



23.2.2021

Explications concernant les antennes adaptatives et leur évaluation selon l'ordonnance sur la protection contre le rayonnement non ionisant (ORNI)

Contenu

1	Introduction : 5G et antennes adaptatives	2
2	Ordonnance sur la protection contre le rayonnement non ionisant (ORNI)	3
2.1	Révision de l'ORNI de 2019 concernant la téléphonie mobile	3
2.2	Informations de base sur la prévision et la mesure du rayonnement de la téléphonie mobile	3
3	5G	4
3.1	Informations techniques	4
3.2	Prévision et mesure de la 5G	5
4	Antennes adaptatives et formation de faisceau	5
4.1	Construction d'antennes exploitables en mode adaptatif et définitions des termes	5
4.2	Technologies de formation de faisceaux (<i>beamforming</i>)	7
4.3	Applications de la formation de faisceaux	7
4.4	Conclusions	8
5	Rayonnement des antennes adaptatives : prévision et mesure	8
5.1	Données de base	8
5.2	Diagrammes d'antenne des antennes conventionnelles	9
5.3	Diagrammes d'antenne enveloppants des antennes adaptatives	10
5.4	Prise en compte des diagrammes d'antenne enveloppants dans la prévision du rayonnement des antennes adaptatives selon la recommandation d'exécution de l'ORNI	12
5.5	Mesures de réception : utilisation des diagrammes d'antenne des antennes adaptatives	13
6	Exposition aux antennes adaptatives	15
6.1	Études de simulation et considérations théoriques	15
6.2	Études de mesures	17
6.3	Mesures et simulations réalisées par l'OFCOM	17
6.4	Conclusions	20
7	Facteur de correction et limitation automatique de la puissance	21
8	Autres considérations	22
8.1	Prise en compte de l'exploitation en TDD	22
8.2	Recommandation d'exécution : suivi et expériences	24
9	Informations complémentaires	25



1 Introduction : 5G et antennes adaptatives

Les antennes de téléphonie mobile actuellement utilisées en Suisse émettent essentiellement avec une répartition spatiale constante du rayonnement. En revanche, les antennes adaptatives sont capables de focaliser le signal dans la direction de l'utilisateur ou de l'appareil de téléphonie mobile et de le réduire dans des autres directions (*beamforming* ou formation de faisceaux). De telles antennes seront de plus en plus utilisées à l'avenir, notamment avec la 5^e génération de téléphonie mobile (5G), mais elles peuvent également être utilisées pour des technologies antérieures, comme la 4G.

En Suisse, l'utilisation d'antennes en mode adaptatif est à mettre sur le compte des facteurs suivants :

- Début 2019, la Confédération a libéré des fréquences supplémentaires dans les bandes des 700 mégahertz (MHz), 1400 MHz et 3500 à 3800 MHz (= 3,5 à 3,8 gigahertz [GHz]) pour la téléphonie mobile. Des antennes adaptatives seront utilisées en particulier dans la bande de fréquences comprise entre 3,5 et 3,8 GHz. D'une part, d'un point de vue technique, ces fréquences ont une capacité de transmission plus faible que les fréquences utilisées jusqu'à présent autour de 2 GHz et en dessous, car leurs signaux sont davantage atténués à mesure qu'ils se propagent dans l'air ou dans l'enveloppe des bâtiments. D'autre part, en raison de la faible longueur d'onde du rayonnement dans cette gamme de fréquences (environ 8 cm), il est possible de construire des antennes plus petites et plus complexes avec lesquelles les signaux peuvent être rassemblés en un faisceau dirigé dans la direction souhaitée. De cette manière, les caractéristiques de propagation de moins bonne qualité peuvent être compensées.
- Fin 2018, les organismes de normalisation des télécommunications ont publié le premier jeu complet de normes pour la norme 5G. Par rapport aux générations précédentes de téléphonie mobile, la 5G présente une structure de signal plus souple et prévoit aussi explicitement l'utilisation d'antennes adaptatives. En avril 2019, les premières antennes émettant des signaux 5G sont entrées en service en Suisse.

L'introduction d'antennes adaptatives a donc été encouragée avec les fréquences supplémentaires dans la gamme comprise entre 3,5 et 3,8 GHz utilisées pour la téléphonie mobile depuis le début de 2019, et avec la normalisation 5G qui est entièrement disponible depuis la fin de 2018. Cependant, la norme 5G ne définit que la manière dont les signaux numériques sont transmis à l'antenne (c'est-à-dire la façon dont ils sont répartis entre les différents ports d'une antenne adaptative). En revanche, le mode de fonctionnement des antennes adaptatives ne fait pas partie de la normalisation 5G, mais dépend du fabricant (cf. Figure 1).

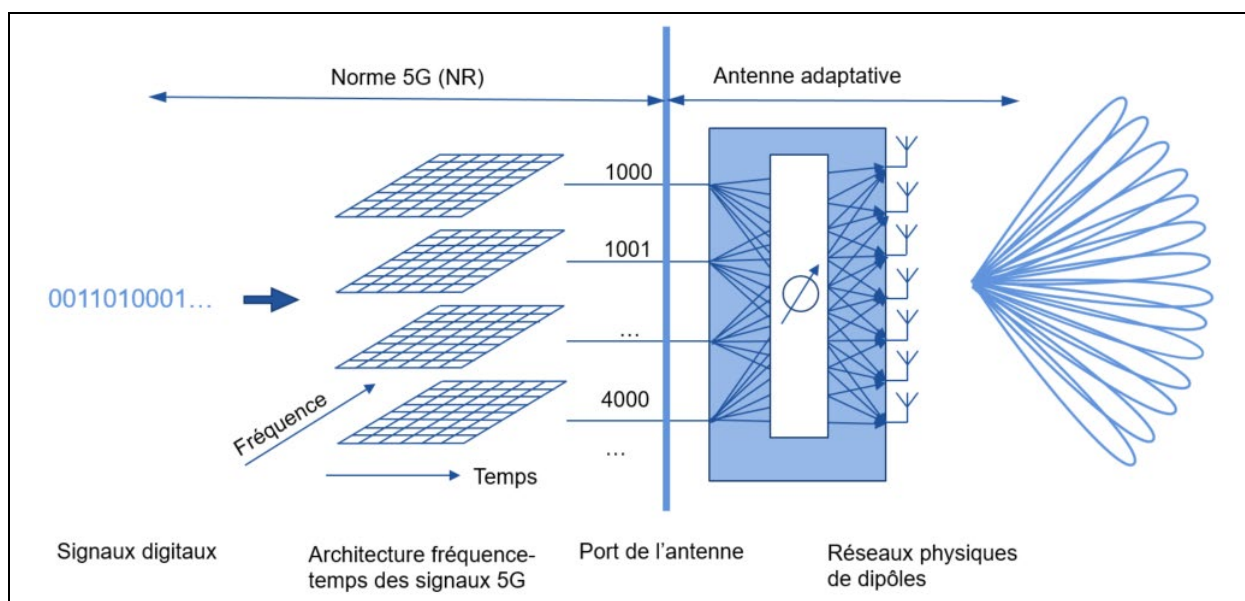


Figure 1 Représentation schématique de la relation entre la 5G et les antennes adaptatives. La norme 5G définit l'architecture fréquence-temps des signaux et la manière dont ils sont acheminés vers les différents ports d'antenne. En revanche, le mode de fonctionnement de l'antenne adaptative est indépendant de la 5G (source : METAS).

2 Ordonnance sur la protection contre le rayonnement non ionisant (ORNI)

2.1 Révision de l'ORNI de 2019 concernant la téléphonie mobile

L'ordonnance sur la protection contre le rayonnement non ionisant (ORNI) n'est pas liée à une technologie particulière ; elle s'applique aussi bien à la technologie de téléphonie mobile de type 2G (GSM), 3G (UMTS), 4G (LTE) ou 5G (*New Radio*). En raison des fréquences autour des 1400 MHz nouvellement attribuées à la téléphonie mobile au début de 2019 et compte tenu de l'utilisation d'antennes adaptatives qui se dessinait, une modification de l'ORNI était néanmoins nécessaire. Elle a été adoptée le 17 avril 2019 :

- Pour la gamme de fréquences comprises entre 900 et 1800 MHz, aucune valeur limite de l'installation (VLInst) n'avait été définie à l'annexe 1, ch. 64, ORNI. Le Conseil fédéral a fixé cette valeur - en accord avec le niveau de précaution précédent - à 5 volts par mètre (V/m).
- Pour les antennes adaptatives, le Conseil fédéral a établi le principe selon lequel la variabilité de leurs directions d'émission et de leurs diagrammes d'antenne doit être prise en compte lors de la détermination du mode d'exploitation déterminant dans lequel les VLInst doivent être respectées conformément à l'annexe 1, ch. 64, ORNI.

Le 23.2.2021, l'OFEV a publié un complément à l'aide à l'exécution de l'ORNI pour les antennes adaptatives décrivant comment la variabilité de leurs diagrammes d'antenne peut être prise en compte dans l'évaluation selon l'ORNI. Des informations générales sur cette recommandation d'exécution et sur des aspects fondamentaux de la 5G et des antennes adaptatives sont présentées ci-après.

2.2 Informations de base sur la prévision et la mesure du rayonnement de la téléphonie mobile

Les cantons et les communes sont responsables de l'octroi des autorisations et du contrôle des installations de téléphonie mobile ainsi que du respect des valeurs limites de l'ORNI. Les procédures peuvent différer quelque peu d'un canton à l'autre, mais les principes sont les mêmes :

- **Calcul d'une prévision** : si de nouvelles installations de téléphonie mobile sont construites ou si les installations existantes sont étendues, le rayonnement attendu à proximité de l'installation est calculé à l'avance pour vérifier si les valeurs limites de l'ORNI sont respectées. Ces calculs sont basés sur des paramètres d'exploitation de l'installation tels que les directions et les puissances d'émission. Ces informations et les résultats des calculs sont documentés dans la fiche de données spécifique au site et sont vérifiés par les autorités.
- **Mesure de réception après la mise en service** : si les calculs montrent que la VLInst de l'ORNI est épuisée à plus de 80 % dans des lieux à utilisation sensible (LUS) tels que les appartements, les écoles, les hôpitaux, les lieux de travail permanents ou les terrains de jeux pour enfants, les autorités ordonnent généralement une mesure de réception après la mise en service de l'installation nouvelle ou transformée. Ainsi, le respect de la VLInst est contrôlé non seulement en théorie, mais aussi dans les conditions réelles d'exploitation.
- **Vérification en cours d'exploitation** : étant donné que certains paramètres ayant une influence sur le rayonnement à proximité d'une installation (tels que les puissances d'émissions) peuvent être réglés et modifiés à distance, les opérateurs ont mis en place un système d'assurance de la qualité dans leurs centres de réseau. Il s'agit de bases de données dans lesquelles les valeurs paramétrées pour la direction d'émission et la puissance émettrice maximale de chaque installation, pour chaque fréquence et chaque service de radiocommunication, sont saisies et comparées quotidiennement avec les valeurs autorisées. Les divergences par rapport aux paramètres autorisés doivent être corrigées dans les 24 heures si elles peuvent l'être à distance ou, au plus, en l'espace d'une semaine ouvrable. Certaines données opérationnelles et d'approbation (selon la fiche de données spécifique au site) de toutes les installations sont également contenues dans une base de données de l'Office fédéral de la communication (OFCOM) et peuvent y être contrôlées par les autorités.

Cette procédure d'autorisation et de contrôle est décrite ici sous une forme très abrégée et uniquement dans la mesure nécessaire aux explications ultérieures. Des informations détaillées sur l'autorisation

et le contrôle des installations de téléphonie mobile figurent au point 7.2 du [Rapport du groupe de travail Téléphonie mobile et rayonnement](#) du 18 novembre 2019.

3 5G

3.1 Informations techniques

La 5G s'appuie sur la norme 4G existante (LTE). Dans l'espace fréquence-temps, le signal 5G présente une architecture similaire à celle du signal 4G ; en outre il est doté de la même **modulation**, à savoir le **multiplexage par répartition orthogonale en fréquence** (en anglais *Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*, OFDM).

La 5G peut donc être exploitée en même temps que la 4G. Dans ce **mode d'exploitation non autonome (non-standalone)**, la signalisation (c'est-à-dire l'envoi d'informations à une cellule radio pour l'identifier) est fournie par un réseau 4G existant. Les données d'utilisation sont toutefois diffusées avec la norme 5G dans la même bande de fréquences que la 4G (les canaux dits de trafic). La 5G peut également être exploitée indépendamment de la 4G. Dans le **mode d'exploitation autonome (standalone)**, la signalisation et les données d'utilisation sont transmises via la 5G. La pleine efficacité de celle-ci n'est atteinte que de cette manière.

La 5G dispose donc de canaux de signalisation et de données, tout comme les précédentes technologies de téléphonie mobile. Contrairement aux générations précédentes, où les canaux de signalisation et de données étaient toujours diffusés avec le même **diagramme d'antenne**, avec la 5G, les canaux de signalisation et de données peuvent être diffusés avec des diagrammes différents (voir point 5.3 pour plus de plus amples informations).

Dans la normalisation internationale, deux **gammes de fréquences** sont envisagées pour la 5G : une pour les fréquences inférieures à 6 GHz (FR1 : 450 à 6000 MHz) et une pour les fréquences supérieures à 6 GHz (FR2 : 24,25 à 52,6 GHz). Dans le cas de cette dernière, on parle également d'« ondes millimétriques ». En Suisse, la 5G est utilisée entre 700 et 3800 MHz (= 3,8 GHz) (cf. Figure 2 ; quant aux ondes millimétriques, elles ne sont pas encore prévues pour la téléphonie mobile. Concernant l'utilisation de telles ondes, c'est au Conseil fédéral d'en décider, dans le cadre de l'approbation du Plan national d'attribution des fréquences (PNAF).

