

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

Campagnes 2020 et 2021

Avril 2023

Synthèse

Ce rapport s'inscrit dans le cadre d'un vaste programme de mesures pour l'évaluation de l'exposition du public aux ondes électromagnétiques lancé à la suite du déploiement de la nouvelle technologie mobile 5G dès la fin de l'année 2020.

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 autorisé par l'Arcep en novembre 2020. Cette bande se démarque par une largeur plus importante que les bandes basses, permettant des débits accrus.

L'étude porte sur les résultats d'environ 5 000 mesures réalisées en visibilité directe de 1 600 sites radioélectriques hébergeant la 5G. Chaque site est mesuré 3 fois : avant l'activation de la 5G, puis après environ 4 mois et 8 mois de mise en service de la 5G sur ce site.

Les résultats font ressortir que l'exposition globale restait stable et variait très peu après 4 mois de mise en service, aussi bien en bandes basses qu'en bande 3 500 MHz. Une tendance à la hausse est néanmoins constatée après 8 mois de mise en service. En effet, pendant la période allant de septembre à décembre 2021, une augmentation moyenne de l'exposition globale de 0,18 V/m a été constatée sur les sites 5G techniquement opérationnels en bande 3 500 MHz. Les résultats sélectifs en fréquences ont toutefois montré que cette augmentation n'est pas due à la bande 3 500 MHz, mais à une exposition plus forte sur les autres bandes de téléphonie mobile, notamment les bandes allouées à la 4G.

Le trafic 5G étant encore faible à ce stade du déploiement, 464 sites ont fait l'objet de mesures complémentaires spécifiques à la 5G en bande 3 500 MHz. Ces mesures consistent à solliciter l'antenne 5G en générant artificiellement du trafic au moyen d'un téléchargement d'un fichier de 1 Go par un téléphone 5G. Les premiers résultats suggèrent une augmentation d'environ 30 % sur l'exposition globale.

Les résultats issus des mesures sur les bandes basses montrent également une tendance à la hausse du niveau global d'exposition pendant la période de fin d'année 2021. L'augmentation moyenne est de 0,11 V/m pour les sites 5G fonctionnant en bande 2 100 MHz et de 0,09 V/m sur les sites en bande 700 MHz. L'analyse en fréquence a montré que cette augmentation n'est toutefois pas corrélée au déploiement de la 5G sur ces bandes de fréquences.

En conclusion, cette étude a montré une augmentation du niveau global d'exposition fin 2021 mais qui n'est pas directement liée à l'introduction de la 5G : cette augmentation, constatée sur presque toutes les bandes de fréquences préexistantes, émane de l'augmentation régulière du trafic.

Executive Summary

This report is part of a broad program of measurements to assess public exposure to electromagnetic waves following the deployment of the new 5G mobile technology from the end of 2020.

In France, 5G is currently being deployed on several frequency bands:

- The "lower bands", already used for previous generation cell phone networks and which can also receive 5G, considering the technological neutrality principle: French operators have deployed 5G in 700 MHz and 2100 MHz bands, which have already been used for many years in 3G and 4G;
- The new 3500 MHz band, authorized for use by Arcep in November 2020: this band is wider than the lower bands, allowing for increased speeds.

The study focuses on the results of about 5,000 measurements performed in line-of-sight of 1,600 radio sites hosting 5G. Each site is measured 3 times: before the activation of 5G, then after about 4 months and 8 months of 5G deployment at that site.

The results show that the overall exposure remained steady and varied very slightly after 4 months of operation both in the low bands and in the 3500 MHz band, but an increasing trend is observed after 8 months of roll out. Indeed, during the period from September to December 2021, an average increase in overall exposure of 0.18 V/m was observed on technically operational 5G sites in 3500 MHz band. However, the frequency selective results showed that this increase is not due to the 3500 MHz band, but rather to the other cell phone bands, especially the bands allocated to 4G.

As 5G traffic is still low at this stage of deployment, 464 sites have been covered by additional measurements specific to 5G in the 3500 MHz band. These measurements consisted in soliciting the 5G antenna by artificially generating traffic by downloading a 1 GB file using a 5G phone. The first results suggest an increase of about 30% on the overall exposure.

The results from the low band measurements also show an increasing trend in the overall exposure level during the year-end 2021 period. The average increase is 0.11 V/m for 5G sites operating in the 2100 MHz band and 0.09 V/m for sites deploying 5G in the 700 MHz band. The frequency analysis showed that this increase is not correlated with the deployment of 5G on these frequency bands.

In conclusion, this study has shown an increase in the overall exposure level at the end of 2021 but not directly related to the introduction of 5G: an increase on almost all frequency bands is observed resulting from an increase in traffic.

Sommaire

1.1.	OBJECTIF	5
1.2.	Déroulement	5
2.	REGLEMENTATION.....	6
3.	METHODE ET PROTOCOLE DE MESURE	7
3.1.	Lieux de mesures	7
3.2.	Répartition des sites	8
3.2.1.	Répartition des sites 5G par type d'environnement	8
3.2.2.	Répartition des sites 5G par opérateur	9
3.3.	Protocole de mesures	9
4.	ANALYSE DES NIVEAUX D'EXPOSITION SUR LES SITES 5G 3500 MHZ AVANT ET APRES L'ACTIVATION DE LA 5G.....	11
4.1.	Analyse des niveaux d'exposition globale	11
4.2.	Analyse des niveaux de la contribution de la seule bande 3 500 MHz	14
4.3.	Conclusion sur l'analyse globale et détaillée	18
4.4.	Mesures spécifiques 5G avec téléchargement de données	19
5.	ANALYSE DES NIVEAUX D'EXPOSITION SUR LES SITES 5G 2 100 MHZ AVANT ET APRES L'ACTIVATION DE LA 5G.....	22
5.1.	Analyse des niveaux d'exposition globale	22
5.2.	Analyse des niveaux de la contribution de la seule bande 2 100 MHz	24
6.	ANALYSE DES NIVEAUX D'EXPOSITION SUR LES SITES 5G 700 MHZ AVANT ET APRES L'ACTIVATION DE LA 5G	27
6.1.	Analyse des niveaux d'exposition globale	28
6.2.	Analyse de la contribution de la seule bande 700 MHz.....	29
7.	CONCLUSION	33

1. Objectif et déroulement

1.1. Objectif

Dans le cadre de ses missions de surveillance de l'exposition du public, l'ANFR, missionnée par Cédric O, alors secrétaire d'Etat chargé de la Transition numérique et des Communications électroniques, a lancé une vaste campagne nationale de mesures en octobre 2020, dès les premières activations de la 5G sur les bandes basses (700 MHz et 2 100 MHz), et s'est poursuivie en 2021 pour prendre en compte les sites autorisés en bande 3 500 MHz.

Ce programme a pour objectif d'étudier l'exposition qui résulterait de l'introduction d'une nouvelle technologie sur les bandes basses hébergeant déjà les technologies 3G/4G mais surtout sur la nouvelle bande de fréquences 3 500 MHz. Cette dernière présente en effet la particularité de mettre en œuvre de nouvelles antennes à faisceaux orientables qui dirigent leur exposition vers les utilisateurs 5G situés dans leur voisinage. Le programme contribue également à la surveillance de l'évolution de l'exposition dans le temps en fonction de l'accroissement éventuel du trafic.

1.2. Déroulement

Pour atteindre ces objectifs, les sites ont été sélectionnés dès le début de l'étude sur la base des demandes d'autorisation COMSIS¹ (comité des sites et servitudes) déposées par les opérateurs de téléphonie mobile avant l'activation de la 5G, ce qui a permis de cibler les premiers sites dotés de la 5G. La déclaration de mise en service par l'opérateur a ensuite permis à l'Agence de planifier les mesures 5G sur ces mêmes sites. Chaque site est mesuré avant l'activation de la 5G, puis après environ 4 mois et 8 mois de mise en service.

Le programme s'est décliné en deux campagnes (cf. Figure 1) :

- La campagne 2020 (en bleu) : elle a concerné initialement 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 ;
- La campagne 2021 (en rose) : elle a concerné 1 500 sites 5G, toutes bandes confondues.

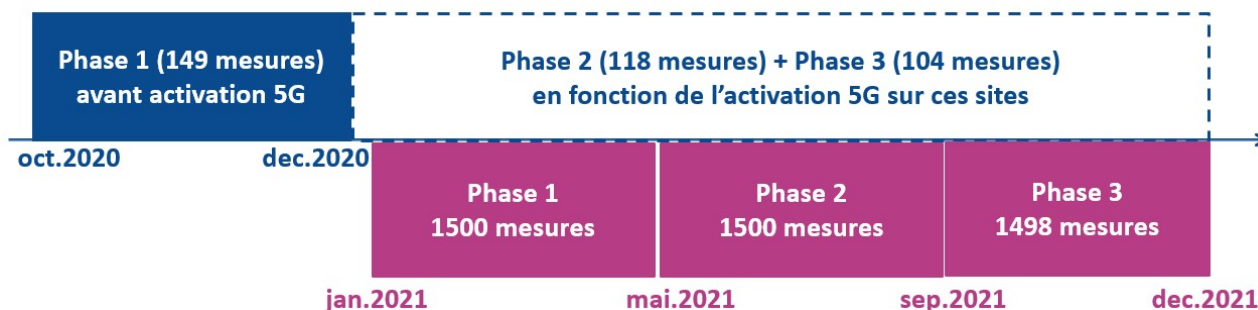


Figure 1. Déroulement des campagnes 5G 2020 et 2021

¹ <https://www.anfr.fr/gerer/sites-servitudes-et-assignments/servitudes/nos-missions>

Pour chaque site identifié dans le programme, trois mesures sont réalisées en trois phases :

- Phase 1 : une mesure initiale est réalisée avant l'arrivée de la 5G sur chaque. Cette phase s'est déroulée entre octobre et décembre 2020 pour la campagne 2020. Elle s'est déroulée entre janvier et mai 2021 en ce qui concerne la campagne 2021.
- Phase 2 : une deuxième mesure est réalisée après 4 mois environ de mise en service de la 5G. Cette phase s'est déroulée tout au long de l'année 2021 pour la campagne 2020, en fonction du déploiement opérationnel de la 5G sur ces sites. Elle s'est déroulée entre mai et septembre 2021 pour la campagne 2021.
- Phase 3 : une troisième mesure est réalisée après environ 8 mois de mise en service. Elle s'est déroulée en fin d'année 2021 pour les deux campagnes.

En supplément de ces sites (représentés sur la Figure 1), 336 sites supplémentaires ont pu faire l'objet de mesures en fin d'année 2021 et sont rajoutés dans le programme pour analyse ultérieure.

Par ailleurs, lors de la deuxième phase de 2021, 955 sites (25 en bande 700 MHz, 323 en bande 2 100 MHz et 607 en bande 3 500 MHz) qui avaient fait l'objet de mesures initiales en phase 1 n'étaient pas encore opérationnels en 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.

Enfin, certains sites faisant partie de la campagne 2020 n'étaient toujours pas mise en service en 2021 et ont donc été retirés du programme.

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. Pour la téléphonie mobile, ces valeurs limites sont comprises entre 36 V/m et 61 V/m selon les fréquences (cf. Figure 2).

