RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

ANFR
AGENCE NATIONALE DES FRÉQUENCES

Etude de la contribution de la 5G à l'exposition du public aux ondes électromagnétiques

Rapport préliminaire (octobre 2020 à octobre 2021)

Décembre 2021

Sommaire

1. OBJECTIF 3

2. REGLEMENTATION 4

3. METHODE 4

3.1. Lieux de mesures 4

3.2. Répartition des sites 6

3.2.1. Répartition des sites 5G par type d'environnement 6

3.2.2. Répartition des sites 5G par opérateur 7

3.3. Protocole de mesures 7

4. ANALYSE DES NIVEAUX D'EXPOSITION SUR LES SITES 5G 700 MHZ AVANT ET APRES L'ACTIVATION DE LA 5G 8

4.1. Analyse de la contribution de la seule bande 700 MHz 8

4.2. Analyse des niveaux d'exposition globale 10

5. ANALYSE DES NIVEAUX D'EXPOSITION SUR LES SITES 5G 2 100 MHZ AVANT ET APRES L'ACTIVATION DE LA 5G 12

5.1. Analyse des niveaux de la contribution de la seule bande 2 100 MHz 12

5.2. Analyse des niveaux d'exposition globale 14

6. ANALYSE DES NIVEAUX D'EXPOSITION SUR LES SITES 5G 3500 MHZ AVANT ET APRES L'ACTIVATION DE LA 5G 16

6.1. Analyse des niveaux de la contribution de la seule bande 3 500 MHz 17

6.2. Analyse des niveaux d'exposition globale 19

6.3. Mesures spécifiques 5G avec téléchargement de données 21

7. CONCLUSION 24

1. Objectif

Ce rapport s'inscrit dans le cadre d'un vaste programme de mesures pour l'évaluation de l'exposition du public aux ondes électromagnétiques, dévoilé le 12 octobre 2020 par Cédric O, secrétaire d'Etat chargé de la Transition numérique et des Communications électroniques, dans la perspective du lancement de la nouvelle technologie mobile 5G.

La 5G se déploie aujourd'hui en France sur plusieurs bandes de fréquences :

- les "bandes basses" déjà utilisées pour les réseaux de téléphonie mobile de génération antérieure et qui peuvent également recevoir la 5G compte tenu du principe de neutralité technologique. Les opérateurs français ont déployé la 5G en 700 MHz et 2 100 MHz, bandes déjà exploitées depuis de nombreuses années en 3G et 4G ;
- la nouvelle bande 3 500 MHz dont l'usage a été autorisée par l'Arcep en novembre 2020. Cette bande se démarque par une largeur plus importante que les bandes basses, permettant des débits accrus.

Ce programme a débuté en octobre 2020 : il porte sur environ 4 800 mesures, sur près de 1 650 sites 5G répartis sur le territoire français, et est structuré en deux campagnes :

- La première campagne concerne près de 150 sites en bandes basses pour lesquels le déploiement de la 5G a été plus rapide puisqu'il n'a pas nécessité d'installation de nouvelles antennes. Une mesure initiale a été réalisée entre octobre et décembre 2020, soit avant l'arrivée de la 5G sur ces sites, suivie par une mesure après sa mise en service. Une quarantaine de sites ont fait l'objet de mesures initiales mais ne sont toujours pas opérationnels en 5G.
- La deuxième campagne concerne 1 500 sites, dont 140 hébergeant la 5G en bandes basses et 1 360 en bande 3 500 MHz. Cette campagne comporte trois phases : la première, avant l'activation de la 5G sur les bandes concernées, s'est déroulée entre janvier et mai 2021 ; la deuxième a été initiée après la mise en service de la 5G et s'est déroulée entre mai 2021 et septembre 2021 ; enfin, la troisième phase a débuté en septembre 2021 et se poursuivra jusqu'à la fin de l'année 2021. L'objectif est de suivre l'évolution de l'exposition en fonction du déploiement de la 5G et de l'accroissement du trafic qui en découle.

Ce rapport préliminaire présente les résultats des deux campagnes et sera complété dès l'achèvement des mesures actuellement en cours. Les mesures analysées dans ce rapport sont les suivantes :

- première campagne de 2020 : 210 mesures retenues sur les 298 initialement lancées, dans l'attente des sites non encore opérationnels en 5G ;
- deuxième campagne de 2021 : 3 000 mesures appelées à être complétées par 1 500 mesures d'ici fin 2021.

Les mesures ont toutes été réalisées selon de le protocole de l'ANFR. En complément, des mesures spécifiques ont été effectuées sur de 370 sites en téléchargeant un fichier de 1 Go sur la bande 3 500 MHz. Ce mode opératoire produit un trafic supplémentaire correspondant à l'indicateur

d'exposition proposé par l'ANFR pour les émetteurs de téléphonie mobile pour des antennes à faisceaux orientables[1] et permet d'estimer le niveau d'exposition local qui serait statistiquement atteint à terme en 5G.

2. Réglementation

En France, le décret n° 2002-775 du 3 mai 2002 fixe les valeurs limites d'exposition du public aux champs électromagnétiques. Il reprend les valeurs de la recommandation européenne 1999/519/CE du Conseil du 12 juillet 1999. Ces valeurs limites sont comprises entre 28 V/m et 87 V/m selon les fréquences (*cf*. Figure 1).

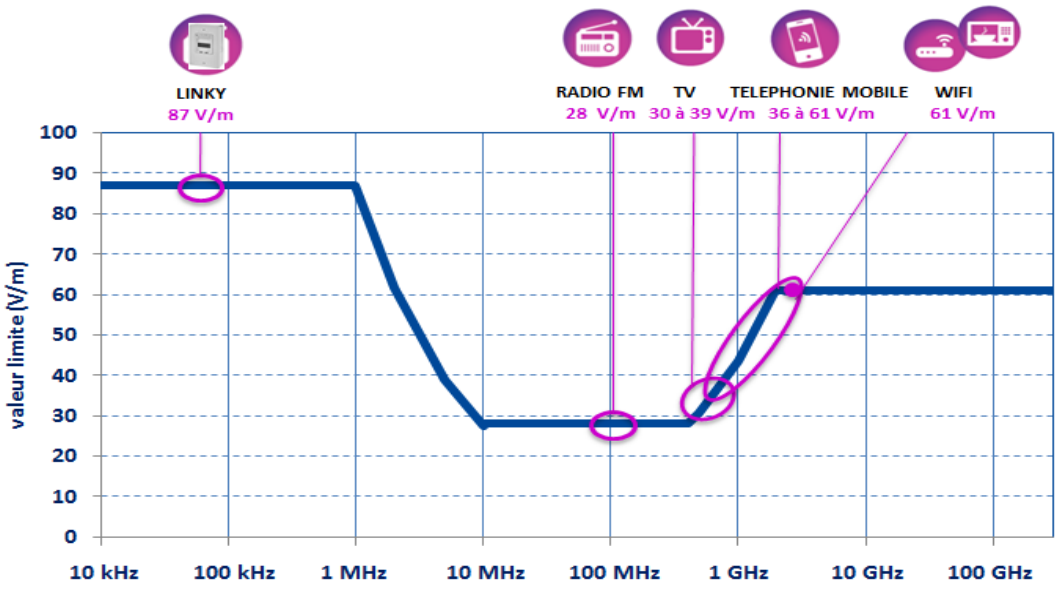

Figure 1. Valeurs limites réglementaires pour le public fixées en France par le décret du 3 mai 2002 n° 2002-775

FM : Radiodiffusion sonore analogique bande 87,5 - 108 MHz ;
TNT : Télévision Numérique Terrestre bande 470 - 694 MHz ;
Téléphonie mobile et haut débit mobile : 700 MHz (4G et 5G), 800 MHz (4G et 5G), 900 MHz (2G, 3G et 4G), 1 800 MHz (2G et 4G), 2 100 MHz (3G, 4G et 5G), 2 600 MHz (4G) et 3 500 MHz (5G).

3. Méthode

3.1. Lieux de mesures

Les sites ont été sélectionnés à partir des demandes d'autorisation COMSIS[2] (comité de concertation des sites et servitudes) déposées par les opérateurs de téléphonie mobile. La déclaration de mise en service par l'opérateur a ensuite permis à l'Agence de planifier les mesures en 5G sur ces mêmes sites.

[1] https://www.anfr.fr/fileadmin/mediatheque/documents/5G/consultation/consultation-5G-Lignes-directrices-nationales.pdf
[2] https://www.anfr.fr/gestion-des-frequences-sites/sites-servitudes-et-assignations/sites/declarer-une-station-procedure-classique/

La répartition sur le territoire national des sites 5G en bandes basses sélectionnés dans le cadre de ce programme est illustrée par la Figure 3.

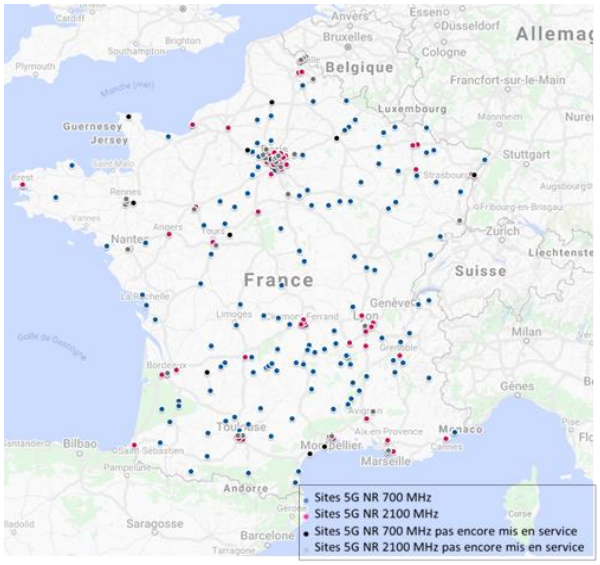

Figure 2. Points de mesure des sites 5G en bandes basses

Lors de la deuxième phase de 2021, 955 sites (25 en bande 700 MHz, 323 en bande 2 100 MHz et 607 sites en bande 3 500 MHz) ont fait l'objet de mesures initiales mais n'étaient pas encore opérationnels pour la 5G lorsque cette étape a pris fin. Ces 955 sites ont été remplacés par d'autres sites 5G en bande 3 500 MHz techniquement opérationnels à cette période. Leur niveau d'exposition avant la mise en service de la 5G a alors été déduit par calcul, en soustrayant la contribution de la bande 3 500 MHz.