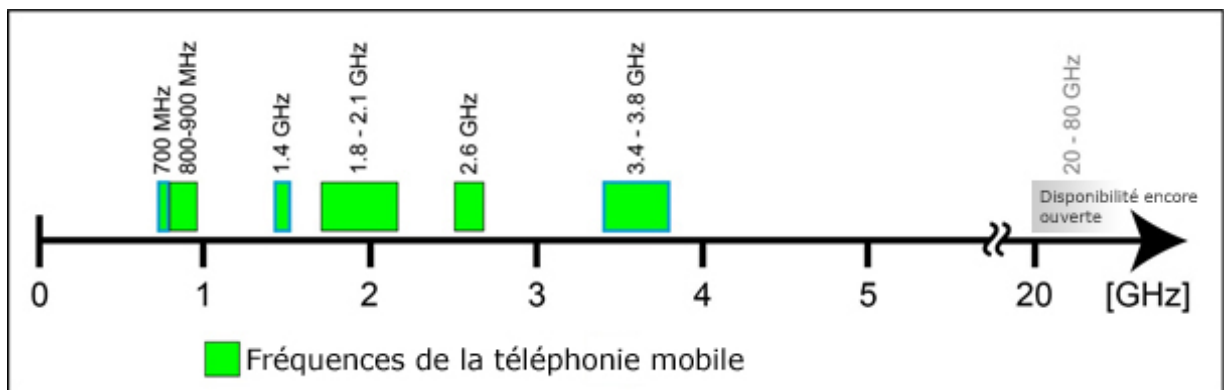


Figure 2 En Suisse, la 5G peut être utilisée sur toutes les fréquences autorisées pour la téléphonie mobile entre 700 MHz et 3,8 GHz. Les premières antennes adaptatives sont utilisées dans la gamme entre 3,4 et 3,8 GHz (source : groupe de travail RNI du Cercl'Air).

En Suisse, dans les bandes de fréquences comprises entre 700 MHz et 2,6 GHz, les signaux diffusés de la station de base vers l'appareil mobile (liaison descendante) sont actuellement transmis sur une fréquence autre (ou dans une bande de fréquences adjacente séparée) que celle utilisée pour les signaux allant du terminal vers l'antenne (liaison montante). C'est ce que l'on appelle le **duplexage par répartition en fréquence** (en anglais *Frequency Division Duplex*, FDD).

De 3,4 à 3,8 GHz et en partie à 2,6 GHz, les liaisons descendante et montante sont réalisées sur la même fréquence, mais à des moments différents, ce qui s'appelle le **duplexage par répartition**

dans le temps (en anglais *Time Division Duplexing, TDD*). Les créneaux temporels prévus pour la liaison descendante et la liaison montante sont clairement définis ; le rapport entre la liaison descendante et la liaison montante est actuellement de 4:1 (ou 80:20). Durant un cycle liaison descendante - liaison montante, la station de base émet donc au maximum pendant 80 % du temps tandis que 20 % du temps est réservé à la transmission du dispositif mobile vers la station de base. Le TDD est utilisé lorsque les données à transmettre sont beaucoup plus nombreuses sur la liaison descendante que sur la liaison montante. En outre, les liaisons descendante et montante ont les mêmes caractéristiques de propagation.

L'utilisation de la technologie FDD ou TDD ne dépend pas de la génération de téléphonie mobile, mais est spécifiée dans les concessions pour les fréquences respectives. En conséquence, le FDD est également utilisé pour la 5G entre 700 MHz et 2,6 GHz et le TDD en partie à 2,6 GHz et entre 3,4 et 3,8 GHz.

3.2 Préviation et mesure de la 5G

Les valeurs limites d'immissions (VLI) et les VLIInst spécifiées dans l'ORNI varient en fonction de la fréquence du rayonnement, mais elles ne dépendent pas de la technologie de téléphonie mobile ; elles s'appliquent donc indépendamment du fait qu'il s'agisse de la 2G (GSM), de la 3G (UMTS), de la 4G (LTE) ou de la 5G (*New Radio*). Les **prévisions** de rayonnement **calculées** dans le cadre de la procédure d'autorisation sont neutres sur le plan technologique. Elles sont donc également applicables à la 5G.

La technologie de téléphonie mobile utilisée ne joue un rôle que pour les **mesures de réception** après la mise en service, la forme du signal utilisée dépendant de la norme de téléphonie mobile. Dans le rapport technique « [Méthode de mesure des stations de base 5G NR jusqu'à 6 GHz](#) » du 18 février 2020, l'Institut fédéral de métrologie (METAS) a présenté les définitions des signaux 5G et les composantes du signal devant être mesurées. De plus amples informations à ce sujet figurent également sous le point 2.1 des « [Explications concernant la méthode de mesure des antennes adaptatives](#) » de l'OFEV du 30 juin 2020.

4 Antennes adaptatives et formation de faisceau

4.1 Construction d'antennes exploitables en mode adaptatif et définitions des termes

Une antenne exploitable en mode adaptatif est constituée d'un réseau d'antennes élémentaires (à polarisation croisée) ou d'éléments d'antenne en colonnes et en lignes, également appelée antenne réseau (cf. Figure 3) :

- L'interconnexion de plusieurs éléments d'antenne permet de générer un effet directionnel appliqué au rayonnement émis, se concluant en un faisceau (*beam*). En termes simplifiés, on peut dire que plus le nombre d'éléments d'antenne est élevé, plus l'effet directionnel possible est important, c'est-à-dire plus le faisceau émis est étroit et plus le gain d'antenne est élevé.
- Si les éléments d'antenne individuels ou interconnectés sont activés différemment (par exemple par des déphasages), la direction d'émission principale du faisceau peut être déplacée horizontalement et verticalement.

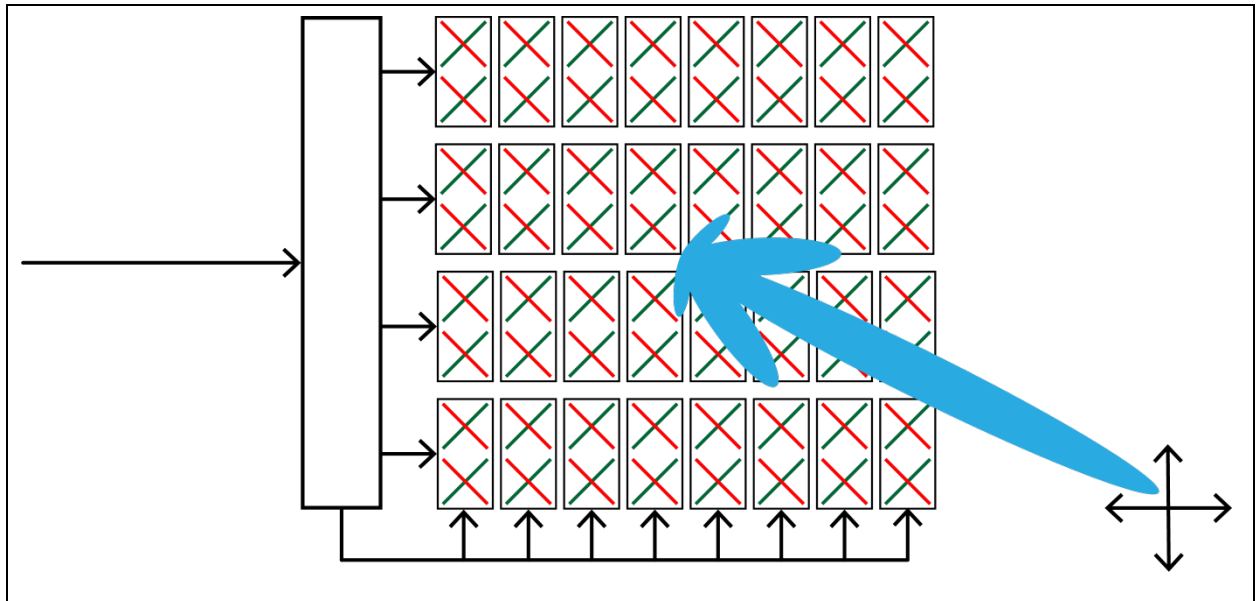


Figure 3 Schéma de principe d'une antenne adaptative dotée de 64 éléments d'antenne constitués de dipôles croisés (représentés en rouge et en vert). Dans cet exemple, deux éléments d'antenne sont à chaque fois couplés pour former un sub array. L'antenne est donc constituée de $4 \times 8 = 32$ sub arrays.

Des notions utilisées dans le cadre du complément à l'aide à l'exécution de l'ORNI pour les antennes adaptatives sont définies ci-après.

Au sens de l'ORNI, les **antennes adaptatives** sont des antennes émettrices ou des systèmes d'antennes ajustant automatiquement leur direction d'émission et/ou leur diagramme d'antenne à intervalles rapprochés sans modification de la direction de montage..

Dans les antennes de téléphonie mobile couramment utilisées aujourd'hui, un **élément d'antenne** se compose de deux dipôles à polarisation croisée ; sur la Figure 3 le dipôle vert est polarisé à $+45^\circ$ et le dipôle rouge à -45° . Les signaux émis ont donc deux plans de polarisation différents.

Les éléments d'antenne couplés physiquement sont appelés **sub array**. Par exemple, si sur une antenne composée de 96 éléments d'antenne (= 192 dipôles) 3 éléments d'antenne sont interconnectés, l'antenne dispose de 32 sub arrays ; si 6 éléments d'antenne sont groupés, l'antenne dispose de 16 sub arrays. Autre exemple : une antenne composée de 64 éléments d'antenne (= 128 dipôles) dispose de 32 sub arrays si 2 éléments d'antenne sont interconnectés et de 16 sub arrays si 4 éléments sont interconnectés

Dans le présent exemple, chaque polarisation d'un sub array est desservie par une **voie d'émission** distincte, ou exprimé dans l'autre sens : une voie d'émission dessert toujours tous les dipôles interconnectés de même polarisation d'un sub array. Dans le cas des antennes constituées de dipôles à polarisation croisée, un sub array est donc desservi par deux voies d'émission.

Chaque voie d'émission est initiée via un étage de sortie distinct (appelé émetteur (*transmitter*) ou élément TX). Une voie d'émission correspond normalement aussi à une voie de réception (récepteur ou RX), alors que les signaux circulent dans le sens opposé lors de la réception. Une antenne dite 64T/64R dispose donc de plus de 64 voies d'émission, soit de 32 sub arrays, et une antenne 32T/32R dispose de plus de 32 voies d'émission, soit de 16 sub arrays (cf. Tableau 1).

Tableau 1 Exemples numériques en lien avec les dipôles, les éléments d'antenne, les sub arrays et les voies d'émission pour les antennes constituées de dipôles à polarisation croisée

Nombre de dipôles	Nombre d'éléments d'antenne	Nombre d'éléments d'antenne physiquement interconnectés	Nombre de sub arrays	Nombre de voies d'émission	Étages de sortie (voie d'émission x voie de réception)
192	96	3	32	64	64×64 ou 64T/64R
192	96	6	16	32	32×32 ou 32T/32R
128	64	2	32	64	64×64 ou 64T/64R
128	64	4	16	32	32×32 ou 32T/32R

Le nombre de faisceaux qu'une antenne adaptative peut générer dépend du nombre d'unités d'antennes contrôlées de manière individuelle. En ce qui concerne l'exposition de l'être humain où les différents niveaux de polarisation ne jouent pas un rôle significatif, le nombre de sub arrays est donc pertinent. Le nombre de voies d'émission (ou d'émetteurs-récepteurs [*transciever*], par exemple 64T) est généralement publié dans les fiches techniques des antennes. Pour les antennes à deux plans de polarisation, cette information peut être divisée par deux pour obtenir le nombre de sub arrays par antenne.

4.2 Technologies de formation de faisceaux (*beamforming*)

L'activation différenciée des divers éléments d'antenne est devenue possible grâce à la haute performance des ordinateurs actuels, qui peuvent traiter les signaux en moins de temps qu'auparavant. Selon l'endroit du processus de traitement du signal, où sont effectués les déphasages pour piloter différemment les éléments d'antenne, différents nombres de faisceaux émis simultanément sont possibles et la technologie de formation des faisceaux est désignée différemment, bien que les définitions ne soient pas toujours utilisées exactement de la même manière.

Si le déphasage appliqué au signal pour les différents éléments de l'antenne s'opère après la conversion du signal numérique en signal analogique (dans la partie haute fréquence de l'antenne), on parle de **formation de faisceau analogique**. Les antennes fonctionnant de cette manière ne peuvent émettre qu'un seul faisceau ou un seul diagramme de rayonnement spécifique à la fois. Des diagrammes ou des directions d'émission (faisceaux) différents doivent donc être émis successivement. En outre, le déphasage étant appliqué à toute la bande de fréquences, les différentes gammes de fréquences ne peuvent pas être émises simultanément dans des directions différentes. Dans la formation de faisceaux analogique, la phase est appliquée linéairement à tous les éléments d'une antenne, ce qui signifie que le nombre maximal de caractéristiques spatiales ou de faisceaux différents pouvant être généré est égal au nombre d'unités activables séparément dans l'antenne (sub arrays).

Si le signal est réparti entre les différents éléments d'antenne dans la partie numérique du traitement du signal et donc avant la conversion du numérique en analogique, on parle de **formation de faisceau numérique**. Avec la formation de faisceau numérique, il est théoriquement possible de générer simultanément un nombre quelconque de faisceaux dans n'importe quelle orientation, puisque chaque élément d'antenne peut se voir attribuer ses propres caractéristiques d'amplitude et de phase. De plus, le diagramme d'antenne ainsi formé ne doit pas nécessairement présenter une direction claire du faisceau principal. Par exemple, si la liaison avec la station de base n'est pas en visibilité directe, un canal peut être « taillé sur mesure » à un terminal en utilisant différentes voies de propagation.

Les antennes adaptatives utilisées aujourd'hui emploient souvent une combinaison de formations de faisceau analogique et numérique, appelée **formation de faisceau hybride**. Dans ce cas, plusieurs éléments d'antenne sont combinés en un « bloc fonctionnel », exploité avec une technologie de formation de faisceau analogique. Il en résulte une limitation du nombre de faisceaux pouvant être transmis simultanément. Si plusieurs faisceaux sont émis simultanément, la puissance d'émission dont dispose la station de base est répartie entre les différents faisceaux (OFCOM 2021).

