

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

Volet 3 intermédiaire: premiers résultats de mesures sur les pilotes 5G dans la bande 26 GHz

Juin 2021

Table des matières

1.	Introduction.....	3
2.	Le déploiement pilote 5G de la gare SNCF de Rennes	4
2.1.	Présentation du site	4
2.2.	Caractéristiques du site	5
3.	Configuration de mesures	6
4.	Contribution des services autres que la 5G.....	8
5.	Résultats de mesures 5G avec un trafic continu	9
5.1.	Cas du faisceau avec le plus fort gain.....	9
5.2.	Cas d'un faisceau intermédiaire du deuxième niveau	11
5.1.	Cas du faisceau le plus large.....	12
5.2.	Configuration avec 2 faisceaux.....	14
5.2.1.	Faisceaux n° 20 et n° 47 sur le site 1	14
5.2.1.	Faisceaux n° 20 et n° 63 sur le site 2	16
6.	Résultats de mesures 5G lors d'un téléchargement de données.....	18
7.	Résultats de simulations numériques	19
7.1.	Outil de simulation	19
7.2.	Comparaison mesures et simulation.....	20
7.2.1.	Emission dans le faisceau n° 20.....	20
7.2.2.	Emission dans le faisceau n° 47	21
7.2.3.	Emission dans le faisceau n° 63.....	22
8.	Conclusions.....	23

1. Introduction

Ce rapport constitue le troisième volet intermédiaire d'une étude sur l'évaluation de l'exposition du public aux ondes électromagnétiques créées par les réseaux 5G.

Le premier volet¹ a porté sur une présentation générale de la 5G abordée sous l'angle de l'exposition.

Il existe deux gammes de fréquences FR1 et FR2 (« *Frequency Range* » 1 et 2) possibles pour le déploiement de la 5G.

La gamme FR1 s'étend de 450 MHz à 7,125 GHz et contient toutes les bandes de fréquences déjà attribuées à la téléphonie mobile pour les précédentes générations de réseaux ainsi que la nouvelle bande 3,4 – 3,8 GHz, récemment attribuée à la 5G et qui a fait l'objet du deuxième volet² de cette étude.

La gamme FR2 s'étend quant à elle de 24,25 GHz à 52,6 GHz et contient les bandes dites millimétriques³. Ces bandes représentent le nouveau territoire du spectre pour les communications mobiles, exploitable grâce aux antennes à faisceaux orientables qui permettent de compenser les pertes importantes de propagation à ces fréquences. La bande 26 GHz a été recommandée dès 2016 par le groupe consultatif européen RSPG⁴ (« *Radio Spectrum Policy Group* ») comme une bande pionnière pour la 5G et l'Union européenne a approuvé cette orientation en 2019. La 5G dans cette bande apportera un supplément de capacité sur une zone de quelques centaines de mètres autour de l'émetteur ("hot spots") et répondra aussi aux besoins d'usages professionnels : logistique, automatisation, agriculture, grands événements...

Les bandes 40,5-43,5 GHz et 66-71 GHz, identifiées lors de la Conférence Mondiale des Radiocommunications de 2019, seront également harmonisées en Europe pour la 5G. La bande 57-71 GHz l'est déjà pour des applications de faible portée ou de liaisons entre petites cellules, dans un cadre d'autorisation générale. Plusieurs technologies sont adaptées à cette bande de fréquences, dont la 5G mais aussi le WiGig, dérivé du WiFi, qui permet des téléchargements 10 à 20 fois plus rapides sur des distances de quelques mètres.

La bande 26 GHz est la première bande dite « millimétrique » utilisée pour faire fonctionner un réseau 5G et fait l'objet de ce rapport.

¹ <https://www.anfr.fr/fileadmin/mediatheque/documents/expace/CND/Rapport-ANFR-presentation-generale-5G.pdf>

² <https://www.anfr.fr/fileadmin/mediatheque/documents/5G/20200410-ANFR-rapport-mesures-pilotes-5G.pdf>

³ Les bandes millimétriques rassemblent les fréquences supérieures à 30 GHz dont la longueur d'onde est inférieure au cm. Du fait de propriétés physiques comparables, les fréquences situées entre 24 et 30 GHz sont *lato sensu* souvent qualifiées de « millimétriques ».

⁴ Radio spectrum policy group <https://rspg-spectrum.eu/>

2. Le déploiement pilote 5G de la gare SNCF de Rennes

2.1. Présentation du site

La nouvelle gare de Rennes inaugurée en Juillet 2019, a été retenue par l'opérateur Orange et la SNCF pour expérimenter la 5G dans la bande FR2 26 GHz. Cette expérimentation a été autorisée par l'ARCEP⁵ suite à l'appel à la création de plateformes d'expérimentation 5G dans la bande de fréquences 26 GHz, ouvertes à des tiers.

Deux antennes Nokia 5G FR2 ont été installées aux niveaux des halls départ et arrivée de la gare de Rennes.

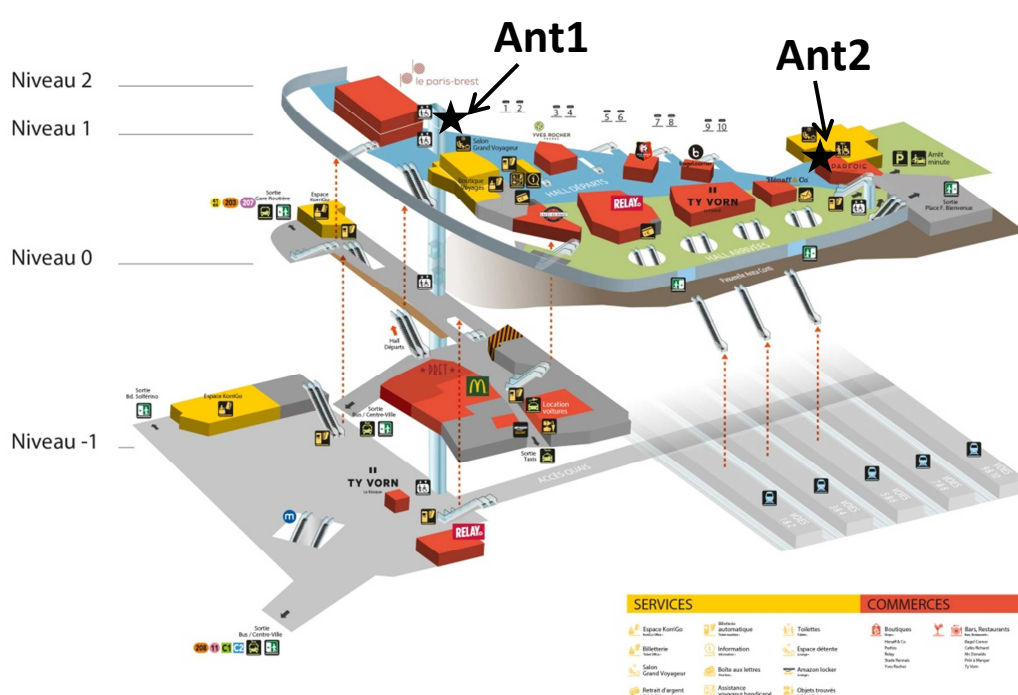


Figure 1 : plan de la gare de Rennes et localisation des 2 antennes 5G 26 GHz

Les tests de déploiement de la 5G FR2 sont effectués en mode NSA « *non standalone* », c'est-à-dire que la communication 5G requiert une accroche initiale avec un réseau 4G. Une antenne 4G accompagne donc systématiquement l'antenne 5G FR2.

A ce stade, du fait du statut expérimental de l'installation, l'utilisation de ces antennes 5G n'était pas ouverte aux abonnés de l'opérateur.

⁵ <https://www.arcep.fr/cartes-et-donnees/nos-publications-chiffrees/experimentations-5g-en-france/tableau-de-bord-des-experimentations-5g-en-france.html>

2.2. Caractéristiques du site

Les deux antennes 5G de la gare de Rennes sont de marque Nokia émettant à la fréquence centrale de 26,8 GHz et disposant d'une largeur de bande de 800 MHz constituée de 8 canaux de 100 MHz. Elles permettent de mettre en œuvre 32 faisceaux orientables parmi 64 possibles dans cette gamme de fréquences. L'orientation et la forme de ces faisceaux sont préconfigurées. La Figure 3 illustre la configuration testée dans la gare de Rennes avec trois niveaux de faisceaux. Le premier niveau est constitué des 16 faisceaux les plus fins émettant à l'horizontale avec les gains les plus forts. Le deuxième niveau est constitué de 15 faisceaux un peu plus larges émettant avec un angle de 12° vers le bas et présentant des gains moins forts. Enfin le troisième niveau ne comporte qu'un seul faisceau, plus large, émettant avec un angle de 29° vers le bas et présentant un gain moins important.

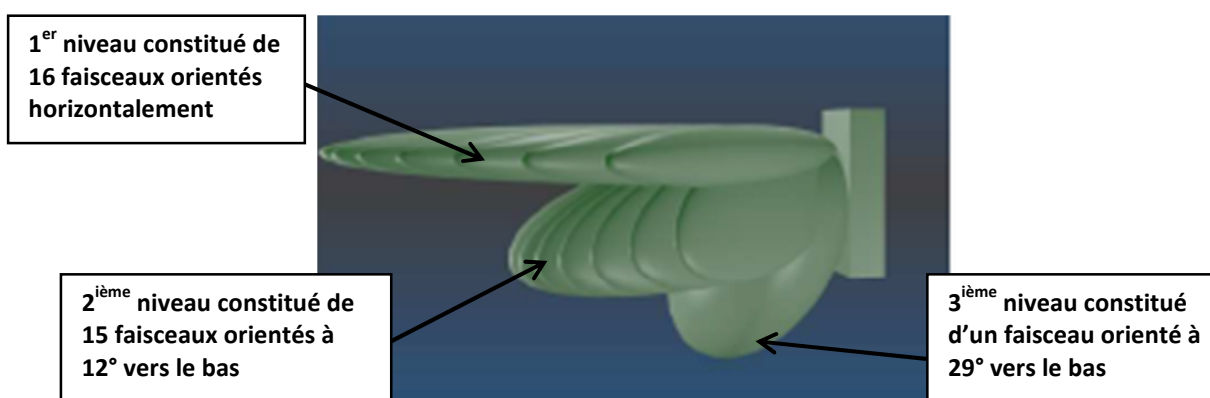


Figure 3 : illustration de la configuration des faisceaux testée dans la gare de Rennes

Le gain maximal de 28,4 dBi est obtenu dans les faisceaux centraux du premier niveau. Les caractéristiques techniques du site de la gare de Rennes sont rappelées dans le Tableau 1.