La Figure 3 illustre la répartition des sites sélectionnés en bande 3 500 MHz, les points rouges désignant les 955 sites initialement choisis mais non opérationnels en 5G en fin de deuxième phase et qui ont donc été remplacés par les sites en bande 3 500 MHz représentés par des points bleus. Les points verts sont quant à eux les sites 5G en bande 3 500 MHz ayant fait l'objet d'une mesure initiale et qui étaient opérationnels pendant la deuxième phase de la campagne.

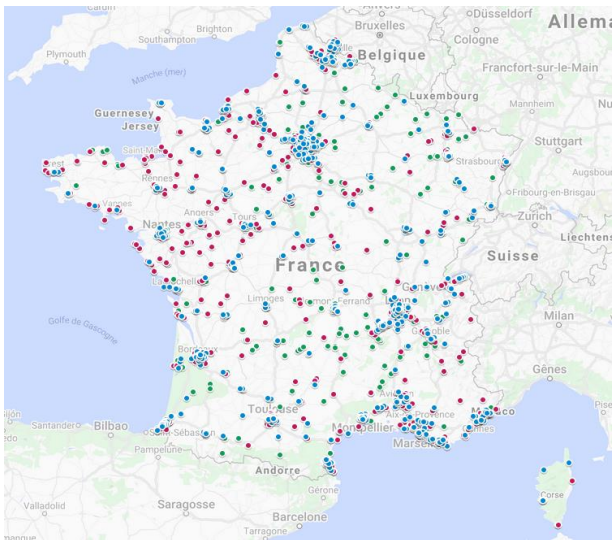

Figure 3. Points de mesure des sites 5G en France Métropolitaine

3.2. Répartition des sites

3.2.1. Répartition des sites 5G par type d'environnement

Parmi les sites sélectionnés[3] dans le cadre de ce programme (1 649 sites) en fonction du type d'environnement, 85 % des sites sont implantés en milieu urbain et 15 % en zone rurale. Cette répartition est proche de la part de la population urbaine par rapport à la population totale en France (80 % en zone urbaine)[4]. La figure 4 donne le détail de cette répartition en fonction des bandes de fréquences.

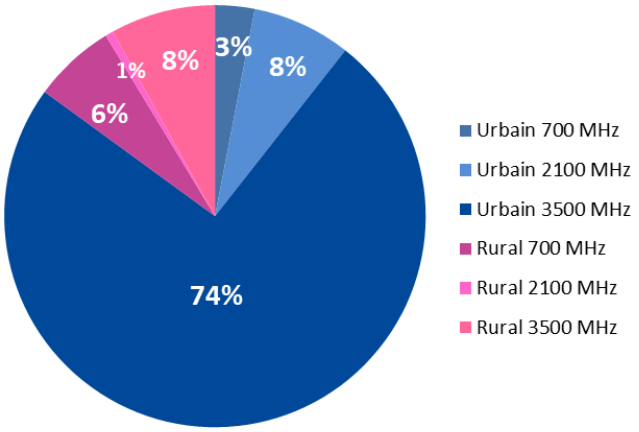

Figure 4. Répartition des sites par fréquences et types d'environnement

La Figure 5 reprend cette répartition, par bande de fréquence :

- Sur 154 sites 5G 700 MHz, 50 sont implantés dans des milieux urbains (32 %) et 104 dans des milieux ruraux (68 %).
- Sur 135 sites 5G 2 100 MHz, 125 se trouvent dans des milieux urbains (93 %) et 10 dans des milieux ruraux (7 %).
- Sur 1 360 sites 5G 3 500 MHz, 1 227 se situent dans des milieux urbains (90 %) et 133 dans des milieux ruraux (10 %).

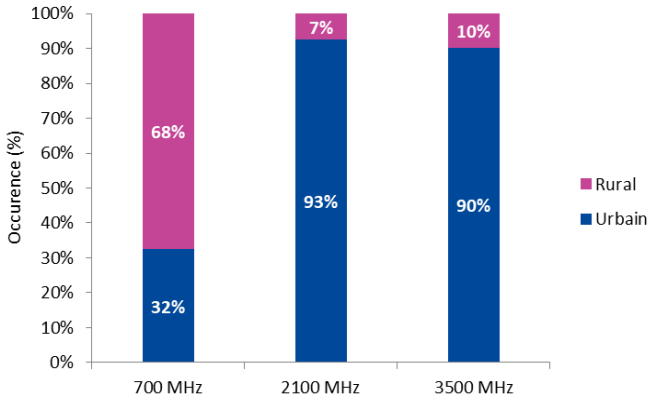

Figure 5. Répartition des sites en fonction de la technologie et du type d'environnement

[3] Seuls les points sélectionnés qui ont fait l'objet d'une mesure après sont pris en compte dans cette répartition
[4] https://www.insee.fr/fr/statistiques/4806684

3.2.2. Répartition des sites 5G par opérateur

La Figure 6 donne la répartition des sites 5G par bande et par opérateur. Les 1 649 sites 5G toutes bandes confondues ont été répartis entre chaque opérateur en tenant compte des stratégies initiales de déploiement des opérateurs, à savoir :

- 154 sites en bande 700 MHz de Free Mobile ;
- 135 sites en bande 2 100 MHz dont, par ordre décroissant en nombre de sites, 60 de SFR, 48 de Bouygues Telecom et 27 d'Orange ;
- 1 360 sites en bande 3 500 MHz, dont 368 de Bouygues Telecom, 360 sites d'Orange, 348 de SFR et 284 de Free Mobile.

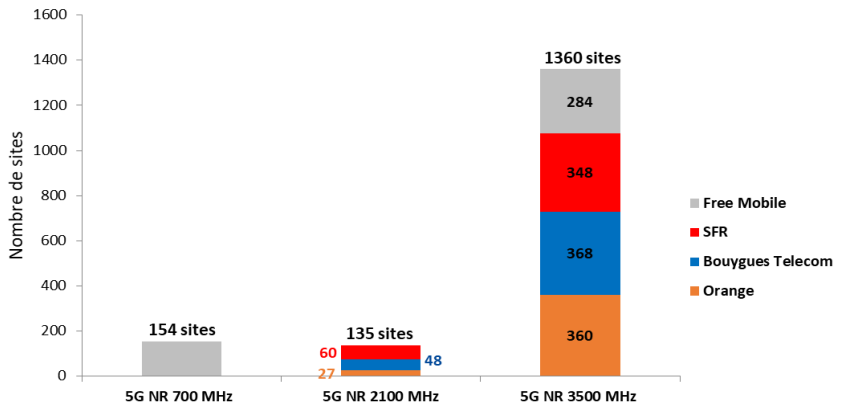

Figure 6. Répartition des sites par bande de fréquences et par opérateur

3.3. Protocole de mesures

Le protocole de mesures ANFR version 4 en vigueur[5] a été utilisé. Une mesure globale de l'exposition est effectuée à la sonde large bande (cas A). Une mesure détaillée (cas B) peut ensuite être réalisée afin de préciser l'exposition pour chaque bande de fréquences et pour chaque exploitant. Dans le cadre de cette campagne, le cas B n'a pas été systématiquement réalisé sur chaque point de mesure. Lors de la deuxième phase de mesures en 2021, il n'a été effectué, en majeure partie, que pour les points dont le niveau global initial était supérieur ou égal à 2 V/m.

Le cas A tient compte de toutes les sources et fréquences radioélectriques significatives. Il repose sur l'utilisation d'une sonde large bande couvrant la bande 100 kHz – 6 GHz. Cette sonde a une sensibilité de 0,38 V/m. Quant au cas B, il suppose l'utilisation d'un analyseur de spectre et fournit une mesure détaillée de chaque contribution à l'exposition dans cette même gamme de fréquences. L'analyseur de spectre a une sensibilité de 0,05 V/m, fonction des bandes de fréquences. Il faut par ailleurs rappeler que, selon le protocle de l'ANFR, les émissions ne sont considérées comme significatives que si leur niveau est d'au moins 0,3 V/m.

Toutes les mesures ont été réalisées en extérieur et en journée. Sur un site donné, une variation de l'exposition peut être observée entre deux mesures, et peut s'expliquer par une différence de trafic au moment des mesures.

[5] https://www.anfr.fr/fileadmin/mediatheque/documents/expace/2017-08-28__Protocole_de_mesure_V4.pdf

La bande de fréquence dite 3 500 MHz réservée à la téléphonie mobile (3 490 – 3 800 MHz) n'étant utilisée que pour la 5G et, le trafic 5G demeurant encore faible, des mesures complémentaires (hors protocole) ont été demandées au laboratoire. Elles ont été réalisées en générant artificiellement du trafic 5G à l'aide d'un téléchargement de fichier de 1 Go.

Afin de faciliter la lecture de ce document, une mesure réalisée avant la mise en service de la 5G sera notée mesure « avant », et celle réalisée après la mise en service de la 5G sera notée mesure « après ». Un couple de mesure avant et après l'activation de la 5G sera ainsi noté « avant/après ».

4. Analyse des niveaux d'exposition sur les sites 5G 700 MHz avant et après l'activation de la 5G

Pour étudier l'exposition créée par l'activation de la 5G sur les sites 700 MHz, 154 sites ont été identifiés dans le cadre ce programme, dont 11 n'ont pu faire l'objet de mesures « après » pour cause de non activation de la 5G pendant la campagne de mesures. Ce rapport traite donc des 143 sites pour lesquels on dispose de mesures avant et après activation de la 5G. Sur ces 143 sites, 61 % ont fait l'objet de mesures détaillées « avant/après », soit 87 sites.

Avant d'analyser l'influence de l'activation de la 5G sur l'exposition globale, il semble pertinent d'exploiter en premier lieu les mesures détaillées en fréquence pour isoler la contribution du service de téléphonie mobile sur la bande 700 MHz avant et après l'activation de la 5G. C'est une possibilité offerte par les 87 mesures "cas B" « avant/après » réalisées en bande 700 MHz.

4.1. Analyse de la contribution de la seule bande 700 MHz

La Figure 7 isole la contribution de la bande 700 MHz avant et après la mise en service de la 5G pour 87 sites. Les histogrammes représentent la distribution des valeurs mesurées avant/après par tranche de 1 V/m. Il en ressort que l'activation de la 5G dans la bande 700 MHz n'a pas modifié la distribution des niveaux dans cette bande et que 99 % des mesures (avant comme après) se sont révélées inférieures à 2 V/m.

