

Evaluation de l'exposition du public aux ondes électromagnétiques 5G

Volet 2 intermédiaire : premiers résultats de mesures sur les pilotes 5G

Juillet 2019

Synthèse

Ce rapport s'inscrit dans le cadre d'une réflexion générale sur l'évaluation de l'exposition du public aux ondes électromagnétiques des réseaux 5G. Le premier volet a porté sur une présentation générale de la 5G abordée sous l'angle de l'exposition. Ce deuxième volet porte sur les déploiements pilotes menés en France pour tester en grandeur nature les modalités d'un déploiement d'antennes 5G à faisceaux orientables dans la bande 3400-3800 MHz.

Des mesures d'exposition selon le protocole de mesure de l'ANFR en vigueur sont réalisées avant et après allumage de sites représentant diverses configurations d'opérateurs, de constructeurs, de types d'antennes. Les mesures après allumage ont été réalisées sans trafic puisqu'à la date de réalisation des mesures ces sites n'étaient pas ouverts à des abonnés. En l'absence de trafic, on observe les signaux de signalisation qui permettent au relais mobile de scruter la zone de couverture à la recherche d'éventuels utilisateurs. Trente-six sites ont déjà fait l'objet de mesures qui ont montré qu'avant allumage des sites 5G, il n'y avait pas d'émission dans cette bande de fréquence et qu'après allumage des sites 5G, en l'absence de trafic, le niveau moyen d'exposition dans la bande 5G s'établit à 0,06 V/m avec un niveau maximal de 0,36 V/m. Ces niveaux se situent très au-dessous de la valeur limite réglementaire qui est fixée à 61 V/m dans cette bande de fréquences.

Des mesures complémentaires ont également pu être réalisées sur un nombre limité de sites dans une configuration de test particulière, avec du trafic de données dans un faisceau bloqué dans une direction donnée. Ces mesures ont permis d'observer le comportement en fréquences et dans le temps des premiers signaux 5G. Elles ont également mis en évidence la variation du niveau d'exposition en fonction de l'usage et ont conduit à proposer de définir un nouvel indicateur permettant de mieux refléter l'exposition réelle créée par les réseaux 5G à faisceaux orientables. Cet indicateur est fondé sur un modèle d'usage prévisible de la 5G, qui se traduit par l'envoi, dans une direction donnée, d'un gigaoctet de données toutes les 6 minutes. Avec une hypothèse d'un débit moyen de 500 Mbps, l'antenne émet alors dans la direction donnée environ 15 secondes toutes les 6 minutes (soit environ 4 % du temps). Les hypothèses pour définir cet indicateur seront confrontées aux mesures de l'exposition réalisées sur le terrain, pour les réseaux commerciaux 5G. Elles seront si nécessaires révisées.

Cet indicateur aboutit à un facteur de réduction qui permet de calculer l'exposition dans des conditions réelles à partir de la puissance maximale théorique des antennes. Cependant, en 4G, le facteur de réduction s'applique à la valeur maximale du gain de l'antenne qui n'est constatée que dans la direction principale de l'antenne : en dehors de cette direction principale, le niveau de champ sera plus faible. En revanche, avec les antennes à faisceaux orientables de la 5G, l'exposition calculée à partir de l'indicateur sera valable dans un nombre plus grand de directions. Les niveaux de champ à 100 mètres d'une antenne 5G découlant de l'application de l'indicateur apparaissent comparables à ceux constatés à la même distance d'une antenne 4G.

Ces premières mesures ont été réalisées dans des conditions qui restent limitées. En effet, un seul type d'antenne d'un seul constructeur a été testé. Il conviendra de tester dès que possible différents types et différentes marques d'antennes. De plus, les téléphones 5G fonctionnant dans cette bande de fréquence n'étaient pas disponibles au moment des mesures et il n'a pas été possible de tester des configurations multi-utilisateurs. Après la commercialisation des premiers téléphones 5G, de nouvelles mesures permettront de construire des configurations plus réalistes.

Table des matières

| | |
|--|----|
| 1. Introduction..... | 4 |
| 2. Les zones pilotes en France..... | 5 |
| 3. Mesures COFRAC réalisées sur les pilotes..... | 7 |
| 3.1. Présentation..... | 7 |
| 3.2. Résultats..... | 7 |
| 4. Mesures complémentaires..... | 8 |
| 4.1. Présentation..... | 8 |
| 4.2. Caractéristiques des sites..... | 8 |
| 4.3. Configuration de mesures..... | 10 |
| 4.4. Caractéristiques des signaux 5G testés..... | 10 |
| 4.5. Résultats..... | 11 |
| 4.5.1. Sans trafic..... | 11 |
| 4.5.2. Avec trafic continu..... | 13 |
| 4.5.3. Avec transfert de fichiers..... | 18 |
| 5. Conclusions intermédiaires..... | 19 |
| 5.1. Indicateur de l'exposition..... | 19 |
| 5.2. Périmètres de sécurité..... | 21 |

1. Introduction

Ce rapport s'inscrit dans le cadre d'une réflexion générale sur l'évaluation de l'exposition du public aux ondes électromagnétiques des réseaux 5G. Le premier volet a porté sur une présentation générale de la 5G abordée sous l'angle de l'exposition. Ce deuxième volet porte sur les déploiements pilotes menés en France pour tester en grandeur nature les modalités d'un déploiement d'antennes 5G dans la bande 3 400 - 3 800 MHz.

La première bande 3 400 – 3 800 MHz utilisée en 5G offre un bon compromis entre couverture et capacité. Des cellules de type longue portée « macro » pourront être mises en œuvre dans cette bande de fréquences afin d'assurer une bonne couverture tout en disposant des largeurs de bande étendues nécessaires au très haut-débit mobile. Pour atteindre les objectifs ambitieux de la 5G, des puissances émises instantanées plus importantes sont nécessaires et la 5G reposera sur la technologie « massive MIMO » qui permet de former des faisceaux orientables et plus fins orientés vers les utilisateurs (« *beamforming* »). Du fait de ces faisceaux orientables, et contrairement aux technologies précédentes, l'exposition aux ondes créée par les antennes relais de la téléphonie mobile varie continuellement en fonction de l'emplacement des utilisateurs et du fait qu'ils communiquent ou non. La 5G nécessite donc d'ajuster les procédures d'évaluation de l'exposition.

L'objectif de la démarche expérimentale est donc de caractériser l'influence du déploiement des antennes 5G sur l'exposition créée par les points d'accès du réseau (antennes 5G de différents modèles).

2. Les zones pilotes en France

Début 2018, l'Arcep a ouvert un guichet « pilotes 5G » afin de délivrer des autorisations d'utilisation de fréquences dans les bandes de fréquence pressenties pour la 5G, à titre transitoire et dans la limite de leur disponibilité. L'Arcep tient un tableau de bord de ces zones pilotes : <https://www.arcep.fr/cartes-et-donnees/nos-publications-chiffrees/experimentations-5g-en-france/tableau-deploiements-5g.html>

Une fois l'autorisation d'utiliser les fréquences obtenue auprès de l'Arcep, les exploitants doivent solliciter l'autorisation d'émettre auprès de l'ANFR. L'ANFR publie mensuellement un observatoire du déploiement des réseaux mobiles et comptabilise notamment les supports¹ 5G autorisés pour ces pilotes (cf. Figure 1). Toutefois, l'accord d'émettre pour une station 5G expérimentale délivré par l'ANFR ne préjuge pas du statut réel de fonctionnement² de cette station.