4.3 Applications de la formation de faisceaux

En plus des différentes manières de former des faisceaux, il existe également différentes façons d'appliquer la technologie de formation de faisceaux. En pratique, les variantes suivantes sont mentionnées, bien que les désignations ne soient pas toujours cohérentes entre les sources (OFCOM 2021) :

- Pour les liaisons radio sans réflexion, généralement en transmission à vue, la station de base émet un seul faisceau direct avec la meilleure qualité de connexion vers le terminal (**SISO : Single Input, Single Output**).
- Dans le cas de connexions radio moins bonnes, l'antenne peut émettre le même flux de données vers l'appareil mobile par des voies différentes, par exemple via les réflexions sur des structures environnantes telles que les façades des maisons ou des reliefs, et réduire le rayonnement en direction des autres utilisateurs (**SIMO : Single Input, Multiple Output**).
- Pour augmenter le débit de données, plusieurs flux de données peuvent également être émis simultanément vers un appareil mobile via différents faisceaux (**SU-MIMO : Single User - Multiple Input, Multiple Output**).
- En utilisation quotidienne, plusieurs terminaux sont visés simultanément par une antenne de la station de base via différents faisceaux. Les connexions individuelles s'adaptent à la structure de la cellule radio et peuvent établir à la fois des connexions directes et des connexions par réflexion (**MU-MIMO : Multi User - Multiple Input, Multiple Output**).
- Si l'antenne de la station de base se compose d'un grand nombre d'éléments d'antenne (plus de cent) et peut donc générer de nombreux faisceaux individuels, alors un terminal peut être activé simultanément via de nombreuses voies de connexion (**mMIMO : massive Multiple Input, Multiple Output**).

4.4 Conclusions

Quelle que soit la façon dont sont nommées les applications et les technologies de formation de faisceaux, les questions suivantes sont pertinentes en ce qui concerne l'application de l'ORNI en matière d'antennes adaptatives :

- L'interconnexion de plusieurs éléments d'antenne (sub arrays) permet de générer un effet directionnel appliqué au rayonnement émis, se concluant en un faisceau (*beam*). En termes simplifiés, on peut dire que plus le nombre d'éléments d'antenne est élevé, plus l'effet directionnel possible est important, c'est-à-dire plus le faisceau émis est étroit et plus le gain de l'antenne est élevé.
- Le nombre de faisceaux qu'une antenne adaptative peut générer dépend du nombre d'unités d'antennes activables séparément - le nombre de sub arrays.
- Selon la technologie utilisée, soit un seul faisceau peut être émis à la fois, soit plusieurs faisceaux peuvent être émis simultanément.
- Le diagramme de l'antenne ne doit pas nécessairement présenter une direction claire du faisceau principal, mais peut avoir des formes différentes.
- Cependant, tous les faisceaux et formes de propagation possibles restent dans un diagramme d'antenne enveloppant (cf. point 5.3).
- Si un seul faisceau est émis à la fois, la puissance d'émission maximale peut être concentrée dans ce faisceau. Si plusieurs faisceaux sont émis simultanément, la puissance émettrice dont dispose la station de base est répartie entre eux. C'est ce que montrent, entre autres, les mesures effectuées par l'OFCOM en été 2020 (OFCOM 2021).

5 Rayonnement des antennes adaptatives : prévision et mesure

5.1 Données de base

L'exposition à proximité d'une station de base dépend essentiellement de la puissance apparente rayonnée (*effective radiated power*, ERP) de l'antenne, du diagramme de rayonnement spatial de l'antenne (diagramme d'antenne), de la distance et de l'orientation par rapport à l'antenne et de l'atténuation par l'enveloppe des bâtiments (murs, toitures). Si ces facteurs sont connus pour une situation spécifique, on peut calculer, en termes d'intensité de champ électrique exprimée en volts par mètre (V/m), l'immission causée par une antenne de téléphonie mobile à un endroit précis dans l'environnement. Tous ces

paramètres et les résultats des calculs sont documentés dans la fiche de données spécifiques au site que les exploitants doivent soumettre à l'autorité et que celle-ci vérifie.

Les diagrammes d'antenne décrivant le rayonnement spatial de l'antenne constituent un paramètre central du calcul de la prévision dans le cadre des autorisations, tant pour les antennes conventionnelles que pour les antennes adaptatives.

5.2 Diagrammes d'antenne des antennes conventionnelles

Même les antennes conventionnelles n'émettent pas uniformément dans toutes les directions, mais rassemblent les signaux radio en un faisceau dirigé dans la direction principale souhaitée. En dehors du cône de propagation, le rayonnement ne disparaît pas totalement, mais il est nettement estompé. Toutefois, à côté du faisceau principal apparaissent des « lobes secondaires » dans lesquels le rayonnement est également plus élevé. La Figure 4 montre une représentation 3D du rayonnement d'une antenne LTE mesuré à l'aide d'un drone.

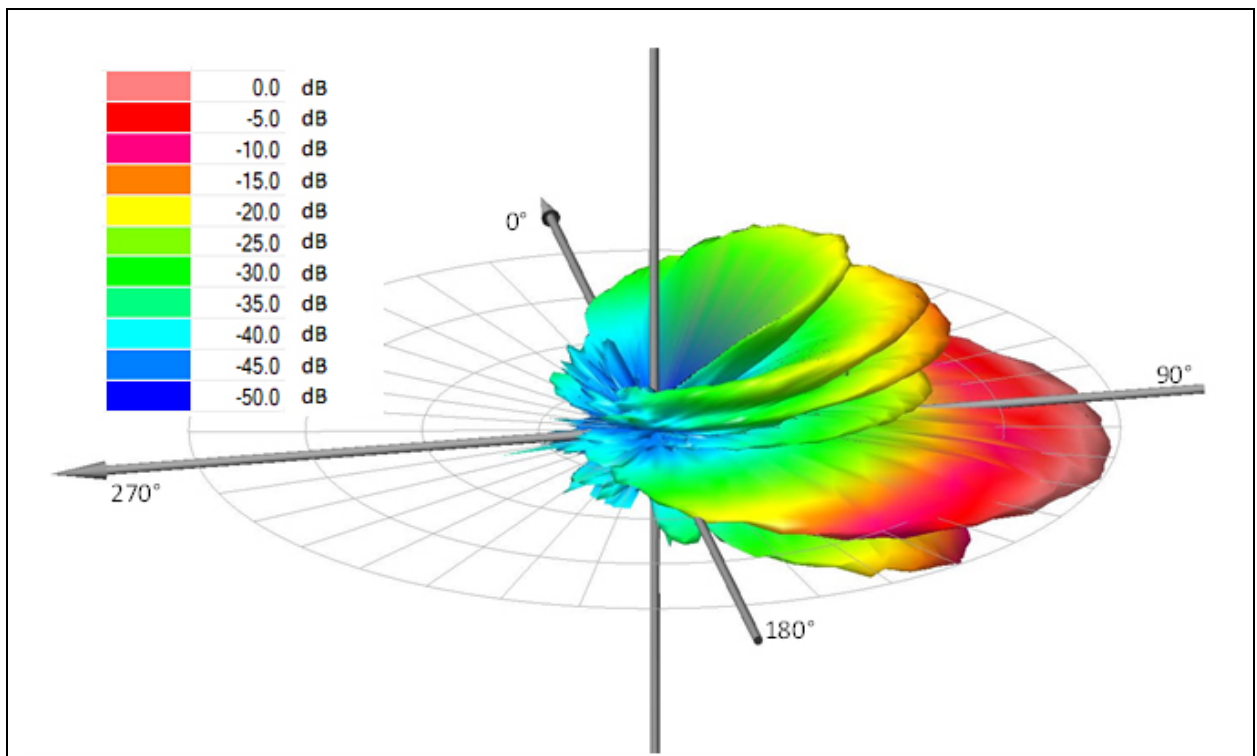


Figure 4 Représentation 3D du rayonnement d'une antenne LTE émettant sur une fréquence de 1800 MHz. L'antenne est située au milieu du diagramme et émet avec une légère inclinaison vers le bas (élévation) dans la direction portant la marque « 90° » (azimut). En plus du faisceau principal (rougeâtre), des lobes latéraux sont également visibles (source : STRAPAG 2018).

Si l'on observe la figure tridimensionnelle par le côté et que l'on procède à une coupe verticale, on obtient le diagramme d'antenne vertical à deux dimensions (cf. Figure 5, à gauche). Dans l'exemple en question, on peut constater que l'antenne n'émet pas horizontalement (0°), mais légèrement vers le bas.

Si l'on observe l'antenne depuis le haut et que l'on procède à une coupe horizontale à travers le diagramme d'antenne en 3D, on obtient le diagramme d'antenne horizontal à deux dimensions (cf. Figure 5, à droite). Il indique la direction (azimut en degrés) dans laquelle l'antenne émet.

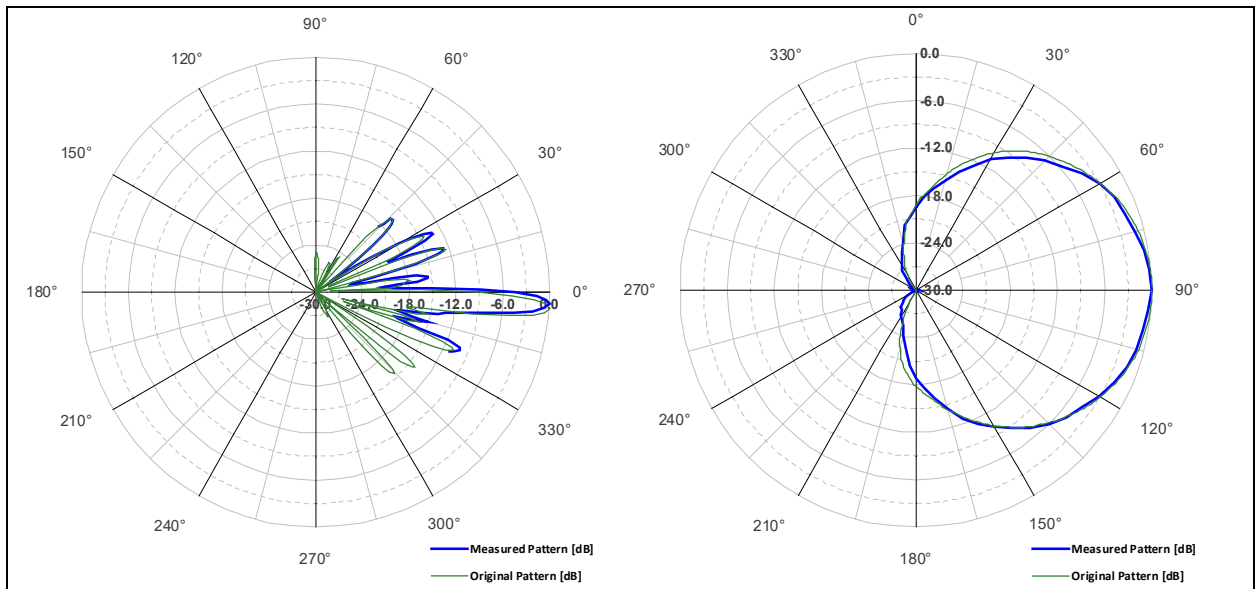


Figure 5 Diagrammes d'antenne vertical (à gauche) et horizontal (à droite) d'une antenne LTE émettant dans la gamme des 1800 MHz. Le diagramme original mesuré en laboratoire est en vert, celui mesuré sur le terrain à l'aide d'un drone est en bleu (en termes d'intensité du champ électrique) (source : STRAPAG 2018).

Les diagrammes d'antenne horizontaux et verticaux sont fournis par le fabricant d'antennes et sont joints à la fiche de données spécifique au site que les opérateurs doivent soumettre dans le cadre de la procédure d'autorisation. Elle fournit des informations essentielles au calcul de l'intensité du champ électrique créé dans les LUS à proximité de l'installation.

Les diagrammes d'antenne sont mesurés par le fabricant en laboratoire. En 2018, dans le cadre d'une étude pilote, l'OFEV a fait mesurer, à l'aide d'un drone, l'orientation du rayonnement de l'antenne d'une installation de téléphonie mobile existante dans un environnement réel. Il ressort des résultats que les diagrammes d'antenne mesurés sont en bonne concordance avec les diagrammes originaux (cf. STRAPAG 2018).

5.3 Diagrammes d'antenne enveloppants des antennes adaptatives

L'annexe 1, ch. 63, de l'ORNI définit le mode d'exploitation déterminant pour une installation de téléphonie mobile, dans laquelle la valeur limite de l'installation doit être respectée sur les lieux à utilisation sensible. En principe, il s'agit du mode d'exploitation dans lequel un maximum de conversations et de données est transféré, l'émetteur étant au maximum de sa puissance.

Dans le cas des antennes conventionnelles, l'orientation du rayonnement (représentée par un diagramme d'antenne) est toujours la même. En revanche, dans le cas des antennes adaptatives, elle peut prendre des caractéristiques spatiales différentes lorsqu'un maximum de conversations et de données est transféré, l'émetteur étant au maximum de sa puissance. Par exemple, un seul faisceau peut être formé. Ce faisceau peut être émis dans différentes directions (cf. Figure 6), ce qui permet aux antennes adaptatives d'obtenir une couverture horizontale élevée et d'alimenter, si nécessaire, les zones précédemment mal couvertes en bordure des cellules cibles avec une intensité de champ plus élevée. Plusieurs faisceaux peuvent également être émis simultanément, et leur direction d'émission principale peut aussi varier.