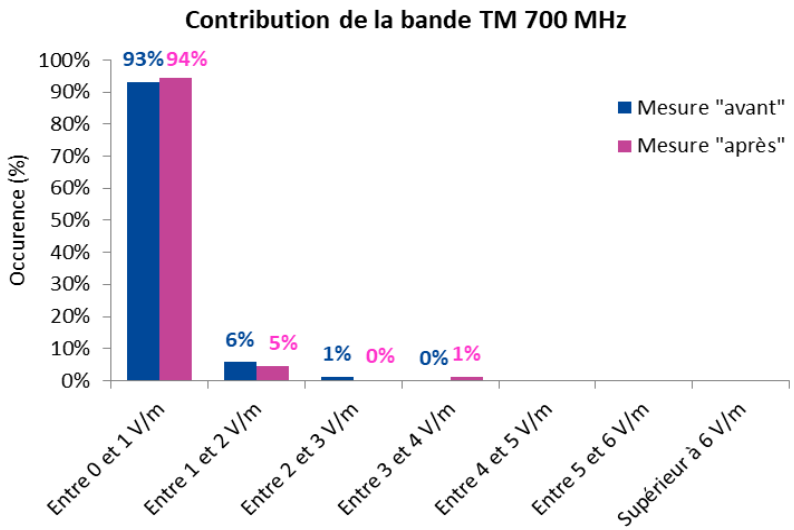

Figure 7. Distribution des niveaux d'exposition sur la bande 700 MHz avant et après l'activation de la 5G sur 87 sites

Sur les 87 points mesurés, un point se trouvant dans la tranche « entre 0 et 1 V/ m » avant l'activation de la 5G paraît plus exposé dans la mesure « après » et passe vers la tranche « entre 1 et 2 V/m ». La contribution sur ce point était de 0,93 V/m « avant » et devient 1,24 V/m « après ».

Un autre point qui se trouvait initialement dans la tranche « entre 2 et 3 V/m » se trouve dans la tranche « entre 3 et 4 V/m » : il passe ainsi de 2,09 V/m à 3,14 V/m.

En revanche, un point paraît moins exposé et passe de la tranche « entre 1 et 2 V/m » à « entre 0 et 1 V/m » (de 1,13 V/m à 0,97 V/m).

Le Tableau 1 récapitule les statistiques des niveaux de champs mesurés dans la bande 700 MHz. La moyenne, la médiane et l'écart-type restent équivalents avant et après l'activation de la 5G.

	Nombre de mesures	Moyenne (V/m)	Médiane (V/m)	Écart-type	Max (V/m)
Contribution de la bande 700 MHz « avant »	87	0,30	0,16	0,41	2,09
Contribution de la bande 700 MHz « après »	87	0,31	0,19	0,43	3,14
Variation « avant/après » (V/m)		0,01	0,03	0,02	1,05

Tableau 1. Comparaison des statistiques des niveaux de champs mesurés sur la bande 700 MHz avant et après activation de la 5G sur 87 sites

Afin d'analyser plus précisément la répartition des niveaux de champs dus à la bande 700 MHz, il est proposé d'étudier la variation locale, c'est-à-dire, pour un même site, l'écart calculé par couple de points mesurés « avant/après ». Les histogrammes présentés dans la Figure 8 montrent la répartition des écarts entre la mesure « avant » et la mesure « après » par intervalle de 0,2 V/m.

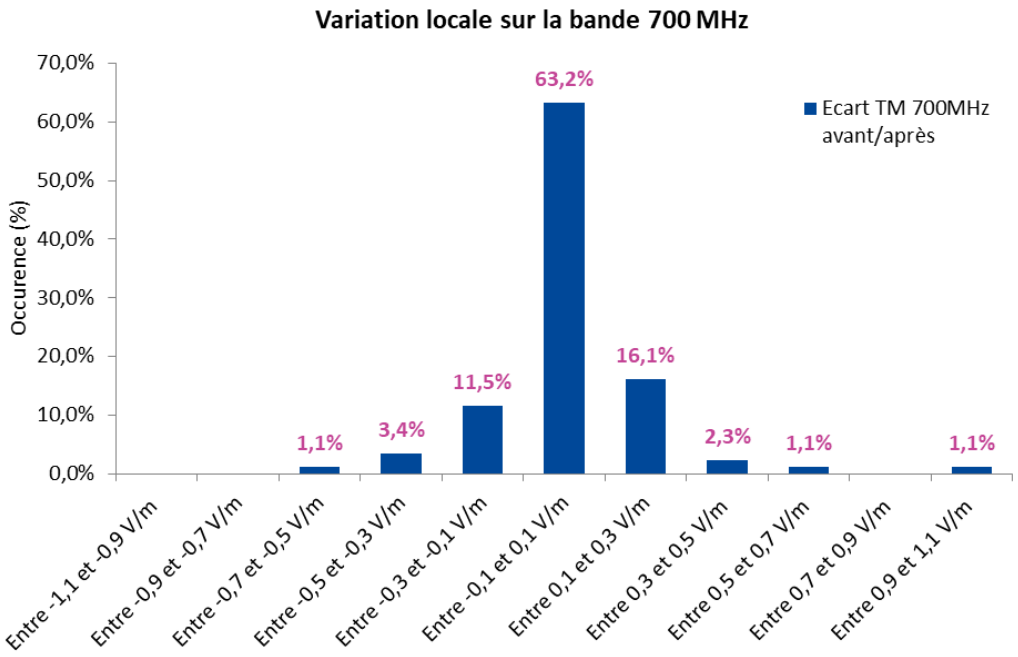

Figure 8. Distribution des écarts entre la contribution de la bande 700 MHz avant et après l'activation de la 5G sur 87 sites 5G 700 MHz

La figure fait ressortir que près de 91 % des écarts sont compris entre -0,3 et 0,3 V/m ce qui représente une variation très faible (rappelons que les émissions sont considérées comme significatives à partir de 0,3 V/m). Dans les 9 % restants, on constate, une fois sur deux, soit une augmentation soit une diminution : dans 4,5 % des cas, une augmentation moyenne de 0,6 V/m est constatée, dans les 4,5 % restants, on constate une diminution de 0,5 V/m. Ces variations peuvent s'apparenter aux variations dues au trafic entre deux mesures.

Par ailleurs, la moyenne des écarts est de 0,01 V/m, une valeur très proche de zéro. Statistiquement, et au vu des performances des outils de mesure, cela revient à dire que les écarts sont centrés autour de 0 V/m. Il est donc raisonnable à ce stade de l'étude de conclure que la contribution de la bande 700 MHz après l'activation de la 5G reste comparable à celle constatée avant son activation comme on peut le constater sur la moyenne des niveaux avant et après l'introduction de la 5G.

4.2. Analyse des niveaux d'exposition globale

Dans cette partie, l'analyse globale est faite sur les niveaux mesurés à la sonde large bande selon le cas A du protocole sur 143 sites avant et après la mise en service de la 5G sur la bande 700 MHz. Il convient de garder à l'esprit que la sonde large bande a une sensibilité de 0,38 V/m.

L'analyse statistique de l'exposition globale illustrée sur la Figure 9 par pas de 1 V/m fait ressortir que 93 % des mesures réalisées avant comme après l'activation de la 5G restent inférieures à 2 V/m.

3 points de mesure, qui se trouvaient dans l'intervalle « entre 0 et 1 V/m » paraissent plus exposés.

En analysant la tranche supérieure « entre 4 et 5 V/m », il ressort qu'un point de mesure est passé de l'intervalle « entre 3 et 4 V/m » vers « entre 4 et 5 V/m », son exposition étant passée de 3,4 V/m à 4,5 V/m.

En revanche, un point de mesure paraît moins exposé, il était initialement dans l'intervalle « entre 2 et 3 V/m » et passe à « entre 1 et 2 V/m » (de 2,04 V/m à 1,91 V/m).

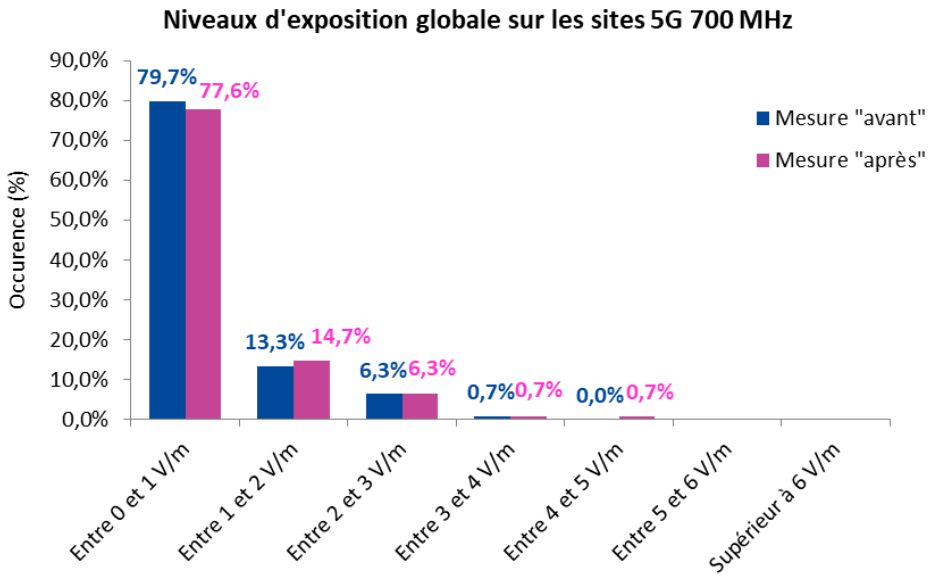

Figure 9. Distribution des niveaux d'exposition globale avant et après l'activation de la 5G sur 143 sites 700 MHz

Le Tableau 2 donne les statistiques des niveaux de champ de l'exposition globale mesurés sur les 143 sites 5G NR 700 MHz avant et après qu'ils soient techniquement opérationnels. Ces valeurs restent équivalentes en termes de moyenne, médiane et écart-type.

	Nombre de mesures	Moyenne (V/m)	Médiane (V/m)	Écart-type	Max (V/m)
Exposition globale 5G NR 700 MHz « avant »	143	0,69	0,46	0,65	3,40
Exposition globale 5G NR 700 MHz « après »	143	0,76	0,51	0,73	4,50
Variation « avant/après » (V/m)		0,07	0,05	0,08	1,10

Tableau 2. Comparaison des statistiques des niveaux de champ de l'exposition globale avant et après l'activation de la 5G sur 143 sites 700 MHz

Pour évaluer plus précisément les écarts entre les points mesurés avant et après la mise en service de la 5G, la Figure 10 illustre la distribution des écarts entre chaque couple de points mesurés avant/après, par pas de 0,2 V/m.

