

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

Volet 2: premiers résultats de mesures sur les pilotes 5G dans la bande 3400-3800 MHz

Avril 2020

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 plusieurs déploiements pilotes représentatifs 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 effectuées 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 puisque, 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. Quarante-trois sites ont 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, en l'absence de trafic, le niveau moyen d'exposition dans la bande 5G s'établissait 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, fixée à 61 V/m dans cette bande de fréquences.

Des mesures complémentaires ont également été réalisées sur un nombre limité de sites dans des configurations de test particulières, notamment avec du trafic continu de données dans un faisceau bloqué dans une direction donnée et lors d'un téléchargement de fichier de 1 Go. Le tableau suivant synthétise les principaux niveaux de champ électrique mesurés :

Ville	Constructeur	Opérateur	Niveau de champ électrique sans trafic	Niveau de champ électrique maximal lorsque l'antenne émet en continu à pleine charge dans une direction donnée	Niveau de champ électrique reçu lors de l'envoi d'un fichier de 1 Go dans une direction donnée
Mérignac	Huawei	Bouygues Telecom	0,1–0,2 V/m	9 V/m	1,1 V/m
Châtillon	Huawei	Orange	0,01–0,2 V/m	0,65 V/m	--
Toulouse	Huawei	SFR	0,1–0,2 V/m	8,3 V/m	0,8 V/m
Douai	Ericsson	Orange	0,1 V/m	1,4 V/m	--
Nozay	Nokia	Nokia	0,05–0,6 V/m	6 V/m	1,6 V/m
Pau	Huawei	Orange	0,01–0,1 V/m	1,8 V/m	--

Ces mesures ont permis d'observer le spectre fréquentiel et l'occupation temporelle des signaux 5G. Elles ont également mis en évidence la variation du niveau d'exposition en fonction de l'usage et ont conduit à proposer un nouvel indicateur permettant de mieux refléter l'exposition réelle créée par les réseaux 5G à faisceaux orientables. Cet indicateur se fonde 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 nécessaire révisées.

Cet indicateur aboutit à un facteur de réduction qui permet d'évaluer l'exposition dans des conditions réelles à partir de la puissance maximale théorique des antennes. 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. Cependant, en 4G, le facteur de réduction s'applique à la valeur maximale du gain de l'antenne. Comme celle-ci 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.

Ces premières mesures ont permis de couvrir plusieurs configurations antennaires et différentes implémentations de la 5G, dans des conditions bien maîtrisées liées aux déploiements pilotes. Après l'ouverture des réseaux au public, de nouvelles mesures permettront de tester des configurations plus réalistes en termes de trafic.

Table des matières

1.	Introduction.....	5
2.	Zones pilotes en France.....	6
3.	Mesures COFRAC réalisées sur les pilotes.....	8
3.1.	Présentation	8
3.2.	Résultats	8
4.	Mesures complémentaires.....	9
4.1.	Présentation	9
4.2.	Caractéristiques des sites	9
4.3.	Configuration de mesures	10
4.4.	Caractéristiques des signaux 5G testés	11
4.5.	Résultats	12
4.5.1.	Sans trafic	12
4.5.2.	Avec trafic continu dans un faisceau.....	16
4.5.3.	Avec transfert de fichiers	29
5.	Perspectives.....	31
5.1.	Indicateur de l'exposition.....	31
5.2.	Périmètres de sécurité	33
6.	Conclusions.....	34

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 plusieurs déploiements pilotes représentatifs 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 envisagée pour le déploiement de la 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 de la 5G, des puissances émises instantanées plus importantes sont nécessaires et la 5G reposera sur la technologie massive MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) qui permet de former des faisceaux orientables et plus fins, orientés vers les utilisateurs (*beamforming*). De ce fait, et contrairement aux technologies précédentes, l'exposition aux ondes créée par les antennes relais de la téléphonie mobile est susceptible de varier en fonction de l'emplacement des utilisateurs en communication et de leurs usages. La 5G nécessite donc d'ajuster les procédures d'évaluation de l'exposition.

L'objectif de la démarche expérimentale est donc de caractériser l'exposition créée par les points d'accès d'un réseau d'antennes 5G.

2. 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.

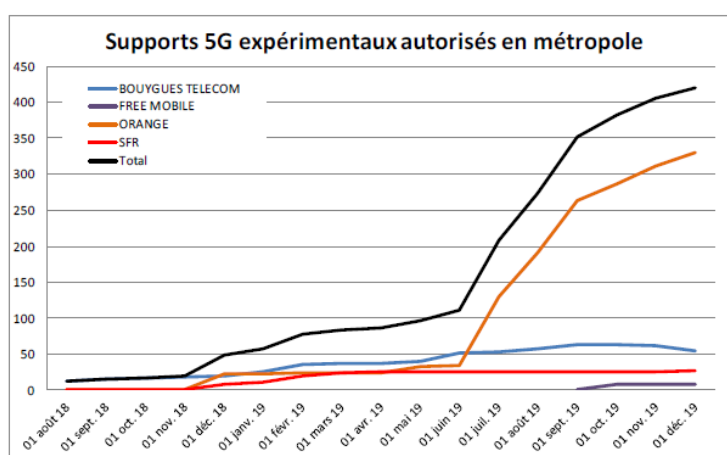


Figure 1 : extrait de l'observatoire ANFR du déploiement des réseaux mobiles de Décembre 2019.

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

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.

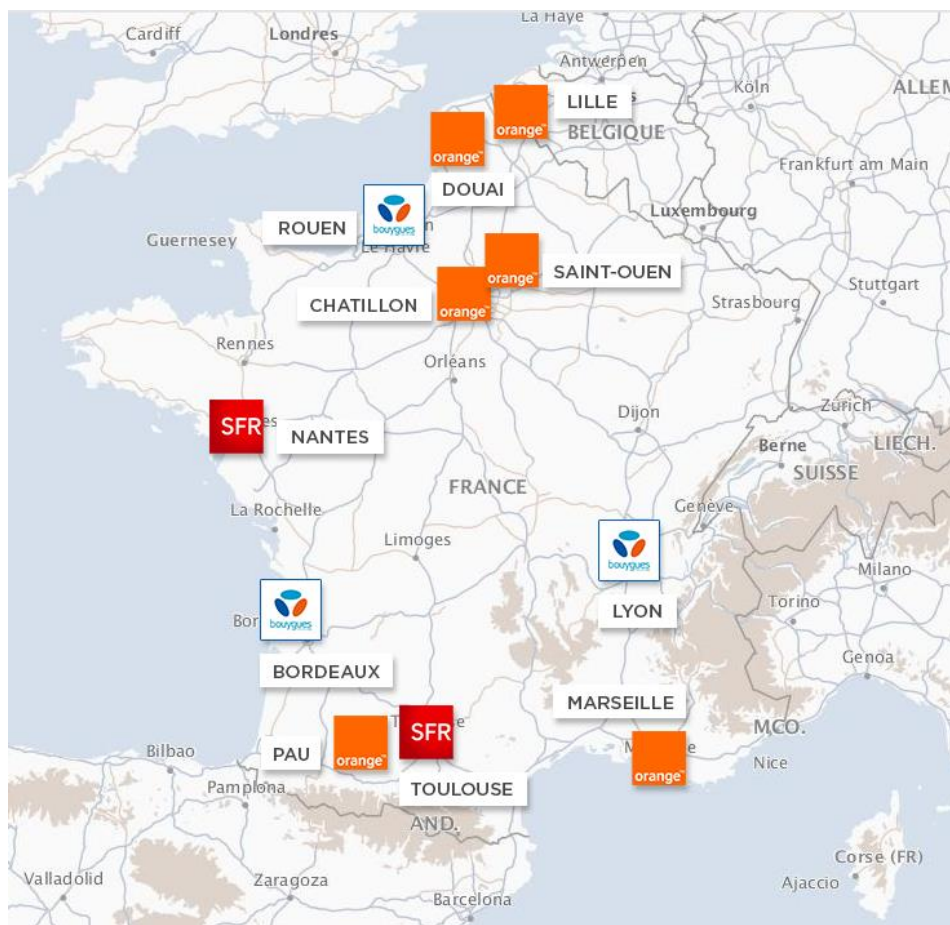


Figure 2 : villes hébergeant les déploiements pilotes 5G dans la bande 3 400 MHz – 3 800 MHz ayant fait l'objet d'un suivi par l'ANFR.

3. Mesures COFRAC réalisées sur les pilotes

3.1. Présentation

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

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

Les mesures après allumage ont été réalisées sans trafic puisque, lorsqu'elles ont eu lieu, ces sites n'étaient pas ouverts aux abonnés. En l'absence de trafic, la station radioélectrique émet une signalisation qui permet d'établir (ou de conserver, en cas de changement de cellule) la connexion au réseau des utilisateurs présents dans sa zone de couverture.

Une mesure détaillée « cas B » du protocole de mesures ANFR a été 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 et dans toutes les villes pilotes concernées. Ces mesures ont permis d'obtenir des points de référence.

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

3.2. Résultats

Quarante-trois sites ont fait l'objet de mesures.

Avant l'allumage des antennes 5G, aucune émission dans cette bande n'a été détectée : 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 est apparu 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 43 sites avant et après allumage de la 5G.

4. Mesures complémentaires

4.1. Présentation

Des mesures complémentaires exploratoires ont été organisées de façon concertée entre l'ANFR, les opérateurs et les constructeurs afin de tester différentes configurations de déploiement 5G.

Ces tests exploratoires ont permis :

- 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.

Au moment des tests, les pilotes 5G n'étaient pas ouverts aux abonnés des opérateurs. Il n'existait pas (ou très peu) de terminaux compatibles 5G sur le marché français. Pour autant, l'évaluation de l'exposition dans différentes configurations nécessitait de créer du trafic. Du trafic a pu être généré par les moyens suivants (cf. Figure 3) :

- l'utilisation d'un mode test de la station de base, qui permettait de tester différentes configurations de charge du réseau et de nombre de faisceaux ;
- un équipement mobile de test en réception (CPE pour *Customer Premises Equipment*) ;
- un modem 5G en réception piloté à l'aide d'un ordinateur ;
- un mobile 5G en réception.



Figure 3 : différents équipements servant de récepteurs sur les pilotes 5G. De gauche à droite, un CPE « customer premises equipment », un modem 5G et deux mobiles 5G.

Durant ces phases pilotes, la plupart des sites étaient installés et allumés, sans pour autant que toutes les fonctionnalités possibles de la 5G y aient été implémentées.

4.2. Caractéristiques des sites

Les sites retenus pour ces mesures complémentaires ont été choisis afin de couvrir l'ensemble des constructeurs d'antennes dont l'usage est envisagé en France et l'ensemble des opérateurs réalisant des pilotes 5G durant la période concernée. Ces sites ont également été choisis en fonction de la visibilité directe et dégagée des sites et d'un certain nombre de contraintes logistiques (accessibilité aux véhicules techniques, présence d'une alimentation électrique...).

Les sites ayant fait l'objet de cette analyse complémentaire sont listés dans le Tableau 3 :

Ville	Constructeur	Opérateur	Type d'antenne ³
Mérignac	Huawei	Bouygues Telecom	64T64R
Châtillon	Huawei	Orange	64T64R
Toulouse	Huawei	SFR	64T64R
Douai	Ericsson	Orange	64T64R
Nozay	Nokia	Nokia	64T64R
Pau	Huawei	Orange	32T32R et 8T8R
Saint-Ouen	Samsung	Orange	32T32R

Tableau 3 : liste des sites 5G ayant fait l'objet d'analyses complémentaires

4.3. Configuration de mesures

Trois types de configuration de mesures ont été testés :

- Configuration sans trafic**
 La station de base n'envoyait que de la signalisation, aucun utilisateur n'était desservi par l'antenne.
- Configuration de test avec trafic continu dans un faisceau bloqué**
 Dans cette configuration, la station de base envoyait un flux de données constant et en continu dans une direction donnée. Cet envoi était assuré soit par un transfert UDP (*User Datagram Protocol*) 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, l'orientation du faisceau se trouvait donc bloquée dans une direction donnée.
- Configuration de transfert de fichiers dans une direction donnée**
 Dans cette configuration, le trafic était 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 ont été réalisées en différents points : en vue directe de l'antenne, dans un faisceau de l'antenne et en dehors des faisceaux. Les mesures ont été réalisées à 1,5 m du sol, en extérieur.

