



## CHAMPS ÉLECTROMAGNÉTIQUES : DE LA DOSIMÉTRIE À LA SANTÉ HUMAINE

### Analyse conjointe de l'exposition des populations et de la couverture radio des réseaux de téléphonie mobile GSM et UMTS

### Joint analysis of the population exposure and radio coverage of the GSM and UMTS mobile phone networks

---

*François Gaudaire\**, *Nicolas Noé\**, *Jean Benoit Dufour\*\**, *René De Sèze\*\*\**.

\*Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), [francois.gaudaire@cstb.fr](mailto:francois.gaudaire@cstb.fr)

\*\* Géomod, [jbdufour@geomod.fr](mailto:jbdufour@geomod.fr)

\*\*\* Institut National de l'Environnement et des RISques (INERIS), [rene.de-seze@ineris.fr](mailto:rene.de-seze@ineris.fr)

---

Mots-clefs (*en français et en anglais*) : exposition aux champs électromagnétiques, stations de base de téléphonie mobile, modélisation numérique, mesures de champs électromagnétiques (*EMF exposure, mobile phone network base station, numerical simulation, electromagnetic fields measurements*)

---

*Les travaux présentés ont été réalisés dans le cadre du Comop « expérimentations », piloté par le Ministère du Développement Durable et l'Agence Nationale des Fréquences.*

#### Résumé

Nous présentons la description et les premiers résultats de l'étude technique menée dans le cadre du Comop « expérimentations » issu de la table-ronde « radiofréquences, santé, environnement ». Ces travaux sont pilotés par l'ANFR et le Ministère du Développement Durable. Ils concernent les antennes de stations de base des réseaux de téléphonie mobile et ont pour objet l'analyse conjointe de l'exposition des populations et de la couverture de ces réseaux à l'échelle du territoire. Dix-sept communes pilotes représentatives ont été sélectionnées. Pour chacune il a été réalisé un état des lieux de la situation actuelle en termes d'exposition, de couverture et de qualité de service, ainsi que des expérimentations d'abaissement de l'exposition par la baisse des puissances d'émission des antennes de stations de base. Ces travaux reposent sur des méthodes de modélisation numérique innovantes associées à différentes campagnes de mesures sur le terrain.

#### Introduction

Une table-ronde « radiofréquences, santé, environnement » organisée par le Ministère de la Santé s'est réunie au cours du mois de mai 2009. Suite à cette table-ronde, le gouvernement a retenu plusieurs orientations, et notamment la réalisation de modélisations et de mesures de l'exposition aux champs électromagnétiques radiofréquences émis par les antennes de stations de base de téléphonie mobile, ainsi que d'expérimentations sur la diminution de cette exposition tout en évaluant en parallèle l'impact sur la couverture du territoire et sur la qualité de service des réseaux.

Un comité opérationnel (Comop), chargé notamment de la mise en œuvre de cette orientation, a été installé par la secrétaire d'Etat chargée de l'écologie en juillet 2009. Ce comité opérationnel rassemble l'Etat, les élus, les associations, les opérateurs et des personnalités qualifiées, sous la présidence du député François Brottes, avec l'appui administratif du Ministère du développement durable et l'appui technique de l'ANFR. Un groupe technique, sous l'égide de l'ANFR, est en charge du suivi des études de modélisations et d'expérimentations.

#### 1. Principe de l'étude : état des lieux des réseaux de téléphonie mobile existants

Les travaux de modélisations et d'expérimentations ont pour vocation une analyse conjointe de l'exposition des populations et de la couverture des réseaux de téléphonie mobile à l'échelle du territoire, à travers un état des lieux de la situation actuelle et des expérimentations d'abaissement de l'exposition par la baisse des puissances d'émission des antennes de stations de base.

