

Liège, le 3 septembre 2024.

**MÉTHODE DE CONTRÔLE
DES RAYONNEMENTS ÉLECTROMAGNÉTIQUES
GÉNÉRÉS PAR DES ANTENNES ÉMETTRICES
STATIONNAIRES EN WALLONIE**

Version : v1.2.1

TABLE DES MATIÈRES

1	Préambule	3
2	Documents de référence	3
3	Zone dans laquelle des mesures sont effectuées	4
4	Equipement nécessaire	5
5	Méthode de mesure	6
5.1	Mesures prises directement dans les lieux de séjour	6
5.2	Détermination du champ électromagnétique à l'intérieur de bâtiments à partir du champ mesuré en un lieu accessible	7
5.2.1	<i>Correction de distance</i>	<i>8</i>
5.2.2	<i>Correction d'azimut</i>	<i>9</i>
5.2.3	<i>Correction d'élévation</i>	<i>10</i>
5.2.4	<i>Prise en compte des obstacles</i>	<i>11</i>
5.2.5	<i>Bilan de l'ensemble des corrections</i>	<i>11</i>
6	Evaluation de l'indice par installation	12
6.1	Détection des fréquences rayonnées par les antennes de l'installation contrôlée...	12
6.2	Détermination du maximum de l'intensité du rayonnement	13
6.2.1	<i>Réseau 2G (GSM et DCS 1800)</i>	<i>13</i>
6.2.2	<i>Réseau 3G (UMTS)</i>	<i>14</i>
6.2.3	<i>Réseau 4G (LTE)</i>	<i>14</i>
6.2.4	<i>Bande de fréquence partagée dynamiquement entre 4G et 5G (DSS)</i>	<i>15</i>
6.2.5	<i>Réseau 5G NR - fréquences d'émission inférieures à 3 GHz</i>	<i>15</i>
6.2.6	<i>Réseau 5G NR – fréquences d'émission dans la bande 3,6 GHz</i>	<i>16</i>
6.2.7	<i>Partage d'une bande de fréquence entre plusieurs réseaux</i>	<i>18</i>
6.3	Evaluation de l'indice relatif à la limite par installation	19
7	Evaluation de l'indice relatif à la limite cumulative	21
	Annexe I - Méthode applicable lorsque le LS est exposé aux lobes secondaires	24
	Annexe II - Equipements utilisés par l'ISSEP	28

1 Préambule

Le présent document décrit la méthode appliquée par l'ISSEP pour l'établissement du rapport visé à l'article 6 du décret du 3 avril 2009¹ relatif à la protection contre les éventuels effets nocifs et nuisances provoqués par les rayonnements non ionisants générés par des antennes émettrices stationnaires et dénommé ci-après « le décret ». Le présent document tient compte des modifications apportées par le décret du 8 décembre 2022² modifiant le décret du 3 avril 2009 relatif à la protection contre les éventuels effets nocifs et nuisances provoqués par les rayonnements non ionisants générés par des antennes émettrices stationnaires. Le décret est complété par l'Arrêté du 27 avril 2023³ fixant le périmètre de proximité mentionné à l'article 2 du décret.

L'objectif du contrôle est la vérification, par des mesures in situ, du respect des limites fixées à l'article 4 du décret par les antennes constituant l'installation visée par le contrôle. Lorsqu'il est possible, un examen visuel de l'installation est également réalisé afin de vérifier l'adéquation avec les informations transmises par l'exploitant dans son dossier technique.

2 Documents de référence

La méthode présentée s'appuie sur différents documents :

- IEC 62232 : « Determination of RF field strength, power density and SAR in the vicinity of base stations for the purpose of evaluating human exposure » – International Electrotechnical Commission – Octobre 2022.
- IEC TR 62669 : « Case studies supporting IEC 62232 – Determination of RF field strength, power density and SAR in the vicinity of radiocommunication base stations for the purpose of evaluating human exposure » – International Electrotechnical Commission – Octobre 2022.
- ANFR/DR15-4.1 : « Protocole de mesure Visant à vérifier sur site, pour les équipements fixes utilisés dans les réseaux de télécommunication ou pour les installations radioélectriques, le respect des niveaux de référence de l'exposition du public aux champs radioélectriques prévus par le décret n° 2002-775 du 3 mai 2002 » Agence Nationale des Fréquences – Octobre 2019.
- ITU-R SM.2452-1 : « Electromagnetic field measurements to assess human exposure » International Telecommunication Union – Juillet 2022.
- « Measuring RF electromagnetic fields at mobile communications base station and broadcast transmitter sites – A guide to good practice » – 2nd Ed. Matthias Wuschek – Narda 2023.
- « Méthode de mesure des stations de base 5G NR jusqu'à 6 GHz » – Rapport technique METAS version 2.1 – Avril 2020.
- « Méthode de mesure des rayonnements électromagnétiques pour le contrôle des antennes émettrices en Wallonie » – Willy Pirard – rapport ISSEP n° 3598/2015 – Septembre 2015.
- « Contrôle des antennes 5G NR dans la bande FR1 – Proposition de méthode » – Stéphane Desmet – document interne ISSEP – version 2.1 – Janvier 2024.
- ITU-R P.2040-3 : « Effects of building materials and structures on radiowave propagation above about 100 MHz » International Telecommunication Union – Août 2023.

¹ M.B. du 6 mai 2009 p 35375.

² M.B. du 16 décembre 2022 p 97541.

³ M.B. du 12 juin 2023 p 54872.

- ITU-R P.2346-5 : « Compilation of measurement data relating to building entry loss »
International Telecommunication Union – Juin 2023.

3 Zone dans laquelle des mesures sont effectuées

La zone dans laquelle les mesures sont effectuées est un disque centré sur l'installation à contrôler. On distingue la zone dans laquelle la vérification de la limite par installation est nécessaire de celle dans laquelle l'indice relatif à la limite cumulative doit être vérifié. Pour cette dernière, le rayon est fixé à 300 mètres à partir de l'installation par l'Arrêté du 27 avril 2023.

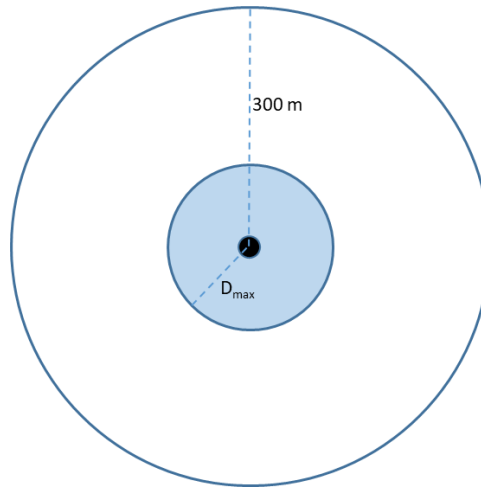


Figure 1 : Zones dans lesquelles les mesures sont effectuées. La zone en bleu représente la zone dans laquelle la limite par installation doit être vérifiée.

La distance D_{max} est la distance maximale théorique à partir de laquelle la limite par installation est nécessairement respectée. Elle a été calculée lorsque la demande d'avis de l'ISSeP sur l'installation a été introduite. Elle est donnée par la formule :

$$(1) \quad D_{max} = \sqrt{30 \sum_f \frac{PIRE_f}{E_{r,f,i}^2}}$$

où $PIRE_f$ est la Puissance Isotrope Rayonnée Équivalente maximale exprimée en watts (W), donnée par :

$$(2) \quad PIRE_f = \sum_k P_{f,k} \cdot 10^{\frac{g_{f,k}}{10}}$$

où $P_{f,k}$ est la puissance maximum fournie à l'entrée de l'antenne k à la fréquence f , exprimée en watts (W) et $g_{f,k}$ est le gain maximum, exprimé en dBi, de l'antenne k à la même fréquence f .

La vérification de la limite par installation doit être effectuée au minimum dans cette zone de rayon D_{max} (figure 1). Néanmoins, par précaution, la vérification de la limite par installation peut être étendue au-delà de cette distance en fonction de la configuration de la zone, jusqu'à $1,5 D_{max}$ environ.

Compte tenu des caractéristiques des antennes des réseaux de communication mobile, la distance D_{max} est nettement inférieure à 300 mètres⁴.

⁴ Dans les faits, cette distance D_{max} dépasse rarement 100 m.

