

### Une méthode de simulation adaptée pour la modélisation France entière de l'exposition aux ondes radioélectriques

#### *A Simulation Method Suited for the Whole French Territory Electromagnetic Waves Exposure*

---

N. Noé<sup>1</sup>, J.B. Dufour<sup>2</sup>, I. Sefsouf<sup>3</sup>, N. Bounoua<sup>2</sup>, E. Conil<sup>3</sup>, J.B. Agnani<sup>3</sup>, and S. Carré<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, Nantes, nicolas.noé@cstb.fr

<sup>2</sup>Geomod, Saint-Didier-au-Mont-d'Or, jean-benoit.dufour@geomod.fr

<sup>3</sup>Agence nationale des fréquences, Maisons-Alfort, ilham.sefsouf@anfr.fr

---

**Mots clés** Exposition aux ondes, Téléphonie mobile, Simulation numérique

**Keywords** EMF exposure, mobile telephony, numerical simulation

---

#### **Résumé / Abstract**

Dans le cadre de son plan de surveillance de l'exposition du public aux ondes, l'Agence nationale des fréquences réalise, en collaboration avec le Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires, le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment et Geomod, une modélisation numérique des niveaux d'exposition aux ondes électromagnétiques émises par les antennes relais de téléphonie mobile à l'échelle du territoire national. Cette modélisation nécessite la mise en œuvre d'une méthode de calcul spécifique. La méthode présentée ici permet de restituer un niveau d'exposition en tout lieu (à l'extérieur et à l'intérieur des bâtiments) tout en conservant des temps de calcul compatibles avec les contraintes opérationnelles. La méthode est basée sur une approche à rayons combinée 2,5D et 3D et sur la prise en compte de zones de calcul dépendant des caractéristiques d'émission des antennes. La méthode est aujourd'hui mise en œuvre sur des zones d'expérimentation avant son déploiement complet.

As part of the process for monitoring public exposure to electromagnetic waves, the national frequency Agency is carrying out, in collaboration with the Ministry of Ecological Transition and Territorial Cohesion, the Scientific and Technical Center for Building (CSTB) and Geomod, a numerical modeling of the electromagnetic waves exposure levels emitted by mobile telephony base stations on a national scale. This paper presents a dedicated simulation method for the numerical modeling of the whole French territory exposure to EMF. This method accounts for EMF exposure everywhere (outdoor and inside buildings), while performing fast enough to fulfill operational constraints. The simulation method relies on a ray-based 2.5D and 3D mixed approach that takes into account computation areas depending on the radiated power pattern of the antennas. The method is yet deployed on pilot areas before a full deployment.

#### **1 Contexte et objectif**

L'action 8 du 4<sup>ème</sup> plan national santé environnement (PNSE4 [1]) consiste à maîtriser l'exposition aux ondes électromagnétiques, et en particulier à obtenir des informations sur le niveau de champ électrique généré par les antennes de téléphonie mobile. Dans ce cadre, l'Agence nationale des fréquences (ANFR) réalise, avec le Ministère de la Transition Écologique et de la Cohésion des territoires, le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) et Geomod, une modélisation numérique des niveaux d'exposition aux ondes électromagnétiques émises par les antennes relais de téléphonie mobile à l'échelle du territoire national.

Une des particularités est donc le grand volume de calcul à considérer. En effet, jusqu'à présent les simulations d'exposition étaient essentiellement réalisées dans l'environnement très proche des antennes. Par exemple pour le respect des normes sanitaires ou dans le cadre de réglementations locales : dossiers d'information mairie [2] lors de l'implantation d'une nouvelle antenne en France, permis d'environnement dans la région de Bruxelles Capitale en Belgique [3] par exemple. En ce qui concerne les calculs de couverture, ils couvrent eux des zones étendues, mais avec une faible résolution spatiale. L'objectif est donc ici d'avoir à la fois un niveau d'exposition en tout point, tout en ayant une bonne connaissance spatiale des niveaux proches des antennes.