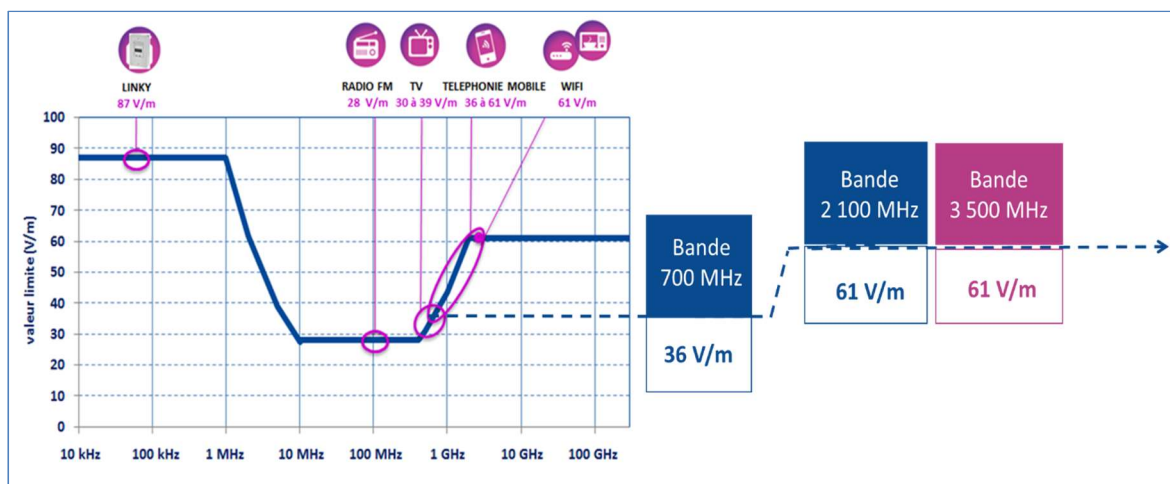


Figure 2. Valeurs limites réglementaires pour le public fixées en France par le décret du 3 mai 2002 n° 2002-775

- 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 et protocole de mesure

3.1. Lieux de mesures

Les sites ont été sélectionnés, au démarrage du programme et avant l'arrivée de la 5G, sur la base des demandes d'autorisation COMSIS déposées par les opérateurs de téléphonie mobile pour préparer l'activation de la 5G sur ces sites, ce qui a permis de cibler les premiers sites dotés de la 5G. 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.

La répartition sur la France métropolitaine des sites 5G étudiés dans ce rapport est illustrée dans la Figure 3.

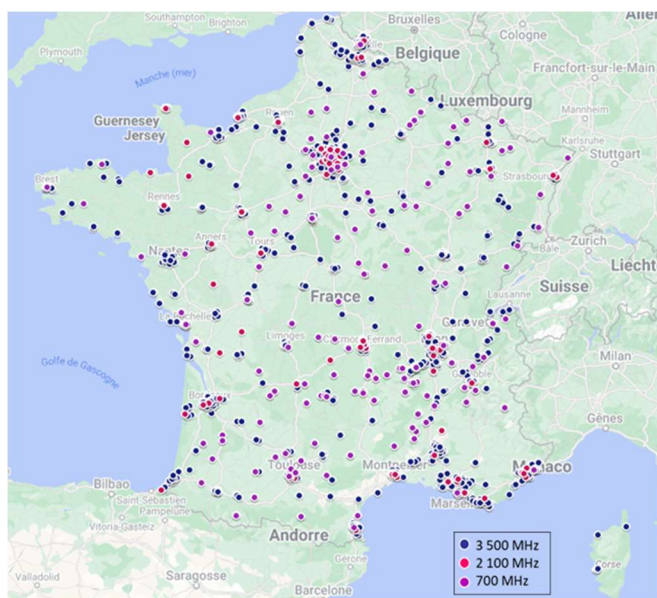


Figure 3. Répartition des sites 5G en France Métropolitaine

3.2. Répartition des sites

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

Parmi les sites sélectionnés² dans le cadre de ce programme 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 % résidant en zone urbaine)³.

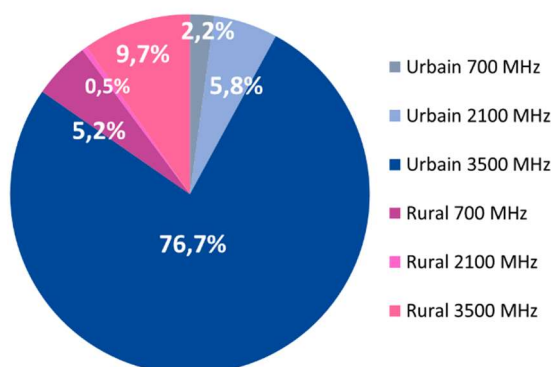


Figure 4. Répartition des sites par fréquences et types d'environnement

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

- Sur 142 sites 5G 700 MHz, 42 sont implantés dans des milieux urbains (30 %) et 100 dans des milieux ruraux (70 %).
- Sur 121 sites 5G 2 100 MHz, 112 se trouvent dans des milieux urbains (93 %) et 9 dans des milieux ruraux (7 %).
- Sur 1678 sites 5G 3 500 MHz, 1 489 se situent dans des milieux urbains (89 %) et 189 dans des milieux ruraux (11 %).

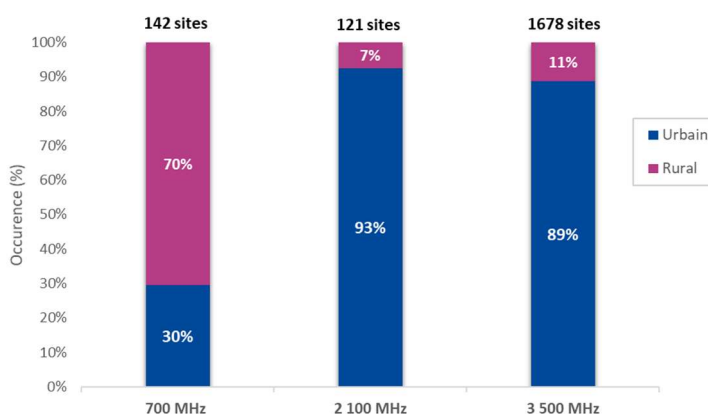


Figure 5. Répartition des sites en fonction de la technologie et du type d'environnement

² Seuls les points sélectionnés qui ont fait l'objet d'au moins une mesure sont pris en compte dans cette répartition

³ <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 sites 5G toutes bandes confondues ont été répartis entre chaque opérateur au vu de leurs stratégies initiales de déploiement, à savoir :

- 142 sites en bande 700 MHz de Free Mobile ;
- 121 sites en bande 2 100 MHz dont, par ordre décroissant en nombre de sites, 56 de SFR, 42 de Bouygues Telecom et 19 d'Orange ;
- 1 678 sites en bande 3 500 MHz, dont 430 de Free Mobile, 424 de Bouygues Telecom, 415 sites d'Orange et 409 de SFR.

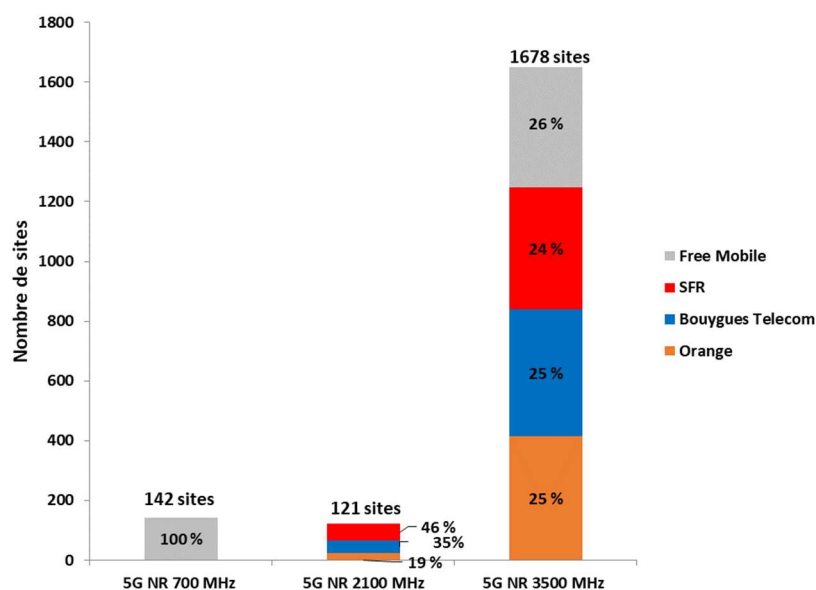


Figure 6. Répartition des sites par bande de fréquences et par opérateur

3.3. Protocole de mesures

Le protocole de mesures ANFR en vigueur⁴ 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, en fonction des bandes de fréquences. Il faut par ailleurs

⁴ https://www.anfr.fr/fileadmin/mediatheque/documents/expance/2017-08-28__Protocole_de_mesure_V4.pdf

rappeler que, selon le protocole 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, en visibilité directe du site ciblé et à une distance de 100 m environ.

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 déployées précédemment (2G, 3G et 4G) 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, inférieur à 30 %.

Avec les antennes à faisceaux orientables de la 5G, une plus grande variabilité spatiale et temporelle est attendue 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 proposé⁵, 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).

Au début du déploiement d'une nouvelle technologie, sa charge est faible notamment du fait que peu d'utilisateurs disposent des terminaux et des forfaits adaptés. Ainsi, au lancement de la 5G dans la bande 3,4 – 3,8 GHz exclusivement utilisée pour la 5G, les niveaux mesurés étaient très faibles comme attendus du fait que le réseau 5G était très peu chargé. Pour mesurer un niveau d'exposition plus représentatif de l'exposition créée à terme par la 5G dans cette bande de fréquence, l'ANFR a choisi de solliciter volontairement les antennes 5G en téléchargeant un fichier de 1 Go pour représenter une charge réaliste de l'antenne, conformément aux hypothèses prises pour la définition de l'indicateur de l'exposition.

Afin de faciliter la lecture de ce document, une mesure réalisée avant la mise en service de la 5G sera notée mesure « avant », celle réalisée après environ 4 mois de mise en service de la 5G sera notée mesure « après 1 » et celle effectuée après environ 8 mois de déploiement opérationnel sera notée mesure « après 2 ». Un couple de mesure avant et après l'activation de la 5G sera ainsi noté « avant/après 1 » ou « avant/après 2 » selon la phase de la campagne considérée. Un trio de mesures représentant les 3 phases de la campagne sera noté mesures « avant/après 1/après 2 ».

⁵ <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/>

4. Analyse des niveaux d'exposition sur les sites 5G 3 500 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.

Parmi les sites sélectionnés hébergeant la 5G en bande 3 500 MHz, 1 678 ont fait l'objet de mesures d'exposition globale après leur déploiement opérationnel en 5G pendant la phase 2 de la campagne et disposent donc d'une mesure « après 1 » et 1 358 ont pu être remesurés en phase 3 et disposent donc d'une mesure « après 2 ». Les sites correspondent à ceux pour lesquels le niveau d'exposition global était d'au moins environ 2 V/m disposent en général d'un trio de mesures détaillées en fréquence « avant/après 1/ après 2 » et pourront ainsi faire l'objet de comparaisons afin d'analyser l'évolution de la contribution de la bande 3 500 MHz

En complément 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 464 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.

Cette partie est organisée comme suit :

- en premier lieu, les niveaux d'exposition globale seront étudiés sur 1 358 sites avant et après la mise en service de la 5G.
- en deuxième lieu, les niveaux d'exposition globale seront étudiés sur les sites les plus forts, soit 141 sites suivis par une analyse détaillée de la contribution de la bande 3 500 MHz sur ces sites ;
- et en dernier lieu, les mesures spécifiques en présence de trafic seront exploitées sur 464 sites pour estimer l'exposition à terme, en présence d'une majorité de terminaux abonnés à la 5G.

4.1. Analyse des niveaux d'exposition globale

La Figure 7 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.

Il en ressort de la figure que la répartition est presque équivalente entre les mesures « avant » et « après 1 » ; les deux mesures restent comparables. Cette tendance a évolué durant la période de septembre à décembre 2021, où une augmentation du niveau global d'exposition est observée. En effet, il en ressort des histogrammes tracés sur la Figure 7 que 11 % des points qui étaient dans la tranche « entre 0 et 1 V/m » en phase 1 quittent cette tranche car ils deviennent plus exposés en phase

3 et passent vers les tranches supérieures. Cette augmentation reste néanmoins modérée car 83 % des mesures « après 2 » se maintiennent à des valeurs inférieures à 2 V/m contre 88 % des mesures « avant » et « après 1 ».