En l'absence de lieux de séjour⁵ – ci-après abrégés « LS » – dans la zone de rayon $1,5.D_{max}$, le contrôle se limitera à l'identification des réseaux en service ainsi que le cas échéant à la vérification de l'indice relatif à la limite cumulative.

Si dans certaines zones rurales, il est envisageable de réaliser des mesures afin d'évaluer l'exposition dans tous les LS situés autour de l'installation, il n'est pas réaliste de prétendre à une telle exhaustivité dans les milieux urbanisés. Les mesures sont réalisées en priorité dans ceux où le risque de dépassement est le plus grand. Il s'agit dès lors d'identifier les LS qui, compte tenu de leur localisation par rapport aux antennes, sont les plus exposés⁶. Une première identification peut se faire préalablement au contrôle sur base des informations dont l'ISSeP dispose. Ces dernières proviennent de différentes sources :

- le dossier technique fourni par l'exploitant ;
- la liste mensuelle des installations et des technologies en service fournie par l'exploitant ;
- l'avis de l'ISSeP attestant le respect des limites fixées à l'article 4 du décret sur base de calculs des indices d'exposition.

Cette identification repose notamment sur :

- un relevé de la position et de la hauteur des LS aux alentours de l'installation ;
- l'orientation des antennes (lorsqu'elles sont directives et visibles) ;
- la présence éventuelle d'obstacles (bâtiments, végétation...) ;
- le cas échéant, la répartition de l'intensité du rayonnement dans le faisceau d'une antenne à partir du diagramme de rayonnement de celle-ci.

En pratique toutefois, la localisation et le nombre des points de mesure peuvent être adaptés à la réalité du terrain.

Compte tenu de la façon, confirmée par la pratique, dont rayonnent les antennes des réseaux mobiles, les niveaux d'exposition sont nettement inférieurs à la limite par installation du décret dans les bâtiments sur le toit desquels des antennes sont installées. Effectuer des mesures dans de tels LS est donc généralement inutile.

Grâce aux mesures effectuées en ces points, les conclusions pourront être étendues aux LS non cités explicitement dans les tableaux reprenant les mesures sur base de leur localisation et/ou du type de configuration (absence de fenêtre, masquage par des bâtiments voisins...).

4 Equipement nécessaire

Les mesures sont réalisées à l'aide d'un analyseur de spectre qui doit pouvoir couvrir au minimum la bande de fréquence utilisée par les réseaux mobiles, c'est-à-dire de 700 à 4000 MHz, ainsi que de disposer des décodeurs des signaux de broadcast des différents réseaux 3G, 4G et 5G. Cet appareil doit être équipé d'une sonde triaxiale afin de ne pas dépendre de la position de l'antenne réceptrice pour les mesures. L'appareil équipé de la sonde constitue l'équipement, ainsi désigné ci-après.

⁵ Au sens du décret, c'est-à-dire les locaux d'un bâtiment dans lesquels des personnes peuvent ou pourront séjourner régulièrement, les locaux de travail occupés régulièrement par des travailleurs, les espaces dévolus à la pratique régulière du sport, des jeux et de la culture à l'exclusion, des voiries, trottoirs, parkings, garages, parcs, jardins, balcons, terrasses.

⁶ En principe, ce sont les LS qui sont à la fois les plus élevés et les plus proches des antennes.

L'équipement doit être suffisamment sélectif afin que les mesures ne soient pas influencées par d'autres sources générant éventuellement un champ électromagnétique dans la zone examinée.

L'équipement doit être en ordre d'étalonnage ou avoir été régulièrement vérifié par rapport à une référence étalonnée.

L'équipement doit pouvoir fournir directement la résultante $E_{rés}$ du champ électromagnétique calculée d'après la formule suivante :

$$(3) \quad E_{res} = E_x^2 + E_y^2 + E_z^2$$

dans laquelle E_x , E_y , E_z désignent les composantes du champ mesurées suivant les axes orthogonaux x, y et z.

L'intensité du champ électromagnétique pourra être présentée directement en volts par mètre (V/m) afin d'être comparée directement aux niveaux de référence utilisés pour le calcul de l'indice relatif à la limite par installation et de l'indice relatif à la limite cumulative.

L'Annexe II détaille les équipements utilisés par l'ISSEP.

5 Méthode de mesure

Les limites prescrites dans le décret ne s'appliquant que dans les LS, une mesure directe à l'intérieur de ceux-ci est souhaitable mais n'est pas toujours possible. S'il s'avère impossible d'accéder au LS, la détermination de l'intensité du champ électromagnétique à l'intérieur de celui-ci est réalisée à partir de mesures en un lieu accessible.

Contrôler que la limite d'exposition est respectée implique que l'intensité du rayonnement soit évaluée à partir de mesures à l'endroit le plus exposé.

Les mesures s'effectuent sur une surface horizontale de $0,5 \times 0,5 \text{ m}^2$ à une hauteur de 1,5 m au-dessus du sol ou du plancher. Dans ce document, sauf mention contraire, toutes les intensités de rayonnement évoquées doivent être comprises comme étant des valeurs efficaces moyennes calculées et mesurées sur cette surface. Dans le cas de mesure avec génération de trafic, l'équipement générant du trafic doit se situer à environ 1,5 m de distance de l'équipement de mesure. Cette distance permet d'éviter la perturbation due à l'équipement générant le trafic tout en s'assurant que l'équipement de mesure est dans le faisceau rayonné par les antennes de l'installation.

5.1 Mesures prises directement dans les lieux de séjour

Les LS extérieurs ne présentant pas de difficulté particulière, ce qui suit concerne les LS à l'intérieur de bâtiments.

Dans la mesure du possible, les mesures doivent être effectuées derrière une fenêtre orientée vers l'installation contrôlée au dernier étage du LS – du moins à une hauteur proche de celle de l'installation – et le plus proche d'un des azimuts de l'installation. Le champ est moyenné sur une surface horizontale de $0,5 \times 0,5 \text{ m}^2$ dont le bord le plus proche se trouve à environ 0,5 m du milieu de la fenêtre fermée (figure 1).

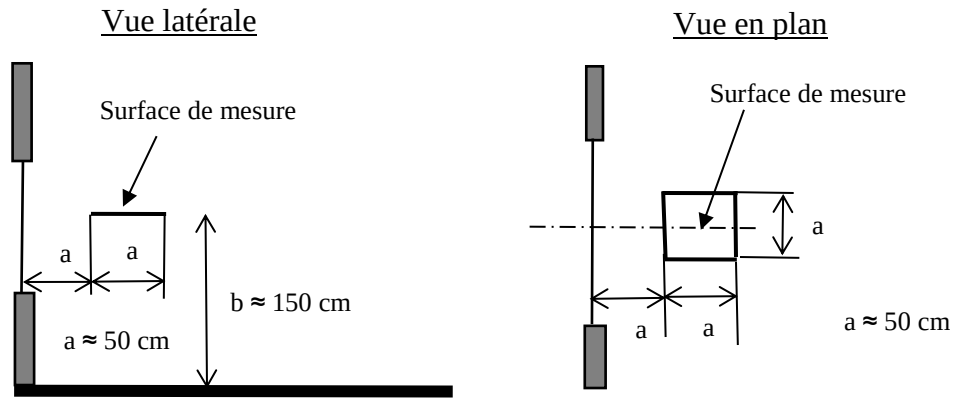


Figure 2 : Surface de mesure dans un local avec une fenêtre orientée vers l'installation.

Le choix d'une fenêtre est historique. Les fenêtres à simple et à double vitrage présentent en effet une atténuation au rayonnement la plus faible parmi les éléments constituant la façade d'un bâtiment. Les vitrages "haute performance énergétique", par contre, présentent des valeurs d'atténuation similaires, voire plus élevées que les autres matériaux constituant l'enveloppe du bâtiment. Néanmoins, une fenêtre permet d'orienter l'équipement de mesure vers l'installation.

5.2 Détermination du champ électromagnétique à l'intérieur de bâtiments à partir du champ mesuré en un lieu accessible

Lorsqu'il n'est pas possible d'accéder au LS, le champ à l'intérieur de celui-ci est déduit de mesures effectuées à l'extérieur, avec éventuellement la prise en compte de facteurs de correction adéquats. Dans la mesure du possible, les mesures sont effectuées en vue directe des antennes puisqu'en principe c'est dans cette situation que le champ est le plus élevé.