## 2 Mise en œuvre

L'objectif présenté, ainsi que la nécessité de produire cette cartographie en un temps raisonnable et de pouvoir la mettre à jour sur une base régulière, demandent donc une méthode de calcul adaptée. La méthode développée consiste à traiter les calculs station de base par station de base, avant de procéder à une agrégation des résultats pour obtenir un niveau d'exposition global en tout point.

### 2.1 Données d'entrée

Les antennes sont issues de la base STATIONS de l'ANFR (base de données interne de l'ANFR, sur la base de données saisies par les opérateurs). Du point de vue calcul, une antenne correspond à une position 3D et à une orientation (azimut et tilt mécanique). Chaque antenne est composée d'un certain nombre d'émetteurs (pour les différentes technologies et bandes de fréquences). Chaque émetteur possède une PIRE (Puissance Isotrope Rayonnée Équivalente) et un diagramme de rayonnement en champ lointain (incluant le tilt électrique), généralement composé de deux coupes (une dans le plan horizontal, une dans le plan vertical) à partir desquelles un diagramme de rayonnement en 3D est recomposé (voir Figure 1).

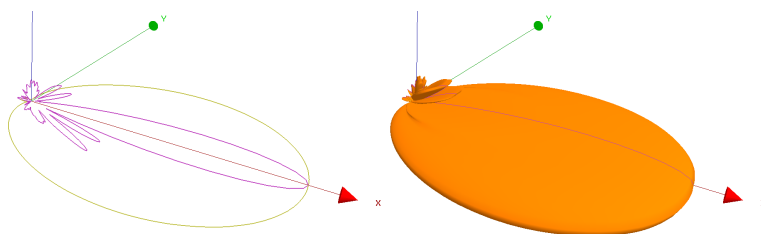


FIGURE 1 : Diagramme de rayonnement d'une antenne (en linéaire) : à gauche coupe horizontale et verticale (données d'entrée), à droite diagramme 3D recomposé pour la simulation

Le modèle géométrique (voir Figure 2) est principalement issu de la BDTPOPO de l'IGN. Dans ce cas il s'agit de bâtiments en 2,5D, c'est-à-dire un polygone représentant le contour de toit et une hauteur, mais pas de forme de toiture précise. Cependant on peut aussi prendre en compte des modèles avec des descriptions plus précises, en particulier des formes de toitures, aucune hypothèse n'étant faite sur la modélisation des bâtiments, qui peut être en vraie 3D. Le terrain est lui aussi issu des bases de données de l'IGN.

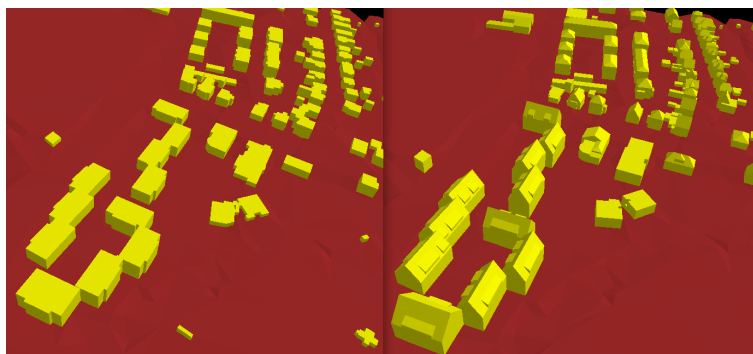


FIGURE 2 : Extrait du modèle géométrique utilisé pour les simulations : BDTPOPO IGN (à gauche), maquette 3D Eurométropole de Strasbourg (à droite) avec toitures détaillées

### 2.2 Pré-traitement

#### 2.2.1 Zone de calcul

Tout d'abord une méthode heuristique (modèle de Hata étendu [4]), prenant en compte la typologie d'environnement (rural, urbain, ...) ainsi que la puissance et les diagrammes de rayonnement dans le plan horizontal des antennes est

utilisée pour déterminer la zone de calcul autour de la station de base, en fonction d'un seuil de niveau d'exposition minimal comme illustré sur la Figure 3. Cette approche permet de s'affranchir d'un paramètre type "distance de propagation maximale" et d'avoir un comportement homogène pour des simulations sur des antennes de puissances hétérogènes.

