.032	0.061	0.135	0.265	0.515	3	0.246
Zone agricole	633	0.007	0.025	0.046	0.08	0.262	3	0.16
Zone naturelle	940	0.007	0.013	0.023	0.052	0.106	5	0.053
Gare	1582	0.051	0.122	0.209	0.296	0.559	17	0.296
Arrêt de tramway	284	0.106	0.181	0.36	0.538	1.489	5	0.651
Arrêt de bus	544	0.063	0.166	0.282	0.419	0.589	7	0.323
Aéroport	174	0.108	0.222	0.293	0.432	0.682	1	0.382
Supermarché	670	0.006	0.009	0.029	0.091	0.396	5	0.201
Restaurants	4409	0.005	0.008	0.036	0.127	0.334	13	0.15
Musée	529	0.036	0.1	0.181	0.308	0.71	1	0.342
EPF/UNI/HES	403	0.008	0.017	0.037	0.068	0.144	3	0.072
Bibliothèque	151	0.082	0.135	0.167	0.284	0.546	1	0.27



Tableau 19: Caractéristiques statistiques (en V/m) de l'exposition aux CEM HF (RMS) due aux téléphones mobiles (liaison montante) : bandes 09-0718M-ul, 13-0847M-ul, 14-0898M-ul, 17-1748M-ul, 20-1957M-ul, 23-2535M-ul.

Microenvironnements	Nombre de mesures	05. Perc.	25. Perc.	Mediane	75. Perc.	95. Perc.	Nombre ME	Moyenne
Train	17994	0.005	0.019	0.05	0.127	0.373	62	0.204
Tram	501	0.005	0.008	0.018	0.04	0.117	5	0.057
Bus	1098	0.005	0.007	0.019	0.042	0.129	11	0.061
Metro	105	0.021	0.058	0.101	0.168	0.322	1	0.165
Télécabine	439	0.005	0.005	0.005	0.006	0.01	2	0.006
Centre d'une grande ville	977	0.005	0.006	0.009	0.016	0.065	5	0.069
Quartier résidentiel central	1015	0.005	0.005	0.006	0.01	0.015	6	0.01
Quartier résidentiel décentralisé	1504	0.005	0.005	0.005	0.01	0.016	8	0.01
Centre-ville	2797	0.005	0.005	0.005	0.006	0.012	17	0.008
Quartier résidentiel	3413	0.005	0.005	0.005	0.005	0.011	20	0.009
Zone industrielle	1366	0.005	0.005	0.006	0.011	0.025	8	0.015
Zone de sport et de loisirs	554	0.005	0.005	0.005	0.006	0.039	3	0.016
Zone agricole	633	0.005	0.005	0.005	0.005	0.007	3	0.006
Zone naturelle	940	0.005	0.005	0.005	0.005	0.006	5	0.006
Gare	1582	0.005	0.01	0.021	0.041	0.114	17	0.049
Arrêt de tramway	284	0.006	0.008	0.01	0.013	0.038	5	0.031
Arrêt de bus	544	0.007	0.012	0.017	0.027	0.069	7	0.039
Aéroport	174	0.011	0.015	0.019	0.027	0.042	1	0.026
Supermarché	670	0.005	0.006	0.012	0.026	0.1	5	0.049
Restaurants	4409	0.005	0.005	0.009	0.015	0.04	13	0.022
Musée	529	0.005	0.005	0.008	0.018	0.067	1	0.036
EPF/UNI/HES	403	0.006	0.01	0.016	0.028	0.066	3	0.035
Bibliothèque	151	0.01	0.01	0.011	0.012	0.024	1	0.021

Tableau 20: Paramètres statistiques (en V/m) de l'exposition aux CEM HF (RMS) due aux services de téléphonie mobile TDD : Bandes 10-0748M-tdd, 24-2593M-tdd, 26-3475M-nr, 27-3605M-nr, 28-3735M-nr.