Les niveaux de champs ont été 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.

³ Le type d'antenne est donné par un code qui précise le nombre d'émetteurs (T) et de récepteurs (R) implanté dans chaque antenne. Plus ces valeurs sont élevées, plus l'antenne est directive et plus les faisceaux créés sont fins. Ces caractéristiques sont détaillées dans le Volet 1 : présentation générale de la 5G (pages 12 et suivantes) <https://www.anfr.fr/fileadmin/mediatheque/documents/espace/CND/Rapport-ANFR-presentation-generale-5G.pdf>

4.4. Caractéristiques des signaux 5G testés

Le standard 5G défini par le 3GPP, la 5G NR, très ouvert, offre une très grande flexibilité dans le choix des 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, de sous-trames d'une milliseconde et de trames de dix millisecondes.

Dans la bande testée 3 400 – 3 800 MHz, un duplexage temporel, dit TDD⁴ (*Time Division Duplexing*), a été retenu. Le découpage dans le temps entre les émissions *uplink* et *downlink* se fait selon des formats de trame prédéfinis.

Le mode TDD peut entraîner des cas d'interférences entre stations de base ou entre utilisateurs. Une manière d'éviter ces interférences est de faire en sorte que les équipements susceptibles de s'interférer émettent en même temps et reçoivent en même temps : c'est ce que l'on appelle la synchronisation. Cela implique notamment l'usage d'une trame commune.

Dans les premiers cas observés sur le terrain, ce découpage se faisait par slot avec un format « DDSU » c'est-à-dire 3 slots D successifs (réservés au trafic *downlink*), un slot S (pour *switch* partagé entre du trafic *downlink*, une zone tampon sans émission et du trafic *uplink*) et un slot U (réservé au trafic *uplink*). Avec cette configuration, le ratio TDD est d'environ 75 % en faveur du *downlink*. Cependant, ce premier format testé sur le terrain n'était pas celui retenu par l'Arcep dans sa décision n° 2019-0862 relative à la synchronisation des réseaux terrestres dans la bande 3,4 - 3,8 GHz en France métropolitaine. Un autre format compatible avec cette décision de l'Arcep a donc également été testé sur certains pilotes : le format « DDDDDDSUU » qui conduit également à un ratio TDD d'environ 75 % en faveur du *downlink*.

L'antenne 5G NR scrute son environnement pour identifier les utilisateurs à servir à l'aide de blocs de signaux de synchronisation SSB (*synchronisation signal block*) qui occupent une largeur de bande de 20 RB c'est-à-dire 7,2 MHz dans le cas des pilotes testés.

Le Tableau 4 récapitule les principales caractéristiques des signaux 5G testés sur les pilotes ayant fait l'objet de mesures complémentaires par l'ANFR.

⁴ Les modes de duplexage sont définis dans le Volet 1 : présentation générale de la 5G (page 10)
<https://www.anfr.fr/fileadmin/mediatheque/documents/espace/CND/Rapport-ANFR-presentation-generale-5G.pdf>

Paramètres	Pilotes 5G testés
Largeur de bande	100 MHz
Espacement entre sous porteuses	30 kHz
Taille d'un ressource bloc RB	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 ou DDDDDDDSUU
Ratio TDD	75% downlink
Position des signaux de signalisation (SSB)	fréquence centrale ou bas de bande
Périodicité des SSB	20 ms
Nombre de SSB	1, 6, 7 ou 8

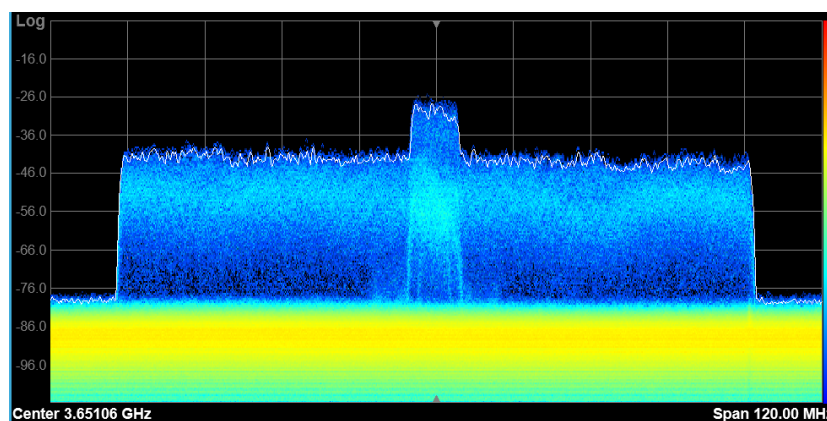
Tableau 4 : caractéristiques générales des signaux 5G testés sur les pilotes ayant fait l'objet de mesures complémentaires par l'ANFR.

4.5. Résultats

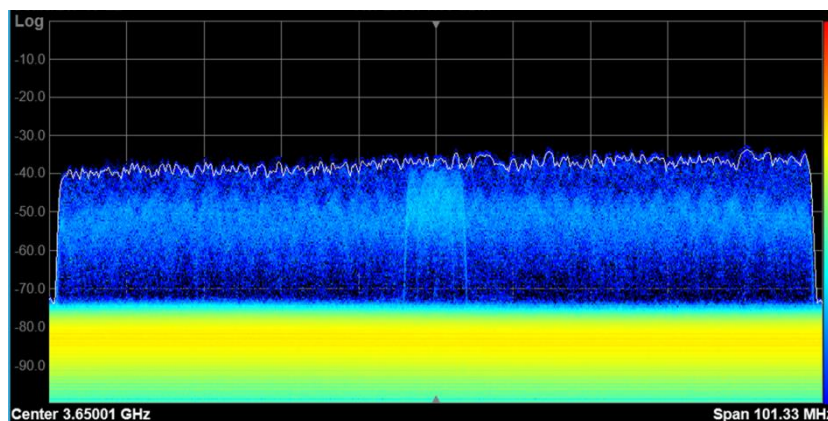
4.5.1. Sans trafic

4.5.1.1. Vision spectrale

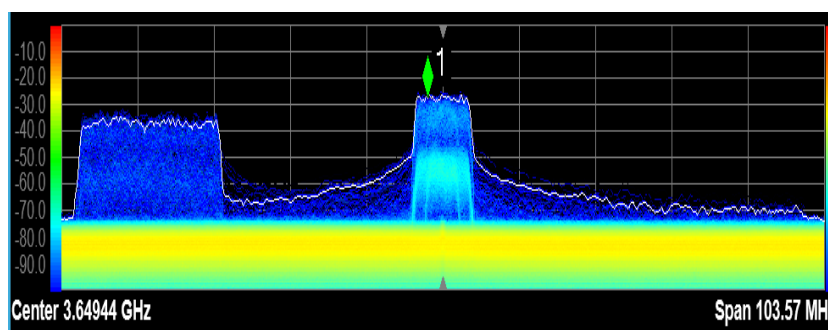
En l'absence de trafic, seule la signalisation est émise. La Figure 4 illustre les spectres observés en l'absence de trafic pour les différents constructeurs. Les couleurs indiquent l'occurrence des niveaux de puissance, indiqués en échelle logarithmique en ordonnée, en fonction de la fréquence en abscisse (100 ou 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 occupent une largeur de bande de 20 RB c'est-à-dire 7,2 MHz et se trouvent au centre de la bande, sauf dans le cas de Samsung où les SSB se trouvent en début de bande. Les autres signaux, qui s'étalent sur l'ensemble du spectre pour Huawei ou Ericsson ou sur une partie pour Nokia, sont d'autres signaux de référence RS (*reference signal*).



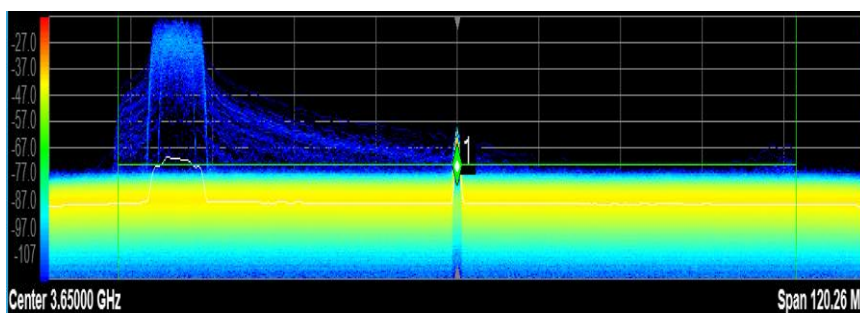
(a) Huawei – Bouygues Telecom - Mérignac



