

Etude par simulation de l'évolution de l'exposition du public créée par la téléphonie mobile en zone urbaine très dense (Paris XIV)

Mars 2019

SOMMAIRE

SOMMAIRE	2
1 - CONTEXTE	3
2 - REGLEMENTATION EN MATIERE D'EXPOSITION DU PUBLIC AUX ONDES ELECTROMAGNETIQUES.....	5
3 - DESCRIPTION DE L'ETUDE.....	6
3.1 - DONNEES TERRAIN ET BATIMENTS	6
3.2 - DONNEES DES EMETTEURS RADIOELECTRIQUES	7
3.3 - PARAMETRES DU LOGICIEL MITHRAREM.....	7
3.4 - SCENARIOS DE SIMULATION	9
3.4.1 - <i>Scénario « Etat initial »</i>	9
3.4.2 - <i>Scénario « futur »</i>	9
4 - RESULTATS POUR LE CALCUL « ETAT INITIAL »	11
4.1 - SYNTHESE DES RESULTATS	11
5 - RESULTATS POUR LE CALCUL « SCENARIO FUTUR »	14
5.1 - SYNTHESE DES RESULTATS	14
6 - CONCLUSIONS.....	16

1 - CONTEXTE

Avec le déploiement des réseaux 4G et le refarming associé, c'est-à-dire la réutilisation des bandes de fréquences des réseaux 2G et 3G par la 4G, la question de l'évolution de l'exposition du public aux champs électromagnétiques radiofréquences se pose. Afin d'étudier cette évolution, l'Agence nationale des fréquences a réalisé des simulations numériques des niveaux d'exposition aux champs électromagnétiques radiofréquences créés par les antennes de téléphonie mobile, dans une zone urbaine très dense le 14^{ème} arrondissement de la ville de Paris.

Cette étude contribue à l'analyse de l'évolution de l'exposition et vient compléter l'analyse des mesures dans le cadre de la mission donnée à l'ANFr sur la révision des critères associés à la définition du point atypique.

L'étude se base sur l'évolution de l'exposition en comparant l'état initial au début de l'étude (correspondant à la situation des réseaux de téléphonie mobile fin 2017), et un scénario de déploiement futur. Ce scénario futur est bâti sur une hypothèse d'évolution de déploiement des émetteurs 2G, 3G et 4G, et correspond au déploiement complet de la 4G sur toutes les bandes de fréquences actuelles et sur toutes les stations existantes.

Ce déploiement généralisé des émetteurs 4G – conforme aux obligations de couverture et de qualité de service prévues par les licences 4G accordées par l'Etat aux opérateurs – répond également à une demande massive de la population de connectivité par les réseaux 4G :

- 75 % de la population totale a désormais choisi d'utiliser un smartphone (contre 19 % pour un téléphone classique) ;
- le smartphone est devenu l'équipement préféré des français pour se connecter à l'internet (plus que l'ordinateur) ;
- la part des détenteurs de téléphone mobile utilisant les réseaux 4G pour se connecter à internet a augmenté de 20 points en deux ans (61 % en 2018 et même 74 % dans l'agglomération parisienne) ;
- même à domicile, l'utilisation des réseaux mobiles pour se connecter à internet progresse et lorsqu'ils bénéficient du réseau 4G, le taux d'utilisateurs du réseau mobile à domicile s'établit à 77 % (+ 7 points en deux ans)¹.

La consommation moyenne de données en France double chaque année depuis plus de quatre ans. Elle est en moyenne de 4,8 Go par mois en 2017 en 4G².

¹ [Baromètre du numérique 2018 - ARCEP/CGE/Agence du Numérique](#)

² [Observatoire des marchés des communications électroniques 2017 - ARCEP](#)

Les cartographies des champs électromagnétiques sont réalisées avec le logiciel MithraREM codéveloppé par le CSTB et Geomod. MithraREM est un logiciel de cartographie de l'exposition aux champs électromagnétiques basé sur un calcul des trajets de propagation entre les émetteurs radioélectriques et des points de simulation, en prenant en compte les interactions avec l'environnement (réflexions, diffractions sur les bâtiments et le terrain). MithraREM utilise une approche de type « lancer de rayons », combinée à l'optique géométrique et la théorie uniforme de la diffraction, bien adaptée au calcul de l'exposition autour des antennes de téléphonie mobile.

PRECAUTIONS DE LECTURE :

Cette étude est une analyse théorique consistant en une évaluation utilisant des simulations de l'exposition aux ondes. Même si l'outil de modélisation utilisé a vocation à répondre à l'objectif d'information, ses résultats doivent être interprétés avec prudence, car ils présentent des incertitudes importantes dues aux sources possibles d'erreurs (méthode, environnement, données d'entrée...), comme cela a notamment été mis en évidence dans le cadre des travaux techniques COMOP/COPIEC de 2011, menés à la suite du Grenelle des Ondes de 2009.

Ainsi, les simulations peuvent donner une information sur la tendance ou sur l'évolution moyenne dans une zone, mais elles ne peuvent en aucun cas permettre d'obtenir un résultat fiable en un point donné. Les travaux du COMOP/COPIEC ont montré qu'il existait souvent des écarts substantiels quand on compare, en des points précis, les résultats obtenus avec Mithra-Rem et les résultats des mesures effectuées avec le protocole de l'ANFR. Dans le cas d'espèce du COMOP, la comparaison entre mesures et modélisations a été effectuée aux 128 points où des mesures détaillées ont été réalisées sur le terrain. Il en est ressorti « *une cohérence satisfaisante entre mesure et simulation dans 40 % des cas* » (rapport, p. 55), mais dans les 60 % restants, les niveaux mesurés présentaient des écarts allant de +/-100 % jusqu'à +/-300 % avec les niveaux modélisés dans environ 40 % des cas et étaient plus de 3 fois inférieurs aux niveaux modélisés dans environ 20 % des cas. C'est pour cette raison que cette étude n'a pas pour but l'identification des points atypiques.

