

Liège, le 25 septembre 2025.

**MÉTHODE DE MESURE
DES RAYONNEMENTS ÉLECTROMAGNÉTIQUES
POUR LA RÉCEPTION ET LE CONTRÔLE D'ÉMETTEURS D'ONDES
AU GRAND-DUCHÉ DE LUXEMBOURG**

Version 2.2

TABLE DES MATIERES

1	Préambule	3
2	Norme d'exposition	3
3	Documents de référence.....	3
4	Zone dans laquelle des mesures sont effectuées.....	4
5	Equipement nécessaire.....	5
6	Méthode de mesure	5
6.1	Mesures prises directement dans les lieux de séjour	6
6.2	Détermination du champ électromagnétique à l'intérieur de bâtiments à partir du champ mesuré en un lieu accessible	6
6.2.1	<i>Correction de distance.....</i>	<i>7</i>
6.2.2	<i>Correction d'azimut.....</i>	<i>8</i>
6.2.3	<i>Correction d'élévation.....</i>	<i>9</i>
6.2.4	<i>Prise en compte des obstacles</i>	<i>10</i>
6.2.5	<i>Bilan de l'ensemble des corrections</i>	<i>10</i>
7	Evaluation du champ électromagnétique.....	11
7.1	Détection des fréquences rayonnées par les antennes de l'installation contrôlée.....	11
7.2	Détermination du champ maximum produit par un élément rayonnement	11
7.2.1	<i>Réseau TETRA.....</i>	<i>11</i>
7.2.2	<i>Réseau 2G (GSM et DCS 1800)</i>	<i>12</i>
7.2.3	<i>Réseau 3G (UMTS).....</i>	<i>12</i>
7.2.4	<i>Réseau 4G (LTE)</i>	<i>12</i>
7.2.5	<i>Bande de fréquence partagée dynamiquement entre 4G et 5G (DSS).....</i>	<i>13</i>
7.2.6	<i>Réseau 5G NR – Antennes passives.....</i>	<i>13</i>
7.2.7	<i>Réseau 5G NR – Antennes actives.....</i>	<i>14</i>
	Annexe I - Symboles et abréviations utilisés.....	17
	Annexe II - Méthode applicable lorsque le LS est exposé aux lobes secondaires	18
	Annexe III - Equipements utilisés par l'ISSEP	22

1 Préambule

Le présent document décrit la méthode de mesure appliquée par l'ISSEP pour la réception et le contrôle des émetteurs d'ondes électromagnétiques. Cette réception et ce contrôle sont effectués conformément aux prescriptions de l'article fixant les conditions relatives à la réception et au contrôle de l'établissement de l'Arrêté d'autorisation du Ministère de l'Environnement, du Climat et de la Biodiversité relative à l'émetteur, ci-après dénommé l'Arrêté, ainsi que du dernier arrêté d'agrément délivré à l'ISSEP par le Ministère de l'Environnement, du Climat et du Développement durable.

2 Norme d'exposition

En ce qui concerne les stations émettrices de mobilophonie, l'article 4 « Protection du public et des travailleurs non visés à l'article 5 » du document ITM¹-SST 1105.1² impose que les antennes soient installées de façon à garantir, en tout lieu où peuvent séjourner des personnes (LS), un champ électromagnétique ≤ 3 V/m par élément rayonnant. Dans ce document un élément rayonnant est identifié par une ligne du tableau de l'Arrêté reprenant les installations autorisées.

Exceptionnellement, dans le cas où plusieurs éléments rayonnent dans la même direction, la valeur maximale autorisée du champ électromagnétique de l'ensemble des éléments orientés dans la même direction se calcule par la formule :

$$(1) \quad E_{max} = 3 \cdot \sqrt{n}$$

dans laquelle n est le nombre d'éléments rayonnant dans la même direction.

3 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.

¹ Inspection du Travail et des Mines

² Conditions d'exploitation pour les émetteurs d'ondes électromagnétiques à haute fréquence

- « Méthode de mesure des stations de base 5G NR jusqu'à 6 GHz » – Rapport technique METAS version 2.1 – Avril 2020.
- « Méthode de contrôle des rayonnements électromagnétiques générés par des antennes émettrices stationnaires en wallonie » – Avril 2024.
- « 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.
- ITU-R P.2346-5 : « Compilation of measurement data relating to building entry loss » International Telecommunication Union – Juin 2023.

4 Zone dans laquelle des mesures sont effectuées

La zone dans laquelle les mesures sont effectuées est un disque centré sur l'installation à contrôler.

Le rayon de ce disque est la distance maximale théorique à partir de laquelle la limite par élément rayonnant est nécessairement respectée à condition que les caractéristiques des éléments autorisés soient correctes. Ce rayon est le maximum des $D_{\max}$ des courbes d'isovaleurs de l'annexe A du rapport de contrôle.