Lorsque l'intensité du rayonnement dans un LS a été obtenue indirectement, les résultats sont exprimés sous la forme $IE_i \leq ###$, indiquant que l'indice à l'intérieur du LS est inférieur ou égal à une certaine valeur, ce qui signifie qu'en pratique, la valeur de l'indice pourrait être nettement inférieure à la valeur mentionnée.

Lorsqu'il s'agit de bâtiments comportant au plus deux étages, on peut souvent considérer que le champ à l'intérieur n'excède pas celui mesuré à l'extérieur à proximité du bâtiment. Effectivement, les matériaux constitutifs de l'enveloppe du bâtiment, fenêtres comprises, présentent une atténuation telle qu'elle compense l'augmentation éventuelle du champ avec la hauteur.

L'influence de la hauteur peut être mieux prise en compte en plaçant la sonde de l'appareil de mesure sur un mât télescopique (figure 3). Il est bien évident que la sonde doit se trouver du même côté que la source à contrôler pour éviter que le bâtiment ne fasse obstacle.

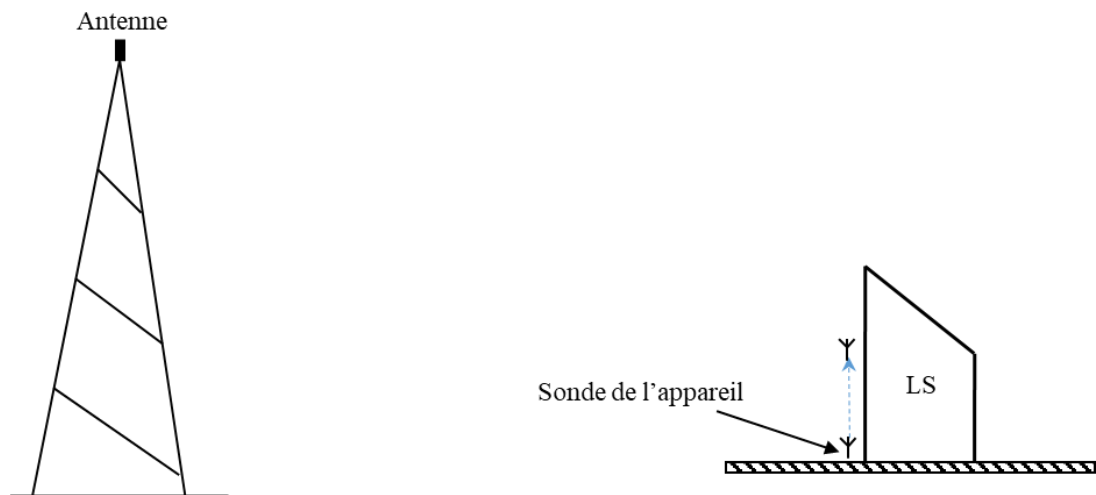
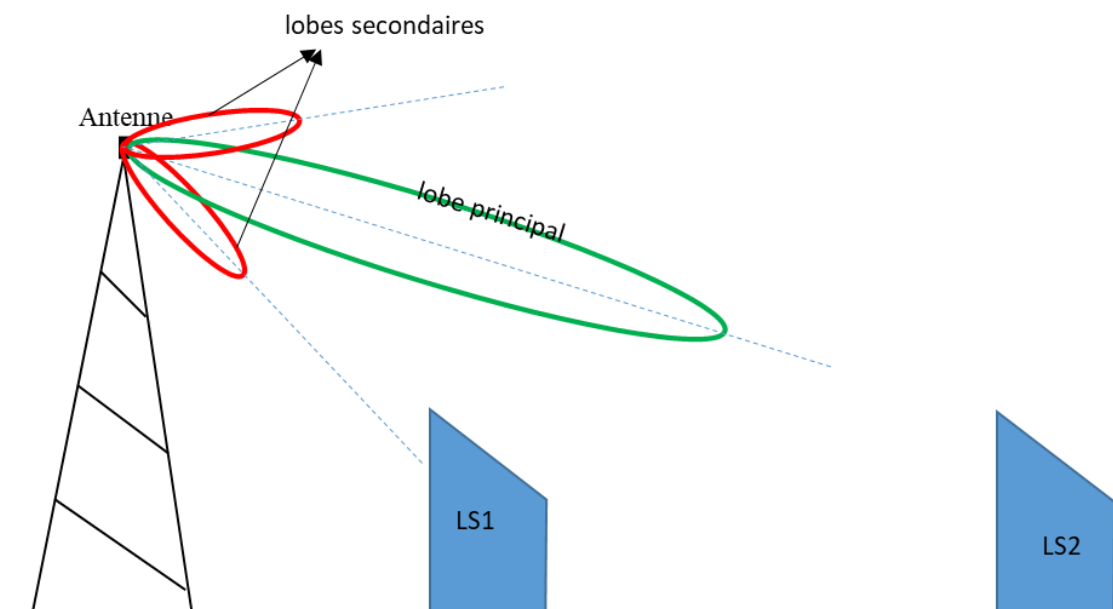


Figure 3 : Détermination du champ au moyen d'un mât télescopique

Lorsqu'il s'agit d'un immeuble de grande hauteur ou lorsque le lieu accessible n'est pas dans l'azimut de l'antenne, la déduction du champ à l'intérieur du LS reste possible moyennant des corrections.

5.2.1 Correction de distance

Lorsque le LS est suffisamment loin de l'antenne, c'est-à-dire lorsque le champ provient essentiellement du lobe principal du rayonnement de l'antenne (figure 4), le champ dans le LS peut être déduit du champ en un point de mesure éloigné du LS de la manière suivante :



**Figure 4 : Lobe principal et lobes secondaires de l'antenne émettrice.
Exposition des LS en fonction de leur localisation.**

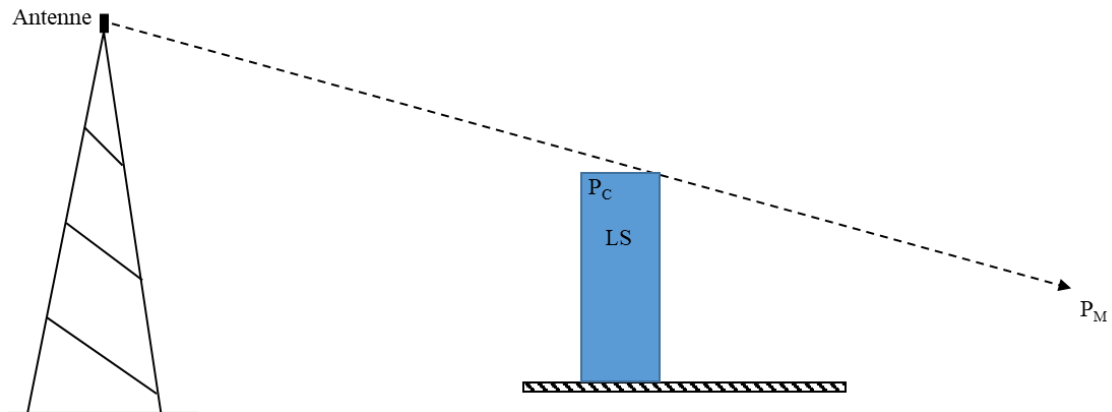


Figure 5 : Principe de la détermination du champ à l'intérieur d'un bâtiment à partir d'une mesure en un lieu accessible (LS exposé au lobe principal)

Dans un tel cas, illustré par la figure 5, le champ augmente avec l'angle d'élévation et il en résulte que c'est la zone autour du point P_C (point critique) qui est la plus exposée. La valeur en ce point peut être déduite de la valeur du champ mesuré en lieu P_M accessible selon la relation :

$$(4) \quad E_{P_C} = E_{P_M} \times \frac{D(A; P_M)}{D(A; P_C)}$$

où E_{P_C} : valeur du champ au point critique ;

E_{P_M} : valeur du champ au point de mesure ;

$D(A; P_M)$: distance de l'antenne au point de mesure ;

$D(A; P_C)$: distance de l'antenne au point critique.

et la correction de distance en dB s'obtient par la relation :

$$(5) \quad Cor_{distance}(dB) = 20 \log_{10} \left(\frac{D(A; P_M)}{D(A; P_C)} \right)$$

Le cas plus complexe d'un LS exposé à un lobe secondaire (par exemple le LS1 de la figure 3) est présenté en Annexe I.