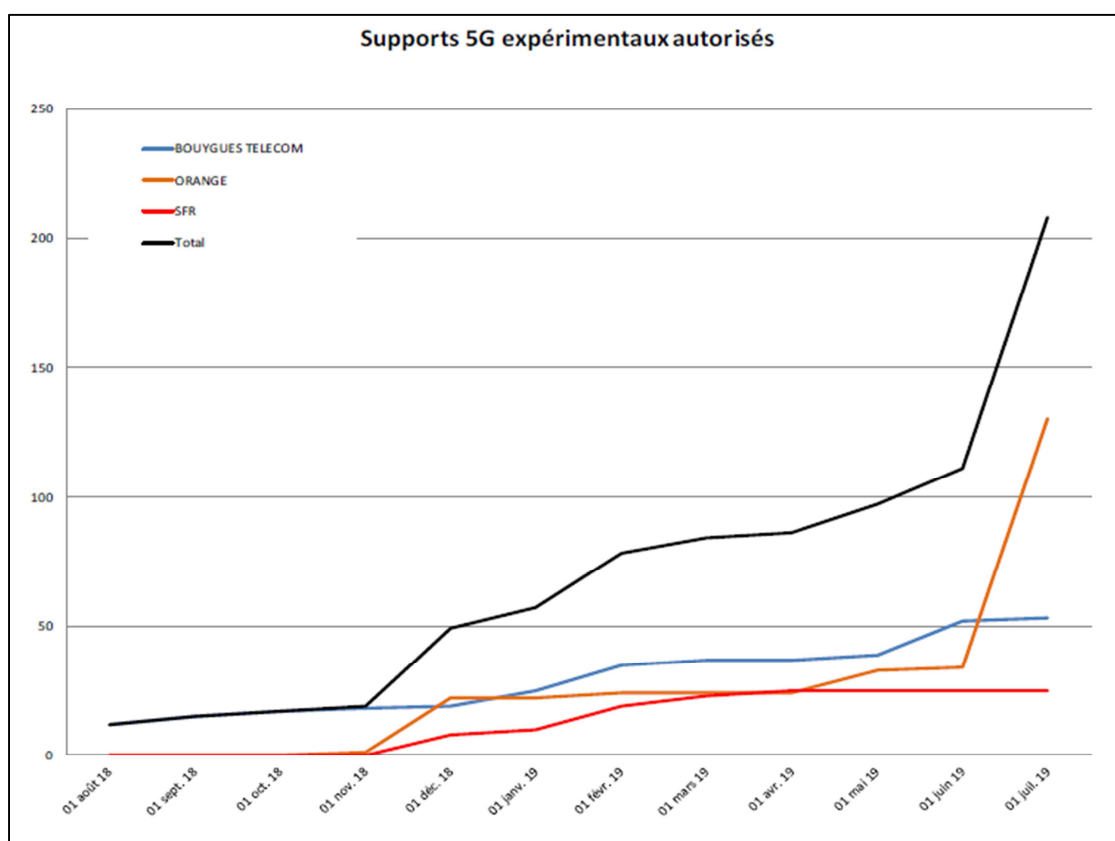


Figure 1 : extrait de l'observatoire ANFR du déploiement des réseaux mobiles de Juillet 2019.

Le Tableau 1 et la Figure 2 résume les principales caractéristiques des pilotes étudiés dans cette analyse. Ce tableau ne se veut pas exhaustif mais présente les premiers pilotes de grande ampleur

¹ Un support est une infrastructure supportant une ou plusieurs antennes

² Du fait du statut expérimental de ces déploiements, le fonctionnement de ces stations est souvent interrompu, n'étant pas soumis à une exigence de continuité de service.

prévus initialement par trois des quatre opérateurs français de téléphonie mobile. Depuis, les opérateurs ont lancé d'autres déploiements expérimentaux d'antennes 5G dans d'autres villes.

| Ville | Opérateur | Constructeur |
|------------|------------------|--------------|
| Lille | Orange | Ericsson |
| Douai | Orange | Ericsson |
| Châtillon | Orange | Huawei |
| Nantes | SFR | Huawei |
| Bordeaux | Bouygues Telecom | Huawei |
| Pau | Orange | Huawei |
| Toulouse | SFR | Huawei |
| Marseille | Orange | Nokia |
| Lyon | Bouygues Telecom | Ericsson |
| Saint-Ouen | Orange | Samsung |

Tableau 1 : liste des villes, opérateurs et constructeurs concernés par les premiers déploiements pilotes 5G dans la bande 3400 MHz – 3800 MHz.

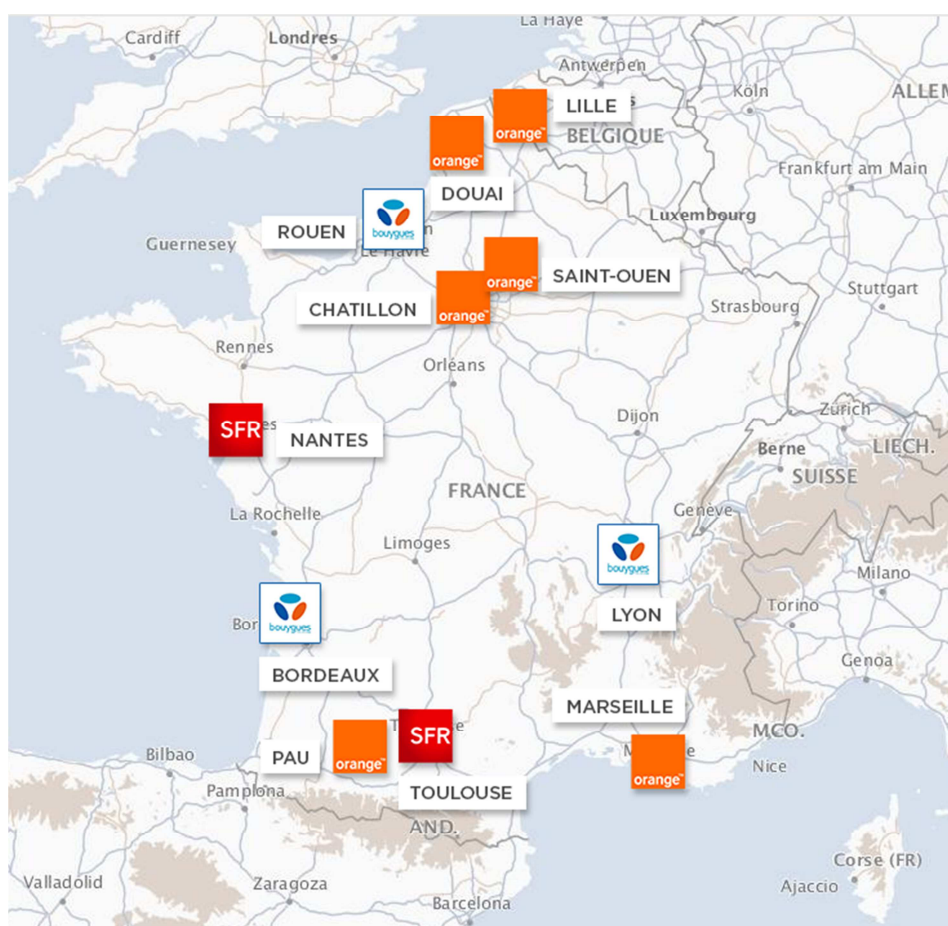


Figure 2 : villes hébergeant les déploiements pilotes 5G dans la bande 3 400 MHz – 3 800 MHz ayant fait l'objet d'un suivi par l'ANFR.

3. Mesures COFRAC réalisées sur les pilotes

3.1. Présentation

Des mesures d'exposition selon le protocole de mesure de l'ANFR en vigueur sont réalisées avant et après allumage d'un certain nombre de sites représentant diverses configurations d'opérateurs, de constructeurs, de types d'antennes.