Tableau 1 : caractéristiques techniques des antennes 5G testées dans la gare de Rennes

Paramètre	Valeur
Modèle	Nokia AEUB
Fréquence Centrale	26,8 GHz
Largeur de bande	8 ×100 MHz
Nombre de faisceaux	32
Gain maximal	28,4 dBi
Tilt mécanique	10°
Puissance maximale configurée par canal	12 dBm
Puissance moyenne totale configurée Tx	24 dBm / 800 MHz (250 mW)

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 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. Il convient de noter que la transmission n'est pas complètement continue du fait du mode TDD de la transmission, qui ménage périodiquement des interruptions pour recueillir le signal issu du terminal. Cet envoi était assuré vers un utilisateur noté UE pour « *user equipment* » qui était soit un mobile Sony, soit un CPE (*customer premises equipment*) Qualcomm. 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 induit par des téléchargements à la demande de fichier de 1 Go.

Les mesures ont été réalisées en intérieur à 1,5 m du sol en différents points, en vue directe de l'antenne, dans le faisceau de l'antenne servant l'utilisateur UE (cf. Figure 4) et en dehors de ce faisceau. Dans l'axe UE/antenne, une mesure a été réalisée tous les 50 cm jusqu'à une distance de 3 m de l'UE, et tous les 3 ou 4 m au-delà. Sur les côtés de l'UE, une mesure est réalisée tous les 50 cm jusqu'à une distance d'environ 3 m de l'UE.

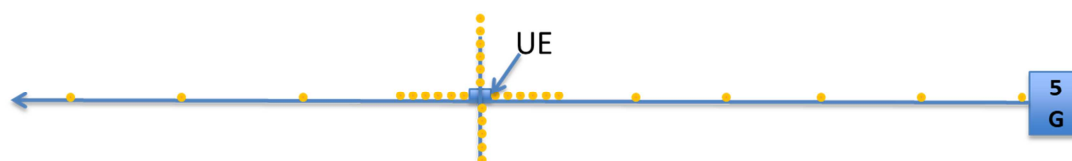


Figure 4 : illustration des points retenus pour mesurer le niveau de champ global dans le faisceau servant l'utilisateur (UE).

Différents faisceaux parmi les 32 faisceaux configurés sur ces sites ont été sollicités (cf. Figure 5) :

- le faisceau portant l'identifiant n° 20 situé dans la 1^e rangée de faisceaux qui émet dans l'azimut central avec le gain maximal de l'antenne (28,4 dBi) sans inclinaison supplémentaire vers le bas par rapport à l'inclinaison mécanique de l'antenne qui est de 10°;
- le faisceau portant l'identifiant n°47 situé dans la 2^e rangée de faisceaux qui émet dans l'azimut central avec une inclinaison intermédiaire de 12° en plus de l'inclinaison mécanique de l'antenne (inclinaison totale de 22°) et un gain maximal de 24,5 dBi.
- le faisceau portant l'identifiant n° 63 situé dans la 3^e rangée de faisceaux qui émet dans l'azimut central mais avec l'inclinaison la plus importante vers le bas (+29° par rapport à l'inclinaison mécanique soit une inclinaison totale de 39°) et un gain plus faible (19,2 dBi).

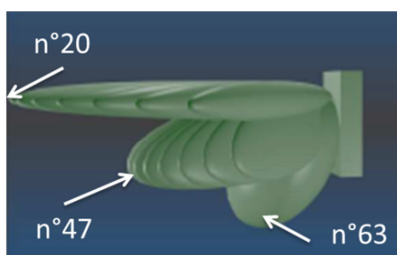


Figure 5 : identification des faisceaux successivement sollicités lors des mesures

Les niveaux de champs ont été évalués en valeurs moyennes sur 6 mn, conformément à la réglementation. Il est rappelé que la 5G comme la 4G utilisent une modulation OFDMA, qui se caractérise également par un niveau de PAPR (*peak to average power ratio*) qui mesure l'amplitude maximale instantanée du signal par rapport à son niveau moyen.

Deux systèmes de mesures ont été utilisés de façon complémentaire :

- Un mesureur large bande SMP2 équipé d'une sonde WPF 40 pour mesurer le niveau de champ global dans la bande de 20 MHz à 40 GHz (cf. Tableau 2) ;
- Un mesureur de champ détaillé en fréquences SRM 3006 équipé d'une antenne SRM-3502/01 pour mesurer les niveaux de champs dans les différents services existants entre 400 MHz et 6 GHz (cf. Tableau 3).

Tableau 2 : caractéristique du système de mesures pour la 5G FR2

Paramètre	Valeur	Illustration
Fabricant	Wave control	
Modèle	SMP 2	
Sonde	WPF 40	
Bande de fréquence	20 MHz – 40 GHz	
Capteur	isotropique	
Sensibilité	1 V/m	

Tableau 3 : caractéristique du système de mesures pour les services en dessous de 6 GHz

Paramètre	Valeur	Illustration
Fabricant	Narda Sts	
Modèle	SRM 3006	
Sonde	SRM-3502/01	
Bande de fréquence	400 MHz – 6 GHz	
Capteur	isotropique	
Niveau émission significative	0,05 V/m	

4. Contribution des services autres que la 5G

A proximité de la gare de Rennes se trouvent un certain nombre de stations radioélectriques (principalement de téléphonie mobile) autorisées par l'ANFR (cf. Figure 6).



Figure 6 : extrait de Cartoradio pour visualiser les stations radioélectriques autorisées par l'ANFR autour de la gare de Rennes

Afin de déterminer la contribution de ces émetteurs préexistants dans les bandes de fréquences inférieures à 6 GHz, une évaluation par service a été réalisée à proximité de chacun des deux sites 5G de la gare. Les services sont définis à l'aide du protocole de mesures de l'ANFR⁶. La Figure 7 montre que le niveau de champ dans les autres bandes de téléphonie mobile est proche de 0,5 V/m par bande de fréquence. Le niveau de champ global entre 400 MHz et 6 GHz est d'environ 1 V/m à proximité des deux sites 5G de la gare de Rennes.

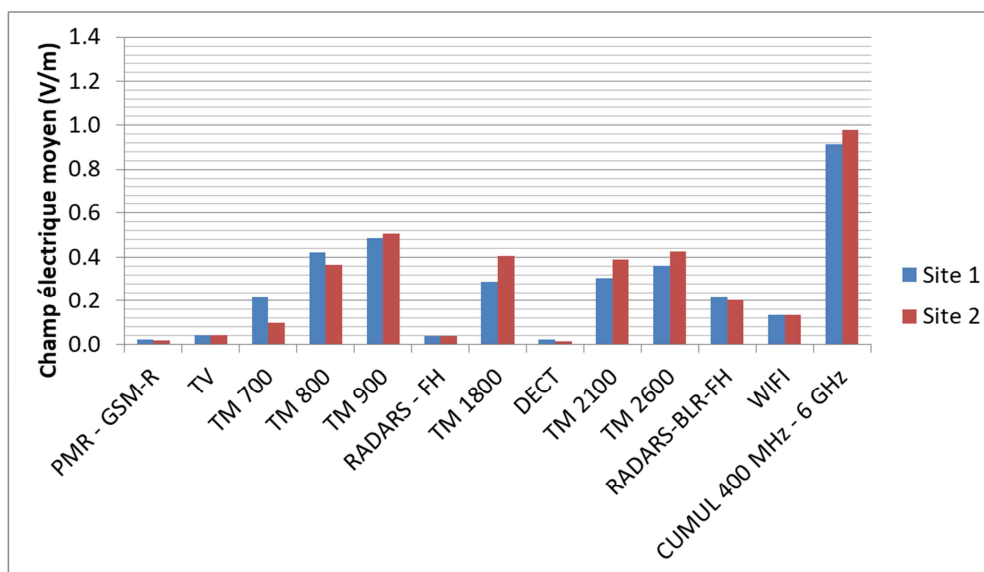


Figure 7 : résultats de l'évaluation du niveau de champ dans les différents services entre 400 MHz et 6 GHz

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

5. Résultats de mesures 5G avec un trafic continu

Ces mesures sont réalisées à l'aide de la sonde large bande qui intègre donc toutes les contributions entre 20 MHz et 40 GHz. La sensibilité de cette sonde est de 1V/m.

5.1. Cas du faisceau avec le plus fort gain

L'UE a été placé de façon à être servi par le faisceau n° 20 présentant le plus fort gain (28,4 dBi) sur le site n° 1. Ce faisceau émet dans l'azimut central sans inclinaison supplémentaire par rapport à l'inclinaison mécanique de 10° de l'antenne. Les mesures sont réalisées dans l'axe du faisceau et dans un axe transversal au niveau de l'UE comme indiqué Figure 8 et Figure 9.

