

Etude de l'exposition du public aux ondes radioélectriques

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

Rapport d'étape

Août 2020

Synthèse

Le déploiement des réseaux 4G et le *refarming* associé, c'est-à-dire la réutilisation par la 4G des bandes de fréquences des réseaux 2G et 3G, ainsi que la perspective d'un déploiement commercial de 5G dans la bande 3,4-3,8 GHz posent la question de l'évolution de l'exposition du public aux champs électromagnétiques radiofréquences. Afin d'étudier cette évolution, l'Agence nationale des fréquences (ANFR) a analysé des simulations numériques des niveaux d'exposition créés par la téléphonie mobile dans une zone urbaine très dense, le 14^e arrondissement de Paris.

L'ANFR a défini quatre premiers scénarios après avoir consulté les équipementiers télécoms et les opérateurs de téléphonie mobile et suivi les pilotes 5G réalisés par les opérateurs.

Le premier scénario a consisté à modéliser l'état actuel des réseaux mobiles dans l'arrondissement, constitué d'une combinaison des technologies 2G, 3G et 4G (scénario « Etat initial »).

Un deuxième scénario a alors été élaboré pour refléter l'optimisation ultime de la 4G (scénario « 4G optimisée ») : conversion de la plupart des émetteurs 2G et 3G à la technologie 4G, avec augmentation concomitante des puissances pour accroître les débits disponibles. La 4G serait alors déployée sur toutes les stations existantes et sur toutes les bandes de fréquences actuelles, excepté sur la bande 900 MHz qui hébergerait la 2G et la 3G.

Un troisième scénario a ensuite consisté à modéliser l'exposition produite par la mise en service de la 5G dans la bande des 3,5 GHz (scénario « 5G seule ») en ayant recours à des antennes à faisceaux orientables.

Enfin, un dernier scénario a été construit en combinant les scénarios « 4G optimisée » et « 5G seule ». Cette construction théorique ne sera sans doute jamais mise en œuvre, car le déploiement de la 5G ne permettra pas d'aller au terme de l'optimisation de la 4G. Néanmoins, elle permet de disposer d'un majorant de l'exposition (scénario « Majorant 5G »), puisque la puissance réelle des réseaux dans l'arrondissement ne devrait jamais dépasser cette enveloppe.

Le scénario « 4G optimisée » met en évidence qu'un retard éventuel de la 5G n'aurait pas pour effet de stabiliser l'exposition du public au niveau actuel : il s'accompagnerait en effet d'un accroissement sensible de l'exposition dans les zones denses, pour permettre au réseau 4G de tenter de prendre en charge une partie de la croissance attendue du trafic.

Le scénario « 5G seule » produit quant à lui une augmentation modérée de l'exposition : le niveau moyen reste faible par rapport aux valeurs limites de l'exposition comprises entre 36 V/m et 61 V/m. Le niveau moyen créé par la 5G dans un environnement urbain très dense ressort notamment à 0,76 V/m à l'intérieur des bâtiments, derrière un simple vitrage. Il montre que les antennes à faisceaux orientables de la 5G dans la bande 3,4-3,8 GHz ne devraient pas constituer à terme le contributeur principal de l'exposition, y compris en zone urbaine dense où ces antennes devraient être largement déployées.

Enfin, le scénario « Majorant 5G » fait apparaître une augmentation de l'exposition moyenne de l'ordre de 30 % par rapport au scénario « 4G optimisée » alors que la mise en œuvre de la nouvelle bande 3,5 GHz aura simultanément fait croître la dotation en fréquences des opérateurs de 50 %. Cette augmentation est à mettre en perspective avec celle de 70 % constatée entre les scénarios « Etat initial » et « 4G optimisée ». Ces taux illustrent notamment l'apport des antennes 5G à faisceaux orientables pour la maîtrise de l'exposition dans la nouvelle bande de fréquence 3,5 GHz.

Cet accroissement de l'exposition se traduira par une augmentation de points atypiques¹. Dans un principe de sobriété, dans le but de conserver des niveaux d'exposition bien en-dessous des valeurs limites, cette augmentation du nombre de points atypiques demandera aux opérateurs des efforts supplémentaires pour concevoir leurs réseaux, qui seront contrôlés par l'Agence nationale des fréquences.

Ce rapport constitue un point d'étape. Il fournit de premiers ordres de grandeur des expositions résultantes. Les prochaines phases de ces travaux consisteront à affiner les scénarios de déploiement, en jouant sur les technologies employées et les puissances, dans les différentes bandes de fréquences ouvertes à la téléphonie

¹ Les points atypiques sont définis en particulier par une valeur d'attention de 6 V/m, niveau situé très en dessous des valeurs limites réglementaires.

mobile. L'exposition sera ainsi simulée plus précisément, entre les bornes strictes formées par l'état initial et le majorant 5G.

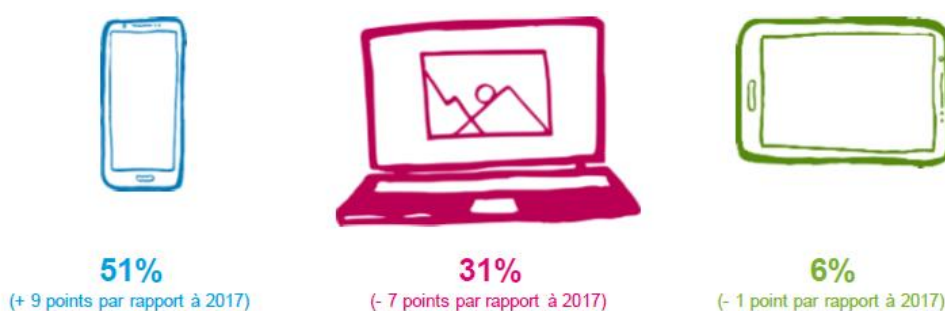
SOMMAIRE

1. CONTEXTE	5
1.1 LES RESEAUX MOBILES FACE A LA CROISSANCE DES USAGES	5
1.2 LA 5G : UNE NOUVELLE TECHNOLOGIE ET DES FREQUENCES SUPPLEMENTAIRES.....	6
1.3 UNE APPROCHE ITERATIVE POUR ENCADRER L'EXPOSITION DU PUBLIC EN ZONE DENSE.....	7
1.4 LES SCENARIOS ETUDIES.....	7
1.5 LA METHODE DE SIMULATION	10
2. REGLEMENTATION EN MATIERE D'EXPOSITION DU PUBLIC AUX ONDES ELECTROMAGNETIQUES	10
3. DESCRIPTION DE L'ETUDE	11
3.1 DONNEES TERRAIN ET BATIMENTS	12
3.2 DONNEES DES EMETTEURS RADIOELECTRIQUES.....	12
3.3 PARAMETRES DU LOGICIEL MITHRAREM.....	13
3.4 DESCRIPTION DES SCENARIOS DE SIMULATION	14
3.4.1 Scénario « Etat initial ».....	14
3.4.2 Scénario « 4G optimisée ».....	14
3.4.3 Scénario « 5G seule ».....	15
3.4.4 Scénario « Majorant 5G ».....	16
4. RESULTATS DES SIMULATIONS	17
4.1 SCENARIO « ETAT INITIAL ».....	17
4.2 SCENARIO « 4G OPTIMISEE».....	20
4.3 SCENARIO « 5G SEULE »	22
4.4 SCENARIO « MAJORANT 5G ».....	24
4.5 EVOLUTION DE L'EXPOSITION.....	26
4.5.1 Evolution de l'exposition derrière les façades (intérieur)	26
4.5.2 Evolution de l'exposition devant les façades (à l'extérieur).....	27
5. CONCLUSIONS	29

1. Contexte

1.1 Les réseaux mobiles face à la croissance des usages

Le volume de données transmises par les réseaux mobiles croît régulièrement. Ce phénomène découle du besoin de connectivité mobile de nos concitoyens, pour lesquels le smartphone apparaît désormais comme l'objet numérique le mieux adapté à cette connectivité permanente. Il est en effet utilisé par la majorité (51 %) des usagers de 12 ans et plus, comme l'illustre la Figure 1-1, équipement le plus utilisé pour se connecter à internet extraite du baromètre du numérique 2019² où figurent aussi les ordinateurs (31 %) et les tablettes (6 %).



Source : CREDOC, Enquêtes sur les « Conditions de vie et Aspirations ».

Figure 1-1 : équipement le plus utilisé pour se connecter à internet
(Champ : ensemble de la population de 12 ans et plus, en %)

Les clients mobiles 4G étaient ainsi 47,7 millions fin 2018, soit 6,1 millions de plus qu'en 2017. Ils sont à l'origine de la quasi-totalité des 3,6 exaoctets de données consommées durant l'année 2018 (+ 66 % en un an), et sont ainsi devenus de gros consommateurs de données : 6,6 gigaoctets par mois en moyenne, soit près de 40 % de plus qu'en 2017³.

Pour satisfaire cette demande, les opérateurs mobiles proposent des forfaits avec une quantité de données toujours plus importante. Ils doivent en conséquence développer régulièrement la capacité de leurs réseaux, et notamment de l'interface hertzienne qui permet, via des fréquences radioélectriques, les échanges de données entre les terminaux et les antennes-relais.