L'ANFR a dégagé des moyens substantiels (humains et financiers) pour la réalisation de cette étude qui a été menée à bien au bout d'une année de travail. Les moyens de calculs exceptionnels mis en œuvre dans le cadre de cette étude technique contribuent à l'amélioration de la connaissance des champs électromagnétiques mais n'est pas transposable à l'échelle nationale.

2 - REGLEMENTATION EN MATIERE D'EXPOSITION DU PUBLIC AUX ONDES ELECTROMAGNETIQUES

En France, le décret n° 2002-775³ du 3 mai 2002 fixe les valeurs-limites d'exposition du public aux champs électromagnétiques émis par les équipements utilisés dans les réseaux de télécommunication ou par les installations radioélectriques. Ces limites ont été proposées, au niveau international, par le comité de protection contre les rayonnements non ionisants (ICNIRP), association officiellement reconnue par l'Organisation Mondiale pour la Santé (OMS), dans son guide pour l'établissement de limites d'exposition aux champs électrique, magnétique et électromagnétique en 1998. L'Union Européenne a repris ces limites dans sa recommandation 1999/519/CE.

Les valeurs-limites dépendent des fréquences (cf. Figure 2-1).

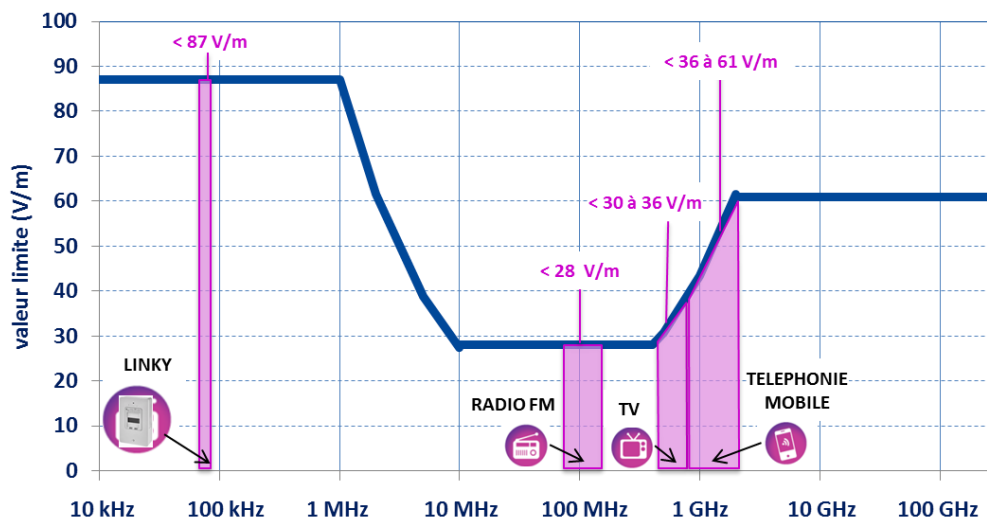


Figure 2-1 : valeurs limites réglementaires fixées en France par le décret du 3 mai 2002 n° 2002-775

³ <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT00000226401>

3 - DESCRIPTION DE L'ETUDE

La zone d'étude est le 14^{ème} arrondissement de la ville de Paris, représentative d'une zone urbaine très dense. A partir des données d'entrée (terrain, bâtiments et émetteurs radioélectriques), un modèle numérique a été généré, sur lequel ont été effectués les calculs de propagation afin d'estimer les niveaux d'exposition de champs électromagnétiques pour un ensemble de points de simulation.

Cette étude compare deux scénarios de déploiement (état initial et scénario de déploiement futur). Le modèle de calcul (terrain et bâtiments) et la méthode de calcul liés au logiciel MithraREM sont identiques entre les deux scénarios. Cette approche relative entre deux états autorise à s'affranchir localement d'une analyse détaillée des incertitudes en absolu sur le résultat de modélisations numériques.

3.1 - Données terrain et bâtiments

L'Agence a fourni au CSTB le modèle de bâti 3D de l'IGN de 2009 sur le 14^{ème} arrondissement établi à partir d'une vue aérienne. Ce modèle de bâti permet d'avoir un niveau de détail précis (LOD2). La structure extérieure de chaque bâtiment est modélisée en 3D et texturée, y compris les pans de toits. Les données toitures et les données façades sont séparées dans le modèle (Figure 3-1).

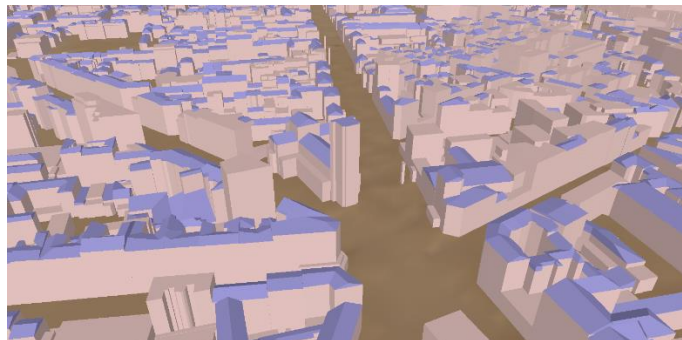


Figure 3-1 : exemple de vue 3D du modèle IGN de Paris14 dans MithraREM

Le modèle de terrain et bâtiments a ensuite été comparé à un modèle plus récent de la ville de Paris (<https://opendata.paris.fr/explore/?sort=modified>) daté de juillet 2017 afin de disposer du modèle le plus à jour possible. Le modèle de données a peu évolué depuis 2009, et les données 3D IGN restent fiables et précises, moyennant des ajustements précisés dans le tableau ci-dessous (Tableau 3-1).