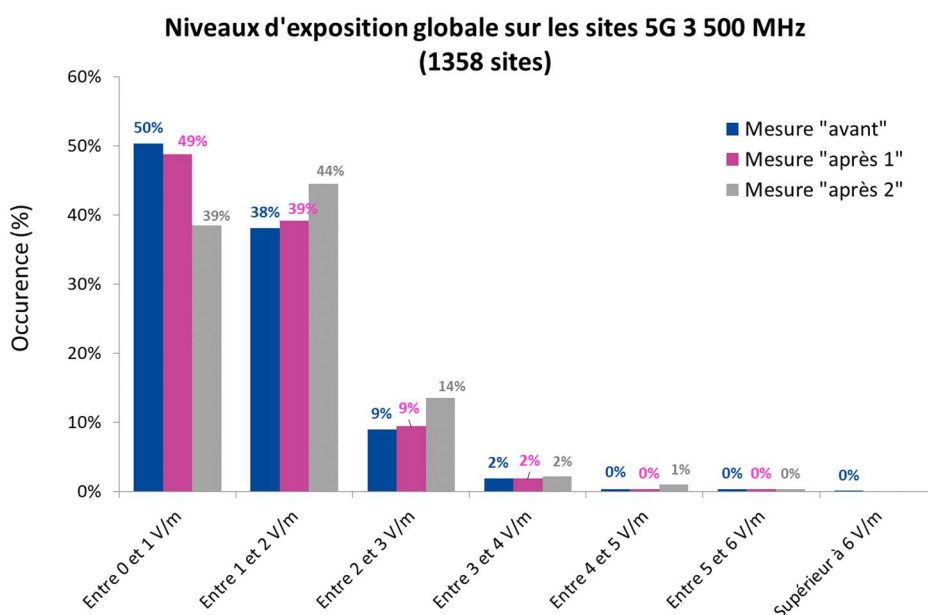


Figure 7. Distribution des niveaux d'exposition globale avant et après l'activation de la 5G sur 1 358 sites 3 500 MHz

La comparaison entre les paramètres statistiques issus des données de l'exposition globale « avant/après 1/après 2 » indiqués dans le Tableau 1 confirment cette première tendance. En effet, le niveau moyen de l'exposition est de 1,16 V/m pour la mesure « avant », de « 1,17 V/m » pour la mesure « après 1 » et de « 1,34 V/m » pour la mesure « après 2 », soit une variation moyenne qui passe de 0,01 V/m (avoisinant le zéro) pour la phase 2 à 0,18 V/m pour la phase 3.

Il en ressort une augmentation en moyenne de 0,18 V/m en phase 3 là où elle était quasi-nulle en phase 2.

	Nombre de mesures	Moyenne (V/m)	Médiane (V/m)	Écart-type	Max (V/m)
Exposition globale 5G 3 500 MHz « avant »	1358	1,16	0,99	0,75	6,19
Exposition globale 5G 3 500 « après 1 »	1358	1,17	1,01	0,74	5,41
Exposition globale 5G 3 500 « après 2 »	1358	1,34	1,19	0,79	5,83
Variation « avant/après 1 » (V/m)	1358	0,01	0,02	-0,01	-0,78
Variation « avant/après 2 » (V/m)	1358	0,18	0,2	0,04	-0,36

Tableau 1. Comparaison des statistiques des niveaux de champ de l'exposition globale avant et après l'activation la 5G sur 1 358 sites 5G 3 500 MHz

Afin de mieux caractériser la variation entre les mesures « avant » et « après 1/après 2 », la variation locale est étudiée pour observer comment les niveaux de champ se répartissent localement (c'est-à-dire site par site).

Pour cela, la distribution statistique des écarts entre les trios de mesures « avant/après 1/après 2 » est caractérisée sur la Figure 8 par des histogrammes de tranches de 0,3 V/m et modélisée par la densité de probabilité de la loi normale et par sa fonction de distribution cumulative (CDF) sur la Figure 9.

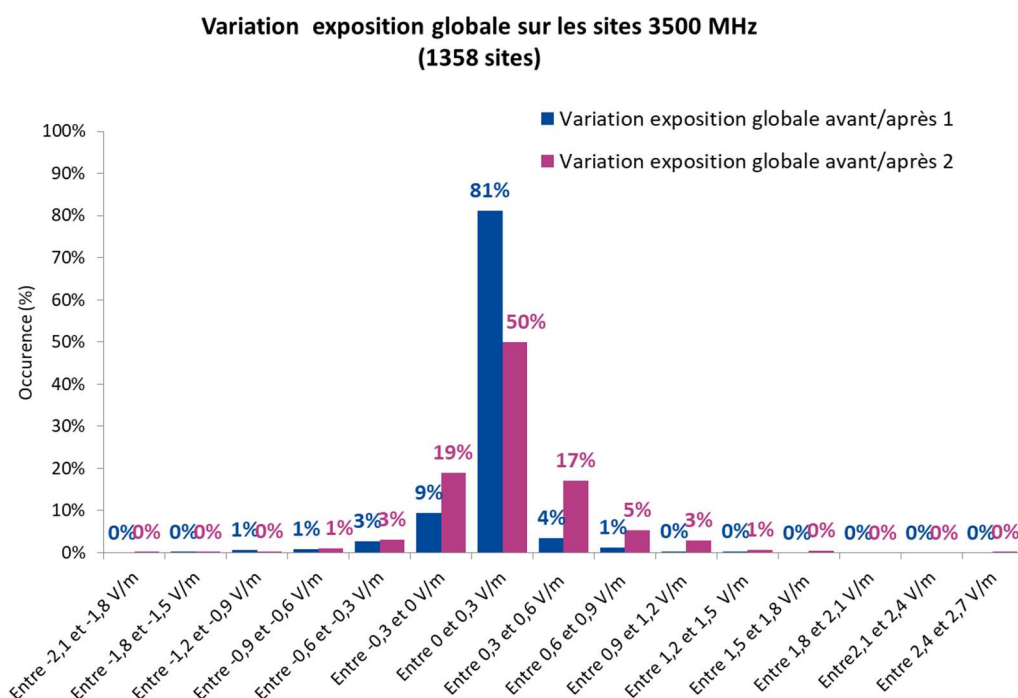


Figure 8. Distribution des écarts entre les niveaux d'exposition globale avant et après l'activation de la 5G sur 1 358 sites 3 500 MHz

Les histogrammes confirment une variation plus importante en phase 3 par rapport à la phase 2 où dans 90 % des cas, la variation se situait entre -0,3 V/m et 0,3 V/m (non significative et inférieure à la sensibilité de la sonde), contre 69 % en phase 3. La densité de probabilité et la CDF permettent de facilement constater que la distribution de la variation « avant/après 2 » n'est plus centrée sur zéro comme cela est le cas pour la variation « avant/après 1 ». Il en ressort également que les valeurs à 90 % et 99 % sont plus importantes pour les variations « avant/après 2 ».

En somme, la variation entre les mesures réalisées après 8 mois de mise en service est plus importante que celle après 4 mois de mise en service, traduisant une légère augmentation des niveaux d'exposition globale.

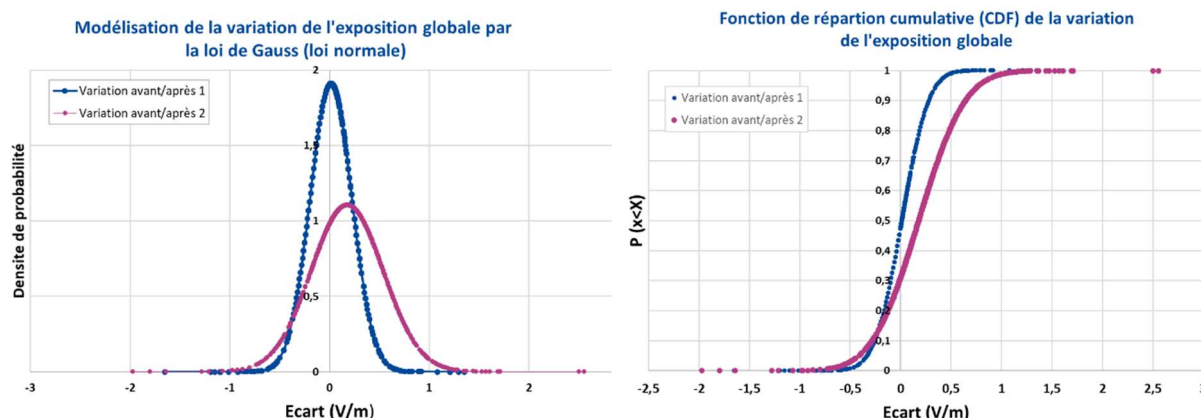


Figure 9. Densité de probabilité et fonction de répartition de la variation de l'exposition globale avant et après l'activation de la 5G sur 1 358 sites 3 500 MHz

En conclusion, l'analyse de l'exposition globale sur les sites hébergeant la 5G sur la bande 3 500 MHz a permis de montrer qu'aucune évolution significative n'a été constatée après 4 mois de mise en service. En revanche, après 8 mois, une évolution à la hausse est observée, avec une valeur d'exposition moyenne qui passe de 1,16 V/m à 1,34 V/m.

Les mesures de l'exposition globale ne permettent pas d'identifier quel est le service qui contribue à cette augmentation, c'est pourquoi des mesures détaillées en fréquences ont été réalisées et sont analysées dans le prochain paragraphe.

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

Parmi les 1 358 sites, 141 sites les plus exposés (au moins une mesure de valeur globale de 2 V/m ou plus) ont fait l'objet de mesures détaillées pendant les phases 2 et 3 de la campagne, ce qui nous permet de suivre l'évolution de la contribution de chaque bande de fréquence. Tout d'abord, les niveaux d'exposition globale seront comparés sur ces 141 sites, puis les tendances seront comparées au jeu complet de mesures (1 358 mesures).

La Figure 10 donne la répartition des niveaux de champ par tranche de 1 V/m sur les 141 sites les plus exposés. Les résultats font ressortir une augmentation des tranches supérieures pendant la phase 3. En effet, 8 points (6 %) rejoignent la tranche « entre 4 et 5 V/m » et deviennent plus exposés, la proportion dans cette tranche passe donc de 3 % à 9 %. 3 points rejoignent la tranche « entre 3 et 4 V/m », ce qui fait passer le pourcentage dans cette tranche de 18 % avant la mise en service à 21 % après 8 mois de mise en service.

Par ailleurs, 23 points deviennent moins exposés en quittant leur tranche initiale « entre 2 et 3 V/m » pour la tranche « entre 1 et 2 V/m » ce qui fait baisser le pourcentage de 72 % avant mise en service à 55 % après 8 mois de mise en service, en analysant les données, on constate que quasi la majorité des points a une valeur avoisinant les 2 V/m avant comme après la mise en service de la 5G (exemple : une

mesure à 2,08 V/m « avant » qui passe à 2,11 V/m « après 1 » puis à 1,92 V/m « après 2 »). Les points oscillent d'une tranche à une autre mais les valeurs restent autour de 2 V/m.

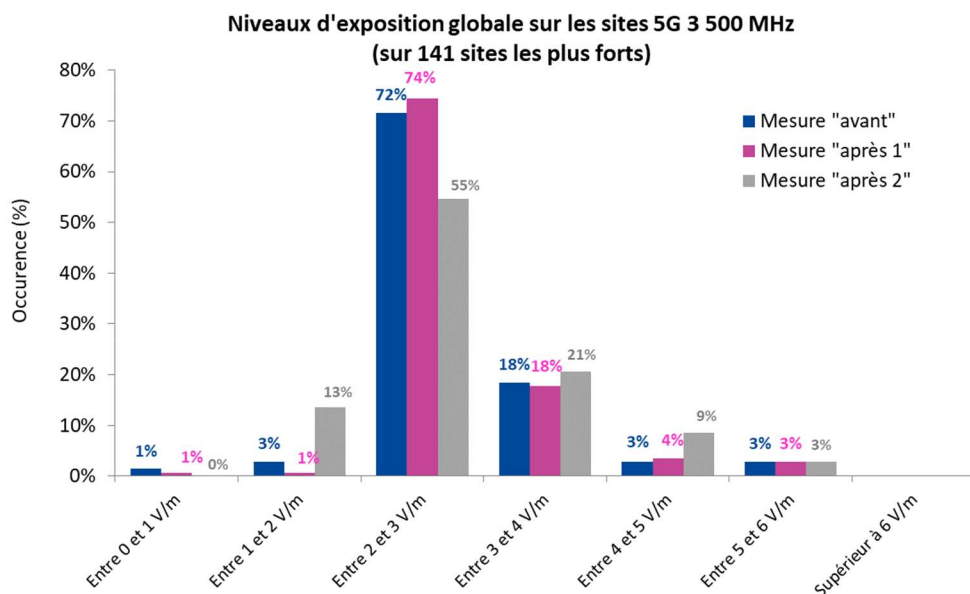


Figure 10. Distribution des niveaux d'exposition globale avant et après l'activation de la 5G sur 141 sites 3 500 MHz

Le Tableau 2 restitue les indicateurs statistiques issus des trois phases, il en ressort une augmentation de l'écart moyen qui était de 0,02 V/m entre le couple de mesures « avant/après 1 » et qui passe à 0,13 V/m pour la comparaison avec le couple de mesures « avant/après 2 ». Cette augmentation reste significativement très faible mais relativement plus importante par rapport à l'état « après 1 ». Les variations sont comparables à celles observées sur le jeu complet de mesures (cf. Tableau 1).