Pour accroître la capacité de l'interface hertzienne, les opérateurs disposent de deux leviers principaux :

- ils peuvent tout d'abord **accroître le nombre de bandes de fréquences mises en œuvre** pour interagir avec les terminaux. Cette méthode est la plus efficace. Aujourd'hui, les opérateurs mobiles français disposent, pour l'essentiel, de six bandes qui leur ont été attribuées au fil des années par l'Etat :
 - les bandes 900 MHz et 1 800 MHz, contemporaines du déploiement de la 2G ;
 - la bande 2 100 MHz, introduite avec la 3G ;

² <https://www.credoc.fr/publications/barometre-du-numerique-2019>

³ <https://www.arcep.fr/cartes-et-donnees/nos-publications-chiffrees/observatoire-des-marches-des-communications-electroniques-en-france/marche-des-communications-electroniques-en-france-annee-2018-resultats-definitifs.html>

- les bandes 700 MHz, 800 MHz et 2 600 MHz, attribuées avec l'arrivée de la 4G.

Le patrimoine total de fréquences détenu aujourd'hui par les quatre opérateurs français est ainsi voisin de 600 MHz⁴. Il est appelé à s'accroître prochainement, notamment à l'occasion du lancement de la 5G avec les enchères pour l'attribution de la bande 3,5 GHz.

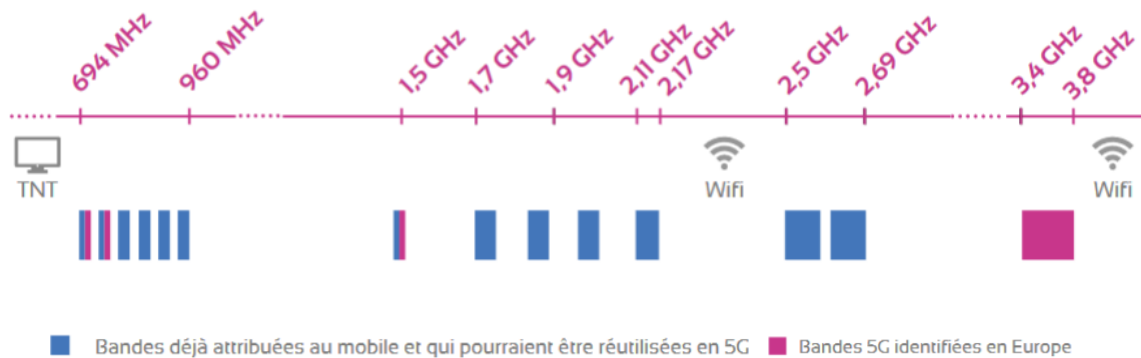


Figure 1-2 : répartition des bandes de fréquence en téléphonie mobile jusqu'à la nouvelle bande 5G 3,4 – 3,8 GHz

- le second levier consiste à **améliorer l'efficacité des transmissions** sur chaque bande de fréquences. Cela peut se faire par deux procédés, non exclusifs l'un de l'autre :
 - une première méthode consiste, à technologie constante, à **augmenter la puissance des émetteurs** ; en effet, la théorie du signal enseigne que l'amélioration du rapport signal/bruit permet d'augmenter le débit d'informations : un émetteur plus puissant se distingue mieux du bruit ambiant et permet ainsi d'accéder à des débits plus élevés ;
 - une seconde méthode suppose de **changer de technologie** : la 5G est ainsi plus efficace, à quantité de spectre égal, que la 4G, elle-même plus efficace que la 3G, qui avait à son apparition considérablement amélioré les performances de la 2G.

Devant la croissance de la demande de données, le changement de technologie est déjà à l'œuvre : les opérateurs, tirant parti de la « neutralité technologique », qui leur permet de choisir librement la technologie employée dans les bandes qu'ils détiennent, ont déjà converti certaines bandes. Des bandes dédiées à la 2G sont ainsi devenues 3G tandis que des bandes 3G ont été transférées vers la 4G. Ces évolutions, appelées *refarming*, ne sont pas nécessairement nationales : chaque opérateur optimise son réseau selon une stratégie et un rythme qui lui sont propres, dès lors qu'il s'inscrit dans la limite de puissance fixée pour chaque antenne-relais par l'autorisation délivrée par l'ANFR.

1.2 La 5G : une nouvelle technologie et des fréquences supplémentaires

La proximité des enchères pour la bande 3,5 GHz crée un point d'inflexion important pour ces travaux d'optimisation des réseaux mobiles. En effet, cette étape concrétisera simultanément :

⁴ Soit en moyenne 200 MHz par opérateur, mais quelques différences existent, le détail est consultable sur <https://www.arcep.fr/fileadmin/cru-1589991844/reprise/dossiers/frequences/attributions-frequences-operateurs-mobiles-metropole-sept2019.pdf>

- l'attribution de 310 MHz supplémentaires aux opérateurs français, soit un accroissement moyen de l'ordre de 50 % de leur patrimoine hertzien actuel, en une seule bande de fréquences ;
- l'introduction d'une nouvelle technologie plus efficiente, la 5G, qui pourra à terme être employée indifféremment dans toutes les bandes autorisées pour la téléphonie mobile.

Dans ce contexte se pose naturellement la question de **l'évolution de l'exposition du public aux champs électromagnétiques**. En effet, si le *refarming* n'a qu'un effet marginal⁵ sur l'exposition du public, il n'en est pas de même pour la mise en œuvre de nouvelles bandes de fréquences, ni de l'accroissement de la puissance de certains émetteurs.

1.3 Une approche itérative pour encadrer l'exposition du public en zone dense

Afin d'étudier cette évolution, l'Agence nationale des fréquences (ANFR), en coopération avec le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), a lancé des simulations numériques des niveaux d'exposition dans des scénarios représentant l'évolution envisagée pour les réseaux. Il importe toutefois de souligner que les opérateurs mobiles restent maîtres de l'exploitation de leurs réseaux : les scénarios envisagés par chaque opérateur pour tirer parti des différents leviers d'optimisation restent confidentiels. **L'approche sera donc itérative** : après une première étape constituée par la publication de ce rapport, d'autres scénarios seront analysés, qui reflèteront les stratégies progressivement dévoilées. A terme, une estimation plus fine de l'exposition envisagée sera ainsi disponible. Cette étude contribue ainsi à l'analyse de l'évolution de l'exposition et vient compléter les analyses annuelles des mesures effectuées par l'ANFR⁶.

Dans la mesure où la tension créée par la croissance des usages s'observe aujourd'hui principalement dans les environnements très denses, c'est un arrondissement de la capitale qui a été choisi pour réaliser ces simulations : le 14^e arrondissement de Paris. Cette zone présente l'avantage de comporter un assez grand nombre d'antennes-relais (près de 140 stations radioélectriques de téléphonie mobile y sont recensées sur le site www.cartoradio.fr) et des bâtiments de hauteurs variées. Elle est également exempte d'enjeux de couverture, puisque l'arrondissement est d'ores et déjà intégralement couvert : il est donc possible de tester différentes hypothèses sans faire varier le nombre d'antennes.

1.4 Les scénarios étudiés

Par convention, les différents états étudiés sont désignés sous le nom de « scénarios ». Pour définir un « point zéro » de l'évolution de l'exposition, le premier scénario, « **Etat initial** », est constitué d'une modélisation de l'état actuel de l'arrondissement. L'étude ayant été lancée en 2018, cela correspondait alors à la situation des réseaux de téléphonie mobile fin 2017, avec leurs composantes 2G, 3G et 4G. Cette situation est restée très proche de l'état du réseau en 2020.

⁵ L'effet sur l'exposition de la conversion d'une bande de la 3G à la 4G ou de la 4G à la 5G est en effet très faible, dans les bandes historiques n'utilisant pas d'antennes à faisceaux orientables. En revanche, la conversion d'une bande 2G vers des technologies plus avancées (3G, 4G ou 5G) est de nature à réduire l'exposition pour la bande concernée.

⁶ <https://www.anfr.fr/contrôle-des-fréquences/exposition-du-public-aux-ondes/la-mesure-de-champ/analyse-des-mesures-realisees/>

L'ANFR a ensuite consulté les équipementiers télécoms et les opérateurs de téléphonie mobile sur les produits disponibles à moyen ou long terme et sur les stratégies qui se dessinent en termes de déploiement technologique sur les sites et bandes de fréquences existantes. Un scénario « **4G optimisée** » en a été déduit : il consiste à aller au bout de la logique de la 4G, en optimisant à la fois la puissance des émetteurs et la technologie utilisée. **Il importe de souligner que ce scénario reste aujourd'hui essentiellement théorique :**

- en effet, si le *refarming* (conversion de bandes existantes à la 4G) est, de fait, déjà partiellement mis en œuvre par plusieurs opérateurs, il est vraisemblable que l'introduction de la 5G mette rapidement un terme à des conversions de bandes en faveur de la 4G. Le *refarming* prendra en effet sans doute pour cible la technologie 5G dès que celle-ci sera disponible.
- Par ailleurs, l'accroissement de puissance des antennes-relais du 14^e arrondissement ne semble pas encore avoir été lancée à ce jour.

Le scénario « 4G optimisée » présente un autre intérêt : il permet de disposer d'un majorant de la puissance susceptible d'être mise en œuvre dans les bandes « historiques » (de 700 MHz à 2 600 MHz), lorsque celles-ci seront entièrement optimisées – qu'elles le soient en 4G ou en 5G.

En parallèle, un scénario limité à une seule bande de fréquences a été approfondi pour évaluer l'impact de la technologie 5G sur l'exposition. Il s'agit du scénario « **5G seule** ». La logique de cette démarche a consisté à créer une simulation robuste de l'exposition créée par les antennes à faisceaux orientables dans la bande des 3,5 GHz. L'exposition statistique due aux antennes à faisceaux orientables est en effet très différente de celle, statique, créée par les antennes 2G, 3G ou 4G. Ce scénario, une fois stabilisé, a vocation à être combiné avec divers schémas d'utilisation des fréquences plus basses, mais aussi à être transposé à d'autres bandes de fréquences qui, à l'avenir, pourraient bénéficier à leur tour d'antennes à faisceaux orientables.