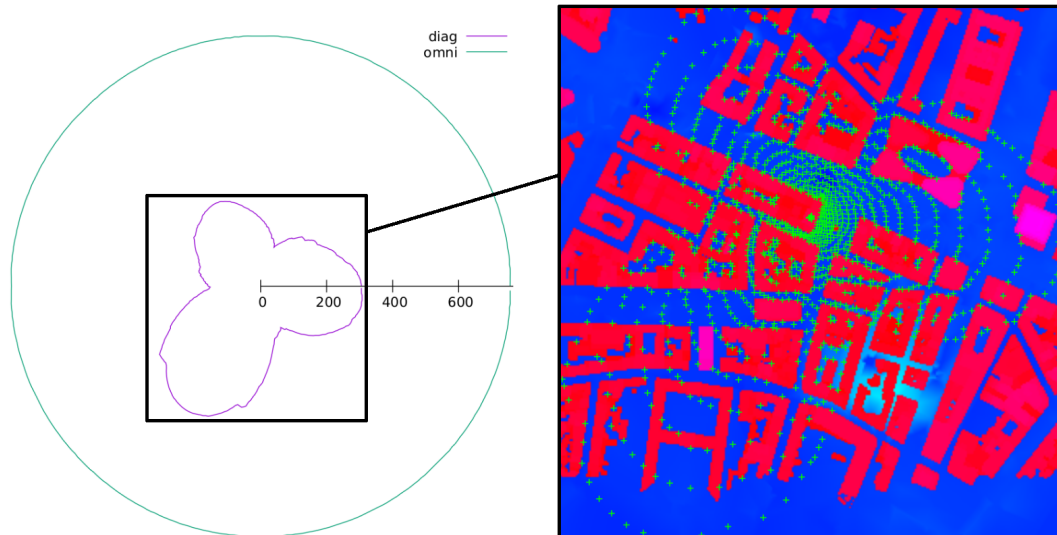


FIGURE 3 : Détermination de la zone de calcul autour d'une station de base composée de trois antennes avec trois azimuts (à gauche) et récepteurs de calcul au sol (croix vertes) dans la zone (à droite)

## 2.2.2 Modèle de calcul

Une fois la zone de calcul déterminée, on extrait des bases de données géographique le sol (sous la forme d'une triangulation) et les bâtiments (sous la forme de polygones en 3D) couvrant la zone. La zone de calcul est alors peuplée de points de calcul, au sol et en façade des bâtiments. La densité des points de calculs est adaptée en fonction de la distance à l'antenne (voir Figure 3). Les récepteurs en façade sont créés sous la forme de colonnes verticales de plusieurs points à la même position horizontale, mais avec plusieurs hauteurs. Loin de l'antenne, on ne crée qu'un seul récepteur par façade des bâtiments, et dans le cas de maisons individuelles de faible hauteur, on ne crée alors qu'un seul récepteur sur le dessus du bâtiment.

Cette réduction des points de calcul vise à accélérer les calculs, mais la méthode présentée ici est générale et ne repose pas sur ce maillage adaptatif pour fonctionner.

## 2.3 Calculs géométriques

Les calculs sont réalisés avec une approche de type lancer de rayons, pour déterminer les chemins de propagation (par réflexion et diffraction par les obstacles) entre les antennes et les points de calcul. Cette approche est bien adaptée à la gamme de fréquences de la téléphonie mobile (700 MHz - 3,5 GHz, soit des longueurs d'onde entre 43cm et 8cm) et au niveau de détail des modèles géométriques (de l'ordre du mètre). Chaque calcul est réalisé en deux étapes, l'une en vraie 3D, l'autre en 2,5D.

### 2.3.1 Calcul géométrique en vraie 3D

Dans une zone circulaire proche horizontalement de l'antenne (typiquement 200 mètres), on réalise un calcul en vraie 3D (voir Figure 4, extrait du modèle de la Figure 3), prenant en compte la réflexion et la diffraction par les façades, les toitures et le sol. La méthode utilisée est celle d'un lancer de faisceaux adaptatif en 3D [6]. Les calculs sont généralement limités à deux réflexions par les obstacles.