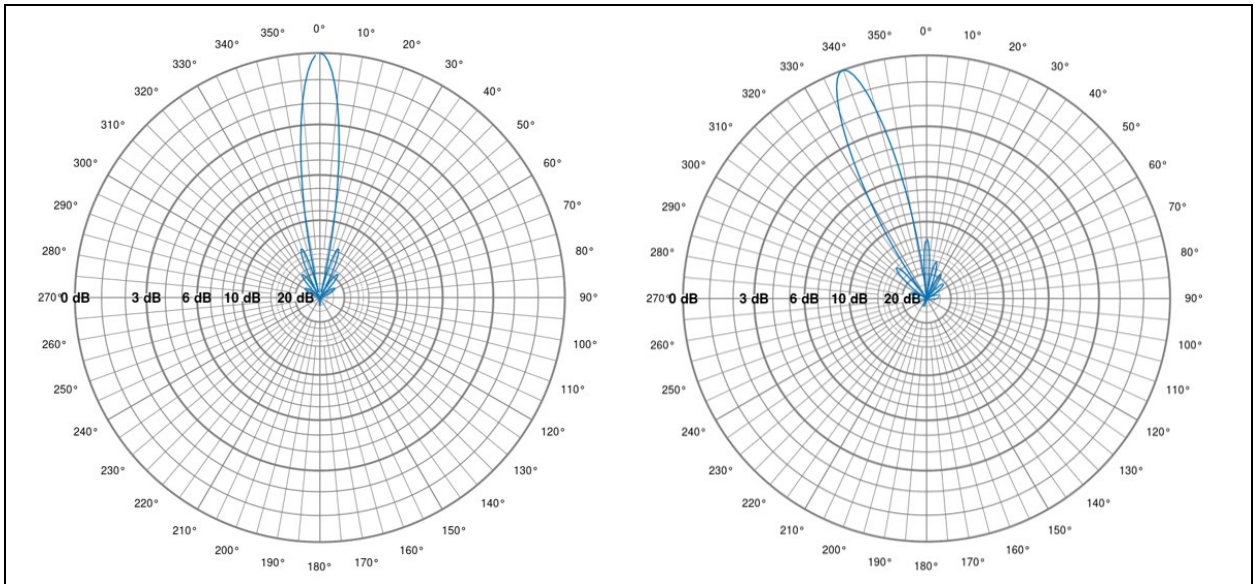


Figure 6 Exemples de diagramme d'antenne horizontal d'une antenne adaptative dans le mode d'exploitation déterminant. Sur l'image de gauche, l'azimut de la direction d'émission principale est de 0° et sur celle de droite de 340°.

Le diagramme d'antenne dans le mode d'exploitation déterminant n'est donc pas toujours le même pour les antennes adaptatives, c'est pourquoi les prévisions calculées pour les antennes adaptatives sont basées sur un diagramme d'antenne enveloppant. Celui-ci comprend tous les diagrammes d'antenne pouvant exister dans le mode d'exploitation déterminant (cf. Figure 7). Les diagrammes d'antenne enveloppants prennent en compte le fait que les faisceaux émis dans des directions s'écartant fortement de la direction principale sont moins concentrés et présentent un gain d'antenne plus faible.

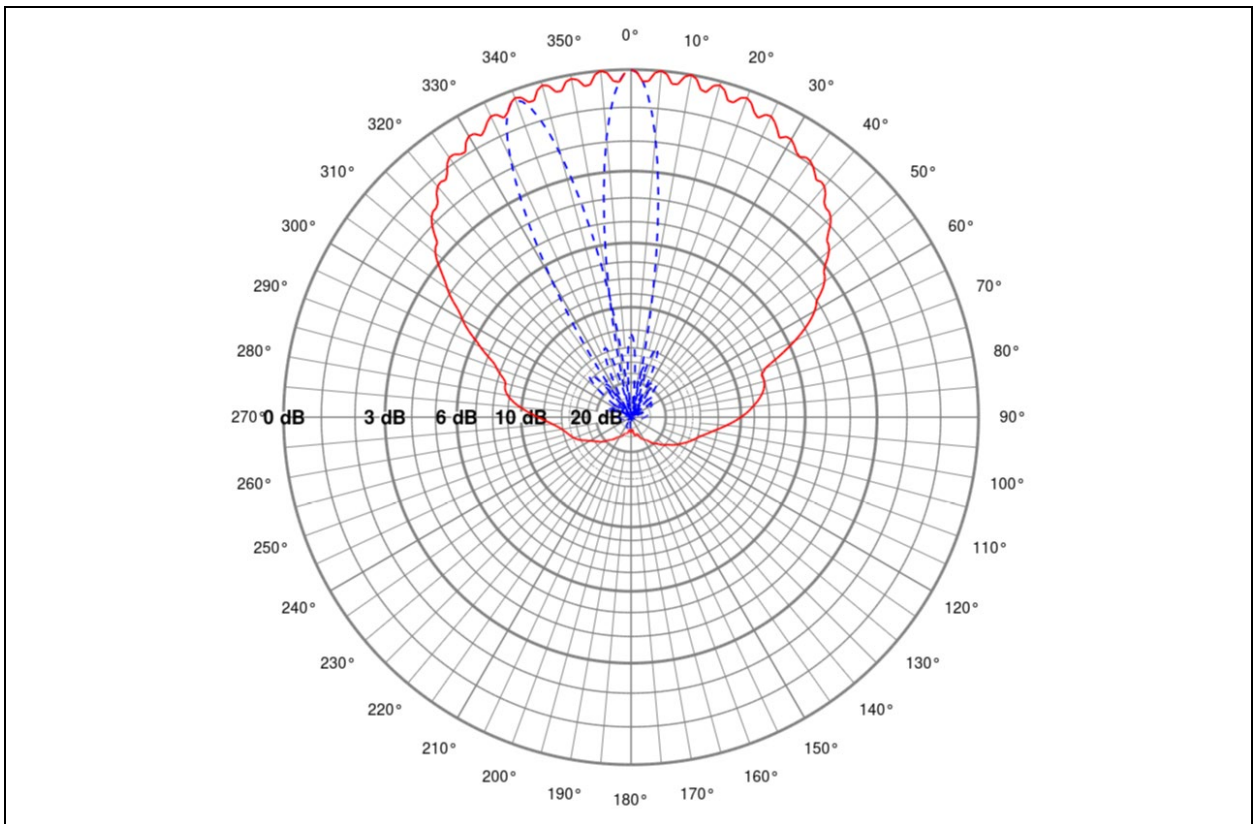


Figure 7 Exemple de diagramme d'antenne enveloppant horizontal d'une antenne Ericsson (AIR6488) émettant dans la gamme des 3,6 GHz. Le diagramme d'antenne enveloppant comprend tous les diagrammes d'antenne pouvant théoriquement exister dans le mode d'exploitation déterminant. Cependant, ces diagrammes d'antenne individuels ne peuvent pas être émis tous en même temps.

Dans l'exemple de la Figure 7, les caractéristiques des différents faisceaux sont clairement visibles dans le diagramme d'antenne enveloppant. Ceci est la conséquence du fait que cette antenne utilise des diagrammes d'antenne prédéfinis. Cependant, il existe également des antennes adaptatives qui calculent et ajustent en permanence le diagramme d'antenne afin d'offrir la meilleure couverture possible aux appareils mobiles actifs dans la cellule. Outre la position des terminaux et leurs exigences de qualité pour la communication radio, les réflexions et les obstacles existants ainsi que d'autres conditions limites telles que la topographie sont également pris en compte. Ainsi, les formes de faisceau et les diagrammes d'antenne appliqués concrètement prennent des contours variés, mais restent toujours inscrits dans le diagramme d'antenne enveloppant. Un exemple de ce type est représenté par la Figure 8.

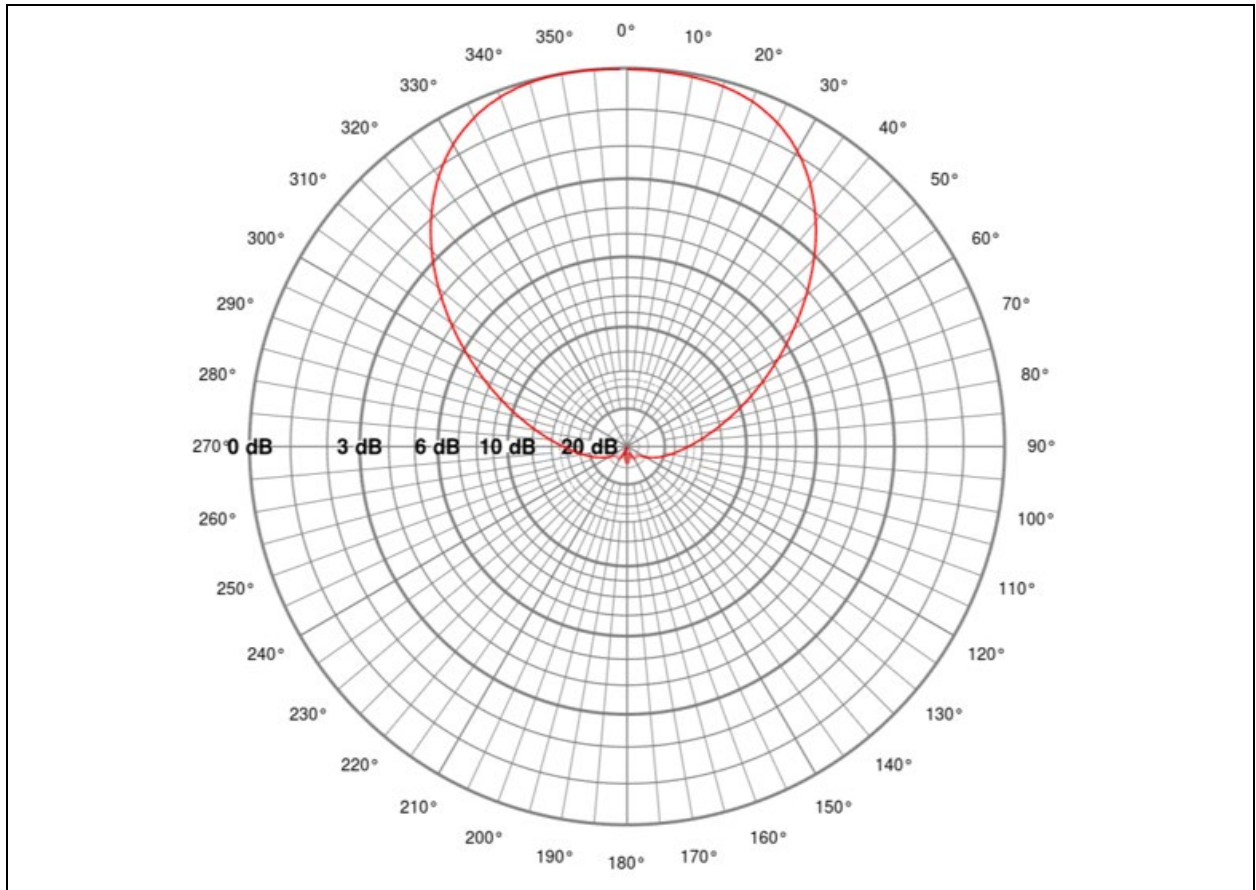


Figure 8 Exemple de diagramme d'antenne enveloppant horizontal d'une antenne Huawei (AAU5313) émettant dans la gamme des 3,6 à 3,8 GHz, où les différents diagrammes d'antenne peuvent prendre des formes variées, ce qui explique que des faisceaux distincts ne sont plus visibles dans l'enveloppe. Cependant, les différents diagrammes d'antenne individuels restent toujours à l'intérieur de l'enveloppe.

5.4 Prise en compte des diagrammes d'antenne enveloppants dans la prévision du rayonnement des antennes adaptatives selon la recommandation d'exécution de l'ORNI

Comme mentionné ci-dessus, le calcul des prévisions concernant les antennes adaptatives est basé sur le diagramme d'antenne enveloppant – aussi bien pour le diagramme d'antenne vertical qu'horizontal (cf. Figure 9).

Cependant, comme les différents diagrammes d'antenne sur lesquels est basé le diagramme enveloppant ne peuvent pas exister simultanément, les calculs basés sur les diagrammes d'antenne enveloppants surestiment considérablement le rayonnement se produisant dans la réalité. Selon ce scénario du pire (worst case) appliqué jusqu'à présent, les antennes adaptatives sont par conséquent évaluées plus sévèrement que les antennes conventionnelles.

Afin de garantir que les antennes adaptatives ne soient pas désavantagées par rapport aux antennes conventionnelles, le Conseil fédéral a établi, dans la révision de l'ORNI de 2019, que la variabilité

des directions d'émission et des diagrammes d'antenne des antennes adaptatives doit être prise en considération dans le mode d'exploitation déterminant (annexe 1, ch. 63, ORNI). Ceci est réalisé conformément au complément à l'aide à l'exécution du 23.2.2021 de l'ORNI pour les stations émettrices pour la téléphonie mobile en ce qui concerne les antennes adaptatives en appliquant un facteur de correction à la puissance d'émission maximale. Ce facteur est gradué - en fonction du nombre de sub arrays (cf. point 7). Il est dérivé des études et des mesures présentées au point 6.