La vérification de la limite par élément rayonnant doit être effectuée au minimum dans cette zone. Néanmoins, par précaution, la vérification de la limite est généralement effectuée dans une zone légèrement plus étendue.

En l'absence de lieux de séjour – ci-après abrégés « LS » – dans la zone d'étude, le contrôle se limitera à l'identification des réseaux en service ou une mesure sera effectuée devant le LS le plus proche.

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 exposés³. 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 de demande d'autorisation fourni par l'exploitant ;
- l'Arrêté d'autorisation du Ministère de l'Environnement, du Climat et de la Biodiversité ;
- le géoportail national officiel du Grand-Duché de Luxembourg ;
- la liste des technologies en service fournie par l'exploitant avant le contrôle.

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.

³ En principe, ce sont les LS qui sont à la fois les plus élevés, les plus proches des antennes et de leurs azimuts.

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, le champ électromagnétique est nettement inférieur à la limite par élément rayonnant 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...).

5 Équipement 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 ainsi que les émetteurs de radio et télévision, c'est-à-dire de 87 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.

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.
- être en ordre d'étalonnage ou avoir été régulièrement vérifié par rapport à une référence étalonnée.
- pouvoir fournir la résultante $E_{rés}$ du champ électromagnétique calculée d'après la formule suivante :

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

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).

L'Annexe III détaille les équipements utilisés par l'ISSeP.

6 Méthode de mesure

La limite d'exposition 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.

6.1 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 – ou 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).

Si, comme mentionné dans le document IEC 62232, la présence de l'opérateur peut influencer la valeur de la mesure, elle est indispensable pour pouvoir moyenné le champ sur la surface définie dans le paragraphe précédent. Elle n'est d'ailleurs pas incongrue puisque les mesures sont censées être effectuées dans des lieux de séjour.

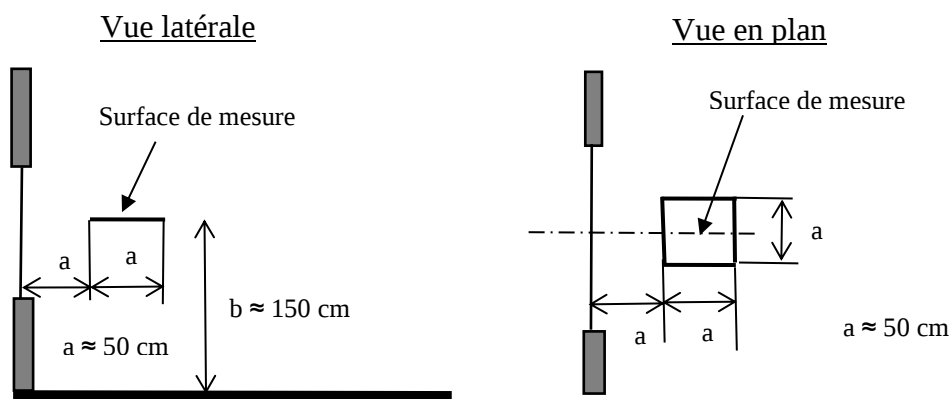


Figure 1 : Surface de mesure dans un local avec une fenêtre orientée vers l'installation.

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.

6.2 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 $<###$, indiquant que le champ à l'intérieur du LS produit par l'élément rayonnant en question est inférieur ou égal à une certaine valeur, ce qui signifie qu'en pratique, la valeur du champ 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 2). 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.