(b) Ericsson – Orange – Douai



(c) Nokia – Nozay

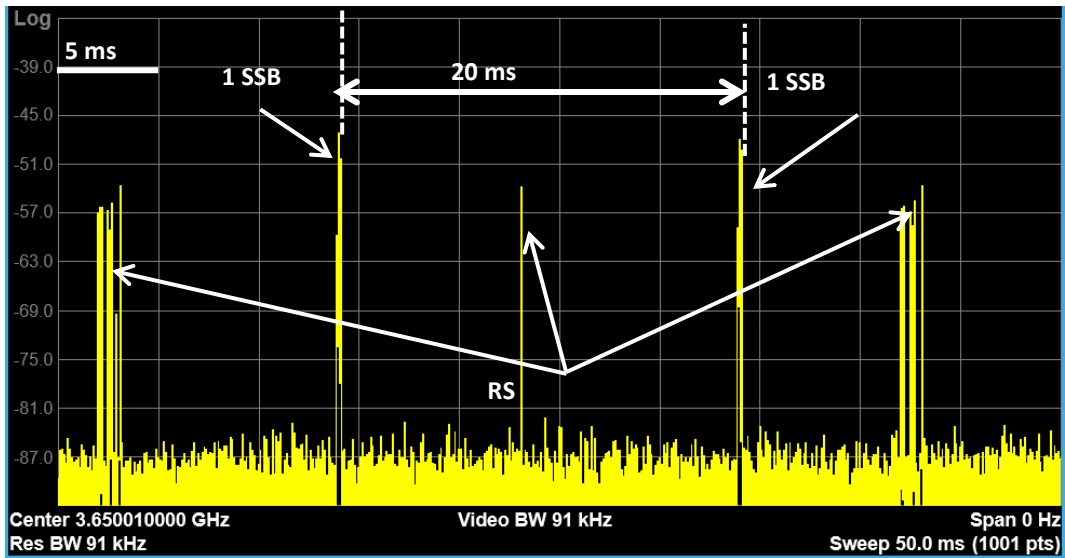


(d) Samsung – Orange – Saint-Ouen

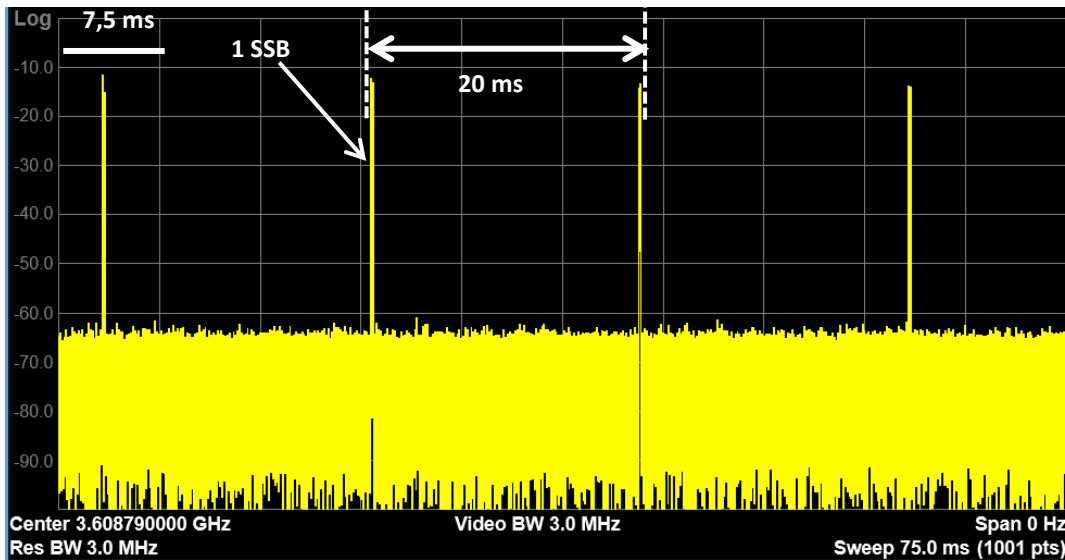
Figure 4 : Visualisation du spectre en absence de trafic. En ordonnée, niveau de la puissance reçue en échelle logarithmique, en fonction de la fréquence en abscisse (100 ou 120 MHz autour de la fréquence centrale de la bande d'émission de l'antenne), les couleurs indiquent l'occurrence des niveaux observés, la plupart du temps on ne mesure que le niveau de bruit dans la bande (indiqué en jaune) et de temps en temps, on observe les signaux de signalisation, indiqués en bleu.

4.5.1.2. Vision temporelle

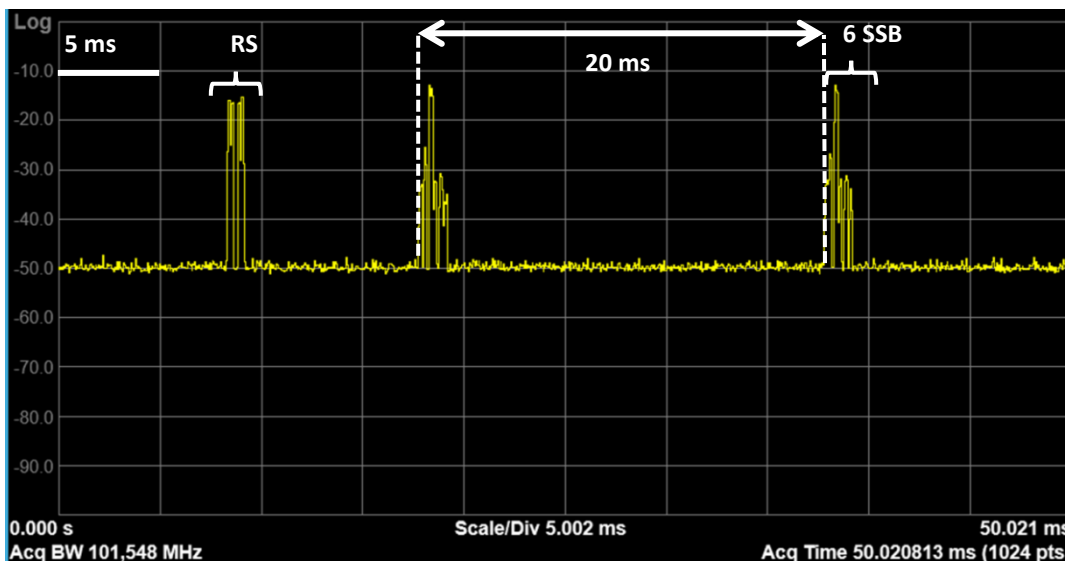
Une analyse temporelle autour de la fréquence centrale permet de visualiser l'occupation temporelle des signaux de signalisation. La Figure 5 illustre le comportement temporel du signal sur une durée de quelques trames. Les trames 5G durent 10 ms et les signaux SSB sont émis une trame sur deux dans les configurations observées. Les signaux SSB sont au nombre, selon les cas, de 1 à 8 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.



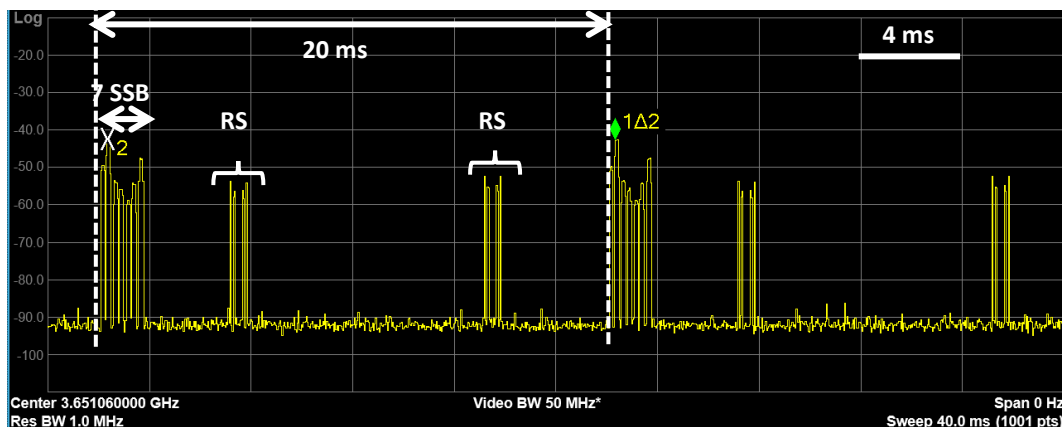
(a) Ericsson – Orange – Douai – 1 SSB



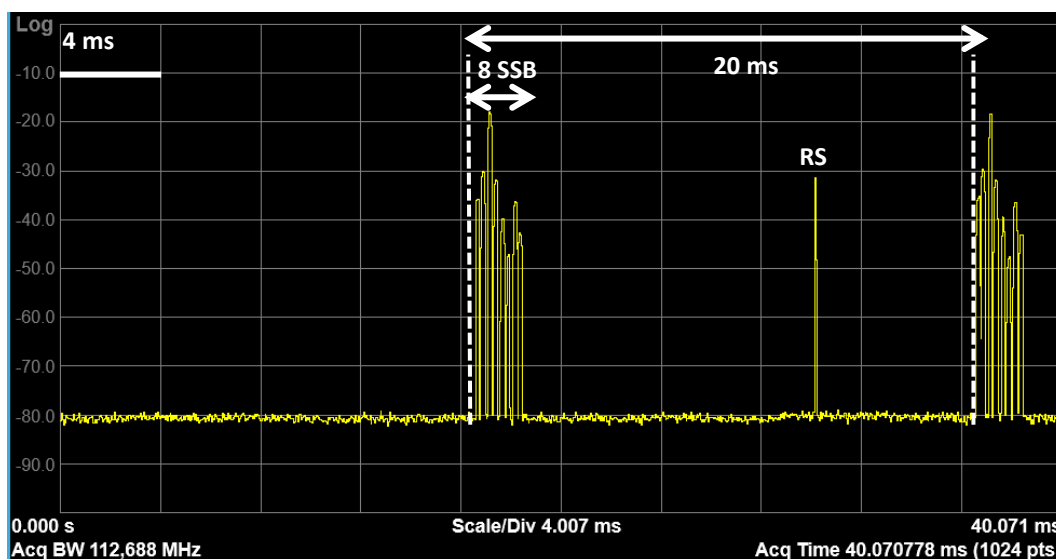
(b) Samsung – Orange – Saint-Ouen – 1 SSB



(c) Nokia – Nozay – 6 SSB



(d) Huawei – Bouygues Telecom - Mérignac – 7 SSB



(e) Nokia – Nozay – 8 SSB

Figure 5 : vision temporelle autour de la fréquence centrale des SSB en l’absence de trafic sur une durée de quelques trames (de 40 ms à 75 ms selon les sites).

4.5.1.3. Niveaux des champs électriques reçus

Le niveau de champ électrique moyen mesuré à des distances allant de 35 m à 200 m des antennes 5G, en l’absence de trafic, sur les 100 MHz de bande de fréquence des émetteurs, se situe entre 0,01 V/m et 0,6 V/m (cf. Tableau 5).

Ville	Constructeur	Opérateur	Niveau de champ électrique sans trafic
Mérignac	Huawei	Bouygues Telecom	0,1 V/m – 0,2 V/m
Châtillon	Huawei	Orange	0,05 V/m – 0,2 V/m
Toulouse	Huawei	SFR	0,1 V/m – 0,2 V/m
Douai	Ericsson	Orange	0,1 V/m
Nozay	Nokia	Nokia	0,05 V/m – 0,6 V/m
Pau	Huawei	Orange	0,01 V/m – 0,1 V/m

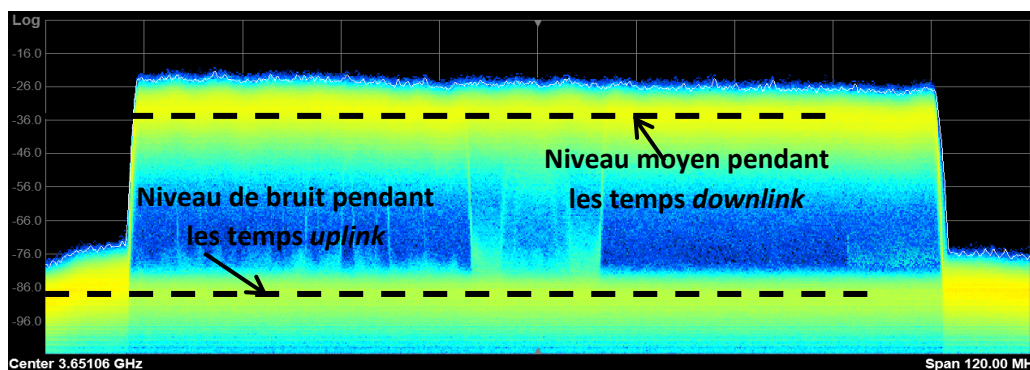
Tableau 5 : niveau de champ électrique mesuré en l’absence de trafic sur les sites ayant fait l’objet de mesures complémentaires.

4.5.2. Avec trafic continu dans un faisceau

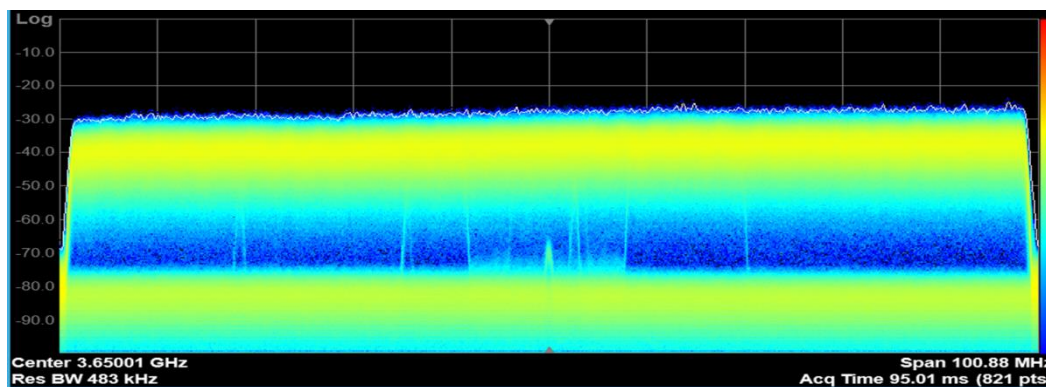
4.5.2.1. Vision spectrale

Dans cette configuration de test, la station de base envoie un flux de données constant, en continu, dans une direction donnée. La Figure 6 illustre l'apparence de spectres 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 (100 ou 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 TDD est ici de 75 % et se traduit dans le spectre par deux niveaux fréquemment mesurés (en jaune sur la figure), le niveau le plus fort correspondant aux transmissions *downlink* et le niveau plus faible correspondant au niveau du bruit dans la bande mesuré aux créneaux réservés à l'*uplink* pendant lesquels il n'y a pas d'émission.