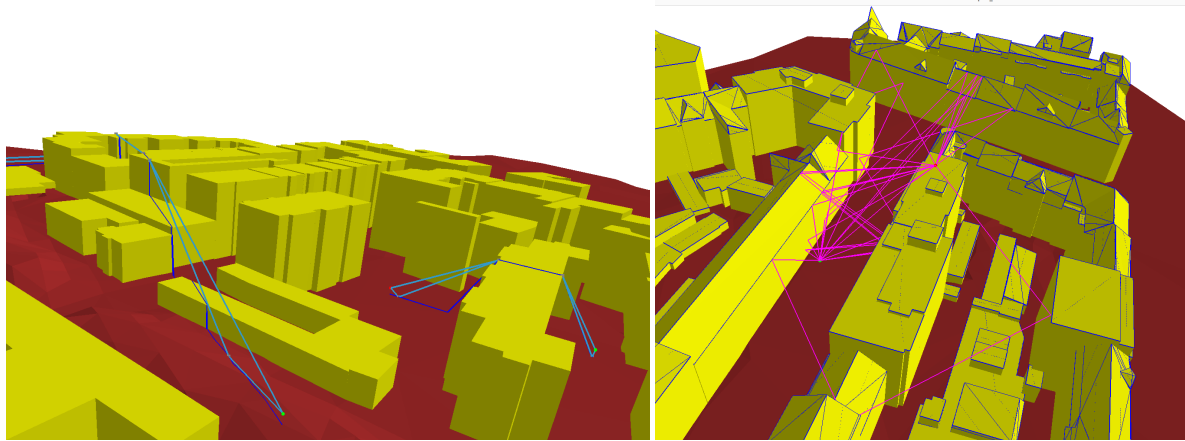


FIGURE 4 : À gauche : exemples de trajets calculés en 2,5D (profil de terrain en bleu foncé, trajets 3D obtenus avec réflexions de sol en bleu clair). À droite : exemples de trajets calculés en 3D.

### 2.3.2 Calcul géométrique en 2,5D

On calcule ensuite en 2,5D sur toute la zone. On détermine, pour chaque récepteur de calcul de la zone, un chemin de propagation principal vu dans le plan horizontal, en trouvant la coupe de terrain et bâti le long de ce chemin. Ce chemin de propagation est alors transformé en chemins 3D, faisant apparaître des diffractions par le dessus des bâtiments et / ou par le sol. On ajoute ensuite les réflexions sur le sol (dans des plans perpendiculaires à la coupe de terrain), comme illustré sur la Figure 4. Ce calcul 2,5D très rapide est réalisé sur une zone beaucoup étendue.

### 2.3.3 Agrégation des calculs 3D et 2,5D

Les deux calculs sont enfin agrégés, en s'assurant que dans la zone circulaire proche de l'antenne, on ne compte pas plusieurs fois les mêmes contributions (issues du calcul 3D et du calcul 2,5D). On se base pour cela sur le type d'interaction (réflexion, diffraction, ...) et les obstacles rencontrés. Pour chaque paire antenne - récepteur, on stocke aussi la différence de marche entre le trajet principal et le trajet réfléchi au sol avec le niveau le plus fort. Cette information sera utilisée ultérieurement pour le calcul du champ en tout point de l'espace.

## 2.4 Calculs physiques

On calcule alors pour chaque chemin de propagation 3D (quel que soit la source du calcul géométrique : 2,5D ou 3D) et pour chaque émetteur, le champ électrique vectoriel au point de réception, en prenant en compte le diagramme de rayonnement, la polarisation et les coefficients de réflexion et de diffraction par les obstacles. Le modèle physique de diffraction utilisé prend en compte les diffractions successives, qu'elles soient entre des obstacles disjoints ou sous la forme d'ondes rampantes, sans limitation du nombre de diffractions (de façon à avoir du niveau partout sur la zone de calcul).