5.2.2 Correction d'azimut

Si les lieux accessibles ne sont pas dans la direction du point où l'exposition est la plus élevée, il est néanmoins possible d'évaluer le champ au point critique P_C en effectuant une mesure dans une autre direction à une distance équivalente à la distance antenne- P_C moyennant une correction d'azimut (figure 6).

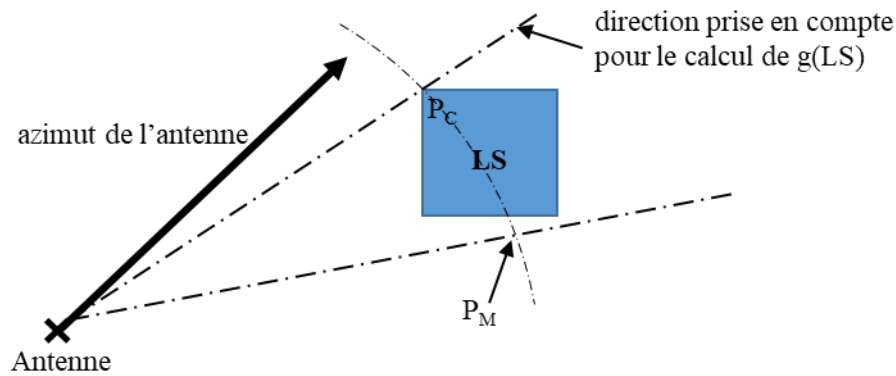


Figure 6 : Correction d'azimut (vue en plan)

La correction d'azimut Cor_{azimut} prend en compte le fait que le gain de l'antenne dans la direction du point de mesure P_M peut différer sensiblement du gain dans la direction du LS. Cette correction est donnée par la relation :

$$(6) \quad Cor_{azimut}(dB) = g_h(LS) - g_h(P_M)$$

dans laquelle $g_h(LS)$ et $g_h(P_M)$ sont respectivement les gains en dB dans les azimuts du LS et du point P_M . Ces gains $g_h(LS)$ et $g_h(P_M)$ sont déduits du diagramme de rayonnement horizontal. Le champ à l'intérieur du bâtiment est donné par :

$$(7) \quad E_{P_C} = E_{P_M} \times 10^{Cor_{azimut}/20}$$

Pour une antenne omnidirectionnelle, Cor_{azimut} est égal à 0 dB.

5.2.3 Correction d'élévation

Si la mesure est prise en un point P_M situé à une hauteur différente du point où l'exposition est la plus grande dans le LS, soit P_C ce point, une correction d'élévation peut s'avérer nécessaire. C'est le cas lorsque les étages supérieurs d'un bâtiment ne sont pas accessibles et que les mesures sont prises soit sur le toit du bâtiment, soit plus bas devant le bâtiment, comme représenté dans la vue en élévation de la figure 7.

La correction d'élévation $Cor_{élévation}$ se calcule de manière similaire à la correction d'azimut. Elle est donnée par la relation :

$$(8) \quad Cor_{élévation}(dB) = g_v(LS) - g_v(P_M)$$

dans laquelle $g_v(LS)$ et $g_v(P_M)$ sont respectivement les gains en dB correspondant aux élévations du point critique P_C et du point P_M . $g_v(LS)$ et $g_v(P_M)$ sont déduits du diagramme de rayonnement vertical.

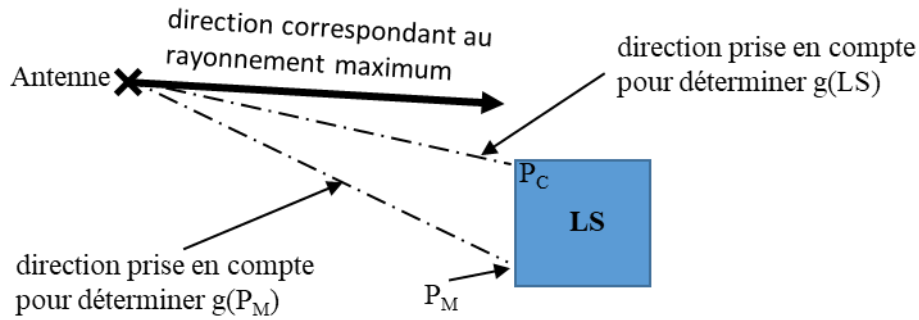


Figure 7 : Correction d'élévation (vue en élévation)

Le champ à l'intérieur du LS en absence d'atténuation d'obstacle est donné par la relation :

$$(9) \quad E_{P_C} = E_{P_M} \times 10^{\frac{Cor_{élévation}}{20}}$$

5.2.4 Prise en compte des obstacles

Le champ E_{P_C} obtenu par les relations (4), (7) et (9) ne tient pas compte de l'atténuation due aux parois. En réalité, le rayonnement est partiellement réfléchi et plus ou moins absorbé en fonction des propriétés du matériau, lorsqu'il rencontre un obstacle.

Compte tenu de la pléthore de matériaux et de configurations possibles, ainsi que leur impossible identification⁷ exhaustive, une atténuation minimale de 3 dB a été adoptée. Elle constitue une sous-estimation dans la grande majorité des cas, comme l'illustre l'ensemble des résultats compilés par l'International Telecommunication Union (rapport ITU-R P.2346-5).

Le champ à l'intérieur d'un bâtiment E_{int} est déduit du champ à l'extérieur E_{ext} selon la relation :

$$(10) \quad E_{int} = E_{ext} \times 10^{-\frac{Att}{20}}$$

dans laquelle Att est l'atténuation par défaut de 3 dB.

5.2.5 Bilan de l'ensemble des corrections

La correction totale, exprimée en dB, est donnée par la relation :

$$(11) \quad Cor_{totale}(dB) = Cor_{distance} - Att + Cor_{azimut} + Cor_{élévation}$$

Il découle de ce qui précède que le champ à l'intérieur du LS est inférieur au champ maximum évalué au point de mesure :

$$(12) \quad E_{LS} \leq E_{P_M} \times 10^{Cor_{totale}/20}$$

Il convient d'être attentif au signe des diverses corrections dans l'expression (11) puisqu'elles peuvent être positives ou négatives. L'inégalité (12) fournit une borne supérieure du champ maximum à l'intérieur du lieu de séjour.

Les corrections présentées ci-avant s'appliquent aux antennes dont le diagramme de rayonnement des signaux de contrôles est le même que le diagramme de rayonnement des signaux de trafic.

⁷ De l'extérieur, seule la couche externe est visuellement identifiable.

Dans le cas où ces diagrammes de rayonnement diffèrent, il faut introduire une correction supplémentaire due à cette différence.

6 Evaluation de l'indice par installation

6.1 Détection des fréquences rayonnées par les antennes de l'installation contrôlée

Une mesure spectrale permet de vérifier la largeur des différentes bandes de fréquence effectivement utilisées.

Les mesures spectrales pour la 2G et issues des décodeurs pour les autres technologies permettent, au point de mesure, d'identifier l'installation contrôlée et de détecter d'éventuels signaux d'autres installations.

Le tableau 1 détaille les différents signaux présents lors du contrôle de la manière suivante :

- colonne 1 : numéro attribué à chaque antenne de l'installation contrôlée ;
- colonne 2 : azimut de l'antenne inscrit dans la demande d'avis par l'exploitant ;
- colonne 3 : bande de fréquences en émission sous la forme "borne inférieure – borne supérieure" ;
- colonne 4 : réseau utilisant la bande de fréquence reprise dans la colonne 3. Une même bande de fréquence peut être utilisée par différents réseaux, soit par un partage en différentes sous-bandes, soit par un partage dynamique temporel⁸ ;
- colonne 5 : selon le réseau,
 - 2G (GSM 900 et DCS 1800) : fréquence du canal de contrôle BCCH⁹ ;
 - 3G (UMTS) ou 4G (LTE) : fréquence centrale de la bande utilisée ;
 - 5G (5G NR) : fréquence centrale de la bande utilisée / fréquence centrale du bloc SSB¹⁰ ;
- colonne 6 : largeur de bande utile. Dans le cas de la 2G, la largeur des différents canaux est fixée à 0,2 MHz ;
- colonne 7 : nombre de fréquences d'émission (porteuses ou TRX) pour les réseaux 2G ; un tiret pour les autres réseaux ;
- colonne 8 : scrambling code (3G) ou Cell ID (4G ou 5G) ; un tiret pour la 2G.