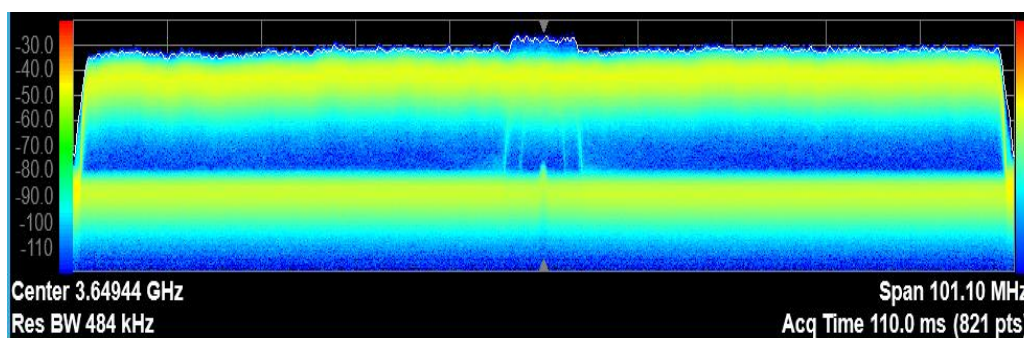
On remarque que, sur les sites de Nokia et Samsung, les niveaux des signaux de signalisation SSB sont au-dessus du niveau des signaux de trafic. Une particularité des antennes à faisceaux orientables est que les signaux de signalisation ne sont pas forcément envoyés avec le même diagramme de rayonnement que les signaux de trafic utile. Le gain dans la direction de l'utilisateur peut donc être différent (plus fort ou moins fort) pour les SSB ou pour du trafic, ce qui peut se traduire par des niveaux de réception par ressource élémentaire différents. Sur les sites de Nokia et Samsung, au point de réception considéré, les niveaux de réception des SSB sont plus forts que les niveaux de réception du trafic. Sur les sites de Huawei à Mérignac et Ericsson, aux points de réception considérés, les niveaux de réception des SSB sont soit identiques soit plus faibles que les niveaux de réception du trafic, ils ne sont donc pas visibles sur le spectre.



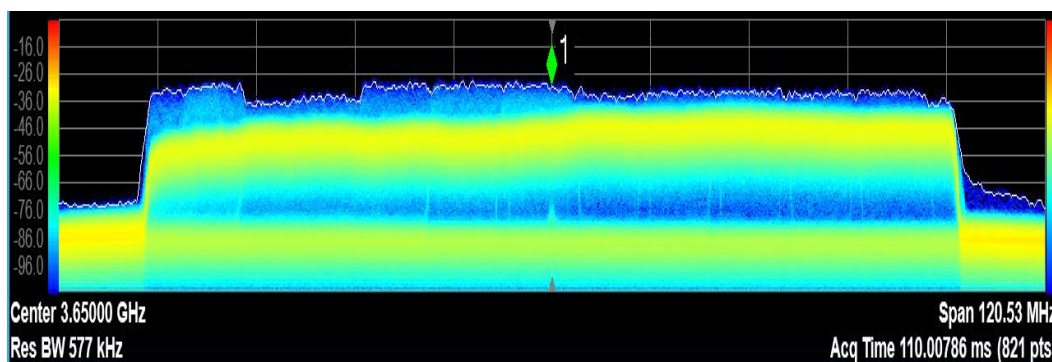
(a) Huawei – Bouygues Telecom – Mérignac – les SSB ne sont plus visibles du fait d'un niveau identique ou plus faible que le trafic



(b) Ericsson – Orange – Douai - les SSB ne sont plus visibles du fait d'un niveau identique ou plus faible que le trafic



(c) Nokia – Nozay – les SSB sont visibles au centre de la bande du fait d'un niveau un peu plus fort que le trafic

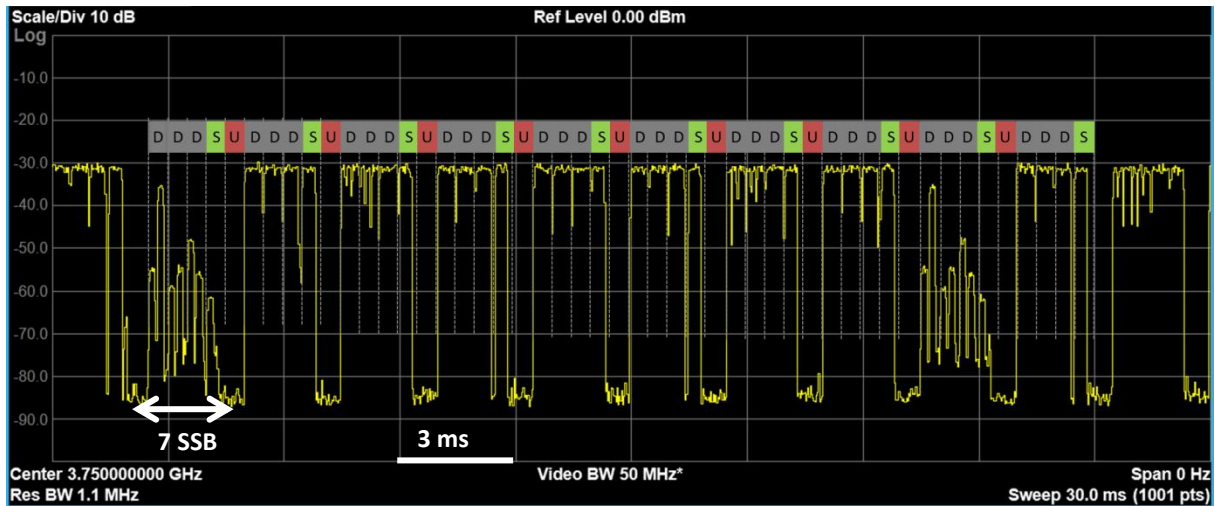


(d) Samsung – Orange – Saint-Ouen – les SSB sont visibles en bas de bande du fait d'un niveau un peu plus fort que le trafic

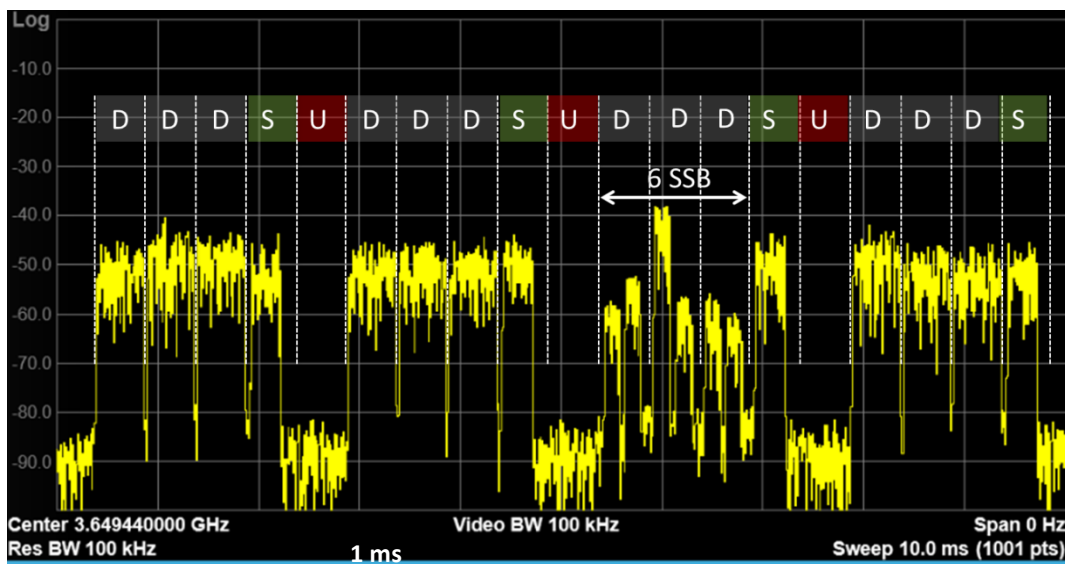
Figure 6 : spectres observés lorsque l'antenne émet toutes ses ressources pour servir un utilisateur dans une direction donnée. En ordonnée, niveau de puissance reçu en échelle logarithmique en fonction de la fréquence en abscisse (100 ou 120 MHz autour de la fréquence centrale de la bande d'émission 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.

4.5.2.2. Vision temporelle

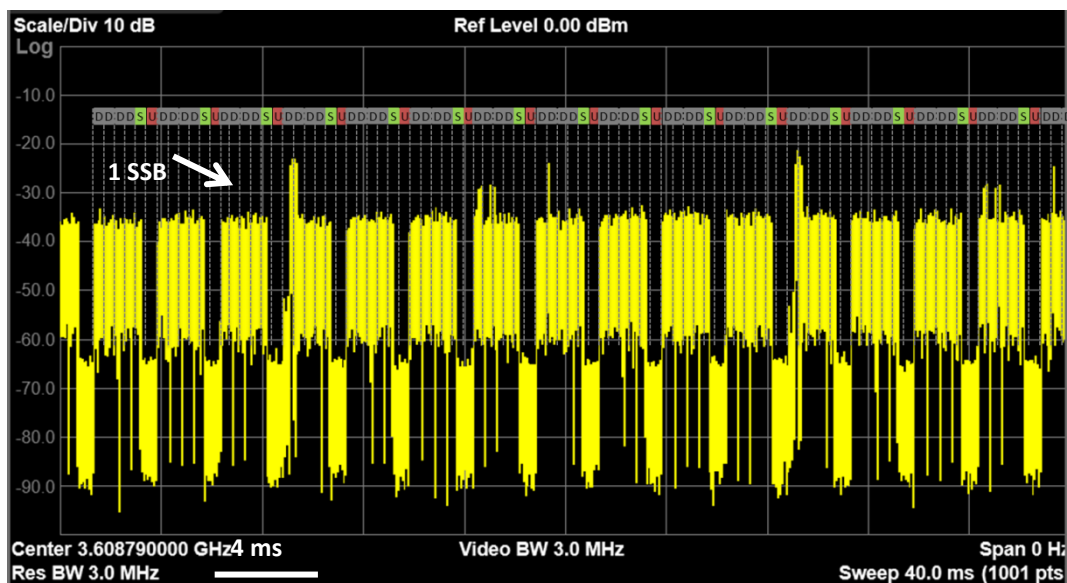
La vision temporelle intégrée sur une faible largeur de bande (de 100 kHz à 3 MHz selon les sites) autour de la fréquence centrale des SSB (cf. Figure 7) permet d'observer, sur une à quelques trames de 10 ms, la réception des SSB et ensuite la réception du trafic selon le format de trame défini DDDSU ou DDDDDDSUU selon les sites.