Donnée 3D IGN	25741 bâtiments
Donnée « Ville de Paris » ajoutées	149 bâtiments
Erreur de modèle et suppressions	103 bâtiments
Bâtiments dessinés	5 bâtiments

Tableau 3-1 : synthèse des données bâtiments

3.2 - Données des émetteurs radioélectriques

Les données caractéristiques des émetteurs proviennent des quatre opérateurs de téléphonie mobile. Elles concernent : la localisation précise des stations de base (adresse, type de bâtiment, plan cadastral), l'orientation (azimut), la hauteur milieu d'antenne, le gain d'antenne, le tilt mécanique, le modèle des antennes, les diagrammes de directivité, la liste des émetteurs pour chaque antenne, les bandes de fréquences d'émission, le tilt électrique et la puissance maximale émise (PIRE).

Pour intégrer les émetteurs, un repositionnement manuel des émetteurs, représentant un travail long et minutieux mais indispensable pour éviter des erreurs sur l'exposition a été effectué à partir du plan cadastral, permettant d'obtenir in fine un modèle le plus juste et complet possible.

Dans le document, un émetteur est caractérisé par une bande de fréquences associée à une technologie et un secteur pour un opérateur de téléphonie mobile donné.

3.3 - Paramètres du logiciel MithraREM

Le logiciel MithraREM version 1.7 a été utilisé pour simuler les différents scénarios.

Des types de matériaux doivent être affectés à chaque bâtiment du modèle. Cela correspond aux propriétés physiques qui induisent le comportement vis-à-vis des ondes électromagnétiques : valeurs de permittivité diélectrique et de conductivité électrique, qui donnent lieu à des coefficients de réflexion, de diffraction et de transmission en fonction de la fréquence, de la polarisation et de l'angle d'incidence de l'onde.

Pour la prise en compte de la réflexion et de la diffraction, un matériau unique a été choisi pour l'ensemble des bâtiments de la zone d'étude. Les matériaux des bâtiments ont les caractéristiques d'un béton léger⁴.

⁴La valeur de permittivité diélectrique relative est : $\epsilon_r = 6$
La valeur de conductivité électrique est : $\sigma = 0,03 \text{ S/m}$

Pour la transmission à travers les façades et toitures, le coefficient d'un simple vitrage, défini dans les lignes directrices de l'ANFR⁵ (atténuation forfaitaire de 20 % à incidence normale sur le niveau de champ électrique) est utilisé.

Il a été pris en compte des points de simulations tous les deux mètres en façade des bâtiments et au sol. La hauteur des points de simulation au-dessus du sol des espaces extérieurs (rues, espaces publics) est de 1,5 mètre.

La puissance maximale des émetteurs a été réduite avec le facteur de réduction de (1,6×1,6), qui correspond au facteur 1,6 appliqué au niveau de champ électrique ; ce coefficient est défini dans les lignes directrices de l'ANFR⁶, afin de prendre en compte l'exposition mesurée sur le terrain avec une sonde large bande.

Les toitures ont été prises en compte, les niveaux d'exposition sur les toitures plates ou à faible pente⁷ ne sont pas calculés, comme celles où sont implantées en particulier les antennes relais, lieux en général inaccessibles au public.

Le nombre total de points de simulations sur l'ensemble de la zone de calcul est d'environ 3 200 000 (dont 2 100 000 sur les façades et 1 100 000 au-dessus du sol).

Dans le cas des points de simulation en façades, deux calculs ont été réalisés :

- L'un à l'extérieur de la façade pour prendre en compte l'existence éventuelle de balcons. Le niveau de champ électrique calculé est obtenu à partir des niveaux incidents (issus de chaque émetteur et des multiples réflexions et diffractions⁸ dans l'environnement) y compris ceux issus de la réflexion sur la façade elle-même (équivalent béton léger).
- Et l'autre derrière la façade, à l'intérieur du bâtiment (« après première paroi »). Le calcul des niveaux de champ électrique derrière la façade des bâtiments, obtenus à partir des niveaux incidents à l'extérieur de la façade et d'un modèle statistique heuristique de transmission des ondes à travers les façades. Ce modèle tient compte de l'angle d'incidence de chaque trajet de propagation et du coefficient d'atténuation forfaitaire de la façade (équivalent à un simple vitrage).

Les hypothèses d'atténuation des différentes surfaces traversées constituent un majorant, car l'atténuation d'un simple vitrage est inférieure à celle du béton léger mais aussi à celle du double vitrage.

⁵ https://www.anfr.fr/fileadmin/CP/2015-12-23_Lignes_directrices_Simulations_de_l_27exposition_v3-09.pdf

⁶ https://www.anfr.fr/fileadmin/CP/2015-12-23_Lignes_directrices_Simulations_de_l_27exposition_v3-09.pdf

⁷ Une différence entre $Z_{\text{toiture minimum}}$ et $Z_{\text{toiture maximum}}$ inférieure à 0,75 mètre

⁸ Pris en compte d'une réflexion et diffraction par les arrêtes horizontales

3.4 - Scénarios de simulation

3.4.1 - Scénario « Etat initial »

Le scénario état initial est basé sur un état de référence, les données ont été fournies en décembre 2017 par les opérateurs.

Les différentes bandes de fréquences et technologies disponibles sont données dans le Tableau 3-2. Toutes les bandes de fréquences sur un site donné ne sont pas toujours toutes présentes.