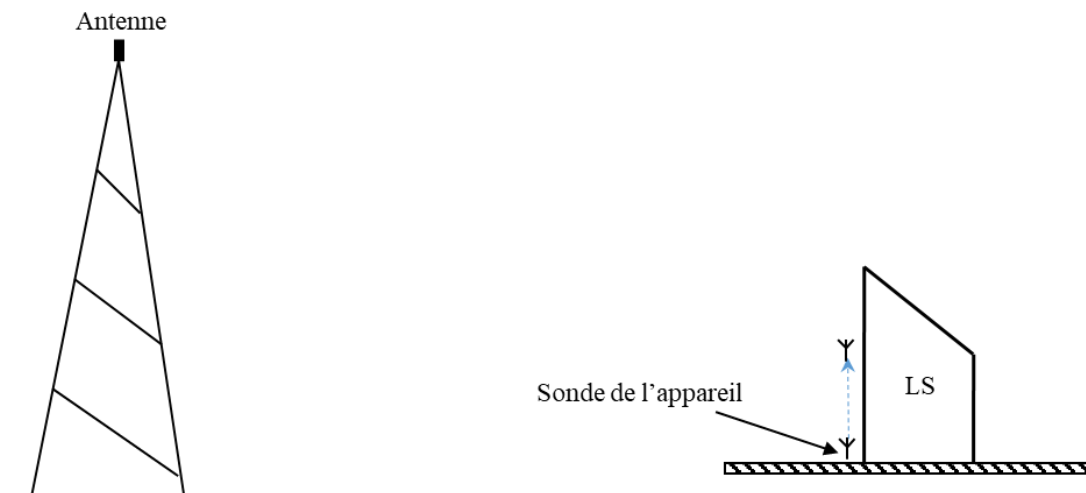
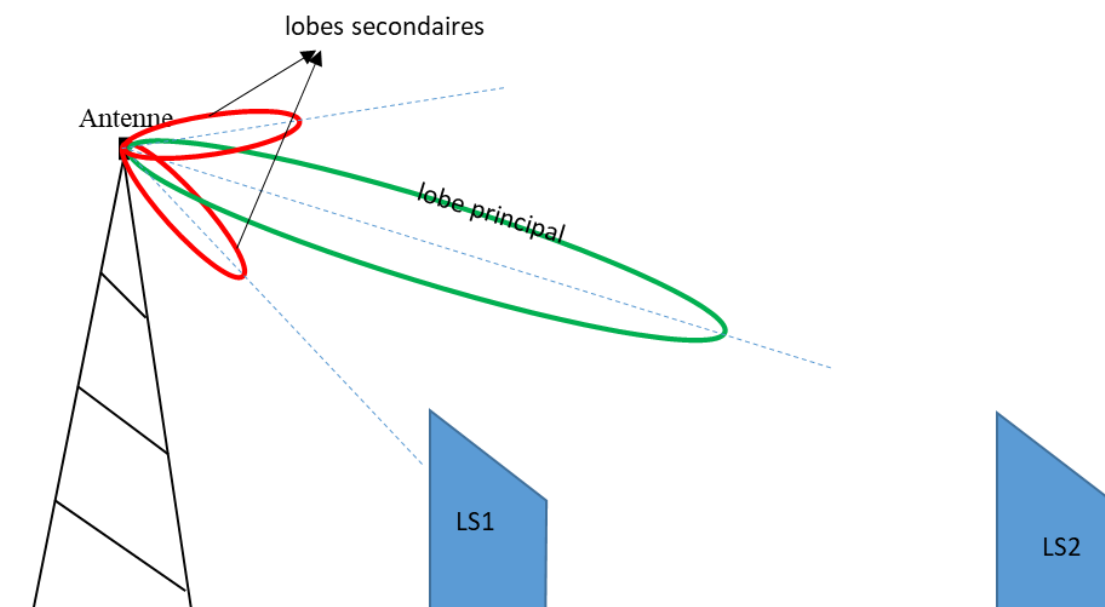


Figure 2 : Détermination du champ au moyen d'un mât télescopique

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.

6.2.1 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 3), le champ dans le LS peut être déduit du champ en un point de mesure éloigné du LS de la manière suivante :



**Figure 3 : Lobe principal et lobes secondaires de l'antenne émettrice.
Exposition des LS en fonction de leur localisation.**

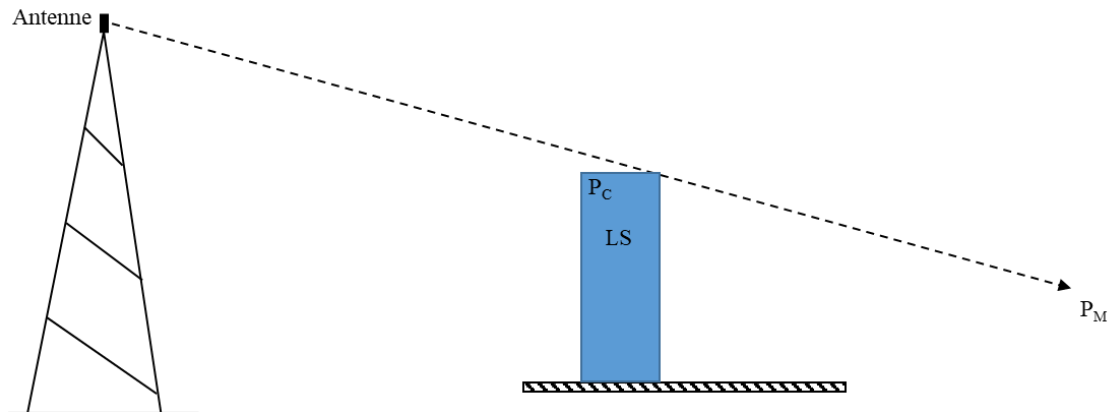


Figure 4 : Principe de la détermination du champ à l'intérieur d'un bâtiment à partir d'une mesure en un lieu accessible (LS exposé au lobe principal)

Dans un tel cas, illustré par la figure 4, 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 :

$$(3) \quad E_{P_C} = E_{P_M} \times \frac{D(A; P_M)}{D(A; P_C)}$$

avec :

- 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 :

$$(4) \quad Cor_{distance}(dB) = 20 \log_{10} \left(\frac{D(A; P_M)}{D(A; P_C)} \right)$$

Remarquons, qu'en vertu des propriétés des triangles semblables, les distances horizontales entre A et P_M et entre A et P_C peuvent également être utilisées.