Microenvironnements	Nombre de mesures	05. Perc.	25. Perc.	Mediane	75. Perc.	95. Perc.	Nombre ME	Moyenne
Train	17994	0.004	0.004	0.005	0.008	0.058	62	0.066
Tram	501	0.004	0.007	0.014	0.031	0.075	5	0.041
Bus	1098	0.004	0.004	0.005	0.012	0.036	11	0.019
Metro	105	0.004	0.004	0.004	0.004	0.005	1	0.004
Télécabine	439	0.004	0.005	0.006	0.008	0.023	2	0.011
Centre d'une grande ville	977	0.004	0.004	0.012	0.029	0.102	5	0.081
Quartier résidentiel central	1015	0.004	0.005	0.011	0.032	0.071	6	0.036
Quartier résidentiel décentralisé	1504	0.004	0.004	0.006	0.028	0.049	8	0.034
Centre-ville	2797	0.004	0.004	0.006	0.013	0.043	17	0.025
Quartier résidentiel	3413	0.004	0.004	0.005	0.009	0.029	20	0.017
Zone industrielle	1366	0.005	0.01	0.023	0.042	0.124	8	0.056
Zone de sport et de loisirs	554	0.005	0.007	0.01	0.017	0.037	3	0.02
Zone agricole	633	0.004	0.004	0.004	0.005	0.008	3	0.005
Zone naturelle	940	0.004	0.004	0.004	0.005	0.008	5	0.006
Gare	1582	0.005	0.008	0.018	0.049	0.137	17	0.062
Arrêt de tramway	284	0.02	0.031	0.042	0.08	0.134	5	0.073
Arrêt de bus	544	0.004	0.019	0.028	0.048	0.116	7	0.056
Aéroport	174	0.017	0.034	0.044	0.065	0.099	1	0.058
Supermarché	670	0.004	0.004	0.004	0.005	0.01	5	0.006
Restaurants	4409	0.004	0.004	0.004	0.008	0.023	13	0.012
Musée	529	0.004	0.004	0.005	0.005	0.007	1	0.005
EPF/UNI/HES	403	0.004	0.004	0.009	0.027	0.031	3	0.021
Bibliothèque	151	0.027	0.028	0.029	0.03	0.041	1	0.031

Tableau 21: Paramètres statistiques (en V/m) de l'exposition aux CEM HF (RMS) par WLAN : bandes 22-2438M-wifi, 29-5200M-wifi, 30-5325M-wifi, 31-5450M-wifi, 32-5575M-wifi, 33-5700M-wifi, 34-5825M-wifi, 35-5950M-wifi.

Microenvironnements	Nombre de mesures	05. Perc.	25. Perc.	Mediane	75. Perc.	95. Perc.	Nombre ME	Moyenne
Train	17994	0.007	0.023	0.054	0.109	0.214	62	0.105
Tram	501	0.008	0.015	0.029	0.058	0.135	5	0.067
Bus	1098	0.006	0.008	0.015	0.04	0.09	11	0.061
Metro	105	0.031	0.064	0.082	0.117	0.188	1	0.11
Télécabine	439	0.006	0.007	0.007	0.007	0.007	2	0.026
Centre d'une grande ville	977	0.007	0.011	0.018	0.038	0.072	5	0.04
Quartier résidentiel central	1015	0.007	0.01	0.014	0.026	0.066	6	0.033
Quartier résidentiel décentralisé	1504	0.006	0.007	0.009	0.06	0.07	8	0.034
Centre-ville	2797	0.005	0.006	0.008	0.011	0.057	17	0.018
Quartier résidentiel	3413	0.006	0.006	0.007	0.009	0.054	20	0.016
Zone industrielle	1366	0.006	0.006	0.007	0.01	0.02	8	0.013
Zone de sport et de loisirs	554	0.006	0.006	0.006	0.007	0.008	3	0.007
Zone agricole	633	0.006	0.006	0.006	0.006	0.007	3	0.006
Zone naturelle	940	0.006	0.006	0.006	0.007	0.007	5	0.007
Gare	1582	0.007	0.012	0.023	0.039	0.081	17	0.04
Arrêt de tramway	284	0.012	0.016	0.023	0.053	0.061	5	0.045
Arrêt de bus	544	0.008	0.015	0.028	0.067	0.097	7	0.055
Aéroport	174	0.04	0.048	0.054	0.071	0.128	1	0.097
Supermarché	670	0.015	0.022	0.03	0.047	0.127	5	0.066
Restaurants	4409	0.008	0.014	0.024	0.043	0.101	13	0.074
Musée	529	0.016	0.024	0.031	0.041	0.067	1	0.039
EPF/UNI/HES	403	0.012	0.02	0.037	0.061	0.085	3	0.06
Bibliothèque	151	0.06	0.061	0.066	0.078	0.207	1	0.096