	Nombre de mesures	Moyenne (V/m)	Médiane (V/m)	Écart-type	Max (V/m)
Exposition globale 5G 3 500 MHz « avant »	141	2,66	2,44	0,81	5,77
Exposition globale 5G 3 500 « après 1 »	141	2,68	2,45	0,74	5,41
Exposition globale 5G 3 500 « après 2 »	141	2,79	2,54	0,87	5,83
Variation « avant/après 1 » (V/m)	141	0,02	0,01	-0,07	-0,36
Variation « avant/après 2 » (V/m)	141	0,13	0,10	0,05	-0,06

Tableau 2. Statistiques des niveaux d'exposition globale sur les 141 sites 5G 3 500 MHz les plus exposés avant et après activation de la 5G

Les paramètres statistiques précédemment analysés montrent une tendance globale à l'augmentation de l'exposition, il est possible d'évaluer l'écart absolu des niveaux de champs, à l'endroit où la mesure est effectuée à 4 et 8 mois d'intervalle. La variation locale (site par site) illustrée sur la Figure 11 permet d'observer comment se répartissent les niveaux de champs.

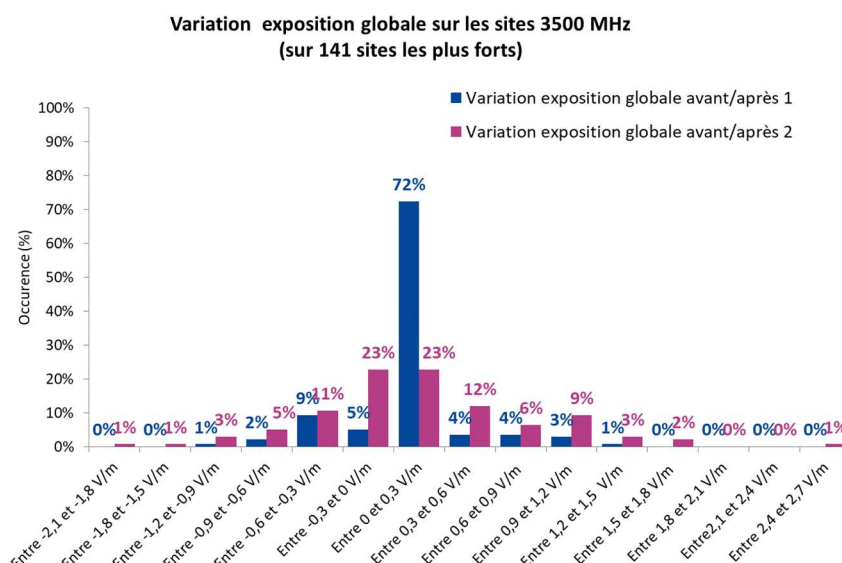


Figure 11. Distribution des écarts entre la contribution de la bande 3 500 MHz avant et après l'activation de la 5G sur 141 sites les plus exposés

Dans 77 % des points mesurés, la variation à 4 mois d'intervalle se situait entre -0,3 V/m et 0,3 V/m (non significative et inférieure à la sensibilité de la sonde). Cette proportion est passée à 46 % après 8 mois de la mesure initiale. La fonction de répartition CDF et la densité de probabilité tracées sur la Figure 12 permettent de constater que la distribution de la variation « avant/après 2 » n'est plus centrée sur zéro comme cela est le cas pour la variation « avant/après 1 ». On peut aussi noter que, plus on s'éloigne de la médiane (CDF=0,5) pour les résultats de la phase 3, moins la pente est raide, traduisant ainsi des écarts plus importants. De même, la PDF montre une plus grande dispersion. Il en ressort également que les valeurs à 90 % et 99 % sont plus importantes pour les variations « avant/après 2 » comparées aux centiles relatifs à la variation « avant/après 1 ».

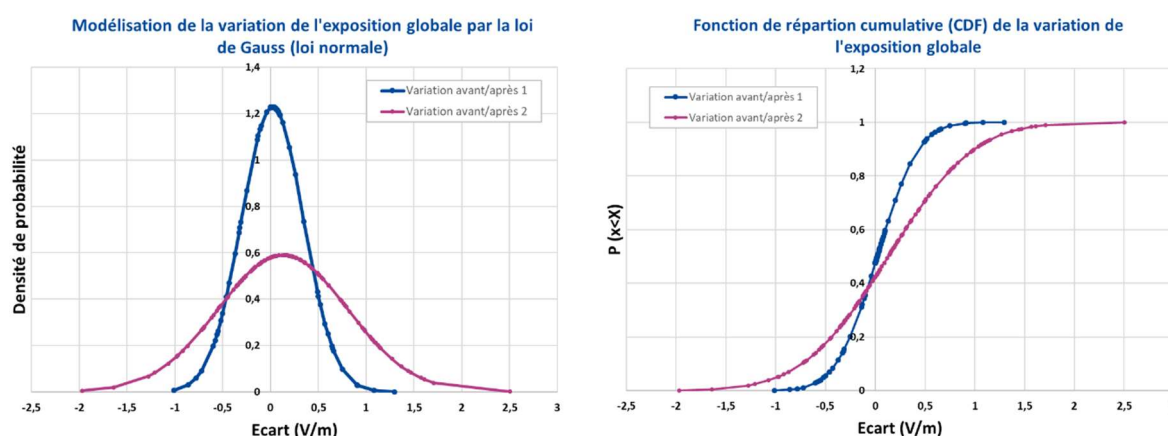


Figure 12. Distribution des écarts entre les niveaux d'exposition globale avant et après l'activation de la 5G sur 141 sites 3 500 MHz

Afin d'analyser de plus près cette augmentation, les mesures détaillées en fréquence sont exploitées dans ce qui suit en isolant la contribution du service de téléphonie sur la bande 3 500 MHz mais également sur les autres bandes de fréquences. Cette analyse portera que sur les mesures « après 1 » et « après » 2 car, comme expliqué précédemment, certains sites ont été abandonnés (la 5G n'était

pas encore activée pendant la campagne) au profit d'autres sites 5G en service au moment de la mesure après 1. En effet, seuls 49 sites parmi les 141 ont fait l'objet de mesures détaillées avant mise en service.

En premier lieu, la Figure 13 donne le service le plus contributeur à l'exposition globale où on constate que les bandes 800 MHz et 900 MHz sont les bandes contributrices principales dans environ 55 % des cas aussi bien en phase 2 qu'en phase 3. Il apparaît par ailleurs que la bande 2 100 MHz devient contributrice principale dans 9 % des cas en phase 3, là où elle était à 1% pendant la phase 2.

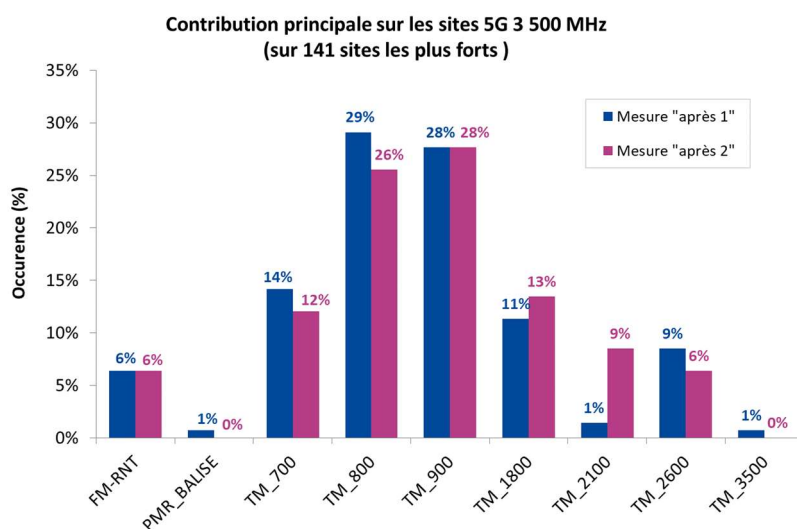


Figure 13. Distribution des contributions principales à l'exposition globale par service et bande de fréquence

En deuxième lieu et afin de mieux représenter l'exposition par service, les histogrammes de la Figure 14 montrent qu'en moyenne l'exposition dans toutes les bandes est en augmentation. L'augmentation de l'exposition moyenne par bande de fréquence n'apparaît relativement plus importante qu'aux fréquences où la LTE (4G) est présente (TM_1800 et TM_2100). En ce qui concerne la bande 3 500 MHz, il n'est pas possible de conclure à une augmentation, les niveaux étant non significatifs. Il convient par ailleurs de souligner que les niveaux relevés restent très faibles par rapport aux valeurs limites réglementaires (36 V/m pour la bande de téléphonie mobile la plus basse et 61 V/m pour la bande la plus haute).

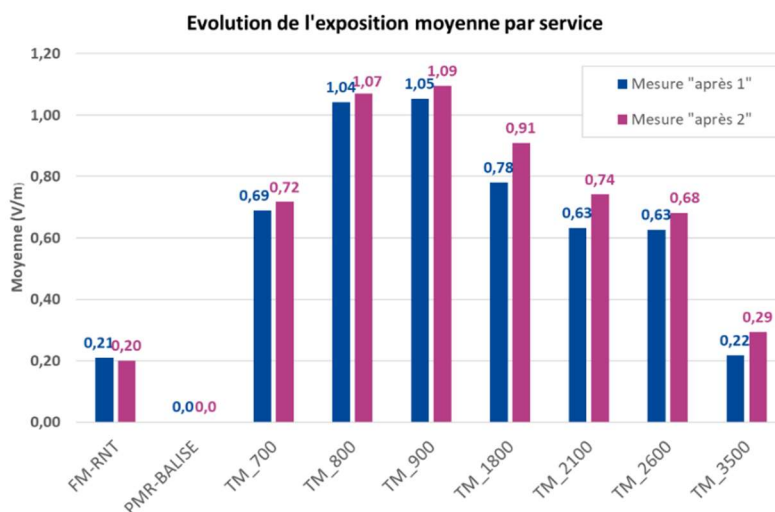


Figure 14. Evolution de l'exposition moyenne entre les phases 2 et 3.

Les statistiques données dans le Tableau 3 montrent une augmentation des niveaux les plus élevés (percentile à 99 %) sur toutes les bandes de fréquences de la téléphonie mobile à l'exception de la bande 3 500 MHz. Ceci expliquerait la hausse de la moyenne.

La moyenne de la contribution de la bande 3 500 MHz sur les sites les plus exposés est de 0,29 V/m.

	TM 700	TM 800	TM 900	TM 1800	TM 2100	TM 2600	TM 3500
Moyenne « après 1 » (V/m)	0,69	1,04	1,05	0,78	0,63	0,63	0,22
Moyenne « après 2 » (V/m)	0,72	1,07	1,09	0,91	0,74	0,68	0,29
Médiane « après 1 » (V/m)	0,68	0,93	1,04	0,74	0,60	0,54	0,16
Médiane « après 2 » (V/m)	0,65	0,90	1,03	0,79	0,67	0,64	0,25
Percentile 99 % « après 1 » (V/m)	1,96	2,78	2,14	2,43	1,57	1,77	1,08
Percentile 99 % « après 2 » (V/m)	2,49	3,27	2,48	2,48	2,01	1,88	1,01
Max « après 1 » (V/m)	2,36	3,27	2,57	2,60	1,80	2,10	2,10
Max « après 2 » (V/m)	2,98	3,64	2,91	2,82	2,39	2,16	1,57

Tableau 3. Statistiques des services de la téléphonie mobile en fonction des bandes de fréquences

4.3. Conclusion sur l'analyse globale et détaillée

En conclusion, une légère augmentation sur le niveau global d'exposition a été observée sur 1 358 sites mesurés à 4 mois puis 8 mois d'intervalle après qu'ils sont devenus opérationnels en 5G. Cette augmentation a été relevée après 8 mois, soit pendant la période allant de septembre à décembre 2021.