Pour être représentatif de la diversité des environnements rencontrés sur le territoire, six environnements types ont été définis : *rural avec relief faible, rural montagneux, périurbain, urbain moderne dense, urbain ancien dense, quartier d'affaire / haute densité*. Après une phase d'appel à candidatures, le comité opérationnel a sélectionné dix-sept

communes pilotes volontaires représentatives de ces six environnements types, pour réaliser les expérimentations sur les réseaux de téléphonie mobile. Une zone d'expérimentation a été définie sur une partie du territoire de chaque commune. L'état des lieux des réseaux a été réalisé pour chaque commune pilote avec :

- **Modélisation de l'exposition des populations (CSTB et Géomod)**

Les niveaux d'exposition ont été modélisés numériquement avec un logiciel de simulation à partir des données géographiques (couches terrain et bâti de la zone d'expérimentation) et des données techniques des émetteurs. Cette modélisation permet une analyse quantitative et qualitative de l'exposition de la population à l'échelle urbaine (dans les zones d'expérimentation définies pour chaque commune pilote).

- **Mesure de l'exposition des populations (INERIS)**

Pour chaque commune des campagnes de mesures ont été réalisées afin de compléter et affiner les résultats de la modélisation numérique. Il s'agit de réaliser des mesures à l'intérieur des bâtiments, de confronter les résultats des mesures et ceux des modélisations et de quantifier l'influence du trafic sur les réseaux de téléphonie dans le niveau d'exposition des populations.

- **Caractérisation de la couverture et de la qualité de service (ATDI<sup>1</sup> et GET<sup>2</sup>)**

Des calculs de couverture des réseaux ont été effectués pour l'ensemble des réseaux de chaque opérateur (2G /3G, indoor / outdoor). Ces modélisations ont été complétées par des mesures in situ de qualité de service (voix et data), pilotées par l'Arcep, dans l'ensemble des zones d'expérimentation de chaque commune pilote.

Ces études sur la couverture des réseaux et la qualité de service sont relativement classiques en ingénierie réseau du coté des opérateurs, et pour les contrôles et vérifications périodiques réalisées par l'Arcep. La suite de cet article se focalise plus spécifiquement sur la partie concernant la modélisation numérique et la mesure de l'exposition.

## 2. Modélisation numérique pour le calcul des niveaux d'exposition

Les niveaux d'exposition ont été modélisés numériquement avec le logiciel de simulation MITHRA-REM développé par le CSTB et la société Géomod. Le principe de ce logiciel repose sur le calcul des trajets de propagation entre les émetteurs radioélectriques et des points récepteurs, en prenant en compte les interactions avec l'environnement urbain et les phénomènes physiques associés : réflexions et diffractions sur les obstacles et bâtiments situés dans la zone de calcul.

### 2.1. Données d'entrée

La modélisation numérique utilise comme données d'entrée les données topologiques et les caractéristiques des émetteurs radioélectriques. Les données topologiques sont basées sur les formats standards des systèmes d'information géographique (SIG) et consistent en plusieurs couches de données spatialisées : description du terrain, végétation, position et géométrie des bâtiments. Dans le cadre de ce projet ces données sont fournies par le Centre d'Études Techniques de l'Équipement (CETE) de Lyon à partir des bases de données BDtopo de l'IGN. Un important travail de consolidation et vérification des données a été effectué par le CETE à partir de visites in situ, de comparaison avec d'autres données (cadastres, photos) et d'échanges d'informations avec les services techniques des communes pilotes.