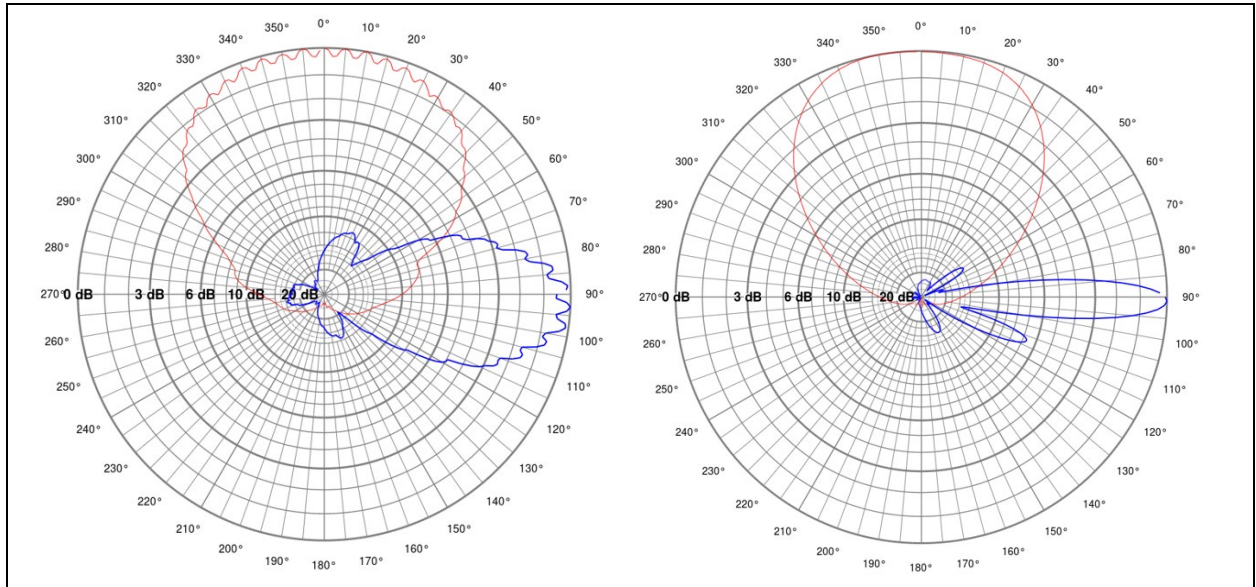


Figure 9 Exemples de diagrammes d'antenne enveloppants verticaux (en bleu) et horizontaux (en rouge) utilisés dans le calcul des prévisions dans le cadre de la procédure d'octroi d'autorisation. L'exemple d'une antenne Ericsson (AIR6488) est présenté à gauche et celui d'une antenne Huawei (AAU5313) à droite. Les diagrammes d'antenne enveloppants comprennent tous les diagrammes d'antenne individuels théoriquement possibles. Toutefois, ces derniers ne peuvent pas exister en même temps. Les diagrammes d'antenne enveloppants tiennent compte du fait que les faisceaux émis dans des directions s'écartant fortement de la direction principale de propagation sont moins concentrés et présentent un gain d'antenne plus faible.

5.5 Mesures de réception : utilisation des diagrammes d'antenne des antennes adaptatives

S'il ressort des prévisions calculées que la VLInst est épuisée à plus de 80 %, les autorités ordonnent généralement une mesure de réception après la mise en service de l'installation. Comme déjà mentionné, les installations de téléphonie mobile doivent respecter la VLInst de l'ORNI lorsqu'un maximum de conversations et de données est transféré, l'émetteur étant au maximum de sa puissance. Ce mode d'exploitation dit déterminant se produit rarement dans la réalité. Il n'est pas non plus possible de l'établir précisément pendant la durée de la mesure. Par conséquent, une mesure de réception est généralement effectuée pendant l'exploitation effective de l'installation. Leurs émissions étant périodiques et leur puissance constante, les canaux de signalisation sont les mieux adaptés à cette mesure. Le résultat de la mesure est ensuite extrapolé au mode d'exploitation déterminant (appelé valeur d'évaluation) afin d'évaluer si la VLInst est respectée.

En principe, cette méthode est également applicable aux antennes adaptatives. Toutefois, contrairement à la 4G, où les canaux de signalisation et de trafic sont émis avec le même diagramme d'antenne, la 5G permet de les transmettre avec des diagrammes différents. Les diagrammes d'antenne des canaux de trafic sont décrits dans la section 5.3 précédente. De leur côté, les canaux de signalisation 5G peuvent être émis par un à huit faisceaux, soit par un à huit diagrammes d'antenne (cf. Figure 10). Si plusieurs faisceaux sont émis, ils ne le sont pas simultanément, mais successivement.

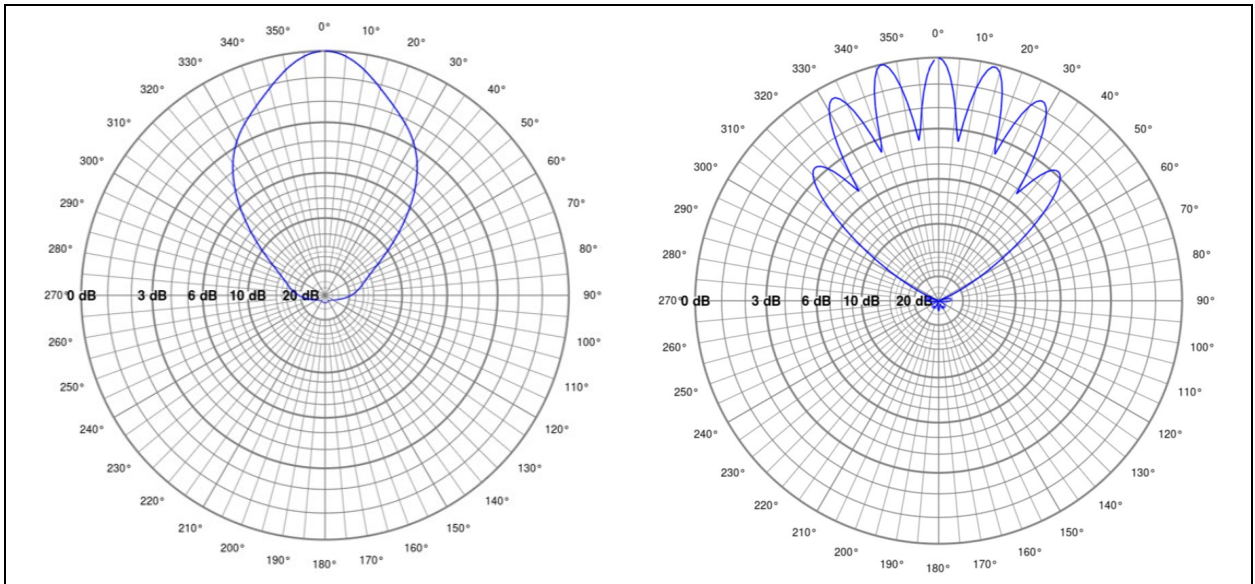


Figure 10 Deux exemples de diagrammes d'antenne des canaux de signalisation d'antennes adaptatives 5G. L'antenne Ericsson (AIR6488) sur la gauche utilise un seul diagramme de rayonnement pour la signalisation, tandis que l'antenne Huawei (AAU5313) sur la droite utilise sept faisceaux. Le diagramme d'antenne enveloppant illustré comprend les sept faisceaux. Cependant, les différents faisceaux ne sont pas émis simultanément, mais de manière séquentielle.

Les diagrammes d'antenne des canaux de signalisation étant différents de ceux des canaux de trafic (cf. Figure 11), le facteur d'extrapolation des antennes adaptatives n'est, contrairement à la 4G, plus constant pour toutes les directions d'émission. Dans le rapport technique « [Méthodes de mesure des stations de base 5G NR jusqu'à 6 GHz](#) » du 18 février 2020 et dans le [complément du 15 juin 2020](#), METAS a décrit comment la valeur d'évaluation peut être obtenue par extrapolation dans le cas de diagrammes d'antenne qui diffèrent. Des informations à ce sujet figurent également dans les « [Explications concernant la méthode de mesure pour les antennes adaptatives](#) » de l'OFEV du 30 juin 2020.

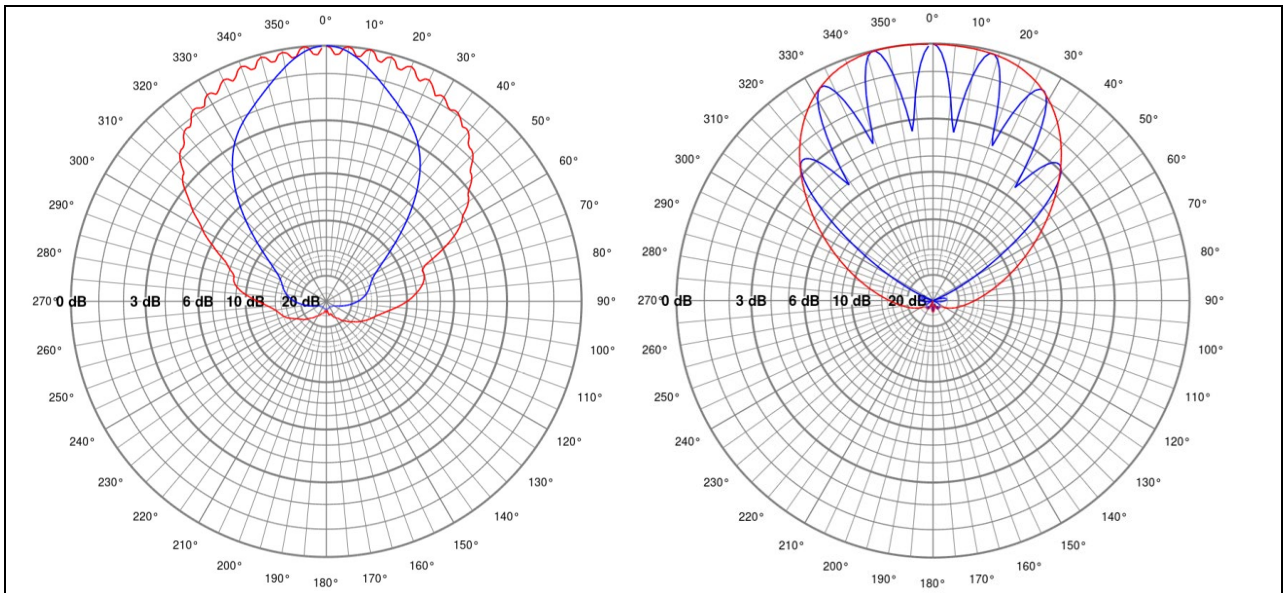


Figure 11 Diagrammes d'antenne enveloppants pour les canaux de trafic (en rouge) et les canaux de signalisation (en bleu) d'une antenne adaptative Ericsson (AIR6488) à gauche et d'une antenne adaptative Huawei (AAU5313) à droite. Les tracés des canaux de trafic et de signalisation sont tous deux normalisés à 0 dB, si bien que les gains d'antenne plus élevés des canaux de trafic ne sont pas indiqués.

6 Exposition aux antennes adaptatives

Étant donné que les antennes adaptatives ont tendance à concentrer le signal dans la direction de l'utilisateur ou du téléphone portable et à le réduire dans d'autres directions, la distribution de l'intensité du champ électrique dans l'espace diffère de celle des antennes classiques. Cependant, comme les antennes adaptatives ne sont pas utilisées depuis longtemps, il n'existe que quelques publications sur la manière dont se présentent les distributions concrètes. Ces informations sont essentielles pour pouvoir intégrer correctement la variabilité des directions d'émission et des diagrammes d'antenne dans l'évaluation selon l'ORNI.

Les études portent sur des antennes réseau de différentes tailles, donc des antennes réseau avec un nombre différent d'éléments d'antenne, toujours disposés en carré (par exemple, réseau 4×4, 8×8, etc.). Les conclusions statistiques des études sont obtenues lorsque ces éléments d'antenne peuvent être activés séparément. Leur nombre correspond donc au nombre de sub arrays tel que défini au point 4.1.

Certaines conclusions d'études existantes sont résumées ci-après.

6.1 Études de simulation et considérations théoriques

Les premières études de simulation ont été réalisées par des fabricants d'antennes en 2017 (Thors et al.) et 2018 (Baracca et al.). L'étude de **Thors et al.**¹ a déterminé les puissances d'émissions maximales se produisant réellement dans différents scénarios de desserte par une antenne réseau 8×8. Sur la base des normes de la Commission électrotechnique internationale (CEI)² et de l'Union internationale des télécommunications (UIT)³, le 95^e centile de toutes les puissances d'émission possibles a été considéré comme la puissance maximale réaliste. En d'autres termes, la puissance maximale réaliste est le niveau de puissance qui n'est pas dépassé dans 95 % des cas examinés. L'étude a considéré la puissance émettrice moyenne sur six minutes en ce qui concerne la couverture d'une zone urbaine et d'une zone rurale ; dans chaque zone deux cas ont été pris en considération : l'un avec une répartition égale des utilisateurs et l'autre avec une densité d'utilisation accrue dans le centre. Des paramètres tels que la durée d'utilisation, les différentes charges du réseau et l'exploitation en TDD ont également été inclus dans les simulations. La formation de faisceaux a été basée sur des hypothèses simplifiées. Les résultats ont montré que, selon le scénario, les puissances maximales réalistes se situaient entre 7 % (0,07 ou -11,5 dB) et 22 % (0,22 ou -6,5 dB) de la puissance maximale théoriquement possible. La valeur la plus élevée de 22 % a été enregistrée pour une zone urbaine et une charge du réseau d'environ 95 %.

L'étude de **Baracca et al.**⁴ était basée sur un arrangement de sept stations de base, chacune alimentant trois cellules radio au moyen d'antennes réseau 8×8. L'étude a simulé un réseau urbain avec de grandes cellules radio (*urban macro UMa*) et un autre avec de petites cellules radio (*urban micro UMi*) en considérant les antennes à différentes hauteurs et à diverses distances les unes des autres. On a supposé que 80 % des utilisateurs se trouvaient à l'intérieur et 20 % à l'extérieur des bâtiments. Les distances de sécurité nécessaires (en exploitation FDD) ont été calculées pour différentes configurations d'utilisation (un à cinq utilisateurs actifs simultanément, durée de connexion de 1 à 60 secondes) afin de pouvoir respecter les valeurs limites de la Commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants (ICNIRP), considérées en tant que moyenne sur six minutes. À partir de ces calculs, il a été possible de déduire les puissances émettrices installées et de les comparer à une puissance émettrice maximale possible. La puissance maximale prise en compte a été la puissance émettrice se produisant lorsqu'un seul utilisateur par cellule est connecté pendant six minutes (c'est-à-dire qu'il n'y a qu'un seul faisceau qui - avec un gain d'antenne maximal - irradie la personne pendant six minutes). En effet, même dans cette situation, les valeurs limites de l'ICNIRP doivent être respectées. Les calculs ont montré qu'un nombre plus élevé d'utilisateurs par cellule et/ou une durée de connexion plus courte entraîne une puis-

¹ Thors et al, Time-Averaged Realistic Maximum Power Levels for the Assessment of Radio Frequency Exposure for 5G Radio Base Stations Using Massive MIMO, IEEE Access (Vol. 5), 19711-19719, 2017

² IEC 62232:2017 : Determination of RF field strength, power density and SAR in the vicinity of radiocommunication base stations for the purpose of evaluating human exposure, 516p., 2017

³ UIT-T K.100 : Measurement of radio frequency electromagnetic fields to determine compliance with human exposure limits when a base station is put into service, International Telecommunication Union ITU, 2019

⁴ Baracca et al, A Statistical Approach for RF Exposure Compliance Boundary Assessment in Massive MIMO Systems, International Workshop on Smart Antennas (WSA), Bochum (Germany), 2018

sance rayonnée plus faible par utilisateur. Dans 95 % des cas, 22 % (scénario UMi) et 26 % (scénario UMa) de la puissance maximale n'ont pas été dépassés. En termes de puissance maximale, les réductions ont donc été de 0,22 ou de -6,6 dB, et de 0,26 ou de -5,9 dB. Dans 99 % des cas, 27 % (0,27 ou de -5,7 dB, scénario UMi) et 32 % (0,32 ou de -5 dB, scénario UMa) de la puissance maximale n'ont pas été dépassés.