⁸ DSS est l'abréviation de « *Dynamic Spectrum Sharing* ».

⁹ BCCH est l'abréviation de « *Broadcast Control Channel* ».

¹⁰ SSB est l'abréviation de « *Synchronization Signal Block* ».

Tableau 1 : Informations enregistrées lors du contrôle

1	2	3	4	5	6	7	8
Antenne	Azimut [°]	Bande de fréquence [MHz]	Réseau	Fréquence de référence [MHz]	Largeur de bande [MHz]	Nombre de fréquences d'émission	Scrambling code ou Cell ID
1	##	###-###	#G	##	##	-	-
2	##			##		-	-
3	##			##		-	-

L'intensité du rayonnement électromagnétique généré par une antenne des réseaux de communication mobile présente des variations importantes :

- dans l'espace, en raison des divers phénomènes (réflexion, diffraction...) qui affectent la propagation des ondes ;
- dans le temps, puisqu'une antenne ajuste sa puissance d'émission¹¹ pour garantir une communication de qualité et satisfaire la demande (nombre d'utilisateurs, débit).

Néanmoins, les différents signaux de contrôle sont quant à eux émis à puissance constante, indépendamment du moment des mesures. La mesure du niveau de champs de ces différents signaux de contrôle permet de calculer l'intensité du champ électromagnétique lorsque les antennes de l'installation émettent au maximum de leur puissance.

6.2 Détermination du maximum de l'intensité du rayonnement

Le champ correspondant à l'émission de la puissance maximale d'une antenne est obtenu par extrapolation pour chaque réseau. L'intensité du champ électrique visée par le décret est une valeur efficace moyenne calculée et mesurée durant une période quelconque de trente minutes. L'indice d'exposition ainsi calculé sur base de la puissance maximale constitue donc une surestimation de l'indice réel.

6.2.1 Réseau 2G (GSM et DCS 1800)

A partir de la mesure du champ à la fréquence du canal de contrôle (fréquence du BCCH¹²), le champ maximal dû aux différents porteuses émises est déduit de la formule :

$$(13) \quad E_{max} = E_{BCCH} \times \sqrt{nP}$$

avec :

- E_{max} : maximum du champ généré par l'installation au point de mesure ;

¹¹ Dans le cadre du déploiement de la 5G, les antennes avec *beamforming* offrent la possibilité d'un "power control", i.e. la possibilité d'automatiquement limiter sa puissance d'émission afin de ne pas dépasser un certain seuil d'exposition. Cette option ne fait pas l'objet d'une obligation légale en Wallonie.

¹² BCCH est l'abréviation de « *Broadcast Control Channel* ».

- E_{BCCH} : mesure du champ à la fréquence de contrôle au point de mesure ;
- nP : nombre de porteuses.

Lorsqu'il y a divergence entre le nombre maximum de porteuses annoncé par l'opérateur et celui constaté *in situ*, c'est le plus élevé des deux qui sera utilisé dans les calculs.

6.2.2 Réseau 3G (UMTS)

Le champ maximum est extrapolé à partir de la mesure du champ du canal commun P-CPICH¹³ selon la formule :

$$(14) \quad E_{max} = E_{P-CPICH} \times \sqrt{10}$$

avec :

- E_{max} : maximum du champ généré par l'installation au point de mesure ;
- $E_{P-CPICH}$: mesure du champ à la fréquence du canal pilote au point de mesure ;
- $\sqrt{10}$: facteur provenant du rapport entre la puissance du canal pilote et la puissance maximale rayonnée. Ce rapport est généralement de 10 mais peut varier entre 8 et 15.

Si plusieurs sous-bandes sont utilisées pour la 3G, le calcul doit se faire pour chaque sous-bande et être sommé :

$$(15) \quad E_{max} = \sqrt{\sum_{i=1}^{nB} E_{max,i}^2}$$

avec :

- $E_{max,i} = E_{P-CPICH,i} \times \sqrt{10}$ ($i = 1, \dots, nB$) ;
- nB : nombre de sous-bandes utilisées.

6.2.3 Réseau 4G (LTE)

Le champ maximum est extrapolé à partir de la mesure du champ des différents signaux RS¹⁴ selon la formule :

$$(16) \quad E_{max} = E_{RS_{sum}} \times \sqrt{K(BW)}$$

avec :

- E_{max} : maximum du champ généré par l'installation au point de mesure ;
- $E_{RS_{sum}}$: somme quadratique des mesures des signaux RS au point de mesure donné par

$$(17) \quad E_{RS_{sum}} = \sqrt{\sum_{i=0}^n E_{RS_i}^2}$$

avec :

- n : le nombre d'éléments de l'antenne MIMO¹⁵

¹³ P-CPICH est l'abréviation de « *Primary Common Pilot Channel* ».

¹⁴ RS est l'abréviation de « *Reference Signal* ».

¹⁵ MIMO est l'abréviation de « *Multiple Input Multiple Output* »

- $K(BW)$: facteur dépendant de la largeur de bande (BW^{16}) utilisée. Les différentes valeurs possibles de $K(BW)$ sont données dans le tableau 2.

Tableau 2 : Valeur de K en fonction de la largeur de bande

Largeur de bande (MHz)	K(BW)
1,4	72
3	180
5	300
10	600
15	900
20	1200

Si du duplexage temporel est utilisé en lieu et place du duplexage fréquentiel, il faut corriger le E_{max} d'un facteur correspondant au rapport entre la liaison descendante (*downlink*) et la liaison montante (*uplink*).

6.2.4 Bande de fréquence partagée dynamiquement entre 4G et 5G (DSS)¹⁷

Lorsqu'une même bande de fréquence est partagée dynamiquement entre 4G (LTE) et 5G (5G NR), le champ maximum est déduit de la même façon que pour la 4G, corrigé éventuellement dans le cas où les signaux des deux technologies sont émis à des puissances différentes.

$$(18) \quad E_{max} = E_{max4G} \times \sqrt{C_{\Delta P}}$$

avec :

- E_{max} : maximum du champ généré par l'installation au point de mesure ;
- E_{max4G} : maximum du champ obtenu selon l'équation (16) au point de mesure ;
- $C_{\Delta P}$: facteur de correction qui tient compte d'une différence de puissance éventuelle entre les signaux LTE et les signaux 5G NR, sa valeur est fixée à 1 par défaut.

6.2.5 Réseau 5G NR - fréquences d'émission inférieures à 3 GHz

Pour les bandes d'émissions inférieures à 3 GHz et dédiées uniquement à la 5G NR, le champ maximum est déduit de la formule

$$(19) \quad E_{max} = E_{SSS} \times \sqrt{K(BW)} \times \sqrt{C_{\Delta BT}}$$

avec :

- E_{max} : maximum du champ généré par l'installation au point de mesure ;
- E_{SSS} : maximum du champ pour le signal de synchronisation du SSB obtenu au point de mesure ;
- $C_{\Delta BT}$: facteur de correction qui tient compte d'une différence de puissance éventuelle entre les signaux de broadcast et les signaux de trafic, sa valeur est fixée à 1 par défaut ;
- $K(BW)$: facteur dépendant de la largeur de bande (BW) utilisée. Les différentes valeurs possibles de $K(BW)$ sont données dans le tableau 3.

¹⁶ BW est l'abréviation de « Band Width ».

¹⁷ DSS est l'abréviation de Dynamic Spectrum Sharing.

Tableau 3 : Valeurs de $K(BW)$ en fonction de la largeur de bande du signal 5G NR

Largeur de bande (MHz)	$K(BW)$
5	300
10	625
15	949
20	1273

6.2.6 Réseau 5G NR – fréquences d’émission dans la bande 3,6 GHz

6.2.6.1 Sans beamforming

Pour la bande d’émission 3,6 GHz sans *beamforming*, le champ maximum est déduit de la formule

$$(20) \quad E_{max} = E_{SSS} \times \sqrt{K(BW, ScS)} \times \sqrt{C_{TDD}} \times \sqrt{C_{\Delta BT}}$$

avec :

- E_{max} : maximum du champ généré par l’installation au point de mesure ;
- E_{SSS} : maximum du champ pour le signal de synchronisation du SSB obtenu au point de mesure ;
- C_{TDD} : facteur de correction pour tenir compte du multiplexage temporel. Actuellement, il est fixé à 0,75 ;
- $C_{\Delta BT}$: facteur de correction qui tient compte d’une différence de puissance éventuelle entre les signaux de broadcast et les signaux de trafic, sa valeur est fixée à 1 par défaut ;
- $K(BW, ScS)$: facteur dépendant de la largeur de bande (BW) ainsi que de la largeur des sous-porteuses (ScS¹⁸) utilisée. Les différentes valeurs possibles de $K(BW, ScS)$ sont données dans le tableau 4.