Parmi ces 1 358 sites, un échantillonnage est réalisé sur les sites les plus exposés. Ainsi, 141 sites ont fait l'objet de mesures détaillées en fréquence pour une analyse plus fine de la contribution émanant de chaque service et bande de fréquences. L'analyse sur le niveau global sur ces 141 sites a permis de confirmer la tendance constatée sur l'ensemble des 1 358 sites. Par ailleurs, l'analyse de l'évolution de l'exposition sur les bandes de fréquences a, quant à elle, permis d'observer une augmentation de l'exposition moyenne sur l'ensemble des bandes de la téléphonie mobile et une augmentation des niveaux les plus forts sur toutes les bandes de fréquences, hormis la bande 3 500 MHz. Elle a permis également de constater que les bandes 800 MHz et 900 MHz sont celles qui contribuent le plus à l'exposition.

Il est possible de conclure, à ce stade de l'étude, que l'augmentation du niveau global sur les sites 5G 3 500 MHz n'est a priori pas liée à une augmentation du niveau de champ sur cette bande mais à une augmentation des niveaux sur toutes les autres bandes de fréquences de la téléphonie mobile traduisant une hausse de trafic.

4.4. Mesures spécifiques 5G avec téléchargement de données

Au démarrage de l'étude, 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 réalisées. Ces mesures sont réalisées hors accréditation. Elles consistent à solliciter l'antenne 5G depuis le lieu de mesure à l'aide d'un téléphone 5G. Le trafic est alors produit en téléchargeant 1 Go de données, ce qui correspond à l'indicateur d'exposition proposé par l'ANFR⁶. Le niveau de champ moyen durant le téléchargement est alors évalué. Les niveaux de champ sont ensuite ramenés en valeur moyenne sur 6 minutes par calcul.

La Figure 15 donne, en gris, le niveau de champ moyen pendant le téléchargement du fichier de 1 Go sur la bande 3 500 MHz ainsi que les niveaux sur 6 minutes avec et sans téléchargement en rose et bleu respectivement.

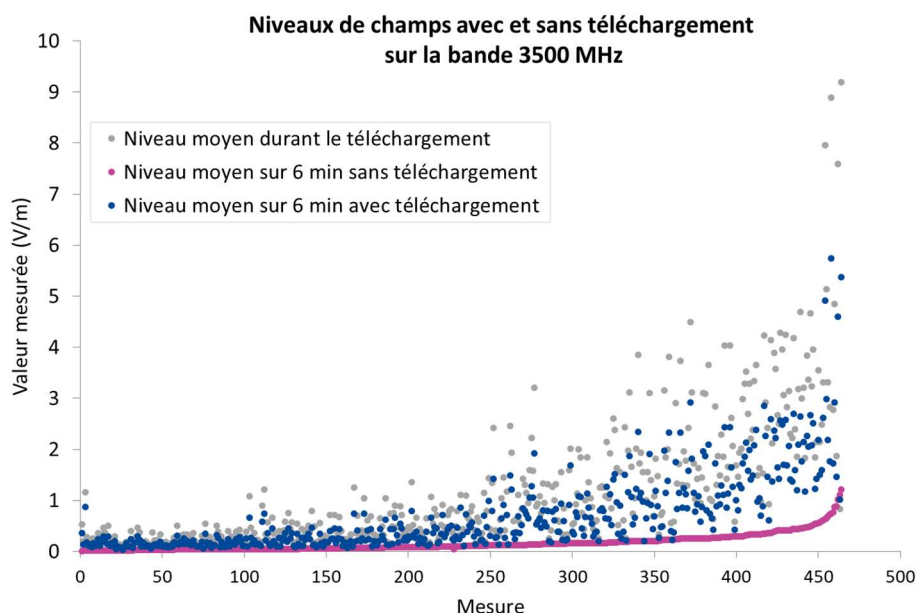


Figure 15. Niveau de champ moyen pendant le téléchargement d'un fichier de 1 Go comparé avec le niveau moyen sans téléchargement sur la bande 3 500 MHz

La figure fait ressortir une augmentation de l'exposition due au téléchargement du fichier.

L'augmentation moyenne calculée entre la mesure sur la bande 3 500 MHz avec téléchargement moyennée sur 6 minutes (en bleu) et le niveau moyen sans téléchargement (en rose) sur cette même bande est de 0,54 V/m. Le niveau moyen calculé dû au seul téléchargement du fichier de 1 Go de données est de 0,68 V/m. Le Tableau 4 donne les statistiques calculées sur la bande 3 500 MHz avec et sans téléchargement.

⁶ <https://www.anfr.fr/toutes-les-actualites/actualites/lanfr-publie-un-rapport-de-mesures-sur-l'exposition-aux-ondes-des-experimentations-5g-et-presente-un-nouvel-indicateur-de-mesure-de-l'exposition/>

	Nombre de mesures	Moyenne (V/m)	Médiane (V/m)	Écart-type	Max (V/m)
Exposition sur la bande 5G 3 500 MHz sans téléchargement	464	0,16	0,10	0,16	1,22
Exposition sur la bande 5G 3 500 MHz avec téléchargement	464	0,70	0,38	0,79	5,75
Variation avec et sans téléchargement (V/m)	464	0,54	0,28	0,63	4,53

Tableau 4. Statistiques sur la bande 3 500 MHz avec et sans téléchargement

Pour évaluer l'utilisation de la bande 3 500 MHz par rapport à l'indicateur proposé par l'ANFR sur la base d'un usage prévisible de la 5G (envoi dans une direction donnée d'1 Go de données toutes les 6 minutes), le taux d'utilisation relatif est calculé à partir de la valeur mesurée sur la bande sans téléchargement (qui correspond au trafic réel pendant la mesure) et de la valeur correspondant au seul téléchargement du fichier 1 Go (qui correspond au trafic estimé à terme). Ce taux a atteint 12 % en moyenne (6 % en médiane), ce qui implique que l'indicateur de l'exposition proposé par l'ANFR demeure pertinent et qu'il n'est pas encore atteint (il serait atteint lorsque le taux atteint 100 %). Cela traduit une utilisation encore faible de la 5G en bande 3 500 MHz fin 2021.

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 relatif au seul téléchargement du fichier 1 Go, issu de la mesure spécifique avec sollicitation de la 5G est intégré par calcul à l'exposition globale cas A et cas B sans sollicitation spécifique du réseau. La Figure 16 donne la répartition des niveaux de l'exposition globale « cas A » avec et sans téléchargement. La Figure 17 donne la répartition de l'exposition globale cumulée « cas B » avec et sans téléchargement.

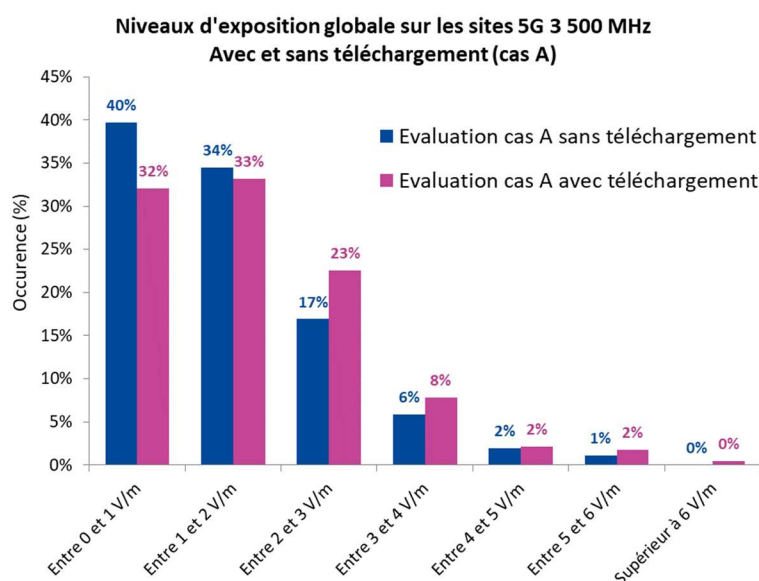


Figure 16. Distribution du niveau moyen sur 6 minutes issu de la mesure spécifique avec sollicitation de la 5G intégré par calcul à l'exposition globale « cas A » et comparé à la mesure « cas A » sans sollicitation spécifique du réseau

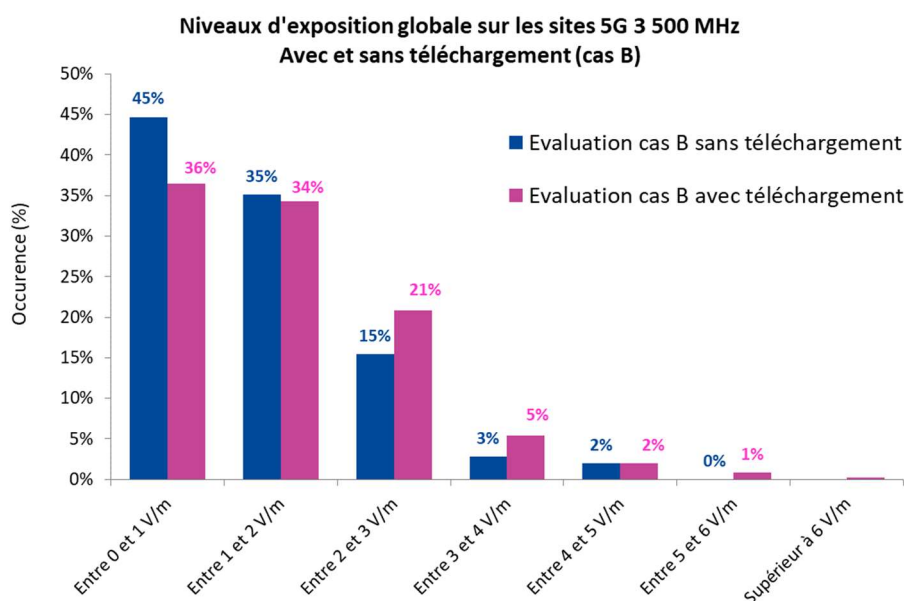


Figure 17. Distribution du niveau moyen sur 6 minutes issu de la mesure spécifique avec sollicitation de la 5G intégré par calcul à l'exposition globale cumulée « cas B » et comparé à la mesure « cas B » cumulée sans sollicitation spécifique du réseau

La comparaison entre les paramètres statistiques issus des données de l'exposition globale avec et sans téléchargement sur la bande 3 500 MHz sont indiqués dans le Tableau 5.

	Nombre de mesures	Moyenne (V/m)	Médiane (V/m)	Écart-type
Exposition globale cas A sans téléchargement	464	1,51	1,24	1,00
Exposition globale cas A avec téléchargement	464	1,71	1,53	1,12
Variation (V/m)	464	0,23	0,29	0,12
Exposition globale cas B sans téléchargement	464	1,33	1,13	0,89
Exposition globale cas B avec téléchargement	464	1,58	1,38	1,03
Variation (V/m)	464	0,25	0,25	0,15

Tableau 5. Comparaison des statistiques des niveaux de champ de l'exposition globale avec et sans téléchargement sur 464 sites 5G 3 500 MHz

L'augmentation moyenne observée entre l'exposition globale sans téléchargement de fichier (qui correspond à l'exposition au démarrage de la 5G) et l'exposition globale relatif au seul téléchargement (qui correspond à l'exposition attendue à terme) du fichier de 1 Go est de 21 % pour le cas A et 31 % pour le niveau cumulé cas B, conforme à l'indicateur d'exposition introduit par l'ANFR.

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 hébergeant la 5G sur la bande 2 100 MHz, 135 ont été identifiés dans le cadre ce programme et ont fait l'objet de mesure « avant », 121 ont pu faire l'objet de mesure « après 1 » dont 101 ont également bénéficié d'une mesure « après 2 ». Parmi ces sites, la moitié a fait l'objet de mesures détaillées en fréquences pendant les 3 phases.

