

ETUDE DE LA CONTRIBUTION DE LA 5G A L'EXPOSITION DU PUBLIC AUX ONDES ELECTROMAGNETIQUES : CAMPAGNE 2020-2023

Avril 2024

SYNTHESE GENERALE	4
1. INTRODUCTION	5
2. LE DEPLOIEMENT DE LA 5G EN FRANCE	5
3. DESCRIPTION GENERALE DE LA CAMPAGNE DE MESURES	4
3.1 <i>La campagne de mesures en chiffres</i>	4
3.2 <i>Le protocole de mesure de la campagne 5G</i>	7
3.2.1 <i>Mesure du niveau global de l'exposition (cas A)</i>	7
3.2.2 <i>Mesure détaillée en fréquence du niveau de l'exposition (cas B)</i>	7
3.2.3 <i>Mesure exploratoire hors accréditation durant un téléchargement sur la voie descendante</i>	7
4. ANALYSE DE L'EVOLUTION DE L'EXPOSITION DE LA BANDE 5G 3500 MHZ	8
4.1 <i>Résultats de mesures du niveau global de l'exposition</i>	8
4.2 <i>Résultats de mesures détaillées en fréquence</i>	9
4.3 <i>Résultats de mesures exploratoires</i>	12
5. ANALYSE DE L'EVOLUTION DE L'EXPOSITION DE LA BANDE 5G 2100 MHZ	16
5.1 <i>Résultats de mesures du niveau global de l'exposition</i>	17
5.2 <i>Résultats de mesures sélectives en fréquence</i>	18
6. ANALYSE DE L'EVOLUTION DE L'EXPOSITION DE LA BANDE 5G 700 MHZ	20
6.1 <i>Résultats de mesures du niveau global de l'exposition</i>	20
6.2 <i>Résultats de mesures sélectives en fréquence</i>	21
7. SYNTHESE DES OBSERVATIONS	23
7.1 <i>La bande 5G 3500 MHz</i>	23
7.2 <i>La bande 5G 2100 MHz</i>	24
7.3 <i>La bande 5G 700 MHz</i>	24
7.4 <i>La campagne 5G comparée aux observations annuelles du dispositif national de surveillance</i>	24
8. CONCLUSION ET PERSPECTIVES	25
ANNEXE 1 : LA BOITE A MOUSTACHES OU BOITE DU TUKEY	27

Synthèse générale

Ce rapport présente les résultats de la campagne de mesures pour l'évaluation de l'impact du déploiement de la 5G sur le niveau de l'exposition en France métropolitaine. La campagne se compose de plus de 13 000 mesures effectuées au sol en vue directe d'antennes 5G entre 2020 et 2023, afin de suivre finement l'évolution de l'exposition.

La 5G a été déployée en France métropolitaine sur plusieurs bandes de fréquences :

- Les bandes dites « basses » à 700 MHz et 2100 MHz 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,
- La nouvelle bande 3 500 MHz se démarque par une largeur plus importante que les bandes basses, permettant des débits accrus et par l'usage d'antennes à faisceaux orientables.

Le rapport montre que, entre 2020 et 2023, le niveau global de l'exposition (comprenant toutes les sources d'exposition entre 100 kHz et 6 GHz) a augmenté de :

- 17 % en moyenne devant les sites 5G 3500 MHz observés pour atteindre un niveau moyen de 1,79 V/m,
- 10 % en moyenne devant les sites 5G 2100 MHz observés pour atteindre un niveau moyen de 1,86 V/m,
- 13 % en moyenne devant les sites 5G 700 MHz observés pour atteindre un niveau moyen de 1,63 V/m.

Ces augmentations sur le niveau global ne sont cependant pas principalement attribuables à la 5G mais à l'augmentation du trafic.

Malgré ces augmentations, la moyenne du niveau global d'exposition reste :

- 34 fois inférieures à la limite en vigueur à 3500 MHz,
- 33 fois inférieures à la limite en vigueur à 2100 MHz,
- 22 fois inférieures à la limite en vigueur à 700 MHz.

Les mesures sélectives en fréquences ont permis de quantifier l'augmentation du niveau dans les bandes de fréquences 5G. Entre 2020 et 2023, les bandes où la 5G a été déployée ont connu les augmentations suivantes :

- bande 3500 MHz : augmentation de 0,33 V/m en moyenne pour atteindre un niveau moyen de 0,41 V/m,
- bande 2100 MHz : augmentation de 0,19 V/m en moyenne pour atteindre un niveau moyen de 0,65 V/m,
- bande 700 MHz : augmentation de 0,13 V/m en moyenne pour atteindre un niveau moyen de 0,64 V/m.

Entre 2020 et 2023, on peut en conclure que l'exposition dans la bande 5G 3500 MHz a clairement augmenté mais représente toujours en général la contribution la plus faible des bandes de téléphonie mobiles fin 2023, celle de la bande 2100 MHz a modérément augmenté et celle de la bande 700 MHz a très modérément augmenté. Pour les bandes 2100 MHz et 700 MHz, on ne peut pas savoir si ces augmentations observées proviennent du déploiement de la 5G ou des autres technologies existantes dans ces bandes. Des tendances similaires sont également observées dans les bandes non utilisées pour la 5G.

Dans la grande majorité des cas, les contributions principales à l'exposition proviennent des bandes historiques de téléphonie mobile à 800 MHz et 900 MHz où la technologie 5G n'a pas été déployée.

En plus des mesures accréditées suivant le protocole de l'ANFR, des mesures exploratoires pour les antennes à faisceaux orientables fonctionnant dans la bande 5G 3500 MHz ont été effectuées. Elles consistent à effectuer des mesures en sollicitant le faisceau. Ces mesures exploratoires montrent que l'utilisateur est 4 fois plus exposé environ lorsqu'un fichier d'un gigaoctet est téléchargé en comparant au niveau sans téléchargement. Ces mesures révèlent enfin que les bandes 5G 3500 MHz seraient utilisés à 22 % en moyenne, ce qui signifie que la quantité de donnée téléchargée (1 Go) reste un indicateur pour l'instant en moyenne majorant pour évaluer l'exposition.

1. Introduction

L'ANFR a pour mission de surveiller et évaluer l'exposition du public aux ondes électromagnétiques. Dans ce contexte, depuis 2020, une campagne de mesures a été effectuée en France métropolitaine¹ afin d'analyser l'impact de la 5G sur le niveau d'exposition aux ondes électromagnétiques². Cette campagne consiste à effectuer au sol plus de mille mesures d'exposition suivant le protocole de l'ANFR en vue directe de sites radioélectriques 5G puis à répéter ces mille mesures à six reprises entre 2021 et 2023.

Ce rapport a pour objectif de quantifier l'augmentation de l'exposition due au déploiement de la 5G et à son usage croissant dans les bandes de téléphonie mobile à 700 MHz, 2100 MHz et 3500 MHz.

La nouvelle bande de fréquence 3500 MHz présente la particularité d'utiliser uniquement la technologie 5G et de mettre en œuvre de nouvelles antennes à faisceaux orientables qui dirigent leur rayonnement vers la zone où se trouve l'équipement radioélectrique qui sollicite la connexion 5G.

Pour les sites radioélectriques en bande 3500 MHz, des mesures exploratoires non-accréditées ont été effectuées : elles consistent à mesurer l'exposition en sollicitant l'antenne en téléchargeant un fichier de 1 Go. Ces mesures exploratoires permettent de comparer les niveaux d'exposition avec et sans sollicitation du faisceau orientable et de quantifier le taux actuel d'utilisation de la 5G à 3500 MHz.

Ce rapport comprend une première section décrivant le déploiement de la 5G en France puis une deuxième section présentant un descriptif détaillé de la campagne de mesure et de ses différentes phases. Ensuite, trois sections exposent l'analyse de l'évolution de l'exposition spécifiquement dans chacune des trois bandes où la 5G est déployée. La section consacrée à la bande 3500 MHz présente également l'analyse des mesures exploratoires. Enfin, une synthèse des observations conclut le rapport et ouvre des perspectives pour l'observation future de l'exposition due à la 5G.

2. Le déploiement de la 5G en France

L'ANFR gère l'intégralité du spectre radioélectrique et est l'interlocutrice des grands utilisateurs du spectre des fréquences. Elle délivre les accords pour les implantations de sites radioélectriques en s'assurant de la compatibilité électromagnétique entre émetteurs et veille au respect des valeurs limites de l'exposition. Depuis sa création, elle suit de près le déploiement de la téléphonie mobile. Un état des lieux du déploiement des antennes relais 2G, 3G, 4G et 5G est publié chaque début de mois par l'ANFR³.

Au 1^{er} février 2024, l'ANFR a autorisé au total 62 342 sites de réseaux mobiles en France métropolitaine, toutes générations confondues, dont 44 198 sites 5G sont autorisés en France métropolitaine.

Dans la base de données de l'ANFR, une différenciation est faite entre :

- les sites autorisés (les sites ayant reçus l'accord d'implantation de l'ANFR et donc autorisés à émettre),
- et les sites techniquement opérationnels (sites émettant des ondes radio mais pouvant ne pas encore être commercialement ouverts).

¹ Dans les DROM-COM, le déploiement de la 5G fut plus tardif, des campagnes de mesure sont en cours et feront l'objet d'un rapport spécifique.

² Deux rapports sur la campagne 5G ont précédemment été publiés par l'ANFR fournissant des premières analyses sur les mesures effectuées en 2020 et en 2021 (<https://www.anfr.fr/maitriser/les-installations-radioelectriques/etudes-sur-les-installations-radioelectriques/5g>)

³ <https://www.anfr.fr/gestion-des-frequences-sites/observatoire/>

SITES 5G TECHNIQUEMENT OPERATIONNELS EN METROPOLE

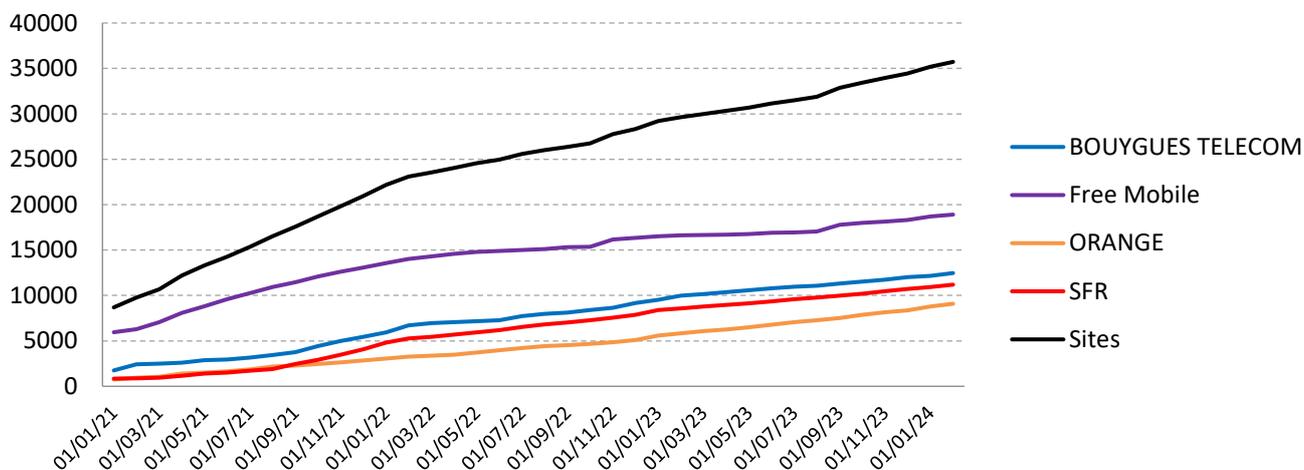


Figure 1 Historique des sites 5G techniquement opérationnels en métropole, depuis janvier 2021⁴

Au 1^{er} février 2024, 36 088 sites 5G sont déclarés techniquement opérationnels par les opérateurs de téléphonie mobile. La Figure 1 dévoile l'évolution du nombre de sites 5G techniquement opérationnels par opérateur ainsi que le nombre total depuis janvier 2021. À titre de comparaison, au 1^{er} février 2024, 63 107 sites 4G sont autorisés en métropole dont 58 244 sont en service. La Figure 2 présente le nombre de sites 4G mis en service depuis novembre 2012 et par opérateur et le nombre total également.

La quasi-totalité des implantations 5G sont autorisées sur des sites préexistants, déjà utilisés par les technologies 2G, 3G ou 4G. Seuls 7 sites n'hébergent que de la 5G.

SITES 4G MIS EN SERVICE EN METROPOLE

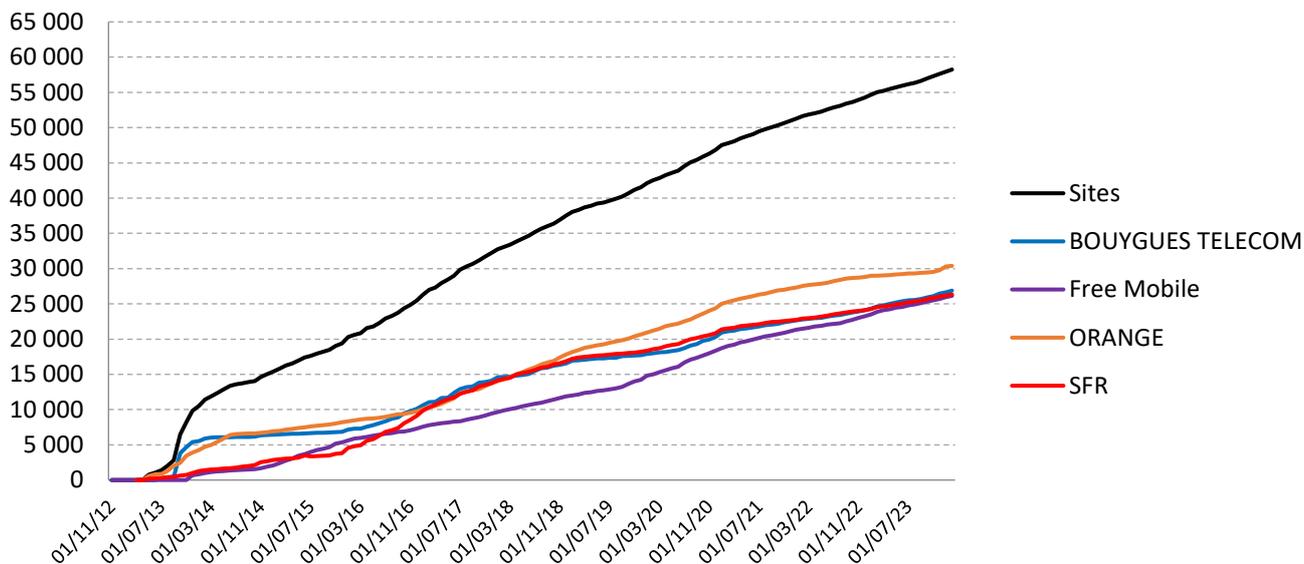


Figure 2 Historique des sites 4G en service en métropole, par opérateur, depuis novembre 2012⁴

En France métropolitaine, quatre bandes de fréquences permettent actuellement de fournir un service 5G :

- 23 340 sites 5G sont autorisés dans la bande 700 MHz (Free Mobile, Orange) dont 18 886 sont déclarés techniquement opérationnels,

⁴ Les chiffres des sites 4G mis en service et des sites 5G techniquement opérationnels proviennent des déclarations des opérateurs à l'ANFR

- 19 082 sites 5G sont autorisés dans la bande 2100 MHz (Bouygues Télécom, Orange, SFR) dont 13 757 sont déclarés techniquement opérationnels,
- 28 134 sites 5G sont autorisés dans la bande 3,5 GHz (Bouygues Telecom, Free Mobile, Orange, SFR) dont 21 798 sont déclarés techniquement opérationnels.