¹⁸ ScS est l’abréviation de « Sub-carrier Spacing ».

Tableau 4 : Valeurs de $K(BW, ScS)$ en fonction de la largeur de bande du signal 5G NR et de la largeur des sous-porteuses

BW en MHz	$K(BW, ScS)$ en kHz	
	ScS = 15 kHz	ScS = 30 kHz
5	300	133
10	625	289
15	949	457
20	1273	613
25	1597	781
30	1921	937
35	2257	1105
40	2593	1273
45	2905	1429
50	3241	1597
60	N/A	1945
70	N/A	2269
80	N/A	2605
90	N/A	2941
100	N/A	3277

6.2.6.2 Avec beamforming

Pour la bande d'émission 3,6 GHz avec *beamforming*, le champ maximum est mesuré en forçant du trafic vers l'appareil de mesure dans cette bande de fréquence. Le champ maximum E_{max} est l'intégration du spectre mesuré pendant l'échange de trafic. Un exemple est illustré par la figure 8.

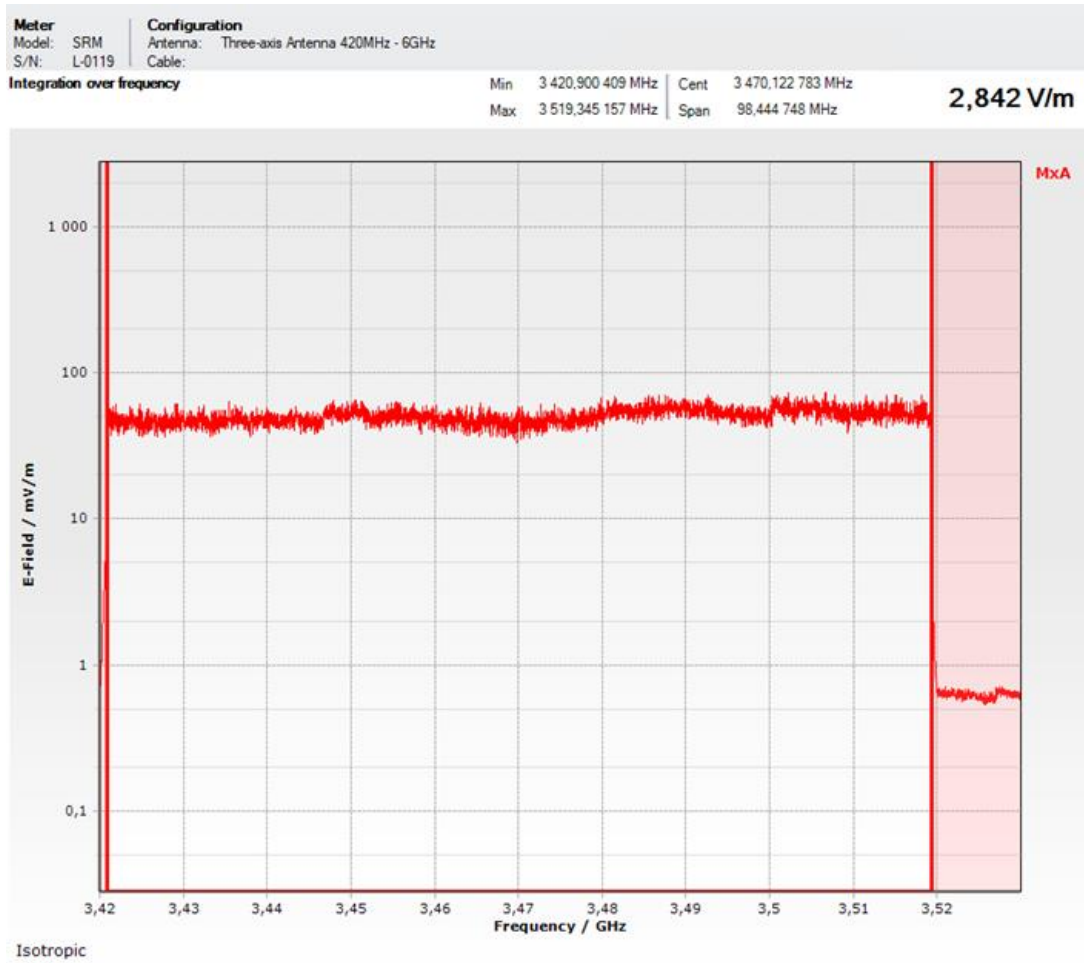


Figure 8 : Spectre obtenu pendant l'échange de trafic vers l'équipement de mesure. La valeur en gras dans le coin supérieur droit est le résultat de l'intégration du spectre délimité par les deux lignes verticales.

Pour tenir compte des fluctuations inhérentes au spectre, la valeur retenue est la valeur intégrée du spectre augmentée de deux écarts-types, soit

$$(21) \quad E_{max} = E_{Int} + 2\sigma$$

avec :

- E_{max} : maximum du champ généré par l'installation au point de mesure;
- E_{Int} : valeur de l'intégration du spectre;
- σ : écart-type de l'ensemble des valeurs individuelles constituant le spectre.

6.2.7 Partage d'une bande de fréquence entre plusieurs réseaux

Lorsque qu'une bande de fréquence est subdivisée en plusieurs sous-bandes destinées à des technologies différentes, leurs contributions doivent être prises en compte :

$$(22) \quad E_{max} = \sqrt{\sum_{i=1}^{nB} E_{max,i}^2}$$

avec :

- $E_{max,i}$: le champ max obtenu conformément au paragraphe correspondant pour chacune des technologies présentes dans la bande ($i = 1, \dots, nB$) ;
- nB : nombre de sous-bandes utilisées.

6.3 Evaluation de l'indice relatif à la limite par installation

L'indice d'exposition IE_i relatif à la limite par installation est obtenu de la manière suivante :

$$(23) \quad IE_i = \sum_{i=1}^n \left(\frac{E_i}{E_{réf,i}} \right)^2$$

avec :

- E_i : le champ maximum dans la bande de fréquence i calculé conformément au § 6.2;
- $E_{réf,i}$: le niveau de référence dans la bande de fréquence i . Les niveaux de référence pour chaque bande de fréquence sont donnés dans le tableau 5 ;
- n : le nombre de bandes de fréquence effectivement utilisées par l'installation ($n \leq 8$).

Tableau 5 : Niveaux de référence utilisés pour l'indice d'exposition relatif à la limite par installation

Bande de fréquences (MHz)	Niveaux de référence (V/m)
758 à 788	8,45
791 à 821	8,63
921 à 960	9,32
1427 à 1517	11,60
1805 à 1880	13,04
2110 à 2170	13,70
2575 à 2620	13,70
2620 à 2690	13,70
3430 à 3800	13,70

Les résultats seront présentés dans un tableau (1 ligne par point de mesure) tel que le tableau 6 :

Tableau 6 : Indice d'exposition relatif à la limite par installation mesuré directement dans les lieux de séjour

1	2	3	4
Lieu de mesure	LS	Étage et local	Indice d'exposition maximum généré par l'installation (%)

Les colonnes reprennent les informations suivantes :

- colonne 1 : localisation des lieux où les mesures ont été prises ;
- colonne 2 : identification du/des LS correspondant(s) ;
- colonne 3 : étage et local dans lesquels la mesure a été prise ;
- colonne 4 : indice d'exposition généré par l'installation exprimé en % de la limite (100%).