Les villes concernées sont Pau, Marseille, Lille, Douai, Bordeaux, Lyon, Nantes, Rouen, Saint-Ouen et Toulouse où les opérateurs Orange, Bouygues Telecom et SFR effectuent des déploiements pilotes dans la bande 3,4 GHz – 3,8 GHz.

Les mesures après allumage ont été réalisées sans trafic puisqu'aujourd'hui ces sites ne sont pas ouverts aux abonnés. En l'absence de trafic, des signaux de signalisation sont émis, ils permettent au relais mobile de scruter la zone de couverture à la recherche d'éventuels utilisateurs.

Une mesure détaillée « cas B » du protocole de mesures ANFR est effectuée initialement avant la mise en marche de la 5G, site par site, en vue directe entre 100 et 200 m et dans l'azimut médian du secteur pour chaque installation dans toutes les villes pilotes concernées. Ces mesures permettent d'obtenir des points de référence.

Des mesures ultérieures auront lieu par la suite en présence d'un trafic établi pour étudier l'effet de la 5G sur l'exposition globale.

3.2. Résultats

Trente-six sites ont déjà fait l'objet de mesures. Celles-ci ont tout d'abord montré qu'avant allumage des sites 5G, aucune émission préexistante n'était constatée dans cette bande de fréquence. Après allumage des sites 5G, en l'absence de trafic, le niveau moyen d'exposition dans la bande 5G ressortait à 0,06 V/m avec un niveau maximal de 0,36 V/m.

Avant l'allumage des antennes 5G, il n'y a pas d'émission dans cette bande : les niveaux ont en effet été mesurés à moins de 0,01 V/m (cf. Tableau 2), valeur bien inférieure à 0,05 V/m, niveau fixé dans le protocole de l'ANFR pour définir une émission significative.

Après allumage des antennes 5G mais en l'absence de trafic, le niveau moyen d'exposition créé par la 5G dans la bande 3,4 – 3,8 GHz apparaît très faible, il a été mesuré en moyenne à 0,06 V/m et au maximum à 0,36 V/m (cf. Tableau 2).

Ces niveaux se situent très en-dessous de la valeur limite réglementaire de 61 V/m dans cette bande de fréquences.

| | Sans 5G | Avec signalisation 5G |
|---------|------------|-----------------------|
| Moyenne | < 0,01 V/m | 0,06 V/m |
| Maximum | < 0,01 V/m | 0,36 V/m |

Tableau 2 : récapitulatif des niveaux de champ électriques mesurés dans la bande 3,4 – 3,8 GHz sur 36 sites avant et après allumage de la 5G.

4. Mesures complémentaires

4.1. Présentation

Des mesures complémentaires exploratoires ont été organisées de façon collaborative entre l'ANFR, l'opérateur et le constructeur afin de tester différentes configurations combinant l'ensemble des opérateurs testant la 5G et l'ensemble des fabricants d'antennes.

Ces essais exploratoires devaient permettre :

- de mieux comprendre les signaux 5G ;
- d'ajuster le protocole de mesure de l'ANFR pour mieux prendre en compte la 5G ;
- de définir un indicateur de l'exposition.

Les pilotes 5G ne sont pas encore ouverts aux abonnés des opérateurs. A ce stade, il n'existait pas de terminaux compatibles sur le marché français. Pour autant, l'évaluation de l'exposition dans différentes configuration nécessite de générer du trafic. En l'absence de mobile 5G, le trafic peut être produit :

- par un équipement mobile de test (CPE pour *Customer Premise Equipment*) qui permettra notamment de forcer le faisceau dans une direction ;
- ou par l'utilisation d'un mode test de la station de base qui permet de tester différentes configurations de charge du réseau et de nombre de faisceaux.

A ce stade, de nombreux sites sont installés et allumés sans pour autant que toutes les fonctionnalités possibles de la 5G y soient implémentées et sans que la génération de trafic y soit possible. Ces mesures complémentaires ont donc été réalisées sur un nombre très limité de sites.

4.2. Caractéristiques des sites

Pour ce rapport préliminaire, seuls des sites équipés de stations de base du constructeur Huawei ont pu être testés dans les configurations souhaitées pour caractériser l'exposition aux ondes électromagnétiques, c'est-à-dire avec la possibilité de générer du trafic dans différentes configurations.

Les sites ayant fait l'objet de cette analyse complémentaire sont (cf. Figure 3) :

- un site Bouygues Telecom à Mérignac ;
- un site Orange à Châtillon ;
- et un site SFR à Toulouse.

Ces sites ont été choisis en fonction d'un certain nombre de contraintes logistiques (visibilité directe et dégagée des sites, accessibilité aux véhicules techniques, alimentation électrique...).



Figure 3 : vue aérienne des trois sites ayant fait l'objet de mesures complémentaires.

Ces 3 sites sont équipés de la même antenne Huawei qui porte la référence AAU5613. Cette antenne est composée de 192 antennes élémentaires permettant de constituer 64 émetteurs/récepteurs.



Figure 4 : photo de l'antenne 5G Huawei AAU5613.

Pour générer du trafic descendant (« *downlink* ») dans une direction donnée, un CPE, alimenté par secteur et piloté par un ordinateur, est utilisé (cf. Figure 5).



Figure 5 : CPE « customer premise equipment », équipement servant de mobile de test pour générer du trafic dans une direction donnée.

4.3. Configuration de mesures

- **Sans trafic**
La station de base n'envoie que des signaux de signalisation, aucun utilisateur n'est servi par l'antenne.
- **Configuration de test avec trafic continu dans un faisceau bloqué**
Dans cette configuration, la station de base envoie un flux de données constant et en continu vers le CPE. Cet envoi est assuré soit par un transfert UDP soit par un transfert FTP. Le transfert UDP présente l'avantage de minimiser les envois montants et de maximiser les envois descendants. Le transfert FTP présente l'avantage d'être plus réaliste. Dans cette configuration, le faisceau se trouve donc bloqué dans une direction donnée.
- **Configuration transfert de fichier**
Dans cette configuration, le trafic est généré par des téléchargements à la demande, à partir de fichiers de différentes tailles (150 Mo, 500 Mo, 1 Go, 10 Go, 100 Go).

Les mesures seront réalisées en différents points, en vue directe de l'antenne, dans un faisceau de l'antenne et en dehors des faisceaux. Les mesures sont réalisées à 1,5 m du sol, en extérieur.

Les niveaux de champs sont évalués en valeurs moyennes sur 6 minutes conformément à la réglementation. Il est rappelé que la 5G utilise une modulation OFDMA qui se caractérise par un fort niveau de PAPR (« *peak to average power ratio* ») qui mesure l'amplitude maximale instantanée du signal par rapport à son niveau moyen.

4.4. Caractéristiques des signaux 5G testés

Le standard 5G défini par le 3GPP, la 5G NR, est très ouvert et permet une très grande flexibilité dans le choix de nombreux paramètres caractérisant le signal.

La 5G NR utilise, comme la 4G, une modulation de type OFDMA (« *orthogonal frequency division multiple access* ») qui repose sur un découpage de la matrice temps/fréquences en ressources élémentaires. En fréquences, l'unité est la taille d'une sous porteuse en kHz ; en temps, c'est la durée d'un symbole OFDM en millisecondes. Les symboles OFDM sont regroupés par 14 pour former des « *slots* ».

Ces ressources élémentaires sont ensuite regroupées pour former des blocs de fréquences (« RB » pour ressource bloc) contenant un certain nombre de sous porteuses, des sous-trames de une milliseconde et des trames de dix millisecondes.