Enfin, une première combinaison de scénarios est proposée dans ce rapport intermédiaire : il s'agit de l'association des deux études déjà citées (« 4G optimisée » et « 5G seule »), qui constitue le scénario appelé « **Majorant 5G** ». Formé en sommant l'exposition maximale des bandes « historiques » et celle de la nouvelle bande 3,5 GHz, ce scénario peut en effet être considéré comme un majorant *a priori* de l'exposition produite si tous les leviers d'optimisation étaient activés sur toutes les bandes disponibles. **Ce majorant, néanmoins, pourrait n'être jamais atteint.** En effet, la conversion de bandes historiques à la 5G peut ne pas entraîner le même accroissement de puissance que celui envisagé pour la 4G, par exemple.

Dans un avenir proche, les premiers déploiements réels des réseaux tenant compte des licences attribuées permettront de définir des scénarios plus proches de la réalité et d'affiner ainsi l'évolution attendue de l'exposition.

Les premiers scénarios étudiés ont ainsi fourni des informations sur le niveau de champ en V/m au niveau du sol, sur les façades d'immeubles, ou dans les lieux de résidence, en tenant compte de l'atténuation produite par les murs et les vitrages. Ces valeurs ont également été confrontées au niveau actuel des points atypiques (6 V/m), en tentant d'évaluer le nombre d'émetteurs qu'il serait nécessaire de reconfigurer. En effet, en présence d'un

point atypique, l'ANFR demande aux opérateurs de réduire l'exposition lorsque cela est possible : le nombre d'émetteurs à modifier constitue donc un paramètre important pour dimensionner cette procédure.

L'articulation des différents scénarios est schématisée dans la Figure 1-3.

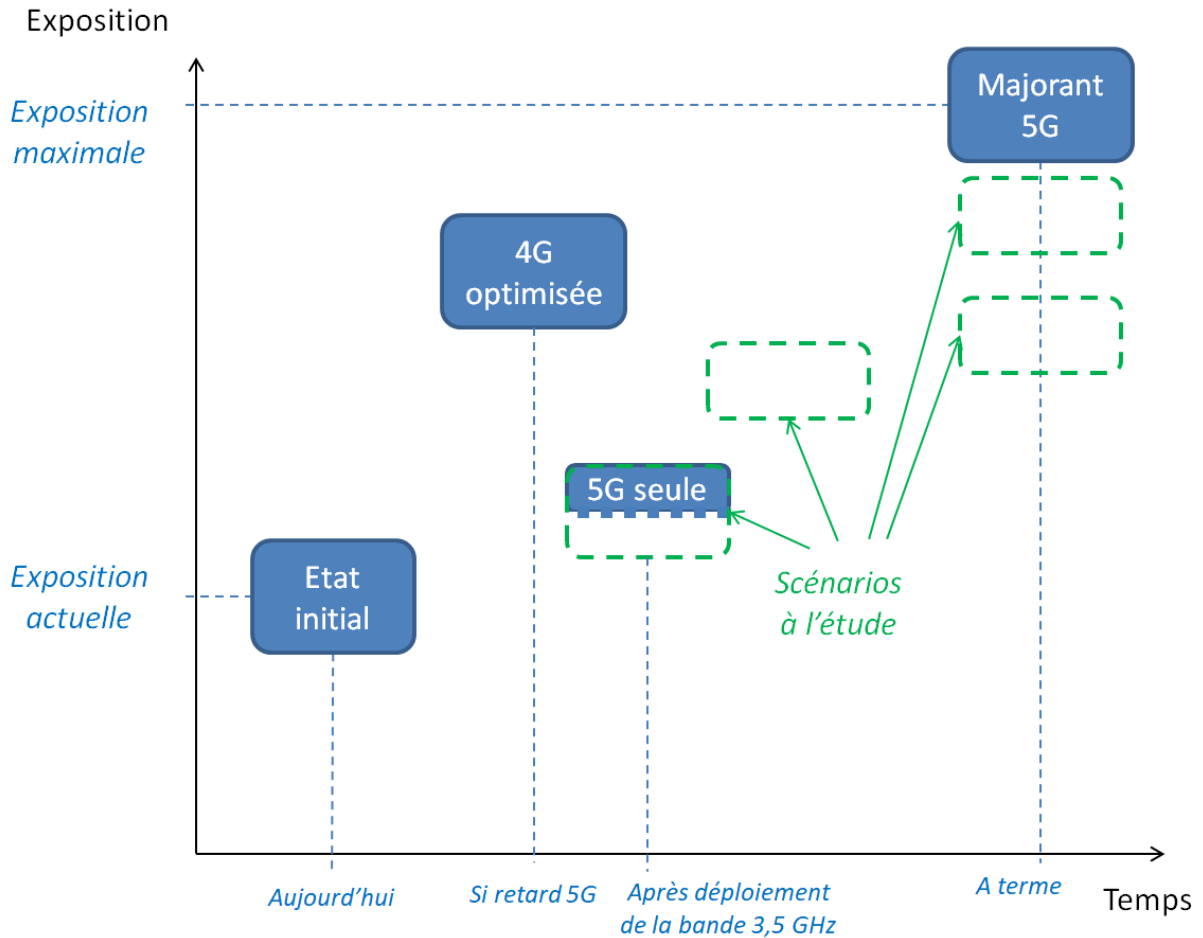


Figure 1-3 : présentation des différents scénarios

Ce rapport constitue ainsi un point d'étape, consistant à poser quelques limites au sein desquelles l'exposition sera précisée en affinant ultérieurement les scénarios.

La prochaine étape consistera à combiner les scénarios « Etat initial » et « 5G seule » pour disposer d'une estimation de l'exposition en cas de déploiement de la 5G limité à la bande 3,5 GHz. Ensuite, à partir des orientations réelles de déploiement constatées sur le terrain, des scénarios plus réalistes de conversion de bandes existantes à la 4G ou à la 5G seront élaborés, afin d'évaluer l'exposition résultante, qui sera vraisemblablement inférieure à celle du scénario « Majorant 5G ».

1.5 La méthode de simulation

Les cartographies des champs électromagnétiques sont réalisées avec le logiciel MithraREM co-développé par le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) et Geomod. MithraREM est un logiciel de cartographie de l'exposition aux champs électromagnétiques recourant au 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.

Avertissement :

Cette étude est une analyse théorique 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 et aux limites des méthodes utilisées, 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 2009⁷. **Les simulations peuvent ainsi donner une information sur la tendance ou sur l'évolution moyenne dans une zone, mais ne peuvent en aucun cas produire un résultat fiable en un point donné sans vérification et/ou recalage des données.**

Les travaux du COMOP/COPIEC ont montré qu'il existait souvent des écarts substantiels si l'on compare, en des points précis, les résultats obtenus avec MithraREM 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.

Les travaux antérieurs ont permis de bénéficier de cette expérience, et la présente étude, qui se fonde sur des comparaisons entre scénarios, devrait être encore plus robuste. Toutefois, cette étude n'a pas pour objet l'identification précise des points atypiques dans la zone de simulation.

2. Réglementation en matière d'exposition du public aux ondes électromagnétiques

En France, le décret n° 2002-775⁸ 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 international 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

⁷ http://www.radiofrquences.gouv.fr/IMG/pdf/rapport-copic-31-juillet_2013-1.pdf

⁸ <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000000226401>

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 et sont présentées ci-dessous (cf. Figure 2-1)

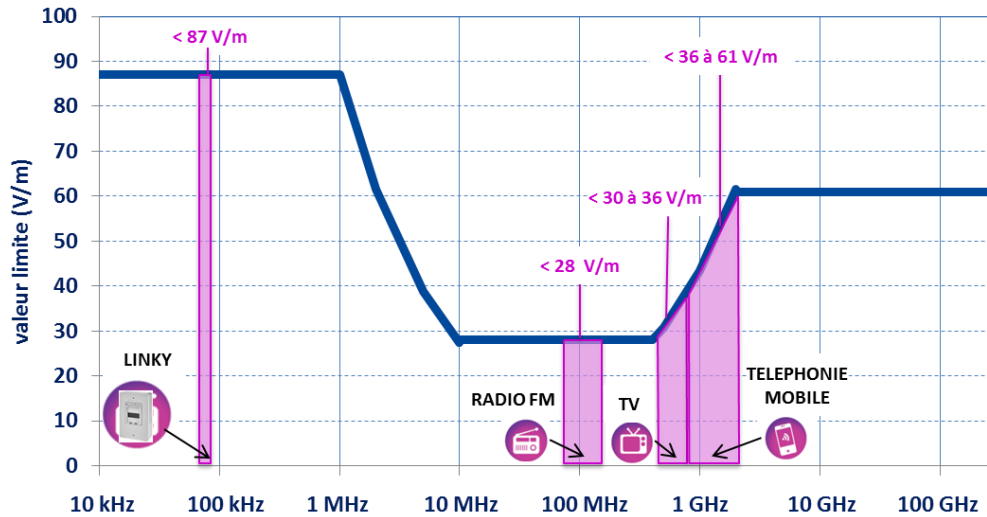


Figure 2-1 : valeurs limites réglementaires fixées en France par le décret du 3 mai 2002 n° 2002-775

Dans la suite de l'étude, les valeurs seront analysées notamment vis-à-vis de la valeur d'attention de 6 V/m retenue pour les points atypiques. Cette valeur est, comme on peut le constater, bien inférieure aux seuils réglementaires, compris entre 36 et 61 V/m pour la téléphonie mobile.