Fréquences	Etat initial
700 MHz	4G
800 MHz	4G
900 MHz	2G et 3G
1800 MHz	2G et 4G
2100 MHz	3G
2600 MHz	4G

2G = GSM 3G = UMTS 4G = LTE

Tableau 3-2 : couples technologies / fréquences – état initial

3.4.2 - Scénario « futur »

L'Agence a défini un scénario de déploiement futur après avoir consulté les équipementiers télécoms et les opérateurs de téléphonie mobile sur les produits disponibles à moyen/long terme sur le marché et la stratégie qui se dessine en termes de déploiement technologique sur les sites et bandes de fréquences existantes. Il correspond à un déploiement complet de la 4G sur les bandes de fréquences actuelles excepté pour la 2G, 3G dans la bande 900 MHz (voir Tableau 3-3). Cela reste une hypothèse de la tendance de la stratégie des opérateurs mobiles, hors déploiement de nouveaux sites et introduction de nouvelles bandes de fréquences.

Il en découle que pour chaque azimut de chaque station de base existante à l'état initial :

- Toutes les bandes de fréquences des opérateurs sont utilisées : 700 MHz, 800 MHz, 900 MHz, 1800 MHz, 2100 MHz et 2600 MHz, contrairement au scénario initial où toutes les stations n'utilisaient pas toutes les fréquences ;
- La technologie 4G est présente dans les bandes 700 MHz, 800 MHz, 1800 MHz, 2100 MHz et 2600 MHz ;
- Les technologies 2G et 3G sont présentes uniquement dans la bande 900 MHz ;
- Pour les bandes 700 MHz, 800 MHz et 900 MHz les puissances d'entrée sont similaires à celles utilisées dans l'état initial, en cas d'absence de données, les puissances des antennes dans les bandes adjacentes sont reprises ;

- Pour les bandes 1800 MHz, 2100 MHz et 2600 MHz les puissances d'entrée sont égales à 4x40W, ou égale à la puissance d'entrée de l'état initial lorsque celle-ci est supérieure à 4x40W ;
- Le type d'antenne (modèle, diagramme) et les caractéristiques (tilt mécanique, électrique, etc.) des antennes manquantes reprennent les caractéristiques des antennes dans les bandes adjacentes.

Fréquences	Etat initial	Scenario futur
700 MHz	4G	4G
800 MHz	4G	4G
900 MHz	2G et 3G	2G et 3G
1800 MHz	2G et 4G	4G
2100 MHz	3G	4G
2600 MHz	4G	4G

2G = GSM 3G = UMTS 4G = LTE

Tableau 3-3 : couples technologies / fréquences – comparaison état initial et scenario futur

4 - RESULTATS POUR LE CALCUL « ETAT INITIAL »

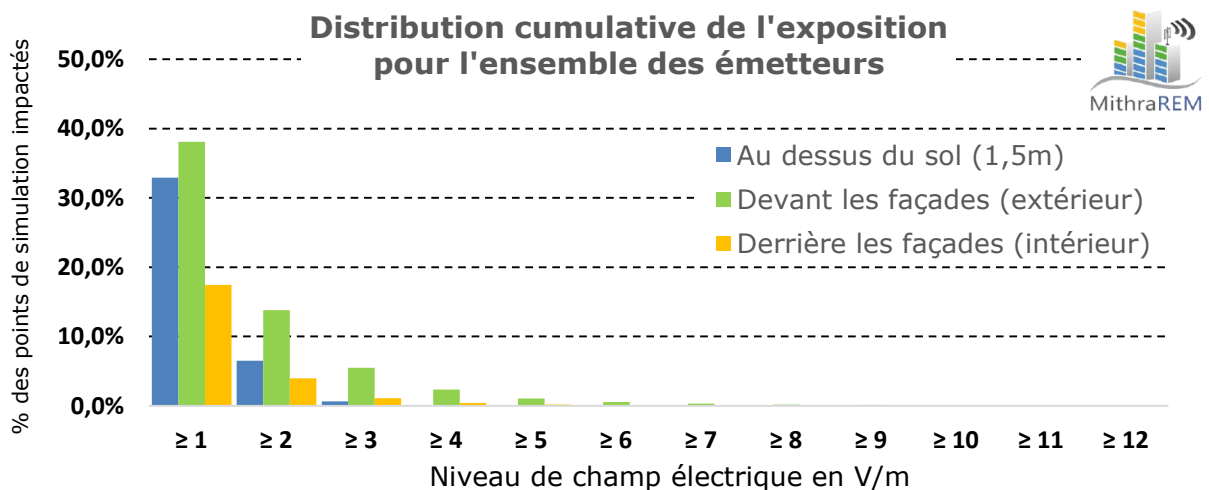
4.1 - Synthèse des résultats

Les niveaux de champ électrique moyens et médians calculés sur l'ensemble des points de simulation dans la zone du 14^{ème} arrondissement de Paris sont donnés dans le Tableau 4-1. Les niveaux de champ électrique les plus élevés sont illustrés par la valeur maximum calculée pour 99 % des points de simulation.

	Niveau Médian	Niveau Moyen	1 % des points calculés sont supérieurs à
Calculs au-dessus du sol	0,6 V/m	0,8 V/m	2,8 V/m
Calculs devant les façades (extérieur)	0,7 V/m	1,0 V/m	5,1 V/m
Calculs derrière les façades (intérieur)	0,4 V/m	0,6 V/m	3,1 V/m

Tableau 4-1 : synthèse des résultats de calcul de l'état initial

La répartition des niveaux d'exposition est illustrée sur la Figure 4-1.