En 2020, une étude (**Tingyong & Skrivervik**⁵) commandée par un opérateur de téléphonie mobile suisse à l'École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL) a pu confirmer les résultats de Thors et al. et ceux de Baracca et al. Au moyen d'une simulation dite de Monte-Carlo, les méthodes de calcul ont été affinées et un scénario d'utilisation plus réaliste a été modélisé en vue d'une évaluation plus précise de l'exposition. Des paramètres tels que les scénarios d'utilisation, la répartition des utilisateurs, le temps d'utilisation, le nombre d'utilisateurs actifs simultanément, la base temporelle de calcul de la moyenne, le mode d'exploitation FDD/TDD et la forme du diagramme d'antenne d'une antenne réseau 8x8 ont été pris en compte dans les calculs. Sur la base d'une répartition égale des utilisateurs, d'un temps d'utilisation d'une seconde et d'une exploitation en FDD, Tingyong & Skrivervik ont calculé une puissance maximale réaliste de 14 % (95^e percentile par rapport à la puissance maximale théoriquement possible), tandis que Thors et al. avaient déterminé 13 % et Baracca et al. 14 % à 16 %. Pour tous les scénarios, l'étude de l'EPFL a déterminé des facteurs de réduction entre 0,01 (-20 dB) et 0,3 (-5,2 dB).

En 2019, **Matalatala et al.**⁶ ont étudié, en se basant sur un réseau LTE existant à Gand (Belgique), la manière dont les réseaux 5G dotés d'antennes adaptatives (« MIMO massif ») pouvaient être optimisés en termes d'emplacement et de configuration afin de minimiser simultanément la consommation d'énergie ainsi que l'exposition de l'utilisateur à la station de base et à son propre appareil portable. À cette fin, la zone d'étude a été conçue avec un réseau dit multicellulaire. Chaque cellule contenait une antenne de station de base dotée de plusieurs éléments d'antenne, le nombre d'éléments variant selon le scénario. Des scénarios de communication réalistes ont été simulés pour l'exploitation du réseau. L'étude a montré que lorsque le nombre d'éléments d'antenne utilisés par station de base passe de 16 à 256, le nombre de stations de base nécessaires pour un réseau doté d'antennes adaptatives diminue. Cela entraîne à son tour une diminution de 12 % de l'intensité du champ électrique causée par les stations de base et une augmentation de 70 % de l'exposition due au téléphone portable de l'utilisateur, ces deux expositions augmentant avec le nombre d'utilisateurs simultanés. Pour la zone considérée, le réseau optimal en ce qui concerne la consommation d'énergie et l'exposition était composé de 37 stations de base dotées chacune de 64 éléments d'antenne. En outre, il a été démontré que l'exposition aux stations de base était cinq fois plus faible (-14 dB) avec des antennes adaptatives (tous éléments d'antenne confondus, 95^e percentile) qu'avec le scénario de référence en 4G.

En 2020, **Shikhantsov et al.**⁷, du même groupe de recherche de l'université de Gand (Belgique), ont réalisé une étude qui a estimé les puissances d'émission maximales réalistes des antennes MIMO massif 5G dans un environnement urbain sur la base du *ray tracing*. La méthode *ray tracing* a été utilisée pour simuler la propagation du rayonnement dans un modèle de macrocellule urbaine en extérieur. Pour différents scénarios avec des antennes adaptatives composées de 64 éléments d'antenne, l'étude a calculé des valeurs (95^e percentile) d'environ -10 dB (0,1) à -3 dB (0,5) par rapport au maximum théorique, et pour un scénario réaliste avec une durée d'utilisation de 10 secondes, des réductions de -7 dB (0,2) à -6 dB (0,25).

En plus des études de simulation, des considérations théoriques ont également été émises au sujet des puissances émettrices pouvant être générées par des antennes adaptatives. L'**Agence Nationale des Fréquences ANFR**⁸ (France) a déduit, sur la base d'hypothèses sur le volume et le débit de données transmises, le nombre de personnes desservies par site d'antenne et le nombre de faisceaux, qu'une antenne adaptative émet pendant six minutes environ quinze secondes. Cela correspond à 4 % du

⁵ Tingyong & Skrivervik (2020): EMF Exposure Assessment Based on Monte Carlo Method, EPFL (École Polytechnique Fédérale de Lausanne), 45p.

⁶ Matalatala et al, Multi-Objective Optimization of Massive MIMO 5G Wireless Networks towards Power Consumption, Uplink and Downlink Exposure, Appl. Sci. 2019, 9, 4974

⁷ Shikhantsov et al (2020) : Ray-Tracing-based numerical assessment of the spatiotemporal duty cycle of 5G Massive MIMO in an outdoor urban environment, Appl. Sci. 2020, 10, 7631 ; doi:10.3390/app10217631

⁸ ANFR (2020) : Évaluation de l'exposition du public aux ondes électromagnétiques 5G - Volet 2 : premiers résultats de mesures sur les pilotes 5G dans la bande 3400-3800 MHz, Agence Nationale des Fréquences ANFR, 34p., 2020.

temps, c'est pourquoi l'ANFR applique un facteur de réduction de 0,04 ou -13,5 dB à la puissance d'émission pour les calculs d'exposition. Une telle moyenne, uniquement temporelle, n'est pas compatible avec le mode d'exploitation déterminant de l'ORNI. En principe, il est basé sur un transfert maximal de conversations et de données, l'émetteur étant au maximum de sa puissance et, dans le cas des antennes adaptatives, leur variabilité spatiale doit également être prise en compte (annexe 1, ch. 63, ORNI).

Dans un rapport technique (IEC TR 62669:2019⁹) basé sur l'étude de Thors et al., sur celle de Baracca et al. et sur les évaluations des puissances d'émission d'antennes adaptatives existantes utilisées pour la LTE, la CEI propose un facteur de réduction de 0,25 ou -6 dB lié à la puissance d'émission maximale possible lorsque les calculs d'exposition aux antennes adaptatives sont effectués en lien avec les valeurs limites de l'ICNIRP.

6.2 Etudes de mesures

Werner et al.¹⁰ (2019) ont effectué des mesures dans le cadre d'une étude portant sur une station de base LTE équipée d'antennes adaptatives dans une zone urbaine. L'antenne était une antenne réseau 8x8 exploitée en mode TDD avec une puissance d'entrée de 120 W. Les résultats des mesures ont été mis à l'échelle pour correspondre à l'exposition due à une utilisation à 100 % de la station de base et comparés aux valeurs limites de l'ICNIRP. Les valeurs mesurées extrapolées à l'utilisation maximale étaient comprises entre 7,3 % et 16,1 % des valeurs limites de l'ICNIRP, tandis que la prévision calculée dans le scénario du pire (puissance d'émission maximale simultanée dans toutes les directions) a donné une exposition correspondant à 79,3 % de la valeur limite de l'ICNIRP, ce qui équivaut à un facteur de réduction de 0,20 (-6,9 dB) à 0,09 (-10,4 dB).

Une première étude sur les stations de base dans un réseau 5G commercial a été menée par **Colombi et al.**¹¹ en 2020. En Australie, l'opérateur du réseau a été parmi les premiers à déployer la 5G et en janvier 2020 plus de 100 000 appareils mobiles compatibles 5G étaient connectés à son réseau. L'étude a recueilli pendant 24 heures les données opérationnelles de 25 stations de base équipées d'antennes MIMO massif - en particulier, les puissances émettrices et les données de référence ayant permis de déterminer le diagramme d'antenne pour chaque connexion. La distribution spatiale de l'ERP moyenne a été calculée sur la base de ces données, pour chaque station de base, et comparée à l'ERP maximale théorique de l'antenne. Au cours des 24 heures considérées, l'ERP maximale de toutes les stations de base était inférieure de 8,8 dB au maximum théorique. En utilisant les valeurs enregistrées de l'ERP des 25 stations de base pour cette comparaison, la réduction de la valeur maximale théorique de l'ERP sur toute la durée de l'expérience était respectivement de -20,2 dB (95^e percentile) et -18 dB (99^e percentile). Cette étude a également examiné l'influence du nombre d'utilisateurs simultanément actifs sur l'exposition. Les valeurs ERP moyennes sur six minutes pour chaque station de base ont été triées en fonction du nombre d'utilisateurs actifs. Il ressort des résultats que la valeur ERP la plus élevée enregistrée dans chaque station de base diminue avec un nombre croissant d'utilisateurs. La réduction par rapport à la valeur ERP maximale théorique correspond à -8,8 dB pour 15 utilisateurs actifs et à -22 dB pour 190 utilisateurs actifs.

6.3 Mesures et simulations réalisées par l'OFCOM

Au cours de l'été 2020, l'OFCOM a effectué des mesures d'essai sur deux antennes adaptatives autorisées de deux opérateurs différents. Les deux antennes réseau 8x8 émettaient dans la bande des 3,5 GHz. L'OFCOM a mis en place un dispositif de test avec, dans chaque cas, deux téléphones mobiles et a mesuré l'exposition dans différentes conditions (« signalisation uniquement », « les deux téléphones mobiles au même endroit : exposition dans le faisceau de données et exposition à côté du faisceau de données » et « les téléphones mobiles à deux endroits différents : exposition à chaque fois dans un des deux faisceaux de données »). En outre, le fonctionnement de la limitation automatique de la puissance (cf. point 7) a été testé sur les antennes. Après les mesures, l'OFCOM a reproduit la situation de

⁹ IEC TR 62669:2019: Case studies supporting IEC 62232 - Determination of RF field strength, power density and SAR in the vicinity of radio-communication base stations for the purpose of evaluating human exposure, 124p., 2019

¹⁰ Werner et al. (2019): A Comparison between Measured and Computed Assessments of the RF Exposure Compliance Boundary of an In-Situ Radio Base Station Massive MIMO Antenna. IEEE Access, Volume 7, 170682-170689, 2019

¹¹ Colombi et al. (2020): Analysis of the Actual Power and EMF Exposure from Base Stations in a Commercial 5G Network. Appl. Sci. 2020, 10, 5280

mesure à l'aide d'un logiciel de calcul, a calculé les expositions pour les différentes conditions d'exploitation testées et les a comparées aux résultats des mesures. Dans une deuxième étape, l'exposition à une antenne adaptative (avec jusqu'à 13 faisceaux) a été calculée dans la zone de mesure pour la comparer ensuite à l'exposition à une antenne conventionnelle. Ce travail et les résultats sont décrits en détail dans le rapport de l'OFCOM intitulé « Test de concession et mesure des antennes adaptatives » (*Testkonzession und Messung adaptive Antennen*) dont voici un extrait des principaux résultats.

Dans l'ensemble, les résultats ont confirmé les bases théoriques concernant la technologie radio technologie et la propagation des champs :

- L'exposition aux antennes adaptatives dépend essentiellement de la position des terminaux en cours d'utilisation.
- La majeure partie de l'intensité du champ électrique en un point de la cellule est clairement causée par le faisceau spécifiquement émis dans cette direction. Les faisceaux dans les autres directions n'apportent que de très petites contributions. Lors des mesures d'essai, le signal utile a été reçu à l'extérieur d'un faisceau avec une intensité de champ au moins trois fois (10 dB) plus faible qu'à l'intérieur du faisceau (en moyenne même douze fois plus faible).
- Les mesures ont également montré que la puissance d'émission totale d'une antenne est répartie entre les faisceaux actuellement disponibles lorsqu'il y a plusieurs faisceaux simultanés.
- Les mesures ont également confirmé que la limitation automatique de la puissance fonctionnait.
- Les simulations (cf. Figure 12) ont montré que, devant l'antenne, l'intensité de champ due aux antennes adaptatives est plus uniformément répartie que celle due aux antennes classiques.
- Pour la situation étudiée, l'intensité du champ électrique dans la direction du faisceau principal était plus faible (jusqu'à un facteur trois) devant l'antenne adaptative que devant l'antenne conventionnelle. Alors qu'avec cette dernière, la majeure partie du signal est toujours transmise dans cette direction, quel que soit l'endroit de la cellule radio où elle est demandée, avec les antennes adaptatives, ce n'est le cas que lorsque les données y sont effectivement requises.
- L'efficacité de la transmission latérale est bien meilleure avec les antennes adaptatives, car elles peuvent focaliser le rayonnement plus fortement et l'émettre de manière plus ciblée. La comparaison avec l'antenne conventionnelle indique une intensité de champ électrique plus élevée, jusqu'à un facteur six, ce qui signifie que les données sont transmises plus efficacement et en moins de temps.
- L'intensité du champ due au canal de signalisation est environ trois fois plus faible avec une antenne adaptative qu'avec une antenne conventionnelle.