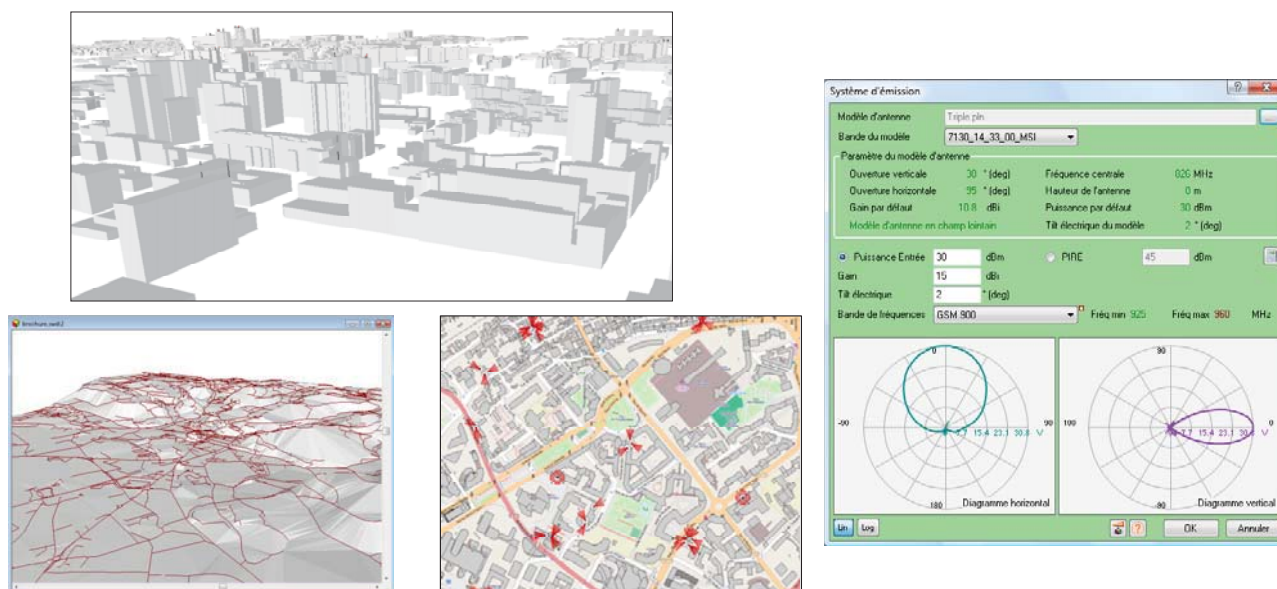


Figure 1 : modèle numérique de calcul – données terrain, bâti et émetteurs

<sup>1</sup> <http://www.atdi.fr/>

<sup>2</sup> Global Engineering Telecom, <http://www.get-telecom.com/>

Ce travail de consolidation permet de minimiser les erreurs du modèle et aussi d'affecter aux bâtiments des caractéristiques de matériaux de façades auxquelles sont associées dans le logiciel les caractéristiques électromagnétiques correspondantes (permittivité et conductivité).

Les données liées aux émetteurs radioélectriques GSM et UMTS, validées et consolidées par l'ANFR, ont été fournies par chacun des opérateurs de téléphonie mobile : plans d'installation pour permettre la localisation précise dans le modèle numérique, modèle d'antenne (diagramme de directivité, gain), azimut, tilts électrique et mécanique, puissance maximale d'émission, fréquences de l'émetteur.

Les émetteurs sont positionnés dans le modèle numérique à partir des plans d'installation et des photos des stations de base disponibles. Pour chacune des communes pilotes, le modèle numérique de calcul de la zone d'expérimentation est ainsi construit.

### 2.2. Méthode de modélisation

La modélisation numérique des niveaux d'exposition repose sur la résolution des équations de propagation des champs électromagnétiques entre un émetteur et un point récepteur. Compte tenu des longueurs d'onde concernées, dans le domaine des radiofréquences, et des dimensions caractéristiques des bâtiments à l'échelle urbaine, les méthodes issues d'un développement asymptotique des équations de propagation (méthodes "rayons", basées sur la TUD - théorie uniforme de la diffraction) permettent des solutions rapides à des problèmes complexes de propagation.

Ces méthodes nécessitent de réaliser un calcul géométrique et un calcul physique.

- Calcul géométrique : il s'agit de trouver l'ensemble des trajets de propagation entre l'émetteur et le point récepteur en prenant en compte les interactions avec les bâtiments et le terrain que sont la réflexion spéculaire, la diffraction par les arêtes et par les surfaces des bâtiments. Ce calcul est réalisé pour tous les émetteurs de la zone d'expérimentation à partir d'un algorithme performant de lancer de faisceaux adaptatif.
- Calcul physique : il s'agit de calculer les contributions associées à ces trajets de propagation, via les coefficients de réflexion et de diffraction et la prise en compte des caractéristiques de l'émetteur (diagramme de directivité, puissance d'émission).