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

6.2.2 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 5).

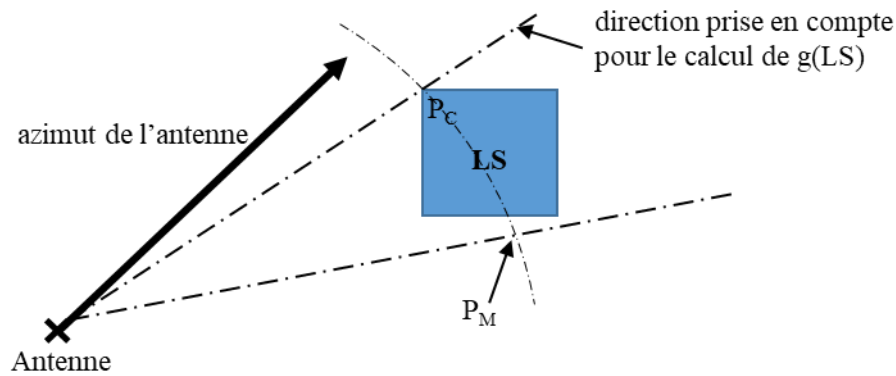


Figure 5 : Correction d'azimut (vue en plan)

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 :

$$(5) \quad Cor_{azimut}(dB) = g_h(LS) - g_h(P_M)$$

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 :

$$(6) \quad E_{P_C} = E_{P_M} \times 10^{Cor_{azimut}/20}$$

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

6.2.3 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 6.

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

$$(7) \quad Cor_{élévation}(dB) = g_v(LS) - g_v(P_M)$$

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.

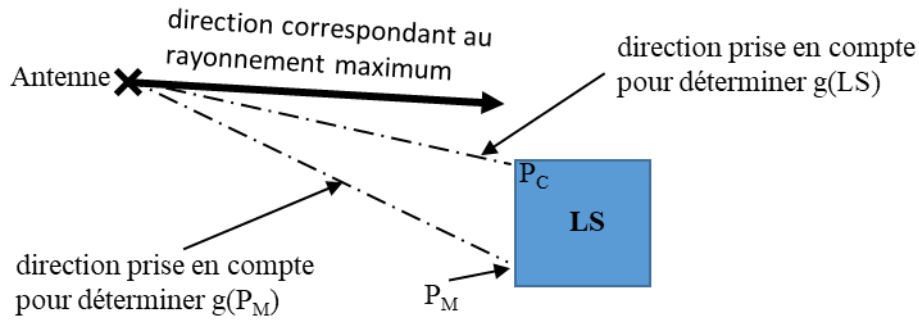


Figure 6 : Correction d'élévation (vue en élévation)

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

$$(8) \quad E_{P_C} = E_{P_M} \times 10^{\frac{Cor_{élévation}}{20}}$$

Notons qu'étant donné le caractère particulièrement variable du diagramme de rayonnement dans le plan vertical, cette correction ne s'applique que lorsque aucune autre possibilité d'évaluer le champ dans le LS n'est possible.

6.2.4 Prise en compte des obstacles

Le champ E_{P_C} obtenu par les relations (3), (6) et (8) 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 identification⁴ 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 :

$$(9) \quad E_{int} = E_{ext} \times 10^{-\frac{Att}{20}}$$

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

6.2.5 Bilan de l'ensemble des corrections

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

$$(10) \quad Cor_{totale}(dB) = Cor_{distance} - Att + Cor_{azimut} + Cor_{élévation}$$

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

$$(11) \quad E_{LS} \leq E_{P_M} \times 10^{Cor_{totale}/20}$$

⁴ De l'extérieur, seule la couche externe est visuellement identifiable.

Il convient d'être attentif au signe des diverses corrections dans l'expression (10) puisqu'elles peuvent être positives ou négatives. L'inégalité (11) 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. Dans le cas où ces diagrammes de rayonnement diffèrent, il faut introduire une correction supplémentaire due à cette différence.

7 Evaluation du champ électromagnétique

7.1 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 les éléments rayonnants de l'installation.

Les résultats de ces détections sont consolidés dans le tableau « **Informations enregistrées lors du contrôle** » du rapport de réception et de contrôle.

7.2 Détermination du champ maximum produit par un élément rayonnement

L'intensité du rayonnement électromagnétique généré par une antenne présente des variations importantes dans l'espace, en raison des divers phénomènes (réflexion, diffraction...) qui affectent la propagation des ondes.