Le découpage dans le temps entre les émissions *uplink* et *downlink* se fait également selon des formats prédéfinis. Dans les premiers cas observés sur le terrain, ce découpage se fait par slot avec un format « DDSU » c'est-à-dire 3 slots « D » successifs réservés au trafic *downlink*, un slot « S » pour *switch* majoritairement réservé au trafic *downlink* et un slot « U » réservé au trafic *uplink*. Avec cette configuration, le ratio TDD est de 75 % en faveur du *downlink*.

Le Tableau 3 récapitule les principales caractéristiques des signaux 5G testés sur les pilotes ayant fait l'objet de mesures complémentaires par l'ANFR.

| Paramètres | Pilotes 5G testés |
|---|--------------------|
| Largeur de bande | 100 MHz |
| Espacement entre sous porteuses | 30 kHz |
| Taille d'un ressource bloc | 12 sous porteuses |
| Nombre de ressources blocs disponibles | 273 |
| Durée d'une trame | 10 ms |
| Durée d'un slot | 0,5 ms |
| Nombre de symboles par slot | 14 symboles |
| Format de la trame | DDDSU |
| Ratio TDD | 75% downlink |
| Position des signaux de signalisation (SSB) | Fréquence centrale |
| Périodicité des SSB | 20 ms |

Tableau 3 : caractéristiques générales des signaux 5G testés sur les pilotes ayant fait l'objet de mesures complémentaires par l'ANFR.

4.5. Résultats

4.5.1. Sans trafic

En l'absence de trafic, seuls les signaux de signalisation sont émis. La Figure 6 illustre le spectre observé en l'absence de trafic. Les couleurs indiquent l'occurrence des niveaux de puissance indiqués en échelle logarithmique en ordonnée en fonction de la fréquence en abscisse (120 MHz autour de la fréquence centrale de la bande d'émission de l'antenne). Le niveau le plus fréquemment mesuré est représenté en jaune et correspond au niveau de bruit dans la bande, en effet, la plupart du temps, en l'absence de trafic, il n'y a aucune émission. Plus rarement, les signaux de signalisation sont émis (couleur bleue sur la figure). Ces signaux de signalisation sont constitués des SSB qui se trouvent au centre de la bande dans ce cas et qui occupent une largeur de bande de 20 RB c'est-à-dire 7,2 MHz. Les autres signaux qui s'étalent sur l'ensemble du spectre sont d'autres signaux de référence RS (*reference signal*).

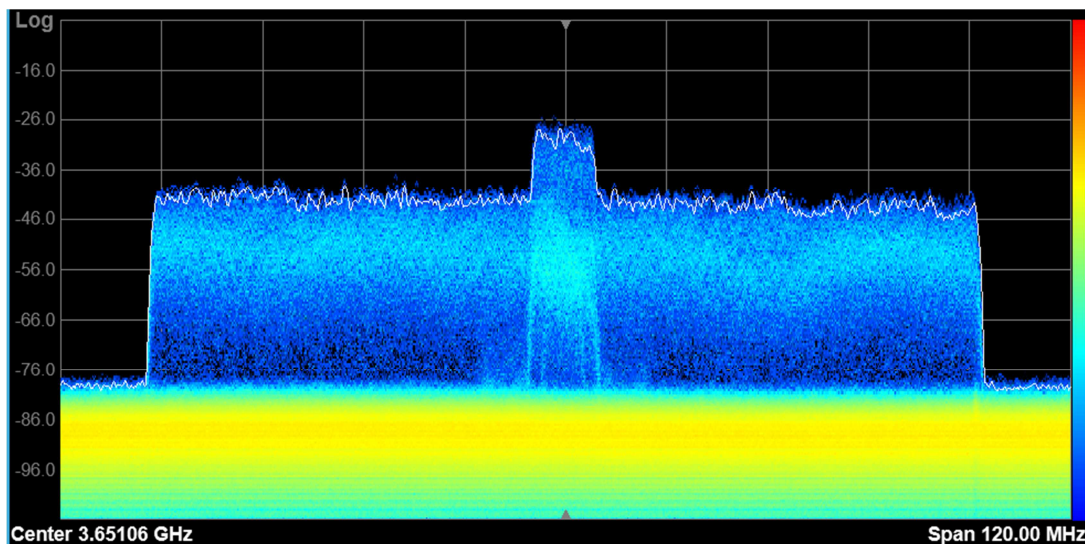


Figure 6 : Visualisation du spectre en absence de trafic. En ordonné, niveau de puissance reçue en échelle logarithmique en fonction de la fréquence en abscisse (120 MHz autour de la fréquence centrale de la bande d'émission de l'antenne), les couleurs indiquent l'occurrence des niveaux observés, la plupart du temps on ne mesure que le niveau de bruit dans la bande indiquée en jaune et de temps en temps, on observe les signaux de signalisation indiqués en bleu.

Une analyse temporelle autour de la fréquence centrale permet de visualiser l'occupation temporelle des signaux de signalisation. La Figure 8 illustre une trame de 10 ms pendant laquelle les signaux SSB ont été émis, ils sont dans ce cas au nombre de 7 et balayent la zone de couverture de l'antenne en moins de 2 millisecondes. Les autres signaux de référence RS sont également visibles et très brefs.

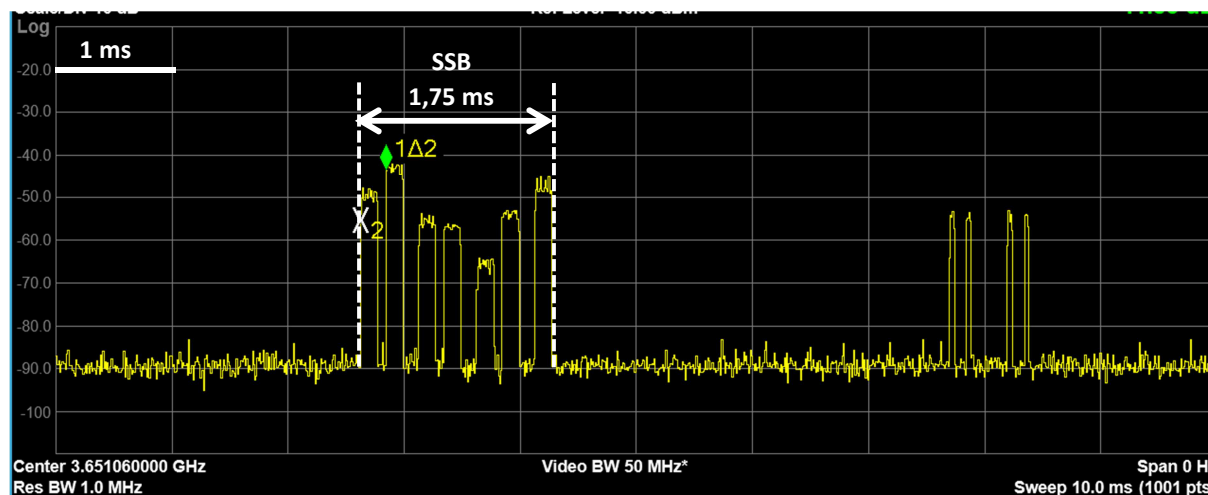


Figure 7 : vision temporelle autour de la fréquence centrale des SSB en l'absence de trafic sur la durée d'une trame (10 ms).

La Figure 8 donne une vision plus large sur 4 trames et illustrent que les SSB ne sont émis qu'une trame sur deux et que les autres signaux RS sont dans ce cas émis à chaque trame.