On retient une approche globale des caractéristiques des matériaux (un unique matériau pour le sol, un unique matériau pour les bâtiments) pour chaque simulation. On peut noter que pour les fréquences considérées, le comportement en réflexion des matériaux de construction (béton, bois, brique, ...) n'est pas extrêmement différent et donc que l'influence est limitée.

Le champ électrique est calculé au sol et aussi à l'intérieur des bâtiments (après la première façade) en utilisant un modèle de transmission heuristique (issu du COST 231 [7]) prenant en compte l'angle d'incidence des ondes sur la façade. La encore on utilise un unique matériau de façade pour cette transmission.

Pour chaque émetteur, le calcul est réalisé sur un échantillonnage spectral de sa bande d'émission (une dizaine de fréquences par bande), et une fois toutes les contributions vectorielles complexes sommées, un moyennage quadratique sur la bande est réalisé pour obtenir une seule valeur de champ électrique réelle dans la bande.

## 2.5 Post-traitements

Plusieurs post-traitements sont réalisés afin d'améliorer la qualité des résultats.

### 2.5.1 Recherche des points chauds et lissage

On rappelle que l'objectif est d'avoir une méthode de simulation qui permet d'estimer le niveau de champ électrique partout mais aussi de pouvoir estimer les niveaux forts, à proximité des antennes. Il est important de noter que la variabilité spatiale du champ électrique, en particulier verticalement et en face de l'antenne, est très importante. Le choix des points de calcul fait donc que d'un calcul à l'autre le maximum de champ électrique pourra varier. Pour éviter ce problème, dans le cas d'une visibilité directe entre l'antenne et un récepteur, on ajoute automatiquement un nouveau point de calcul se situant dans le faisceau principal, à la valeur maximum théorique.

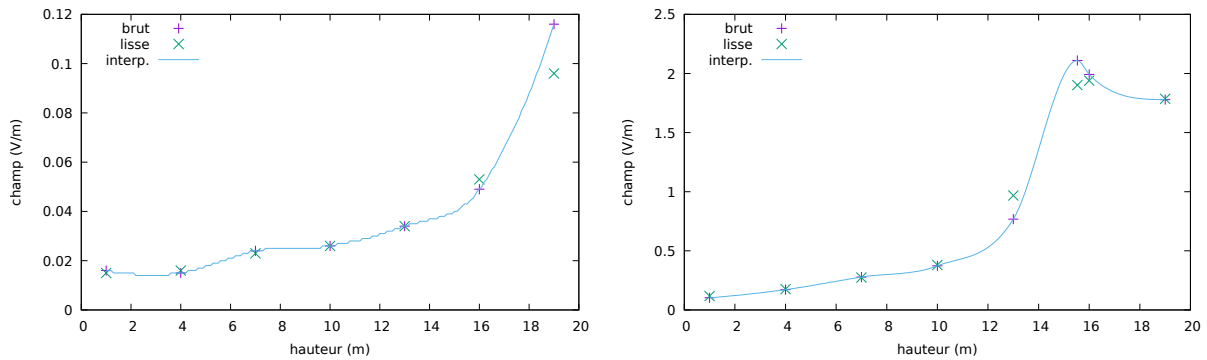


FIGURE 5 : Champ électrique simulé (violet) avec éventuel point de champ maximum ajouté, champ électrique interpolé sur une verticale (bleu) et champ restitué lissé sur 1,5m (vert)

On peut voir sur la Figure 5 les croix violettes régulièrement espacées représentant les points de calcul en façade sur deux verticales. Dans le cas de la courbe de droite, exposée directement, un point supplémentaire à environ 15,5m de hauteur a été rajouté au cours du calcul et représente donc le maximum. Une interpolation cubique positive permet ensuite de trouver la valeur de champ à n'importe quelle hauteur (courbe bleue).

Afin de ne pas surestimer le niveau de ces points chauds simulés par rapport à une mesure d'exposition qui serait réalisée selon un protocole type ANFR, on applique un lissage sur une hauteur de 1,5m avant de restituer le champ électrique final, qui correspond ici aux croix vertes.