Tableau 7 : Indice d'exposition relatif à la limite par installation évalué à partir de mesures effectuées en dehors des lieux de séjour

1	2	3	4	5	6	7
Localisation du lieu de mesure	Hauteur du point de mesure [m]	LS	Indice d'exposition maximum généré par l'installation [%]	Type de correction	Correction totale [dB]	Indice d'exposition maximum dans le LS [%]

Les colonnes reprennent les informations suivantes :

- colonne 1 : localisation des lieux où les mesures ont été prises ;
- colonne 2 : hauteur du point de mesure ;
- colonne 3 : identification des LS ;
- colonne 4 : indice d'exposition maximum où la mesure a été prise ;
- colonne 5 : liste des corrections appliquées pour la détermination du champ maximum à l'intérieur du LS :
 - a) correction de distance ;
 - b) prise en compte des obstacles ;
 - c) le cas échéant, une correction d'azimut ;

d) correction d'élévation ;

- colonne 6 : correction totale appliquée exprimée en dB ;
- colonne 7 : indice d'exposition maximum généré par l'installation à l'intérieur du LS. L'indice d'exposition est ici obtenu indirectement, le résultat est exprimé sous la forme « $\leq$ indice maximum ». Cette valeur est l'indice d'exposition repris en colonne 4 auquel est appliqué la correction inscrite dans la colonne 6, ce qui signifie qu'en pratique l'indice d'exposition pourrait être nettement inférieur à la valeur mentionnée.

Note sur la présentation des résultats

Les indices définis par le décret sont des sommes quadratiques pondérées. Les niveaux mesurés sur le terrain peuvent être très faibles par rapport aux coefficients de pondération (poids) pour chaque bande de fréquence repris pour le calcul des indices. Plutôt que de présenter de tels indices avec un grand nombre de décimales, par exemple 0,000004 ou sous la notation ingénieur soit $4 \cdot 10^{-6}$, ils seront présentés sous la forme $< 0,1 \%$. Autrement dit, lorsqu'un indice calculé est inférieur au millième de la limite fixée par le décret, celui-ci sera présentés sous la forme « $< 0,1 \%$ ».

7 Evaluation de l'indice relatif à la limite cumulative

En sus de la limite par installation, le décret fixe une limite cumulative dans une zone circulaire centrée sur l'installation dont le rayon a été défini par l'arrêté du 27 avril 2023 : 300 mètres.

Le décret stipule notamment que l'intensité du champ électrique est une valeur efficace moyenne calculée et mesurée durant une période quelconque de trente minutes. En fonctionnement normal, une installation d'antennes émettrices des réseaux mobiles ne va pas émettre à pleine puissance pendant une durée aussi longue. A fortiori, plusieurs installations n'émettront jamais simultanément à pleine puissance pendant des périodes aussi longues.

L'indice d'exposition cumulé est évalué de la manière suivante :

Une mesure du champ est effectuée dans toutes les bandes de fréquences visées par le décret, tous opérateurs inclus ;

L'indice d'exposition cumulé IE_c est ensuite calculé de la manière suivante :

$$(24) \quad IE_c = \sum_{i=1}^8 \left(\frac{E_i}{E_{réf,i}} \right)^2$$

avec :

- E_i : le champ mesuré dans la bande de fréquence i ;
- $E_{réf,i}$: le niveau de référence dans la bande de fréquence i . Les niveaux de référence pour chaque bande de fréquence sont donnés dans le tableau 8.

Tableau 8 : Niveaux de référence utilisés pour l'indice d'exposition relatif à la limite cumulative

Bande de fréquences (MHz)	Niveaux de référence
758 à 788	16,90
791 à 821	17,27
921 à 960	18,63
1427 à 1517	23,19
1805 à 1880	26,09
2110 à 2170	27,40
2575 à 2620	13,70
2620 à 2690	27,40
3430 à 3800	27,40

En pratique, si l'indice ainsi obtenu est inférieur ou égal à 0,2, la limite cumulative est de facto respectée. Lorsque l'indice cumulatif dépasse cette valeur guide, une analyse plus approfondie est menée avec des mesures et calculs selon la méthode exposée au § 6.

Les résultats seront présentés dans un tableau (une ligne par point de mesure) tel que le tableau 9.

Tableau 9 : Résultat de la mesure de l'indice d'exposition relatif à la limite cumulative

1	2	3
Localisation du lieu de mesure	Hauteur du point de mesure (m)	Indice d'exposition cumulé (%)

Les colonnes reprennent les informations suivantes :

- colonne 1 : localisation des lieux où les mesures ont été prises ;
- colonne 2 : la hauteur du point de mesure;
- colonne 3 : l'indice d'exposition relatif à la limite cumulative exprimé en % de la limite (100%).

La note concernant la présentation des résultats du chapitre précédent reste d'application.

L'indice cumulé est évalué systématiquement aux points où est évalué l'indice relatif à la limite par installation auxquels s'ajoutent des points pertinents en fonction notamment de la localisation des installations d'antennes émettrices stationnaires.

Annexe I - Méthode applicable lorsque le LS est exposé aux lobes secondaires

La figure 8 décrit une approche qui peut être appliquée dans certains cas et plus particulièrement lorsque le LS est exposé aux lobes secondaires. Elle consiste à mesurer le champ dans l'angle BÂC le long d'un trajet TM parallèle au sol (à une hauteur de 1,5 m par défaut), situé à l'extérieur et à côté du LS. En pratique, on mesure le champ moyen en des points espacés de 2 ou 3 m le long du trajet TM. Soit P_M le point le long du trajet TM où le champ est maximum. Il en découle que ce maximum au point P_M correspond à un maximum en un point D situé à l'intersection de la droite AP_M et du mur (face extérieure). Etant donné la loi de variation du champ en fonction de la distance et si E_D désigne le champ en D, on peut écrire :

$$(25) \quad E_D = E_{P_M} \times \frac{AP_M}{AD}$$

où E_{P_M} désigne le champ moyenné sur une surface horizontale de 0,5 x 0,5 m² située autour du point P_M .

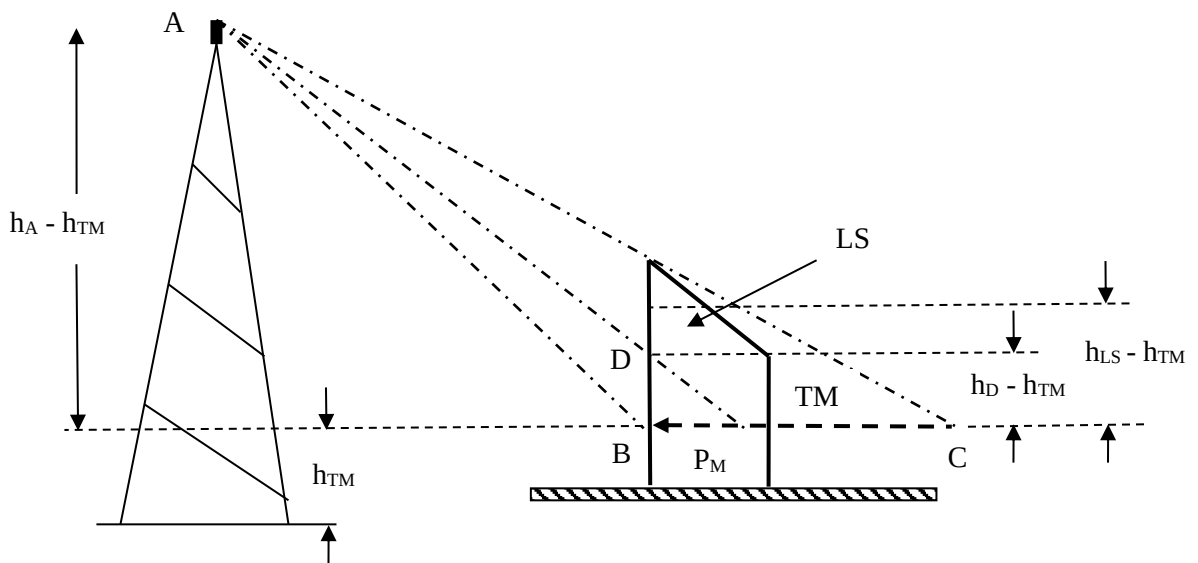


Figure 9: Principe de la détermination du champ à l'intérieur d'un bâtiment à partir d'une mesure à l'extérieur (LS exposé aux lobes secondaires)

Compte tenu des propriétés des triangles semblables, on a l'égalité :

$$(26) \quad E_D = E_{P_m} \times \frac{h_A - h_{TM}}{(h_A - h_{TM}) - (h_D - h_{TM})}$$

dans laquelle :

- $h_A - h_{TM}$ est la différence entre la hauteur du milieu de l'antenne et de celle du trajet TM ;
- $h_D - h_{TM}$ est la différence entre la hauteur du point D et celle du trajet TM.