Sur cette figure, il ressort que plus de 92 % des écarts sont compris entre -0,4 et 0,4 V/m (rappelons que la sensibilité de la sonde est proche de 0,4 V/m et que les écarts ne sont considérés comme significatifs qu'à partir de 0,3 V/m). Dans près de 8 % des cas, une augmentation moyenne d'environ 0,9 V/m est constatée. Ces variations de cet ordre peuvent être dues à la variation du trafic entre deux mesures.

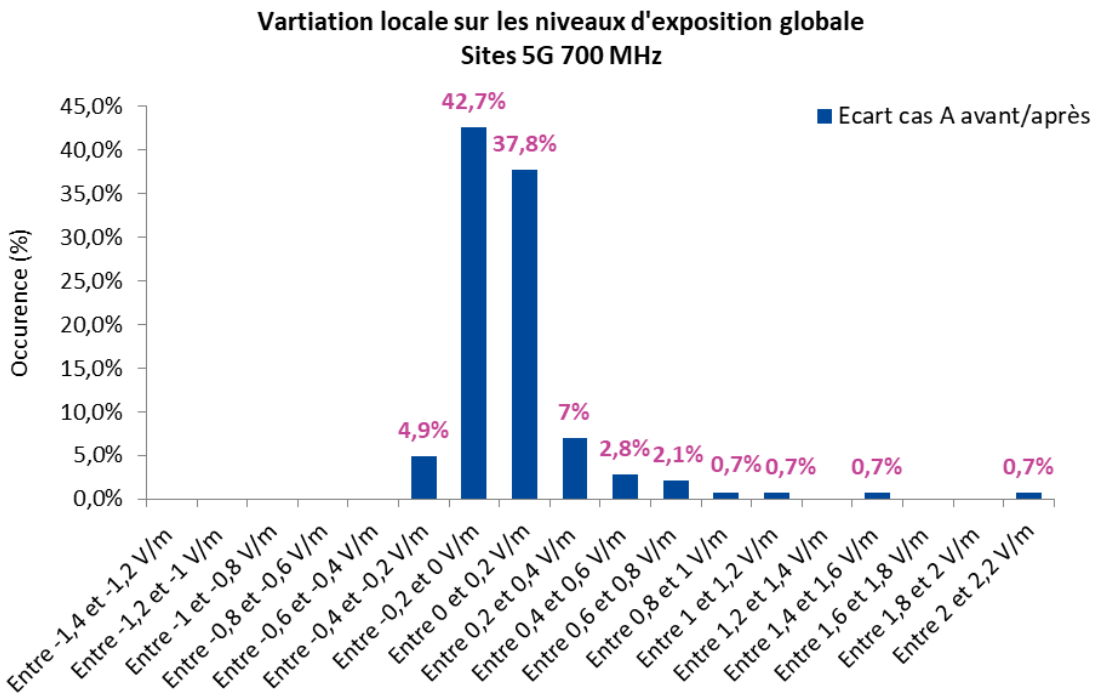

Figure 10. Distribution des écarts entre les niveaux d'exposition globale avant et après l'activation de la 5G sur 143 sites 700 MHz

La moyenne des écarts sur l'exposition globale avant et après l'activation de la 5G ressort à 0,07 V/m, valeur très faible proche de 0 V/m. Cette valeur, compte tenu de la précision des instruments, conduit également à considérer que l'exposition globale générée après l'activation de la 5G sur la bande 700 MHz reste comparable à celle constatée avant son activation.

En conclusion, à l'aide de mesures détaillées sur 87 sites hébergeant la 5G sur la bande 700 MHz, l'analyse a montré que les niveaux de champ mesurés sur la contribution de la bande 700 MHz après la mise en service de la 5G restent comparables à ceux observés avant sa mise en service. Ensuite, l'analyse globale de l'exposition sur un échantillon plus large (143 sites 5G en bande 700 MHz) n'a pas remis en cause cette conclusion.

5. Analyse des niveaux d'exposition sur les sites 5G 2 100 MHz avant et après l'activation de la 5G

Pour étudier l'exposition créée par l'activation de la 5G sur les sites 5G 2 100 MHz, 135 ont été identifiés dans le cadre ce programme, dont 33 n'ont pu faire l'objet de mesure « après » pour cause de non activation de la 5G pendant la campagne de mesure. Cette analyse concerne donc 102 sites à 2 100 MHz. Sur ces 102 sites, 75 % ont fait l'objet de meures détaillées "cas B", soit 77 sites.

Comme dans l'étude présentée précédemment sur les sites 700 MHz, les niveaux de champ mesurés sur la seule bande 2 100 MHz seront analysés dans un premier temps pour 77 sites à l'aide de mesures détaillées en fréquence (cas B du protocole). Dans un second temps, l'analyse portera sur les niveaux d'exposition globale sur 102 sites (cas A du protocole).

5.1. Analyse des niveaux de la contribution de la seule bande 2 100 MHz

La Figure 11 montre la contribution de la seule bande 2 100 MHz avant et après l'activation de la 5G sur cette bande sur 77 sites. Les histogrammes représentent la distribution des valeurs mesurées avant/après par tranche de 1 V/m.

Il en ressort que l'activation de la 5G dans la bande 2 100 MHz n'a pas modifié la distribution des niveaux dans cette bande et que 100 % des mesures « avant » sont inférieures à 2 V/m et près de 99 % des mesures « après » sont inférieures à 2 V/m.

Sur les 77 points mesurés, un point se trouvant dans la tranche « entre 0 et 1 V/ m » avant l'activation de la 5G apparaît plus exposé dans la mesure « après » et passe à la tranche « entre 1 et 2 V/m »: la contribution sur ce point était de 0,70 V/m et a atteint 1,13 V/m dans la deuxième mesure. Un autre point se trouvant initialement dans la tranche « entre 1 et 2 V/m » est passé à la tranche supérieure « entre 2 et 3 V/m » (de 1,75 V/m à 2,58 V/m).

En revanche, un point qui se trouvait initialement dans la tranche « entre 1 et 2 V/m » se trouve dans la tranche inférieure « entre 0 et 1 V/m » dans la mesure « après », il passe de 1,09 V/m à 0,66 V/m.

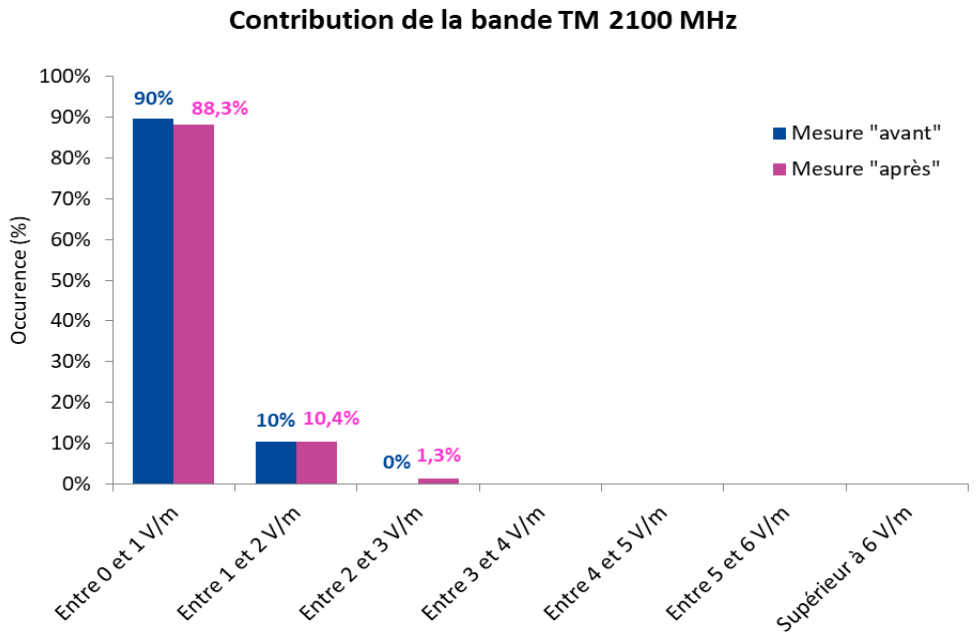

Figure 11. Distribution des niveaux d'exposition sur la bande 2100 MHz avant et après l'activation de la 5G sur 77 sites 2 100 MHz

Le Tableau 3 récapitule les statistiques des niveaux de champ dus à la seule bande 2 100 MHz. La moyenne, la médiane et l'écart-type restent équivalents avant et après l'activation de la 5G (on peut noter une diminution moyenne non significative).

	Nombre de mesures	Moyenne (V/m)	Médiane (V/m)	Écart-type	Max (V/m)
Contribution de la bande 2 100 MHz « avant »	77	0,46	0,30	0,42	1,83
Contribution de la bande 2 100 MHz « après »	77	0,45	0,33	0,40	2,58
Variation « avant/après » (V/m)		-0,01	0,03	-0,02	0,75

Tableau 3. Comparaison des statistiques des niveaux de champs mesurés sur la la bande 2 100 MHz avant et après l'activation de la 5G sur 77 sites

Pour caractériser la variation de la contribution de la bande 2 100 MHz avant et après la mise en service de la 5G sur cette bande, les écarts sont ensuite calculés pour chaque couple de mesure avant/après. Les histogrammes illustrés sur la Figure 12 montrent la répartition des écarts entre la mesure « avant » et la mesure « après » par intervalle de 0,2 V/m.

82 % des écarts sont compris entre -0,3 et 0,3 V/m. Dans 7 % des cas, on constate une augmentation de 0,6 V/m sur la bande et dans 11 % une diminution de 0,6 V/m. Comme expliqué précédemment, la variation du trafic entre deux mesures peut expliquer cette situation.