La Figure 3 présente en métropole pour chaque opérateur, la proportion de sites 5G par bande de fréquence. On constate que Bouygues Télécom, Orange et SFR ont surtout privilégié les bandes 2,1 GHz et 3,5 GHz tandis que Free Mobile a déployé dans les bandes 700 MHz et 3,5 GHz.

Certains des sites autorisés sont mutualisés : la somme des sites autorisés par bande de fréquences est plus élevée que le total des supports autorisés.

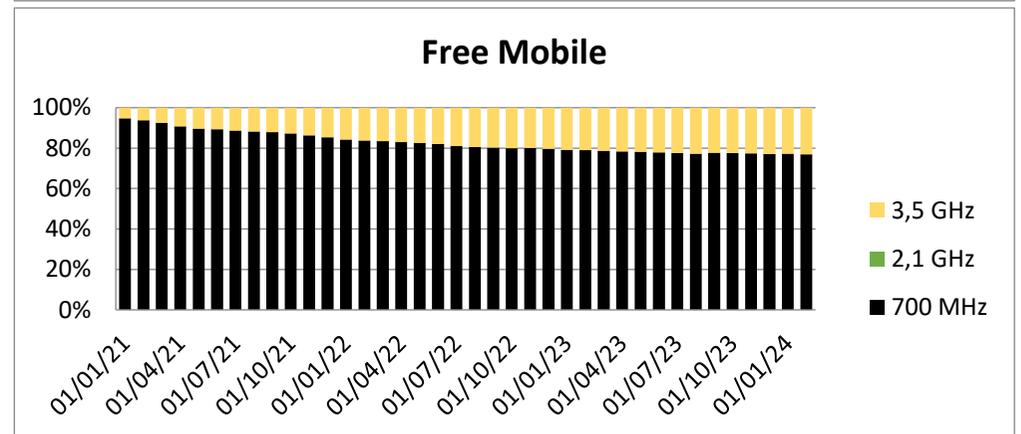
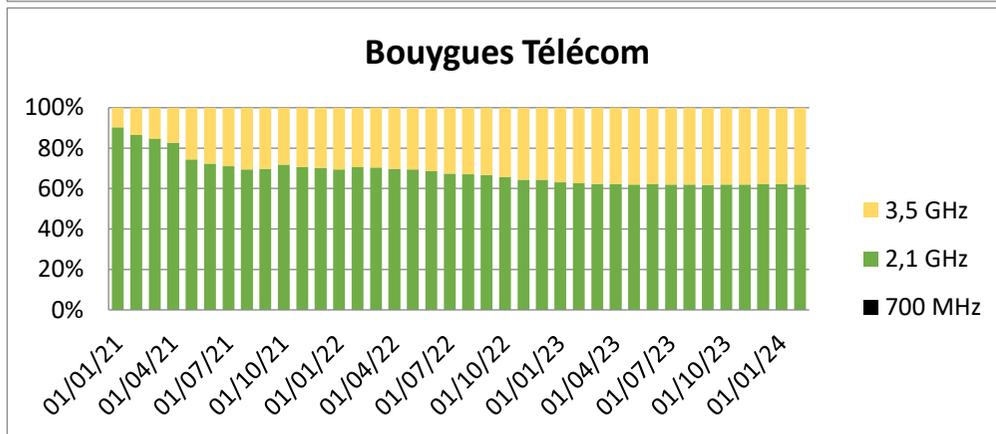
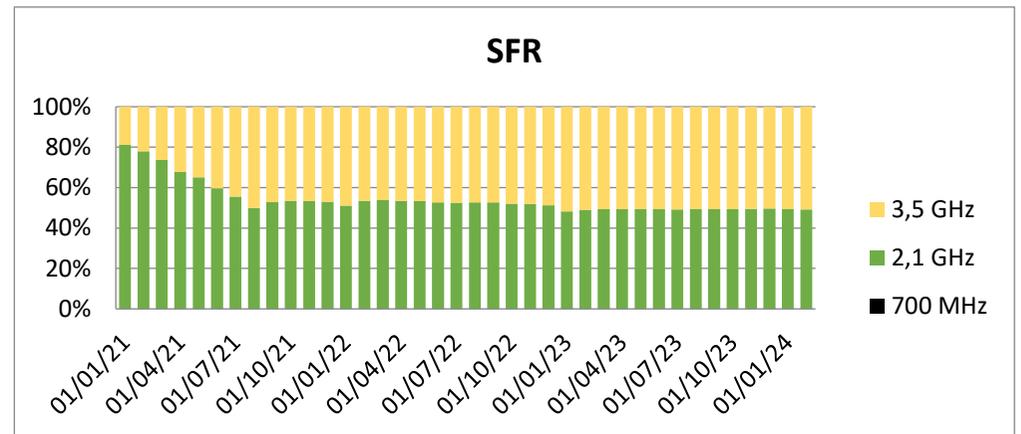
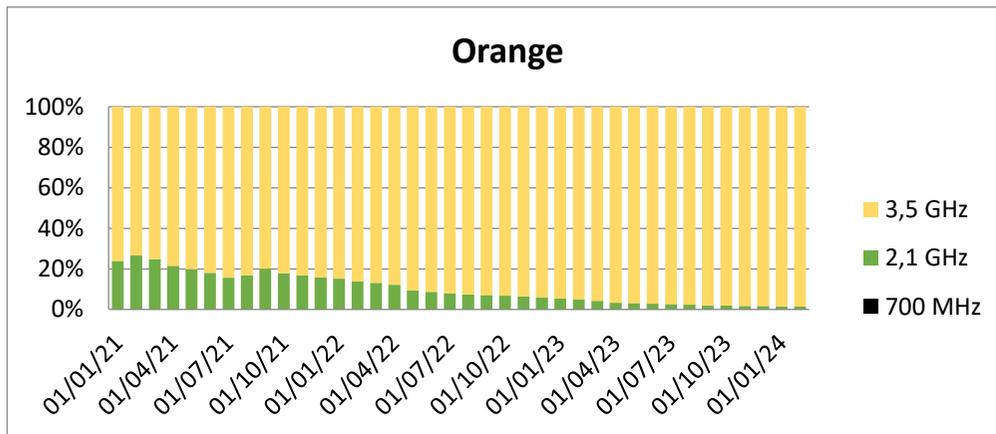


Figure 3 Evolution des proportions de sites 5G techniquement opérationnels par bande de fréquence, par opérateur

3. Description générale de la campagne de mesures

3.1 La campagne en chiffres

Dans le cadre de ses missions de surveillance de l'exposition du public, l'ANFR, a lancé une vaste campagne nationale de mesures de la 5G à partir d'octobre 2020 et qui se poursuit encore aujourd'hui. La campagne de mesure a été subdivisée en sept phases de mesures dénommées R0 à R6, réparties entre le lancement de la 5G en 2020 et le début de l'année 2024. La phase R0 correspond aux mesures avant la mise en service de la 5G. La déclaration du statut « techniquement opérationnel » par l'opérateur a ensuite permis à l'Agence de planifier les premières mesures après allumage de la 5G (R1). Ces mesures ont été reconduites en 2021 (R2), puis deux fois en 2022 (R3, R4) et deux fois en 2023 (R5 et R6).

Les sites ont été sélectionnés dès le début de l'étude sur la base des demandes d'autorisation COMSIS⁵ (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 Figure 4 montre la carte des 1175 positions de mesure en France métropolitaine.

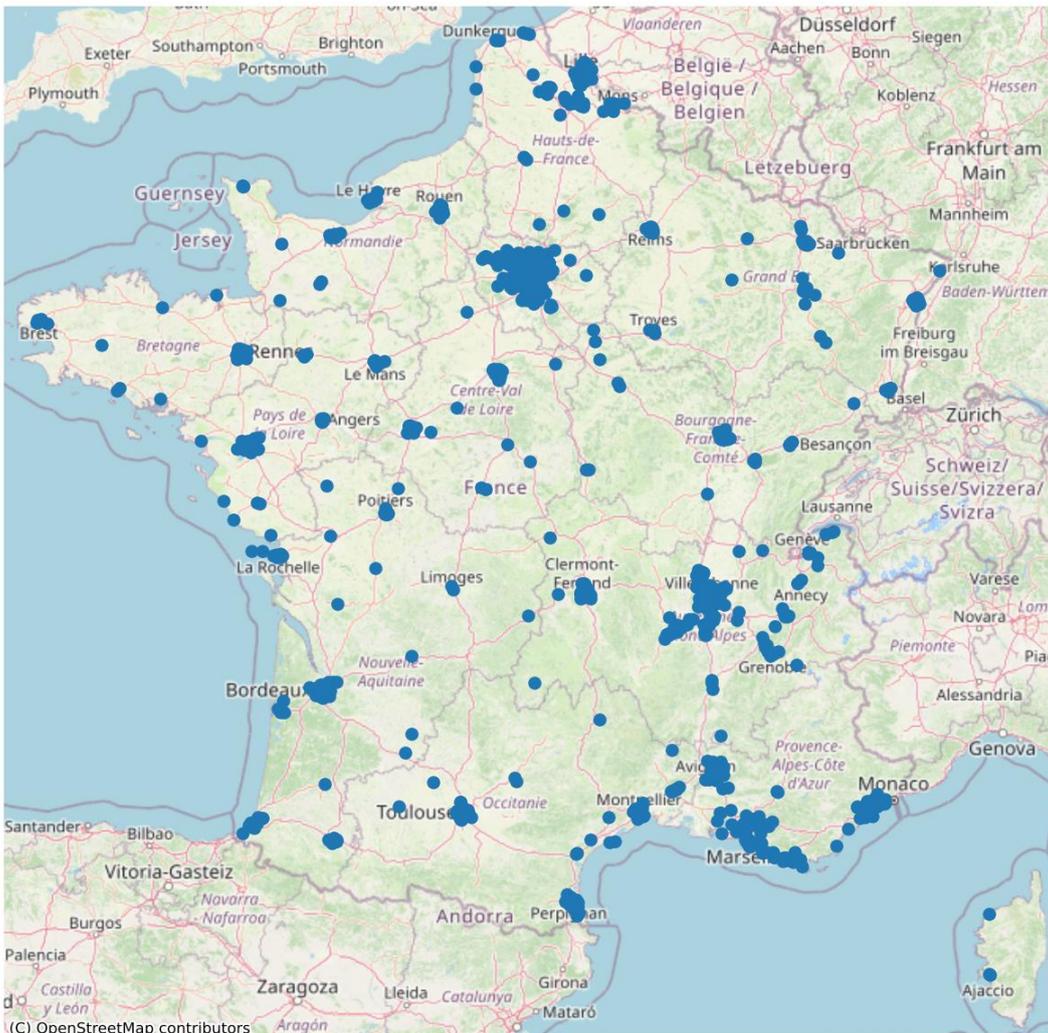


Figure 4 Carte de la position des mesures de la campagne 5G 2020-2023

⁵ <https://www.anfr.fr/gerer/sites-servitudes-et-assignations/servitudes/nos-missions>

La Figure 5 et le Tableau 1 détaillent les différentes phases de mesure. La phase R0 est particulière puisqu'elle donne un état initial du niveau de l'exposition avant l'allumage de la 5G. Comme cela est présenté dans le Tableau 1, toutes les phases ne sont pas équivalentes. En général, des mesures « cas A » et « cas B » ont été réalisées pour chaque phase, à l'exception de la phase R2. La phase R2 s'est en effet déroulée en 2021, année pour laquelle le gouvernement avait fixé un objectif de 10 000 mesures. Pour atteindre cet objectif sans précédent, la phase R2 comporte surtout des « cas A » pour un nombre plus faible de sites, sélectionnés sur la base des résultats obtenus en R1. Les mesures « cas B » de la phase R2 ont été déterminées en fonction des résultats obtenus en « cas A » lors de la phase R1. Les « cas B » n'ont été effectués que là où les mesures « cas A » en R1 ont donné des résultats supérieurs à 2 V/m. La phase R2 étant sensiblement différente des autres phases, un biais peut apparaître du fait du choix des points de mesure.

Les mesures exploratoires n'ont logiquement pas eu lieu avant les phases R1 et R2 quand elles étaient devenues possibles et ensuite entre R3 et R6, quasi systématiquement. En effet, des difficultés de connexion et d'un maintien suffisamment long de l'échange des données ont été rencontrées au début de la campagne.

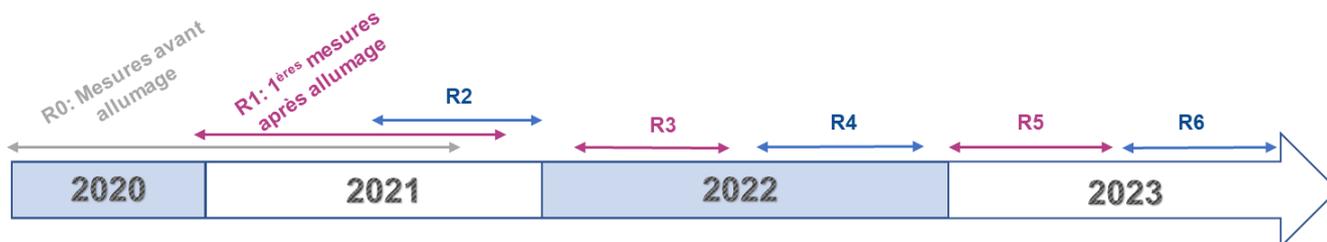


Figure 5 Frise décrivant le séquençage des différentes phases de la campagne 5G 2020-2023

Phase	Nombre de mesures par type			Période
	Cas A	Cas B	Exploratoire	
R0	1088	1088	0	2020/10 - 2021/11
R1	1005	776	243	2020/12 - 2021/12
R2	963	219	144	2021/08 - 2021/12
R3	1170	1170	1294	2022/03 - 2022/06
R4	1175	1175	1244	2022/07 - 2022/10
R5	1175	1175	1330	2023/05 - 2023/10
R6	1175	1175	1444	2023/10 - 2024/01

Tableau 1 Descriptif du nombre de mesures par type et par phase et leur période

La campagne avait pour objectif d'étudier l'exposition qui résulte de l'introduction de la nouvelle technologie 5G sur les bandes basses hébergeant déjà les technologies 3G et/ou 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. La campagne a également contribué à la surveillance de l'évolution de l'exposition dans le temps en fonction de l'accroissement éventuel du trafic.

La Figure 6 présente sous forme d'histogramme circulaire les proportions de sites selon la bande de fréquence et l'environnement. La lecture de l'histogramme se fait de la manière suivante : 81,8 % des sites mesurés sont dans la bande 5G 3500 MHz en zone urbaine et 7,30 % des sites mesurés dans la bande 5G 3500 MHz en zone rurale. 90 % des sites sont installés en environnement urbain et 10 % en environnement rural.