3. Description de l'étude

L'étude se fonde sur des simulations effectuées par le CSTB sur la base d'informations fournies par l'ANFR et d'échanges réguliers entre les deux organismes.

La zone d'étude, le 14^e arrondissement Paris, est représentative d'une zone urbaine très dense. A partir des données d'entrée (terrain, bâtiments et émetteurs radioélectriques), un modèle numérique a été construit, sur lequel ont été effectués les calculs de propagation afin d'estimer les niveaux d'exposition de champs électromagnétiques créés par les antennes de téléphonie mobile pour un ensemble de points de simulation. Elle ne prend pas en compte les autres sources contribuant à l'exposition du public (émetteurs FM, TV, wifi, etc.).

Cette étude compare essentiellement des scénarios de déploiement. Le modèle de calcul (terrain et bâtiments) et la méthode de calcul liés au logiciel MithraREM restent identiques entre les différents scénarios. Cette approche relative entre différents 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'ANFR a fourni au CSTB le modèle de bâti 3D de l'IGN de 2009 sur le 14^e arrondissement élaboré 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, y compris les pans de toits. Les données toitures et les données façades sont séparées dans le modèle (cf. Figure 3-1).

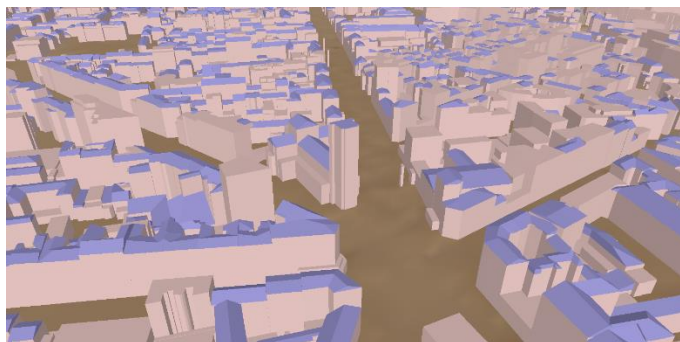


Figure 3-1 : exemple de vue 3D du modèle IGN de Paris14 dans MithraREM

Le modèle de terrain et bâtiments a ensuite été comparé à un modèle plus récent de la ville de Paris⁹ 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 quelques ajustements précisés dans le Tableau 3-1.

Donnée 3D IGN	25741 bâtiments
Données « Ville de Paris » ajoutées	149 bâtiments
Erreur de modèle et suppressions	103 bâtiments
Bâtiments rajoutés	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).

⁹ <https://opendata.paris.fr/explore/?sort=modified>

Pour intégrer les émetteurs, un repositionnement manuel des émetteurs, travail long et minutieux mais indispensable pour éviter des erreurs sur l'exposition, a été réalisé à partir du plan cadastral, permettant d'obtenir *in fine* un modèle aussi proche que possible de la réalité.

Dans ce 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 léger¹⁰.

Pour la transmission à travers les façades et toitures, le coefficient d'un simple vitrage est utilisé, défini dans les lignes directrices de l'ANFR¹¹ (atténuation forfaitaire de 20 % à incidence normale sur le niveau de champ électrique).

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 m.

Les toitures ont été prises en compte, les niveaux d'exposition sur les toitures plates ou à faible pente¹² ne sont pas calculés, en particulier celles où sont implantées 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 diffractions¹³ dans l'environnement) y compris ceux issus de la réflexion sur la façade elle-même (équivalent béton léger) ;
- 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 est réalisé à partir des niveaux incidents à l'extérieur

¹⁰La valeur de permittivité diélectrique relative est : $\epsilon_r = 6$

La valeur de conductivité électrique est : $\sigma = 0,03$ S/m

¹¹ <https://www.anfr.fr/fileadmin/mediatheque/documents/expace/20191001-Lignes-directrices-nationales.pdf>

¹² Une différence entre l'altitude $Z_{\text{toiture minimum}}$ et l'altitude $Z_{\text{toiture maximum}}$ inférieure à 0,75 mètre

¹³ Pris en compte d'une réflexion et diffraction par les arrêtes horizontales

de la façade et d'un modèle statistique 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, équivalant à un simple vitrage.

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

3.4 Description des scénarios de simulation

3.4.1 Scénario « Etat initial »

Le scénario « Etat initial » s'appuie sur un état de référence constitué de données fournies par les opérateurs en décembre 2017.

Pour ce scénario, les différentes bandes de fréquences et technologies disponibles sont données dans le Tableau 3-2. Sur un site donné, les bandes de fréquences ne sont pas toujours toutes implantées.

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 – Scénario « Etat initial »

3.4.2 Scénario « 4G optimisée »

L'ANFR a défini ce scénario de déploiement futur sur la base des technologies actuelles, après avoir consulté les équipementiers télécoms et les opérateurs de téléphonie mobile sur les produits disponibles à moyen/long terme sur le marché et les stratégies qui se dessinent en termes de déploiement technologique sur les sites et bandes de fréquences existantes. Ce scénario est bâti sur une hypothèse d'évolution de déploiement des émetteurs 2G, 3G et 4G, et correspond au déploiement de la 4G sur toutes les stations existantes et sur toutes les bandes de fréquences actuelles, excepté sur la bande 900 qui continuerait à héberger la 2G et la 3G (cf. Tableau 3-3). Ce scénario est appelé « 4G optimisée ». Il ne concerne pas la 5G, qui fait l'objet d'une analyse séparée.

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 augmentées à 4x40W, ou égales à la puissance d'entrée de l'état initial lorsque celle-ci est déjà supérieure à 4x40W ; cet accroissement de puissance permet d'améliorer le rapport signal/bruit et donc d'accroître le débit utile des antennes 4G existantes ;
- 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 »	« 4G optimisée »
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

P = P_{état initial}

P = 4 x 40 W

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

Tableau 3-3 : couples technologies / fréquences – comparaison scénario « Etat initial » et scénario « 4G optimisée »

La puissance maximale des émetteurs a été réduite d'un facteur de réduction de (1,6x1,6), qui correspond au facteur 1,6 appliqué au niveau du champ électrique et défini dans les lignes directrices de l'ANFR¹⁴, afin de modéliser l'exposition qui serait mesurée sur le terrain avec une sonde large bande.

3.4.3 Scénario « 5G seule »

Seule la 5G est prise en compte, dans une seule bande (bande 3,5 GHz), sans prendre en compte les autres contributeurs de la téléphonie mobile. Ce scénario est appelé « 5G seule ».

Pour la 5G, le déploiement est systématisé dans la bande 3,5 GHz, sur l'ensemble des sites existants :

- les localisation, disposition et azimut des émetteurs 5G sont identiques à ceux des aériens 4G ;

¹⁴ <https://www.anfr.fr/fileadmin/mediatheque/documents/espace/20191001-Lignes-directrices-nationales.pdf>

- une attribution de 80 MHz par opérateur dans la bande 3,5 GHz est retenue ;
- la puissance injectée a été choisie sur la base des observations faites dans les pilotes (200 W pour 100 MHz de bande) ce qui donne 160 W (soit 52,04 dBm) pour une largeur de bande de 80 MHz ;
- le *tilt* mécanique est nul ;
- un diagramme d'enveloppe générique est pris en compte pour l'ensemble des antennes 5G : il reprend les caractéristiques techniques du dispositif *Massive MIMO* présenté dans l'annexe H du document IEC TR 62669 (ouverture horizontale à -3 dB de 120°, ouverture verticale à -3 dB de 40°, 20 dB d'atténuation au-delà ; *tilt* électrique intégré de -3°).

Les puissances d'entrée et les diagrammes de rayonnement étant identiques, les PIRE (Puissances isotropes rayonnées équivalentes) des antennes 5G sont ainsi identiques pour chacun des opérateurs :

$$\text{PIRE} = P_{\text{entrée}} + \text{Gain} = 52,04 \text{ dBm} + 24,3 \text{ dBi} = 76,34 \text{ dBm}$$

Le scénario « 5G seule » est simulé avec un coefficient de réduction de 14,75 dB sur la puissance rayonnée pour tenir compte du duplexage temporel (1,25 dB) et du balayage du faisceau moyenné sur 6 minutes (13,5 dB), conformément aux lignes directrices de l'ANFR¹⁵.

3.4.4 Scénario « Majorant 5G »

Les contributions des deux scénarios « 4G optimisé » (scénario optimisé en l'absence de 5G) et « 5G seule » sont combinées pour créer le scénario futur « Majorant 5G ».

Les technologies 5G et 4G créent *a priori* une exposition similaire pour une bande de fréquences donnée pour les antennes à faisceau non orientable. Or, les antennes classiques à faisceau fixe semblent devoir être majoritairement utilisées dans les bandes antérieurement occupées par la 4G. De ce fait, même si la 5G peut en principe créer une exposition *a priori* légèrement plus faible pour un usage donné, ce scénario constitue un majorant plausible dans le cas de migration de la 4G vers la 5G.

Le résultat final permet d'illustrer la tendance stratégique selon laquelle les opérateurs mobiles souhaiteraient éviter le déploiement de nouveaux sites et l'introduction de nouvelles bandes de fréquences.

Une synthèse du scénario « Majorant 5G » est présentée ci-dessous au Tableau 3-4.