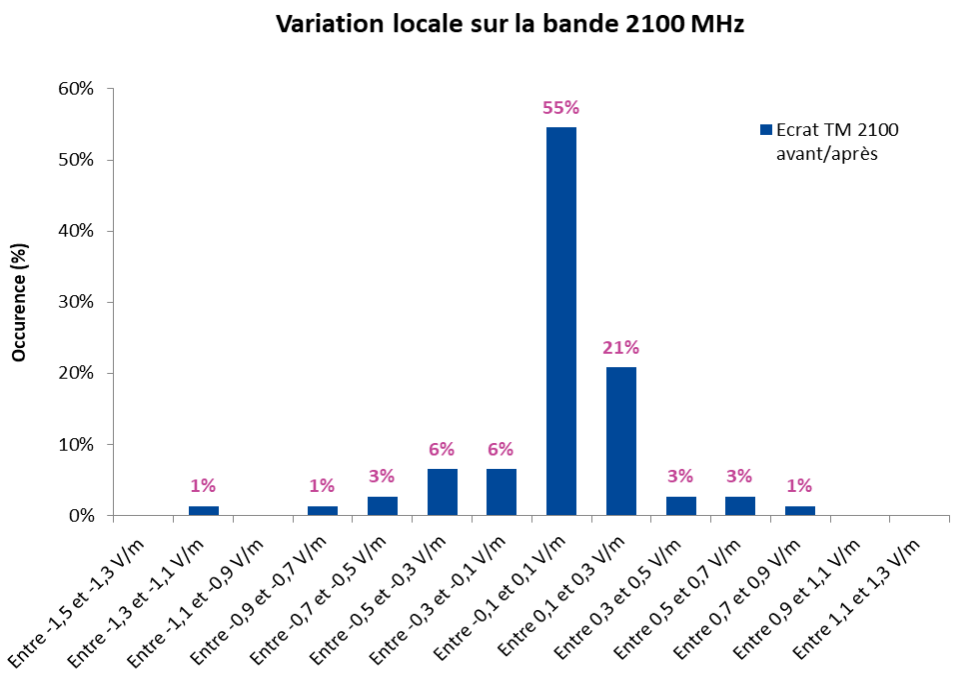

Figure 12. Distribution des écarts entre la contribution de la bande 2100 MHz avant et après l'activation de la 5G sur 77 sites 2 100 MHz

La moyenne des écarts est de -0,01 V/m, avoisinant la valeur nulle, ce qui, rapporté à la sensibilité des instruments de mesure, revient à dire que les écarts sont centrés sur 0 V/m. Il est raisonnable, à ce stade de l'étude, d'inférer que la contribution de la bande 2100 MHz après l'activation de la 5G reste comparable à celle avant son activation.

5.2. Analyse des niveaux d'exposition globale

L'analyse sur les niveaux d'exposition globale d'exposition (cas A du protocole) est étudiée dans cette partie sur 102 sites 5G 2 100 MHz.

L'analyse statistique de l'exposition globale illustrée sur la Figure 13 par tranche de 1 V/m fait ressortir que plus de 70 % des mesures réalisées avant et après l'activation de la 5G restent inférieures à 2 V/m.

4 points de mesure, qui se trouvaient dans la tranche « entre 0 et 1 V/m » apparaissent plus exposés.

En analysant la tranche la plus élevée « entre 4 et 5 V/m », il ressort qu'un point de mesure est passé de la tranche « entre 3 et 4 V/m » vers la tranche « entre 4 et 5 V/m » (de 3,28 V/m à 4,33 V/m).

En revanche, plusieurs points de mesure passent des intervalles supérieurs vers des intervalles inférieurs, par exemple de 2,70 V/m à 0,41 V/m ou encore de 2,59 V/ à 0,62 V/m.

En analysant de plus près ces points, il s'avère que la contribution des autres bandes de fréquence de la téléphonie mobile a diminué, notamment en bande 800 MHz et 900 MHz.

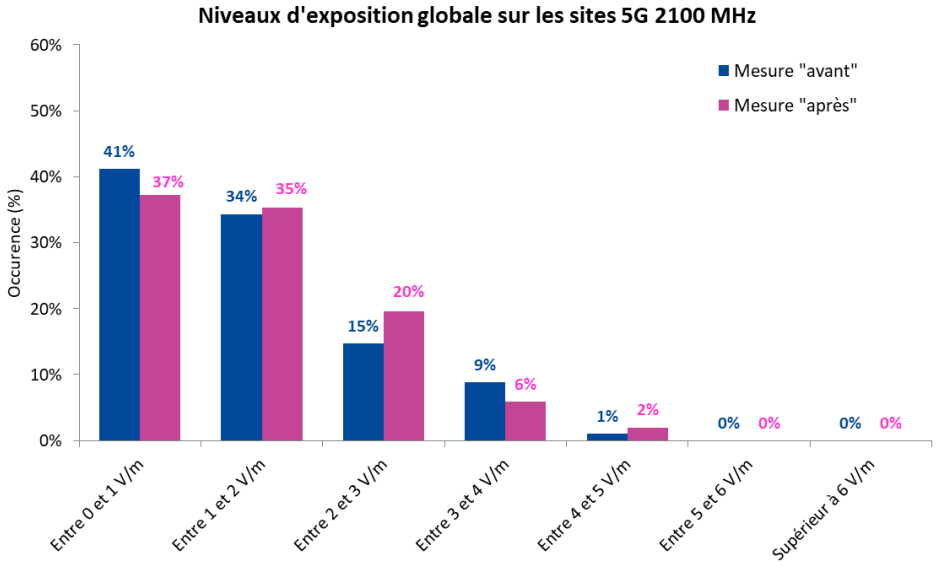

Figure 13. Distribution des niveaux d'exposition globale avant et après l'activation de la 5G sur 102 sites 2100 MHz

Les statistiques des niveaux de champs mesurés sur la bande 2 100 MHz sont précisées dans le Tableau 4. La moyenne, la médiane et l'écart-type restent équivalents en ce qui concerne l'exposition globale sur les sites 5G 2 100 MHz (on peut également noter une diminution moyenne non significative de l'exposition globale).

	Nombre de mesures	Moyenne (V/m)	Médiane (V/m)	Écart-type	Max (V/m)
Exposition globale 5G 2 100 MHz « avant »	102	1,52	1,16	0,96	4,98
Exposition globale 5G 2 100 MHz « après »	102	1,50	1,18	0,94	4,33
Variation « avant/après » (V/m)		-0,02	0,03	-0,03	-0,65

Tableau 4. Comparaison des statistiques des niveaux de champ de l'exposition globale avant et après l'activation la 5G sur 102 sites 2 100 MHz

Pour évaluer plus précisément les écarts entre les niveaux d'exposition globale avant et après la mise en service de la 5G sur la bande 2100 MHz, la Figure 14 donne la distribution des écarts entre chaque couple de points mesurés avant/après, par pas de 0,2 V/m.

Dans plus de 77 % des cas, les écarts sont compris entre -0,4 et 0,4 V/m, proche de la sensibilité de la sonde (0,38 V/m). Dans près de 15 % des cas, on note une augmentation de 0,6 V/m et dans environ 12 % des cas, une diminution moyenne de 0,9 V/m est observée. Comme pour les cas précédents, ces variations peuvent être expliquées par la variation du trafic entre deux mesures.

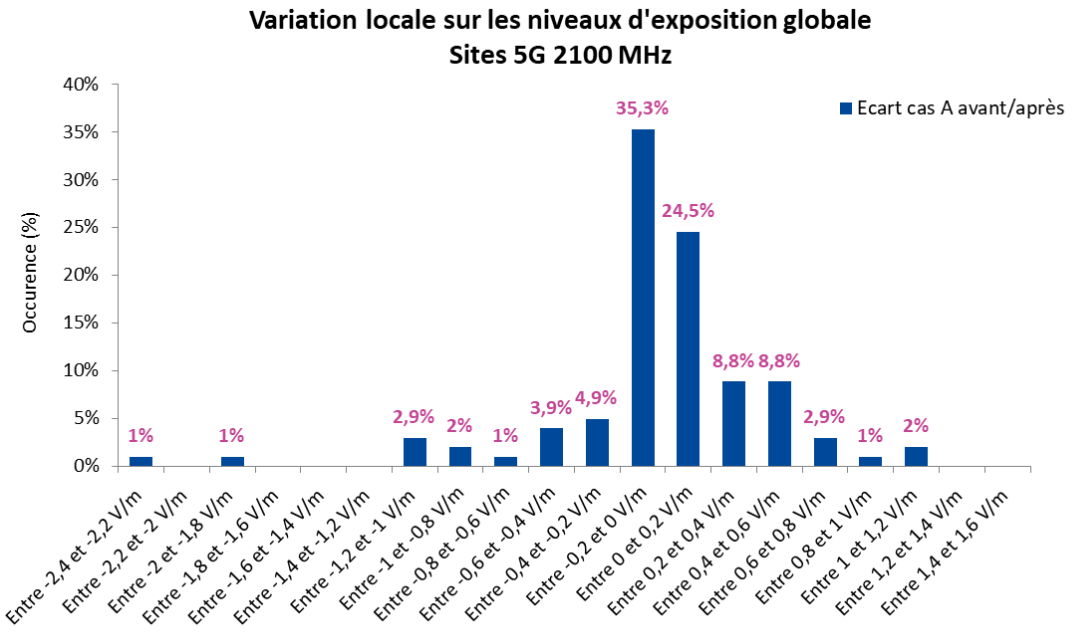

Figure 14. Distribution des écarts entre les niveaux d'exposition globale avant et après l'activation de la 5G sur 102 sites 5G 2 100 MHz

La moyenne des écarts sur l'exposition globale avant et après l'activation de la 5G sur la bande 2 100 MHz est de -0,02 V/m, avoisinant la valeur nulle. On peut donc conclure que l'exposition globale mesurée après l'activation de la 5G sur la bande 2 100 MHz reste très comparable à celle constatée avant son activation.

En conclusion, d'un côté, en analysant les mesures détaillées sélectives en fréquence sur 77 sites hébergeant la 5G sur la bande 2 100 MHz, il ressort que la contribution de la bande 2 100 MHz avant et après la mise en service de la 5G produit des niveaux de champ très comparables à ceux observés avant sa mise en service. D'un autre côté, l'analyse globale de l'exposition sur 143 sites 5G en bande 2 100 MHz a également montré que les niveaux mesurés avant la mise en service de la 5G restent comparables à ceux après son activation.

6. Analyse des niveaux d'exposition sur les sites 5G 3500 MHz avant et après l'activation de la 5G

La bande 3 500 MHz a été l'objet d'une vaste opération de réaménagement au profit de la 5G. Cette bande était encore utilisée en 2020 en France par des réseaux de BLR (Boucle Locale Radio) fonctionnant avec la technologie WiMax (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*). A la fin de l'année 2020, avant la mise en service de la 5G, plus aucune émission n'était autorisée dans la bande attribuée à la téléphonie mobile, les niveaux d'exposition attendus correspondaient donc au niveau de bruit résiduel dans cette bande.