### 2.5.2 Interpolation du champ

Afin de restituer une carte au sol réaliste à partir d'un nombre de points limités et potentiellement espacés d'un grand nombre de longueurs d'onde, on utilise la différence de marche obtenue lors du calcul géométrique pour procéder à une interpolation spatiale des niveaux de champ. On dispose de résultats de calculs sous la forme d'un ensemble de paires de champ électrique généré par un émetteur (réel noté  $E$ , en V/m) et de différence de marche (réel noté  $d$ , en m) :  $\{(E_i, d_i)\}$  pour  $i \in \{1, 2, \dots, n\}$ . Chacune de ces paires est associée à un point de calcul. On souhaite faire l'interpolation du champ en un autre point, et on associe donc à chaque point de calcul  $i$  un poids relatif  $\omega_i$  (par exemple coordonnée barycentrique dans un triangle), tel que  $\sum_{i=1}^n \omega_i = 1$ . On calcule alors le champ interpolé selon la formule :

$$E = \left( \sum_{i=1}^n \omega_i \frac{E_i}{\sqrt{1 + 2R \cos(kd_i) + R^2}} \right) \sqrt{1 + 2R \cos \left( k \sum_{i=1}^n w_i d_i \right) + R^2} \quad (1)$$

Où  $k$  est le nombre d'onde (à la fréquence centrale de la bande d'émission de l'émetteur) et  $R$  le coefficient de réflexion en champ diffus par le sol. L'effet de cette interpolation est illustré sur la Figure 6 pour un émetteur omni à 2100MHz situé 10m au dessus d'un sol plan, avec une ligne de récepteurs horizontale, à 1,5m de hauteur et passant à la verticale de l'émetteur. On regarde le champ obtenu pour une distance horizontale de 0 à 100m sur la

ligne de réception, avec un point de calcul tous les 10m (représentés par des croix vertes). Ce champ est la somme du champ direct et du champ réfléchi par le sol avec un coefficient de réflexion en champ de 50%. La solution théorique est donnée en violet, et la solution interpolée en bleu. On constate que l'interpolation avec la différence de marche permet de reproduire des effets d'interférences plus réalistes qu'une interpolation du champ uniquement (ligne verte).

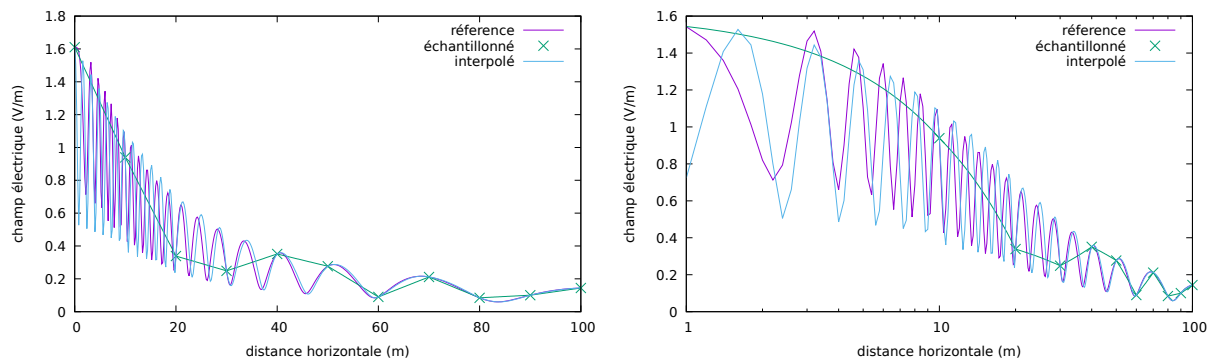


FIGURE 6 : Effet de l'interpolation sur la variation spatiale du niveau de champ électrique

Puisqu'on est capable de calculer le champ partout dans l'espace, il devient alors possible de recomposer des niveaux d'exposition cumulés, pour toutes les antennes. Ces niveaux sont restitués dans des dalles géographiques avec une précision spatiale de 2 mètres.