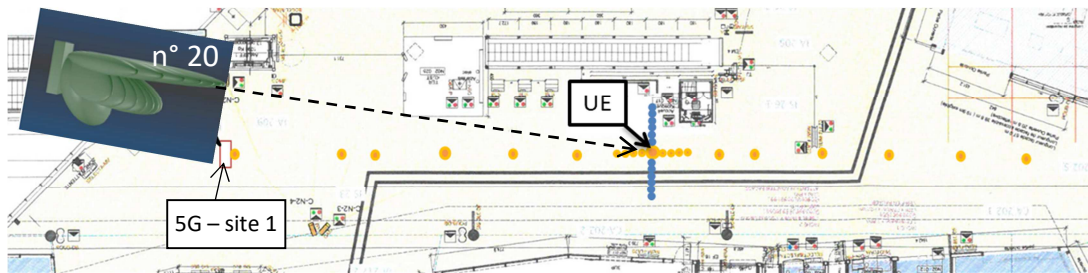


Figure 8 : localisation des points de mesures autour de l'UE servi par le faisceau n°20 du site n°1 émettant avec un tilt mécanique de 10° vers le bas (en jaune dans l'axe du faisceau et en bleu sur les côtés de l'UE)

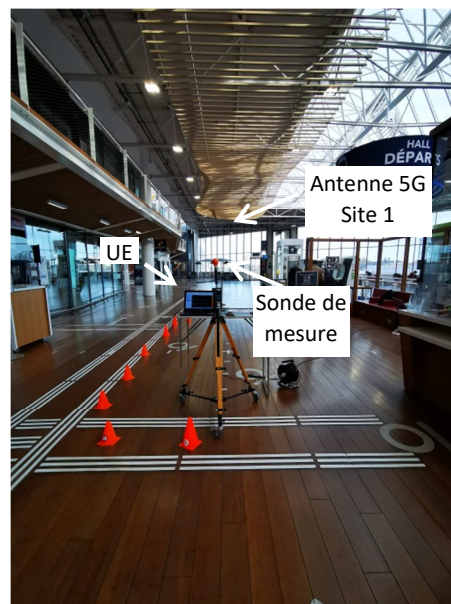


Figure 9 : photo d'un point de mesure à proximité de l'UE servi par le faisceau n°20

La Figure 10 et la Figure 11 montrent les niveaux de champ moyen mesurés sur les deux axes de mesures en l'absence d'émission 5G (sans trafic) ainsi qu'avec une émission continue dans le faisceau servant l'UE, qui est alors fixe (avec trafic).

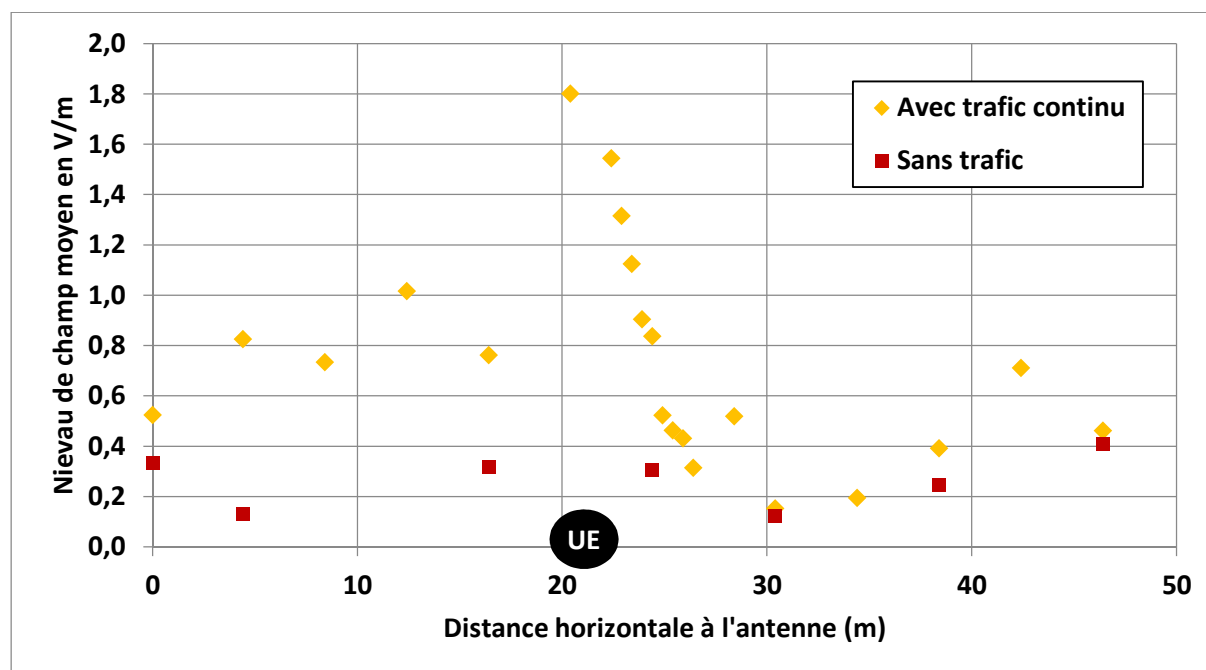


Figure 10 : niveau de champ moyen mesuré dans l'axe du faisceau servant l'UE en fonction de la distance à l'antenne 5G

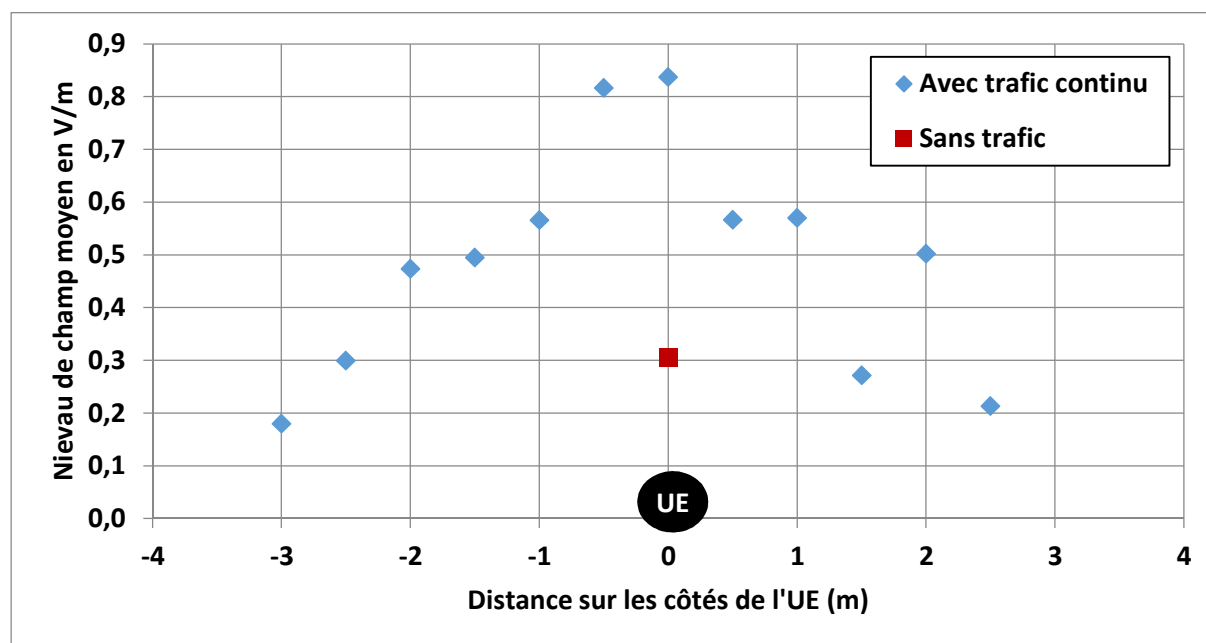


Figure 11 : niveau de champ moyen mesuré sur les côtés de l'UE en fonction de la distance à l'UE

En l'absence d'émission 5G, le niveau de champ ambiant se situe entre 0,2 et 0,4 V/m. Avec une émission continue vers l'UE, le niveau de champ à proximité immédiate de l'UE atteint 1,8 V/m. L'exposition produite par le faisceau apparaît très localisée du fait de la finesse du faisceau. Dans l'axe du faisceau (Figure 10), à quelques mètres devant ou derrière l'UE (à plus ou moins 5 m), la contribution de l'émission 5G n'est plus significative. Sur les côtés de l'UE (Figure 11), le niveau de champ décroît également très rapidement, à environ 2 m de l'UE, les points de mesure ne se trouvent plus dans le faisceau et le niveau de champ redevient comparable au niveau de champ mesuré sans 5G.

5.2. Cas d'un faisceau intermédiaire du deuxième niveau

L'UE a été placé sur le site n° 1 de façon à être servi par le faisceau n° 47 émettant dans l'azimut central mais avec une inclinaison supplémentaire vers le bas de 12° par rapport à l'inclinaison mécanique de 10°. Le gain maximal de ce faisceau est 24,5 dBi. Les mesures sont réalisées dans l'axe du faisceau et dans un axe transversal au niveau de l'UE comme indiqué Figure 12.

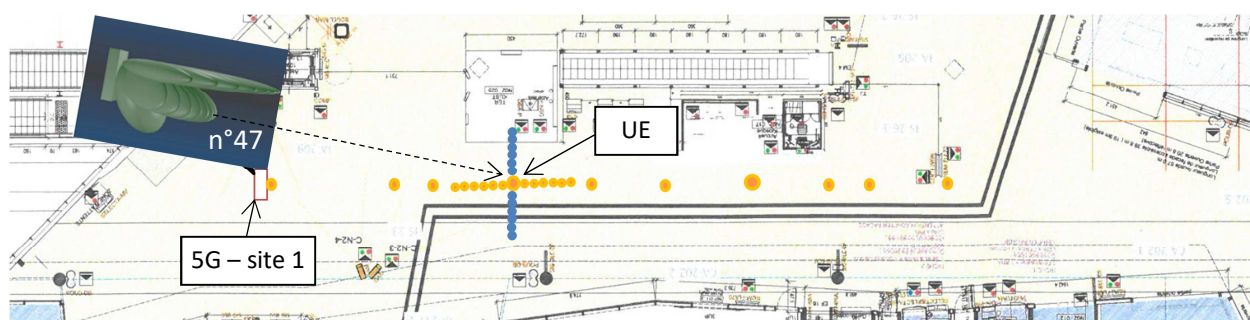


Figure 12 : localisation des points de mesures autour de l'UE servi par le faisceau n°47 du site n°1 en jaune dans l'axe du faisceau et en bleu sur les côtés de l'UE

Le gain de ce faisceau apparaît moins important que celui du n° 20, mais ce faisceau sert une zone plus proche de l'antenne. Le niveau de champ électrique maximal mesuré en condition de trafic permanent atteint 2,3 V/m. En l'absence de trafic 5G, le niveau de champ est inférieur à 0,5 V/m.