¹⁵ <https://www.anfr.fr/fileadmin/mediatheque/documents/espace/20191001-Lignes-directrices-nationales.pdf>

Fréquences	Scénario « Etat initial »	Scénario « 4G optimisée »	Scénario « Majorant 5G »	Puissance d'entrée pour les scénarios futurs
700 MHz	4G	4G	4G	$P = P_{\text{état initial}}$
800 MHz	4G	4G	4G	$P = P_{\text{état initial}}$
900 MHz	2G et 3G	2G et 3G	2G et 3G	$P = P_{\text{état initial}}$
1800 MHz	2G et 4G	4G	4G	$P = 4 \times 40 \text{ W}$
2100 MHz	3G	4G	4G	$P = 4 \times 40 \text{ W}$
2600 MHz	4G	4G	4G	$P = 4 \times 40 \text{ W}$
3600 MHz			5G	$P = 160 \text{ W}$

Tableau 3-4 : Synthèse du scénario « Majorant 5G »

4. Résultats des simulations

Les résultats sont fournis selon les différents scénarios. Une étude sur l'évolution de l'exposition entre les différents scénarios est présentée ensuite.

4.1 Scénario « Etat initial »

Les niveaux de champ électrique moyens et médians calculés sur l'ensemble des points de simulation dans la zone du 14^e 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	2,9 V/m
Calculs devant les façades (extérieur)	0,8 V/m	1,1 V/m	5,2 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 du scénario « Etat initial »

Ces résultats peuvent être rapprochés de l'analyse des résultats de mesures d'exposition du public aux ondes électromagnétiques réalisées en 2017 dans le cadre du dispositif national de surveillance¹⁶ où le niveau médian avait été relevé à 0,4 V/m en milieu urbain où la majorité des mesures sont effectuées en intérieur, ce qui permet, même si les résultats ne sont pas directement comparables, d'avoir un bon niveau de confiance sur la qualité des simulations effectuées dans le scénario « Etat initial ».

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

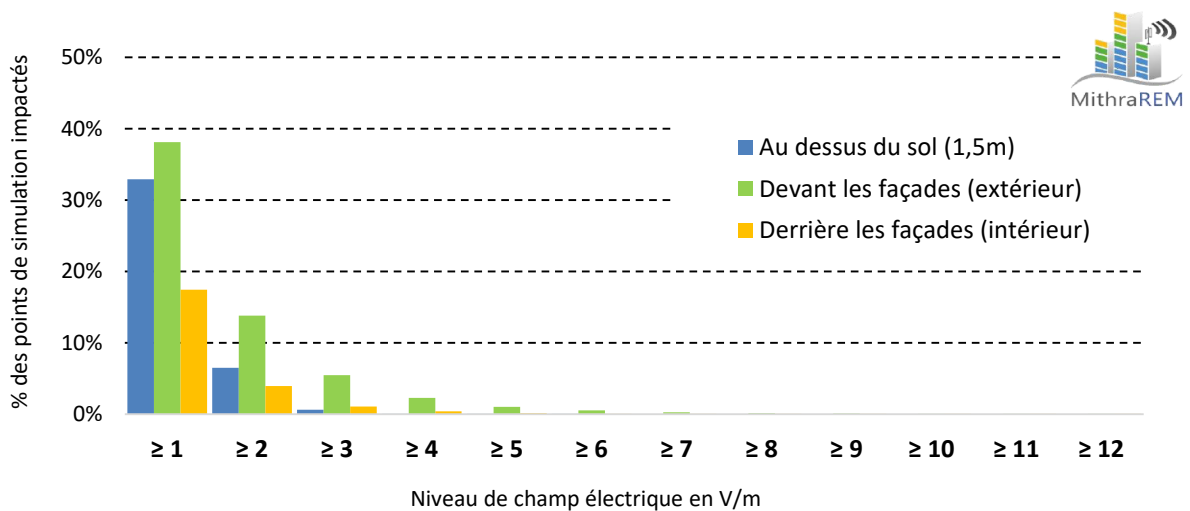


Figure 4-1 : Distribution cumulative de l'exposition – scénario « Etat initial »

	≥ 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. Devant les façades, à l'extérieur, ils 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 COMOP¹⁷.

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.

¹⁶ <https://www.anfr.fr/fileadmin/mediatheque/documents/exp/20180919-Analyse-mesures-2017.pdf>

¹⁷ http://www.radiofrequences.gouv.fr/IMG/pdf/rapport-copic-31-juillet_2013-1.pdf

Les points de simulation des bâtiments dépassant 6 V/m représentent 0,6 % des points en extérieur et 0,1 % des points 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.

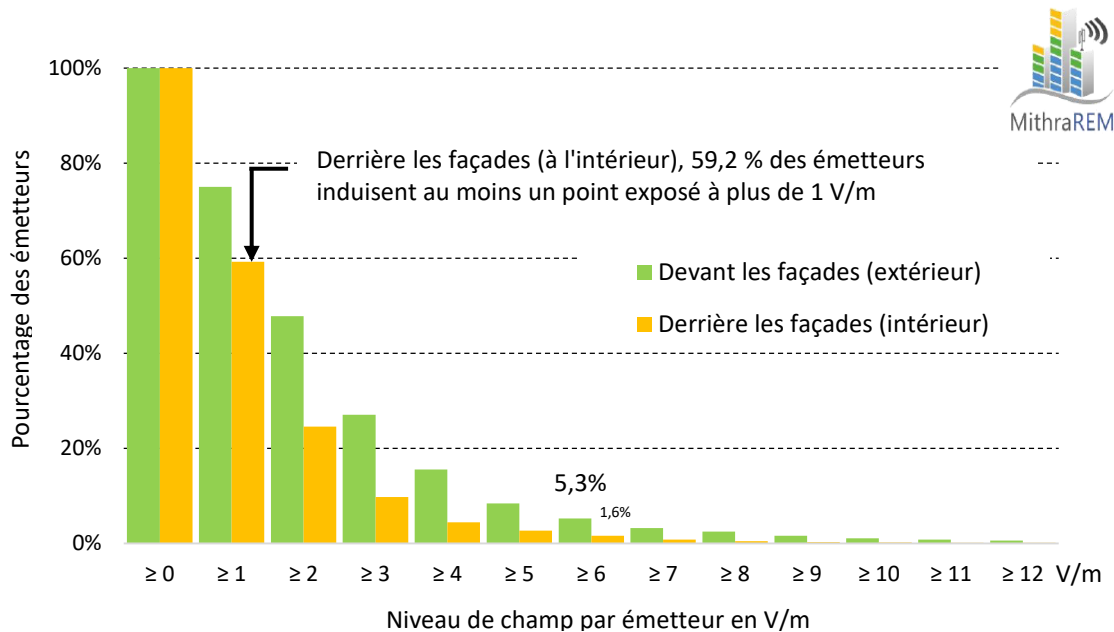


Figure 4-2 : Distribution cumulative des émetteurs contributeurs – scénario « Etat initial »

	≥ 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%

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. 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. Enfin, 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 rendu des niveaux de champ électrique calculés derrière les façades, à l'intérieur des bâtiments.

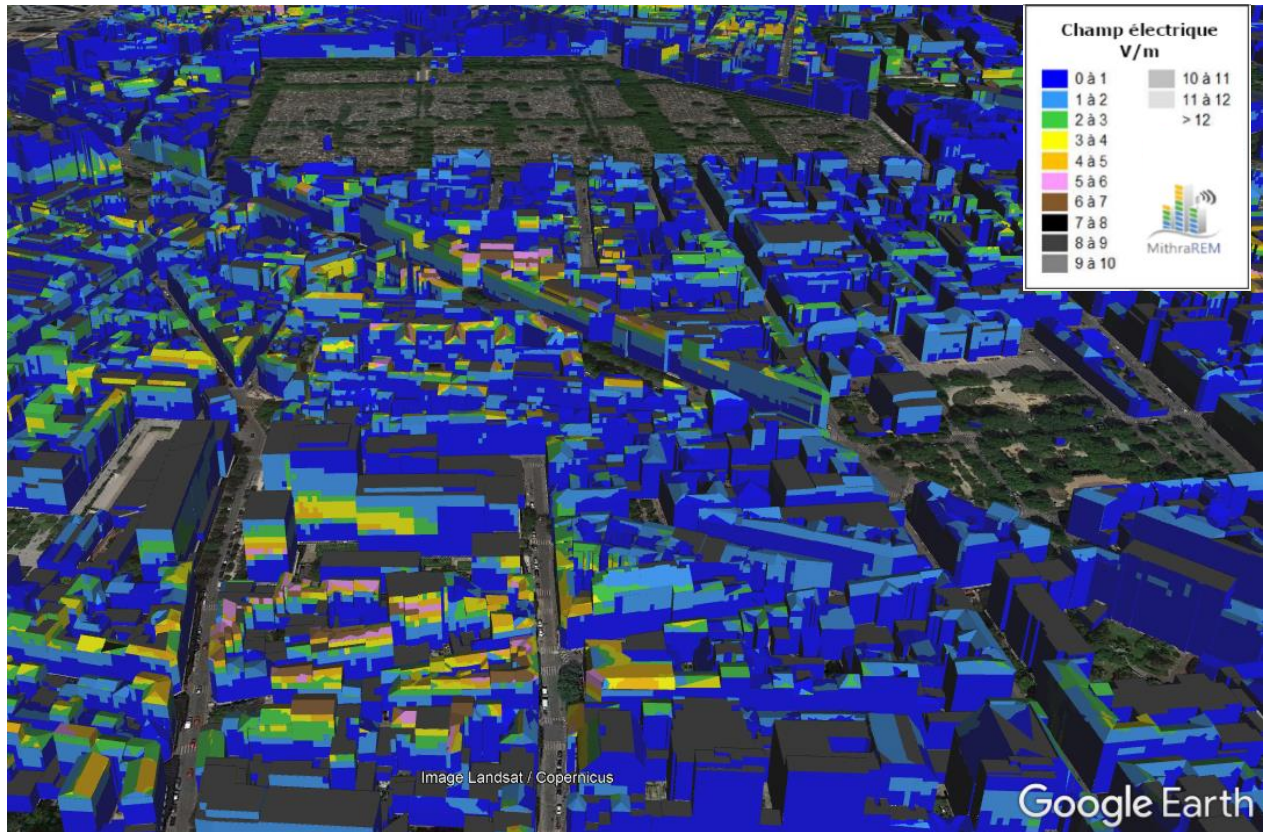


Figure 4-3 : exemple de niveaux de champ électrique calculés derrière les façades des bâtiments en intérieur – scénario « Etat initial » (visualisation Google Earth)