Il n'est pas indispensable de connaître la hauteur exacte du point D puisque le terme $h_D - h_{TM}$ étant au dénominateur et négatif, on peut écrire que le champ maximum E_{LS} à l'intérieur du LS satisfait l'inégalité :

$$(27) \quad E_{LS} \leq E_{P_M} \times \frac{h_A - h_{TM}}{(h_A - h_{TM}) - (h_{LS} - h_{TM})}$$

dans laquelle :

- h_{LS} est la hauteur du point le plus élevé du LS soit 1,5 m au-dessus du plancher du dernier étage ;
- $h_{LS} - h_{TM}$ est la différence entre la hauteur du point le plus élevé du LS et de celle du trajet TM.

L'inégalité (27) peut être mise sous la forme :

$$(28) \quad E_{LS} \leq E_{PM} \times \frac{1}{1 - \frac{(h_{LS} - h_{TM})}{(h_A - h_{TM})}}$$

La relation (28) permet donc de déterminer la limite supérieure de E_{LS} à partir de E_{PM} qui est le champ maximum mesuré le long du trajet TM. On note que la différence de hauteur $h_A - h_{TM}$ peut être mesurée directement, depuis le trajet TM, au moyen d'un télémètre fournissant directement la différence de hauteurs entre deux points.

De même, la différence de hauteurs $h_{LS} - h_{TM}$ peut être mesurée au moyen d'un télémètre.

Le rapport

$$(29) \quad \frac{1}{1 - \frac{(h_{LS} - h_{TM})}{(h_A - h_{TM})}}$$

constitue un facteur de « correction de distance » qui peut être exprimé en dB de la manière suivante :

$$(30) \quad Cor_{distance}(dB) = 20 \log_{10} \left(\frac{1}{1 - \frac{(h_{LS} - h_{TM})}{(h_A - h_{TM})}} \right)$$

L'expression (28) ne faisant intervenir que des différences de hauteurs, le point de référence à partir duquel elles sont mesurées n'a pas d'importance. Le télémètre peut donc être placé le long du trajet TM, ce qui revient à prendre $h_{TM} = 0$, c'est-à-dire à prendre le trajet de mesure comme origine pour évaluer les hauteurs.

Conditions d'application de la méthode

Déterminer le champ à l'intérieur d'un bâtiment à partir d'une mesure à l'extérieur n'est possible que si le trajet TM se trouve en vue directe de la source de rayonnement analysée. Dans tous les cas, l'opérateur de l'appareil de mesure doit se déplacer vers la source de manière à ne pas constituer lui-même un obstacle.

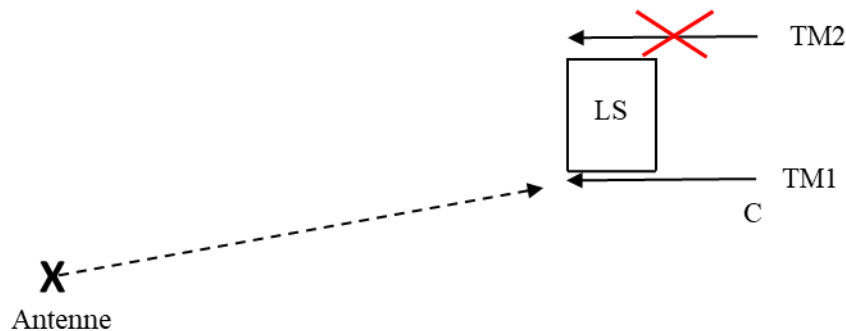


Figure 10 : Conditions de validité d'une détermination du champ à l'intérieur d'un bâtiment à partir d'une mesure à l'extérieur

La figure 10 et la suivante (vues en plan) correspondent à des cas où la méthode est applicable. Dans celui de la figure 10 la mesure doit être réalisée le long du trajet TM1 qui débute au point C. Ce point C correspond à l'endroit où le sommet du LS et l'antenne examinée apparaissent sur une même ligne horizontale. Une mesure le long de TM1 n'est évidemment possible que si cette zone est accessible, ce qui n'est malheureusement pas toujours le cas. Une mesure le long du chemin TM2 n'est pas permise car il est masqué, du moins partiellement, par le LS.

Dans l'exemple de la figure 11 l'accès est impossible des deux côtés du LS (aucun passage entre les bâtiments). Si l'angle formé par les façades des bâtiments et la direction de propagation de l'onde est suffisamment oblique (moins de 45° en pratique), la mesure peut être effectuée le long d'un trajet TM parallèle à la façade exposée des bâtiments. Dans un tel cas, le trajet TM commence en un point C qui correspond à l'endroit où le sommet du LS et l'antenne examinée apparaissent, approximativement, sur une même ligne horizontale.

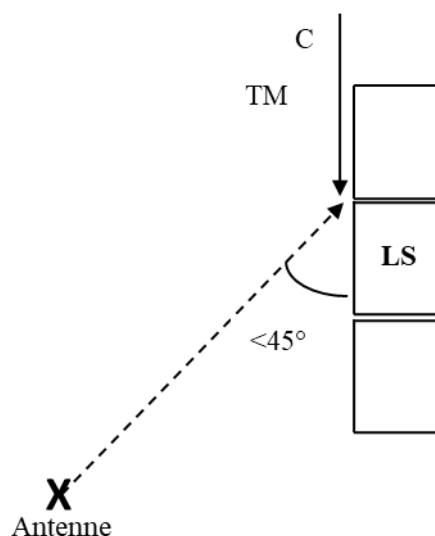


Figure 11 : Conditions de validité d'une détermination du champ à l'intérieur d'un bâtiment à partir d'une mesure à l'extérieur

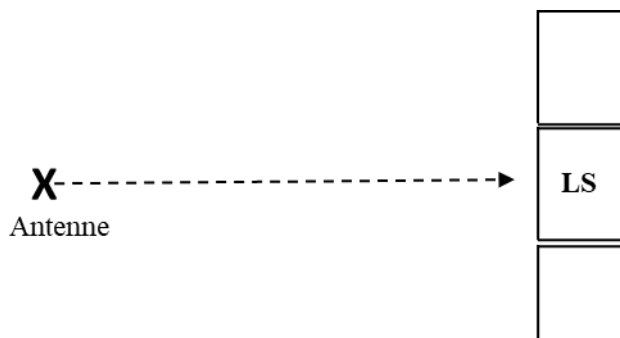


Figure 12 : Cas où la détermination du champ à l'intérieur d'un bâtiment à partir d'une mesure à l'extérieur est impossible

La figure 12 décrit le cas où l'accès est impossible des deux côtés du LS et où l'alignement des façades est perpendiculaire à la direction de propagation. La méthode n'est pas applicable car le trajet TM situé dans l'angle BÂC de la figure 9 est inaccessible.

Comme précisé ci-dessus, la méthode décrite à la figure 9 s'applique plus particulièrement dans le cas où le LS est exposé aux lobes secondaires. Dans cette zone, une légère variation de l'angle d'élévation peut se traduire par de fortes variations du gain. C'est la raison qui justifie que l'on prenne plusieurs mesures le long du trajet TM afin de déterminer le champ maximum (au point noté P_M).

Une correction d'élévation n'est permise que si le LS et le point P_M se trouvent dans le lobe principal de l'antenne. En effet, les variations du gain d'antenne dans la direction des lobes secondaires sont trop importantes pour permettre une correction fiable.

Annexe II - Equipements utilisés par l'ISSeP

L'ISSeP utilise des analyseurs de spectre NARDA SRM¹⁹-3006 couvrant la bande de fréquences comprise entre 9 kHz et 6 GHz, équipés d'une sonde triaxiale (« Three-Axis-Antenna, E Field ») NARDA de type P/N 3502/01 couvrant la bande de fréquences comprise entre 420 MHz et 6 GHz. Ces équipements incorporent également les décodeurs des différents réseaux 2G, 3G, 4G, et 5G.

Conformément aux recommandations du constructeur et compte tenu de l'expérience de l'ISSeP, ces équipements sont étalonnés tous les deux ans.

Des télémètres de la marque Haglof Laser Geo sont utilisés pour les mesures de distance.

Les smartphones suivants sont utilisés pour générer du trafic sur le réseau 5G :

- Apple ...
- Samsung ...

La génération du trafic est réalisée à l'aide de l'appli de mesure de débit Ookla Speedtest.

¹⁹ SRM est l'abréviation de « *Selective Radiation Meter* ».