Prise en compte du facteur de réduction de puissance $1,6^2$

Figure 4-1 : Distribution cumulative de l'exposition – état initial

	≥ 1	≥ 2	≥ 3	≥ 4	≥ 5	≥ 6	≥ 7	≥ 8	≥ 9	≥ 10	≥ 11	≥ 12
Au dessus du sol (1,5m)	32,9%	6,5%	0,6%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Devant les façades (extérieur)	38,1%	13,8%	5,5%	2,3%	1,1%	0,6%	0,3%	0,2%	0,1%	0,1%	0,0%	0,0%
Derrière les façades (intérieur)	17,4%	4,0%	1,1%	0,4%	0,2%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Le niveau de champ électrique résulte de la contribution de plusieurs émetteurs.

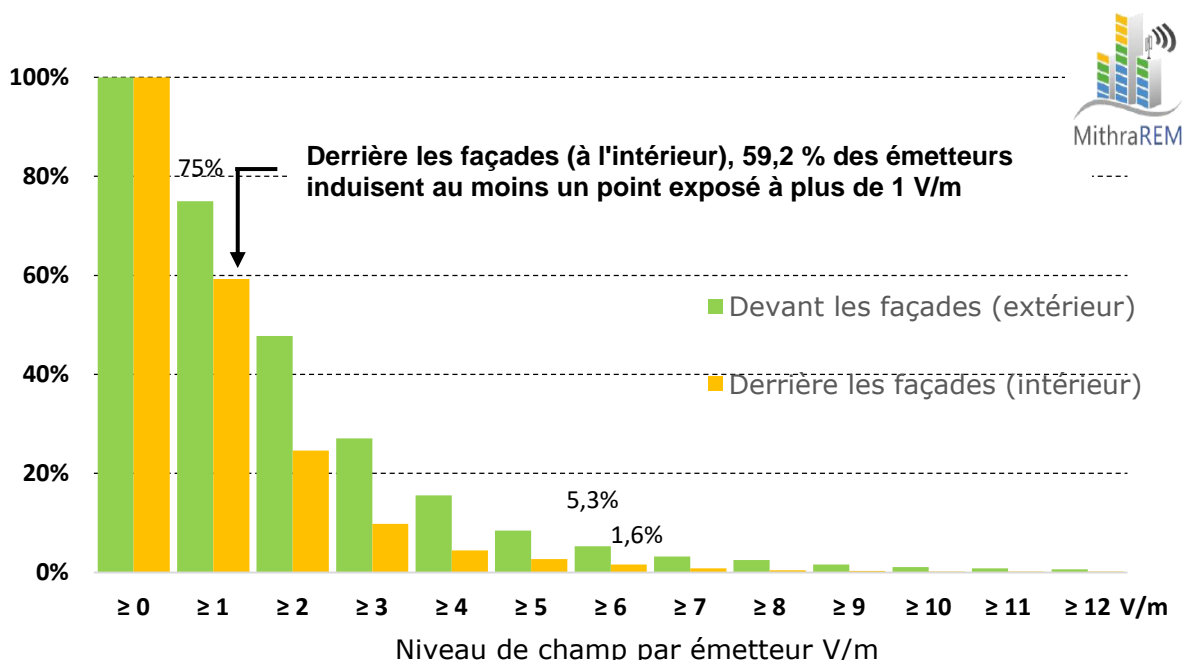
Les niveaux d'exposition devant les façades, à l'extérieur, sont statistiquement légèrement plus élevés que les niveaux d'exposition au sol. Ce résultat est cohérent avec la densité de bâtiments, la densité des émetteurs et l'architecture des réseaux avec les émetteurs

placés sur des points hauts : toitures, haut de façades. Les niveaux d'exposition simulés au sol peuvent constituer néanmoins un bon indicateur de l'exposition à l'échelle d'un arrondissement comme le montrent les résultats du COMOP⁹.

L'exposition derrière les façades, à l'intérieur, est fortement diminuée par rapport à l'exposition à l'extérieur. Cela est dû au coefficient d'atténuation de 20 % de traversée de façade, auquel se rajoute la prise en compte de l'angle d'incidence des trajets de propagation sur la façade, avec une forte diminution de la pénétration du champ électrique dans le cas d'incidences rasantes. Dans la réalité, l'atténuation pourrait être supérieure dans le cas par exemple de la présence d'un double vitrage.

Les points de simulation à l'extérieur des bâtiments dépassant 6 V/m sont de 0,6 % et de 0,1 % à l'intérieur des bâtiments.

La contribution des émetteurs aux niveaux d'exposition est illustrée sur la Figure 4-2. Pour rappel, un émetteur est caractérisé par une bande de fréquences associée à une technologie et un secteur pour un opérateur de téléphonie mobile donné. Ainsi, le niveau de champ par émetteur n'est pas le niveau global d'exposition.



Prise en compte du facteur de réduction de puissance 1,6²

Figure 4-2 : Distribution cumulative des émetteurs contributeurs – état initial

	≥ 1	≥ 2	≥ 3	≥ 4	≥ 5	≥ 6	≥ 7	≥ 8	≥ 9	≥ 10	≥ 11	≥ 12
Devant les façades (extérieur)	75%	47,8%	27,1%	15,6%	8,4%	5,3%	3,2%	2,5%	1,6%	1,1%	0,8%	0,6%
Derrière les façades (intérieur)	59,2%	24,6%	9,8%	4,4%	2,7%	1,6%	0,8%	0,5%	0,3%	0,2%	0,2%	0,2%

⁹ http://www.radiofréquences.gouv.fr/IMG/pdf/rapport-copic-31-juillet_2013-1.pdf

Dans le scénario « Etat initial », plus de 59 % des émetteurs installés induisent au moins un point supérieur ou égal à 1 V/m à l'intérieur des bâtiments. Et 75 % des émetteurs installés induisent au moins un point supérieur ou égal à 1 V/m à l'extérieur des bâtiments. Plus de 5 % des émetteurs induisent au moins un point de simulation supérieur à 6 V/m à l'extérieur des bâtiments. Et moins de 2 % des émetteurs induisent au moins un point de simulation supérieur à 6 V/m à l'intérieur.