4.2 Scénario « 4G optimisée »

Avec les hypothèses du scénario « 4G optimisée », les niveaux de champ électrique moyens et médians calculés sur l'ensemble des points de simulation dans la zone du 14^e arrondissement de Paris sont donnés dans le Tableau 4-2 : 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	4,8 V/m
Calculs devant les façades (extérieur)	1,3 V/m	1,8 V/m	8,6 V/m
Calculs derrière les façades (intérieur)	0,6 V/m	1 V/m	5,2 V/m

Tableau 4-2 : synthèse des résultats de calcul du scénario « 4G optimisée »

Par rapport au scénario « Etat initial » simulé (qui correspond à l'état des réseaux en 2017), on observe une augmentation notamment du niveau médian qui passe de 0,4 V/m à 0,6 V/m en intérieur. Dans les mesures en

2019¹⁸ le niveau médian est relevé à 0,45 V/m en milieu urbain alors que le niveau médian en milieu urbain était de 0,4 V/m dans nos mesures effectuées en 2017. **La progression observée sur les simulations ne se retrouve donc pas encore dans les mesures : cela signifie a priori que cette hypothèse de déploiement n'était pas encore réalisée en 2019.**

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

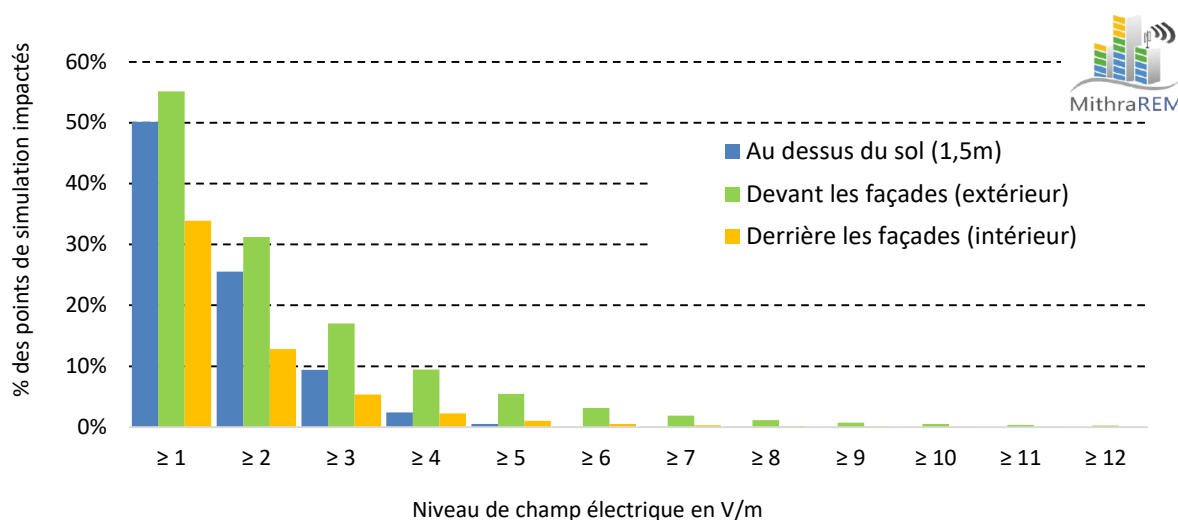


Figure 4-4 : Distribution cumulative de l'exposition – scénario « 4G optimisée »

	≥ 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%

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.

¹⁸ <https://www.anfr.fr/fileadmin/mediatheque/documents/expacce/20200408-ANFR-analyse-mesures-2019.pdf>

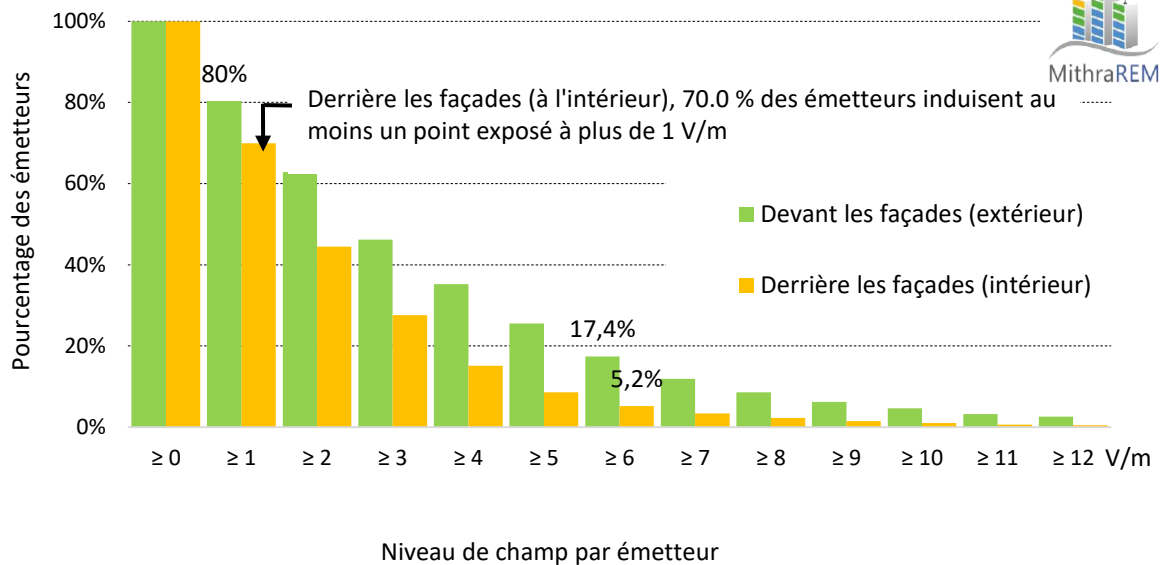


Figure 4-5 : Distribution cumulative des émetteurs contributeurs – scénario « 4G optimisée »

	≥ 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%

L'apport de ce scénario est aussi de faire apparaître, notamment dans le cadre des controverses autour de l'introduction de la 5G, qu'un hypothétique gel de l'évolution technologique n'aurait pas pour effet de stabiliser l'exposition du public au niveau actuel : **s'il s'agit de répondre à la croissance du volume des données mobiles, la logique d'optimisation de la 4G conduira à un accroissement de l'exposition dans les zones denses.**

4.3 Scénario « 5G seule »

Dans le scénario « 5G seule », la 5G est simulée seule, dans une seule bande, sans les autres technologies. Les résultats sont analysés dans ce rapport, même si l'objectif principal de l'étude demeure l'analyse du niveau global de l'exposition créée par la téléphonie mobile.

Le Tableau 4-3 ci-dessous fournit une synthèse des résultats trouvés.

	Niveau Moyen	Pourcentage des points supérieurs à 6 V/m
Calculs devant les façades (extérieur)	1,36 V/m	1,1 %
Calculs derrière les façades (intérieur)	0,76 V/m	0,2 %

Tableau 4-3 : Synthèse des résultats de calcul du scénario « 5G seule »

La Figure 4-6 ci-dessous fournit la répartition des niveaux d'exposition.

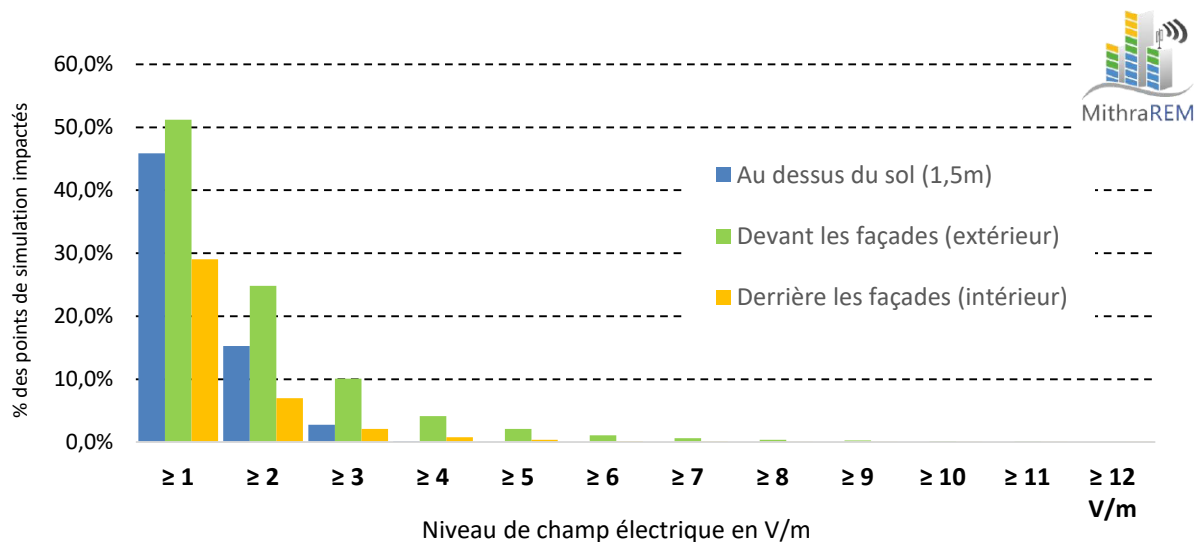


Figure 4-6 : Répartition des niveaux d'exposition en « 5G seule »

	≥ 1	≥ 2	≥ 3	≥ 4	≥ 5	≥ 6	≥ 7	≥ 8	≥ 9	≥ 10	≥ 11	≥ 12
Au dessus du sol (1,5m)	45,9%	15,3%	2,8%	0,2%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Devant les façades (extérieur)	51,2%	24,8%	10,1%	4,1%	2,1%	1,1%	0,6%	0,4%	0,3%	0,2%	0,1%	0,1%
Derrière les façades (intérieur)	29,0%	7,0%	2,1%	0,8%	0,4%	0,2%	0,1%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Devant les façades en extérieur, on constate que le pourcentage de points au-dessus de 6 V/m est de 1,1 %, il est supérieur à celui obtenu à l'état initial (0,6 %) mais bien inférieur à celui du scénario « 4G optimisée » (3,2 %). De même, la moyenne de l'exposition pour les façades en extérieur est de 1,36 V/m supérieure à celle obtenue à l'état initial (1,1 V/m) et inférieure à celle obtenue au scénario « 4G optimisée » (1,8 V/m).