Comme précédemment, l'exposition générée par le faisceau apparaît très localisée : dans l'axe du faisceau (Figure 13), à quelques mètres devant ou derrière l'UE (à plus ou moins 5 m), la contribution de l'émission 5G n'est plus significative. Sur les côtés de l'UE (Figure 14), le niveau de champ décroît encore plus rapidement, à environ 1 m du point d'exposition maximale, les points de mesure ne se trouvent plus dans le faisceau et le niveau de champ redevient comparable au niveau de champ mesuré sans 5G.

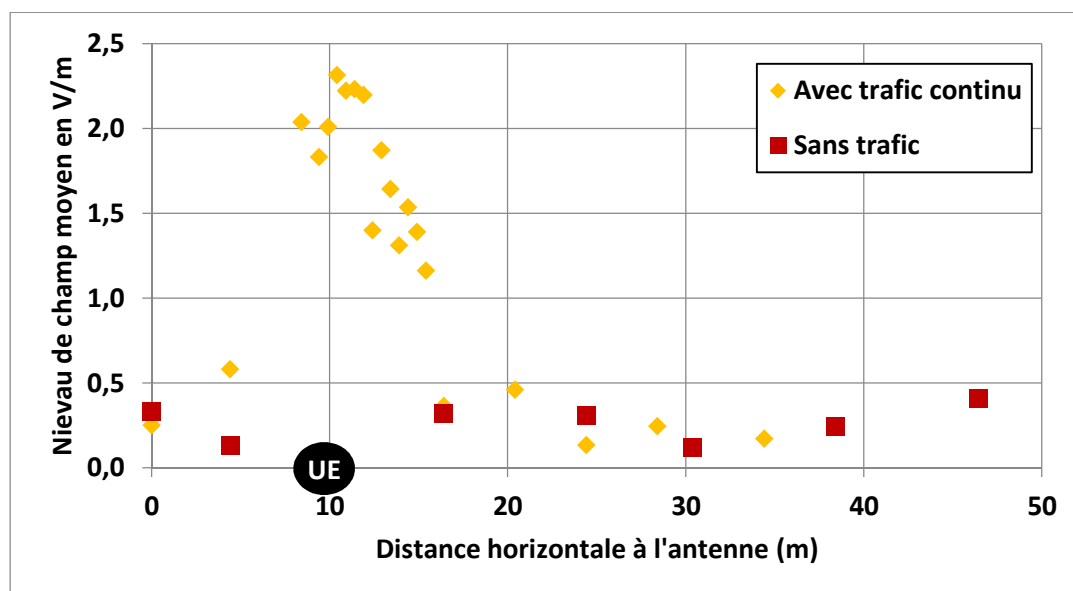


Figure 13 : niveau de champ moyen mesuré dans l'axe du faisceau n° 47 servant l'UE en fonction de la distance au sol à l'antenne 5G

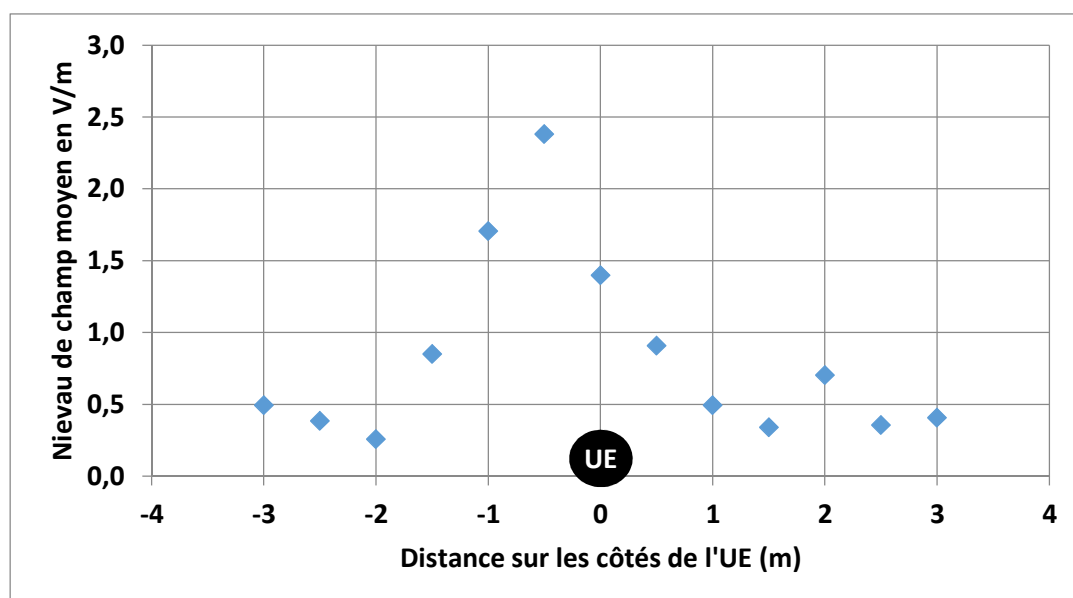


Figure 14 : niveau de champ moyen mesuré sur les côtés de l'UE en fonction de la distance à l'UE avec un trafic continu dans le faisceau n°47

5.1. Cas du faisceau le plus large

Dans cette configuration, l'UE a été placé sur le site n° 2 de façon à être servi par le faisceau n° 63 émettant dans l'azimut central mais avec une inclinaison supplémentaire vers le bas de 29° par rapport à l'inclinaison mécanique de 10°. Ce faisceau est plus large que les autres faisceaux de l'antenne et son gain maximal n'est que de 19,2 dBi. Les mesures sont, comme précédemment, réalisées dans l'axe du faisceau et dans un axe transversal au niveau de l'UE comme indiqué dans la Figure 14.

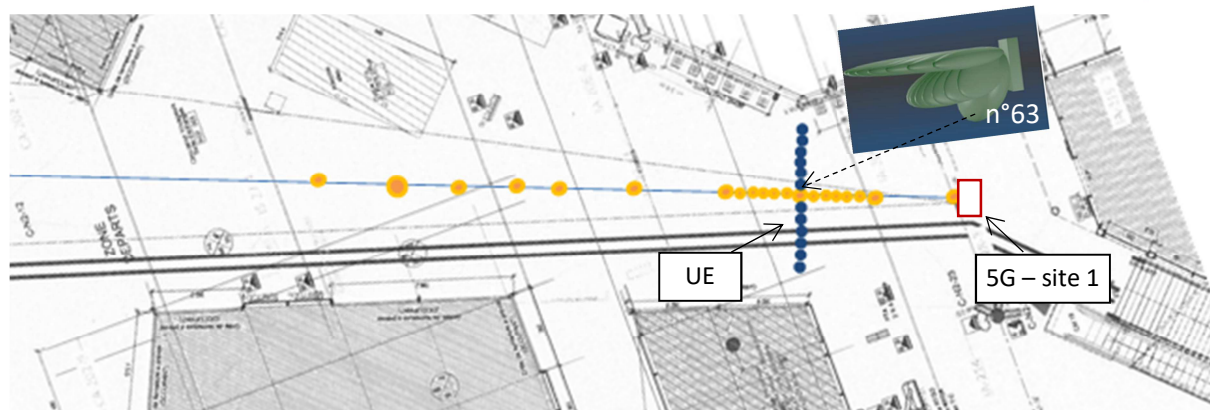


Figure 15 : localisation des points de mesures autour de l'UE servi par le faisceau n°63 du site n°2 en jaune dans l'axe du faisceau et en bleu sur les côtés de l'UE

Le gain de ce faisceau est encore moins important que précédemment mais il sert une zone beaucoup plus proche de l'antenne. Le niveau de champ électrique maximal mesuré en condition de trafic permanent ressort à 3,2 V/m. En l'absence de trafic 5G, le niveau de champ se situe entre 0,5 V/m et 1 V/m.