Dans un premier temps, l'analyse portera sur l'exposition globale sur 101 sites mesurés 3 fois. Dans un deuxième temps, l'étude portera sur l'analyse de la seule contribution de la bande 2 100 MHz suivie par l'analyse de la contribution émanant des autres bandes de fréquences dédiées à la téléphonie mobile.

Rappelons que cette bande de fréquence n'étant pas exclusivement réservée à la 5G, les moyens de mesure ne permettent pas de distinguer la contribution 5G de la contribution 4G dans le niveau mesuré de la bande.

5.1. 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 101 sites 5G 2 100 MHz.

L'analyse statistique de l'exposition globale illustrée sur la Figure 18 par tranche de 1 V/m fait ressortir une tendance à la hausse de l'exposition étant donné que le nombre de points en dessous de 1 V/m diminue et à l'inverse le nombre de points dans les tranches supérieures augmente.

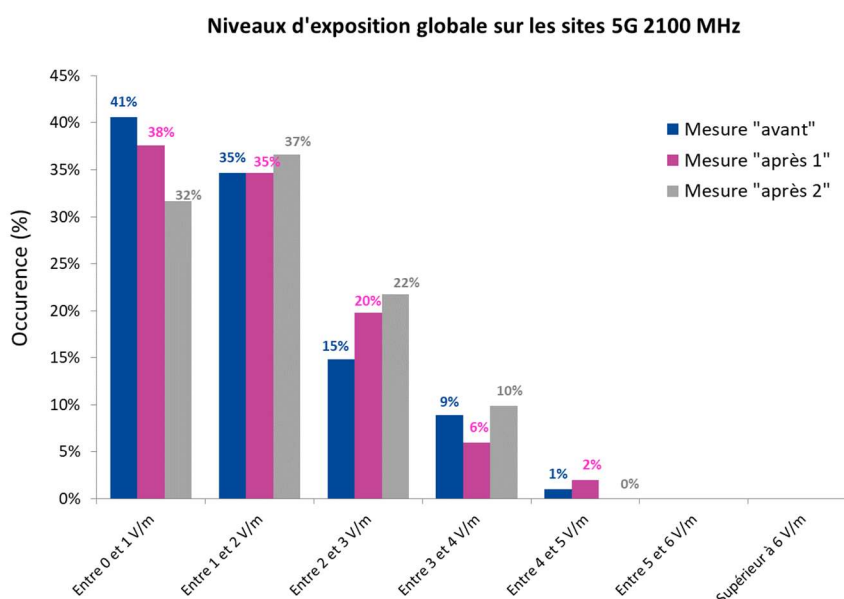


Figure 18. Distribution des niveaux d'exposition globale avant et après l'activation de la 5G sur 101 sites 2 100 MHz

Les statistiques des niveaux de l'exposition globale mesurés sur les sites 5G 2 100 MHz sont précisées dans le Tableau 6. On peut noter les mêmes tendances constatées sur les sites 3 500 MHz. En effet, l'exposition est restée stable entre les phases 1 et 2 (variation moyenne de -0,02 V/m). Une évolution vers la hausse est constatée en phase 3 (variation moyenne de 0,11 V/m).

	Nombre de mesures	Moyenne (V/m)	Médiane (V/m)	Écart-type	Max (V/m)
Exposition globale 5G 2 100 MHz « avant »	101	1,52	1,16	0,96	4,98
Exposition globale 5G 2 100 MHz « après 1 »	101	1,50	1,20	0,94	4,33
Exposition globale 5G 2 100 MHz « après 2 »	101	1,63	1,45	0,95	3,97
Variation « avant/après 1 » (V/m)	101	-0,02	0,04	-0,02	-0,65
Variation « avant/après 2 » (V/m)	101	0,11	0,29	-0,01	-1,01

Tableau 6. Comparaison des statistiques des niveaux de champ de l'exposition globale avant et après l'activation la 5G sur 101 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 2 100 MHz, la Figure 19 donne la distribution des écarts entre chaque trio de points mesurés « avant/après 1/après 2 », par pas de 0,3 V/m.

En phase 2, il en ressort que 69 % des écarts entre les niveaux « avant/après 1 » se situent entre -0,3 V/m et 0,3 V/m (valeur non significative et inférieure à la sensibilité de la sonde qui est de 0,38 V/m), contre 63 % en phase 3.

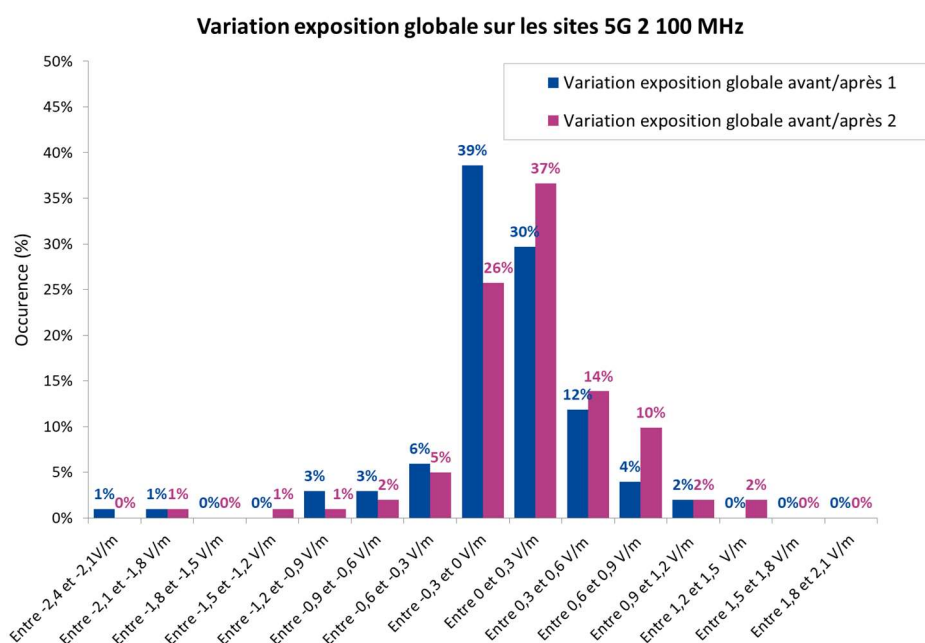


Figure 19. Distribution des écarts entre les niveaux d'exposition globale avant et après l'activation de la 5G sur 101 sites 5G 2 100 MHz

Aussi, le nombre d'écarts positifs entre les niveaux « avant/après 2 » est en hausse. En effet, une augmentation des écarts dans les tranches supérieures dont le niveau est supérieur à 0,3 V/m est enregistrée, 29 % des points sont supérieurs à 0,3 V/m là où ils étaient 18 % pour les écarts « avant/après1 ».

Les résultats présentés dans cette partie traduisent une augmentation moyenne du niveau global de l'exposition entre septembre et décembre 2021 de 0,11 V/m.

Afin de savoir si cette augmentation est liée à l'activation de la 5G, les sites les plus exposés ont fait l'objet de mesures détaillées en fréquences et seront étudiés dans le prochain paragraphe.

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

Parmi les 101 sites, les 50 les plus exposés (si au moins une mesure de valeur globale est de 2 V/m) ont fait l'objet de mesures détaillées pendant les phases 2 et 3 de la campagne, ce qui permet de suivre l'évolution de la contribution de chaque bande de fréquences.

Tout d'abord, les niveaux d'exposition globale seront comparés sur ces 50 sites afin de confirmer si sur ce nombre réduit de sites, les tendances constatées sur l'analyse sur 101 sites restent valables.

La Figure 20 donne la répartition des niveaux d'exposition globale par tranche de 1 V/m sur les 50 sites les plus exposés. Les résultats font ressortir une augmentation des tranches supérieures notamment « entre 2 et 3 V/m » et « entre 3 et 4 V/m » pendant les phases 2 et 3, traduisant une augmentation du niveau global, comme cela a été constaté pour les 101 sites.

Nota : Etant donné le nombre réduit d'échantillons (<100 sites), les résultats sont représentés en absolu et non en relatif.

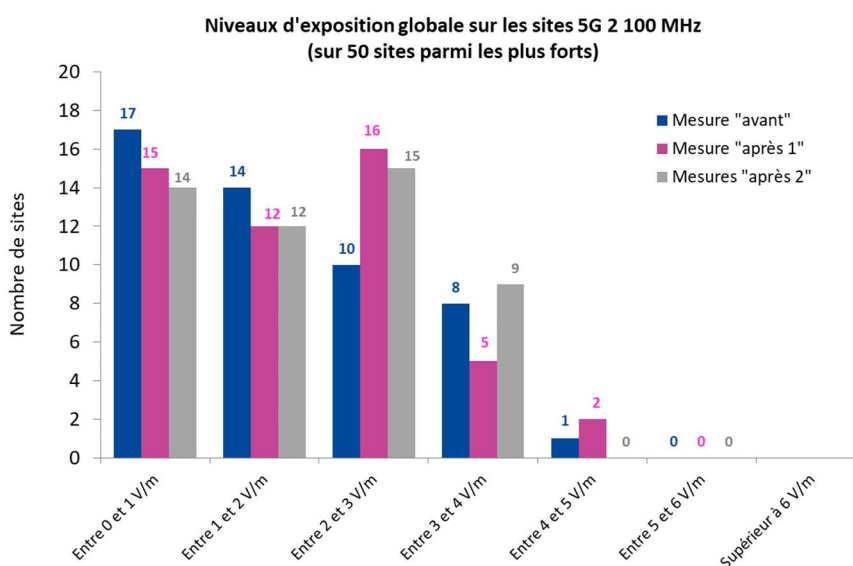


Figure 20. Distribution des niveaux d'exposition sur la bande 2 100 MHz avant et après l'activation de la 5G sur 50 sites 2 100 MHz

Le Tableau 7 donne les statistiques issues des niveaux de l'exposition globale mesurés.

La moyenne, la médiane et l'écart-type restent relativement équivalents en ce qui concerne l'exposition globale sur les sites 5G 2 100 MHz, néanmoins, il est noté une augmentation de l'écart moyen en phase 3 qui passe de 0,04 V/m en phase 2 à 0,13 V/m en phase 3. En phase 2, la variation était très petite avoisinant le zéro.

	Nombre de mesures	Moyenne (V/m)	Médiane (V/m)	Écart-type	Max (V/m)
Exposition globale 5G 2 100 MHz « avant »	50	1,79	1,77	1,12	4,98
Exposition globale 5G 2 100 MHz « après 1 »	50	1,83	1,81	1,08	4,33
Exposition globale 5G 2 100 MHz « après 2 »	50	1,92	1,88	1,06	3,97
Variation « avant/après 1 » (V/m)	50	0,04	0,04	-0,04	-0,65
Variation « avant/après 2 » (V/m)	50	0,13	0,11	-0,06	-1,01

Tableau 7. Comparaison des statistiques des niveaux de champ de l'exposition globale avant et après l'activation la 5G sur 50 sites 2 100 MHz

Afin d'analyser si cette augmentation provient du trafic sur la bande 2 100 MHz, les résultats de la contribution de la seule bande 2 100 MHz sont illustrés dans la Figure 21 pendant les 3 phases.

Les histogrammes ci-après représentent la distribution des valeurs mesurées « avant/après 1/après 2 » par pas de 1 V/m.

Les résultats ne montrent pas une augmentation significative de la contribution de la bande 2 100 MHz entre les 2 phases.