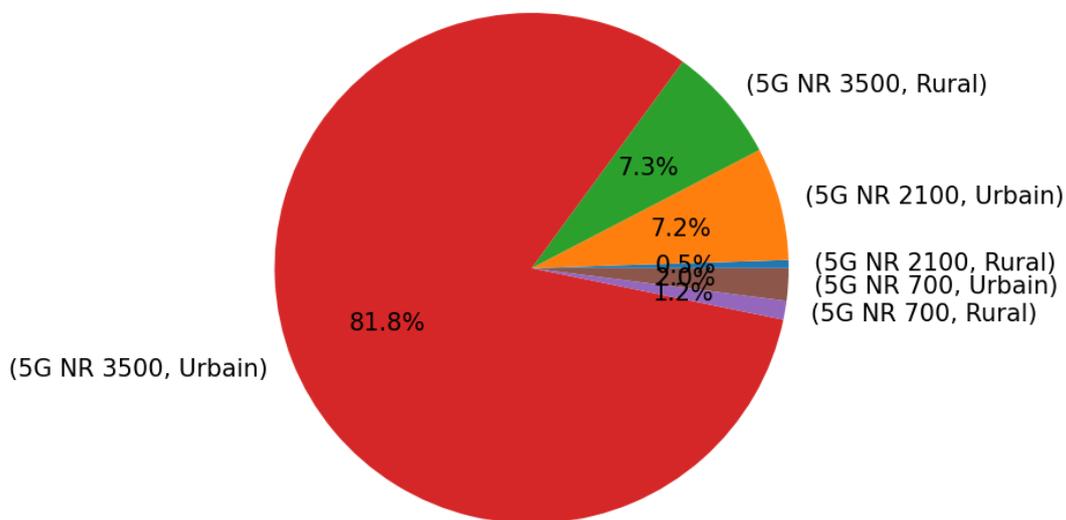


Figure 6 Histogramme circulaire présentant la répartition par bande de fréquence et par type d'environnement urbain/rural (phase R6)

Initialement, les sites ont été ciblés pour la campagne de mesures sur base des demandes d'autorisation des opérateurs d'installation et de mise en service de la 5G. La Figure 7 expose la répartition par bande de fréquence et par opérateur initialement installé sur les sites. Au fil du temps, d'autres opérateurs ont pu rejoindre l'opérateur initial. La répartition montre que l'ANFR a visé majoritairement des sites 5G 3500 MHz mais que la répartition par opérateur dans cette bande est presque équivalente (entre 200 et 250 sites environ par opérateur). La bande 5G 700 MHz est utilisée par l'opérateur Free Mobile, tandis que la bande 5G 2100 MHz est préférée par les trois autres opérateurs.

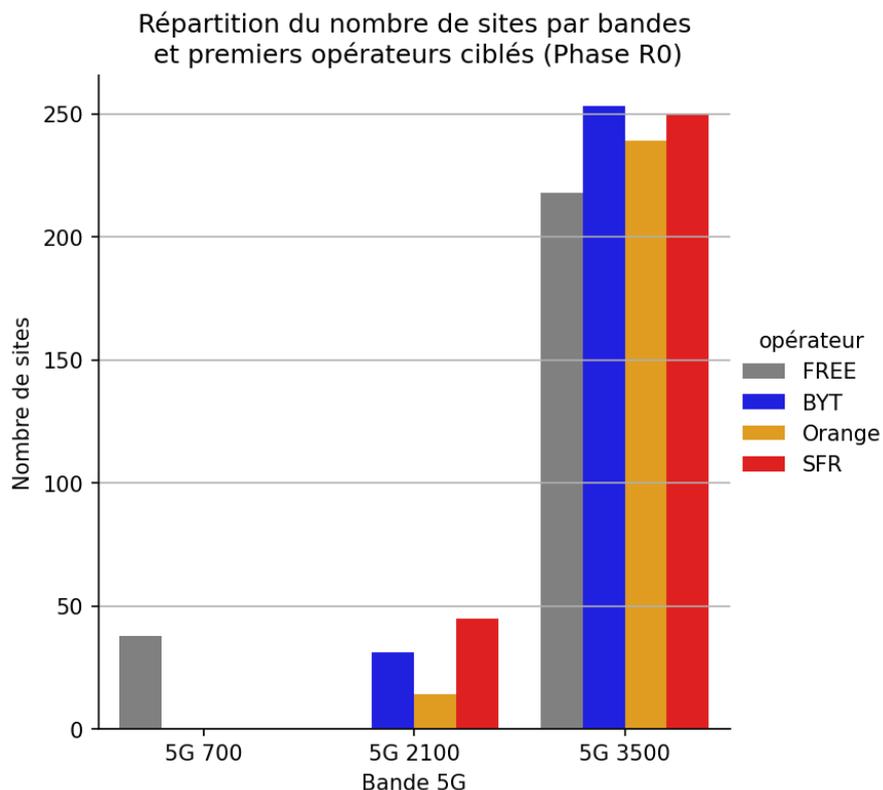


Figure 7 Histogramme du nombre de sites par bandes et par opérateurs initialement ciblés

Le Tableau 2 présente le groupement du nombre de lieu de mesures ayant été mesurées sur une suite de phases particulières. La lecture du tableau se fait de la manière suivante : 141 lieux qui ont été mesurés uniquement durant les phases R0, R3, R4, R5 et R6. En synthèse, 77 % des lieux ont été mesurés à toutes les phases et 99 % des lieux ont été mesurés aux phases R3 à R6.

Historique par phase	Nombre de lieu de mesure
R0 R1 R2 R3 R4 R5 R6	900
R0 R3 R4 R5 R6	141
R1 R2 R3 R4 R5 R6	59
R0 R1 R3 R4 R5 R6	42
R3 R4 R5 R6	28
R0 R1 R2 R4 R5 R6	4
R0 R4 R5 R6	1

Tableau 2 Historique des mesures

3.2 Le protocole de mesure de la campagne 5G

3.2.1 Mesure du niveau global de l'exposition (cas A)

Le protocole de mesure de l'ANFR en vigueur a été utilisé⁶. Une mesure globale de l'exposition est effectuée à la sonde large bande (cas A), cette mesure résulte des émissions de l'ensemble des équipements utilisés dans les réseaux de télécommunications et installations radioélectriques environnantes (radiodiffusion FM, télévision, téléphonie mobiles, Wifi, autres réseaux de communication publics ou privés...). Le cas A tient compte de toutes les sources d'émission. Il repose sur l'utilisation d'une sonde large bande couvrant la bande 100 kHz – 6 GHz. La mesure se fait à trois hauteurs (1,10 m, 1,50 m et 1,70 m) en moyenne sur six minutes et le résultat final est la moyenne spatiale des niveaux mesurés aux trois hauteurs. La sonde a une sensibilité minimale de 0,38 V/m.

3.2.2 Mesure détaillée en fréquence du niveau de l'exposition (cas B)

Une mesure détaillée (cas B) a ensuite été réalisée afin de préciser l'exposition due à chaque bande de fréquences, pour chaque exploitant. Le cas B implique 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 l'ordre de 0,05 V/m, en fonction des bandes de fréquences. Il faut 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. De la même manière qu'au cas A, la mesure au cas B se fait à trois hauteurs en moyenne sur six minutes et le résultat final est la moyenne spatiale des niveaux mesurés aux trois hauteurs.

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.

3.2.3 Mesure exploratoire hors accréditation durant un téléchargement sur la voie descendante

Avec les antennes à faisceaux orientables de la 5G sur la bande 3,4 GHz à 3,8 GHz, 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 indicateur a été donc proposé, sur la

⁶ <https://www.anfr.fr/maitriser/les-installations-radioelectriques/protocole-de-mesure>

base d'un usage prévisible de la 5G : un envoi dans une direction donnée d'un gigaoctet de données en moyenne toutes les 6 minutes. Avec une hypothèse d'un débit moyen de 500 Mbps, l'antenne n'émettra dans la direction donnée qu'environ 15 secondes sur les 6 minutes (environ 4 % du temps). Cet indicateur est utilisé dans les directrices nationales sur la présentation des résultats de simulation de l'exposition aux ondes émises par les installations radioélectriques⁷.

L'ANFR a donc 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 de l'indicateur. Cette mesure exploratoire consistant à solliciter la voie descendante est hors accréditation et donne lieu à trois résultats de mesure distinct :

- La mesure du niveau d'exposition sans téléchargement sur la bande de l'opérateur installé sur le site 3,5 GHz,
- La mesure du niveau d'exposition moyenné durant le temps de téléchargement d'un fichier de 1 Go sur la bande de l'opérateur installé sur le site 3,5 GHz,
- Le temps de téléchargement d'un fichier de 1 Go sur la bande de l'opérateur installé sur le site 3,5 GHz.

4. Analyse de l'évolution de l'exposition de la bande 5G 3500 MHz

L'analyse de l'évolution de l'exposition de la bande 5G 3500 MHz suit la méthode suivante : les résultats de mesure du niveau global de l'exposition sont présentés pour porter un premier regard sur l'évolution de l'exposition. Les résultats détaillés en fréquence permettent ensuite d'analyser plus précisément l'évolution de la bande 5G 3500 MHz en fonction des phases de la campagne. La contribution de la bande 5G 3500 MHz est ainsi comparée à la contribution des autres bandes. Enfin, les mesures exploratoires permettent de situer l'exposition avec et sans téléchargement en utilisant l'indicateur de l'exposition.

4.1 Résultats de mesures du niveau global de l'exposition

La Figure 8 présente les distributions du niveau global de l'exposition par phase sous forme de boîte à moustache pour les sites sélectionnés 5G 3500 MHz. La représentation des distributions sous forme de boîte à moustache est une technique connue pour faciliter la comparaison de différentes distributions statistiques. L'annexe 1 décrit la représentation sous forme de boîte à moustache. Pour rappel, le segment vertical central représente la médiane, tandis que le triangle vert représente la moyenne. Le Tableau 3 répertorie les paramètres statistiques du niveau global de l'exposition par phase.

⁷ <https://www.anfr.fr/maitriser/les-installations-radioelectriques/simulation-de-l'exposition>

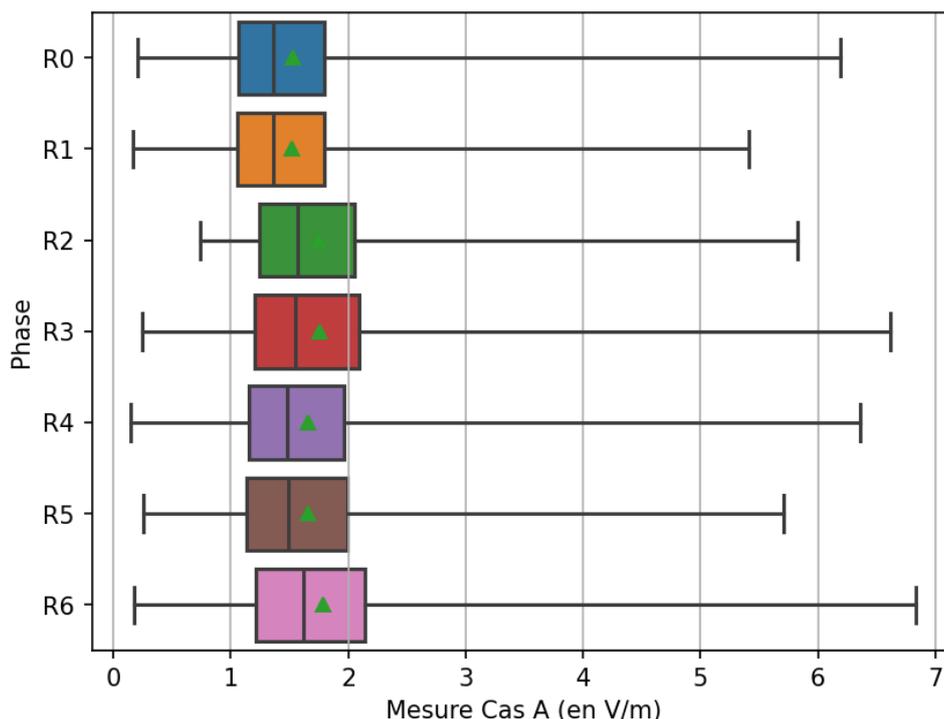


Figure 8 Distribution du niveau global de l'exposition par phase mesuré devant les sites 5G 3500 MHz

Phase	nombre	médiane	Δ médiane	moyenne	Δ moyenne	95° centile	Maximum
R0	959	1,36		1,53		2,73	6,19
R1	875	1,36	+0,00	1,52	-0,01	2,81	5,41
R2	854	1,57	+0,21	1,75	+0,23	3,15	5,83
R3	1042	1,55	-0,02	1,75	+0,00	3,32	6,62
R4	1045	1,48	-0,07	1,66	-0,09	3,11	6,36
R5	1045	1,49	+0,01	1,65	-0,01	3,12	5,71
R6	1045	1,62	+0,13	1,79	+0,14	3,42	6,83

Tableau 3 Paramètres statistiques par phase des distributions du niveau global de l'exposition en V/m mesuré devant les sites 5G 3500 MHz

La Figure 8 et le Tableau 3 montrent que le niveau global de l'exposition a augmenté en moyenne et en médiane de 0,26 V/m entre l'état initial R0 et R6. Le Tableau 3 affiche les variations de la médiane et de la moyenne appelées Δ médiane et Δ moyenne entre phases successives. On remarque une augmentation entre R1 et R2 que l'on ne retrouve pas entre les autres phases : cela est dû à la manière dont ont été sélectionnés les sites pour R2. Comme énoncé dans la section 3.1, les lieux mesurés en R2 correspondent aux lieux où les niveaux les plus élevés avaient été mesurés en R1.⁸ Globalement, l'évolution du niveau global de l'exposition présente une tendance à la hausse, mais il est impossible à ce stade de savoir si elle est exclusivement due à la 5G.

4.2 Résultats de mesures détaillées en fréquence

La mesure du cas B permet d'effectuer une analyse plus profonde des niveaux d'exposition de la bande 5G 3500 MHz. En effet, la Figure 9 expose les distributions sous forme de boîtes à moustache des niveaux d'exposition dans la bande 5G 3500 MHz, le Tableau 4 présente les paramètres statistiques des distributions.