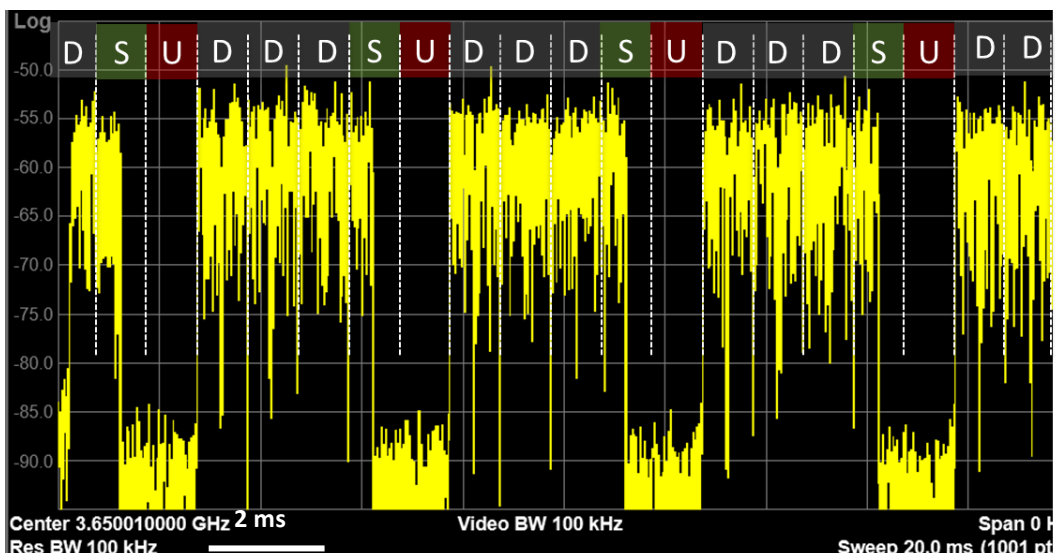
(a) Huawei – SFR – Toulouse – 7 SSB - Format DDDSU



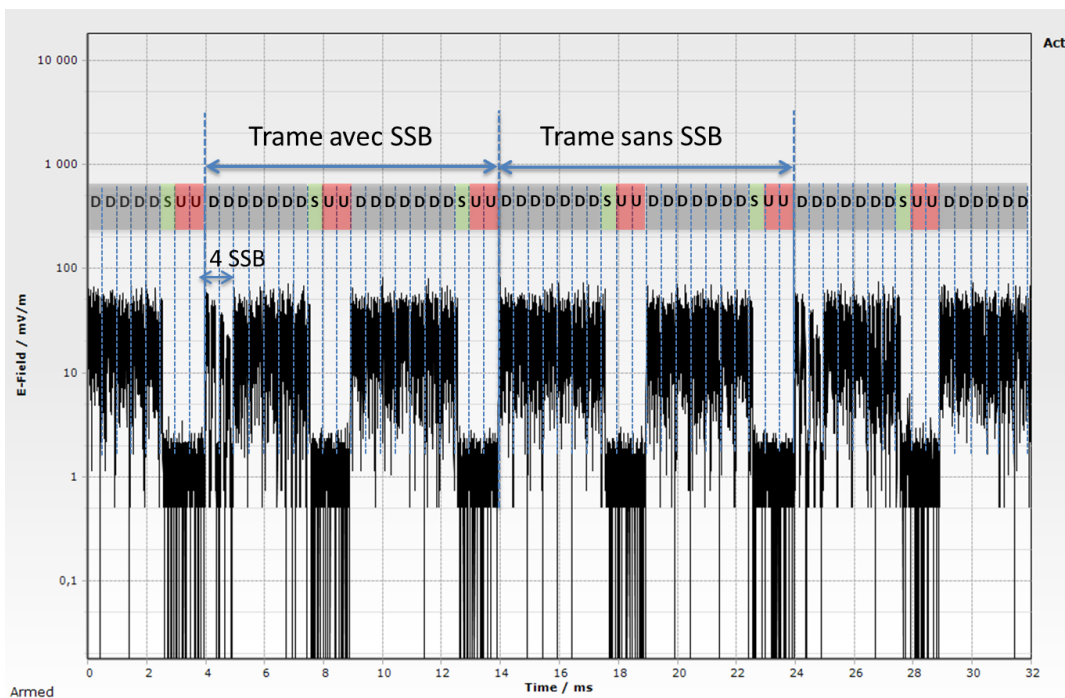
(b) Nokia – Nozay – 6 SSB – Format DDDSU



(c) Samsung – Orange – Saint-Ouen – 1 SSB- Format DDDSU



(d) Ericsson – Orange – Douai – 1 SSB non détectable – Format DDDSU



(e) Huawei – Orange – Pau – 4 SSB - Format DDDDDDSUU

Figure 7 : visions temporelles sur une petite largeur de bande (de 100 kHz à 3 MHz selon les sites) autour de la fréquence centrale des SSB avec du trafic downlink continu sur une durée allant d'une à quatre trames selon les sites.

Les SSB sont transmis sur une petite partie de la bande de fréquence correspondant à 20 RB (*ressource block*) ou, ici, à 7,4 MHz de bande ; donc, en dehors de la bande de fréquence d'émission des SSB, tous les slots sont utilisés pour le trafic, les SSB ne sont plus visibles, comme cela est illustré sur la Figure 8 sur 1 MHz en haut de bande (autour de 3661 MHz) pour le format DDDSU.

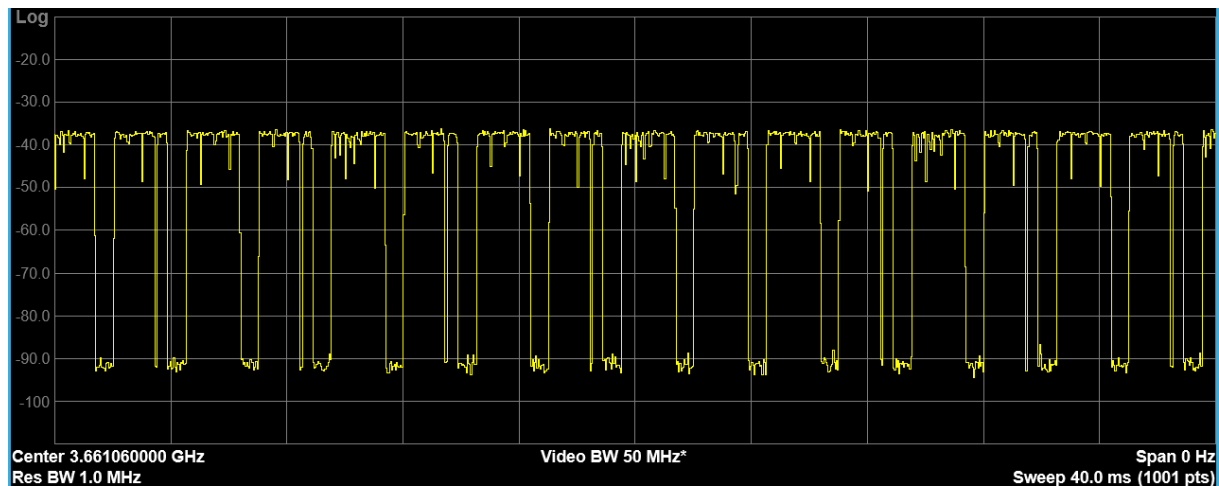


Figure 8 : vision temporelle sur 1 MHz en haut de bande autour de 3661 MHz (donc en dehors des SSB) avec du trafic downlink continu sur une durée de quatre trames (40 ms).

4.5.2.3. Niveaux de champ électrique mesurés

Sur l'ensemble des sites considérés, des mesures de champ électrique ont été réalisées à 1,5 m de hauteur à différentes distances des antennes, dans la bande de fréquence de l'antenne 5G. A l'exception de celles du site de Châtillon, l'ensemble des mesures ont été réalisées en extérieur.

Dans l'axe reliant l'antenne au terminal, à 1,5 m de hauteur, des niveaux de champ électrique 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.

- **Site Bouygues Telecom Huawei à Mérignac**

Sur ce site, l'antenne 64T64R est installée à une hauteur de 8 m sur un support en forme d'arbre. Le niveau de champ électrique maximal a été mesuré sur ce site à près de 9 V/m à proximité du CPE servi par l'antenne.

La Figure 9 montre le niveau de champ électrique mesuré à différentes distances de l'antenne 5G, dans l'axe du CPE. 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.

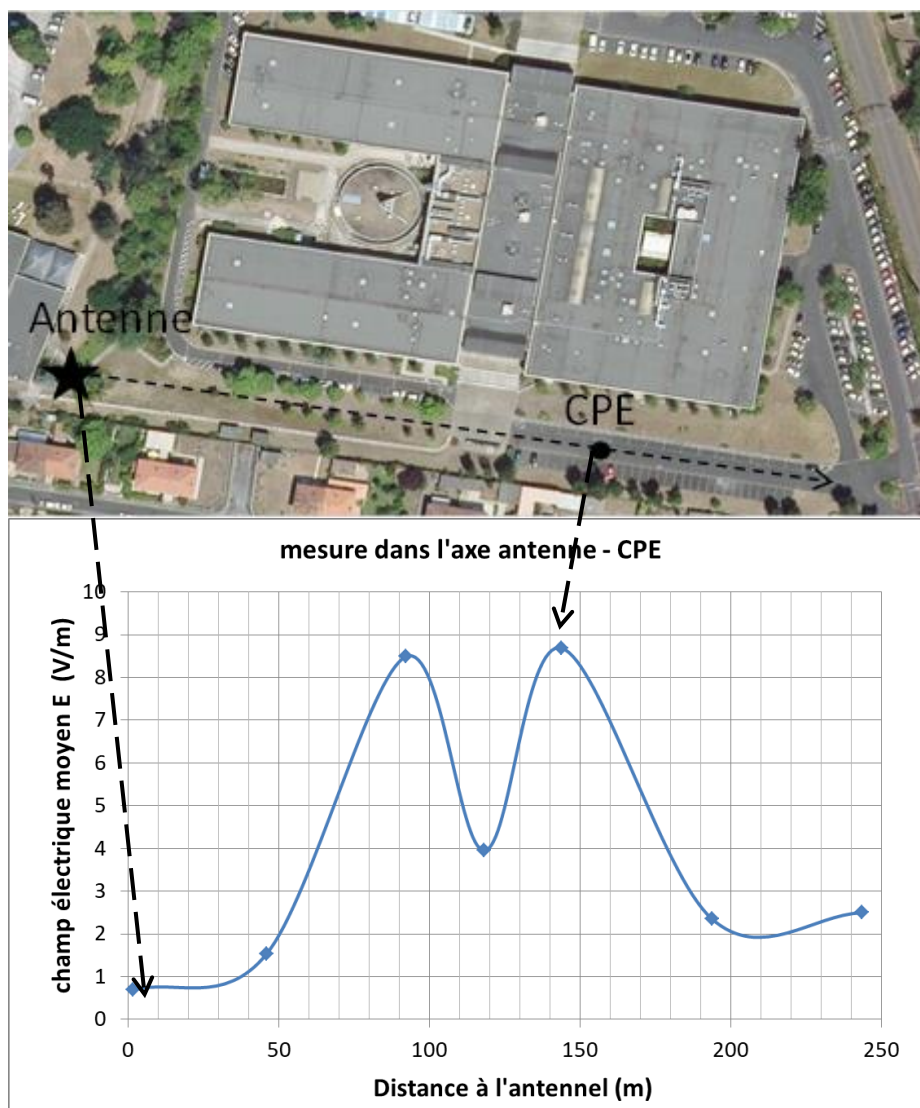


Figure 9 : en haut, vue satellite du site de mesure de Mérignac avec le positionnement de l'antenne, du CPE qui recevait les données envoyées par l'antenne et de l'axe de mesures, en bas illustration du niveau de champ électrique moyen évalué sur 100 MHz de largeur de bande à 1m50 de hauteur en fonction de la distance à l'antenne.

La Figure 10 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.