#### IV Comparaison des bandes de fréquences HF-EMF de 2014 et 2021

Tableau 22: Comparaison des bandes de fréquences dans lesquelles le présent rapport (2021) et une campagne de mesure similaire en 2014 (Röösli M. F. M., 2015) a été effectuée. Le rapport a comparé l'exposition totale avec toutes les bandes définies en 2014 et 2021, ainsi que l'exposition à la "téléphonie mobile". Les bandes classées comme "téléphonie mobile" lors des deux campagnes de mesure sont indiquées en gris dans le tableau.

Numéro de volume. (2021)	Description (2021)	Fréquence centrale 2021 (MHz)	Bande passante 2021 (MHz)	Fréquence centrale 2014 (MHz)	Bande passante 2014 (MHz)
1	Radio FM	97.75	35	97.75	20.5
2	DAB/DAB	202	75	-	-
3	Polycom / TETRAPOL	385	35	-	-
4	TETRAPOL, amateur, ISM 433	422.5	35	-	-
5	PMR/PAMR (radio d'entreprise)	452.5	35	-	-
6	Broadcasting CH (1)	507.5	75	630	320
7	Broadcasting CH (2)	583.5	75		
8	Broadcasting CH (3)	659.5	75		
9	Mobile 700 UL (CH)	718	35		
10	Mobile 700 TDD (CH, Sunrise)	748	35		
11	Mobile 700 DL (CH)	770.5	35		
12	Mobile 800 DL	808.5	35	806	30
13	Mobile 800 UL	847	35	847	30
14	Mobile 900 UL	897.5	35	897.5	35
15	Mobile 900 DL	942.5	35	942.5	35
16	Mobile 1400 SDL (CH)	1479.5	75	-	-
17	Mobile 1800 UL	1747.5	75	1747.5	75
18	Mobile 1800 DL	1842.5	75	1842.5	75
19	DECT	1897.5	35	1890	20
20	Mobile 2100 UL	1957	75	1950	60
21	Mobile 2100 DL	2145	75	2140	60
22	ISM 2.4 GHz	2438	100	2442.5	85
23	Mobile 2600 DL	2535	75	2535	70
24	Mobile 2600 TDD (Swisscom)	2592.5	35	-	-
25	Mobile 2600 DL	2657	75	2655	70
26	Mobile 3500 (1)	3475	100	-	-
27	Mobile 3500 (2)	3605	100		
28	Mobile 3500 (3)	3735	100		
29	WiFi 5 GHz (1)	5200	100	5512.5	725
30	WiFi 5 GHz (2)	5325	100		
31	WiFi 5 GHz (3)	5450	100		
32	WiFi 5 GHz (4)	5575	100		
33	WiFi 5 GHz (5)	5700	100		

Numéro de volume. (2021)	Description (2021)	Fréquence centrale 2021 (MHz)	Bande passante 2021 (MHz)	Fréquence centrale 2014 (MHz)	Bande passante 2014 (MHz)
34	WiFi / SRD 5,8 GHz (1)	5825	100		
35	WiFi / SRD 5,8 GHz (2)	5950	100	-	-

## V Liste des communes sélectionnées pour les mesures

Tableau 23: Liste des 70 communes sélectionnées pour les mesures d'itinéraires et de spots (état au 22.04.2022)