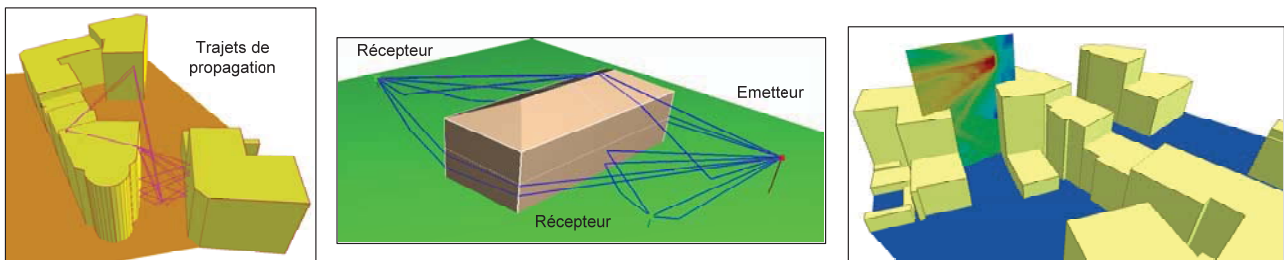


Figure 2 : trajets de propagation entre émetteur et récepteur permettant de calculer les niveaux de champ électrique

### 2.3. Rendus et analyses

Dans le cadre de ce projet qui s'intéresse aux niveaux d'exposition de la population à l'échelle de territoires, la modélisation de l'exposition est réalisée à l'extérieur des bâtiments, en prenant en compte la puissance maximale installée de chaque émetteur. Le niveau d'exposition affiché est le cumul des niveaux de champ électrique calculés pour les trois réseaux : GSM 900, GSM 1800 et UMTS.

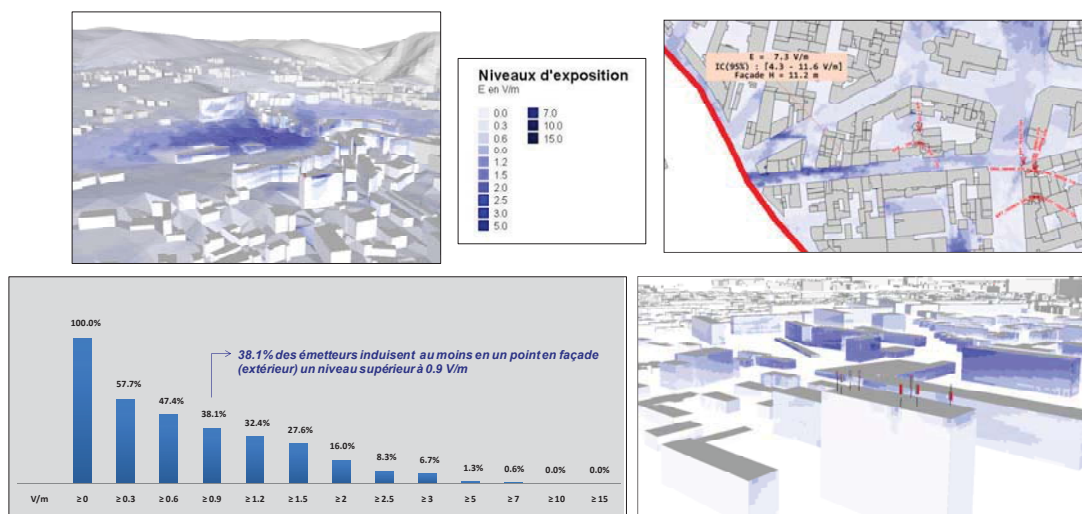


Figure 3 : rendus de la modélisation numérique - niveaux de champ électrique calculés



Pour chaque commune pilote, les niveaux de champ électrique sont calculés à 1,5 mètre au dessus du sol et sur l'ensemble des façades des bâtiments de la zone d'expérimentation. Les résultats sont présentés sous forme de cartes de couleur et de graphes de répartition des niveaux d'exposition (pourcentages de surfaces exposées, répartition par émetteurs).

La modélisation numérique permet au travers d'une analyse exhaustive de la répartition de l'exposition à l'échelle de la zone d'expérimentation d'identifier les zones les plus exposées dans lesquelles l'INERIS peut effectuer des mesures. Elle permet de plus dans cette phase d'état des lieux d'identifier des points d'exposition « atypiques » qui font l'objet de traitement correctif par les opérateurs de téléphonie mobile.