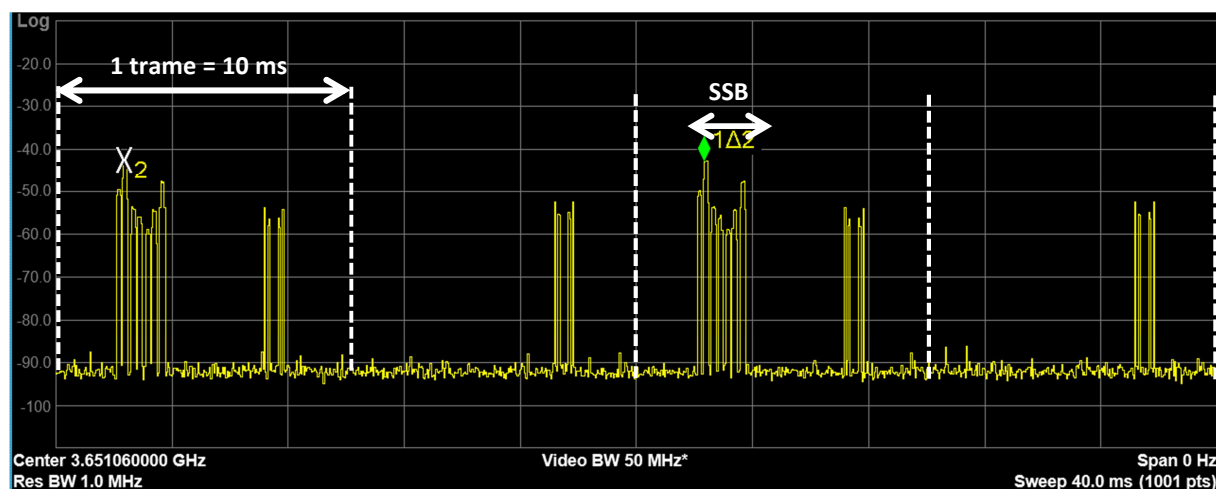


Figure 8 : vision temporelle autour de la fréquence centrale des SSB en l'absence de trafic sur la durée de quatre trames (40 ms).

Le niveau de champ électrique moyen mesuré à des distances allant de 35 m à 200 m de l'antenne 5G, en l'absence de trafic, sur les 100 MHz de bande de fréquence des émetteurs, se situe entre 0,1 V/m et 0,2 V/m.

4.5.2. Avec trafic continu

Dans cette configuration de test, la station de base envoie un flux de données constant en continu vers le CPE. La Figure 9 illustre l'apparence du spectre dans la durée lors d'une émission permanente *downlink*. Les couleurs indiquent l'occurrence des niveaux de puissance reçus en échelle logarithmique en ordonnée en fonction de la fréquence en abscisse (120 MHz autour de la fréquence centrale de la bande d'émission de l'antenne). L'émission est permanente mais il apparaît tout de même les slots réservés à l'*uplink* du format TDD retenu pendant lesquels aucun signal n'est envoyé par l'antenne. Le ratio est ici aussi de 75 % et se traduit dans le spectre par deux niveaux fréquemment mesurés (en jaune sur la figure), le niveau plus fort correspondant aux transmissions *downlink* et le niveau plus faible correspondant au niveau du bruit dans la bande mesurés aux temps réservés à l'*uplink* pendant lesquels il n'y a pas d'émission.

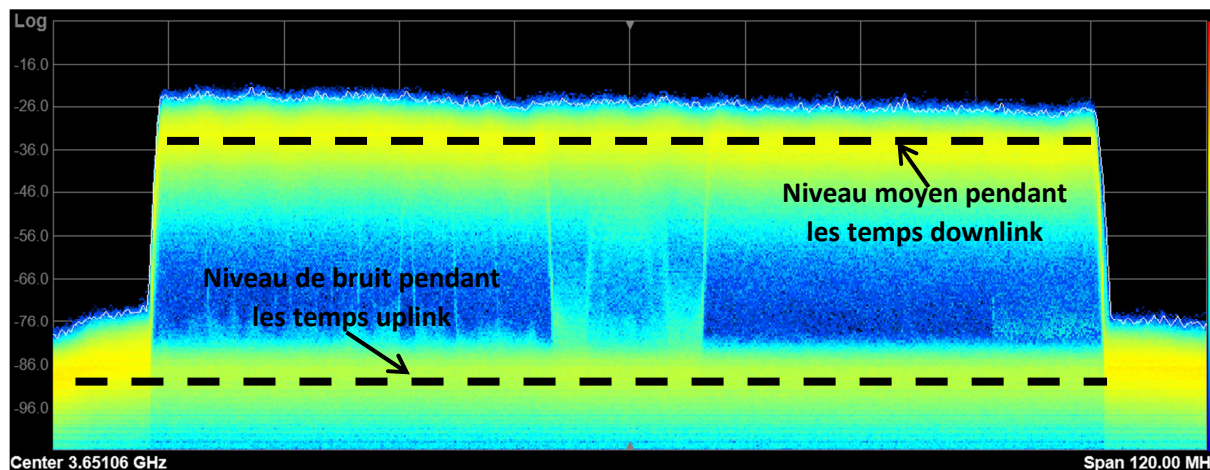


Figure 9 : spectre observé lorsque l'antenne émet toutes ses ressources pour servir un utilisateur dans une direction donnée. En ordonné, niveau de puissance reçu en échelle logarithmique en fonction de la fréquence en abscisse (120 MHz autour de la fréquence centrale de la bande d'émission de l'antenne). Les couleurs indiquent l'occurrence des niveaux observés; les niveaux jaunes sont les niveaux les plus fréquents. L'ensemble des 100 MHz de bande est occupée lors des émissions downlink et lors des temps uplink, il n'y a aucune émission et le niveau reçu est le niveau de bruit dans la bande.

La vision temporelle intégrée sur 1 MHz autour de la fréquence centrale (cf. Figure 10) permet d'observer sur une trame de 10 ms, la réception des SSB et ensuite la réception du trafic selon le format de trame défini DDSU.

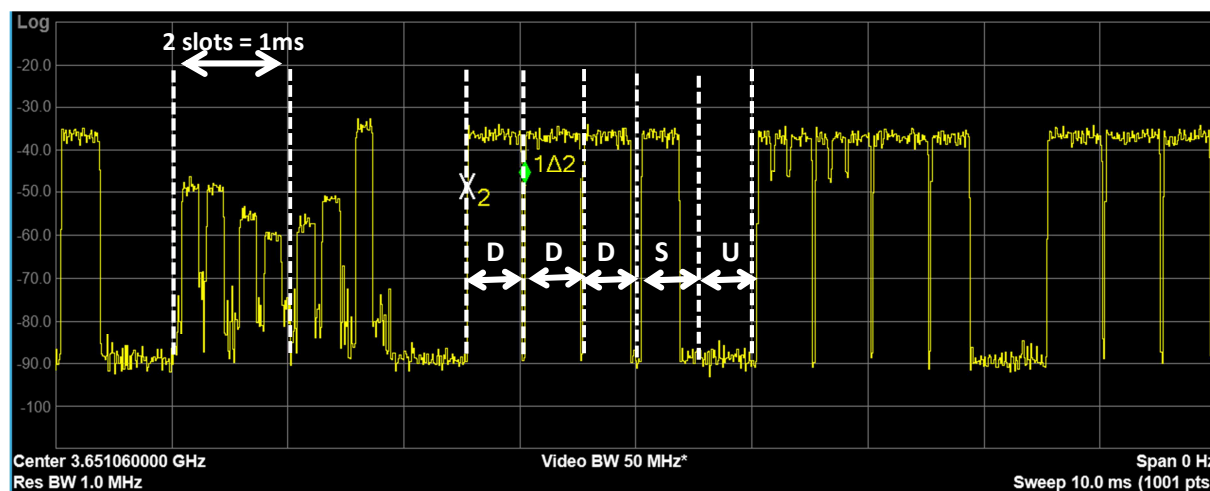


Figure 10 : vision temporelle sur 1 MHz autour de la fréquence centrale des SSB (3651 MHz) avec du trafic downlink continu sur une durée d'une trame (10 ms).