	Commune	Canton	Typologie des communes selon l'OFS
1	Bâle	BS	Ville-centre d'une grande agglomération (111)
2	Berne	BE	
3	Geneve	GE	
4	Lausanne	VD	
5	Zurich	ZH	
6	Allschwil	BL	Commune urbaine d'emploi d'une grande agglomération (112)
7	Duebendorf	ZH	
8	Freienbach	SZ	
9	Liestal	BL	
10	Muenchenstein	BL	Commune urbaine résidentielle d'une grande agglomération (113)
11	Bettingen	BS	
12	Kehrsatz	BE	
13	Lausen	BL	
14	Pully	VD	
15	Zufikon	ZH	Ville-centre d'une agglomération de taille moyenne (121)
16	Aarau	GT	
17	Bienne	BE	
18	Fribourg	FR	
19	Lugano	TI	
20	Lucerne	LU	
21	Neuchatel	NE	
22	Soleure	SO	
23	Saint-Gall	SG	Commune urbaine d'emploi d'une agglomération de taille moyenne (122)
24	Winthertur	ZH	
25	Bioggio	TI	Commune résidentielle urbaine d'une agglomération de taille moyenne (123)
26	Herisau	AR	
27	Neuhausen am Rheinfall	SH	
28	Evilard	BE	
29	Graenichen	GT	
30	Ipsach	BE	Commune touristique urbaine d'une petite agglomération ou en dehors d'une agglomération (134)
31	Nidau	BE	
32	Saint-Blaise	NE	
33	Zermatt	VS	



	Commune	Canton	Typologie des communes selon l'OFS
34	Appenzell	AR	Commune industrielle urbaine d'une petite agglomération ou en dehors d'une agglomération (136)
35	Glaris	GL	
36	Reinach	GT	
37	Rossemaison	JU	
38	Viège	VS	
39	Wattwil	SG	
40	Cheseaux-Noreaz	VD	Commune urbaine de services d'une petite agglomération ou en dehors d'une agglomération (137)
41	Delemont	JU	
42	Schwyz	SZ	
43	Yverdon	VD	
44	Ruemlang	ZH	Commune industrielle périurbaine à haute densité (216)
45	Belp	BE	Commune tertiaire périurbaine à haute densité (217)
46	Hergiswil	NW	
47	Deitingen	SO	Commune industrielle périurbaine de moyenne densité (226)
48	Erstfeld	UR	
49	Grellingen	BL	
50	Selzach	SO	
51	Grolley	FR	Commune tertiaire périurbaine de moyenne densité (227)
52	Walchwil	ZG	
53	Chatillon	JU	Commune agricole périurbaine à faible densité (235)
54	Tecknau	BL	Commune industrielle périurbaine de faible densité (236)
55	Seewen	BE	Commune tertiaire périurbaine de faible densité (237)
56	Unterbaech	VS	
57	Brienz	BE	Commune touristique d'un centre rural (314)
58	Gstaad (Saanen)	BE	
59	Frick	GT	Commune industrielle d'un centre rural (316)
60	Langnau dans l'Emmental	BE	Commune de services d'un centre rural (317)
61	Bowil	BE	Commune agricole rurale et centrale (325)
62	Gonten	AI	
63	Diessenhofen	TG	Commune industrielle rurale située au centre (326)
64	Laufenburg	GT	
65	Ruete	AI	
66	Nesslau	SG	Commune rurale et centrale de services (327)
67	Disentis	GR	Commune touristique rurale périphérique (334)
68	Escholzmatt-Marbach	LU	Communauté rurale périphérique (335)
69	Lungern	OW	Commune rurale périphérique mixte (338)
70	Zweisimmen	BE	

## VI Liste des sites de mesures spot

Tableau 24: Liste des mesures spot avec la commune d'implantation et l'ID du micro-environnement ainsi que la catégorie de bâtiment (GKAT) du registre des bâtiments GWS.

ID du spot	Commune	Source primaire	Type de maison	GKAT
spot_002	Muenchenstein	Lignes à très haute tension 220 /380kV (lignes aériennes)	MAISON FAMILIALE	1021
spot_003	Muenchenstein	Lignes de tramway	MFH	1030
spot_019	Soleure	Lignes de chemin de fer à voie unique	MAISON FAMILIALE	1021
spot_021	Deitingen	Lignes de chemin de fer à double voie	Ferme	1025

## VII Correction crosstalk

Tableau 25: Réduction de l'exposition totale aux CEM HF après correction crosstalk avec les moyennes non corrigées et corrigées, le pourcentage de réduction et les différences absolues entre les moyennes non corrigées et corrigées par type d'environnement de mesure pour les valeurs RMS et les valeurs de pic.