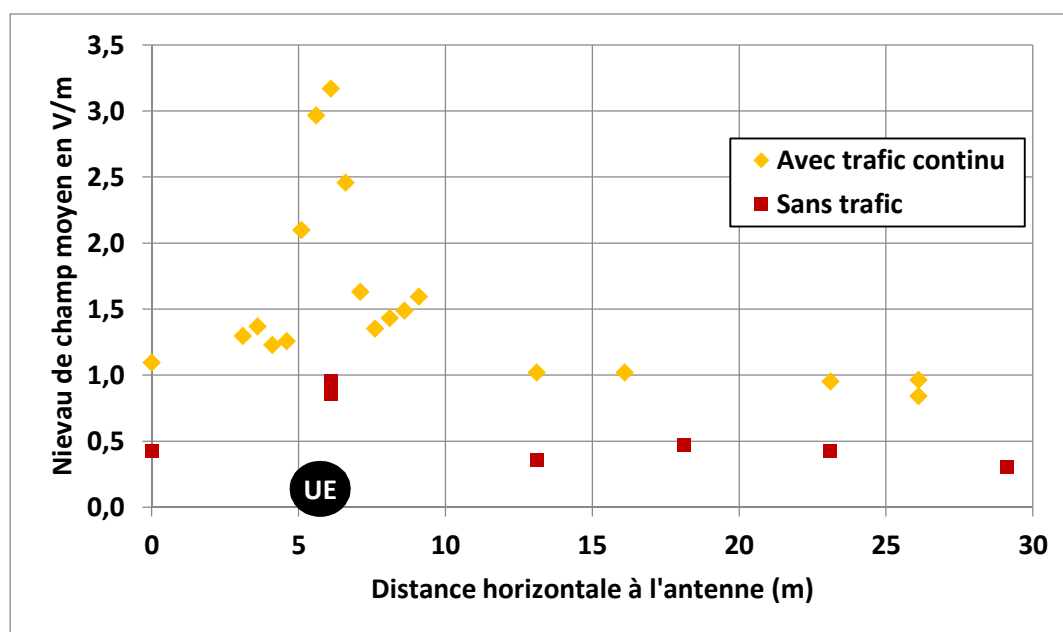


Figure 16 : niveau de champ moyen mesuré dans l'axe du faisceau n°63 servant l'UE en fonction de la distance au sol à l'antenne 5G

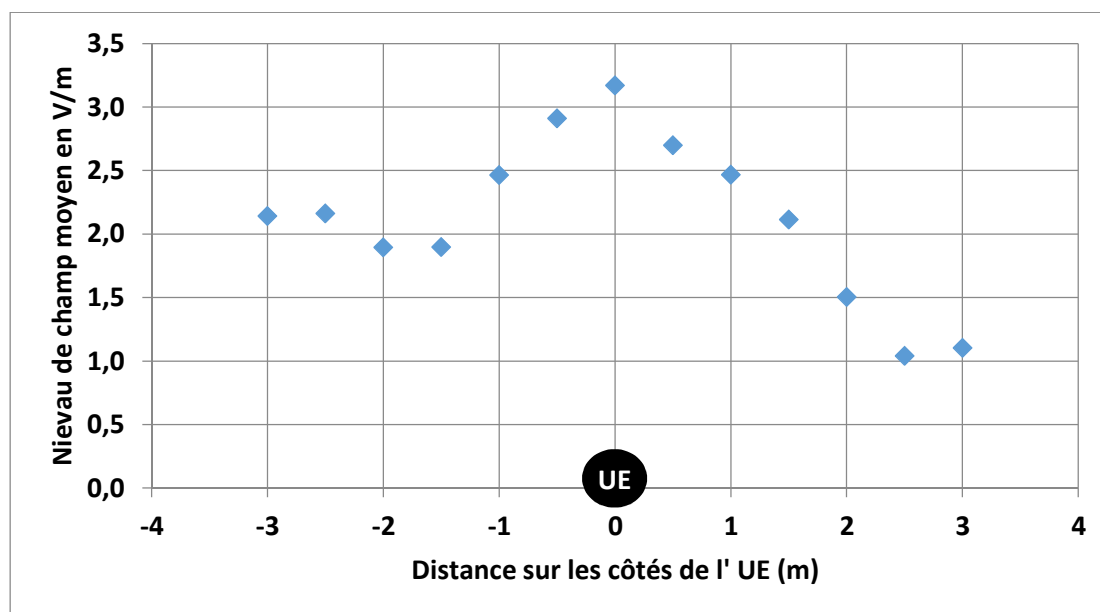


Figure 17 : niveau de champ moyen mesuré sur les côtés de l'UE en fonction de la distance à l'UE avec un trafic continu dans le faisceau n°63

Bien que le faisceau soit plus large que dans les configurations précédentes, le fait d'être plus proche de l'antenne crée de nouveau une exposition très localisée : dans l'axe du faisceau (Figure 16), à quelques mètres devant ou derrière l'UE (à plus ou moins 2 ou 3 m), la contribution de l'émission 5G n'est plus significative. Sur les côtés de l'UE (Figure 17), le niveau de champ décroît également rapidement, à environ 2 m du point d'exposition maximale, les points de mesure ne se trouvent plus dans le faisceau et le niveau de champ redevient comparable au niveau de champ mesuré sans 5G.

5.2. Configuration avec 2 faisceaux

5.2.1. Faisceaux n° 20 et n° 47 sur le site 1

Dans cette configuration, l'antenne sert deux UEs qui sont placés de façon à être servis l'un par le faisceau n° 20 et l'autre par le faisceau n° 47 (cf. Figure 18).

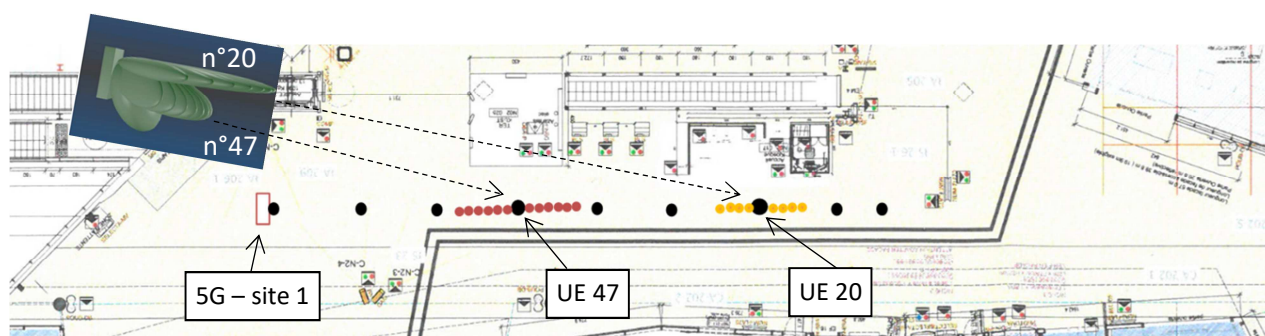


Figure 18 : localisation des points de mesures dans l'axe central du site n°2 lorsque l'antenne sert 2 UEs (points noirs), et lorsque l'antenne sert un seul UE (points supplémentaires en jaune pour le faisceau 20 et points supplémentaires rouges pour le faisceau 47)

Lorsqu'elle doit servir deux UE simultanément, l'antenne doit partager ses ressources entre ces deux terminaux, ce qui a pour conséquence de réduire le niveau de champ électrique mesuré à proximité des UE par rapport à la configuration avec un unique UE. La Figure 19 montre les niveaux de champ électrique mesurés :

- lorsque l'antenne ne sert qu'un seul UE dans le faisceau n° 20 (points jaunes) avec un niveau de champ maximale de 1,7 V/m ;
- lorsque l'antenne ne sert qu'un seul UE dans le faisceau n° 47 (points rouges) avec un niveau de champ maximale de 2,3 V/m ;
- lorsque l'antenne sert les 2 UE simultanément dans les faisceaux n° 20 et 47 (points noirs) avec des niveaux de champs maximum de 1,2 V/m dans le faisceau n° 20 et de 1,5 V/m dans le faisceau n° 47.

L'antenne doit partager ses ressources en deux, ce qui implique que l'exposition exprimée en champ électrique est théoriquement réduite d'un facteur 1,4 (racine carrée de 2) si le partage est égal entre les 2 UE. Les mesures montrent bien une réduction d'un facteur environ 1,4 entre le niveau de champ maximal avec un seul UE et le niveau de champ maximal avec deux UE (cf. Tableau 4).

Tableau 4 : récapitulatif des niveaux de champ électrique maximum mesurés sur le site n°1 avec 1 et 2 UE

Configuration	1 seul UE	2 UEs	Ratio
Niveau de champ à proximité de l'UE 20	1,7 V/m	1,2 V/m	1,4
Niveau de champ à proximité de l'UE 63	2,3 V/m	1,5 V/m	1,5

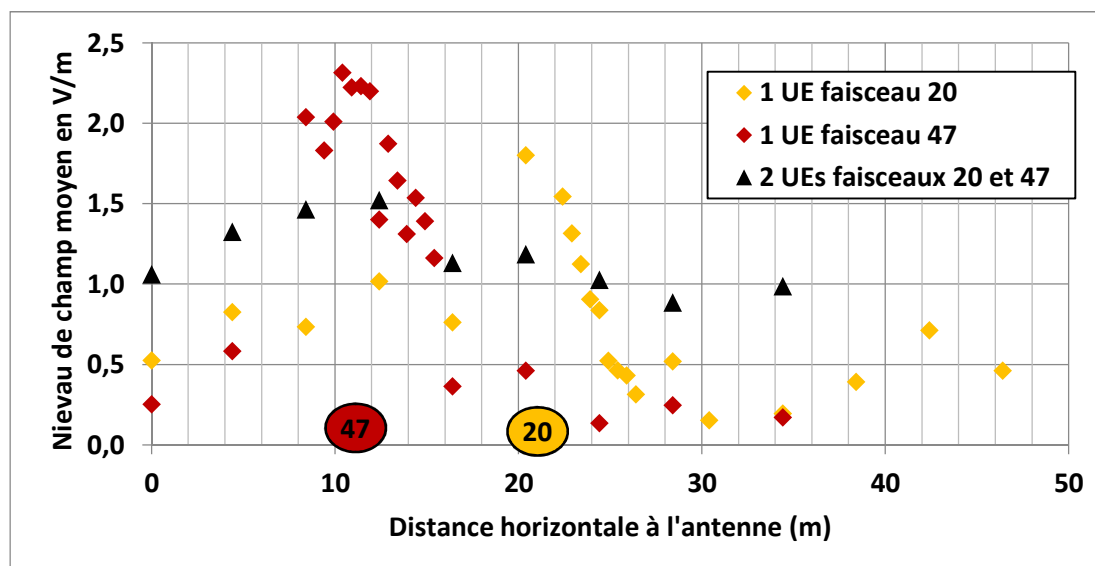


Figure 19 : niveau de champ moyen mesuré en fonction de la distance à l'antenne 5G dans l'azimut central lorsque l'antenne sert soit un unique UE dans le faisceau n° 20 (points jaunes), soit un unique UE dans le faisceau n° 47 (points rouges) soit deux UE dans les faisceaux n°20 et n°47

5.2.1. Faisceaux n° 20 et n° 63 sur le site 2

Dans cette configuration, l'antenne sert deux UEs qui sont placés de façon à être servis l'un par le faisceau n° 20 et l'autre par le faisceau n° 63 (cf. Figure 20).