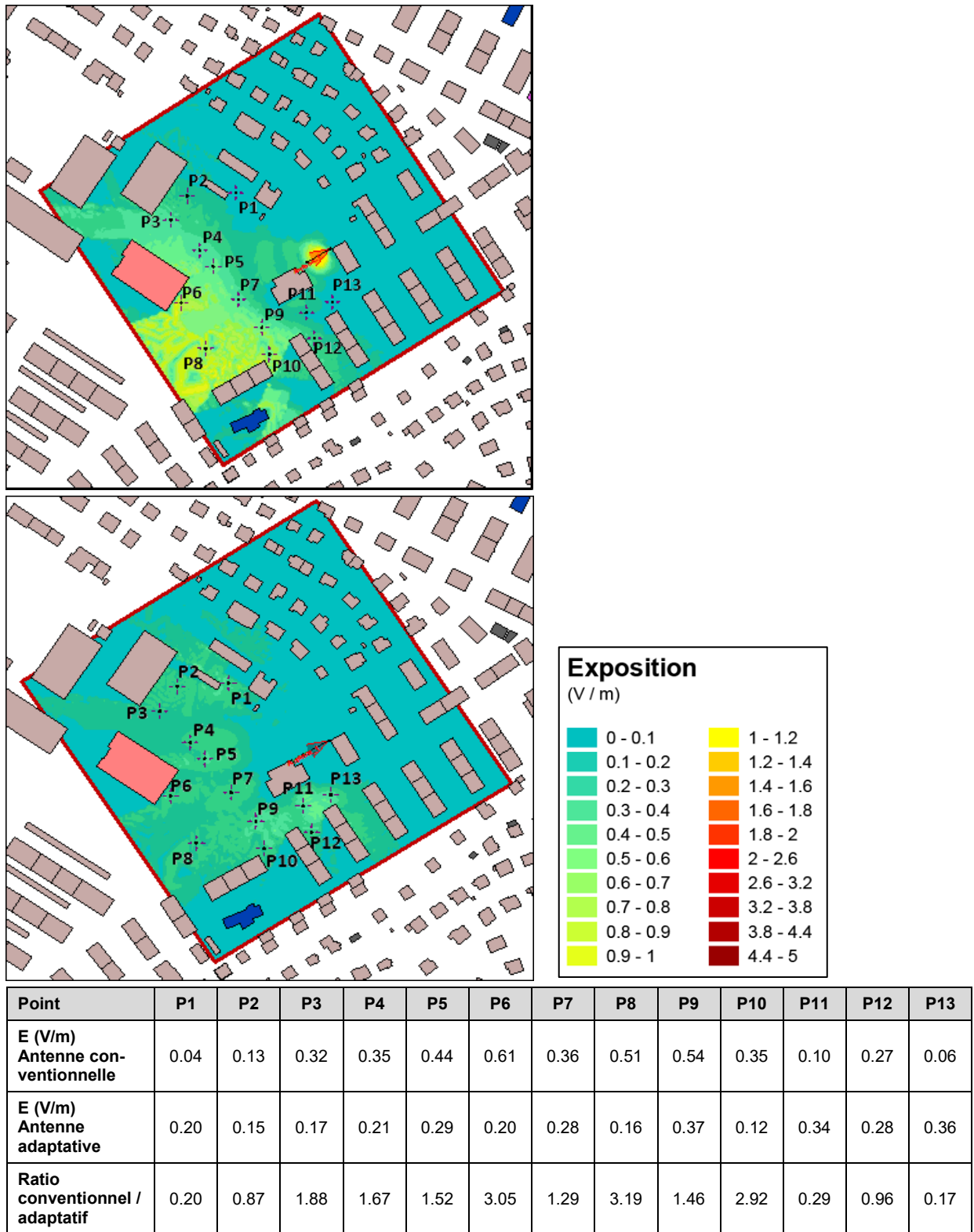


Figure 12 La figure ci-dessus montre l'intensité du champ électrique en volts par mètre générée par une antenne conventionnelle d'une puissance d'émission de 200 W ERP (figure du haut) et par une antenne adaptative à 13 faisceaux (figure du bas). Dans le cas de l'antenne adaptative, la puissance d'émission a été répartie entre les 13 faisceaux ; elle est de 15,4 W ERP par faisceau. Les valeurs de l'intensité du champ calculées sont indiquées pour 13 points dans l'espace de mesure. On peut noter que l'intensité du champ aux points 3 à 10, situés devant l'antenne, est plus importante avec l'antenne conventionnelle qu'avec l'antenne adaptative. Sur le côté de l'antenne (points 1, 2, 11 à 13), c'est tout le contraire, les antennes adaptatives pouvant mieux émettre latéralement. L'exposition moyenne sur la zone est de 0,15 V/m pour l'antenne classique et de 0,074 V/m pour l'antenne à 13 faisceaux (source : OFCOM).

6.4 Conclusions

Les résultats des études de simulation et de mesure décrites sont compilés dans le Tableau 2. Les puissances d'émission moyennes des antennes adaptatives (avec différents nombres d'éléments d'antenne), calculées sur six minutes, se situent, selon le scénario, dans une plage comprise entre environ 1 % (0,01 ou -20 dB) et 50 % (0,5 ou -3 dB) de la puissance maximale théorique. L'éventail des résultats des études est très large. En ce qui concerne les antennes réseau 8×8, les puissances émettrices déterminées se situent généralement entre environ 10 % (0,1 ou -10 dB) et 32 % (0,32 ou -5 dB) de la puissance maximale théorique.

Les études ont également montré que la différence entre la puissance d'émission maximale déterminée et la puissance d'émission maximale théorique dépend de la taille de l'antenne, c'est-à-dire du nombre d'unités d'antenne activables indépendamment (réseaux ou sub arrays). On a calculé, sur la base d'études portant sur différentes tailles d'antennes, un facteur de correction gradué pouvant être appliqué à la puissance d'émission maximale possible des antennes adaptatives (cf. point 7). La relation entre le facteur de correction et les résultats de l'étude est illustrée par la Figure 13.

Tableau 2 Aperçu des études ayant réalisé des simulations et des mesures, en particulier des puissances d'émission attendues, en ce qui concerne l'estimation des expositions aux antennes adaptatives.

Étude	Méthode / Remarques	Différence entre puissance maximale réaliste et théorique		Autres réductions
		95 ^e percentile	Maximum ou 99 ^e percentile	
Thors et al (2017).	Modélisation statistique, réseau 8×8 et autres tailles de réseau, divers scénarios de couverture (rural, urbain).	0,07 à 0,22 -11,5 dB à -6,5 dB		
Baracca et al (2018).	Simulation / statistiques, réseau 8×8, deux scénarios de couverture urbaine.	0,22 à 0,26 -6,6 dB à -5,9 dB	99 ^e P : 0,27 à 0,32 -5,7 dB à -5 dB	
Tingyong & Skrivervik (EPFL, 2020)	Simulation de Monte-Carlo de divers scénarios d'utilisation, répartitions des utilisateurs, nombre d'utilisateurs et durée d'utilisation, réseau 8×8	0,01 à 0,3 -20 dB à -5,2 dB		
Matalatala et al (2019)	Simulation : optimisation d'un réseau de téléphonie mobile doté d'antennes adaptatives (divers nombres d'éléments d'antenne) en ce qui concerne l'exposition et la consommation d'énergie			Exposition 5G à 4G : -14 dB
Shikhantsov et al (2020).	Simulation de la couverture macrocellulaire urbaine, scénarios pour les antennes mMIMO avec différents nombres d'éléments d'antenne. Scénario réaliste : 64 éléments d'antenne	Tous les scénarios : 0,1 à 0,5 -10 dB à -3 dB Réaliste : 0,2 à 0,25 -7 dB à -6 dB		
ANFR	L'approche par la moyenne temporelle n'est pas compatible avec le mode d'exploitation déterminant de l'ORNI.			Durée moyenne sur 6 minutes : -13,5 dB
IEC TR 62669:2019	Évaluation des études Thors et al., Baracca et al. et des mesures sur les antennes adaptatives utilisées pour la LTE	0,25 -6 dB		
Werner et al (2019).	Mesure de l'exposition réseau 8×8 (mMIMO) 4G / 2,3 GHz / TDD / mise à l'échelle pour une utilisation à 100 %		0,09 à 0,20 -10,4 dB à -6,9 dB	
Colombi et al (2020).	Mesure / évaluation des données d'exploitation (y compris la puissance émettrice) de 25 antennes mMIMO 5G utilisées à des fins commerciales	0,1-20 dB	99. p. : 0,016 ou -18 dB Maximum : 0,03 à 0,16 -15 dB à -8 dB	

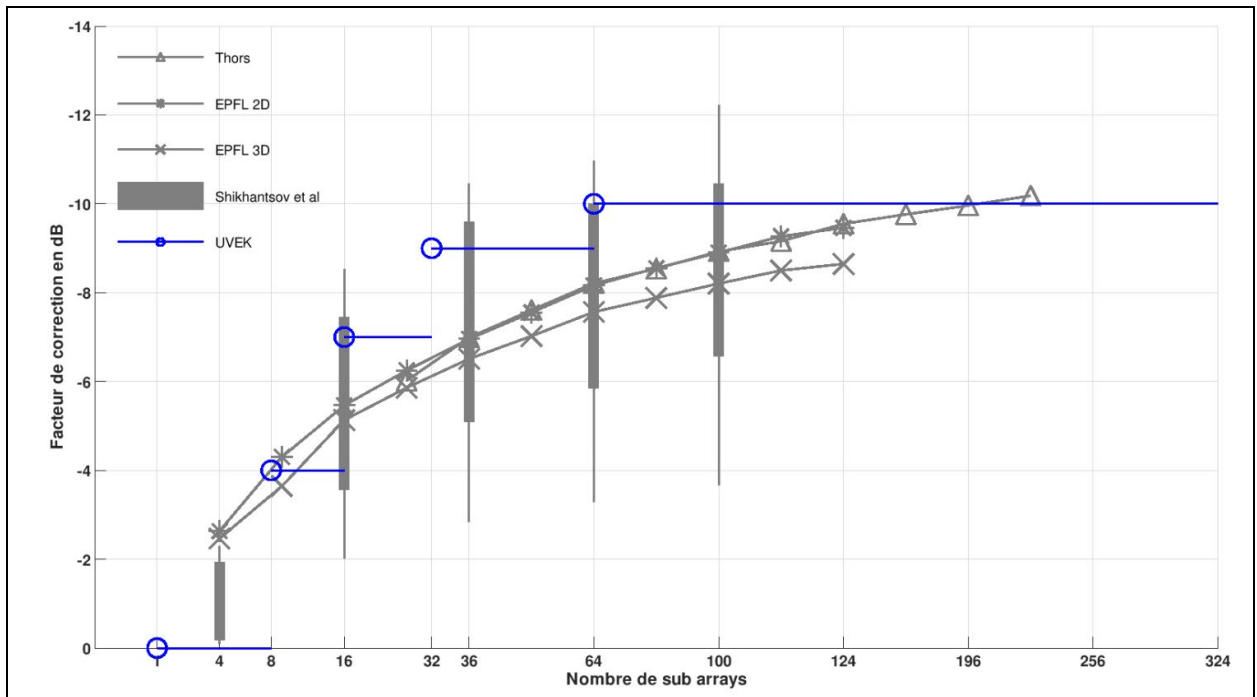


Figure 13 Facteurs de correction issus des études précitées considérant différentes tailles d'antennes, en gris (Thors et al. [2017], Tingyong & Skrivervik [EPFL, 2020] et Shikhantsov et al. [2020]), et facteurs de correction qui en sont dérivés, en fonction de la taille de l'antenne, (nombre de sub arrays), en bleu.

7 Facteur de correction et limitation automatique de la puissance

Le mode d'exploitation déterminant dans lequel les VLInst, au sens de l'annexe 1, ch. 64, ORNI, doivent être respectées, est déterminé comme suit pour les antennes adaptatives, conformément au complément à l'aide à l'exécution du 23.2.2021 de l'ORNI pour les stations émettrices de téléphonie mobile :

- le maximum de conversations et de données transféré à la puissance d'émission maximale, exprimée en puissance d'émission maximale possible $ERP_{max, n}$, constitue la base du mode d'exploitation déterminant ;
- pour tenir compte de la variabilité des directions d'émission et des diagrammes d'antenne dans le cas des antennes adaptatives, un facteur de correction K_{AA} est appliqué à la puissance d'émission maximale possible $ERP_{max, n}$. Ce facteur K_{AA} dépend de la taille de l'antenne, exprimée en nombre de sub arrays (cf. Tableau 3).

La puissance d'émission déterminante ERP_n de l'antenne adaptative n s'exprime donc ainsi :

$ERP_n = ERP_{max, n} \times K_{AA}$. Cette ERP_n est saisie dans la fiche de données spécifique au site et utilisée en combinaison avec les diagrammes d'antenne enveloppants pour calculer l'intensité du champ électrique dans le but de contrôler le respect de la VLInst dans les LUS.

Tableau 3 Facteur de correction K_{AA} . Les facteurs de correction spécifiés constituent la correction maximale autorisée pour le nombre correspondant de sub arrays. Plus la correction est importante, plus la valeur numérique du facteur est faible. Les valeurs indiquées dans le tableau correspondent donc à la limite inférieure de la valeur numérique du facteur de correction.

Nombre de sub arrays	Facteur de correction K_{AA}	Facteur de correction en dB
64 et plus	≥ 0.10	≥ -10 dB
32 à 63	≥ 0.13	≥ -9 dB
16 à 31	≥ 0.20	≥ -7 dB
8 à 15	≥ 0.40	≥ -4 dB
1 à 7	1	0 dB

Étant donné qu'en raison de cette définition du mode d'exploitation déterminant, il peut arriver en exploitation réelle que la puissance émettrice déterminante ERP_n soit dépassée durant une courte période (au maximum jusqu'à la puissance d'émission $ERP_{max, n}$), le facteur de correction ne peut être appliqué que si l'antenne adaptative est dotée d'une limitation automatique de la puissance.

La limitation automatique de la puissance est une application logicielle implémentée sur l'antenne. Elle détecte en permanence la puissance totale de l'antenne adaptative émise dans un secteur radio. Si, sur de courtes périodes, des pics de puissance supérieurs à la puissance d'émission ERP_n déclarée dans la fiche de données spécifique au site se produisent, la puissance est réduite (et donc la capacité fournie) de telle sorte que la puissance émettrice moyenne sur une période de six minutes ne dépasse pas la puissance d'émission déclarée. Le système automatique calcule donc en permanence la « moyenne mobile » de la puissance émettrice des six dernières minutes. S'il est prévisible que cette moyenne courante puisse dépasser la puissance autorisée, la puissance est réduite de telle sorte que la valeur moyenne reste sûrement en dessous du seuil spécifié.