Les antennes à faisceaux orientables de la 5G dans la bande 3,4-3,8 GHz par rapport aux antennes classiques à faisceau fixe avec les hypothèses retenues ne devraient donc pas être à terme le contributeur principal de l'exposition, y compris en zone urbaine dense ou ces antennes devraient largement être déployées.

4.4 Scénario « Majorant 5G »

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 4-4. 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	1,5 V/m	1,7 V/m	5,6 V/m
Calculs devant les façades (extérieur)	1,8 V/m	2,3 V/m	10,4 V/m
Calculs derrière les façades (intérieur)	0,9 V/m	1,3 V/m	6,3 V/m

Tableau 4-4 : synthèse des résultats de calcul du scénario « Majorant 5G »

La répartition des niveaux d'exposition est illustrée sur la Tableau 4-7.

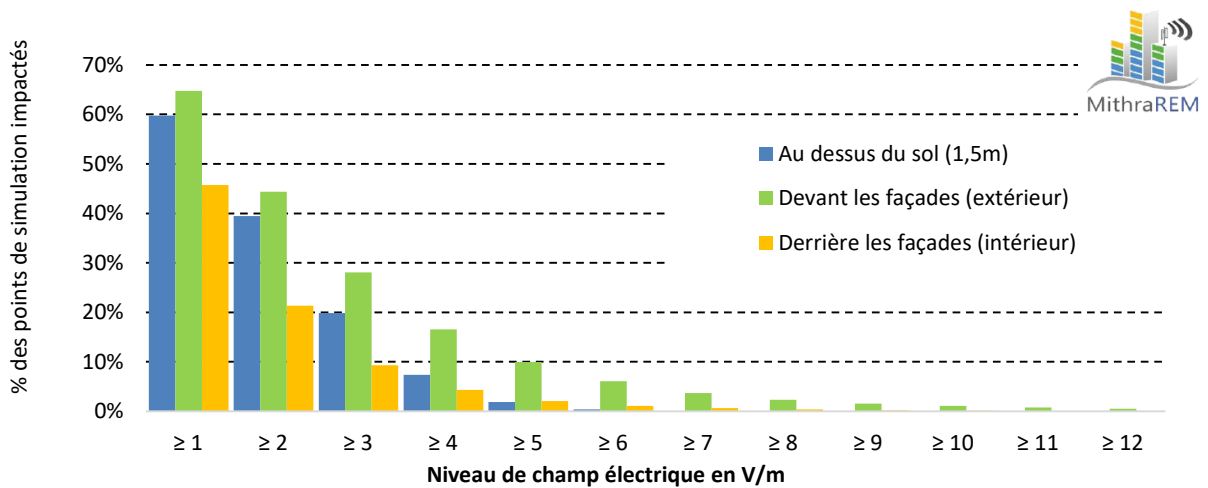


Figure 4-7 : distribution cumulative de l'exposition – scénario « Majorant 5G »

	≥ 1	≥ 2	≥ 3	≥ 4	≥ 5	≥ 6	≥ 7	≥ 8	≥ 9	≥ 10	≥ 11	≥ 12
Au dessus du sol (1,5m)	59,8%	39,5%	19,9%	7,4%	1,9%	0,4%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Devant les façades (extérieur)	64,7%	44,4%	28,1%	16,6%	9,9%	6,1%	3,7%	2,4%	1,6%	1,1%	0,8%	0,5%
Derrière les façades (intérieur)	45,8%	21,3%	9,3%	4,3%	2,1%	1,1%	0,7%	0,4%	0,2%	0,1%	0,1%	0,1%

La contribution des émetteurs aux niveaux d'exposition est illustrée sur la Tableau 4-8. 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.

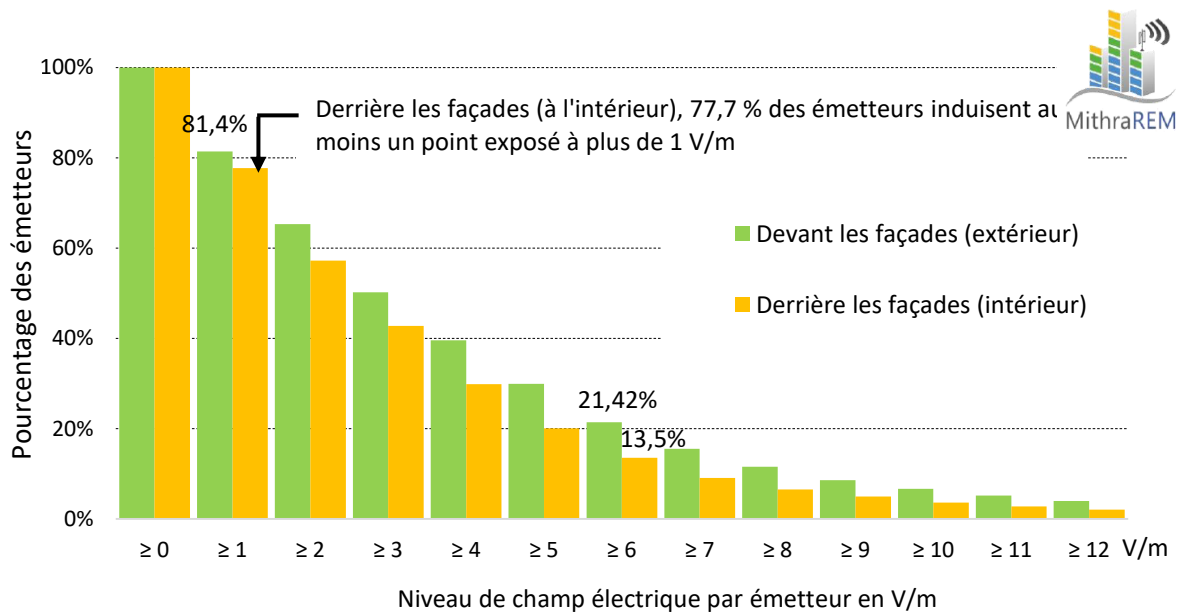


Figure 4-8 : distribution cumulative des émetteurs contributeurs – scénario « Majorant 5G »

	≥ 1	≥ 2	≥ 3	≥ 4	≥ 5	≥ 6	≥ 7	≥ 8	≥ 9	≥ 10	≥ 11	≥ 12
Devant les façades (extérieur)	81,4%	65,3%	50,2%	39,6%	29,9%	21,4%	15,5%	11,5%	8,6%	6,6%	5,2%	3,9%
Derrière les façades (intérieur)	77,7%	57,2%	42,7%	29,9%	20,1%	13,5%	9,1%	6,5%	4,9%	3,6%	2,7%	2,0%

4.5 Evolution de l'exposition

L'évolution de l'exposition est étudiée en dissociant l'exposition devant les façades (à l'extérieur) et derrière les façades (à l'intérieur) et au sol.

4.5.1 Evolution de l'exposition derrière les façades (intérieur)

Pour l'étude de l'évolution derrière les façades (à l'intérieur) selon les différents scénarios, on présente ci-dessous la distribution de l'exposition avec la moyenne et le nombre de points qui ont une valeur d'exposition supérieure ou égale à 6 V/m, ainsi que la distribution des émetteurs contributeurs à l'exposition avec le pourcentage des émetteurs induisant un point pour laquelle l'exposition est supérieure ou égale à 6 V/m.

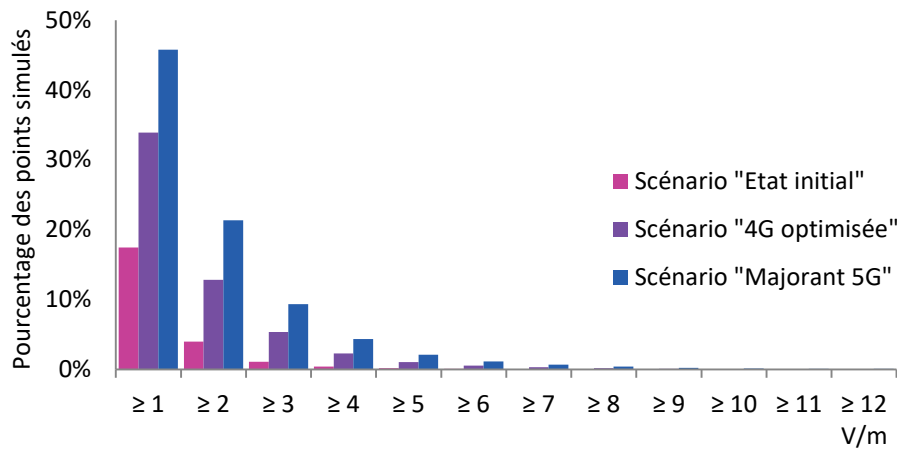


Figure 4-9 : distribution cumulative de l'exposition derrière les façades (intérieur)

	Scénario « Etat initial »	Scénario « 4G optimisée »	Scénario « Majorant 5G »
Moyenne	0,6 V/m	1 V/m	1,3 V/m
Pourcentage des points ≥ 6 V/m	0,07 %	0,5 %	1,1 %

Tableau 4-5 : évolution de l'exposition derrière les façades (intérieur)

L'exposition augmente derrière les façades (à l'intérieur) en fonction des scénarios, le nombre de points supérieur ou égal à 6 V/m est multiplié par environ 15 en intérieur, même si le pourcentage reste faible pour le dernier scénario (1,1 %) (cf. Tableau 4-5).