⁸ <https://www.anfr.fr/maitriser/les-installations-radioelectriques/etudes-sur-les-installations-radioelectriques/5g>

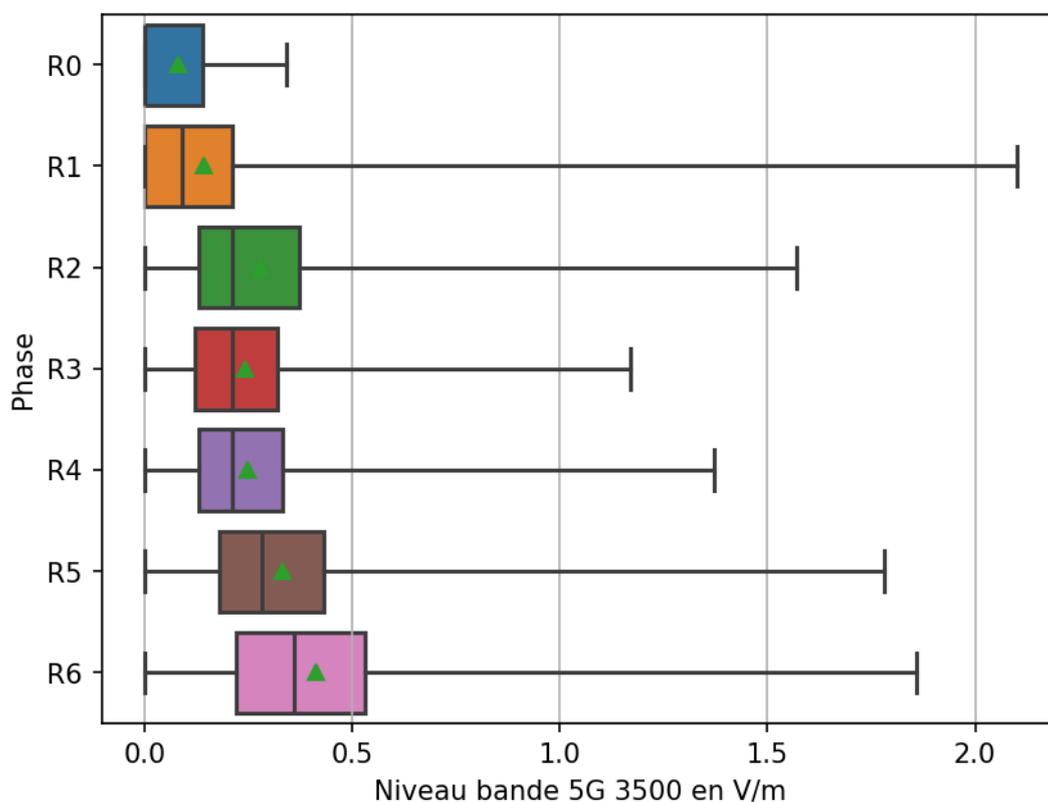


Figure 9 Niveau d'exposition de la bande 5G 3500 MHz par phase

Phase	nombre	médiane	Δmédiane	moyenne	Δmoyenne	95 ^e centile	maximum
R0	959	0,00		0,08		0,28	0,34
R1	682	0,09	+0,09	0,14	+0,06	0,48	2,10
R2	163	0,21	+0,12	0,28	+0,14	0,75	1,57
R3	1042	0,21	+0,00	0,24	-0,04	0,57	1,17
R4	1045	0,21	+0,00	0,25	+0,01	0,55	1,37
R5	1045	0,28	+0,07	0,33	+0,08	0,78	1,78
R6	1045	0,36	+0,08	0,41	+0,08	0,96	1,86

Tableau 4 Paramètres statistiques par phase du niveau d'exposition en V/m de la bande 5G 3500 MHz

La Figure 9 et le Tableau 4 montrent que le niveau de l'exposition avant allumage (R0) est, comme attendu, en moyenne très faible et légèrement au-dessus du seuil de sensibilité des appareils de mesure. Par la suite le niveau de l'exposition dans cette bande augmente en moyenne de 0,33 V/m entre R0 et R6 et la médiane augmente de 0,36 V/m sur la même période. Il faut noter deux éléments par rapport aux mesures de R2, comme cela a été expliqué précédemment, le nombre de cas B effectués en R2 est faible en comparaison avec les autres phases. De plus, les cas B ont été effectués là où les cas A étaient supérieurs à 2 V/m. Cela illustre le léger biais statistique de R2. Plus généralement, les données montrent que l'exposition de la bande 5G 3500 MHz augmente entre 2020 et 2023. Il s'agit maintenant d'évaluer si cette tendance se retrouve sur toutes les autres bandes de téléphonie mobile.

La Figure 10 présente l'évolution du niveau d'exposition pour les bandes de la téléphonie mobile pour les mesures effectuées devant les sites 5G 3500 MHz. Les données montrent que la bande 5G 3500 MHz connaît une claire augmentation du niveau d'exposition pour les mesures effectuées devant les sites 5G 3500 MHz. Dans une moindre mesure, la bande de téléphonie mobile 2100 MHz montre une tendance à la hausse du niveau d'exposition. En revanche, les autres bandes connaissent des fluctuations mais sont *in fine* assez stables sur l'intervalle 2020-2023. Malgré l'augmentation du niveau de la bande 5G 3500 MHz, celle-ci reste inférieure aux niveaux moyens des autres bandes de téléphonie mobile.

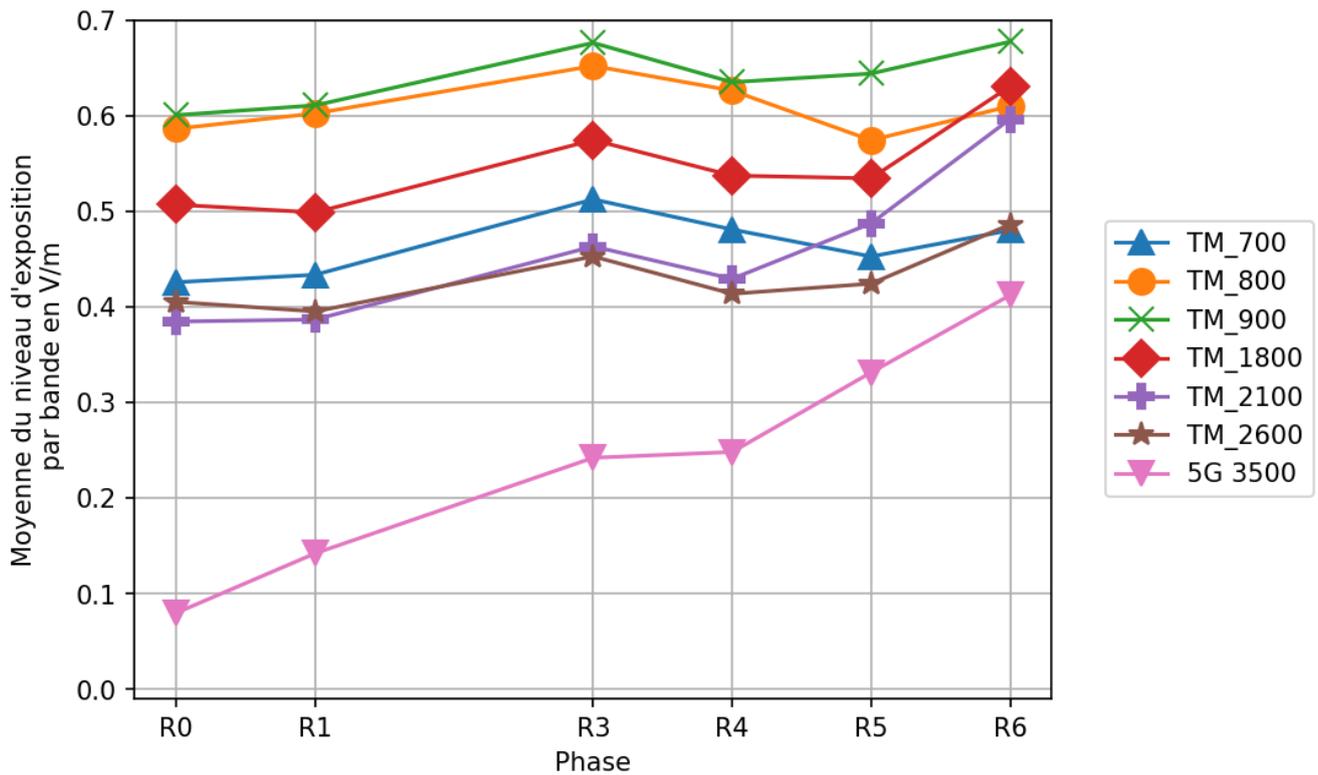


Figure 10 Evolution du niveau d'exposition par bande de téléphonie mobile et par phase pour les sites 5G 3500 MHz

L'augmentation de l'exposition dans la bande 5G 3500 MHz étant maintenant quantifiée et comparée aux autres bandes, il est légitime de se demander comment cette bande a évolué par rapport aux autres bandes de fréquence, toutes technologies de téléphonie mobile et FM⁹ confondues. Sur base des mesures cas B, il est possible de compter le nombre de fois où une bande a été détectée comme étant contributrice principale par rapport aux autres bandes de fréquences.

⁹ La radio FM est le deuxième contributeur à l'exposition après la téléphonie mobile comme cela a pu être observé (<https://www.anfr.fr/maitriser/les-installations-radioelectriques/etudes-sur-les-installations-radioelectriques/rapports-annuels-des-mesures>)

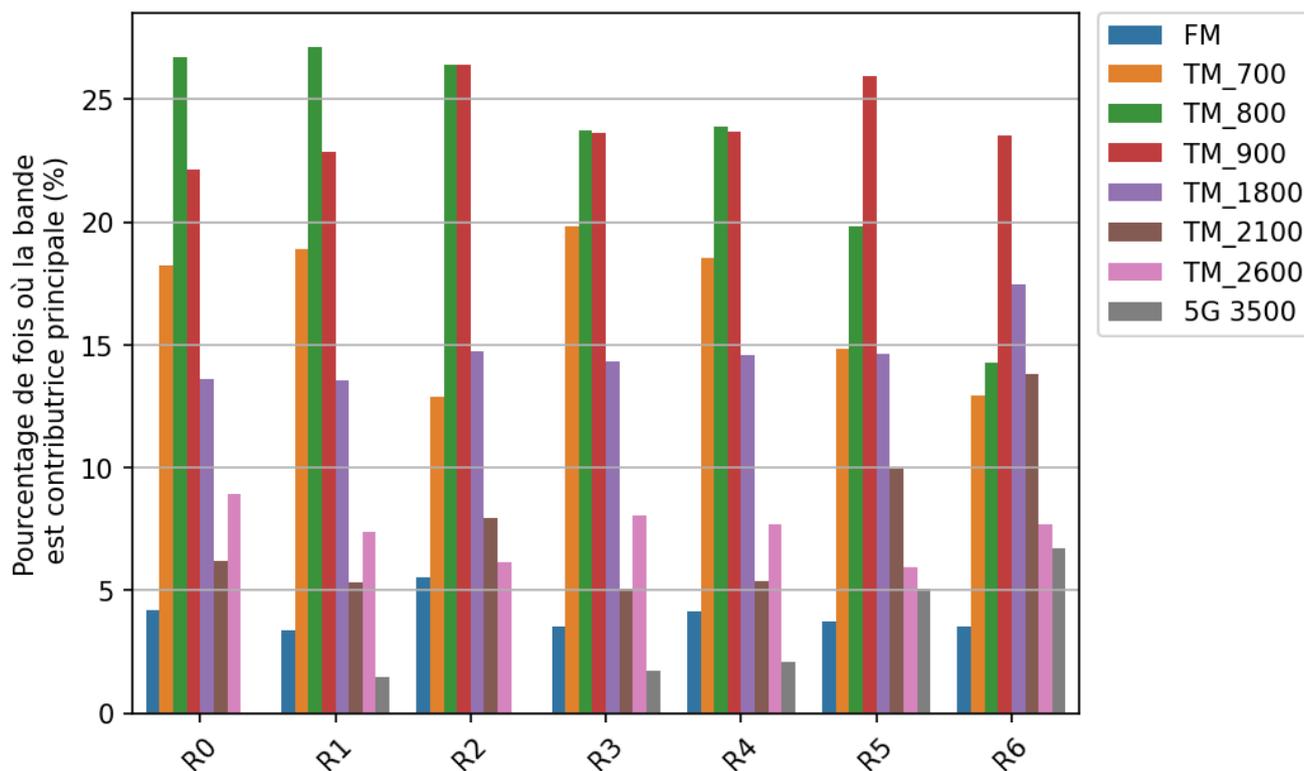


Figure 11 Histogrammes des pourcentages de contribution principale constatée par phase pour les sites 5G 3500 MHz

La Figure 11 fait un état des lieux du pourcentage de fois où les bandes de fréquences sont détectées comme contributrices principales à travers les différentes phases. Le graphique montre que la bande 5G 3500 MHz devient plus souvent contributrice principale puisqu'elle passe de 0 % en R0 à peu près 7 % en R6. Il faut également remarquer que les bandes historiques de téléphonie mobile à 800 MHz et 900 MHz où sont déployées les technologies 2G, 3G ou 4G, sont beaucoup plus souvent contributrices principales (15 à 25 % en fonction des phases) en comparaison à la bande 5G 3500 MHz.

Les mesures du niveau global de l'exposition et les mesures détaillées en fréquence ont permis d'exposer l'évolution du niveau d'exposition pour environ 1000 emplacements de mesures situés en face de site 5G 3500 MHz. Il a été montré que le niveau global de l'exposition a augmenté en moyenne de +0,26 V/m sur le cas A, et en moyenne de +0,33 V/m sur la bande 5G 3500 MHz.

4.3 Résultats de mesures exploratoires

Les résultats de mesure exploratoires ont été effectués systématiquement pour les phases R3 à R6 mais de manière plus ponctuelle sur les phases R1 et R2 (seulement quand le téléchargement était possible). La Figure 12 montre le nombre de mesures exploratoires effectuées par phase.

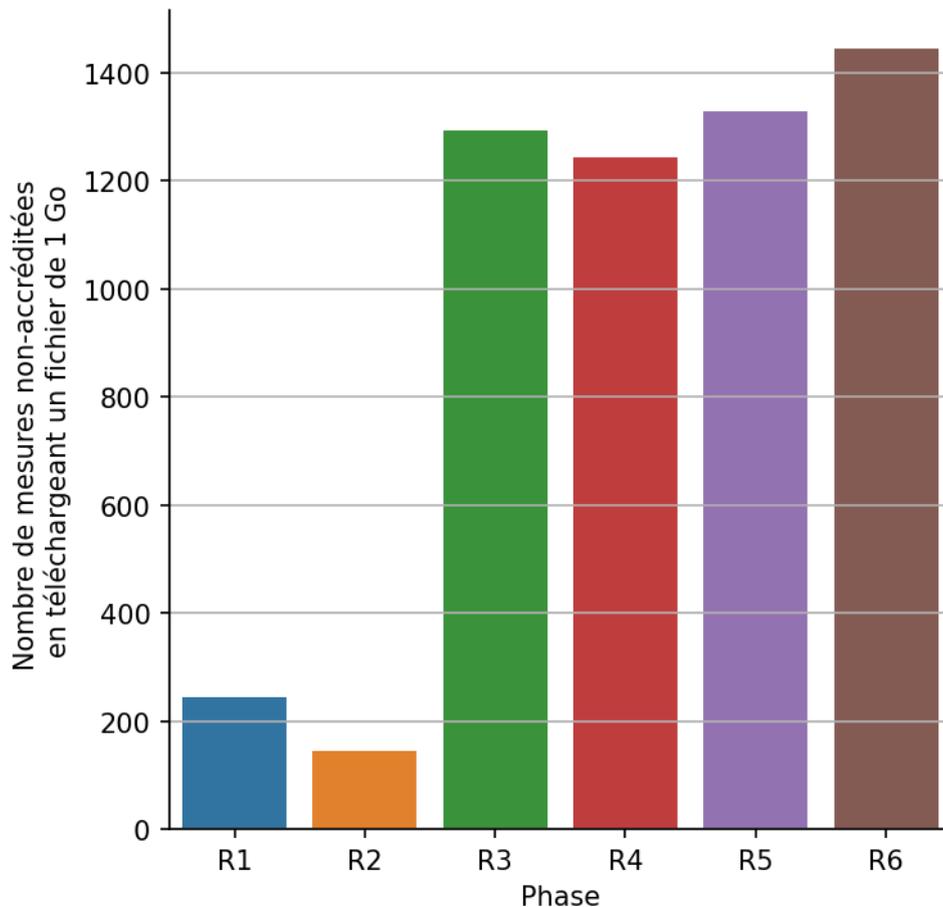


Figure 12 Nombre de mesures exploratoires sollicitant la voie descendante par phase

Les grandeurs qui sont relevées durant ces mesures exploratoires sont :

- E^{noDL} : la mesure du niveau d'exposition sans téléchargement sur la bande de l'opérateur installé sur le site 3,5 GHz,
- E^{DL} : la mesure du niveau d'exposition moyenné durant le temps de téléchargement d'un fichier de 1 Go sur la bande de l'opérateur installé sur le site 3,5 GHz,
- T_{DL} : le temps de téléchargement d'un fichier de 1 Go sur la bande de l'opérateur installé sur le site 3,5 GHz.