Les SSB ne sont visibles qu'au centre de la bande dans ces configurations, en dehors de la bande de fréquence des SSB, la forme temporelle du signal est une répétition du format DDSU comme illustré par exemple sur 1 MHz en haut de bande (autour de 3661 MHz) sur la Figure 11.

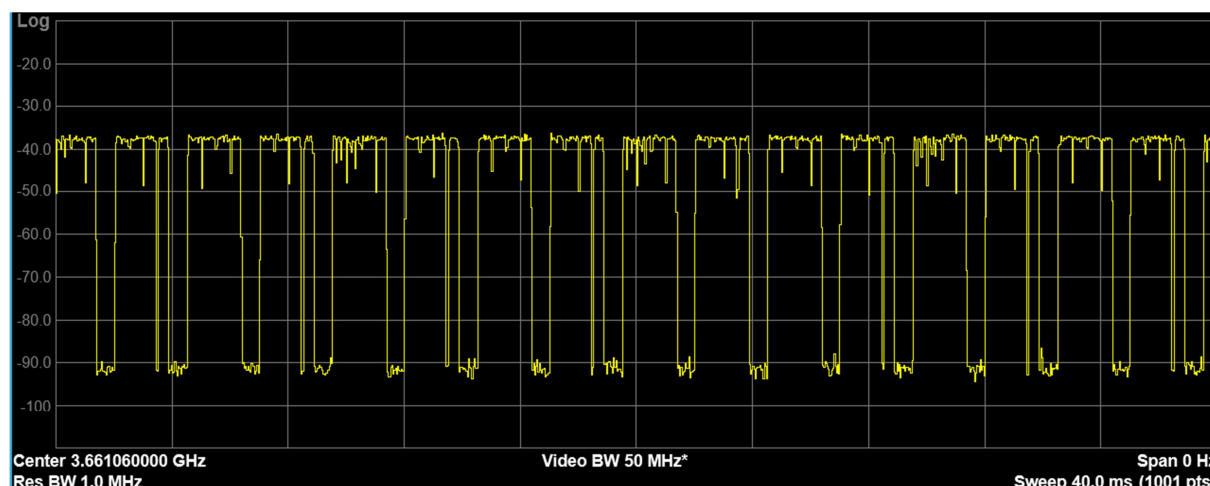


Figure 11 : vision temporelle sur 1 MHz en haut de bande autour de 3661 MHz (donc en dehors des SSB) avec du trafic downlink continu sur une durée de quatre trames (40 ms).

En termes de niveau de champ électrique, des mesures ont été réalisées à 1,5 m de hauteur à différentes distances des antennes.

Dans l'axe antenne-CPE, à 1,5 m de hauteur, des niveaux de champ entre 0,25 V/m et 9 V/m ont été mesurés, en extérieur, à des distances allant de 2 à 250 m des antennes pour une transmission sur 100 MHz de largeur de bande et une puissance maximale émise de 200 W. La Figure 12 montre un exemple de niveau de champ mesuré à différentes distances de l'antenne 5G, dans l'axe du CPE.

Le niveau de champ maximal a été mesuré dans ce cas à près de 9 V/m à proximité du CPE servi par l'antenne. Des réflexions sur le sol entraînent des combinaisons constructives et destructives du champ qui expliquent le niveau de champ de seulement 4 V/m à 120 m de l'antenne et le niveau de champ de 8,5 V/m à 90 m de l'antenne.

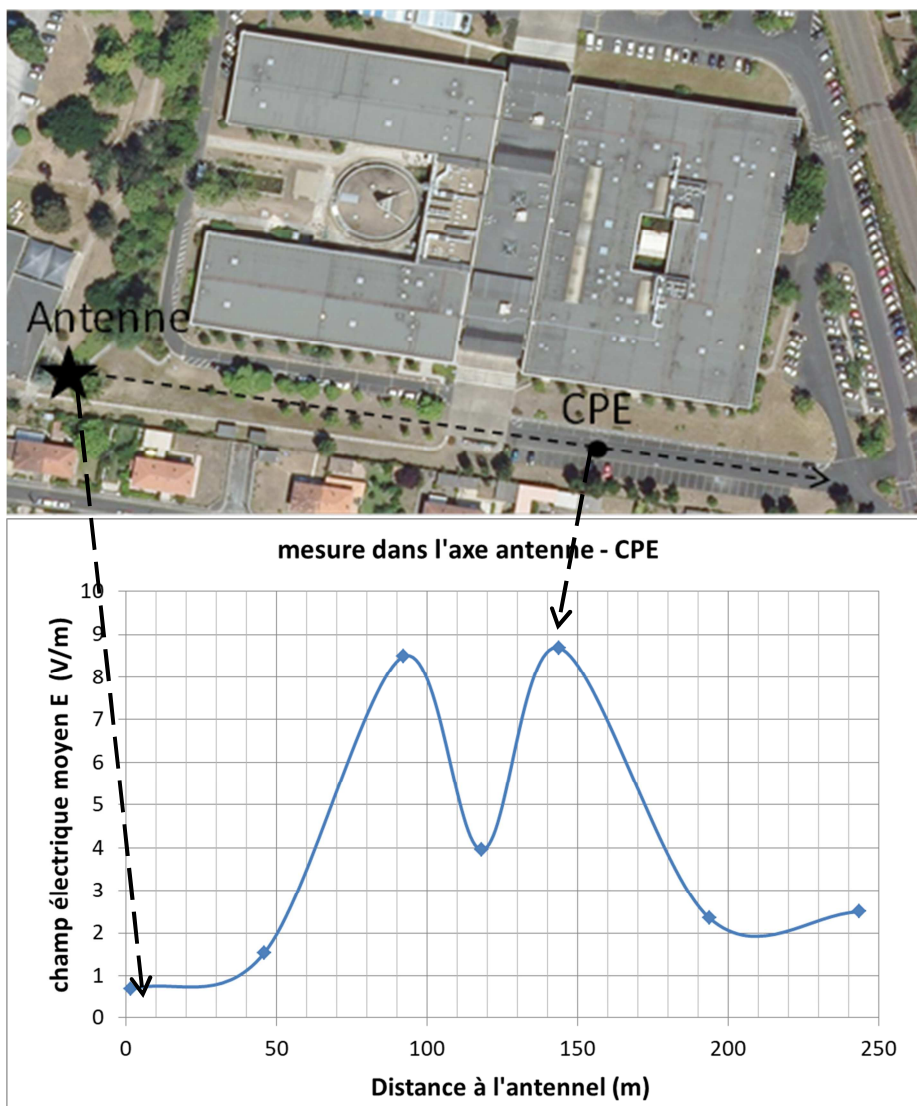


Figure 12 : en haut, vue satellite du site de mesure (situé à Mérignac) avec le positionnement de l'antenne, du CPE qui recevait les données envoyées par l'antenne et de l'axe de mesures, en bas illustration du niveau de champ électrique moyen évalué sur 100 MHz de largeur de bande à 1m50 de hauteur en fonction de la distance à l'antenne.