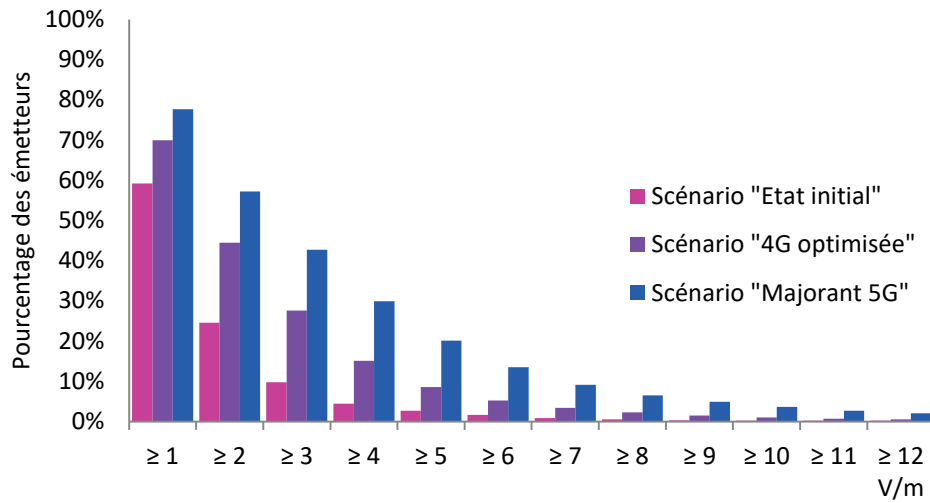


Figure 4-10 : distribution cumulative des émetteurs contributeurs derrière les façades (intérieur)

	Scénario « Etat initial »	Scénario « 4G optimisée »	Scénario « Majorant 5G »
Pourcentage des émetteurs induisant un point ≥ 6 V/m	1,6 %	5,2 %	13,5 %

Tableau 4-6 : émetteurs induisant un point supérieur ou égal à 6 V/m derrière les façades (intérieur)

Dans le Tableau 4-6, on constate que le nombre d'émetteurs induisant un point supérieur ou égal à 6 V/m augmente en fonction des scénarios, jusqu'à atteindre pratiquement un émetteur sur sept dans le dernier scénario.

4.5.2 Evolution de l'exposition devant les façades (à l'extérieur)

Pour l'étude de l'évolution devant les façades (à l'extérieur) selon les différents scénarios, on présente ci-dessous la distribution de l'exposition avec la moyenne et le nombre de points qui ont une valeur d'exposition supérieure ou égale à 6 V/m, ainsi que la distribution des émetteurs contributeurs à l'exposition avec le pourcentage des émetteurs induisant un point pour laquelle l'exposition est supérieure ou égale à 6 V/m.

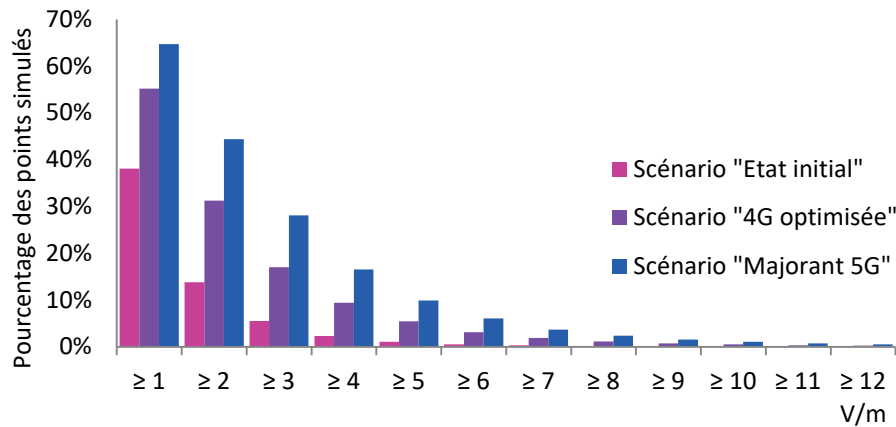


Figure 4-11 : distribution cumulative de l'exposition devant les façades (extérieur)

	Scénario « Etat initial »	Scénario « 4G optimisée »	Scénario « Majorant 5G »
Moyenne	1 V/m	1,7 V/m	2,3 V/m
Points >= 6 V/m	0,55 %	3,15 %	6 %

Tableau 4-7 : évolution de l'exposition devant les façades (extérieur)

L'exposition augmente en fonction des scénarios devant les façades (à l'extérieur), le nombre de points supérieur ou égal à 6 V/m est multiplié par environ 11 en extérieur (cf. Tableau 4-7).

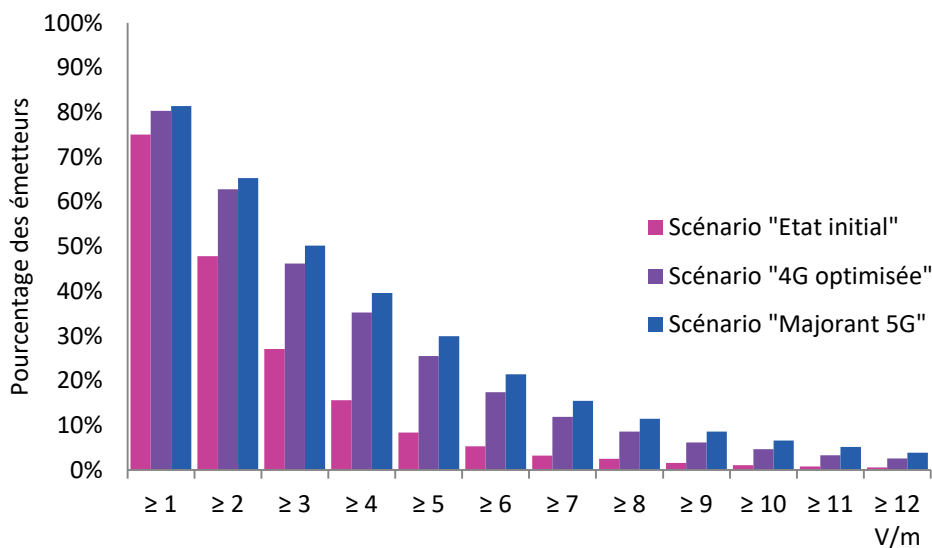


Figure 4-12 : distribution cumulative des émetteurs contributeurs devant les façades (extérieur)

	Scénario « Etat initial »	Scénario « 4G optimisée »	Scénario « Majorant 5G »
Pourcentage des émetteurs induisant un point ≥ 6 V/m	5,3 %	17,4 %	21,4 %

Tableau 4-8 : émetteurs induisant un point supérieur ou égal à 6 V/m devant les façades (extérieur)

Dans le Tableau 4-8, on constate que le nombre d'émetteurs induisant un point supérieur ou égal à 6 V/m augmente en fonction des scénarios, jusqu'à atteindre plus d'un émetteur sur cinq (21,4 %) dans le dernier scénario « Majorant 5G ».

5. Conclusions

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

Un 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.

Les niveaux d'exposition devant les façades (à l'extérieur) sont globalement plus élevés que les niveaux d'exposition au sol. L'exposition derrière les façades (à l'intérieur) est fortement diminuée par rapport à l'exposition à l'extérieur.

Avec l'hypothèse d'un déploiement optimisé de la 4G, le niveau d'exposition moyen augmente d'environ 66 % et génère environ six fois plus de points les plus exposés (niveaux supérieurs à la valeur d'attention de 6 V/m). S'il s'agissait pour les opérateurs de tenter de répondre à la croissance du volume des données mobiles en l'absence de 5G, l'optimisation de la 4G conduirait ainsi à une évolution de l'exposition dans les zones les plus denses.

Dans l'hypothèse de l'ajout d'émetteurs 5G au déploiement 4G optimisée, le niveau d'exposition moyen augmente d'environ 30 % et génère environ 50 % de points de niveau supérieur à 6 V/m supplémentaires.

L'exposition de la « 5G seule » crée 0,2 % de points supérieurs ou égal à 6 V/m en intérieur et 1,1 % en extérieur. Les antennes à faisceaux orientables de la 5G dans la bande 3,4-3,8 GHz ne devraient donc pas être à terme le contributeur principal de l'exposition, y compris en zone urbaine dense où ces antennes devraient être largement déployées.

Enfin, à ce stade intermédiaire de l'étude, il apparaît également que la croissance du volume de données fera croître le nombre de points supérieurs à 6 V/m dans les zones urbaines très denses. Le nombre d'émetteurs entrant en procédure de « point atypique » sera donc plus élevé.