Des temps de téléchargement, il est possible d'en déduire les débits moyens relevés en fonction des phases (Figure 13). Les débits calculés montrent une nette différence entre les débits de téléchargements durant les phases R1 à R3 et les phases R4 à R6. En effet, la Figure 13 et le Tableau 5 montrent que de R1 à R3, les débits sont en moyenne autour de 60 Mbps tandis que de R4 à R6 les débits se situent autour de 450 Mbps. Cette différence n'est pas le fait des performances de la 5G, les débits anormalement bas de R1 à R3 étant dus à un bridage du serveur utilisé pour télécharger les données. À partir de R4, le serveur servant à héberger le fichier de 1 Go a été changé en veillant qu'il ne soit pas bridé, ce qui a donné des débits 5G plus satisfaisants. Il faut noter que l'hypothèse prise pour la construction de l'indicateur (500 Mbps) reste plausible au vu des débits relevés. Ces écarts importants sur les débits n'ont pas une grande influence sur le niveau d'exposition moyenné sur 6 minutes comme cela sera expliqué par la suite.

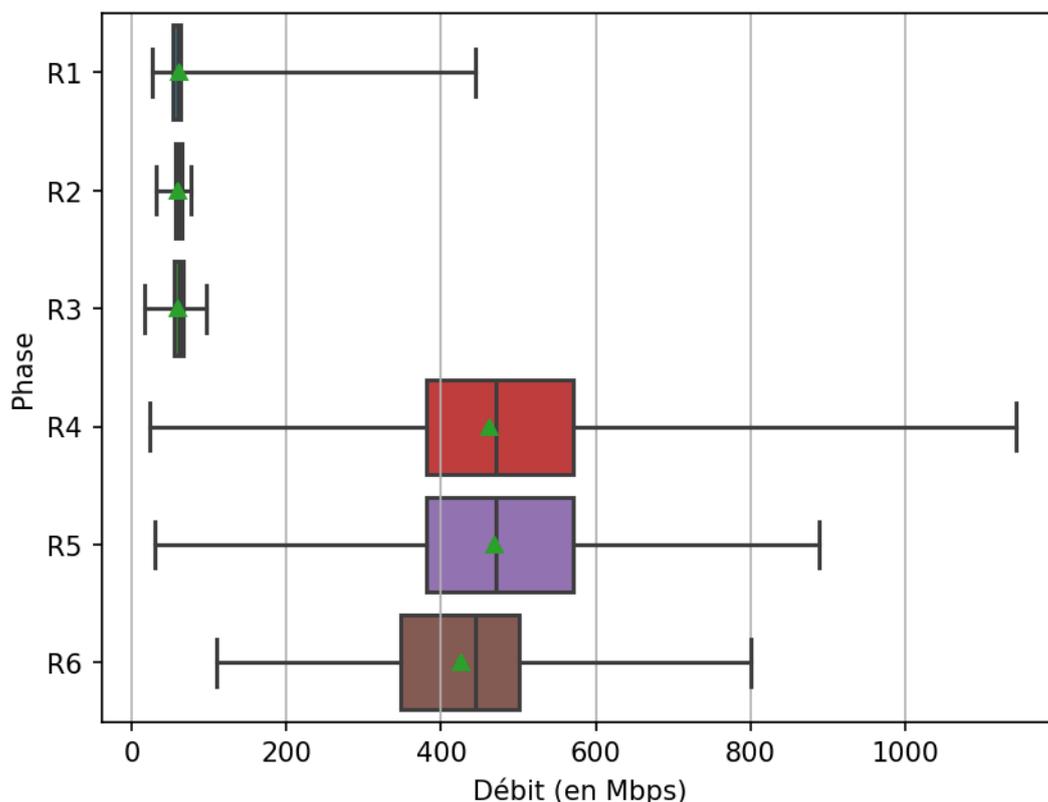


Figure 13 Débit en téléchargement par phase (en Mbps)

Phase	nombre	médiane	moyenne	95 ^e centile	maximum
R1	243	58,82	61,29	70,18	444,44
R2	144	61,07	59,48	69,57	76,19
R3	1293	61,07	60,18	79,21	96,39
R4	1244	470,59	462,12	666,67	1142,86
R5	1330	470,59	469,16	666,67	888,89
R6	1444	444,44	426,60	615,38	800,00

Tableau 5 Paramètres statistiques des débits relevés lors des téléchargements des fichiers de 1 Go

Le niveau d'exposition avec téléchargement moyenné sur 6 minutes s'obtient par calcul par l'expression suivante :

$$E_{6min}^{DL} = \sqrt{E^{DL^2} \frac{T_{DL}}{360} + E^{noDL^2} \left(1 - \frac{T_{DL}}{360}\right)}$$

Le Tableau 6 et la Figure 14 présentent l'évolution des niveaux d'exposition sans téléchargement et avec téléchargement moyennés sur 6 minutes. Le niveau sans téléchargement est le témoin de l'accroissement de l'usage de la bande 5G 3500 MHz. Les données montrent que les niveaux moyen et médian de l'exposition ont augmentés de 0,09 V/m entre R1 et R6. En moyenne, cela représente une augmentation de 52 % par rapport au niveau d'exposition en R1 ce qui montre que la bande 5G 3500 MHz est de plus en plus utilisée même si les niveaux mesurés dans cette bande restent inférieurs aux niveaux relevés dans les autres bandes. En moyenne, le niveau d'exposition avec téléchargement moyenné sur 6 minutes montre qu'il est en augmentation de 0,26 V/m entre R1 et R6 en moyenne et la médiane augmente de 0,39 V/m entre R1 et R6.

Les résultats disponibles montrent que, pour la moyenne ou la médiane, l'exposition est environ 4 fois plus forte avec un téléchargement moyenné sur 6 minutes que sans téléchargement, et cela pour toute les phases.

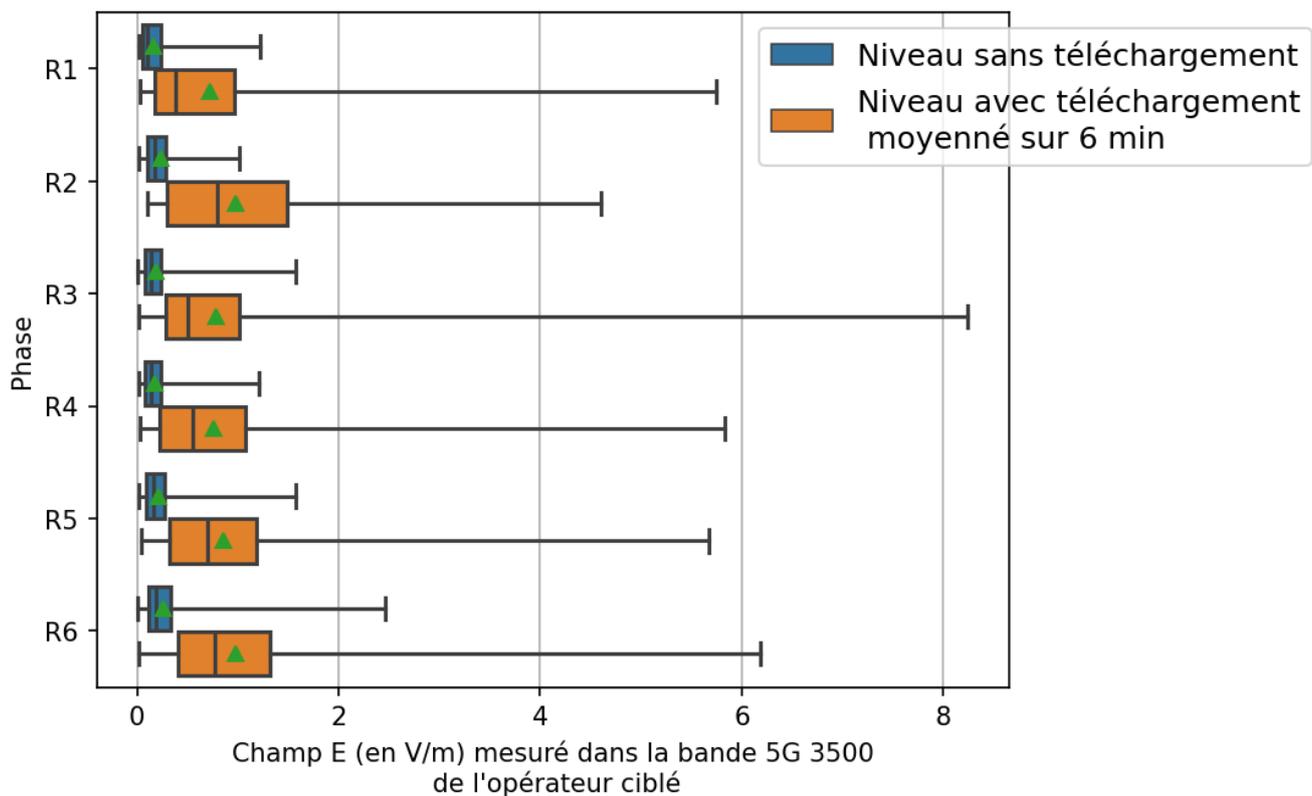


Figure 14 Distributions comparées du niveau sans téléchargement et avec téléchargement moyenné sur 6 minutes

Phase	nombre	Sans téléchargement				Avec téléchargement moyenné sur 6 min			
		médiane	moyenne	95 ^e centile	maximum	médiane	moyenne	95 ^e centile	maximum
R1	243	0,10	0,17	0,46	1,22	0,38	0,72	2,31	5,75
R2	144	0,17	0,24	0,68	1,02	0,80	0,98	2,61	4,60
R3	1293	0,14	0,19	0,53	1,58	0,50	0,79	2,34	8,24
R4	1244	0,14	0,18	0,46	1,21	0,55	0,76	2,14	5,83
R5	1330	0,16	0,21	0,54	1,58	0,70	0,86	2,20	5,67
R6	1444	0,19	0,26	0,69	2,46	0,77	0,98	2,56	6,18

Tableau 6 Statistiques des distributions des niveaux sans téléchargement et avec téléchargements moyennés sur 6 minutes

Les mesures exploratoires permettent de suivre l'utilisation de la 5G dans la bande 3500 MHz mais également d'évaluer la situation actuelle par rapport à un hypothétique usage généralisé de la 5G où le téléchargement d'un fichier de 1 Go n'impliquera plus d'évolution de l'exposition.

Le taux d'utilisation est un pourcentage qui indique à quel point la bande 5G 3500 MHz de l'opérateur est utilisée par rapport à l'hypothèse majorante prise pour la construction de l'indicateur d'exposition. Ce taux s'exprime en fonction du niveau avec téléchargement moyenné sur 6 minutes et du niveau sans téléchargement de la manière suivante :

$$\tau = 100 \times \left(1 - \frac{E_{6min}^{DL^2} - E^{noDL^2}}{E_{6min}^{DL^2} + E^{noDL^2}} \right)$$

Le taux d'utilisation va varier entre :

- une valeur minimale $\tau_{min} \rightarrow 0\%$ qui correspond à la situation où la 5G vient d'être mise en service et que la bande de l'opérateur est entièrement disponible,
- et une valeur maximale plafonnée par $\tau_{max} \rightarrow 100\%$ reflétant le taux de d'utilisation lorsque la 5G sera pleinement utilisée et que le téléchargement d'un fichier de 1 Go n'aura que très peu d'impact sur le niveau d'exposition.

La Figure 15 et le Tableau 7 décrivent l'évolution du taux d'utilisation de la bande 5G 3500 MHz de l'opérateur où le téléchargement d'un fichier de 1 Go a été effectué et pendant lequel l'exposition a été mesurée. Les données montrent que pour les phases R1 et R2 comparées aux phases R3 à R6, les taux d'utilisations sont légèrement différents, cela peut être dû à deux facteurs : le nombre de mesures entre R1, R2 et R3 à R6 ainsi

que l'usage croissant de la 5G dans la société. On constate qu'en moyenne, de R1 à R6, le taux d'utilisation croît de 5% tandis qu'en médiane il croît de 2,3%, cela montre que le taux d'utilisation a légèrement augmenté entre 2021 et 2023. L'écart entre médiane et moyenne est dû au fait que, pour certains emplacements de mesure, le taux d'utilisation est nettement supérieur à l'essentiel des taux d'utilisation relevés.

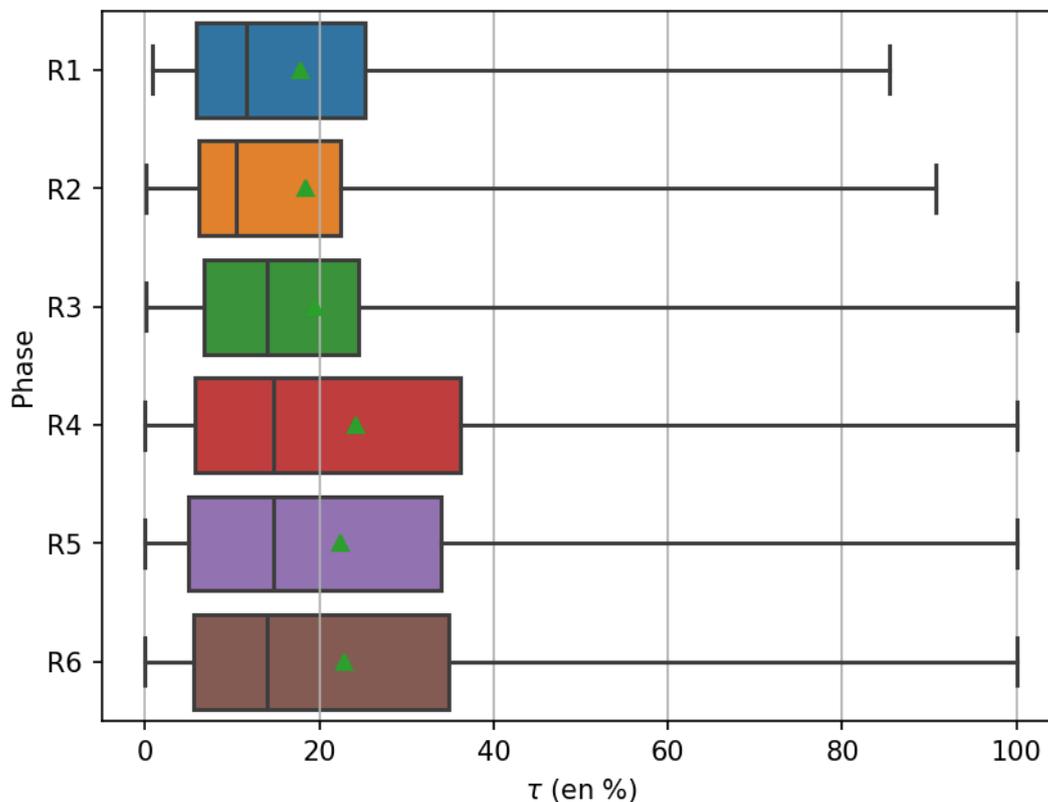


Figure 15 Distribution du taux d'utilisation de la bande 5G 3500 MHz de l'opérateur ciblé par phase

Phase	nombre	médiane	moyenne	95 ^e centile	maximum
R1	242	11,63	17,90	52,95	85,4
R2	143	10,51	18,43	62,28	90,7
R3	1284	13,94	19,51	59,26	100,0
R4	1236	14,75	24,15	78,00	100,0
R5	1328	14,69	22,48	68,14	100,0
R6	1443	13,97	22,86	71,95	100,0

Tableau 7 Paramètres statistiques des distributions du taux d'utilisation de la bande 5G 3500 MHz par phase

En conclusion, une sensible augmentation du taux d'utilisation est constatée entre 2021 et 2023. Les dernières données montrent que le taux d'utilisation de la bande 5G 3500 MHz est d'environ 14 % en médiane et 23 % en moyenne.