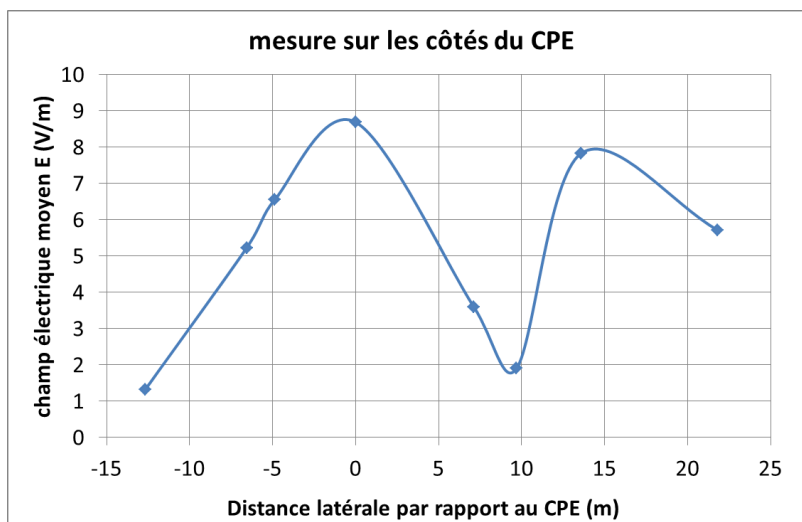


Figure 10 : niveau de champ électrique moyen évalué sur 100 MHz de largeur de bande et mesuré de part et d'autres du CPE situé à 150 mètres de l'antenne.

Les niveaux des champs mesurés en dehors de l'axe antenne – CPE ont été mesurés entre 0,4 V/m et 1,2 V/m pour une émission continue sur 50 MHz⁵ de largeur de bande.

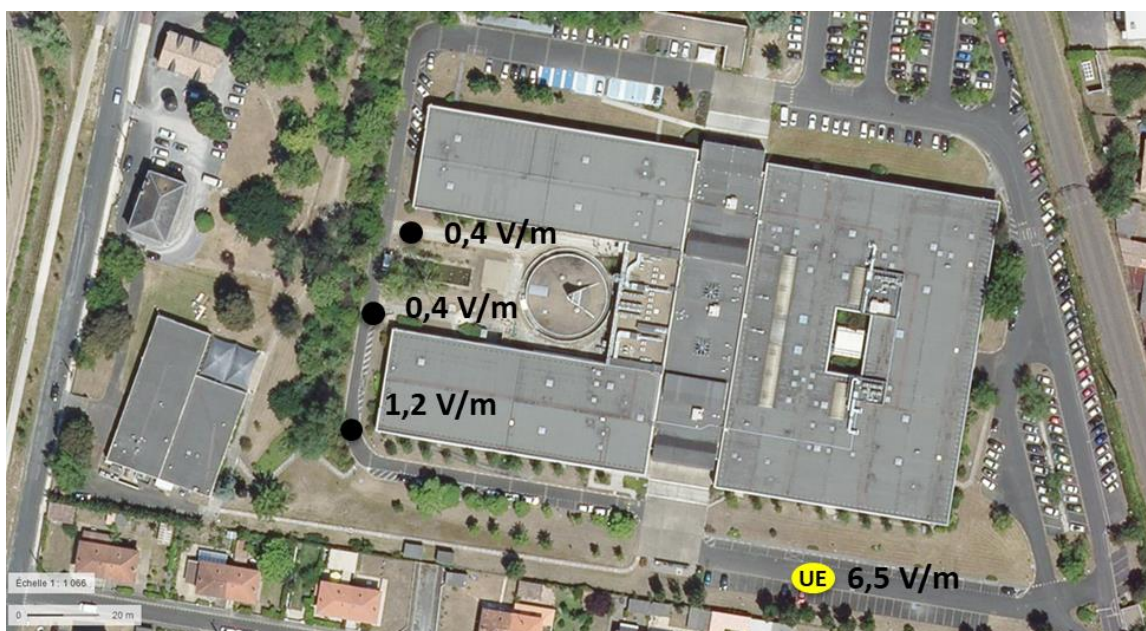


Figure 11 : niveau de champ mesuré en dehors de l'axe de transmission de l'antenne. Dans l'axe sur 50 MHz de bande, le niveau de champ électrique a été mesuré à 6,5 V/m.

- **Site SFR Huawei à Toulouse**

Sur ce site, l'antenne 64T64R est installée sur le toit d'un immeuble à une hauteur de 27 m. Le trafic est établi de façon continue entre l'antenne et un CPE placé dans la ligne de visée de l'antenne (point A sur la Figure 12). La Figure 12 donne les niveaux de champ mesurés à proximité du CPE et en dehors de l'axe du faisceau.

⁵ Les mesures n'ont pas pu être toutes réalisées avec une émission continue sur 100 MHz du fait de limitation en réception du CPE utilisé lors des tests. L'antenne était dans ces conditions à 50% de sa charge maximale.



Figure 12 : 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 100 MHz de largeur de bande avec une puissance maximale de 200 W.

Le niveau de champ électrique maximal a été mesuré dans ces conditions sur ce site à 8,3 V/m à trois mètres du CPE à proximité d’un bâtiment (cf. Figure 13). Les réflexions sur ce bâtiment peuvent expliquer cette valeur plus forte qu’à proximité immédiate du CPE.

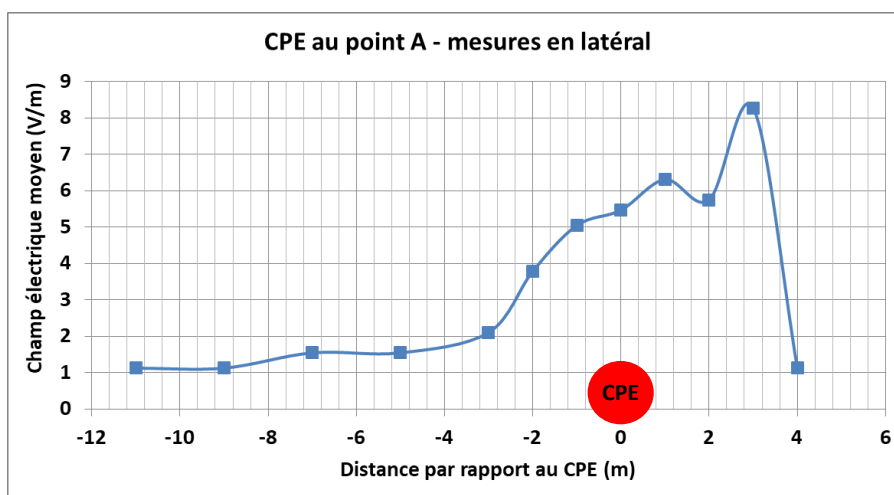


Figure 13 : niveau de champ électrique moyen évalué sur 100 MHz de largeur de bande et mesuré de part et d’autre du CPE situé à 90 mètres de l’antenne.

- **Site Orange Huawei à Toulouse**

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 14). 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 14) et à 7,8 m de l’antenne dans un azimut très dépointé (photo de droite sur la Figure 14).

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).

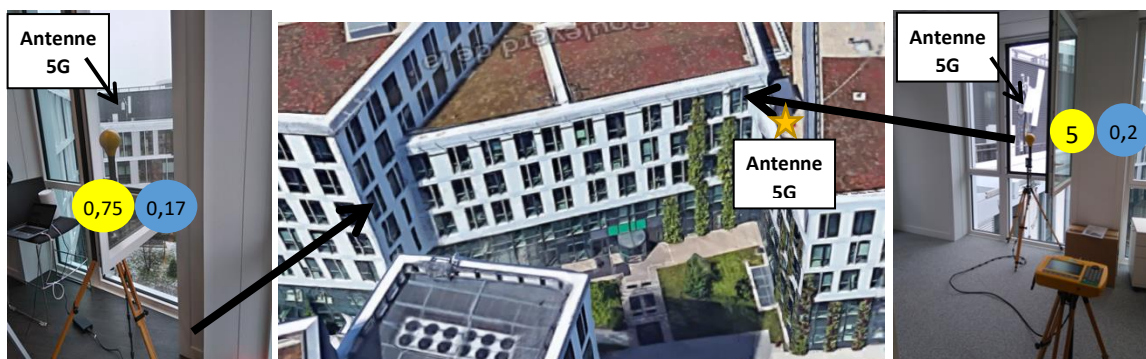


Figure 14 : points de mesure en intérieur à proximité de l'antenne du site de Châtillon, en jaune le niveau de champ en V/m mesuré fenêtre ouverte et en bleu le niveau de champ en V/m mesuré fenêtre fermée. A gauche, CPE et point de mesure à 35 m dans l'azimut médian de l'antenne, à droite CPE et point de mesure à 7,8 m de l'antenne dans un azimut très dépointé.

Des mesures ont également été réalisées en extérieur avec le CPE placé à 60 m au pied de l'antenne : le niveau de champ maximal moyenné sur 6 minutes et mesuré sur 100 MHz de bande dans cette configuration a été de 0,65 V/m pour 2 W de puissance maximale au niveau de l'antenne.

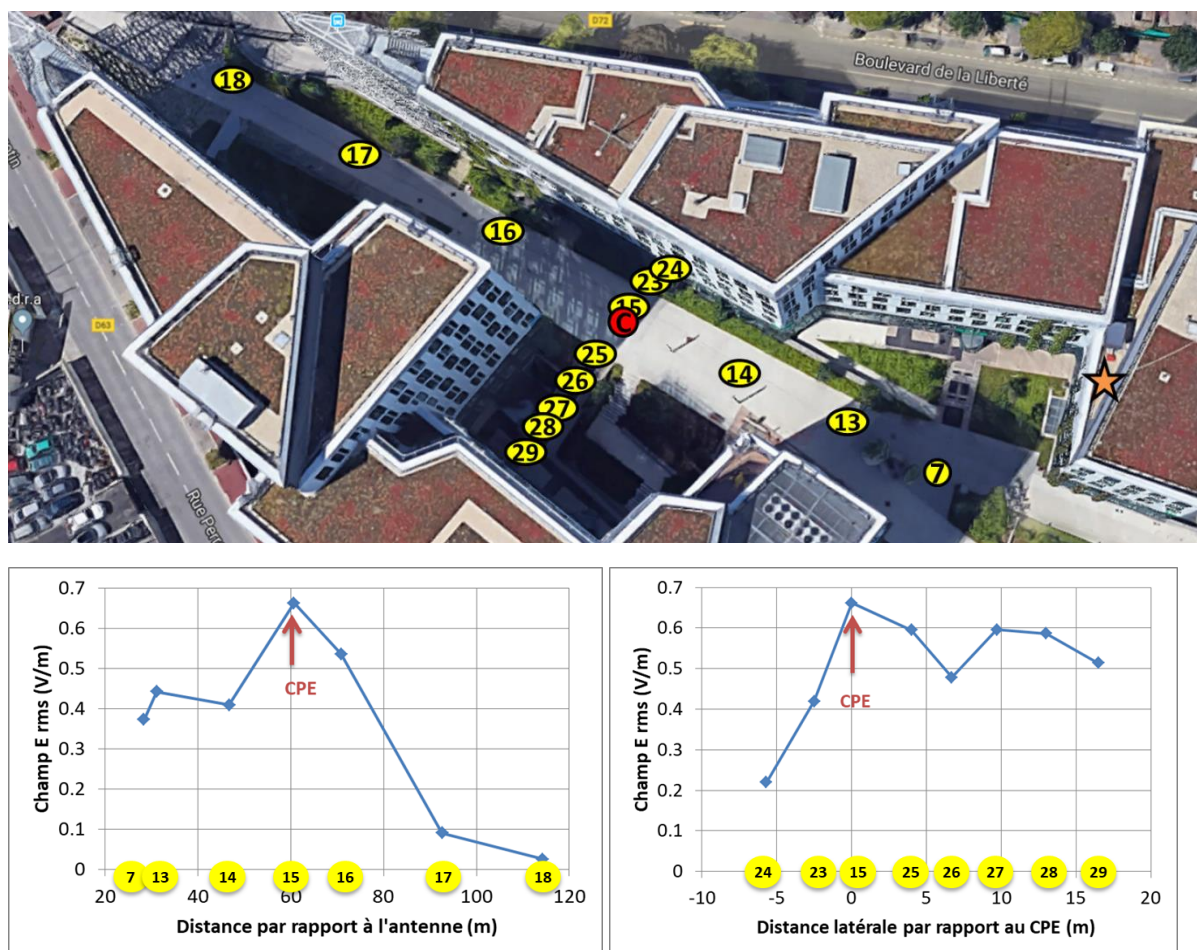


Figure 15 : en haut, vue de dessus du site de Châtillon. Le CPE est placé au point rouge et les points jaunes correspondent aux points de mesure dans l'axe de l'antenne et sur les côtés du CPE. En bas, niveaux de champ moyen sur 6 minutes mesurés sur 100 MHz de bande dans l'axe de l'antenne (à gauche) et sur les côtés du CPE (à droite).