Pour les réseaux de communication mobile, il y a également des variations importantes dans le temps, puisqu'une antenne ajuste sa puissance d'émission⁵ 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.

7.2.1 Réseau TETRA

A partir de la mesure du champ à la fréquence du canal de contrôle (fréquence du MCCH⁶), le champ maximal dû aux différentes porteuses émises est déduit de la formule :

$$(12) \quad E_{max} = E_{MCCH} \times \sqrt{nP}$$

avec :

- E_{max} : maximum du champ généré par l'installation au point de mesure ;
- E_{MCCH} : mesure du champ à la fréquence de contrôle au point de mesure ;
- nP : nombre de porteuses.

⁵ Dans le cadre du déploiement de la 5G, les antennes avec *beamforming* offrent la possibilité d'un "power control", c'est-à-dire la possibilité d'automatiquement limiter sa puissance d'émission afin de ne pas dépasser un certain seuil d'exposition.

⁶ MCCH est l'abréviation de « *Multidestination Control Channel* ».

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.

7.2.2 Réseau 2G (GSM et DCS 1800)

La fréquence du canal de contrôle est dans ce cas celle du BCCH. Le champ maximal dû aux différentes 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 ;
- 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.

7.2.3 Réseau 3G (UMTS)

Le champ maximum est extrapolé à partir de la mesure du champ du canal commun P-CPICH 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.

7.2.4 Réseau 4G (LTE)

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

$$(15) \quad E_{max} = E_{RS_{max}} \times \sqrt{K_{BW}}$$

avec :

- E_{max} : maximum du champ généré par un élément rayonnant au point de mesure ;
- RS_{max} : signal RS de l'élément rayonnant qui produit le champ maximum

$$(16) \quad E_{RS_{max}} = \max (E_{RS_1}, E_{RS_2}, \dots, E_{RS_n})$$

avec :

- n : le nombre d'éléments rayonnants de l'antenne MIMO
- K_{BW} : facteur dépendant de la largeur de bande (BW) utilisée. Les différentes valeurs possibles de K_{BW} sont données dans le tableau 1.

Tableau 1 : Valeur de K_{BW} 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

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

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.

$$(17) \quad E_{max} = E_{max4G} \times \sqrt{C_{\Delta P}}$$

avec :

- E_{max} : maximum du champ généré par un élément rayonnant au point de mesure ;
- E_{max4G} : maximum du champ obtenu selon l'équation (15) 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.

7.2.6 Réseau 5G NR – Antennes passives

Pour les antennes passives⁷ et dédiées uniquement à la 5G NR, le champ maximum est déduit de la formule :

$$(18) \quad E_{max} = E_{SSS_{max}} \times \sqrt{K_{BW}} \times \sqrt{C_{\Delta BT}} \times \sqrt{K_{TDD}}$$

avec :

- E_{max} : maximum du champ généré par un élément rayonnant au point de mesure ;
- SSS_{max} : signal SSS de l'élément rayonnant qui produit le champ maximum ;
- $C_{\Delta BT}$: 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 2.
- Le facteur K_{TDD} permet de tenir compte d'un éventuel duplexage temporel ou TDD, il est donné par la formule (19).

⁷ Les antennes passives émettent les signaux de *broadcast* et de *traffic* avec les mêmes patterns.

Tableau 2 : Valeurs de K_{BW} en fonction de la largeur de bande du signal et du Subcarrier Spacing.

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

Si TDD est utilisé en lieu et place du duplexage fréquentiel (FDD), il faut corriger le E_{max} pour tenir compte du fait que l'antenne n'émet pas en permanence. Ce facteur de correction est donné par la formule :

$$(19) \quad K_{TDD} = \frac{t_{downlink}}{t_{frame}}$$

avec :

- K_{TDD} : facteur de correction du au TDD ;
- $t_{downlink}$: temps alloué à la liaison descendante (*downlink*) par trame;
- t_{frame} : durée d'une trame (10 ms).

Dans le cas du FDD, le facteur K_{TDD} est égal à 1.

7.2.7 Réseau 5G NR – Antennes actives

Pour les antennes actives, émettant habituellement dans la bande de fréquence 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 7.