5. Analyse de l'évolution de l'exposition de la bande 5G 2100 MHz

Comme présenté dans la section 2, la bande de téléphonie mobile 2100 MHz dans laquelle étaient déjà déployées les technologies 3G et 4G, a aussi accueilli la technologie 5G. Trois opérateurs sur quatre ont implanté des sites 5G dans la bande 5G 2100 MHz en France métropolitaine. Afin d'évaluer l'évolution de l'exposition dans la bande 2100 MHz, 90 sites ont été sélectionnés afin de suivre le niveau global de l'exposition et les niveaux détaillés en fréquences.

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 Résultats de mesures du niveau global de l'exposition

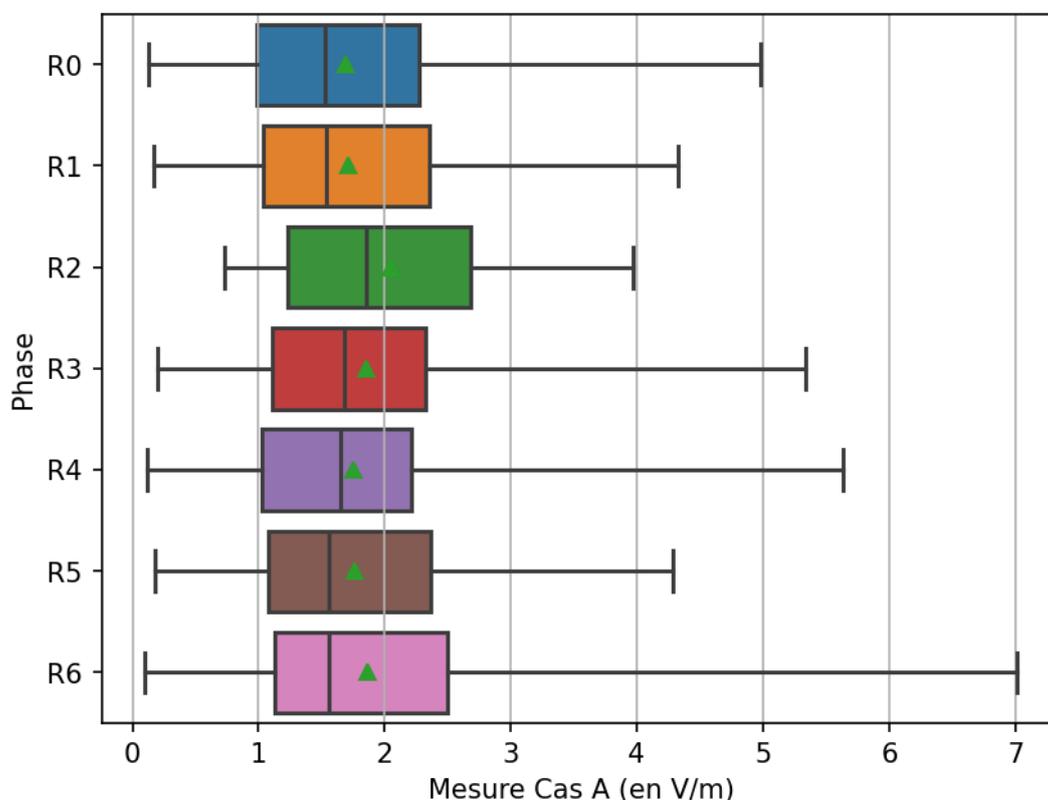


Figure 16 Distribution du niveau global de l'exposition par phase mesuré devant les sites 5G 2100 MHz

Phase	nombre	médiane	Δ médiane	moyenne	Δ moyenne	95 ^e centile	maximum
R0	90	1,53		1,69		3,54	4,98
R1	90	1,54	+0,01	1,72	+0,03	3,42	4,33
R2	70	1,86	+0,32	2,05	+0,33	3,53	3,97
R3	89	1,68	-0,16	1,85	-0,20	3,66	5,34
R4	90	1,64	-0,04	1,75	-0,10	3,42	5,63
R5	90	1,56	-0,08	1,76	+0,01	3,44	4,29
R6	90	1,56	+0,00	1,86	+0,10	3,68	7,01

Tableau 8 Paramètres statistiques des distributions du niveau global de l'exposition par phase mesuré devant les sites 5G 2100 MHz

La Figure 16 et le Tableau 8 présentent l'évolution du niveau global de l'exposition pour les 90 sites 5G 2100 MHz ciblés. Le nombre de mesures effectuées à chaque phase étant très faible en comparaison au nombre total de sites techniquement opérationnels en France, il se peut que cette évolution ne soit pas représentative de l'évolution à l'échelle nationale mais elle indique tout de même une tendance intéressante. En moyenne, le niveau global de l'exposition a augmenté de 0,17 V/m entre R0 et R6 tandis que la médiane a connu de petites fluctuations mais augmente seulement de +0,05 V/m entre R0 et R6. Les résultats de mesures de la phase R2 sont légèrement supérieurs en moyenne et en médiane, cela est dû au biais dans le choix des mesures de la phase R2.

5.2 Résultats de mesures sélectives en fréquence

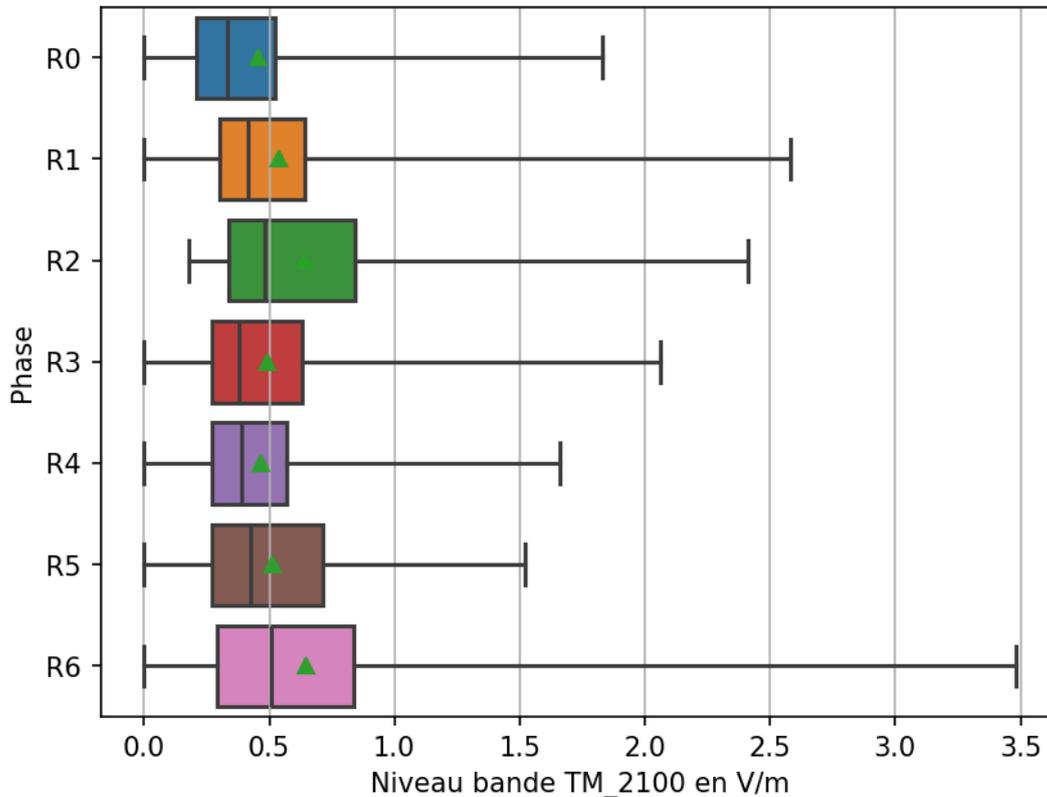


Figure 17 Niveau d'exposition de la bande 2100 MHz par phase

Phase	nombre	médiane	Δmédiane	moyenne	Δmoyenne	95 ^e centile	maximum
R0	90	0,34		0,46		1,54	1,83
R1	62	0,42	+0,08	0,54	+0,08	1,24	2,58
R2	41	0,48	+0,06	0,64	+0,10	1,38	2,41
R3	89	0,38	-0,10	0,49	-0,15	1,15	2,06
R4	90	0,39	+0,01	0,46	-0,03	1,09	1,66
R5	90	0,42	+0,03	0,51	+0,05	1,12	1,52
R6	90	0,51	+0,09	0,65	+0,14	1,50	3,48

Tableau 9 Paramètres statistiques du niveau d'exposition de la bande 2100 MHz par phase

La Figure 17 et le Tableau 9 montrent l'évolution de l'exposition dans la bande de téléphonie mobile 2100 MHz qui comprend les technologies 3G et 4G, et à partir de R1 la technologie 5G. Les données mesurées montrent que le niveau de l'exposition dans cette bande a augmenté de 0,19 V/m en moyenne et de 0,17 V/m en médiane entre R0 et R6. Il est difficile de savoir si l'augmentation de l'exposition dans cette bande est due ou non à la seule 5G puisque dans cette bande d'autres technologies sont aussi utilisées.

La Figure 18 présente l'évolution du niveau d'exposition des bandes de téléphonie mobile en fonction des phases. Ce graphique montre une tendance à la hausse de l'exposition dans la bande de téléphonie mobile 2100 MHz. Les autres bandes sont plutôt stables sauf la bande 3500 MHz qui présente une nette augmentation entre R0 et R6. Finalement, l'évolution de l'exposition des bandes de téléphonie mobile pour les sites 5G 2100 MHz décrit les mêmes tendances que l'évolution de l'exposition pour les sites 5G 3500 MHz en section 4.2 à la Figure 10. Il est intéressant d'observer que la bande de téléphonie 2100 MHz voit son niveau d'exposition augmenter notamment sur les dernières phases R5 et R6. Il sera intéressant d'observer la trajectoire d'évolution du niveau d'exposition de cette bande pour la phase de mesures de la campagne 5G en 2024.

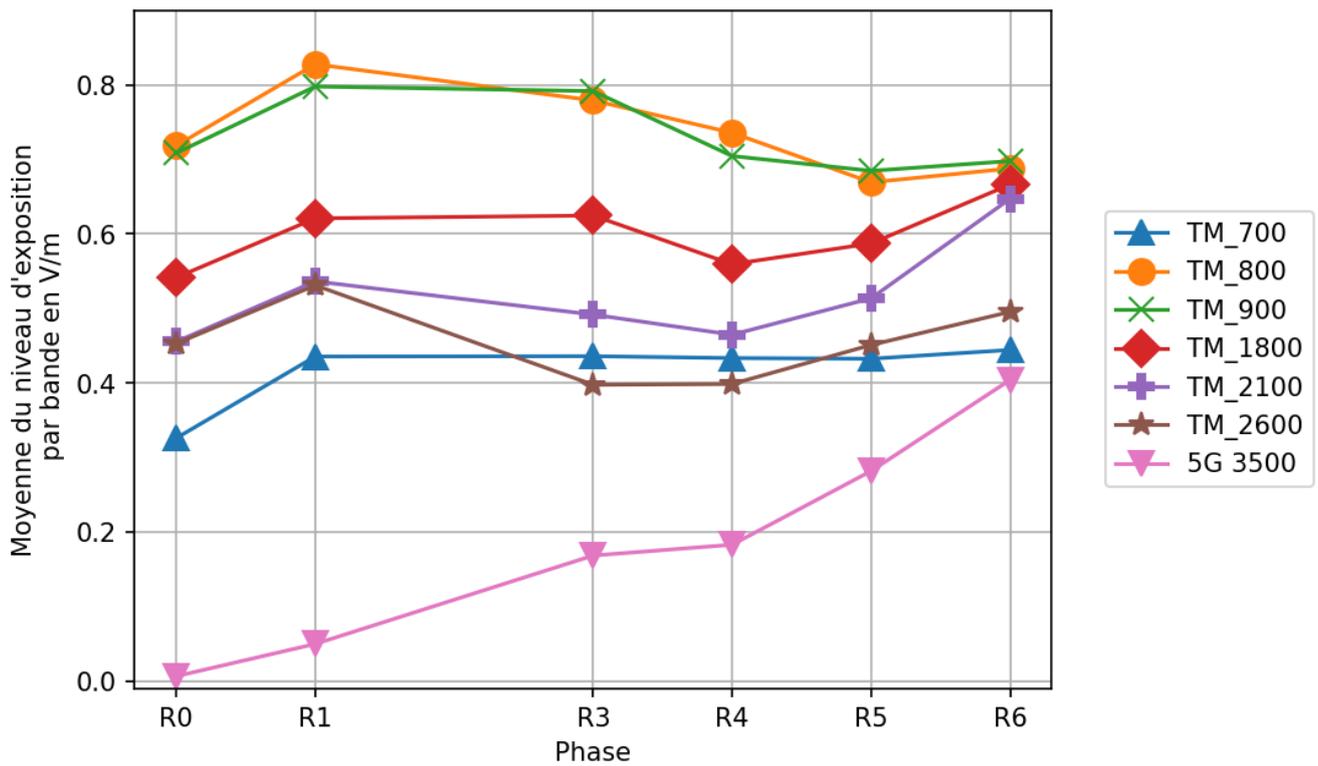


Figure 18 Evolution du niveau d'exposition par bande de téléphonie mobile et par phase pour les sites 5G 2100 MHz

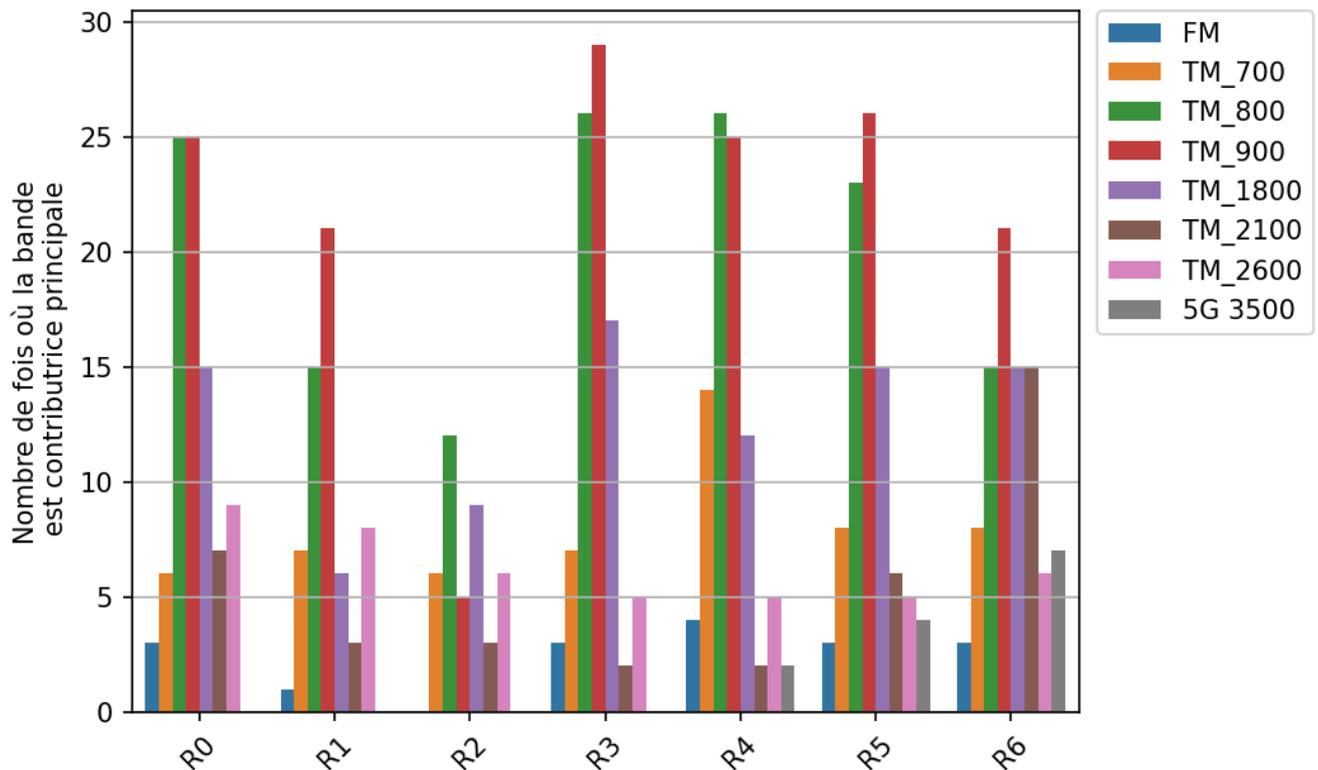


Figure 19 Histogrammes du nombre de contributions principales constatées par phase et par bande pour les sites 5G 2100 MHz

La Figure 19 présente le nombre de fois où les bandes ont été contributrices principales sur toutes les mesures faites devant les sites 5G 2100 MHz. Entre R0 et R6, les bandes contributrices principales sont quasi systématiquement la bande 800 MHz et la bande 900 MHz. Entre R0 et R5, la bande 2100 MHz est contributrice

principale au maximum 7 fois sur les 90 sites mesurés. En R6, la bande 2100 MHz atteint 15 sites où elle est contributrice principale (sur 90 sites), tout comme les bandes de 800 MHz et 1800 MHz.