Sur les 1 360 sites hébergeant la 5G en bande 3 500 MHz sélectionnés dans le cadre de ce programme, près de 80 % (1 063 sites) ont fait l'objet des mesures détaillées après leur déploiement opérationnel en 5G. 112 de ces sites disposent également d'une mesure détaillée en fréquence avant la mise en service 5G.

Comme indiqué précédemment, en supplément des mesures classiques entrant dans le cadre du protocole en vigueur, des mesures complémentaires spécifiques à la 5G en bande 3 500 MHz ont eu lieu sur 370 sites. Ces mesures ont été réalisées en générant du trafic à partir d'un téléchargement d'un fichier de 1 Go afin de diriger le faisceau variable de l'antenne 5G vers le point de mesure et créer ainsi une exposition plus représentative de celle qui pourrait être atteinte à terme, lorsque les terminaux fonctionnant en 5G seront plus répandus.

Un seul site ayant fait l'objet de mesures avant/après et de mesure spécifique sera supprimé de cette étude. En effet la mesure « après » a montré que le site initial a été démonté et déplacé d'une quinzaine de mètres, ce qui ne permet pas de comparaisons fiables.

Cette partie est organisée comme suit :

- en premier lieu, la contribution de la bande 3 500 MHz sera analysée sur 1 062 sites après l'activation de la 5G, suivie par une étude comparative sur la contribution de la bande 3 500 MHz sur 111 sites pour lesquels les données issues de mesures détaillées sont disponibles avant et après l'activation de la 5G ;
- en deuxième lieu, les niveaux d'exposition globale seront étudiés sur 1 359 sites avant et après la mise en service de la 5G (dont 955 seront déduits par calcul) ;
- et en dernier lieu, les mesures spécifiques en présence de trafic seront exploitées pour estimer l'exposition à terme, en présence d'une majorité de terminaux abonnés à la 5G.

6.1. Analyse des niveaux de la contribution de la seule bande 3 500 MHz

La Figure 15 donne la répartition des niveaux de champ mesurés sur la bande 3 500 MHz sur 1 062 sites opérationnels en 5G. Les résultats font ressortir que près de 100 % des niveaux mesurés restent inférieurs à 1 V/m.

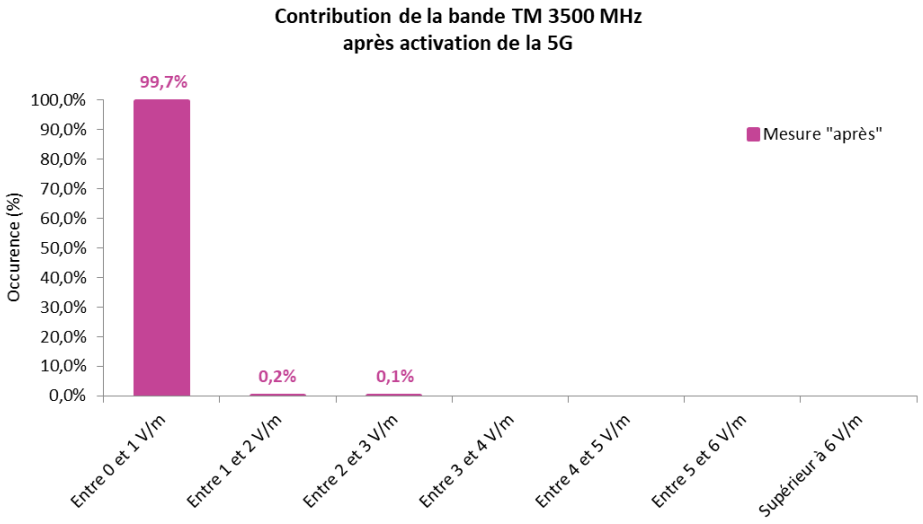

Figure 15. Contribution de la bande 3500 MHz après l'activation de la 5G estimée à partir de 1 062 mesures

Comme indiqué dans le Tableau 5, la moyenne de la contribution de la bande 3 500 MHz sur l'ensemble de ces 1 062 sites est de 0,11 V/m. Ce niveau apparaît très faible comparé au niveau de référence (valeur limite) dans la bande considérée (61 V/m).

	Nombre de mesures	Moyenne (V/m)	Médiane (V/m)	Écart-type	Max (V/m)
Contribution de la bande 3 500 MHz « après »	1062	0,11	0,07	0,16	2,1

Tableau 5. Statistiques des niveaux de champ mesurés sur la contribution de la bande 3 500 MHz après activation de la 5G sur 1 062 sites

Le Tableau 6 récapitule les statistiques des niveaux de champ mesurés sur la bande 3 500 MHz, sur lequel on peut noter une augmentation de la moyenne de 0,13 V/m.

Avant la mise en service, il n'y a pas d'émission significative dans la bande, libérée pour accueillir la 5G. Les niveaux mesurés sont donc très faibles (0,02 V/m en moyenne) et reflètent le niveau de bruit dans la bande.

	Nombre de mesures	Moyenne (V/m)	Médiane (V/m)	Écart-type	Max (V/m)
Contribution de la bande 3 500 MHz « avant »	111	0,02	0	0,13	0,28
Contribution de la bande 3 500 MHz « après »	111	0,15	0,09	0,21	1,25
Variation « avant/après » (V/m)		0,13	0,09	0,08	0,97

Tableau 6. Comparaison des statistiques des niveaux de champs mesurés sur la bande 3 500 MHz avant et après activation de la 5G sur 111 sites 5G 3 500 MHz

Pour observer la variation entre les niveaux relevés avant la mise en service et après sur le bande 3 500 MHz, la Figure 16 donne la distribution des écarts entre chaque couple de points mesurés avant/après par tranche de 0,2 V/m.

83 % des écarts sont compris entre -0,3 V/m et 0,3 V/m. Dans 16 % des cas une augmentation moyenne de 0,5 V/m est observée, et dans 1 % une diminution moyenne de 0,4 V/m.

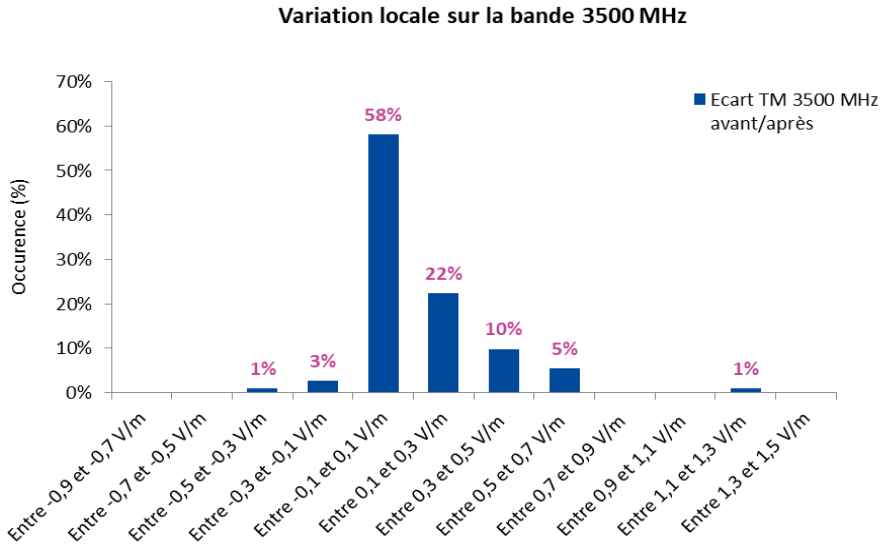

Figure 16. Distribution des écarts entre la contribution de la bande 3500 MHz avant et après l'activation de la 5G sur 111 sites 3 500 MHz

La moyenne des écarts sur l'exposition globale avant et après l'activation de la 5G sur la bande 3 500 MHz est de 0,13 V/m. Cette valeur reste faible mais sensiblement supérieure à celles observées pour les bandes basses qui sont de 0,01 V/m pour la bande 700 MHz et de -0,01 V/m pour la bande 2 100 MHz. La distribution n'est plus centrée autour de 0 V/m : la grande majorité des écarts sont positifs et traduisent une augmentation de l'exposition, qui apparaît faible puisqu'elle reste non significative pour la majorité des cas.

6.2. Analyse des niveaux d'exposition globale

La Figure 17 illustre la répartition des mesures par tranche de 1 V/m sur les niveaux d'exposition globale observés avant et après la mise en service de la 5G sur la bande 3 500 MHz.

1,5 % des points (20 points) qui étaient dans la tranche « entre 0 et 1 V/m » quittent cette tranche car ils deviennent plus exposés. De même, 1 % (14 points) des points qui se trouvant initialement dans la tranche « entre 1 et 2 V/m » voient leur exposition augmenter.

Globalement, plus de 88 % des 1 359 mesures « avant » réalisées (ou calculées) sur les sites 5G 3500 MHz restent inférieures à 2 V/m. L'analyse des mesures « après » montre que près de 88 % des mesures sont également inférieures à 2 V/m. La répartition est donc presque équivalente dans l'intervalle étendu de 0 à 2 V/m.

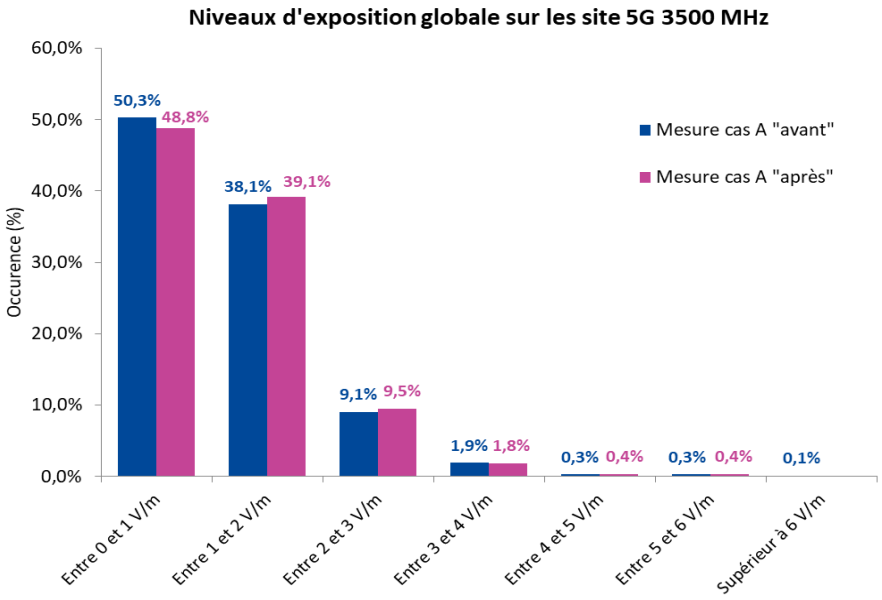

Figure 17. Distribution des niveaux d'exposition globale avant et après l'activation de la 5G sur 1359 sites 3 500 MHz

Ces histogrammes font ressortir que les deux mesures « avant » « après » sont comparables. Le niveau moyen de l'exposition permet de confirmer cela : il est de 1,16 V/m pour la mesure « avant » et de 1,17 V/m pour la mesure « après », soit une augmentation non significative de 0,01 V/m.