Les pics de puissance de courte durée peuvent atteindre au maximum une valeur $ERP_{max, n}$ correspondant à la puissance d'émission autorisée ERP_n multipliée par la réciproque du facteur de correction. Avec un facteur de correction de 0,1, la valeur de pointe de la puissance émettrice peut être au maximum dix fois supérieure à la valeur déclarée. En même temps, cela signifie que l'intensité du champ électrique calculée pour l'antenne adaptative peut être dépassée à court terme au maximum d'un facteur 3,2. Si l'on considère qu'une station émettrice de téléphonie mobile dotée d'antennes adaptatives est, dans la plupart des cas, également équipée d'antennes conventionnelles, l'intensité du champ de l'ensemble du système augmente d'un facteur plus faible à court terme. Si, par exemple, un LUS est desservi « pour moitié » par des antennes conventionnelles et « pour moitié » par des antennes adaptatives d'une installation ayant la même puissance d'émission déterminante (hypothèse : mêmes distances, mêmes atténuations directionnelles et de bâtiment), l'intensité du champ total peut augmenter à court terme jusqu'à une valeur égale à 2,3 fois l'intensité calculée : la puissance émettrice des antennes conventionnelles reste inchangée tandis que celle des antennes adaptatives peut augmenter d'un facteur 10 à court terme, ce qui donne un facteur de 5,5 pour la puissance d'émission totale. Là encore, le fait que plusieurs antennes adaptatives émettent rarement simultanément à la puissance maximale n'a pas été pris en compte.

La limitation automatique de la puissance doit figurer dans le système d'assurance qualité des opérateurs de téléphonie mobile d'une manière facile à comprendre pour l'autorité.

8 Autres considérations

8.1 Prise en compte de l'exploitation en TDD

Les VLInst que les installations de téléphonie mobile doivent respecter dans le mode d'exploitation déterminant, sont spécifiées à l'annexe 1, ch. 64, ORNI, pour la *valeur efficace* de l'intensité du champ électrique. La valeur efficace est - par principe - la puissance moyenne fournie au cours d'une période donnée d'une quantité variable dans le temps. Pour une tension ou une intensité de champ, il faudrait donc utiliser la valeur moyenne quadratique, la puissance étant proportionnelle au carré de la tension ou de l'intensité de champ. En anglais, la valeur efficace d'une telle grandeur se nomme *Root Mean Square* ou « RMS ». Dans la Figure 14, la valeur efficace est indiquée sur l'exemple d'une quantité physique variant de façon sinusoïdale dans le temps.

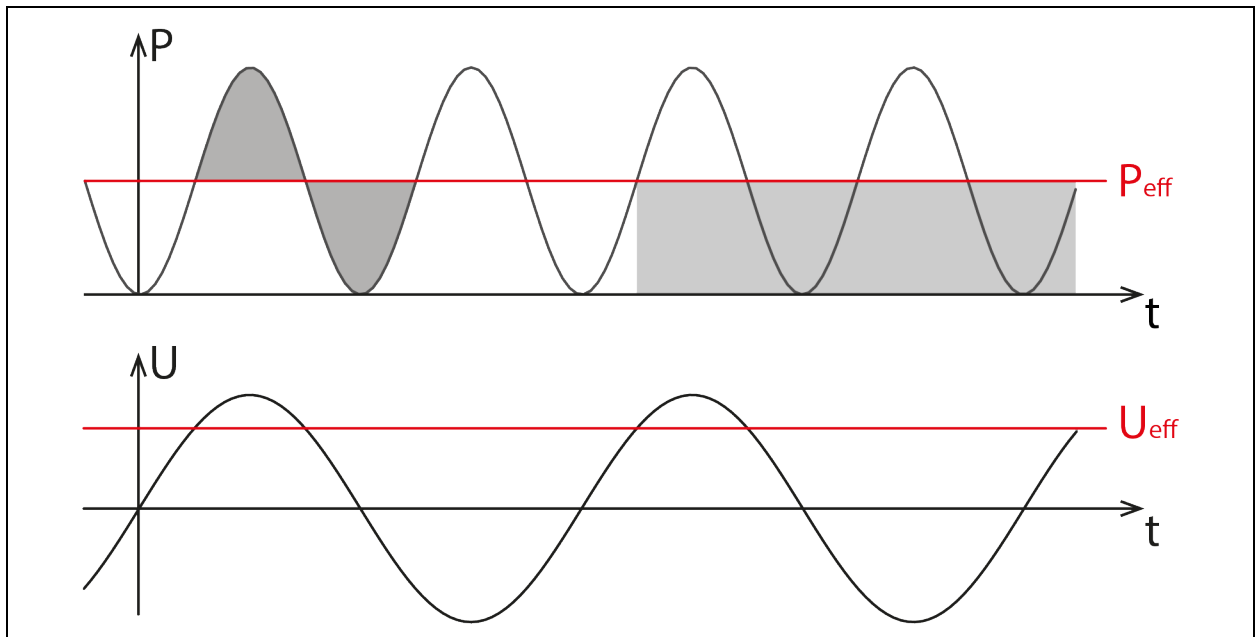


Figure 14 Valeur efficace d'une grandeur physique variant de façon sinusoïdale. Figure du haut : la valeur efficace de la puissance peut être illustrée graphiquement : P_{eff} correspond à la moitié de l'amplitude de P ; les valeurs supérieures à P_{eff} compensent les valeurs inférieures à P_{eff} . Figure du bas : P_{eff} converti en une tension U : U_{eff} correspond à $0,71 (= \sqrt{0,5})$ fois l'amplitude de U (U est proportionnelle à la racine carrée de P).

La valeur efficace de l'intensité du champ correspond donc à la puissance d'émission moyenne au cours d'une période donnée. La VLInst doit par principe être respectée à la puissance émettrice maximale. Étant donné que dans l'exploitation en FDD appliquée jusqu'à présent, une station émettrice de téléphonie mobile émet en continu lorsqu'elle émet des signaux (par exemple, un canal de signalisation), que ces signaux n'ont pas de structure claire se répétant périodiquement (telle qu'une forme sinusoïdale) et que la puissance émettrice maximale est pertinente pour la VLInst, la question de la puissance moyenne sur une période donnée ne se pose pas en exploitation FDD. Les contrôles dynamiques de puissance résultant de l'exploitation effective ne doivent pas être pris en compte en ce qui concerne la VLInst.

Dans les concessions de téléphonie mobile pour la gamme des 3,4 à 3,8 GHz (et en partie pour 2,6 GHz), l'exploitation en TDD est obligatoire : la liaison descendante et la liaison montante se font sur la même fréquence, mais à des moments différents. En mode TDD, tel qu'il est actuellement déployé par les opérateurs pour la 5G, la transmission de données d'utilisation par une station de base occupe au maximum 80 % du temps dans un créneau horaire (*time slot*) de 1 ms (ou 0,5 ms) alors que 20 % du temps du créneau est réservé à la transmission de données depuis le dispositif mobile vers la station de base. Il en résulte que la valeur efficace de l'intensité de champ électrique est plus faible que si la station de base émettait en permanence (cf. Figure 15).

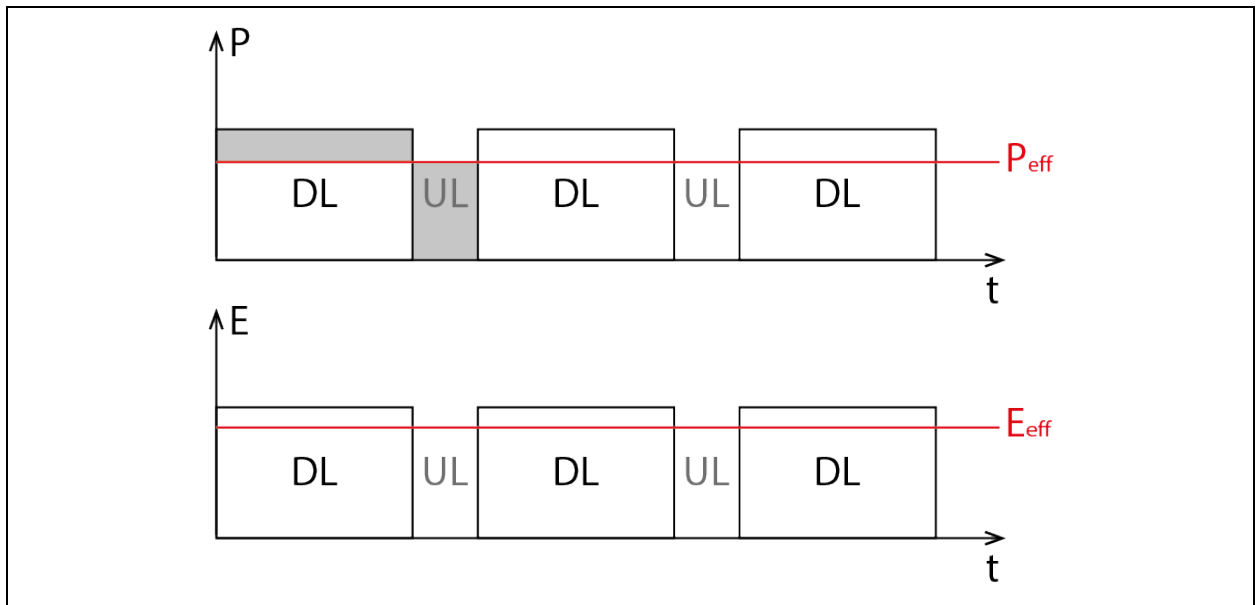


Figure 15 Valeurs efficaces de la puissance d'émission P_{eff} (en haut) et de l'intensité du champ électrique E_{eff} (en bas) pour le mode d'exploitation TDD, basées sur la puissance émettrice maximale. Étant donné que la station de base transmet des données d'utilisation (DL : *downlink*, liaison descendante) au maximum durant 80 % du temps alors que 20 % de celui-ci est réservé à la liaison montante (UL : *uplink*, liaison montante), la valeur efficace de l'intensité du champ électrique (E_{eff}) est inférieure à celle qui serait obtenue si la station de base émettait en permanence. La valeur efficace de la puissance d'émission est la valeur moyenne sur le temps t , indiquée par la ligne rouge (P_{eff}). Les zones grises du graphique supérieur concernant la puissance émettrice ont la même surface. Le graphique du bas est converti en valeur efficace de l'intensité du champ électrique. Cette dernière correspond à la moyenne quadratique sur le temps t .

Étant donné que dans le cas d'une installation de téléphonie mobile - en ce qui concerne la valeur efficace - la puissance d'émission moyenne au cours d'une période donnée est déterminante, le rapport entre la durée de transmission au cours de cette période et la durée de la période - ce que l'on appelle le rapport cyclique (*duty cycle*) - peut être pris en compte dans la puissance émettrice déterminante dans le mode d'exploitation TDD. En effet, le rapport cyclique est un paramètre de système réglable et constant, c'est pourquoi le calcul de la moyenne de la puissance d'émission maximale en ce qui concerne le rapport cyclique est conforme aux dispositions de l'ORNI concernant la VLInst.

Pour le rapport actuellement spécifié entre la liaison descendante et la liaison montante, soit 4:1 ou 80:20, le rapport cyclique est de 0,8. Le rapport cyclique relatif au mode d'exploitation TDD n'est pas spécifié dans la fiche de données spécifique au site, mais il doit être documenté dans le système d'assurance de la qualité afin de garantir que le degré de performance soit correctement documenté en lien avec la surveillance de la puissance d'émission.

8.2 Recommandation d'exécution : suivi et expériences

Le facteur de correction et la limitation automatique de la puissance constituent deux nouveaux éléments de l'exécution de l'ORNI en ce qui concerne les installations de téléphonie mobile. Dans la phase initiale, elles seront accompagnées d'études empiriques.

9 Informations complémentaires

Groupe de travail sur la téléphonie mobile et les rayonnements (2019) : « [Rapport Téléphonie mobile et rayonnement](#) ». Rapport commandé par le Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC, 18.11.2019.

Office fédéral de la communication OFCOM (2020) : « [Notice d'information 5G - Aperçu général](#) », 30.1.2020.

Office fédéral de la communication OFCOM (2021) : « Testkonzession und Messung adaptive Antennen (GS-UVEK-325.1-9/2/1) ». 24.9.2020 et « Testkonzession und Messungen adaptive Antennen (GS-UVEK-325.1-9/2/1) – Bericht-Nachtrag » (« Concession d'essai et mesures des antennes adaptatives (GS-UVEK-325.1-9/2/1) - Addendum au rapport », uniquement disponible en allemand), 8.2.2021.

Office fédéral de l'environnement OFEV (2020) : « [Explications concernant la méthode de mesure du rayonnement des antennes adaptatives](#) », 30.6.2020.

Office fédéral de l'environnement OFEV (2021) : « Antennes adaptatives. Complément du 23 février 2021 à la recommandation d'exécution de l'ordonnance sur la protection contre le rayonnement non ionisant (ORNI) concernant les stations de base pour téléphonie mobile et raccordements sans fil (WLL), OFEFP, 2002 », 23.2.2021.

Institut fédéral de métrologie METAS (2020 a) : « [Rapport technique : Méthode de mesure pour les stations de base 5 G NR dans la gamme de fréquences jusqu'à 6 GHz](#) », 18.2.2020.

Institut fédéral de métrologie METAS (2020b) : « [Complément du 15 juin 2020 au rapport technique Méthode de mesure des stations de base 5 G NR jusqu'à 6 GHz](#) », 15.6.2020.

STRAPAG (2018) : « [Pilotstudie für Emissionsmessungen an einer Mobilfunkseideanlage mittels Flugdrone](#) » (« Étude pilote pour la mesure des émissions d'une station de téléphonie mobile à l'aide d'un drone volant », uniquement disponible en allemand). Rapport commandé par l'Office fédéral de l'environnement OFEV, 23.11.2018.