6. Analyse de l'évolution de l'exposition de la bande 5G 700 MHz

En section 2, il a été indiqué que la 5G a été déployée dans la bande de téléphonie mobile 700 MHz uniquement par un opérateur. Cette bande de téléphonie mobile contient déjà la technologie 4G. Afin d'évaluer l'évolution de l'exposition dans la bande 700 MHz, 38 sites ont été sélectionnés afin de suivre le niveau global de l'exposition et les niveaux détaillés en fréquences. De la même manière que pour la bande 2100 MHz, les moyens de mesure ne permettent pas de distinguer la contribution 5G de la contribution 4G dans le niveau mesuré de la bande.

6.1 Résultats de mesures du niveau global de l'exposition

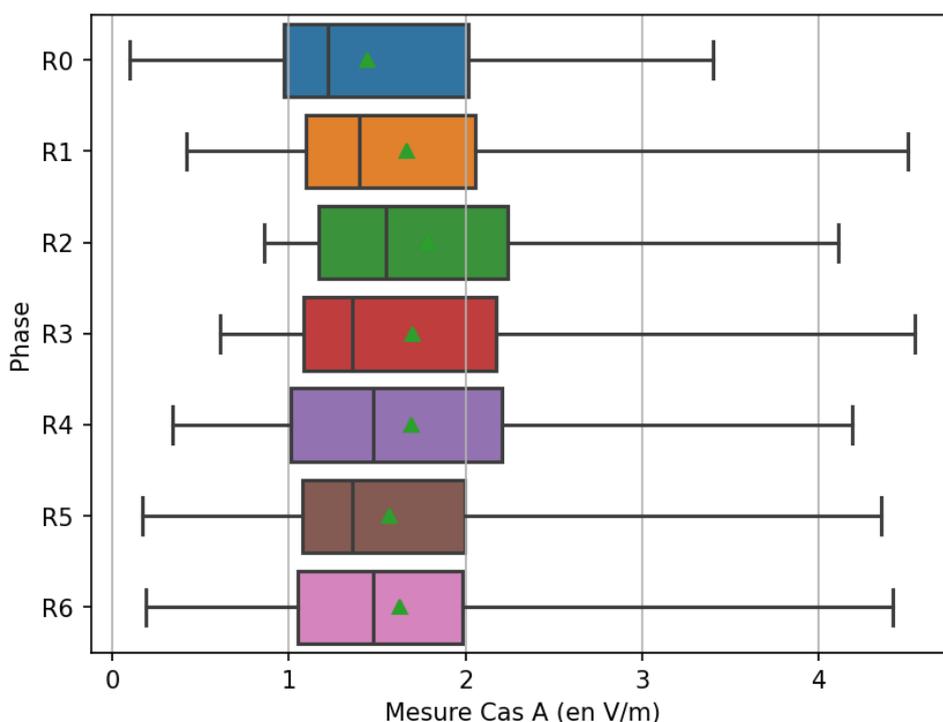


Figure 20 Distribution du niveau global de l'exposition par phase mesuré devant les sites 5G 700 MHz

Phase	nombre	médiane	Δ médiane	moyenne	Δ moyenne	95 ^e centile	maximum
R0	38	1,22		1,44		2,92	3,40
R1	38	1,40	+0,18	1,67	+0,23	3,04	4,50
R2	37	1,55	+0,15	1,78	+0,11	2,91	4,11
R3	38	1,36	-0,19	1,70	-0,08	3,38	4,54
R4	38	1,48	+0,12	1,69	-0,01	3,77	4,19
R5	38	1,36	-0,12	1,56	-0,13	2,99	4,35
R6	38	1,48	+0,12	1,63	+0,07	3,36	4,42

Tableau 10 Paramètres statistiques des distributions du niveau global de l'exposition par phase mesuré devant les sites 5G 700 MHz

La Figure 20 et le Tableau 10 présentent l'évolution du niveau global de l'exposition pour les sites en bande 700 MHz sélectionnés. Les mesures montrent que la moyenne du niveau global augmente de +0,19 V/m entre

2020 et 2023 tandis que la médiane augmente de +0,26 V/m. On constate également que le niveau global de l'exposition à proximité de ces sites 5G 700 MHz fluctue en fonction des phases de mesure, ce qui montre que l'augmentation du niveau est sensible. À ce stade, il n'est pas possible de savoir si l'augmentation du niveau global de l'exposition est due à la contribution de la bande 700 MHz ou aux autres bandes.

6.2 Résultats de mesures sélectives en fréquence

La Figure 21 et Tableau 11 présentent l'évolution du niveau d'exposition dans la bande 700 MHz pour les 38 sites mesurés entre R0 et R6. Les données montrent que le niveau dans la bande 700 MHz connaît des fluctuations et au final augmente de +0,13 V/m sur la moyenne et de +0,15 V/m sur la médiane. L'augmentation en R2 par rapport à R1 est significativement différente de celles des phases consécutives, ce qui est dû au biais dans le choix des mesures effectuées en cas B durant R2.

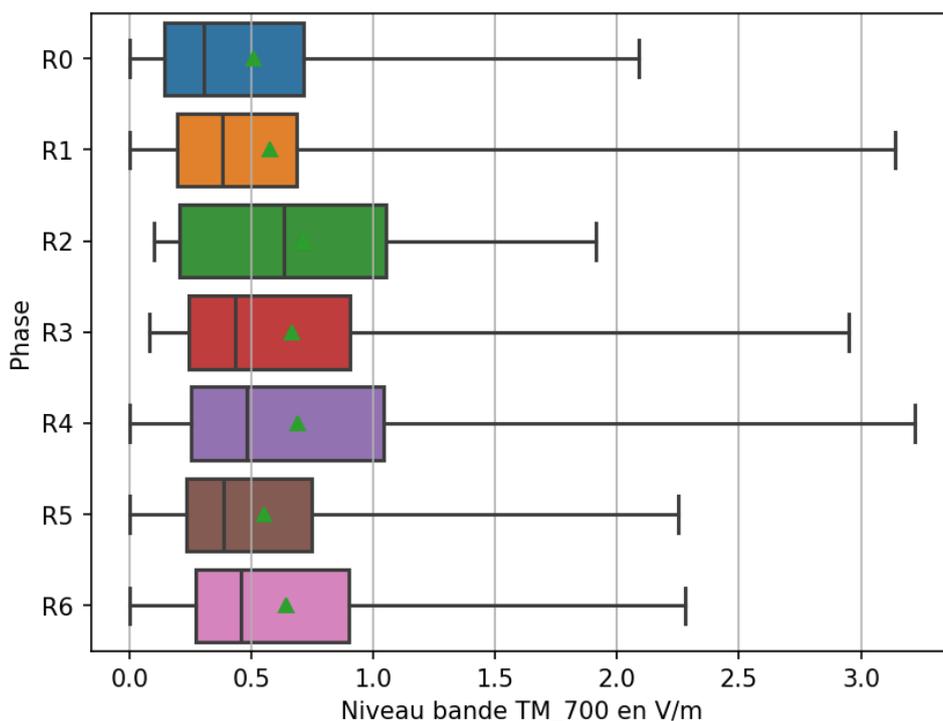


Figure 21 Niveau d'exposition de la bande 700 MHz par phase

Phase	nombre	médiane	Δmédiane	moyenne	Δmoyenne	95 ^e centile	maximum
R0	38	0,31		0,51		1,77	2,09
R1	30	0,38	+0,07	0,57	+0,06	1,47	3,14
R2	15	0,63	+0,25	0,71	+0,14	1,70	1,91
R3	38	0,43	-0,20	0,66	-0,05	1,73	2,95
R4	38	0,48	+0,05	0,69	+0,03	1,71	3,22
R5	38	0,38	-0,10	0,55	-0,14	1,43	2,25
R6	38	0,46	+0,08	0,64	+0,09	1,45	2,28

Tableau 11 Paramètres statistiques du niveau d'exposition de la bande 700 MHz par phase

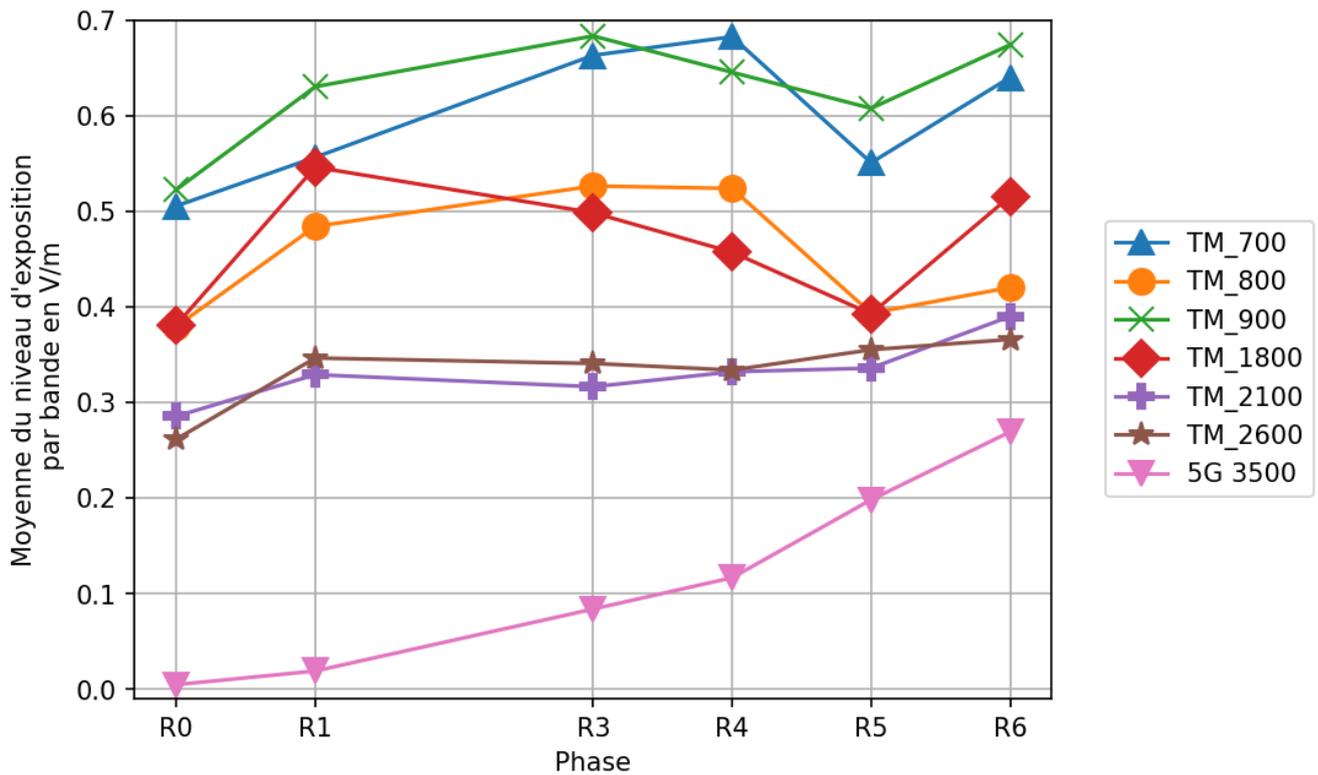


Figure 22 Evolution du niveau d'exposition par bande de téléphonie mobile et par phase pour les sites 5G 700 MHz

La Figure 22 présente l'évolution de l'exposition des bandes de téléphonie mobile pour les mesures effectuées devant les sites 5G 700 MHz. Ces courbes montrent que le niveau de l'exposition dans la bande 700 MHz connaît des fluctuations mais reste plutôt stable. Il faut noter que les bandes 5G 3500 MHz et TM 2100 MHz présentent respectivement des augmentations de l'exposition comme cela a été observé pour les sites 5G 3500 MHz et 2100 MHz.

La Figure 23 présente le nombre de fois où les bandes de fréquences ont été détectées comme étant contributrices principales du niveau d'exposition pour les sites ciblés 5G 700 MHz. Les données montrent que le nombre de fois où la contribution principale provient de la bande 700 MHz fluctue entre 7 et 13 fois (R2 mis à part) sur 38. La bande 700 MHz et la bande 900 MHz sont contributrices principales le plus souvent en R0 et de R3 à R6. Les résultats de mesure ne montrent pas d'augmentation franche du nombre de fois où la bande 700 MHz est relevé comme étant contributrice principale. Le nombre de mesures effectuées étant faible, ce constat ne peut pas être généralisé à l'ensemble de la France, mais cette stabilité est plausible.