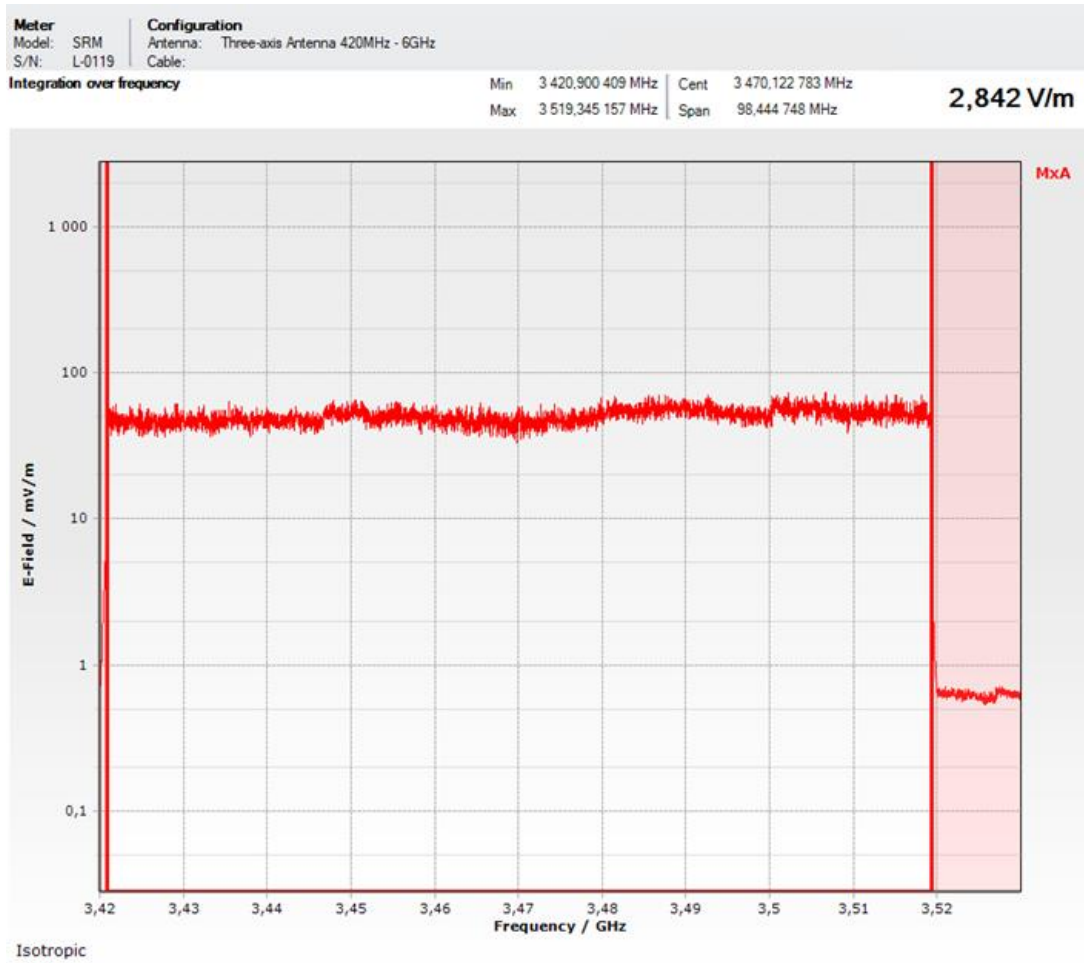


Figure 7 : Spectre obtenu pendant l'échange de trafic vers l'équipement de mesure. La valeur en gras dans le coin supérieur droit est le résultat de l'intégration du spectre délimité par les deux lignes verticales.

Pour tenir compte des fluctuations inhérentes au spectre, la valeur retenue est la valeur intégrée du spectre augmentée de deux écarts-types. Cette valeur est ensuite corrigée pour tenir compte du fait qu'un spectre ne permet ni de discriminer les antennes émettrices ni de discriminer les éléments rayonnants. La valeur retenue pour la vérification du respect de la limite est donc calculée par:

$$(20) \quad E_{max} = \left(E_{Int} + 2\sigma \sqrt{\frac{BW}{ScS}} \right) \times \frac{Max(SSS_{max})}{Total_{SSS}} \times \frac{1}{\sqrt{n}}$$

avec :

- E_{max} : maximum du champ généré par l'installation 5G au point de mesure;
- E_{Int} : valeur de l'intégration du spectre;
- σ : écart-type de l'ensemble des valeurs individuelles constituant le spectre;
- BW : largeur de bande (BW) utilisée;
- ScS : largeur de sous-porteuse;

- $Max(SSS_{max})$: le maximum des valeurs maximales de SSS décodées parmi celles appartenant au site faisant l'objet du contrôle (identifiées à partir de leur identification de cellule⁸);
- $Total_{SSS}$: Somme quadratique de tous les SSS enregistrés;
- n : nombre d'éléments rayonnants identifiés dans l'Arrêté.

⁸ Cell ID, identification fournie par l'opérateur.

Annexe I - Symboles et abréviations utilisés

Les symboles et abréviations utilisés dans ce document sont repris dans le tableau ci-dessous.