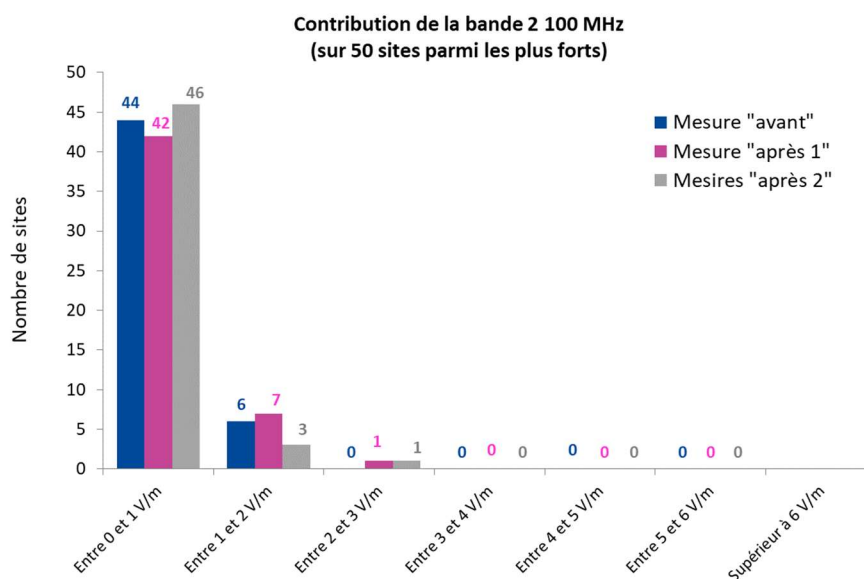


Figure 21. Distribution des niveaux d'exposition sur la bande 2 100 MHz avant et après l'activation de la 5G sur 50 sites 2 100 MHz

Le Tableau 8 récapitule les statistiques des niveaux de champs dus à la seule bande 2 100 MHz.

La moyenne, la médiane et l'écart-type restent équivalents en ce qui concerne la contribution de la bande 2 100 MHz pendant les 3 phases de la campagne. La variation entre les paramètres statistiques est très faible.

	Nombre de mesures	Moyenne (V/m)	Médiane (V/m)	Écart-type	Max (V/m)
Contribution de la bande 2 100 MHz « avant »	50	0,50	0,34	0,43	1,83
Contribution de la bande 2 100 MHz « après 1 »	50	0,53	0,37	0,45	2,58
Contribution de la bande 2 100 MHz « après 2 »	50	0,54	0,40	0,43	2,41
Variation « avant/après 1 » (V/m)	50	0,03	0,03	0,02	0,75
Variation « avant/après 2 » (V/m)	50	0,04	0,06	0,0	0,58

Tableau 8. Comparaison des statistiques des niveaux de champs mesurés sur la bande 2 100 MHz avant et après l'activation de la 5G sur 50 sites

La Figure 22 illustre le service le plus contributeur à l'exposition globale, le Tableau 9 donne la moyenne et la médiane des différentes bandes de fréquence de la téléphonie mobile.

Il en ressort que, comme pour les sites 3 500 MHz, les bandes 800 MHz et 900 MHz sont les bandes contributrices principales dans environ 50 % des cas, suivies par la bande 1 800 MHz.

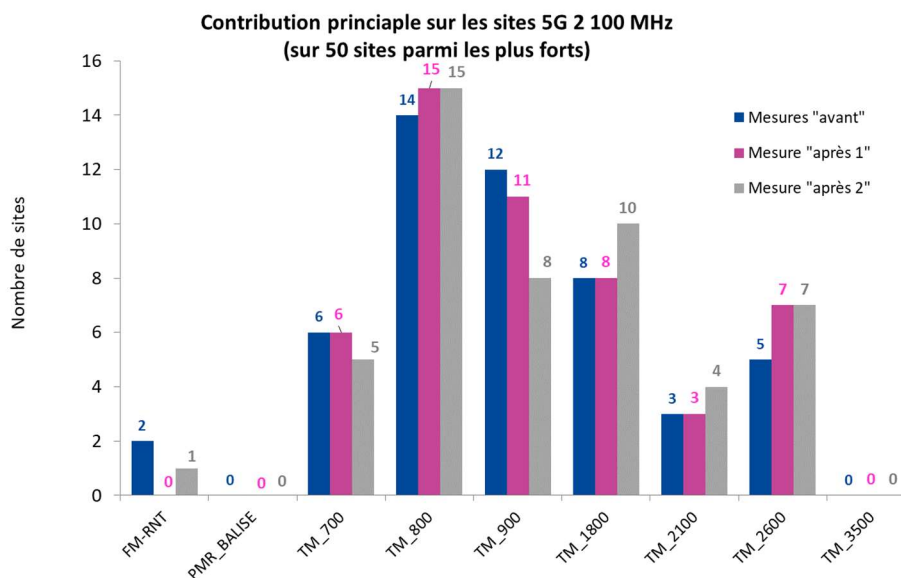


Figure 22. Distribution des contributions principales à l'exposition globale par service et bande de fréquence sur les sites 5G 2 100 MHz

	Cas A	TM 700	TM 800	TM 900	TM 1800	TM 2100	TM 2600	TM 3500
Moyenne « avant » (V/m)	1,79	0,41	0,75	0,70	0,59	0,50	0,49	0,01
Moyenne « après 1 » (V/m)	1,83	0,44	0,80	0,73	0,62	0,53	0,53	0,05
Moyenne « après 2 » (V/m)	1,93	0,45	0,82	0,75	0,68	0,54	0,47	0,13
Médiane « avant » (V/m)	1,77	0,21	0,62	0,51	0,44	0,34	0,41	0
Médiane « après 1 » (V/m)	1,81	0,24	0,74	0,55	0,49	0,37	0,38	0
Médiane « après 2 » (V/m)	1,88	0,37	0,69	0,82	0,53	0,53	0,35	0,11

Tableau 9. Comparaison des statistiques des niveaux de champs mesurés par bande de fréquence avant et après l'activation de la 5G sur 50 sites 2 100 MHz

Une contribution de la bande 3 500 MHz est constatée avec une moyenne de 0,13 V/m lors de la phase 2. On observe que certains sites initialement ciblés comme sites hébergeant la 5G sur la bande 2 100 MHz ont entre-temps évolué pour également déployer la 5G sur la bande 3 500 MHz. Il est aussi possible que la contribution provienne de sites avoisinant le site ciblé.

6. 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, 179 sites ont été identifiés dans le cadre ce programme et ont fait l'objet de mesures avant l'activation de la 5G. Sur ces 179 sites, 143 ont fait l'objet d'une mesure globale en phase 2 et 142 en phase 3.

Ce rapport traite donc des 142 sites pour lesquels on dispose de mesures « avant », « après 1 » et « après 2 ». Sur ces 142 sites, 87 sites ont fait l'objet de mesures détaillées en phase 2 dont les résultats ont été analysés dans le rapport préliminaire. 17 sites ont ensuite fait l'objet de mesures détaillées en phase 3, il s'agit des sites pour lesquels les niveaux d'exposition sont relativement plus importants. Pour la comparaison entre les 3 phases, ce rapport établira l'analyse du niveau global sur 142 sites suivi par l'analyse sur les niveaux détaillés en fréquence sur les 17 sites.

Il convient de rappeler que cette bande n'est pas exclusivement réservée à la 5G, les ressources sont partagées avec la technologie 4G et les équipements de mesure ne permettent pas de distinguer la contribution de la 5G de la contribution de la 4G dans le niveau mesuré dans la bande.

6.1. 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 142 sites avant et après la mise en service de la 5G sur la bande 700 MHz. Il convient de rappeler que la sonde large bande a une sensibilité de 0,38 V/m.

L'analyse statistique de l'exposition globale illustrée sur la Figure 23 par pas de 1 V/m fait ressortir une tendance à la hausse ; le nombre de mesures inférieur à 1 V/m diminue une phase après l'autre.

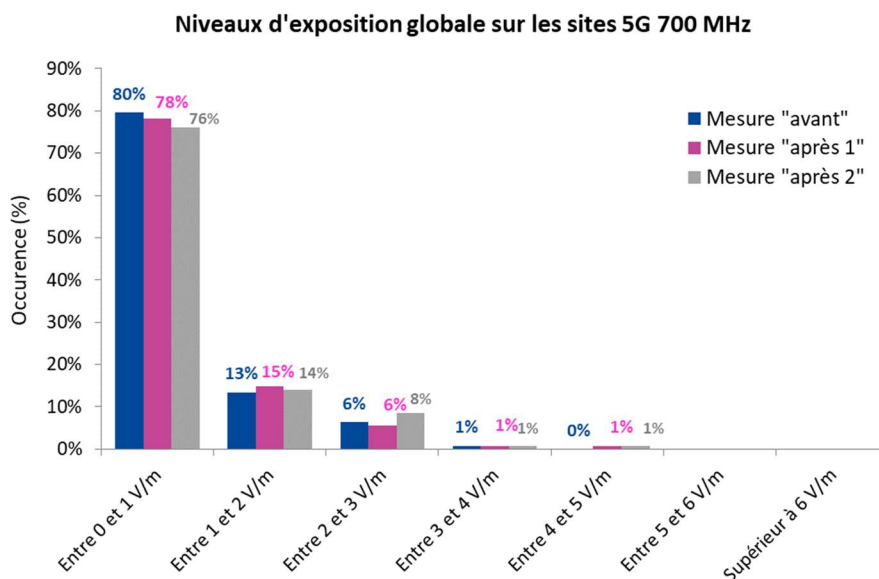


Figure 23. Distribution des niveaux d'exposition globale avant et après l'activation de la 5G sur 142 sites 700 MHz

Le Tableau 10 donne les statistiques des niveaux de champ de l'exposition globale mesurés sur les 142 sites 5G 700 MHz avant et après qu'ils sont devenus techniquement opérationnels. On note une tendance de l'augmentation du niveau moyen mais les indicateurs restent globalement équivalents.

	Nombre de mesures	Moyenne (V/m)	Médiane (V/m)	Écart-type	Max (V/m)
Exposition globale 5G 700 MHz « avant »	142	0,69	0,46	0,65	3,40
Exposition globale 5G 700 MHz « après 1 »	142	0,75	0,51	0,72	4,50
Exposition globale 5G 700 MHz « après 2 »	142	0,79	0,55	0,72	4,11
Variation « avant/après 1 » (V/m)	142	0,06	0,04	0,08	1,10
Variation « avant/après 2 » (V/m)	142	0,09	0,09	0,07	0,71

Tableau 10. Comparaison des statistiques des niveaux de champ de l'exposition globale avant et après l'activation de la 5G sur 142 sites 700 MHz

Les résultats présentés dans cette partie traduisent une augmentation moyenne du niveau global de l'exposition entre septembre et décembre 2021 d'environ 0,1 V/m, contre une augmentation de 0,06 V/m sur ces mêmes sites entre mai et septembre 2021.

Pour évaluer plus précisément les écarts entre les points mesurés avant et après la mise en service de la 5G, la Figure 24 illustre la distribution des écarts entre chaque couple de points mesurés « avant/après 1 » et « avant/après 2 », par pas de 0,3 V/m.

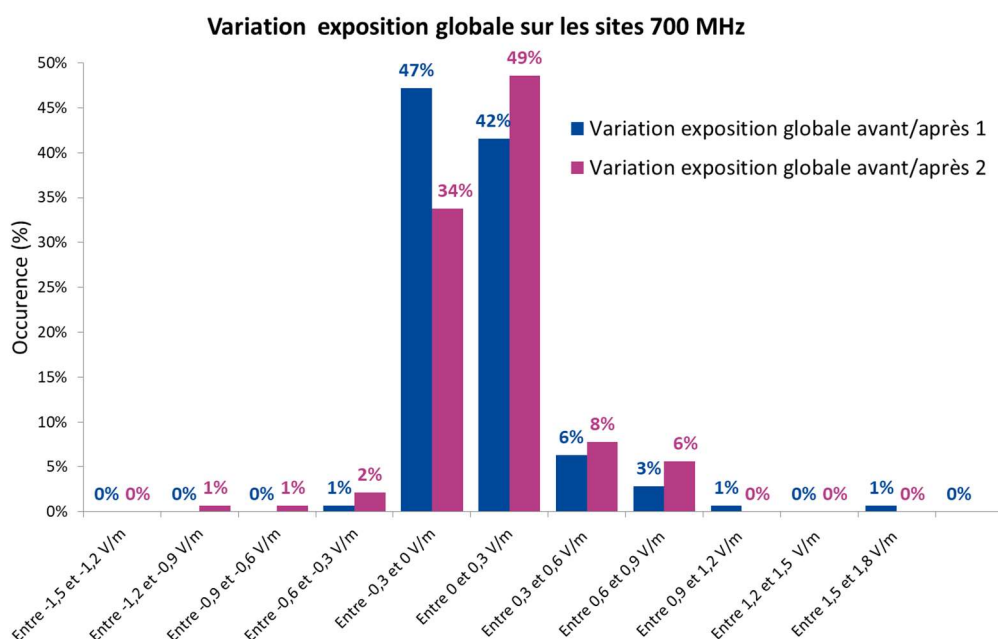


Figure 24. Distribution des écarts entre les niveaux d'exposition globale avant et après l'activation de la 5G sur 142 sites 700 MHz

Sur cette figure, dans 89 % des cas, la variation entre les écarts « avant/après 1 » se situait entre -0,3 V/m et 0,3 V/m (non significative et inférieure à la sensibilité de la sonde). Cette proportion passe à 69 % pour les écarts « avant/après 2 ». On note par ailleurs une augmentation des écarts supérieurs à 0,3 V/m de 11 % en phase 2 à 14 % en phase 3. Cela confirme l'augmentation constatée sur l'exposition globale en phase 3.