### 3. Campagnes de mesures des niveaux d'exposition

Ces mesures ont consisté en :

- **Mesures spectrales en quelques points identifiés par la modélisation numérique (« zones les plus exposés »)**

L'identification de zones plus exposées est effectuée à partir des résultats des modélisations numériques. Chaque zone correspond à un lieu de vie identifié sur le terrain (appartement, espace public...). Les niveaux d'exposition liés aux antennes de téléphonie mobile y sont mesurés précisément avec un analyseur de spectre sur la base du protocole ANFR : recherche dans le lieu du point d'exposition maximum, mesures spectrales avec un moyennage spatial sur trois hauteurs, identification des voies balises (BCCH) et du canal de contrôle (CPICH) pour une extrapolation des résultats au trafic maximum (à partir des données de trafic des opérateurs). Pour les bandes de fréquences de téléphonie mobile, ces mesures sont comparées aux valeurs calculées par la modélisation numérique.

- **Mesures embarquées géo référencées dans les rues de la zone d'expérimentation**

Afin de valider les résultats de la modélisation numérique sur la distribution spatiale du niveau de champ électrique dans chaque zone d'expérimentation, une cartographie du niveau de champ est réalisée à l'aide d'un dosimètre sur un trajet dans les rues du quartier. Les mesures sont effectuées à une fréquence rapide d'échantillonnage (4 secondes), avec un dosimètre placé à l'extérieur d'une voiture sur un support non métallique. Bien que l'étude ne concerne que les émetteurs de stations de base de téléphonie mobile, ces mesures sont réalisées sur l'ensemble des bandes radiofréquences : FM, TV, GSM 900, 1800 et UMTS (montantes et descendantes), TETRA, Wifi (2.4 et 5 GHz), Wimax. Les mesures sont couplées à un GPS ce qui permet une représentation géo référencée des niveaux de champ cumulé ou par bande de fréquences. Les résultats des mesures sont ensuite affichés sous forme de points colorés dans le modèle numérique et peuvent être visualisés et analysés conjointement avec les résultats de modélisation.

- **Mesures d'exposition individuelle à l'aide de dosimètres portés par des personnes pendant une semaine**

Des dosimètres individuels sont confiés à trois personnes qui résident ou travaillent dans les zones les plus exposées identifiées par la modélisation numérique. Ils sont portés pendant 24 heures par deux personnes et pendant une semaine par une personne. Un journal de bord est fourni aux volontaires afin de recueillir un certain nombre d'informations sur leur situation, leurs activités et leur environnement pendant la période de mesures. Il n'est pas prévu d'exploitation statistique systématique et de croisement de données ; les résultats sont analysés individuellement afin d'identifier de possibles corrélations entre des niveaux de champ et une situation ou une activité donnée. L'objectif de cette dosimétrie individuelle est de comparer l'exposition d'un individu au cours de la journée en différents emplacements par rapport à l'exposition mesurée au point le plus exposé identifié par la modélisation. Elle permet de plus d'améliorer la connaissance de l'exposition individuelle aux ondes radiofréquences.