- **Site Orange Huawei à Pau**

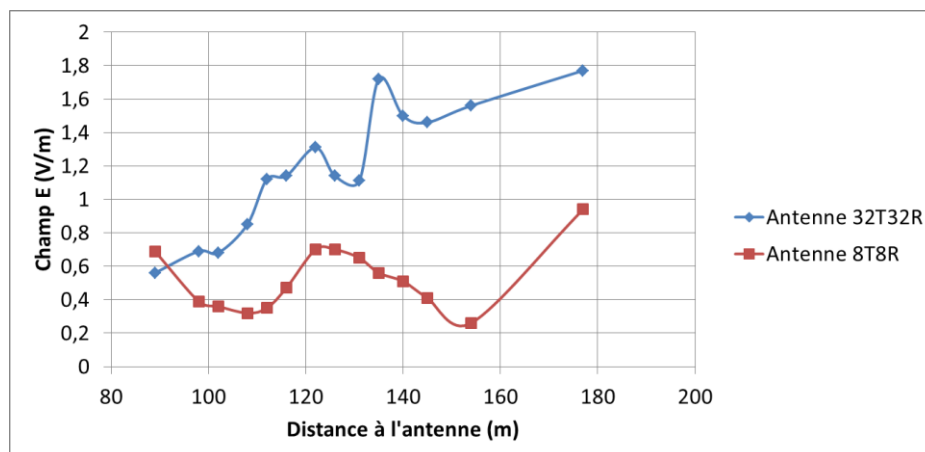
Sur ce site, les antennes se trouvaient sur un immeuble à 45 mètres de hauteur et le trafic était établi de façon continue vers un mobile situé à 125 mètres de l'antenne, en vue directe dans une rue au pied de l'immeuble supportant les antennes (cf. Figure 16).



Figure 16 : vue aérienne du site de Pau avec les antennes sur un immeuble à 45 m de hauteur et le CPE situé à 125 mètres de l'antenne, en vue directe dans une rue au pied de l'immeuble supportant les antennes. Les points jaune et orange sont les points de mesure.

Sur ce site, l'émission provenait soit d'une antenne 32T32R soit d'une antenne 8T8R. La capacité d'orientation dans le plan vertical de l'antenne 8T8R est bien moindre que celle de l'antenne 32T32R, elle-même moindre que celle d'une antenne 64T64R.

Les niveaux de champs maximaux moyennés sur 6 minutes et mesurés sur 100 MHz de bande sont de 1,8 V/m dans le cas de l'antenne 32T32R et de 1 V/m dans le cas de l'antenne 8T8R (cf. Figure 17). Ni le mobile ni les points de mesure ne se trouvaient sans doute dans le lobe direct de l'antenne, que ce soit dans le cas de l'antenne 32T32R ou de l'antenne 8T8R, ce qui explique des niveaux de champs plus faibles que dans d'autres cas, comme à Toulouse ou Mérignac par exemple.



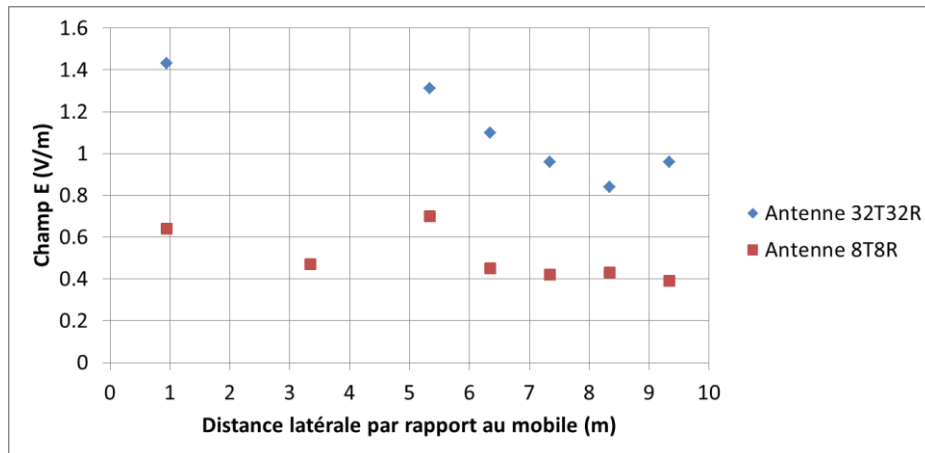


Figure 17 : niveaux de champs moyens sur 6 minutes mesurés sur 100 MHz de bande dans l'axe de visée de l'antenne pour la figure du haut et sur le côté du mobile pour la figure du bas dans le cas d'une émission continue provenant de l'antenne 32T32R pour les points bleus et de l'antenne 8T8R pour les points rouges.

- **Site Orange Ericsson à Douai**

A Douai, l'antenne 64T64R se trouvait sur un immeuble à 28 mètres de hauteur et les mesures ont été réalisées à proximité du modem 5G, sur un parking en vue directe de l'antenne et dans son axe principal de visée (cf. Figure 18).



Figure 18 : vue satellite du site de Douai avec l'antenne sur un toit d'immeuble, le modem 5G sur un parking (point orange) et les points de mesure en jaune.

Le niveau maximal de champ moyen sur 6 minutes évalué sur 100 MHz de bande est de 1,4 V/m sur ce site dans ces configurations. Les niveaux de champ moyen sur 6 minutes mesurés dans l'axe de l'antenne et sur les côtés du modem sont illustrés sur la Figure 19. Ces niveaux de champ sont plus faibles que ceux observés dans des conditions semblables (comme sur le site de Toulouse par

exemple). Ces niveaux plus faibles sont probablement dus à une capacité moindre d'orientation de l'antenne et à un niveau de gain dans la direction du terminal plus faible que le gain maximal de l'antenne.

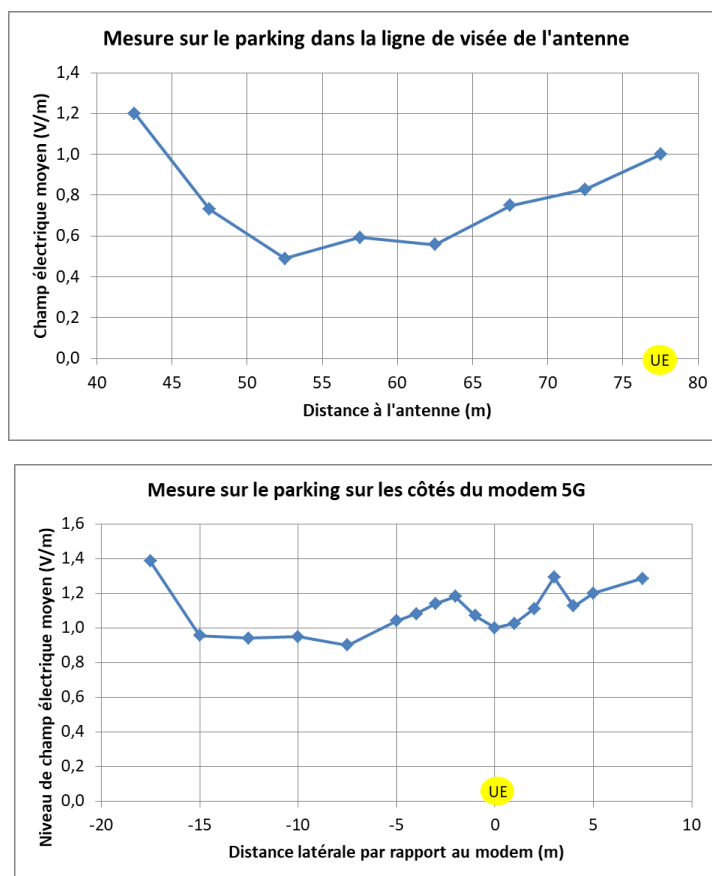


Figure 19 : niveaux de champs moyens sur 6 minutes mesurés sur 100 MHz de bande dans l'axe de visée de l'antenne pour la figure du haut et sur le côté du modem 5G (UE) pour la figure du bas.

- **Site Nokia à Nozay**

A Nozay, deux antennes 64T64R sont installées sur un bâtiment de 40 mètres de hauteur (cf. Figure 22). Une des antennes (secteur 1) est installée au dernier étage de l'immeuble à 38,5 m de hauteur et est dirigée vers un parking avec un très fort tilt mécanique de 18 degrés. Un mode test de l'antenne permet d'envoyer du trafic de façon continue et en chargeant au maximum l'antenne. Etant donné le tilt de 18 degrés, l'axe de visée de l'antenne tire à environ 124 mètres de l'antenne.

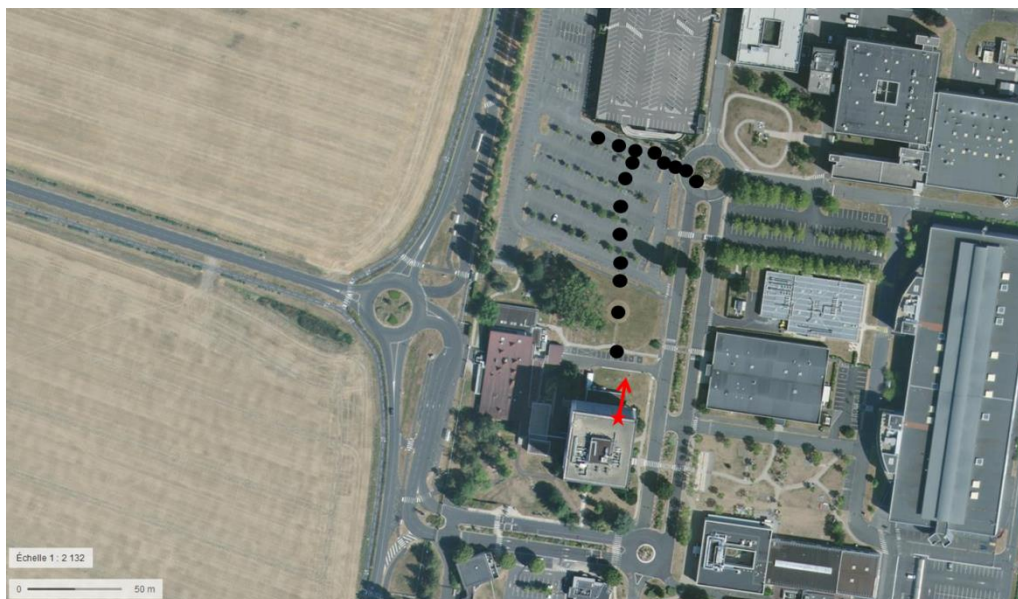


Figure 20 : vue aérienne du site de Nozay et du secteur n°1 pointant vers un parking, en noir sont représentés les points de mesure. En rouge, est indiquée l'antenne et son axe de visée.