<u>Abréviation</u>	<u>Description</u>
BCCH	Broadcast Control Channel
BW	BandWidth ou largeur de bande
COR _{azimut}	la correction d'azimut (en dB) prend en compte le fait que le gain de l'antenne, dans la direction du lieu accessible pour la mesure, peut différer sensiblement du gain dans la direction du LS
COR _{distance}	la correction de distance (en dB) prend en compte le fait que le lieu accessible pour la mesure ne coïncide pas avec le LS
COR _{élévation}	la correction d'élévation (en dB) prend en compte le fait que le gain de l'antenne, dans la direction du lieu accessible pour la mesure, peut différer sensiblement du gain dans la direction du LS situé plus haut ou plus bas
COR _{obstacle}	la correction d'obstacle (en dB) prend en compte l'atténuation due aux obstacles entre les antennes et le LS
COR _{totale}	somme (en dB) des 4 corrections précédentes
DSS	Dynamic Spectrum Sharing
E _{BCCH}	champ (en V/m) à la fréquence du canal de contrôle (technologie 2G ou GSM 900 et DCS 1800)
E _{CPICH}	champ (en V/m) du canal commun CPICH (technologie 3G ou UMTS)
E _{LS}	champ (en V/m) à l'intérieur du LS
E _{max}	champ maximum par élément rayonnant (en V/m) extrapolé à partir de la mesure du champ d'un signal de contrôle. Ce signal de contrôle et la formule d'extrapolation varient en fonction de la technologie utilisée
E _{MCCH}	champ (en V/m) à la fréquence du canal de contrôle (technologie TETRA)
E _{res}	champ (en V/m) résultant de la mesure des champs suivant 3 axes orthogonaux
E _{RS}	champ (en V/m) du signal de référence (technologie 4G ou LTE)
E _{SSS}	champ (en V/m) du signal de synchronisation secondaire (technologie 5G NR)
FDD	Frequency Division Duplex
LS	lieux de séjour
MIMO	Multiple Input Multiple Output
nP	nombre de porteuses (2G ou GSM 900, DCS 1800 et TETRA)
P-CPICH	Primary Common Pilot Channel
PIRE	puissance isotrope rayonnée équivalente (en W)
PM	point où le champ est maximum le long d'un TM
RS	Reference Signal
ScS	Subcarrier Spacing
TDD	Time Division Duplex

Annexe II - 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 :

$$(21) \quad E_D = E_{P_M} \times \frac{AP_M}{AD}$$

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 .

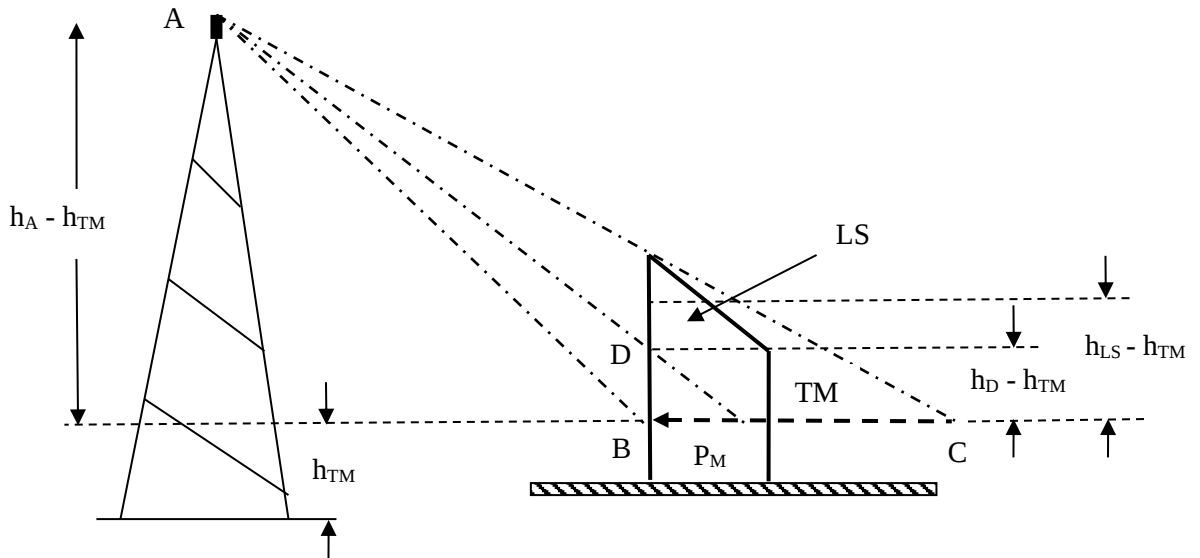


Figure 8 : Principe de la détermination du champ à l'intérieur d'un bâtiment à partir d'une mesure à l'extérieur (LS exposé aux lobes secondaires)

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

$$(22) \quad E_D = E_{P_m} \times \frac{h_A - h_{TM}}{(h_A - h_{TM}) - (h_D - h_{TM})}$$