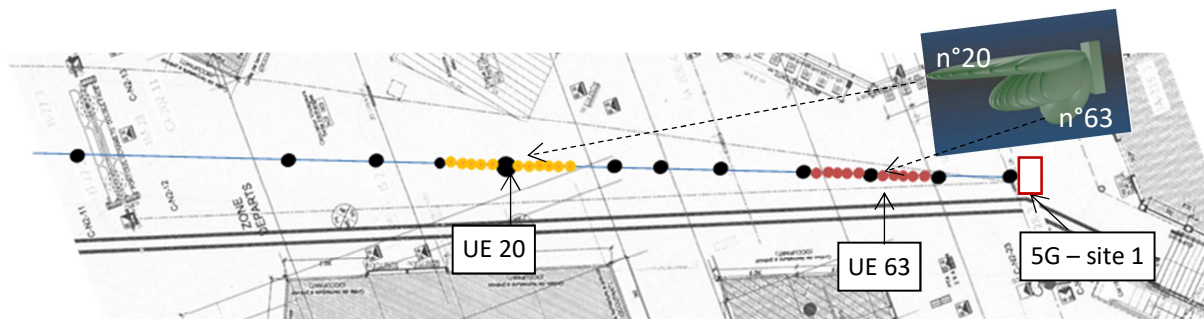


Figure 20: localisation des points de mesures dans l'axe central du site n°2 lorsque l'antenne sert 2 UEs (points noirs), et lorsque l'antenne sert un seul UE (points supplémentaires en jaune pour le faisceau 20 et points supplémentaires rouges pour le faisceau 63)

Comme précédemment, l'antenne doit partager ses ressources pour servir les deux UEs.

La Figure 21 montre les niveaux de champ électrique mesurés :

- lorsque l'antenne ne sert qu'un seul UE dans le faisceau n° 20 (points jaunes) avec un niveau de champ maximal de 1,6 V/m ;
- lorsque l'antenne ne sert qu'un seul UE dans le faisceau n° 63 (points rouges) avec un niveau de champ maximale de 3,2 V/m
- lorsque l'antenne sert les 2 UEs simultanément dans les faisceaux n° 20 et 63 (points noirs) avec des niveaux de champs maximum de 0,9 V/m dans le faisceau n° 20 et de 2 V/m dans le faisceau n° 63.

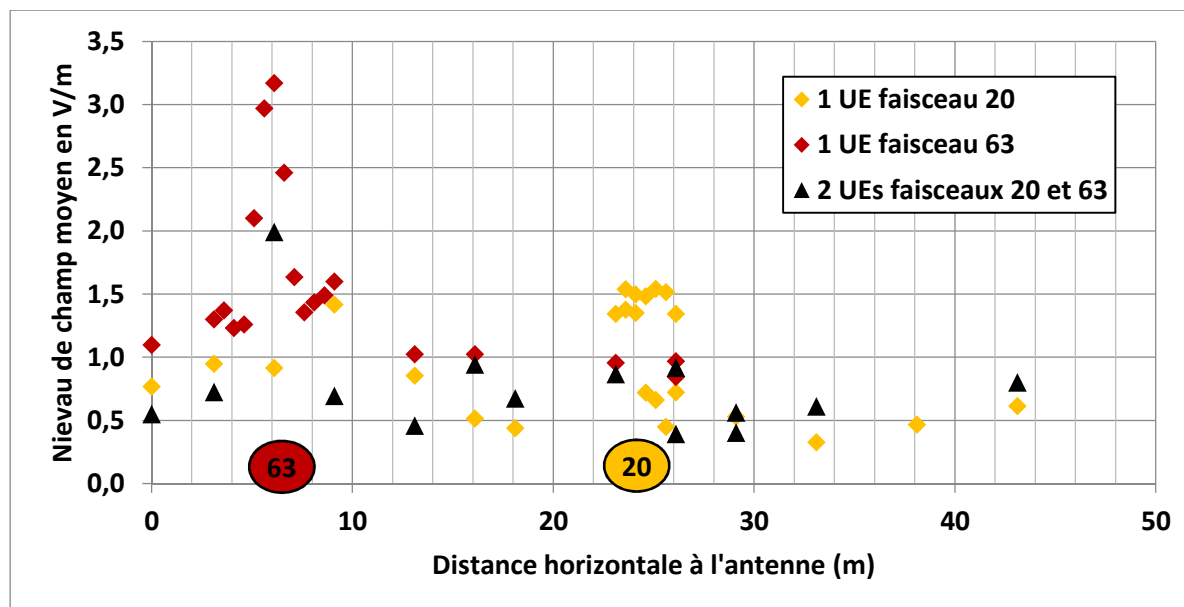


Figure 21 : niveau de champ moyen mesuré en fonction de la distance à l'antenne 5G dans l'azimut central lorsque l'antenne sert soit un unique UE dans le faisceau n° 20 (points jaunes), soit un unique UE dans le faisceau n° 63 (points rouges) soit deux UE dans les faisceaux n°20 et n°63

Le Tableau 6 montre que la réduction du niveau de champ électrique mesuré à proximité des UE est légèrement plus importante qu'attendue (ratios observés de 1,6 et 1,7 alors que le ratio attendu est de 1,4).

Tableau 5 : récapitulatif des niveaux de champ électrique maximum mesurés sur le site n°1 avec 1 et 2 UEs

Configuration	1 seul UE	2 UEs	Ratio
Niveau de champ à proximité de l'UE 20	1,5 V/m	0,9 V/m*	1,7
Niveau de champ à proximité de l'UE 63	3,2 V/m	2 V/m	1,6

* : niveau inférieur à la sensibilité de la sonde (1 V/m)

6. Résultats de mesures 5G lors d'un téléchargement de données

Dans le chapitre précédent, des configurations de trafic continu étaient créées afin de caractériser les niveaux d'exposition autour d'UEs dans des conditions stables et répétables. Ces conditions ne sont cependant pas représentatives des niveaux d'exposition générés dans des conditions réelles de fonctionnement du réseau.

Afin d'illustrer le niveau de champ électrique moyenné sur 6 mn dans une configuration d'usage plus réaliste, des mesures ont été réalisées lors d'un téléchargement d'un fichier de 1 Go. Le téléchargement est très rapide et dure beaucoup moins de 6 mn, mais le niveau de champ électrique est mesuré sur 6 mn conformément à la réglementation en matière d'exposition du public aux ondes radiofréquences.

Le Tableau 6 récapitule les niveaux de champs large bande mesurés à proximité des UEs dans différentes configuration de trafic (sans trafic, avec un téléchargement de 1 Go et avec un trafic continu) et pour différentes positions de l'UE (dans les faisceaux n° 20, 47 et 63).

Tableau 6 : récapitulatif des niveaux de champ mesurés à proximité des UEs dans différentes configuration de trafic et pour différentes positions de l'UE

Configuration	Sans trafic	Téléchargement 1Go	Trafic continu
Site 1 – faisceau 47	0,4 V/m*	0,9 V/m*	2,3 V/m
Site 2 – faisceau 20	0,4 V/m*	0,7 V/m*	1,6 V/m
Site 2 – faisceau 63	0,9 V/m*	0,9 V/m*	3,2 V/m

* : niveau inférieur à la sensibilité de la sonde (1 V/m)

Comme attendu, les niveaux de champs mesurés dans le cas des téléchargements de 1 Go apparaissent fortement réduits par rapport à la configuration de trafic continu. Inférieurs à la sensibilité de la sonde utilisée, ils reflètent en grande partie dans notre cas l'exposition créée par d'autres sources d'émission.

7. Résultats de simulations numériques

7.1. Outil de simulation

En complément des résultats de mesures effectuées en gare de Rennes, des résultats de simulation numériques ont été réalisés en collaboration avec Nokia. L'outil de simulation utilisé est le logiciel EMF-Visual V4-2002.2 (*Microwave Vision Group*) qui permet de modéliser finement la propagation des ondes dans un environnement complexe.

Les lieux de mesures ont été choisis en vue directe de l'antenne dans de larges espaces. Il a donc été choisi de réaliser les simulations sans tenir compte des interactions avec l'environnement (dont les réflexions sur le sol ou les obstacles). Ces conditions d'espace libre permettent d'avoir une meilleure vue des différents faisceaux de l'antenne et sont dans la plupart des cas conservatrices.

La Figure 22 illustre les résultats de simulation pour tous les faisceaux des deux sites de la gare de Rennes. Les faisceaux qui ont été sollicités lors des mesures ont été indiqués.