La Figure 4-3 montre un exemple de niveaux de champ électrique calculés derrière les façades, à l'intérieur des bâtiments sous Google Earth.

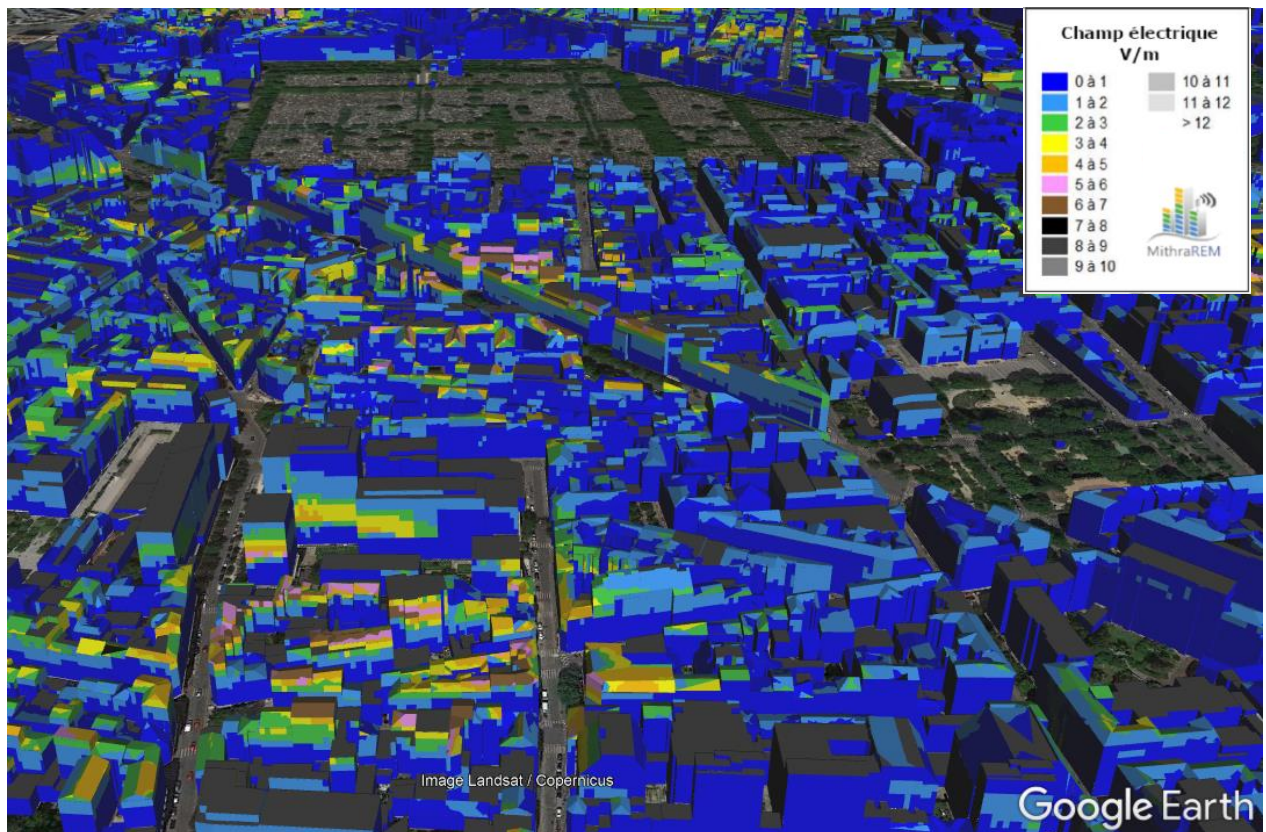


Figure 4-3 : exemple de niveaux de champ électrique calculés derrière les façades des bâtiments en intérieur – état initial (visualisation Google Earth)

5 - RESULTATS POUR LE CALCUL « SCENARIO FUTUR »

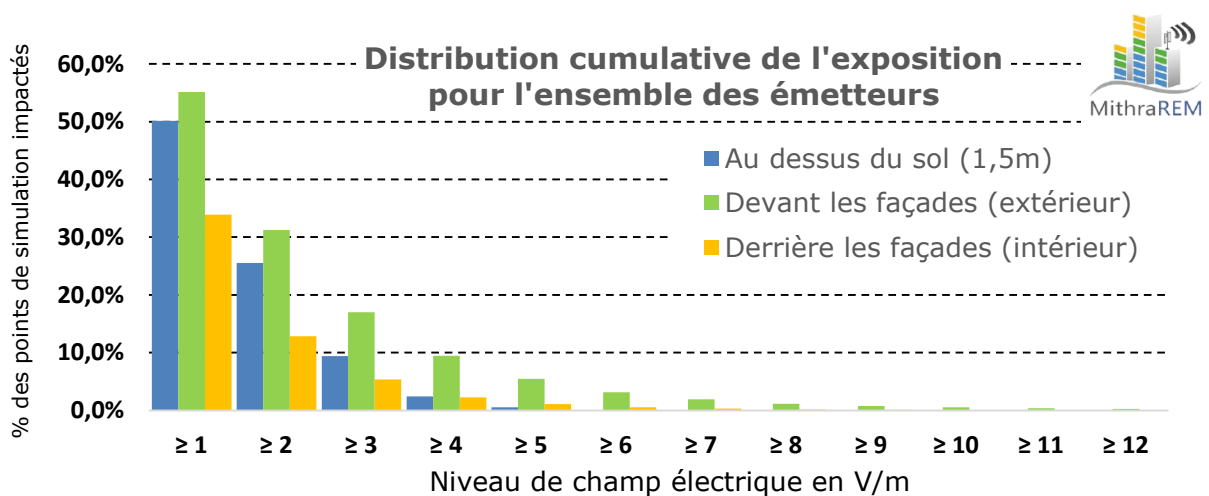
5.1 - Synthèse des résultats

Avec les hypothèses du scénario futur, les niveaux de champ électrique moyens et médians calculés sur l'ensemble des points de simulation dans la zone du 14^{ème} arrondissement de Paris sont donnés dans le Tableau 5-1 :. Les niveaux de champ électrique les plus élevés sont illustrés par la valeur maximum calculée pour 99 % des points de simulation.