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 :

$$(23) \quad E_{LS} \leq E_{PM} \times \frac{h_A - h_{TM}}{(h_A - h_{TM}) - (h_{LS} - h_{TM})}$$

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 (23) peut être mise sous la forme :

$$(24) \quad E_{LS} \leq E_{PM} \times \frac{1}{1 - \frac{(h_{LS} - h_{TM})}{(h_A - h_{TM})}}$$

La relation (24) 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

$$(25) \quad \frac{1}{1 - \frac{(h_{LS} - h_{TM})}{(h_A - h_{TM})}}$$

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

$$(26) \quad Cor_{distance}(dB) = 20 \log_{10} \left(\frac{1}{1 - \frac{(h_{LS} - h_{TM})}{(h_A - h_{TM})}} \right)$$

L'expression (26) 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.

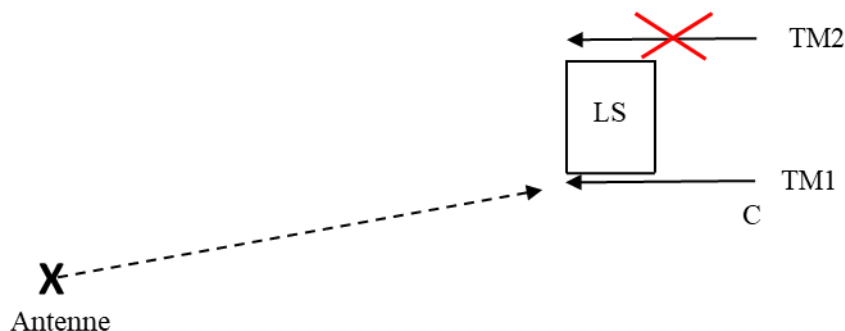


Figure 9 : Conditions de validité d'une détermination du champ à l'intérieur d'un bâtiment à partir d'une mesure à l'extérieur

La figure 9 et la suivante (vues en plan) correspondent à des cas où la méthode est applicable. Dans celui de la figure 9 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 10, 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.

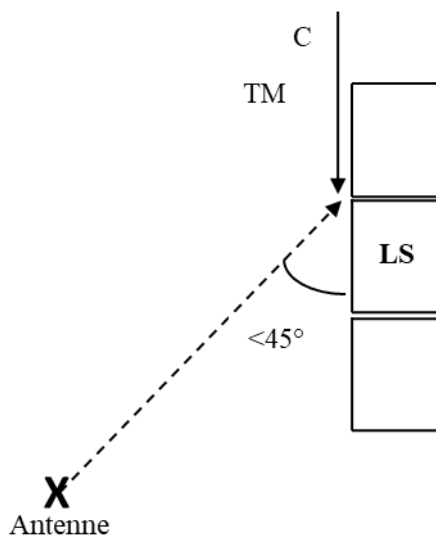


Figure 10 : Conditions de validité d'une détermination du champ à l'intérieur d'un bâtiment à partir d'une mesure à l'extérieur

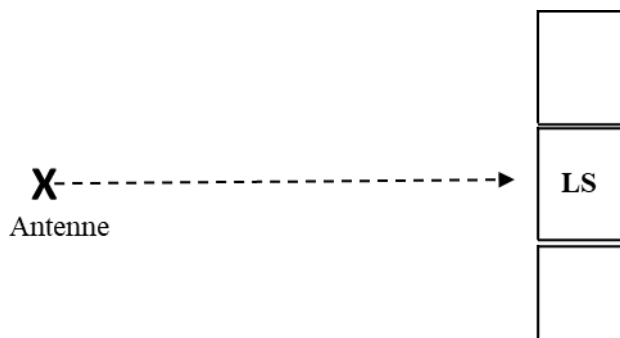


Figure 11 : Cas où la détermination du champ à l'intérieur d'un bâtiment à partir d'une mesure à l'extérieur est impossible

La figure 11 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 I-1 est inaccessible.

Comme précisé ci-dessus, la méthode décrite à la figure 8 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 III - Equipements utilisés par l'ISSEP

L'ISSEP utilise des analyseurs de spectre NARDA SRM⁹-3006 couvrant la bande de fréquences comprise entre 9 kHz et 6 GHz. Pour couvrir la bande de fréquence nécessaire définie au chapitre 5, 2 sondes sont disponibles :

- une sonde triaxiale (« Three-Axis-Antenna, E Field ») NARDA de type P/N 3501/03 couvrant la bande comprise entre 27 et 3 000 MHz.
- 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.

Le mesureur de champ NARDA - SRM 3006 fournit directement la résultante du champ électromagnétique calculée d'après la formule (2). Il incorpore 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.

⁹ SRM est l'abréviation de « *Selective Radiation Meter* ».