La comparaison entre les paramètres statistiques issus des données sur l'exposition globale avant et après l'activation de la 5G sur la bande 3 500 MHz indiqués dans le Tableau 7 confirment cette première tendance.

	Nombre de mesures	Moyenne (V/m)	Médiane (V/m)	Écart-type	Max (V/m)
Exposition globale 5G 3 500 MHz « avant »	1 359	1,16	1,00	0,75	6,19
Exposition globale 5G 3 500 « après »	1 359	1,17	1,01	0,74	5,41
Variation (V/m)		0,01	0,01	-0,01	-0,78

Tableau 7. Comparaison des statistiques des niveaux de champ de l'exposition globale avant et après l'activation la 5G sur 1359 sites 5G 3 500 MHz

Afin de mieux caractériser la variation entre les mesures « avant » et « après », la variation locale est étudiée pour vérifier comment les niveaux de champ se répartissent.

Pour cela, la distribution statistique des écarts entre les couples des mesures avant/après est caractérisée sur la Figure 18.

Dans plus de 93 % des cas, la variation est comprise entre -0,4 et 0,4 V/m, donc proche de la sensibilité de la sonde. Dans près de 4 % des cas, une augmentation moyenne de 0,6 V/m est observée tandis que dans près de 3 %, on constate une diminution moyenne de 0,7 V/m.

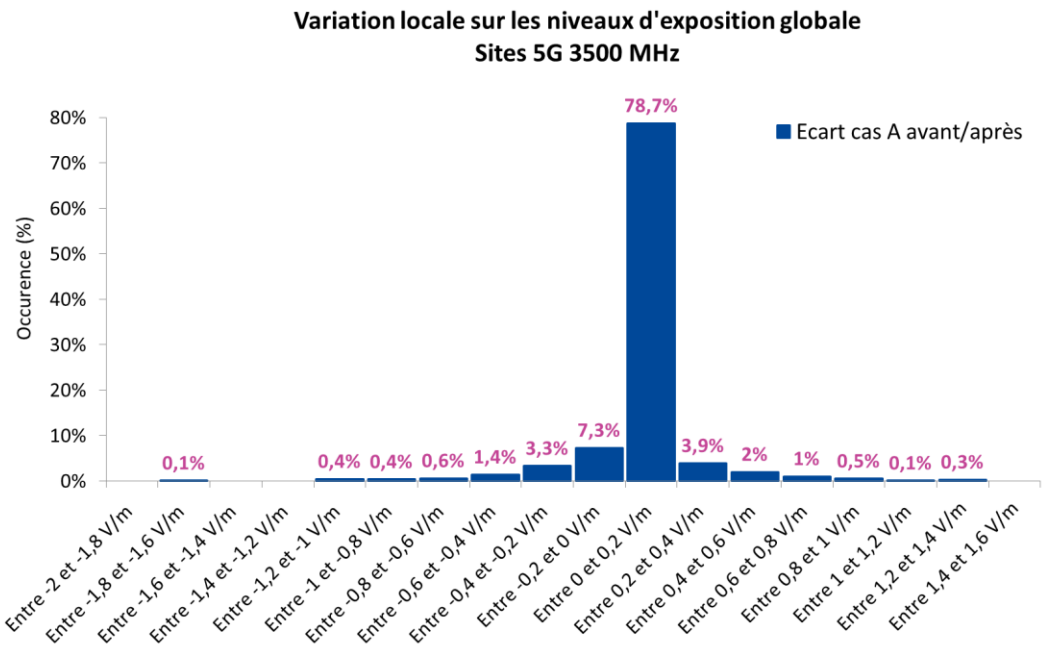

Figure 18. Distribution des écarts entre les niveaux d'exposition globale avant et après l'activation de la 5G sur 1359 sites 3 500 MHz

La moyenne des écarts entre les niveaux d'exposition globale avant le déploiement opérationnel de la 5G sur la bande 3 500 MHz et après sa mise en service est de 0,01 V/m. Cet écart est très faible avoisinant 0 V/m.

Il est donc possible de conclure à ce stade de l'étude que l'exposition globale aux ondes électromagnétiques générée par des sites hébergeant la 5G sur la bande 3 500 MHz est restée comparable à l'exposition sur ces même sites générée par des générations antérieures de téléphonie mobile (2G/3G/4G) sur les bandes basses.

En conclusion, à ce stade du déploiement où le trafic 5G reste faible, le niveau d'exposition dans la bande 3 500 MHz après mise en service est faible avec une contribution supplémentaire moyenne de 0,11 V/m, valeur issue des mesures détaillées. L'arrivée de la 5G dans cette bande n'a entraîné qu'une augmentation très faible du niveau de l'exposition globale.

6.3. Mesures spécifiques 5G avec téléchargement de données

Comme vu dans le paragraphe précédent, la contribution de la bande 3 500 MHz est apparue faible.

Au stade actuel du déploiement, peu d'utilisateurs sollicitent les antennes 5G, c'est pourquoi il a paru intéressant de créer artificiellement du trafic pour étudier l'effet de la 5G sur l'exposition globale en simulant une plus forte utilisation dans cette bande.

Des mesures complémentaires spécifiques à la 5G en bande 3 500 MHz ont donc été demandées au laboratoire. Ces mesures sont réalisées hors protocole. Elles consistent à solliciter l'antenne 5G depuis le lieu de mesure à l'aide d'un téléphone 5G et à la hauteur où le champ mesuré a été constaté le plus élevé lors de la moyenne spatiale du cas A[6]. Le trafic est alors produit en téléchargeant 1 Go de données, ce qui correspond à l'indicateur d'exposition proposé par l'ANFR[7]. Le niveau de champ moyen durant le téléchargement est alors évalué. Puis les niveaux de champ sont ensuite ramenés en valeur moyenne sur 6 minutes.

Près 370 sites 5G 3 500 MHz ont fait l'objet de ces mesures spécifiques permettant de solliciter le réseau 5G.

La Figure 19 donne le niveau de champ moyen pendant le téléchargement du fichier de 1 Go sur la bande 3 500 MHz (en bleu) ainsi que le niveau de champ moyen sans téléchargement (en rose).

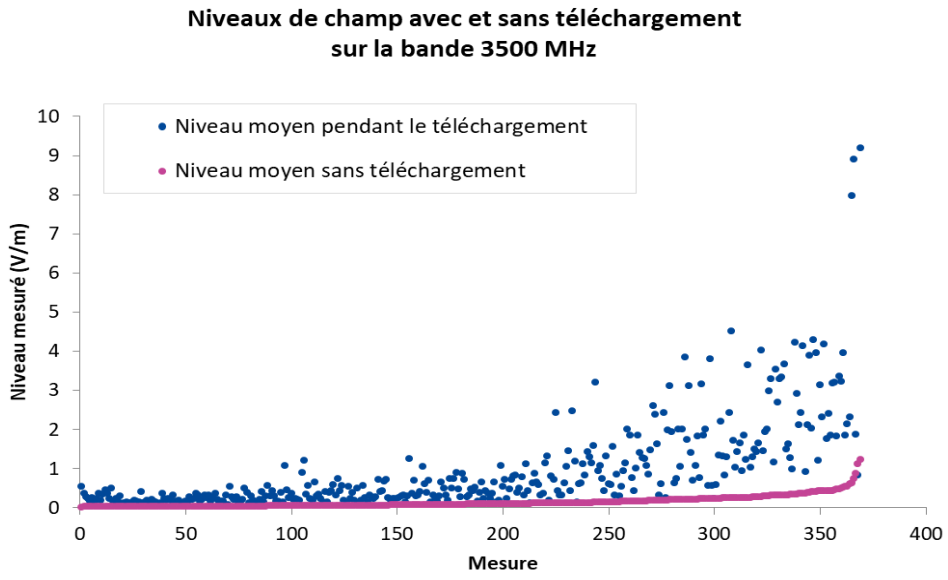

Figure 19. Niveau de champ moyen pendant le téléchargement d'un fichier de 1 Go comparé avec le niveau moyen sans téléchargement

[6] Une moyenne spatiale s'effectue sur trois points de mesure à 1m10, 1m50 et 1m70
[7] https://www.anfr.fr/toutes-les-actualites/actualites/lanfr-publie-un-rapport-de-mesures-sur-lexposition-aux-ondes-des-experimentations-5g-et-presente-un-nouvel-indicateur-de-mesure-de-lexposition/

La Figure 20 donne le niveau de champ moyen sur 6 minutes avec téléchargement (en bleu) et sans téléchargement (en rose).

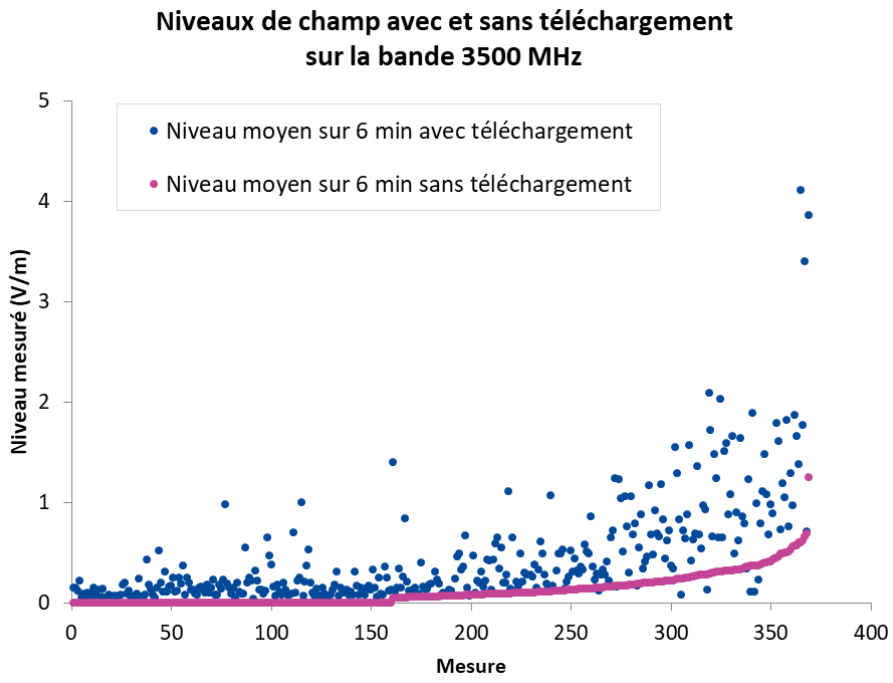

Figure 20. Niveau de champ moyen sur 6 minutes pendant le téléchargement d'un fichier de 1 Go comparé avec le niveau moyen sur 6 minutes sans téléchargement

Les deux figures font ressortir une augmentation de l'exposition due au téléchargement du fichier.