La Figure 13 illustre la largeur du faisceau à 1,5 m du sol et à une distance de 150 m de l'antenne. Lorsqu'on s'éloigne du CPE qui est servi par l'antenne, le niveau de champ moyen décroît rapidement (d'un facteur 2 à 7,5 m de chaque côté du CPE). On observe sur un côté du CPE la réflexion du champ sur le grand bâtiment, cette réflexion induit un niveau de champ de 8 V/m à environ 15 m du CPE contre un peu plus de 1 V/m à la même distance du CPE, mais de l'autre côté, en l'absence de réflexion.

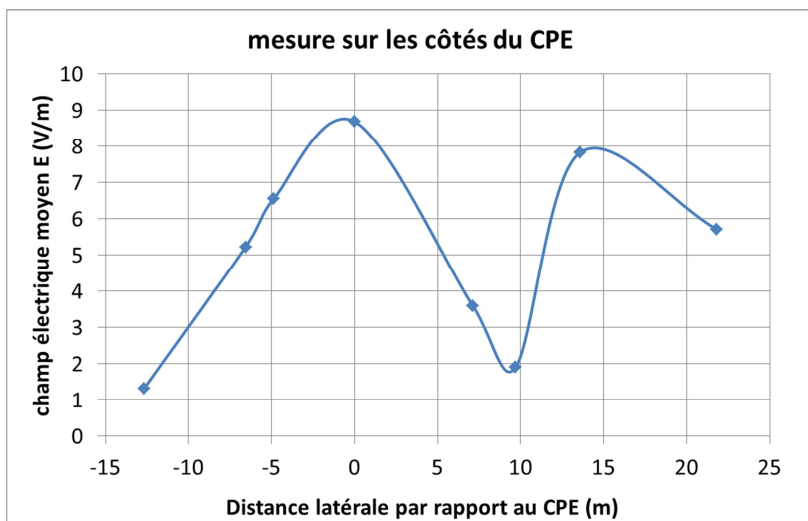


Figure 13 : niveaux de champ électrique moyen mesurés à 150 mètres de l’antenne de part et d’autres du CPE.

Les niveaux des champs mesurés en dehors de l’axe antenne – CPE ont été mesurés entre 0,2 V/m et 1,1 V/m pour une émission continue sur 50 MHz de largeur de bande. La Figure 14 donne un exemple de niveaux de champ mesurés à proximité du CPE et en dehors de l’axe du faisceau.



Figure 14 : vue satellite du site de Toulouse avec en rouge la position du CPE et en jaune les niveaux de champ mesurés en en V/m en différents points pour une émission continue sur 50 MHz de largeur de bande avec une puissance maximale de 200 W.

Sur le site de Châtillon, la puissance de l’antenne était limitée à 2 W. Des mesures en intérieur ont pu être réalisées à proximité de l’antenne avec les fenêtres ouvertes ou fermées (cf. Figure 15). Le CPE se trouvait à proximité de la fenêtre à 35 m de l’antenne dans son azimut médian dans un cas (photo de gauche sur la Figure 15) et à 7,8 m de l’antenne dans un azimut très dépointé (photo de droite sur la Figure 15).

Fenêtres fermées, les niveaux de champs reçus depuis l'antenne sont fortement atténués, jusqu'à un facteur 25 à proximité immédiate de l'antenne (figure de droite).

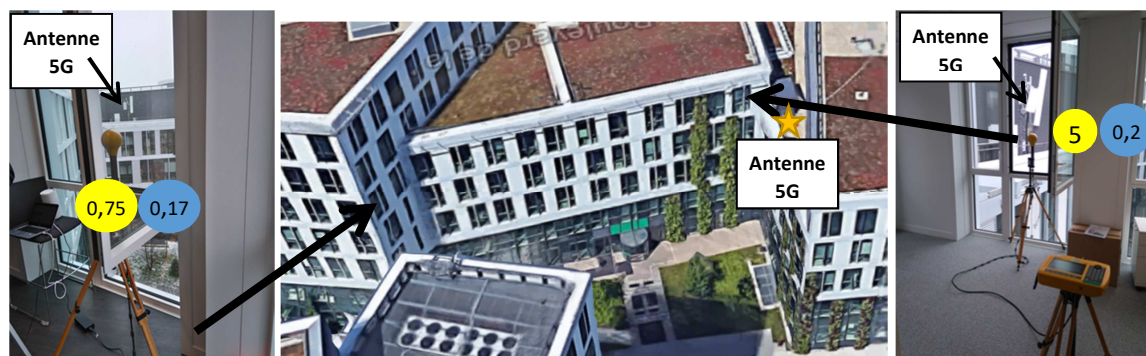


Figure 15 : points de mesure en intérieur à proximité de l'antenne du site de Châtillon, en jaune le niveau de champ en V/m mesuré fenêtre ouverte et en bleu le niveau de champ en V/m mesuré fenêtre fermée. A gauche, CPE et point de mesure à 35 m dans l'azimut médian de l'antenne, à droite CPE et point de mesure à 7,8 m de l'antenne dans un azimut très dépointé.

4.5.3. Avec transfert de fichiers

L'exposition est dans cette configuration déclenchée par un téléchargement de fichiers demandé par le CPE. L'envoi se fait sur une largeur de bande de 50 MHz. Le Tableau 4 récapitule les niveaux de champ mesurés sur 6 minutes à proximité du CPE lors du téléchargement de fichiers de différentes tailles. Le CPE était placé à 150 m de l'antenne du site de Mérignac. Le cas « infini » correspond à celui d'un faisceau bloqué dans la direction du CPE avec une émission continue sur 50 MHz de bande et une puissance maximale de l'antenne de 200 W.

| Durée du téléchargement | Taille du fichier | E moyen sur 6 minutes |
|-------------------------|-------------------|-----------------------|
| Pas de téléchargement | 0 Mo | 0,2 V/m |
| 2 s | 150 Mo | 0,5 V/m |
| 7 s | 500 Mo | 0,8 V/m |
| 15 s | 1 Go | 1,1 V/m |
| 150 s | 10 Go | 3,9 V/m |
| Infini | Infini | 6,5 V/m |

Tableau 4 : Niveaux de champ moyen mesurés sur 6 minutes à proximité d'un CPE téléchargeant des fichiers de différentes tailles.

Le niveau d'exposition est évalué sur 6 minutes et dépend donc essentiellement de l'usage. A titre de comparaison, un forfait mensuel 4G actuel (10 Go) pourrait être consommé en 150 s (2 mn 30 s) dans les conditions testées.

5. Conclusions intermédiaires

Les mesures réalisées ont permis d'observer les premiers signaux 5G NR. L'exposition aux ondes se révèle dépendre de nombreux paramètres :

- de la distance entre l'antenne et le terminal, ce qui est classique ;
- de la focalisation du faisceau et du nombre de faisceaux pilotés par l'antenne ;
- du temps passé par le faisceau dans chaque direction donc de la demande de données par les terminaux dans le faisceau.

Cependant, ces premières mesures ont été réalisées dans des conditions qui restent limitées. En effet, un seul type d'antenne d'un seul constructeur a été testé. Il conviendra à l'avenir de tester différents types et différentes marques d'antennes. De plus, les téléphones 5G fonctionnant dans cette bande de fréquence n'étaient pas disponibles au moment des mesures et il n'a pas été possible de tester des configurations multi-utilisateurs. Après la commercialisation des premiers téléphones 5G, de nouvelles mesures permettront de tester des configurations plus réalistes.