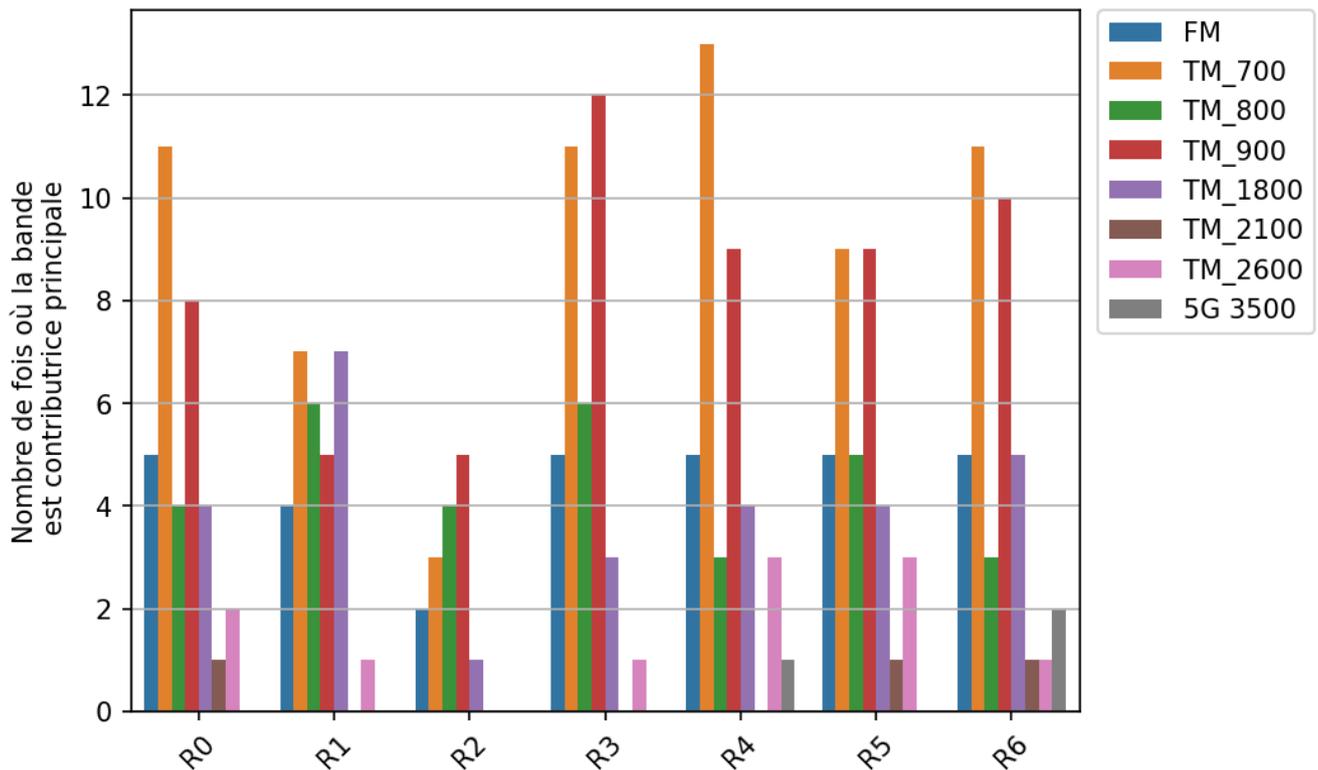


Figure 23 Histogrammes du nombre de contributions principales constatées par phase et par bande pour les sites 5G 700 MHz

7. Synthèse des observations

La campagne de mesure 5G révèle un certain nombre de tendances de l'évolution de l'exposition en France métropolitaine. Entre 2020 et 2023, les mesures effectuées systématiquement devant les mêmes sites radioélectriques révèlent l'augmentation de l'exposition générale ainsi que l'exposition dans les bandes où la technologie 5G est techniquement opérationnelle. En supplément, pour les sites 5G 3500 MHz, des mesures exploratoires de l'exposition durant le téléchargement d'un fichier de 1 Go permettent de comparer les niveaux d'exposition avec et sans sollicitation de la voie descendante mais également d'évaluer à quel point la 5G 3500 MHz est utilisée. Il est important de rappeler que tous les résultats des mesures effectuées pendant cette étude sont conformes aux limites en vigueur.

7.1 La bande 5G 3500 MHz

En quatre années, les mesures devant les sites 5G 3500 MHz montrent que :

- le niveau global de l'exposition a augmenté en moyenne et en médiane de 0,26 V/m,
- le niveau de la bande 5G 3500 MHz a augmenté en moyenne de 0,32 V/m et en médiane de 0,36 V/m.

Confirmant cette tendance, les figures Figure 10, Figure 18 et Figure 22 confirment toutes que la bande 5G 3500 MHz connaît une nette augmentation de l'exposition. Cependant, les bandes historiques de téléphonie mobile demeurent les contributrices principales pour la majorité des sites de mesure. L'évolution de la proportion des bandes contributrices principales montrent que la bande 5G 3500 MHz passe de 0 % à 7 % entre R0 et R6, cela confirme la progression de l'usage de la 5G en quatre années.

Les mesures exploratoires, en sollicitant la voie descendante, montrent que les niveaux sans téléchargement ont augmenté de 0,09 V/m entre R1 et R6 en moyenne et en médiane. Le niveau moyen de l'exposition avec téléchargement moyenné sur 6 minutes a augmenté quant à lui de 0,26 V/m pour la moyenne et 0,39 V/m pour

la médiane. Il a également été montré que, pour la moyenne ou la médiane, l'exposition est environ 4 fois plus forte avec un téléchargement moyenné sur 6 minutes que sans téléchargement, et cela pour toutes les phases. Le taux d'utilisation de la bande 5G 3500 MHz se situe à environ 14 % en médiane et 23% en moyenne par rapport à l'indicateur de l'exposition, ce qui signifie que cet indicateur reste au-dessus de l'usage actuel de la 5G 3500 MHz.

7.2 La bande 5G 2100 MHz

Les mesures devant les sites 5G 2100 MHz sont environ 10 fois moins nombreuses que celles devant les sites 5G 3500 MHz, cependant les résultats vont dans le même sens.

L'étude montre que :

- le niveau global de l'exposition devant les sites 5G 2100 MHz a augmenté de 0,17 V/m en moyenne et de 0,05 V/m pour la médiane,
- le niveau d'exposition de cette bande a augmenté de 0,19 V/m en moyenne et 0,17 V/m pour la médiane.

L'évolution de l'exposition de la bande 2100 MHz montre notamment que l'augmentation est plus grande pour les phases R5 et R6 et qu'il serait intéressant de voir si les mesures en 2024 suivront cette tendance.

Concernant les contributions principales, entre R0 et R5, la bande 2100 MHz est contributrice principale au maximum 7 fois sur les 90 sites mesurés. En R6, la bande 2100 MHz atteint 15 sites où elle est contributrice principale (sur 90 sites), tout comme les bandes 800 MHz et 1800 MHz.

En conclusion, pour les mesures effectuées devant les sites 5G 2100 MHz, l'exposition due à la bande de téléphonie mobile 2100 MHz augmente mais beaucoup moins que pour la bande 5G 3500 MHz. Cependant, les données d'exposition et le nombre de fois où la bande 2100 MHz a été détectée comme principale contributrice montrent que l'usage de cette bande de fréquence est probablement en croissance.

7.3 La bande 5G 700 MHz

Les mesures à proximité des sites 5G 700 MHz sont peu nombreuses mais témoignent de l'évolution de l'exposition.

L'étude montre que :

- le niveau global de l'exposition augmente de 0,19 V/m en moyenne et de 0,26 V/m pour la médiane,
- le niveau d'exposition de cette bande a augmenté de 0,13 V/m en et de 0,15 V/m pour la médiane.

Pour le niveau global de l'exposition et le niveau détaillé en fréquence, les variations interphases sont assez fluctuantes puisqu'au cours de la campagne des augmentations et diminutions moyennes ont été relevées entre les différentes phases.

La bande 700 MHz a souvent été détectée comme contributrice principale avec la bande 900 MHz. Les résultats de mesure ne montrent pas d'augmentation franche du nombre de fois où la bande 700 MHz est relevé comme étant contributrice principale mais au contraire une certaine stabilité.

7.4 La campagne 5G comparée aux observations annuelles du dispositif national de surveillance

Dans cette section, les niveaux relevés durant la campagne 5G sont comparés aux observations annuelles faites sur les mesures du dispositif national de surveillance de l'exposition.

L'analyse des résultats de mesures d'exposition du public aux ondes radiofréquences réalisées en 2022 dans le cadre du dispositif national de surveillance¹⁰ montre que le niveau global de l'exposition a augmenté en moyenne de 0,15 V/m entre 2020 et 2022 et que la médiane reste stable¹¹. Les mesures du dispositif national de surveillance sont statistiquement inférieures aux niveaux moyens et médians relevés durant la campagne 5G. En effet, on relève un niveau moyen de 1 V/m en 2022 pour les mesures du dispositif tandis que les mesures de la campagne 5G devant les sites 5G 3500 MHz en 2022 présentent un niveau moyen de 1,75 V/m en R3 et 1,66 V/m en R4. Ceci est dû au fait que les mesures du dispositif national de surveillance sont faites dans des lieux accessibles au public ou chez les particuliers mais ne sont pas forcément à proximité d'un site radioélectrique.

De la même manière pour les sites 5G 2100 MHz, les statistiques du niveau global de l'exposition pour la campagne 5G (1,85 V/m en R3, 1,75 V/m en R4) sont supérieures aux statistiques relevées lors de l'analyse du dispositif national pour les mêmes raisons précédemment décrites. À titre informatif, les mesures près des sites 5G 2100 MHz en 2022 montrent un niveau dans la bande 2100 MHz de 0,49 V/m en R3 et 0,46 V/m en R4 tandis que les mesures du dispositif de surveillance relèvent 0,52 V/m, ce qui est du même ordre de grandeur.

Pour les sites 5G 700 MHz, le niveau global de l'exposition en 2022 est de 1,70 V/m en R3 et 1,69 V/m en R4 et est supérieur aux résultats obtenus dans le cadre du dispositif national. Le niveau moyen de l'exposition dans la bande 700 MHz pour les mesures du dispositif est de 0,49 V/m en 2022 tandis les mesures de la campagne 5G donnent en moyenne 0,66 V/m en R3 et 0,69 V/m en R4.

8. Conclusion et perspectives

La campagne 5G lancée en 2020 a accompagné le déploiement de la 5G pour évaluer l'exposition avant et après sa mise en service. L'analyse menée sur les 7751 mesures *in situ* et les 5699 mesures exploratoires apporte des réponses à propos de la quantification de l'impact de la 5G sur l'exposition en France métropolitaine et de son usage grandissant.

Entre 2020 et 2023, le niveau global de l'exposition augmente de :

- 17 % en moyenne devant les sites 5G 3500 MHz observés pour atteindre un niveau moyen de 1,79 V/m,
- 10 % en moyenne devant les sites 5G 2100 MHz observés pour atteindre un niveau moyen de 1,86 V/m,
- 13 % en moyenne devant les sites 5G 700 MHz observés pour atteindre un niveau moyen de 1,63 V/m.

Les augmentations du niveau global de l'exposition sont supérieures aux augmentations relevées nationalement puisque les mesures ont été effectuées à proximité des sites radioélectriques et en ligne de vue directe par rapport aux émetteurs. Les augmentations relevées devant les sites 5G 2100 MHz et 5G 700 MHz sont à prendre avec précaution car le nombre de mesures reste assez faible, même si les résultats vont dans le même sens que les mesures effectuées devant les sites 5G 3500 MHz. Malgré ces augmentations la moyenne du niveau global de l'exposition relevé à la dernière phase reste :

- 34 fois inférieures à la limite en vigueur pour les sites 5G 3500 MHz,
- 33 fois inférieures à la limite en vigueur pour les sites 5G 2100 MHz,
- 22 fois inférieures à la limite en vigueur pour les sites 5G 700 MHz.

Les mesures sélectives en fréquences ont permis de quantifier l'augmentation du niveau dans les bandes de fréquences où la 5G a été déployée. Au vu de la faiblesse des niveaux relevés, les augmentations absolues sont présentées. Entre 2020 et 2023, les bandes où la 5G a été déployées, ont connu les augmentations suivantes :

- TM 3500 MHz : augmentation de 0,33 V/m en moyenne pour atteindre un niveau moyen de 0,41 V/m,
- TM 2100 MHz : augmentation de 0,19 V/m en moyenne pour atteindre un niveau moyen de 0,65 V/m,
- TM 700 MHz : augmentation de 0,13 V/m en moyenne pour atteindre un niveau moyen de 0,64 V/m.

¹⁰ <https://www.anfr.fr/maitriser/les-installations-radioelectriques/etudes-sur-les-installations-radioelectriques/rapports-annuels-des-mesures>

¹¹ Les données de la campagne 5G sont comparées aux données de 2022 du dispositif national de surveillance car ce sont les dernières données publiées disponibles

Finalement, on peut conclure que le niveau d'exposition dans la bande 5G 3500 MHz a clairement augmenté entre 2020 et 2023 mais représente malgré tout en général la contribution la plus faible des bandes de téléphonie mobile fin 2023, tandis que la bande 2100 MHz a connu une augmentation de moindre mesure surtout sur l'année 2023. Enfin, l'exposition due à la bande 700 MHz a très modérément augmenté par rapport aux autres bandes ayant accueillies la 5G.

Les mesures exploratoires non-accréditées ont révélé que les niveaux relevés sans téléchargement ont augmenté de 0,09 V/m pour moyenne et médiane, les niveaux avec téléchargements moyennés sur 6 minutes ont augmenté de 0,26 V/m pour la moyenne et 0,39 V/m pour la médiane. Ces mesures exploratoires montrent également que l'utilisateur est environ 4 fois plus exposé lorsqu'un fichier d'1 Go est téléchargé par rapport au niveau sans téléchargement. Ces mesures révèlent enfin que les bandes 5G 3500 MHz sont utilisés à 22 % en moyenne ce qui signifie que la quantité de donnée téléchargée (1 Go) reste un indicateur correct pour évaluer l'exposition.

La campagne 5G continuera en 2024 avec une seule et unique phase de 1175 mesures ainsi que des mesures exploratoires afin de continuer à suivre l'évolution de l'exposition. Une campagne de mesure spécifique à la Réunion et en Guyane est en cours et fera l'objet d'un rapport spécifique.

ANNEXE 1 : La boîte à moustaches ou boîte de Tukey

La boîte à moustaches ou boîte de Tukey est une manière de représenter les distributions statistiques qui va faciliter la comparaison entre plusieurs distributions.

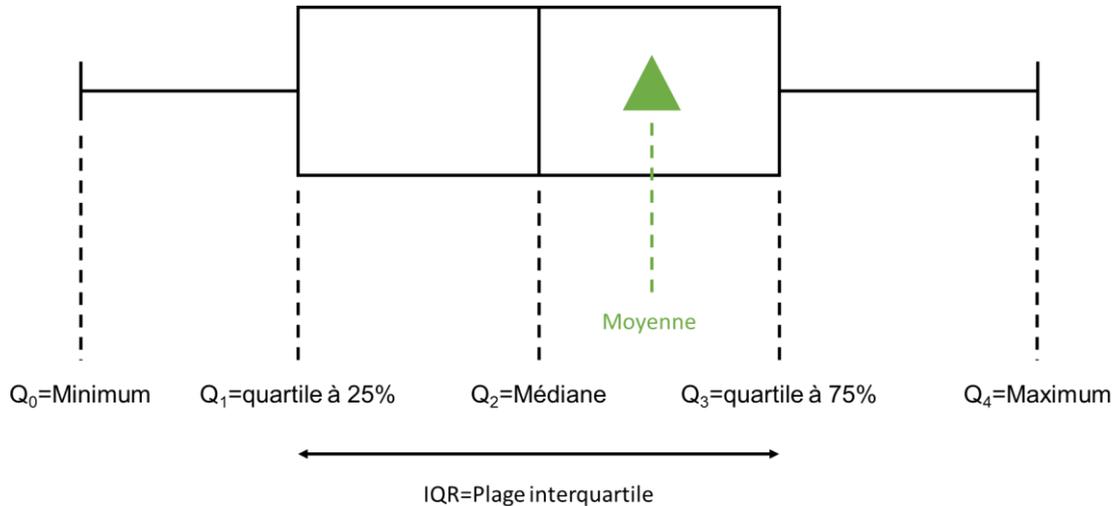


Figure 24 Schéma explicatif de la représentation en "boîte à moustaches"

La boîte à moustaches se définit sur l'identification d'un certain nombre de paramètres :

- Q₀ : la valeur minimum du jeu de mesures
- Q₄ : la valeur maximale du jeu de mesures
- Q₂ : la valeur médiane du jeu de mesures, valeur délimitant 50% des mesures les plus petites et 50 % des valeurs les plus grandes,
- Q₁ : le quartile à 25 % est la valeur médiane de la première moitié du jeu de mesures,
- Q₃ : le quartile à 75 % est la valeur médiane de la deuxième moitié du jeu de mesures,
- Et enfin, la moyenne qui est représentée par un triangle vert.

Sur base de ces éléments, la plage interquartile peut être déterminée par la différence entre Q₃ et Q₁ :

$$IQR = Q_3 - Q_1$$