Le niveau maximal de champ moyen sur 6 minutes évalué sur 100 MHz de bande est de 6 V/m sur ce secteur dans ces configurations. La Figure 21 illustre les niveaux de champs mesurés dans l'axe de visée de l'antenne et perpendiculairement à cet axe. Un bâtiment situé à environ 150 m de l'antenne peut expliquer les variations de champs entre 130 et 140 m dans l'axe de visée de l'antenne.

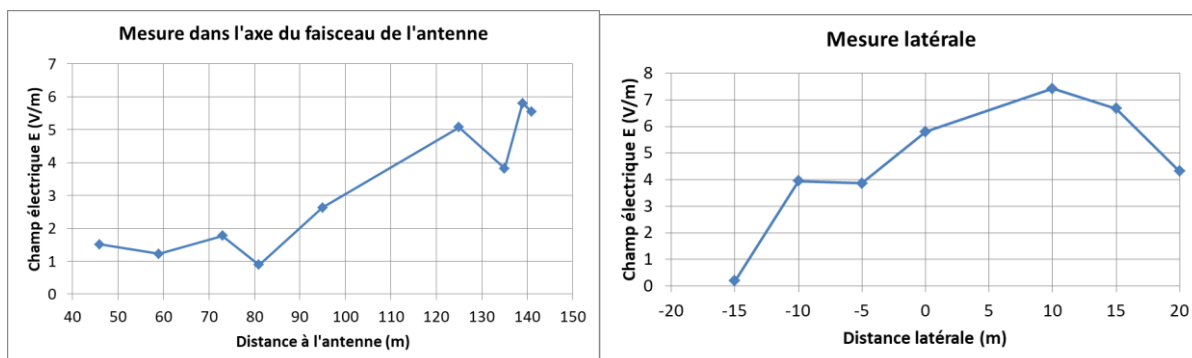


Figure 21 : niveaux de champ électrique moyen sur 6 minutes mesurés sur le secteur 1 du site de Nokia à Nozay à gauche dans l'axe de visée de l'antenne et à droite perpendiculairement à l'axe de visée de l'antenne à environ 140 mètres de l'antenne.

L'autre antenne (secteur 4) est installée sur le toit du bâtiment à 41,5 m de hauteur et est dirigée vers des champs avec un tilt mécanique de 8 degrés (cf. Figure 22). Le mode test de l'antenne permet de transmettre les données dans un faisceau tilté de 18 degrés (8 degrés mécanique et 10 degrés électrique) qui tire donc théoriquement à 134 m de l'antenne.

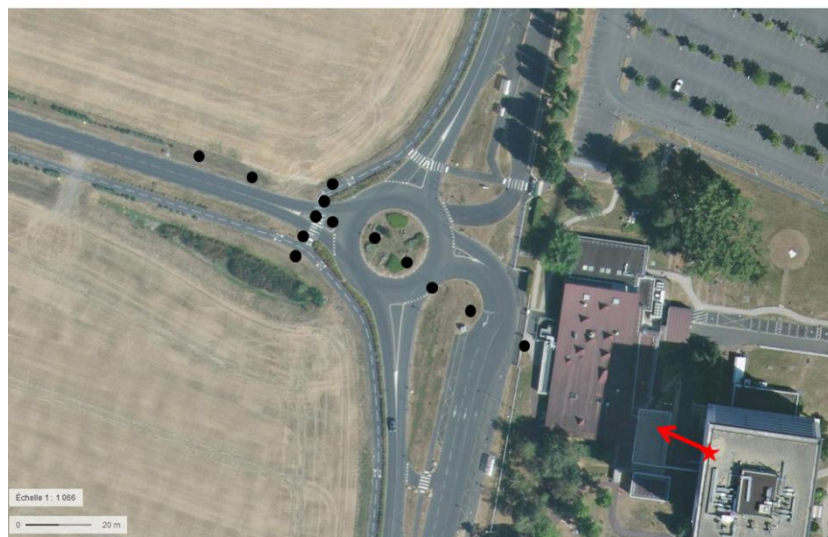


Figure 22 : secteur 4 du site de Nokia à Nozay avec une antenne installée à 41,5 mètres de hauteur (représentée en rouge sur l'image) et des points de mesure représentés en noir sur l'image.

Le niveau maximal de champ moyen sur 6 minutes évalué sur 100 MHz de bande est de 3,5 V/m sur ce secteur dans ces configurations. Ce niveau de champ électrique est moins fort que sur le secteur 1 du fait du tilt électrique qui engendre des pertes de gain. La Figure 23 illustre les niveaux de champs mesurés dans l'axe de visée de l'antenne et perpendiculairement à cet axe.

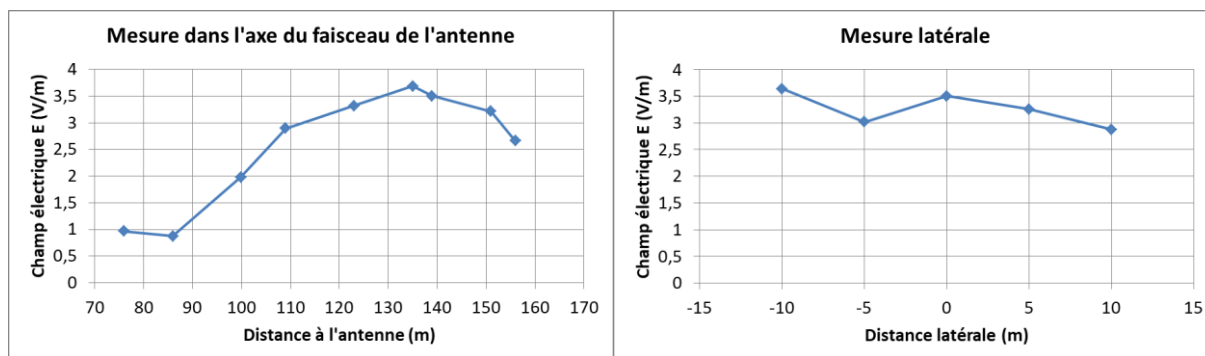


Figure 23 : niveaux de champ électrique moyen sur 6 minutes mesurés sur le secteur 4 du site de Nokia à Nozay à gauche dans l'axe de visée de l'antenne et à droite perpendiculairement à l'axe de visée de l'antenne à un peu moins de 140 mètres de l'antenne.

4.5.3. Avec transfert de fichiers

L'exposition est, dans cette configuration, déclenchée par un téléchargement de fichiers demandé par le CPE, le modem ou le mobile. Différentes tailles de fichiers de 150 Mo à 10 Go ont été utilisés. Comme référence, une mesure en absence de trafic, donc sans téléchargement, a également été réalisée ainsi qu'une mesure dans la configuration traitée au paragraphe précédent c'est-à-dire avec une transmission en continu à pleine charge de l'antenne dans la direction de l'équipement (cas infini dans les tableaux suivants).

Les Tableau 6, Tableau 7 et Tableau 8 récapitulent les niveaux de champ mesurés sur 6 minutes à proximité de l'équipement recevant les fichiers de différentes tailles pour les 3 sites sur lesquels cette configuration a été traitée.

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 6 : Niveaux de champ moyen mesurés sur 6 minutes à proximité d'un CPE téléchargeant des fichiers de différentes tailles sur le site Huawei Bouygues Telecom à Mérignac. Le cas infini correspond à une transmission en continu de données à pleine charge de l'antenne vers l'équipement.

Durée du téléchargement	Taille du fichier	E moyen sur 6 minutes
Pas de téléchargement	0 Mo	0,28 V/m
19 s	1 Go	1,6 V/m
190 s	10 Go	4,8 V/m
Infini	Infini	8,2 V/m

Tableau 7 : Niveaux de champ moyen mesurés sur 6 minutes à proximité d'un CPE téléchargeant des fichiers de différentes tailles sur le site Nokia à Nozay. Le cas infini correspond à une transmission en continu de données à pleine charge de l'antenne vers l'équipement.

Durée du téléchargement	Taille du fichier	E moyen sur 6 minutes
Pas de téléchargement	0 Mo	0,2 V/m
2 s	150 Mo	0,3 V/m
7 s	500 Mo	0,6 V/m
14 s	1 Go	0,8 V/m
134 s	10 Go	2,4 V/m
Infini	Infini	3,9 V/m

Tableau 8 : Niveaux des champs moyens mesurés sur 6 minutes à proximité d'un CPE téléchargeant des fichiers de différentes tailles sur le site Huawei SFR à Toulouse. Le cas infini correspond à une transmission en continu de données à pleine charge de l'antenne vers l'équipement.

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

5. Perspectives

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 gigaoctet 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). Cet indicateur a été intégré dans les lignes directrices nationales sur la présentation des résultats de simulation de l'exposition aux ondes émises par les installations radioélectriques.

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 carte 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 des consommations de données.

L'intérêt de cet indicateur est qu'il permet un calcul 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'ANFR⁶, 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 pour les antennes à

⁶<https://www.anfr.fr/fileadmin/mediatheque/documents/5G/consultation/consultation-5G-Lignes-directrices-nationales.pdf>

faisceau fixe. 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 dans le cas d'antennes à faisceaux variables : 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.

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 9).

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
Champ E estimé à 100 m	1,7 V/m	2,8 V/m

Tableau 9 : estimation du niveau de champ électrique à 100 mètres d'une antenne 4G à l'intérieur d'un bâtiment avec une hypothèse de puissance typique actuelle et une hypothèse de puissance future.

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
Champ E estimé à 100 m	1,1 V/m	1,8 V/m

Tableau 10 : estimation du niveau de champ électrique à 100 mètres d'une antenne 5G à l'intérieur d'un bâtiment avec une hypothèse de puissance basse et une hypothèse de puissance haute.

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

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 radioélectriques⁷.

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 est donc indépendante de la durée.

Avec l'utilisation des antennes à faisceaux orientables, la variabilité spatiale et temporelle devrait augmenter et cette approche n'apparaît plus adaptée.

La solution proposée, notamment au sein des groupes de normalisation de l'IEC⁸, 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.

⁷ 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

⁸ 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

6. Conclusions

Ces premières mesures ont permis de couvrir plusieurs configurations antennaires (des antennes de marques différentes, de tailles différentes) et différentes implémentations de la 5G NR (avec par exemple un nombre différent de SSB ou des formats de trame différents).

Les niveaux des champs mesurés sont tous très en-dessous de la valeur limite réglementaire qui est de 61 V/m dans la bande de fréquences 3,4 - 3,8 GHz.

Les mesures réalisées ont permis de confirmer que l'exposition aux ondes dépend de nombreux paramètres dont:

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

Ces premières mesures ont été réalisées dans des configurations particulières permettant de bien maîtriser les conditions de mesure. Ces configurations ont été mises en œuvre car les réseaux n'étaient pas ouverts aux clients des opérateurs. Après l'ouverture des réseaux aux clients des opérateurs, de nouvelles mesures permettront de tester des configurations plus réalistes en termes de trafic et de compléter les conclusions de ce rapport.

De plus, ces mesures n'ont concerné quasiment exclusivement que des mesures en extérieur. Des mesures en intérieur compléteront l'analyse.

Enfin, cette étude a porté sur la bande 3,4 – 3,8 GHz, qui sera la première à être utilisée pour la 5G en France. De premières expérimentations dans la bande 26 GHz ont été autorisées par l'ARCEP en fin d'année 2019. Il conviendra d'étudier également la 5G dans cette nouvelle bande de fréquences.