Type d'environnement de mesure	RMS						Peak					
	Nombre de mesure	Nombre de ME	Valeur moyenne non corrigée [V/m]	Valeur moyenne corrigée [V/m]	Réduction moyenne [%]	Réduction moyenne [V/m]	Nombre de mesure	Nombre de ME	Moyenne non corrigée [V/m]	Valeur moyenne corrigée [V/m]	Réduction moyenne [%]	Réduction moyenne [V/m]
Train	17994	62	0.308	0.305	1.0	0.003	17832	61	2.104	2.091	0.6	0.013
Tram	500	5	0.339	0.337	0.6	0.002	501	5	2.01	2.002	0.4	0.008
Bus	1046	10	0.236	0.233	1.3	0.003	1013	10	1.418	1.401	1.2	0.017
Metro	105	1	0.255	0.253	0.8	0.002	105	1	1.665	1.659	0.4	0.006
Téléphérique	439	2	0.138	0.138	0.0	0.000	438	2	0.934	0.932	0.2	0.002
Centre de la grande ville	977	5	0.385	0.377	2.1	0.008	979	5	2.088	2.039	2.3	0.049
Zone résidentielle centrale	1015	6	0.285	0.281	1.4	0.004	1017	6	1.525	1.512	0.9	0.013
Zone d'habitation décentralisée	1504	8	0.240	0.237	1.3	0.003	1504	8	1.485	1.477	0.5	0.008
Centre-ville	2796	17	0.212	0.204	3.8	0.008	2794	17	1.332	1.304	2.1	0.028
Zone résidentielle	3411	20	0.194	0.191	1.5	0.003	3410	20	1.064	1.052	1.1	0.012
Zone industrielle	1365	8	0.408	0.403	1.2	0.005	1365	8	2.644	2.618	1.0	0.026
Zone de sport/loisirs	553	3	0.305	0.303	0.7	0.002	554	3	1.679	1.655	1.4	0.024
Zone agricole	633	3	0.169	0.169	0.0	0.000	471	2	0.426	0.419	1.6	0.007
Zone naturelle	939	5	0.083	0.083	0.0	0.000	938	5	0.361	0.359	0.6	0.002
Gare ferroviaire	1582	17	0.330	0.326	1.2	0.004	1509	16	1.863	1.85	0.7	0.013
Arrêt de tramway	284	5	0.663	0.661	0.3	0.002	284	5	4.223	4.215	0.2	0.008
Arrêt de bus	494	6	0.383	0.379	1.0	0.004	495	6	2.391	2.376	0.6	0.015
Aéroport	174	1	0.407	0.400	1.7	0.007	174	1	2.767	2.736	1.1	0.031

Type d'environnement de mesure	RMS						Peak					
	Nombre de mesure	Nombre de ME	Valeur moyenne non corrigée [V/m]	Valeur moyenne corrigée [V/m]	Réduction moyenne [%]	Réduction moyenne [V/m]	Nombre de mesure	Nombre de ME	Moyenne non corrigée [V/m]	Valeur moyenne corrigée [V/m]	Réduction moyenne [%]	Réduction moyenne [V/m]
Supermarché	669	5	0.239	0.233	2.5	0.006	672	5	1.586	1.553	2.1	0.033
Restaurants	4408	13	0.183	0.181	1.1	0.002	4402	13	1.094	1.083	1.0	0.011
Musée	529	1	0.347	0.346	0.3	0.001	528	1	2.062	2.057	0.2	0.005
EPF/UNI/HES	403	3	0.143	0.142	0.7	0.001	403	3	0.695	0.694	0.1	0.001
Bibliothèques	151	1	0.295	0.294	0.3	0.001	151	1	2.241	2.24	0.0	0.001