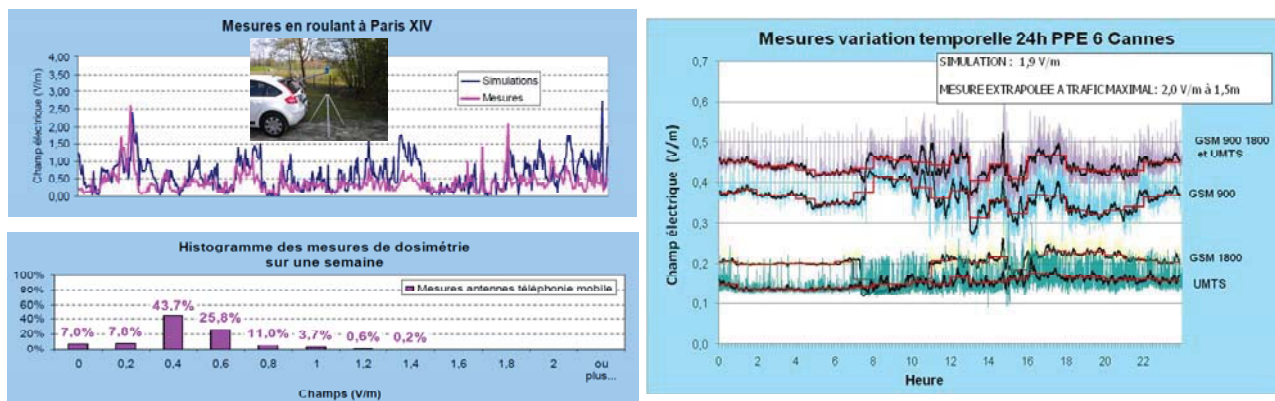


Figure 4 : exemple de résultats des différentes campagnes de mesures

- **Mesures de durée prolongée (24h à une semaine) en des points fixes avec une sonde sélective**

Dans chaque commune pilote, trois zones plus exposées font l'objet d'une mesure de la variabilité temporelle de l'exposition à la radiotéléphonie mobile à l'aide d'une sonde de mesure en continu et sélective en fréquences. La sonde est déposée sur un support non métallique pendant 24 heures sur deux points, et pendant une semaine sur le troisième point. L'intervalle d'échantillonnage est de 13 secondes pour les mesures sur 24 heures, de 1,5 minutes pour les

mesures sur une semaine. Les résultats de ces mesures permettent sous forme de courbes de variations temporelles de comparer différents moyennages des niveaux d'exposition (résultats bruts, moyennage sur 6 minutes, par tranche horaire...). Ces résultats sont également utilisés pour corriger à hauteur du trafic réel moyen mesuré les valeurs maximum théoriques modélisées ou mesurées et extrapolées en fonction de la période de la journée.

#### 4. Résultats et perspectives

L'état des lieux de l'exposition liée aux stations de base de téléphonie mobile a porté sur dix-sept communes représentatives des 6 environnements types, en utilisant de façon conjointe et complémentaire les résultats de modélisations numériques et des campagnes de mesures.

Globalement les niveaux d'exposition dépendent de la densité de population et donc des usages de la téléphonie mobile : la puissance d'émission et le nombre d'émetteurs sont proportionnels aux débits des réseaux installés par les opérateurs. L'exposition est donc sensiblement plus faible dans les zones rurales (peu d'émetteurs, peu d'utilisateurs potentiels) et plus élevée dans les zones urbaines denses. La distribution des niveaux d'exposition, au dessus du sol et sur les façades des bâtiments, est de forme relativement constante pour tous les environnements types. Des zones plus exposées apparaissent à proximité de certains émetteurs, en fonction des configurations d'installation des émetteurs sur le terrain (présence de bâtiments à proximité de l'émetteur, hauteur faible de l'émetteur...).

Cette étude a aussi permis au travers de la modélisation d'isoler localement des zones et configurations d'exposition « atypiques » et, avec les opérateurs de téléphonie mobile, de proposer des solutions techniques pour les résorber.