5.1. Indicateur de l'exposition

La mesure sur le terrain de l'exposition répond notamment à un besoin d'information sur les niveaux d'exposition rencontrés au quotidien. Pour la téléphonie mobile, avec les technologies actuellement déployées et les usages actuels, le niveau relevé à la sonde large bande (cas A du protocole de mesure de l'ANFR) dans la journée, et ceci quelle que soit l'heure, constitue un bon indicateur de l'exposition, en général proche de celui que l'on constaterait en faisant des mesures en continu moyennées sur six minutes : en effet, l'amplitude des variations dans la journée constatée dans les études est en général faible, inférieure à 30%.

Avec les antennes à faisceaux orientables de la 5G, une plus grande variabilité spatiale et temporelle est prévisible et le niveau relevé à la sonde large bande à un moment quelconque pourrait ne plus constituer un bon indicateur de l'exposition. Le niveau d'exposition dépendra en effet fortement de l'usage, et en particulier de l'appel de données réalisé par le terminal.

Un nouvel indicateur est donc proposé, sur la base d'un usage prévisible de la 5G : un envoi dans une direction donnée d'un giga-octet de données toutes les 6 minutes. Avec une hypothèse d'un débit moyen de 500 Mbps, l'antenne n'émettra dans la direction donnée qu'environ 15 secondes sur les 6 minutes (environ 4 % du temps).

En prenant une hypothèse de 8 faisceaux actifs pour servir la zone de couverture de l'antenne, la zone couverte par l'antenne recevra ainsi en moyenne 8 Go toutes les 6 minutes, ce qui correspond à 960 Go par jour en considérant 12h d'utilisation du réseau par jour et à 28 800 Go par mois. Il y avait en France 47,7 millions de cartes SIM 4G à la fin de l'année 2018 et près de 40 000 sites 4G en services, ce qui permet d'estimer en moyenne à 1 000 le nombre d'utilisateurs par site. Avec ces hypothèses, la consommation mensuelle en 5G serait de 28 Go par mois. A titre de comparaison, la consommation moyenne en 4G était au dernier trimestre 2018 de 7 Go par mois en moyenne : en retenant le quadruple de la consommation actuellement constatée, cette volumétrie tient compte de l'évolution des usages qui semble devoir être suscitée par la 5G.

Les hypothèses pour définir cet indicateur seront confrontées aux mesures de l'exposition réalisées sur le terrain, pour les réseaux commerciaux 5G et seront, si nécessaires, révisées, notamment en cas de croissance atypique des consommations de données.

L'intérêt de cet indicateur est qu'il autorise un calcul pour donner un majorant de l'exposition dans des conditions réelles en appliquant un facteur de réduction par rapport à la puissance maximale théorique des antennes.

Actuellement, dans les lignes directrices nationales sur la présentation des résultats de simulation publiées par l'ANFR³, un facteur de 1,6 (soit 4 dB en puissance) est appliqué sur le niveau de champ électrique calculé pour tenir compte des variations statistiques sur 6 minutes. Il est complété, en usage *indoor*, par un facteur de 20 % (soit 2 dB en puissance) pour tenir compte de l'atténuation par un simple vitrage.

En 5G, plusieurs facteurs s'appliqueront :

- Le ratio TDD, puisque l'antenne n'émet pas en permanence et ménage des plages d'écoute pour recevoir les signaux des terminaux : typiquement de 75 % en puissance (soit 1,25 dB) ;
- Les variations statistiques sur 6 minutes : compte tenu de la grande mobilité des faisceaux, qui doivent balayer en permanence l'intégralité du secteur couvert par l'antenne pour servir les terminaux qui s'y trouvent : elles sont reflétées par un ratio de 4 % en puissance (soit 13,5 dB)
- L'atténuation par le vitrage : identique à la 4G, 20 % en champ (soit 2dB en puissance)

Cet indicateur aboutit à un facteur de réduction qui permet de calculer l'exposition dans des conditions réelles à partir de la puissance maximale théorique des antennes. Cependant, en 4G, le facteur de réduction s'applique à la valeur maximale du gain de l'antenne qui n'est constatée que dans la direction principale de l'antenne : en dehors de cette direction principale, le niveau de champ sera plus faible. En revanche, avec les antennes à faisceaux orientables de la 5G, l'exposition calculée à partir de l'indicateur sera valable dans un nombre plus grand de directions. Les niveaux de champ à 100 mètres d'une antenne 5G découlant de l'application de l'indicateur apparaissent comparables à ceux constatés à la même distance d'une antenne 4G (cf. Tableau 5).

| 4G | Actuelle | Future |
|---------------------------|----------------|----------------|
| Puissance maximale | 60 W | 160 W |
| Gain maximal de l'antenne | 18 dBi | 18 dBi |
| Atténuation sur 6 minutes | - 4 dB | - 4 dB |
| Vitrage | - 2 dB | - 2 dB |
| E estimé à 100 m | 1,7 V/m | 2,8 V/m |

Tableau 5 : estimation du niveau de champ à 100 mètre d'une antenne 4G à l'intérieur d'un bâtiment avec une hypothèse de puissance typique actuelle et une hypothèse de puissance future.

³ https://www.anfr.fr/fileadmin/CP/2015-12-23_Lignes_directrices_Simulations_de_l_27exposition_v3-09.pdf

| 5G | Hypothèse basse | Hypothèse haute |
|---------------------------|-----------------|-----------------|
| Puissance | 80 W | 200 W |
| Gain | 24 dBi | 24 dBi |
| Atténuation sur 6 minutes | - 13,5 dB | - 13,5 dB |
| Vitrage | - 2 dB | - 2 dB |
| TDD | - 1,25 dB | - 1,25 dB |
| E estimé à 100 m | 1,1 V/m | 1,8 V/m |

Tableau 6 : estimation du niveau de champ à 100 mètre d'une antenne 5G à l'intérieur d'un bâtiment avec une hypothèse de puissance basse et une hypothèse de puissance haute.

5.2. Périmètres de sécurité

Les opérateurs de téléphonie mobile doivent, lorsqu'ils installent des sites radioélectriques, délimiter autour des stations radioélectriques les périmètres de sécurité à l'extérieur desquels le niveau d'exposition du public aux champs électromagnétiques émis par les installations radioélectriques est inférieur aux valeurs limites.

L'ANFR publie un guide informatif qui établit des règles pratiques d'installation des sites radioélectriques⁴.

Pour les technologies actuellement déployées, les opérateurs de téléphonie mobile utilisent la puissance maximale théorique pour déterminer les périmètres de sécurité, sans tenir compte des variations possibles sur 6 minutes. Cette approche simplifiée, indépendante de la durée, n'est valide que parce que la puissance des technologies actuelles varie peu au cours du temps.

Avec l'utilisation des antennes à faisceaux orientables, la variabilité spatiale et temporelle devrait augmenter et cette approche devient excessivement conservatrice et problématique d'un point de vue opérationnel.

La solution proposée, notamment au sein des groupes de normalisation de l'IEC⁵, est d'utiliser la puissance moyenne sur 6 minutes maximale pour déterminer les périmètres de sécurité au lieu de la puissance crête maximale. L'utilisation de cette puissance maximale moyenne sur 6 minutes pour déterminer les périmètres de sécurité est cependant conditionnée à la disponibilité d'outils permettant de garantir que la puissance moyenne sur 6 minutes retenue pour le calcul des périmètres de sécurité n'est jamais dépassée sur le terrain.

⁴ https://www.anfr.fr/fileadmin/mediatheque/documents/sites/2018-05-07_ANFR-DR17-5_Guide_P%C3%A9rim%C3%A8tres_de_S%C3%A9curit%C3%A9_VF.pdf

⁵ IEC TR 62669:2019 Case studies supporting IEC 62232 - Determination of RF field strength, power density and SAR in the vicinity of radiocommunication base stations for the purpose of evaluating human exposure