L'écart moyen sur l'exposition globale avant et après l'activation de la 5G passe de 0,06 V/m en phase 2 à environ 0,1 V/m en phase 3.

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

Parmi les 142 sites les plus exposés (si au moins une mesure de valeur globale est de 2 V/m), 87 ont fait l'objet de mesures détaillées en phase 2 et 17 en phase 3, cette partie traitera donc des 17 sites mesurés 3 fois. Pour apporter une meilleure lecture, une comparaison des niveaux globaux sur ces 17 sites est d'abord réalisée (afin de vérifier la tendance observée sur les 142 sites), suivie par une analyse de la contribution isolée de la bande 700 MHz et enfin par une analyse des bandes de fréquences les plus contributrices au niveau global d'exposition.

Notons qu'avec un nombre d'échantillons aussi faibles, il n'est pas possible de tirer des conclusions sur l'ensemble des sites mais il est possible d'en observer la tendance.

La répartition des niveaux d'exposition globale illustrée sur la Figure 25 par pas de 1 V/m montre une hausse de la proportion des tranches supérieures traduisant une augmentation de l'exposition globale pendant les phases 2 et 3.

Nota : Etant donné le nombre réduit d'échantillons (<100 sites), les résultats sont représentés en absolu et non en relatif.

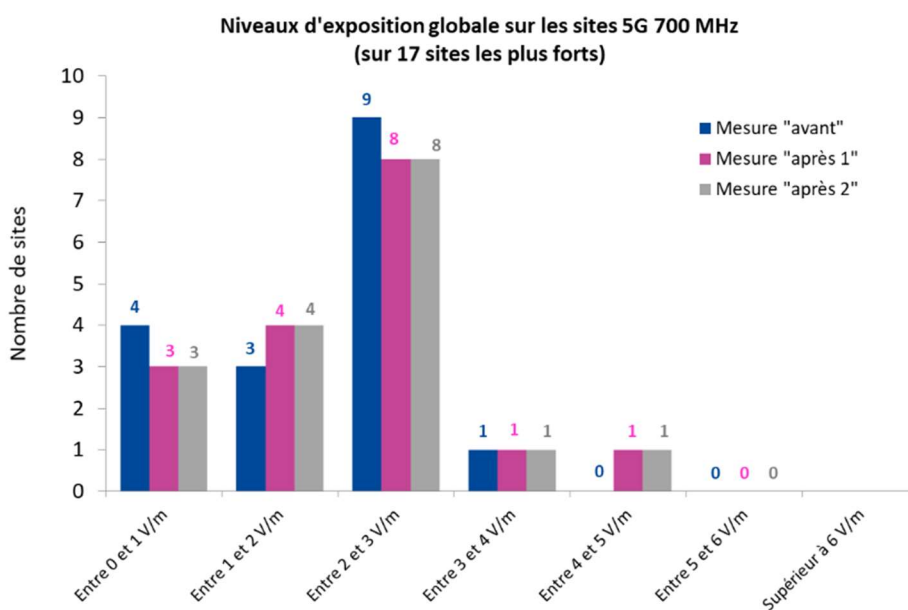


Figure 25. Distribution des niveaux d'exposition sur la bande 700 MHz avant et après l'activation de la 5G sur 17 sites

En effet, le Tableau 11 montre une augmentation du niveau global moyen pendant les phases 2 et 3. On note notamment une augmentation de la valeur médiane pendant la phase 3.

	Nombre de mesures	Moyenne (V/m)	Médiane (V/m)	Écart-type	Max (V/m)
Exposition globale 5G 700 MHz « avant »	17	1,84	2,12	1,04	3,4
Exposition globale 5G 700 MHz « après 1 »	17	2,05	2,06	1,15	4,5
Exposition globale 5G 700 MHz « après 2 »	17	2,02	2,24	1,08	4,11
Variation « avant/après 1 » (V/m)	17	0,21	-0,06	0,11	1,1
Variation « avant/après 2 » (V/m)	17	0,18	0,12	0,04	0,71

Tableau 11. Comparaison des statistiques des niveaux de champ de l'exposition globale avant et après l'activation de la 5G sur 17 sites 700

La Figure 26 isole la contribution de la bande 700 MHz avant et après la mise en service de la 5G pour les 17 sites les plus forts. Les données ne montrent pas une augmentation du niveau de la bande 700 MHz en phase 3.

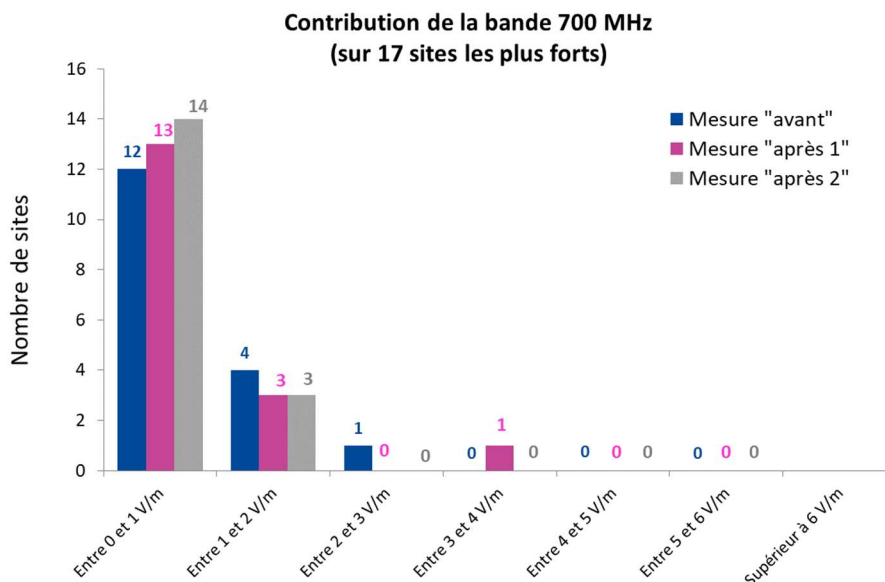


Figure 26. Distribution des niveaux d'exposition sur la bande 700 MHz avant et après l'activation de la 5G sur 17 sites

Le Tableau 12 récapitule les statistiques des niveaux de champ mesurés sur la bande 700 MHz.

Une baisse de la moyenne de la contribution de la bande 700 MHz est même observée due à la diminution du niveau maximum sur la bande mesurée en phases 1 et 2.

	Nombre de mesures	Moyenne (V/m)	Médiane (V/m)	Écart-type	Max (V/m)
Contribution de la bande 700 MHz « avant »	17	0,69	0,33	0,69	2,09
Contribution de la bande 700 MHz « après 1 »	17	0,72	0,46	0,77	3,14
Contribution de la bande 700 MHz « après 2 »	17	0,59	0,35	0,54	1,91
Variation « avant/après 1 » (V/m)	17	0,03	0,13	0,08	1,05
Variation « avant/après 2 » (V/m)	17	-0,1	0,02	-0,15	-0,18

Tableau 12. Comparaison des statistiques sur la contribution de la bande 700 MHz avant et après l'activation de la 5G sur 17 sites 700 MHz

La Figure 27 donne l'analyse des bandes de fréquences les plus contributrices à l'exposition globale où il est possible d'en déduire une augmentation du trafic sur les bandes 800 MHz et 1 800 MHz en phase 2 et les bandes 800 MHz et 900 MHz en phase 3.

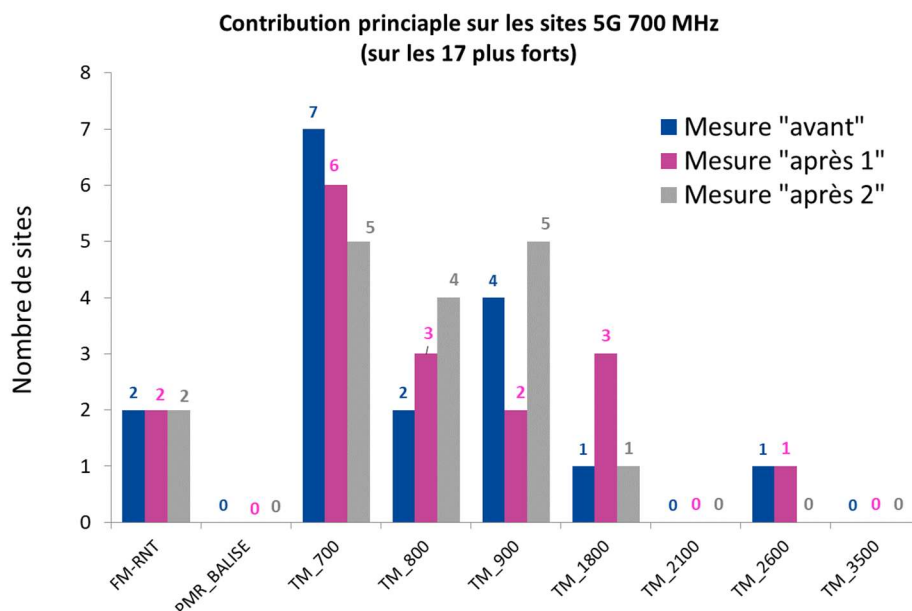


Figure 27. Distribution des contributions principales en fonction des bandes de fréquences avant et après l'activation de la 5G sur 17 sites 700 MHz

Le Tableau 13 donne la moyenne et la médiane par bande de fréquence où on peut constater que le niveau moyen augmente sur toutes les bandes de fréquences hormis la bande 700 MHz.

	Cas A	TM 700	TM 800	TM 900	TM 1800	TM 2100	TM 2600	TM 3500
Moyenne « avant » (V/m)	1,84	0,69	0,46	0,65	0,45	0,41	0,34	0
Moyenne « après 1 » (V/m)	2,05	0,72	0,57	0,71	0,69	0,44	0,47	0
Moyenne « après 2 » (V/m)	2,02	0,59	0,63	0,81	0,64	0,51	0,44	0
Médiane « avant » (V/m)	2,12	0,33	0,32	0,45	0,47	0,28	0,27	0
Médiane « après 1 » (V/m)	2,06	0,46	0,5	0,56	0,71	0,36	0,31	0
Médiane « après 2 » (V/m)	2,24	0,35	0,51	0,79	0,49	0,35	0,28	0

Tableau 13. Comparaison des statistiques des contributions des bandes de téléphonie mobiles avant et après l'activation de la 5G sur 17 sites 700 MHz

7. Conclusion

Ce rapport a porté sur l'analyse de l'évolution de l'exposition liée au déploiement de la 5G sur le territoire national. Plus de 5 000 mesures ont été effectuées dans le cadre d'un large programme de surveillance de l'exposition sur les sites hébergeant la 5G sur les bandes basses 700 MHz et 2 100 MHz déjà utilisées pour les réseaux 3G et 4G ainsi que sur la nouvelle bande 3 500 MHz exclusivement dédiée à la 5G.

Une augmentation du niveau global d'exposition a été constatée en fin d'année 2021 sur les sites ciblés, les mesures détaillées en fréquences ont montré que cette augmentation n'est pas liée à l'introduction de la 5G sur ces sites mais à une augmentation sur presque toutes les bandes de fréquences.

La campagne de mesures se poursuit en 2022 et 2023 et permettra d'évaluer l'exposition après 1 an à 2 ans de mise en service de la 5G.

A la suite du déploiement de la 5G à la Réunion, la campagne s'est étendue dans les DROM-COM en 2022 pour évaluer l'exposition sur 80 sites techniquement opérationnels à la Réunion.

Ces campagnes feront l'objet de rapports ultérieurs.