### 3 Résultats et conclusions

#### 3.1 Performances des calculs

On compare ici les performances entre la méthode de calcul originale utilisée par le logiciel MithraREM (pour l'étude COMOP / COPIC sur la diminution de l'exposition aux ondes électromagnétiques émises par les antennes relais de téléphonie mobile, [8]) et la nouvelle méthode de calcul. Le cas test est composé d'une antenne (avec 7 émetteurs), de 18199 points au sol et 28077 points en façade.

Pour la méthode originale de MithraREM, les paramètres de calcul sont  $d$ , la distance de propagation maximale horizontale, utilisée pour le calcul de tous les trajets. Pour la nouvelle méthode, les paramètres de calcul sont  $d_2 = d$  (le rayon de la zone de calcul complète) et  $d_3$  (le rayon de la zone de calcul en vraie 3D). Dans les deux méthodes, on appelle  $r$  le nombre de réflexions (par les bâtiments). On compare les durées de calcul, les taux d'occupation mémoire (mémoire totale de 16 Go) et le nombre de trajets trouvés par les deux méthodes sur la Table 1.

calcul MithraREM				calcul PNSE4				
d	r	durée	mémoire	$d_2$	$d_3$	r	durée	mémoire
600	0	16s	-	600	150	0	9s	-
600	1	39s	3,6%	600	150	1	11s	1,2%
1200	0	69s	6,4%	1200	200	0	41s	0,8%
1200	1	213s	-	1200	200	1	45s	-

TABLE 1 : Analyse des performances de calcul

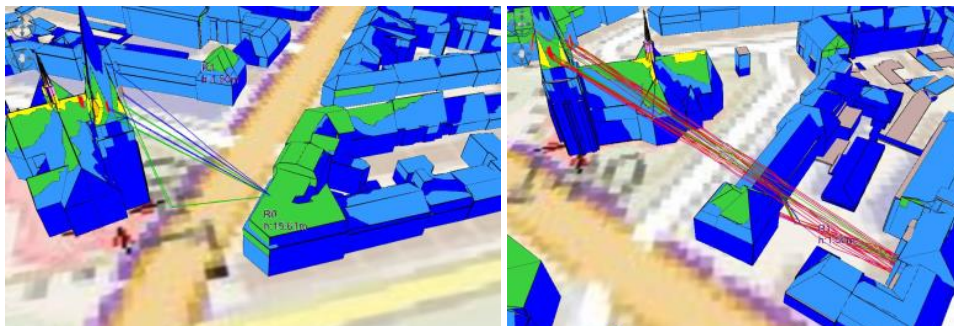
0 réflexion, 46k trajets 2D, 560k trajets 3D, 27s 1 réflexion, 451k trajets 2D, 1440k trajets 3D, 71s

Le nombre de chemins de propagation trouvé par les deux méthodes de calcul est quasi-identique. Pour une situation strictement équivalente ( $r = 0$ ) la nouvelle méthode est 2 à 4 fois plus rapide, et c'est aussi le cas en situation opérationnelle ( $r = 1$ ). En ce qui concerne l'occupation mémoire la nouvelle méthode est aussi 3 fois moins gourmande.

Étant donné que l'on travaille station par station, la parallélisation naturelle des calculs se fait en affectant une station à un cœur de calcul, donc ce gain en occupation mémoire permet d'utiliser à pleine charge les machines de calcul.

### 3.2 Résultats de simulation

Des résultats partiels mais non définitifs ont été obtenus sur des zones de démonstration (Paris et Strasbourg). On peut voir sur la Figure 7 des chemins de propagation en 3D et des niveaux d'exposition en façade.



Maquette 3D :  
Eurométropole  
de Strasbourg

FIGURE 7 : Exemple de calcul d'exposition et des trajets (illustration basée sur des données fictives)

La Figure 8 présente une carte d'exposition au sol avec la palette de couleurs retenue pour le PNSE4.