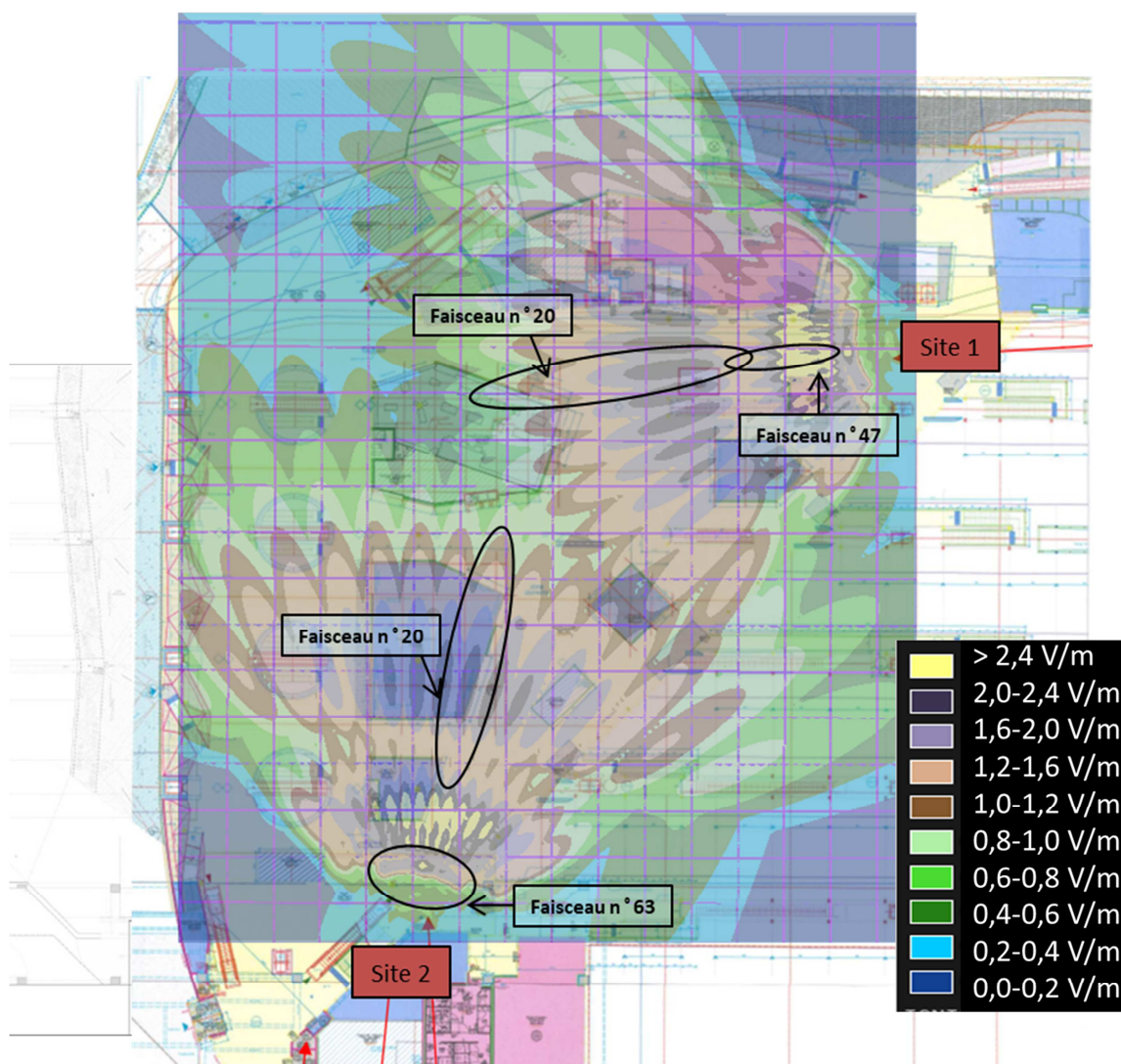


Figure 22 : niveaux de champ simulés par EMF-Visual pour tous les faisceaux des deux sites de la gare de Rennes-source Nokia

Les niveaux de champ simulés les plus forts apparaissent pour le faisceau n° 63, qui est celui qui émet le plus vers le bas de l'antenne, et pour les faisceaux du deuxième niveau émettant avec une inclinaison de 12° supplémentaire par rapport à l'inclinaison mécanique de l'antenne (comme le faisceau n° 47 par exemple).

7.2. Comparaison mesures et simulation

7.2.1. Emission dans le faisceau n° 20

La Figure 23 est le résultat de la simulation en conditions d'espace libre lorsque seul le faisceau n° 20 émet en continu. Le maillage est de 2 m par 5 m. Le niveau de champ électrique maximal simulé ne dépasse pas 2,4 V/m et les premiers lobes secondaires ne dépassent pas 0,6 V/m.

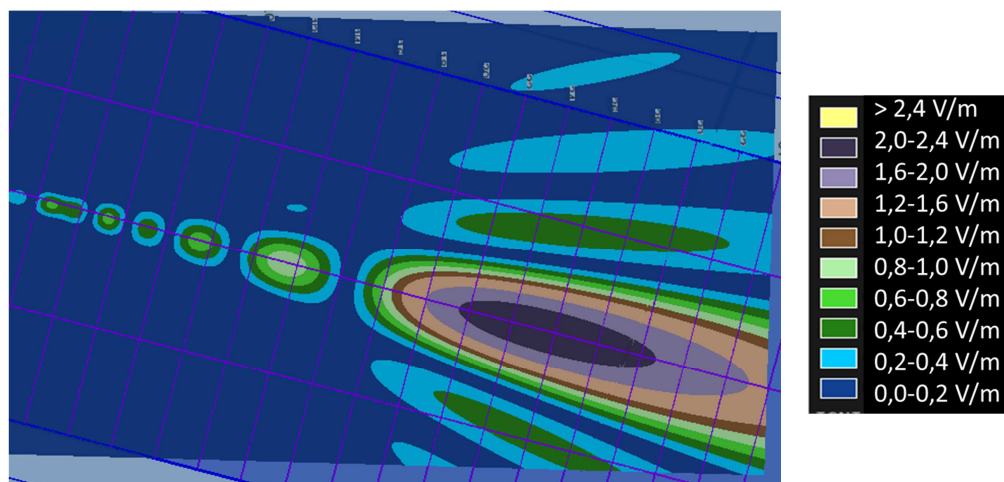


Figure 23 : résultat de simulation EMF-Visula à 1m50 du sol pour un trafic continu dans le faisceau n°20 sans tenir compte des interactions avec l'environnement (conditions d'espace libre). Pas du maillage 2m par 5m. Source : Nokia.

Ces résultats de simulations sont tout à fait cohérents avec les résultats de mesure comme illustré sur la Figure 24 dans le cas du site n° 1.

La simulation surestime les résultats de mesure mais la tendance est bonne.

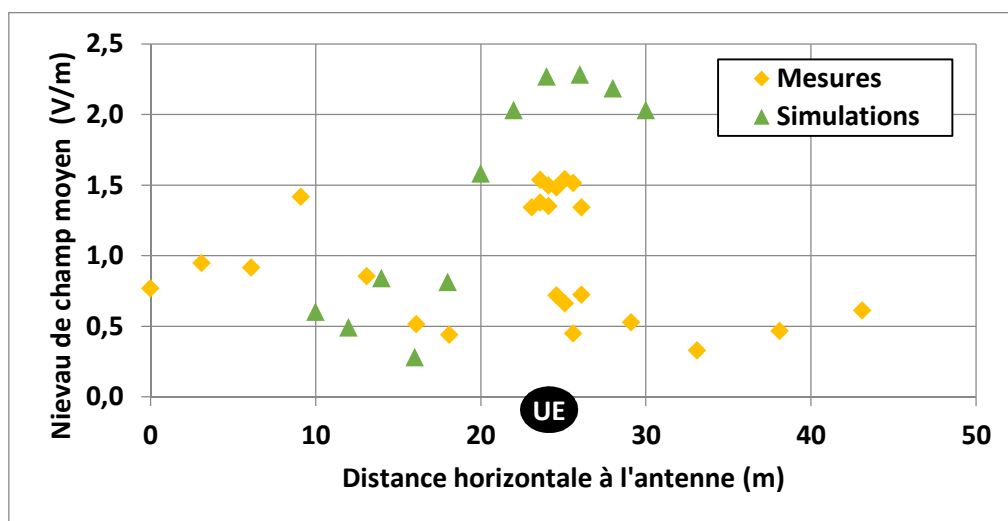


Figure 24 : niveaux de champ moyen en fonction de la distance à l'antenne 5G lorsqu'elle émet en continu dans le faisceau n°20 soit mesurés sur le site n°2 (en jaune) soit simulés (en vert). Source simulation : Nokia.

7.2.2. Emission dans le faisceau n° 47

La Figure 25 présente le résultat de la simulation en conditions d'espace libre lorsque seul le faisceau n° 47 émet en continu. Le maillage est de 2 m par 5 m. Le niveau de champ électrique maximal simulé est de 3,2 V/m et les premiers lobes secondaires ne dépassent pas 0,8 V/m.

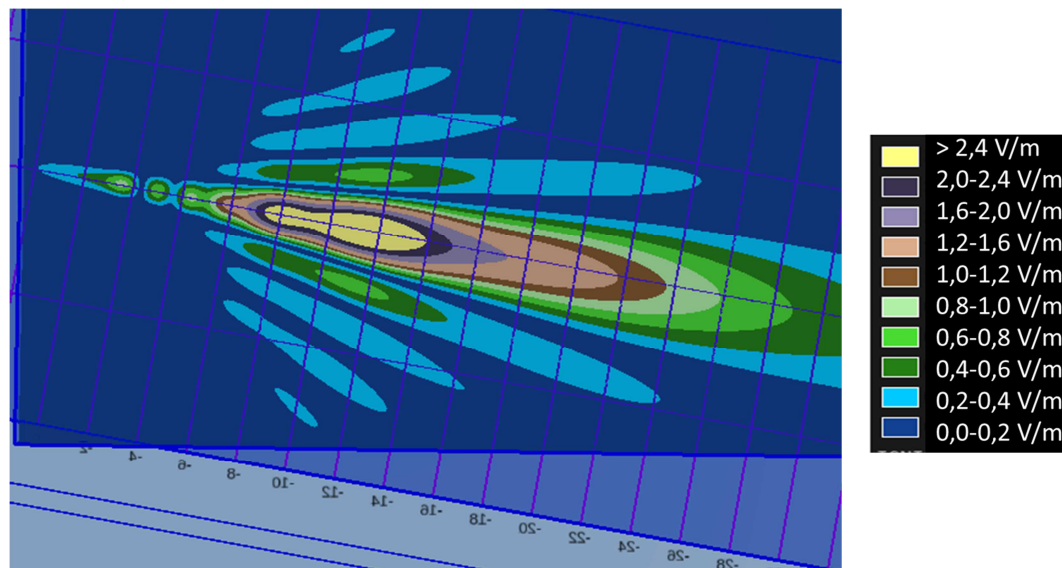


Figure 25 : résultat de simulation EMF-Visula à 1m50 du sol pour un trafic continu dans le faisceau n°47 sans tenir compte des interactions avec l'environnement (conditions d'espace libre). Pas du maillage 2m par 5m. Source : Nokia.