	Niveau Médian	Niveau Moyen	1 % des points calculés sont supérieurs à
Calculs au-dessus du sol	1,0 V/m	1,3 V/m	4,7 V/m
Calculs devant les façades (extérieur)	1,2 V/m	1,7 V/m	8,6 V/m
Calculs derrière les façades (intérieur)	0,6 V/m	0,9 V/m	5,2 V/m

Tableau 5-1 : synthèse des résultats de calcul du scénario futur

La répartition des niveaux d'exposition est illustrée sur la Figure 5-1.



Prise en compte du facteur de réduction de puissance $1,6^2$

Figure 5-1 : Distribution cumulative de l'exposition – « scénario futur »

	≥ 1	≥ 2	≥ 3	≥ 4	≥ 5	≥ 6	≥ 7	≥ 8	≥ 9	≥ 10	≥ 11	≥ 12
Au dessus du sol (1,5m)	50,1%	25,6%	9,4%	2,4%	0,5%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Devant les façades (extérieur)	55,2%	31,2%	17,0%	9,4%	5,5%	3,2%	1,9%	1,2%	0,7%	0,5%	0,3%	0,2%
Derrière les façades (intérieur)	33,9%	12,8%	5,3%	2,3%	1,1%	0,5%	0,3%	0,2%	0,1%	0,1%	0,0%	0,0%

Par rapport à l'état initial, dans le scénario futur toutes les technologies sont systématiquement présentes sur chaque station de base et les puissances d'émission sont plus élevées ; les niveaux de champ électrique calculés sont donc logiquement plus élevés.

Les tendances de la répartition des niveaux en façades et au sol sont identiques à celles de la phase d'état initial : les niveaux d'exposition devant les façades, à l'extérieur, sont globalement plus élevés que les niveaux d'exposition au sol et l'exposition derrière les façades, à l'intérieur, est fortement diminuée par rapport à l'exposition à l'extérieur.

Les points de simulation à l'extérieur des bâtiments dépassant 6 V/m sont de 0,6 % dans le scénario initial et de 3,2 % dans le scénario futur. Pour un environnement intérieur, ils sont de 0,1 % dans le scénario initial et de 0,5 % dans le scénario futur.

La contribution des émetteurs aux niveaux d'exposition est illustrée sur la Figure 5-2. Pour rappel, un émetteur est caractérisé par une bande de fréquences associée à une technologie et un secteur pour un opérateur de téléphonie mobile donné.

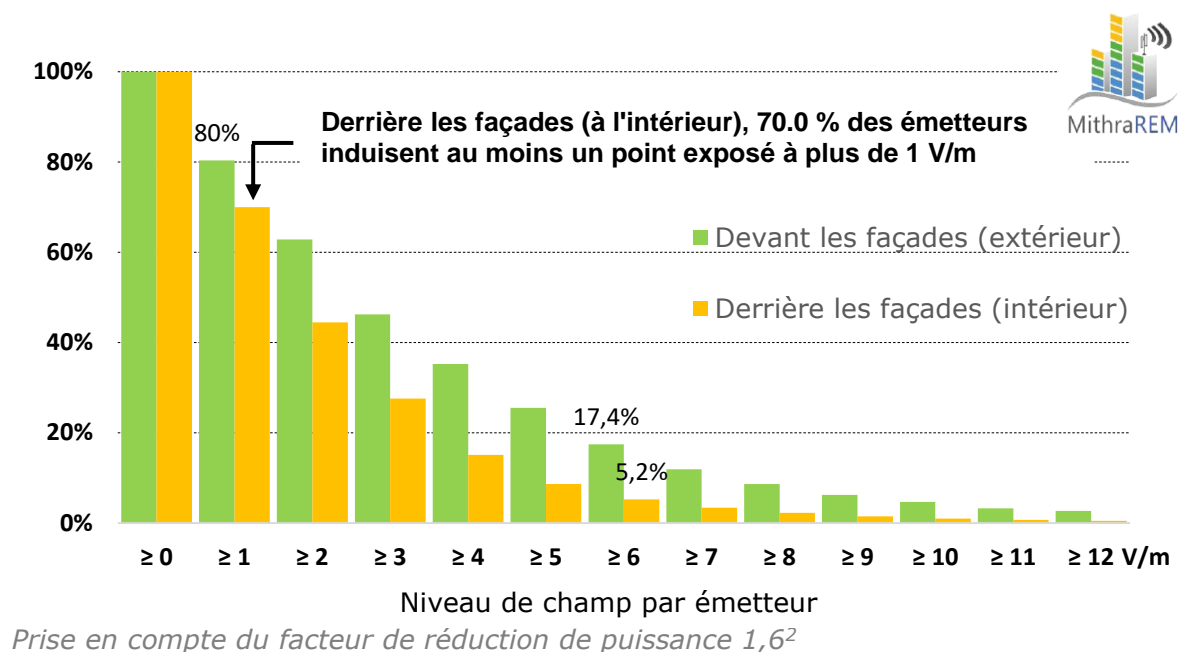


Figure 5-2 : Distribution cumulative des émetteurs contributeurs – état futur

	≥ 1	≥ 2	≥ 3	≥ 4	≥ 5	≥ 6	≥ 7	≥ 8	≥ 9	≥ 10	≥ 11	≥ 12
Devant les façades (extérieur)	80,3%	62,8%	46,2%	35,2%	25,5%	17,4%	11,9%	8,6%	6,2%	4,7%	3,3%	2,6%
Derrière les façades (intérieur)	70,0%	44,5%	27,6%	15,1%	8,6%	5,2%	3,4%	2,3%	1,5%	1,0%	0,7%	0,5%