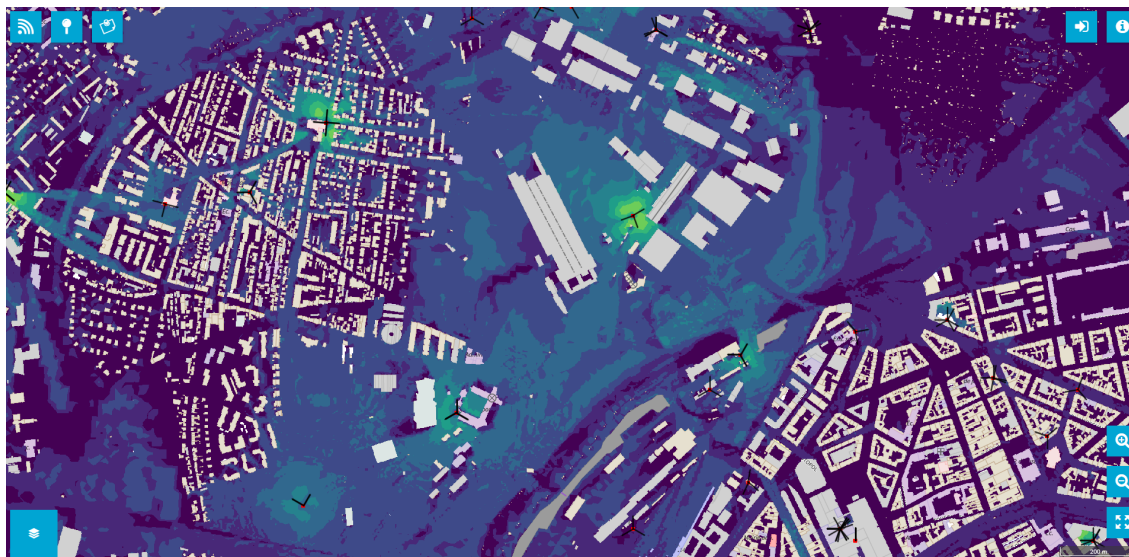


FIGURE 8 : Exemple de calcul de carte d'exposition au sol

### 3.3 Suite des travaux

La méthode de calcul de l'exposition présentée ici permet aujourd'hui de traiter de manière adaptée des simulations de l'exposition aux ondes générées par les antennes de téléphonie mobile en vue du calcul d'une cartographie France entière. Par rapport à la méthode utilisée jusqu'à présent, les calculs sont plus rapides, plus adaptés (c'est un seuil de niveau de champ qui permet de déterminer la zone et non plus des paramètres de calcul figés) et permettent dans le futur de traiter des modèles de villes plus précis.

Un des enjeux cruciaux pour obtenir des résultats de simulation de qualité sera le positionnement des antennes dans l'environnement.

## Références bibliographiques

- [1] <https://solidarites-sante.gouv.fr/IMGpdf/pnse4.pdf>
- [2] <https://www.anfr.fr/maitriser/information-du-public/role-des-maires>
- [3] <https://environnement.brussels/pro/reglementation/controles-et-amendes/comment-les-normes-dexposition-aux-ondes-sont-elles-controlees>
- [4] Rapport UIT-R SM.2028-2, “Méthode de simulation de Monte Carlo à utiliser pour les études de partage et de compatibilité entre différents services ou systèmes radioélectriques”, section 6 (2017)
- [5] N. Noé, F. Gaudaire, M. Diarra Bousso Lo, “Estimating and Reducing Uncertainties in Ray-Tracing Techniques for Electromagnetic Field Exposure in Urban Areas”, IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications (2013)
- [6] N. Noé, F. Gaudaire, P. Jean, M. Vermet, “A General Ray-Tracing Solution to Reflection on Curved Surfaces and Diffraction by their Bounding Edges”, ICTCA 9th convention (2009)
- [7] Commission européenne et Direction générale de la société de l’information et des médias, “COST Action 231 : Digital mobile radio towards future generation systems : Final Report” (1999)
- [8] F. Gaudaire, N. Noé, J.B. Dufour, R. De Dèze, “Analyse conjointe de l’exposition des populations et de la couverture radio des réseaux de téléphonie mobile GSM et UMTS”, *journées URSI France* (2012)