Ces résultats de simulations sont tout à fait cohérents avec les résultats de mesure comme illustré sur la Figure 26 dans le cas du site n° 1.

La simulation surestime de nouveau les résultats de mesure, mais la tendance reste très bonne.

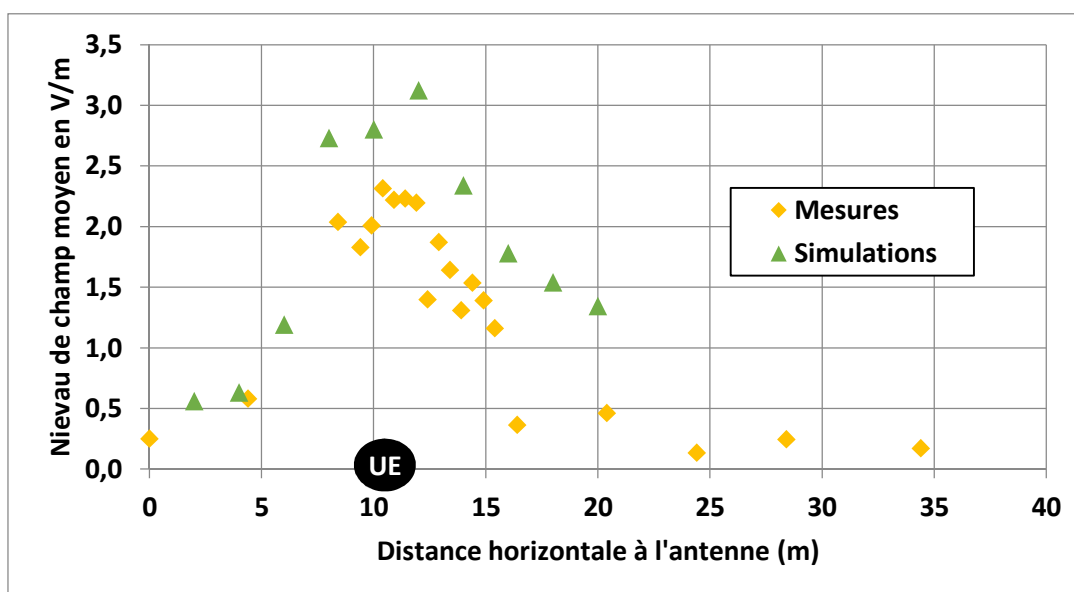


Figure 26 : niveaux de champ moyen en fonction de la distance à l'antenne 5G lorsqu'elle émet en continu dans le faisceau n°47 soit mesurés sur le site n°1(en jaune) soit simulés (en vert). Source simulation : Nokia.

7.2.3. Emission dans le faisceau n° 63

La Figure 27 est le résultat de la simulation en conditions d'espace libre lorsque seul le faisceau n° 63 émet en continu. Le maillage est de 2 m par 5 m. La simulation montre bien que ce faisceau est plus large que les autres. Le niveau de champ électrique simulé dans le faisceau est de 2,6 V/m et les premiers lobes secondaires ne dépassent pas 1 V/m.

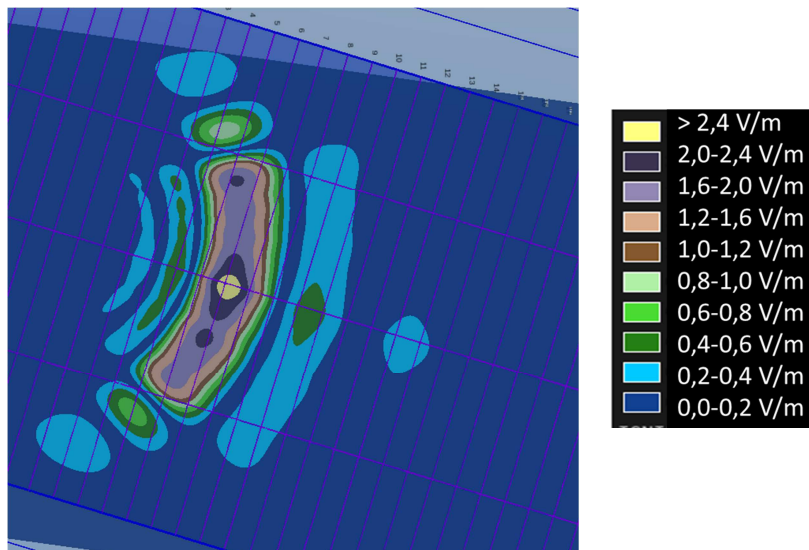


Figure 27 : résultat de simulation EMF-Visula à 1m50 du sol pour un trafic continu dans le faisceau n°63 sans tenir compte des interactions avec l'environnement (conditions d'espace libre). Pas du maillage 2m par 5m. Source : Nokia.

Ces résultats de simulations sont tout à fait cohérents avec les résultats de mesure comme illustré sur la Figure 28 dans le cas du site n° 1.

Dans ce cas particulier, la simulation sous-estime les résultats de mesure mais la tendance reste très bonne. Il convient de rappeler que la mesure se fait sur une large bande entre 20 MHz et 40 GHz. Or, dans la zone correspondant au faisceau n° 63, des niveaux de champs plus forts ont été relevés même en l'absence d'émission 5G dans cette direction, ce qui pourrait expliquer que dans ce cas, les valeurs mesurées large bande soient plus fortes que les valeurs simulées pour la 5G.

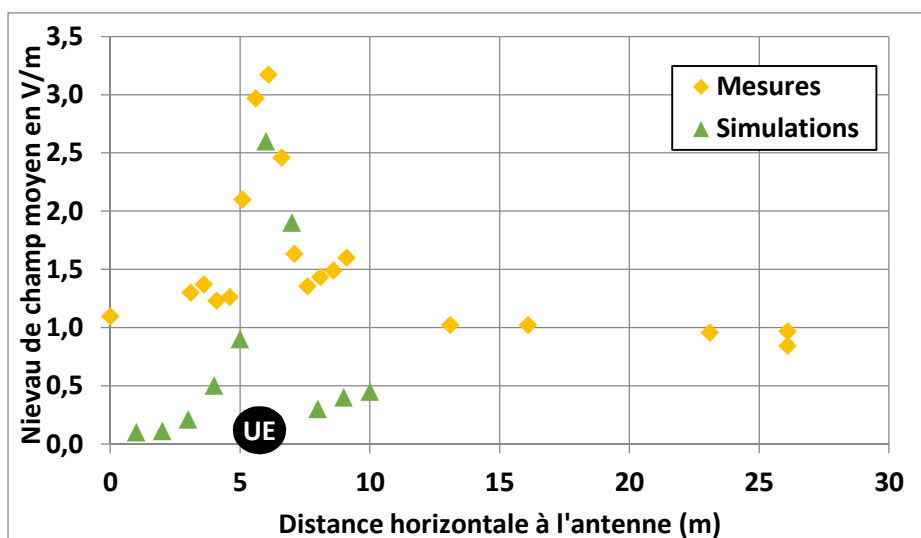


Figure 28: niveaux de champ moyen en fonction de la distance à l'antenne 5G lorsqu'elle émet en continu dans le faisceau n°63 soit mesurés sur le site n°2 (en jaune) soit simulés (en vert). Source simulation : Nokia.

8. Conclusions

Les mesures réalisées dans la gare de Rennes ont permis d'observer les premiers signaux 5G NR FR2. Comme en 5G FR1, l'exposition aux ondes dépend fortement :

- 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.

Ces premières mesures ont permis de montrer que le nombre de faisceaux pilotés par l'antenne est plus grand en 5G FR2 qu'en 5G FR1 et que l'exposition générée par ces faisceaux est localisée.

Le niveau de champ maximum mesuré est de 3,2 V/m dans les conditions très particulières avec une émission continue de l'antenne dans un faisceau. Selon les faisceaux sollicités, les niveaux de champ maximum dans ces conditions de trafic continu varient entre 1,6 V/m et 3,2 V/m. Ces niveaux mesurés sont bien dessous de la valeur limite réglementaire qui est de 61 V/m dans cette bande de fréquences.

Dès qu'on s'éloigne de quelques mètres du cœur du faisceau, la contribution de la 5G devient négligeable.

Dans une configuration plus réaliste d'un téléchargement de fichier de 1 Go, retenue à titre d'exemple, les niveaux de champs maximum restent en dessous de 1 V/m et reflètent en grande partie l'exposition créée par les autres sources d'émission.

Dès qu'un deuxième utilisateur est servi par l'antenne, celle-ci doit partager ses ressources et le niveau d'exposition se trouve réduit d'un facteur 1,4 dans le cas de 2 utilisateurs servis par 2 faisceaux différents.

Les résultats de simulation numériques fournis par Nokia montrent que ces simulations permettent de mieux visualiser le rayonnement des différents faisceaux et de bien appréhender le comportement du niveau de champ dans les différentes configurations. A l'exception d'un cas particulier, les résultats de simulation numérique surestiment les résultats de mesures, mais elles permettent néanmoins de confirmer les analyses.

Ces premières mesures ont été réalisées dans des conditions qui demeurent 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.