L'augmentation moyenne calculée entre la mesure avec téléchargement moyennée sur 6 minutes (en bleu) sur la bande 3 500 MHz et le niveau moyen sans téléchargement (en rose) est de 0,3 V/m.

Le but de cette mesure supplémentaire est de simuler un accroissement éventuel de trafic en sollicitant spécifiquement l'antenne 5G.

Pour évaluer l'impact sur le niveau global d'exposition, le niveau moyen sur 6 minutes issu de la mesure spécifique avec sollicitation de la 5G est intégré par calcul dans l'exposition globale cas A et cas B et est ensuite comparé à la mesure cas A « après » et cas B « après » sans sollicitation spécifique du réseau. La Figure 21 donne la répartition des niveaux de l'exposition globale « cas A » avec et sans téléchargement. La Figure 22 donne, quant à elle, les niveaux d'exposition globale « cas B » avec et sans téléchargement.

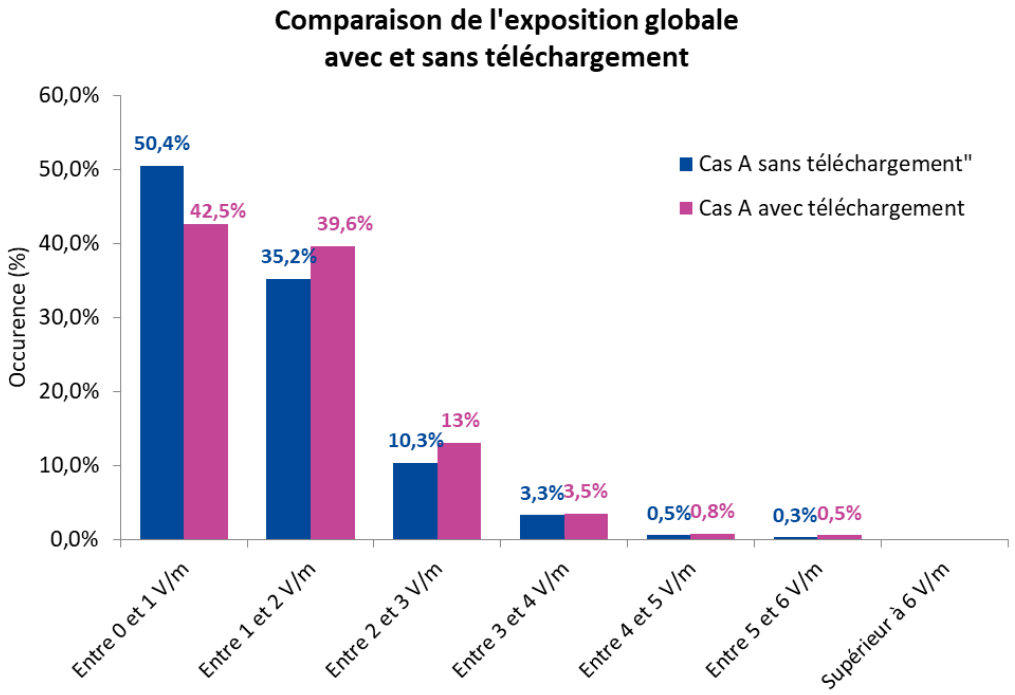

Figure 21. Distribution du niveau moyen sur 6 minutes issu de la mesure spécifique avec sollicitation de la 5G intégré par calcul dans l'exposition globale cas A et comparé à la mesure cas A « après » sans sollicitation spécifique du réseau

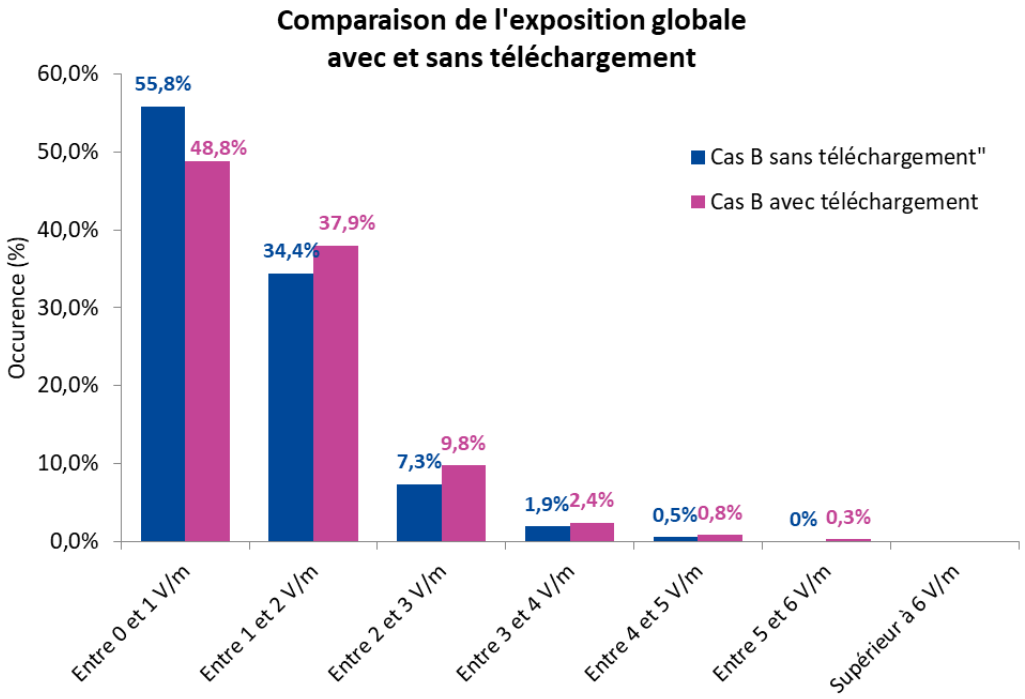

Figure 22. Distribution du niveau moyen sur 6 minutes issu de la mesure spécifique avec sollicitation de la 5G intégré par calcul dans l'exposition globale cas B et comparé à la mesure cas B « après » sans sollicitation spécifique du réseau

La comparaison entre les paramètres statistiques issus des données de l'exposition globale (cas A et cas B) avec et sans téléchargement sur la bande 3 500 MHz sont indiqués dans le Tableau 8.

	Nombre de mesures	Moyenne (V/m)	Médiane (V/m)	Écart-type
Exposition globale cas A sans téléchargement	369	1,21	0,99	0,78
Exposition globale cas A avec téléchargement	369	1,34	1,13	0,84
Variation (V/m)		0,13	0,14	0,06
Exposition globale cas B sans téléchargement	369	1,08	0,91	0,70
Exposition globale cas B avec téléchargement	369	1,22	1,02	0,77
Variation (V/m)		0,14	0,11	0,07

Tableau 8. Comparaison des statistiques des niveaux de champ de l'exposition globale avec et sans téléchargement sur 369 sites 5G 3 500 MHz

L'augmentation moyenne entre les deux niveaux est de 0,13 V/m pour le cas A et de 0,14 V/m pour le cas B, soit une augmentation en moyenne de 14 % et 16 % respectivement. Il est donc possible d'en déduire qu'une augmentation du trafic de la 5G conforme à l'indicateur d'exposition introduit par l'ANFR devrait à terme engendrer une augmentation de l'ordre de 20 % sur le niveau global de l'exposition.

7. Conclusion

Cette étude préliminaire porte sur l'analyse de plus de 3 000 mesures réalisées dans le cadre d'une vaste campagne sur l'évolution de l'exposition liée au déploiement de la 5G dans les bandes de fréquences basses 700 MHz et 2 100 MHz déjà utilisées pour les réseaux 3G et 4G ainsi que dans la nouvelle bande 3 500 MHz qui a fait l'objet d'une autorisation d'utilisation par l'ARCEP en novembre 2020.

Les premiers résultats montrent que l'exposition reste très comparable après l'activation de la 5G sur les bandes basses, qui continuent de servir également aux générations précédentes 3G et 4G. En majeure partie, la variation est inférieure à 0,3 V/m avec une valeur moyenne très proche de 0 V/m.

En ce qui concerne la bande 3 500 MHz, elle n'est utilisée que pour la 5G et elle avait été préalablement libérée des autres sources d'émission. Les premiers résultats montrent que l'exposition globale varie également très peu. Dans près de 93 % des cas, la variation ne dépasse pas +/- 0,4 V/m, proche de la sensibilité de la sonde. L'écart moyen entre les mesures d'exposition globale avant la mise en service de la 5G et après sa mise en service est quasiment nul (0,01 V/m). La contribution de la seule bande 3 500 MHz sur les sites opérationnels en 5G ressort quant à elle à 0,11 V/m.

Peu d'utilisateurs sollicitent pour le moment le réseau par rapport à son potentiel, ce qui peut expliquer ce très faible accroissement de l'exposition en bande 3 500 MHz. Les mesures se poursuivront donc afin de suivre l'évolution de l'exposition en fonction de l'accroissement attendu du trafic dans les prochaines années. Ce rapport provisoire sera alors complété, dans un premier temps en y intégrant le complément de l'étude de la première campagne et la troisième phase de la deuxième campagne qui se poursuit jusqu'à la fin de l'année 2021.

Le trafic 5G étant encore faible à ce stade du déploiement, des mesures complémentaires spécifiques à la 5G en bande 3 500 MHz ont été réalisées en présence de trafic artificiellement généré pour solliciter l'antenne 5G, en téléchargeant un fichier de 1 Go à l'aide d'un téléphone 5G. Les premiers résultats suggèrent une augmentation à terme d'environ 20 % sur l'exposition globale.