Dans le scénario « Etat initial », plus de 59 % des émetteurs installés induisent au moins un point supérieur ou égal à 1 V/m à l'intérieur des bâtiments, ce pourcentage passe à 70 % avec le « scénario futur ».

Plus de 5 % des émetteurs induisent au moins un point de simulation supérieur à 6 V/m à l'intérieur des bâtiments, identique au pourcentage en extérieur dans le scénario « Etat initial ». On passe à plus de 17 % des émetteurs induisant au moins un point de simulation supérieur à 6 V/m à l'extérieur des bâtiments.

6 - CONCLUSIONS

La modélisation numérique a permis d'estimer les niveaux d'exposition de champ électrique générés par les antennes des réseaux de téléphonie mobile sur une zone urbaine très dense (14^{ème} arrondissement de Paris).

Le modèle numérique de terrain et bâtiments a été créé, mis à jour et validé. L'ensemble des antennes et émetteurs a été intégré à partir des informations fournies par les quatre opérateurs de téléphonie mobile et validées par l'ANFR.

De ce fait, l'étude se limite aux seules antennes-relais de téléphonie mobile et ne prend pas en compte les autres sources de contribution à l'exposition du public (émetteurs FM, TV, wifi, etc..).

Un premier calcul de l'état initial a été réalisé ; il s'agit de l'état du déploiement des réseaux de téléphonie mobile des quatre opérateurs, à la date de décembre 2017. Un second calcul « scénario futur » a été réalisé avec une hypothèse d'évolution de déploiement des émetteurs, hors déploiement de nouveaux sites et introduction de nouvelles bandes de fréquences.

Les calculs ont été réalisés pour des points de simulation situés au-dessus du sol et sur les façades de l'ensemble des bâtiments du 14^{ème} arrondissement : devant la façade (à l'extérieur) et derrière la façade (à l'intérieur, en prenant en compte une atténuation de façade correspondant à un simple vitrage).

En appliquant le facteur de réduction de puissance défini dans les lignes directrices de l'ANFR, le niveau de champ électrique moyen devant les façades (en extérieur) pour l'état initial dans le 14^{ème} arrondissement de Paris est de 1 V/m ; environ 62 % des niveaux calculés sont inférieurs à 1 V/m.

Le scénario de déploiement futur génère des niveaux d'exposition plus élevés, compte tenu de l'augmentation des puissances émises, des bandes de fréquences et la systématisation de toutes les technologies et bandes de fréquences sur toutes les stations de base des quatre opérateurs de téléphonie mobile.

Le niveau de champ électrique moyen devant les façades (en extérieur) dans le 14^{ème} arrondissement de Paris est de 1,7 V/m, soit environ 5 % de la valeur limite réglementaire de 36 V/m, la plus basse dans les bandes de fréquences de la téléphonie mobile, fixée par le décret n°2002-775 du 3 mai 2002.

Les points de simulation à l'extérieur des bâtiments dépassant 6 V/m sont de 0,6 % dans le scénario initial et de 3,2 % dans le scénario futur. Cela signifie que, dans le scénario futur, l'exposition théorique est inférieure, dans près de 97 % des façades, à 17 % de la valeur limite réglementaire de 36 V/m¹⁰ fixée par le décret n°2002-775 du 3 mai 2002.

¹⁰ Valeur limite réglementaire minimale dans les bandes de fréquences de la téléphonie mobile étudiées.

Les points de simulation à l'intérieur des bâtiments dépassant 6 V/m sont de 0,1 % dans le scénario initial et de 0,5 % dans le scénario futur. Cela signifie que, dans le scénario futur, l'exposition théorique est inférieure, dans près de 99,5 % des intérieurs de bâtiment, à 17 % de la valeur limite réglementaire de 36 V/m.

Le pourcentage d'émetteurs (un émetteur est caractérisé par une bande de fréquences associée à une technologie et un secteur pour un opérateur de téléphonie mobile donné) qui induisent au moins un point de simulation à plus de 1 V/m passe de 75 % à 80 % d'un scénario à l'autre devant les façades. Ce pourcentage passe de 5 % à 17 % pour au moins un point de simulation supérieur ou égal à 6 V/m devant les façades.

Au-delà des résultats bruts absolus (niveaux de champ électrique, etc.), la modélisation numérique montre tout son intérêt pour la réalisation d'études d'impact en amont de l'évolution des déploiements des émetteurs et réseaux. L'étude montre également le différentiel important entre l'exposition en intérieur et en extérieur.

Ainsi, avec l'hypothèse d'évolution retenue dans l'étude, le niveau d'exposition moyen en façades extérieures passe de 1 V/m à 1,7 V/m, soit un niveau bien en deçà des valeurs limites réglementaires.

Dès que les hypothèses d'exploitation seront précisées et qu'un outil de modélisation sera validé, il sera intéressant de poursuivre l'étude avec un scénario incluant les nouvelles bandes de fréquences de la 5G.