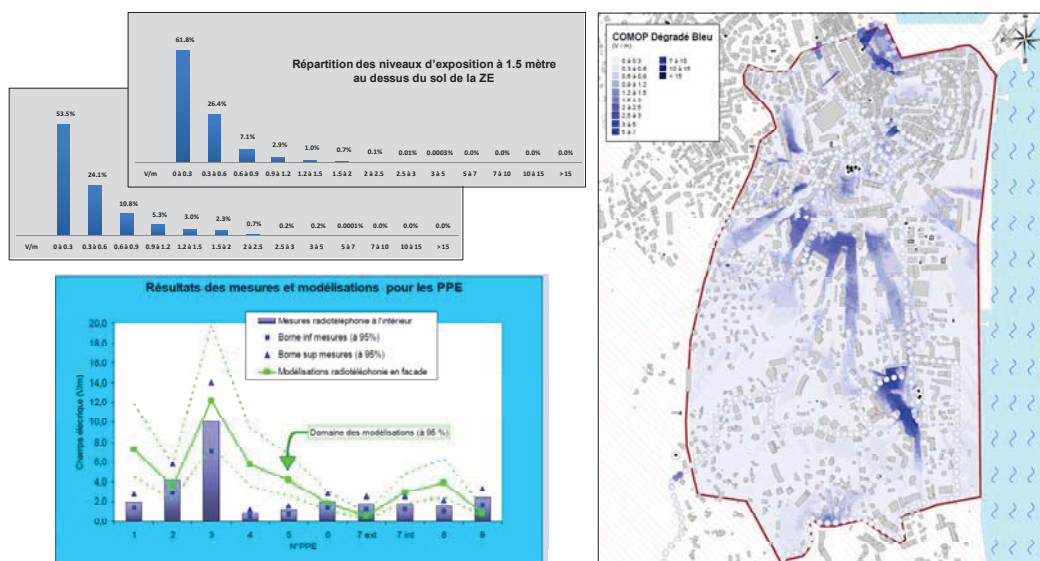


Figure 5 : répartition des niveaux d'exposition au dessus du sol dans une zone d'expérimentation – comparaison modélisation / mesures spectrales ou modélisation / mesures avec un dosimètre embarqué

Cette approche combinant la modélisation numérique et la mesure sur le terrain est tout à fait pertinente pour mieux appréhender et caractériser l'exposition des populations :

- La modélisation numérique permet une analyse exhaustive de l'exposition à grande échelle sur un territoire et d'identifier des zones plus exposées qui sont pertinentes pour y réaliser des mesures. Elle permet aussi par calcul l'étude de différents scénarios et de l'impact sur l'exposition de modifications des réseaux. Compte tenu des modèles de bâti disponibles et de la complexité des méthodes, la modélisation est limitée dans ce projet aux environnements extérieurs des bâtiments et donne donc par exemple des niveaux plus élevés par rapport à l'exposition à l'intérieur des bâtiments.
- Les campagnes de mesure permettent de se rapprocher au plus près de la réalité de l'exposition des personnes au travers de différents protocoles de mesure : sondes de mesure fixes en un lieu donné sur une longue période de temps, dosimètre porté par une personne dans ses déplacements quotidiens, mesures sélectives en fréquence au point le plus exposé d'un lieu donné, mesures dans les rues avec un dosimètre embarqué sur un véhicule.

Les résultats de modélisations et les résultats de mesures ont été systématiquement comparés. Cette analyse a permis, compte tenu des incertitudes affichées dans chacun des domaines, de valider conjointement l'ensemble de l'approche choisie.

Cette étude montre aussi la complexité d'appréhender ce qu'est réellement l'exposition des populations, du fait du manque d'indicateurs d'exposition consensuels et des multiples approches complémentaires : exposition d'une personne ou d'une population, d'un lieu extérieur ou intérieur, en tenant compte de la variabilité spatiale et/ou temporelle...

Les travaux se poursuivent par l'étude de la diminution de puissance pour différents scénarios de réduction de l'exposition. La modélisation numérique permet de calculer les puissances d'émission des antennes qui respectent un seuil d'exposition donné. Certains des scénarios modélisés sont en cours d'expérimentation sur le terrain et seront

complétés le cas échéant par un calcul de reconfiguration du réseau pour retrouver la couverture et la qualité de service initiale tout en conservant des contraintes sur les niveaux d'exposition.

Cette étude d'envergure a permis d'établir un état des lieux scientifique très complet sur la réalité de l'exposition des populations aux antennes de stations de base de radiotéléphonie mobile : cartographies et répartitions des niveaux de champs électriques issus de modélisations numériques, complétées par de nombreux résultats de mesure sur le terrain. Associés aux données de couverture et de qualité de service des réseaux, ces résultats constituent une approche globale innovante et pertinente en termes de concertation dans le débat actuel autour de l'implantation des stations de base des réseaux de téléphonie mobile. Ils apportent aussi des données factuelles et pertinentes sur lesquelles peuvent s'appuyer les décisions publiques.

### **Références bibliographiques**

N. Noé, F. Gaudaire, « Reflection on curved surfaces in a 2.5D ray-tracing method for electromagnetic waves exposure prediction in urban areas » - in proceedings of URSI General Assembly, Istanbul, Turkey, 2011