



30.06.2020

Explications concernant la méthode de mesure du rayonnement des antennes adaptatives

L'Institut fédéral de métrologie (METAS) a élaboré une méthode de mesure pour le rayonnement des stations de bases 5G et les antennes adaptatives jusqu'à 6 GHz qui a été publiée le 18 février 2020¹.

Suite à la publication de ce rapport, plusieurs cantons ont exprimé un besoin d'explications supplémentaires concernant son contenu technique auprès de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV). Pour donner suite à cette demande, le présent document synthétise la méthode de mesure du rayonnement des antennes adaptatives présentée par le METAS.

1 Généralités sur la mesure de réception

Les installations de téléphonie mobile doivent respecter la valeur limite de l'installation (VLinst) de l'ordonnance sur la protection contre le rayonnement non ionisant (ORNI), y compris lorsqu'elles sont au maximum de la puissance d'émission et lors d'un transfert maximal de conversations et de données. Ce mode est appelé mode d'exploitation déterminant et est plutôt rarement appliqué. De plus, il est difficile d'enclencher, de manière ciblée, ce mode d'exploitation durant la mesure. C'est pourquoi la mesure de réception est en général effectuée dans le mode d'exploitation effectif de l'installation. En raison de leur émission périodique et leur puissance constante, les canaux de signalisation sont les plus adaptés pour cette mesure. La valeur mesurée est ensuite extrapolée au mode d'exploitation déterminant (valeur d'appréciation) pour juger le respect de la VLinst.

En principe cette méthode est aussi applicable pour les antennes adaptatives, mais contrairement à la 4G où les canaux de données et les canaux de signalisation possèdent le même diagramme de rayonnement, la structure de signal de la 5G est optimisée et ces canaux sont émis selon différents diagrammes d'antenne. De plus, les divers champs d'applications de la 5G nécessitent un grand degré de flexibilité et d'adaptativité. En particulier dans les bandes de fréquences hautes, où les conditions de propagation sont plus difficiles, le rayonnement est concentré dans un faisceau fin afin d'atteindre un gain d'antenne nettement plus important. Cette technique de traitement de signal dénommée « beamforming ou formation de faisceaux » permet de former des faisceaux orientés en direction des utilisateurs. On distingue entre deux types de faisceaux qui ont chacun un diagramme d'antenne différent :

- Faisceaux de signalisation qui contiennent les informations systèmes de la cellule radio et permettent l'identification de cette dernière et sa synchronisation avec les utilisateurs dans la zone desservie.
- Faisceaux de trafic qui permettent la transmission des données utiles entre la station de base et l'utilisateur.

En raison des différents diagrammes d'antenne, avec la 5G, le facteur d'extrapolation reliant les canaux de signalisation et ceux du trafic n'est plus identique pour toutes les directions comme c'était le cas pour la 4G. La différence entre les diagrammes d'antennes adaptatives et conventionnelles est illustré dans l'exemple de la Figure 1.

¹ Rapport technique: Méthode de mesure des stations de base 5G NR jusqu'à 6 GHz (2020) : https://www.metas.ch/dam/metas/de/data/dokumentation/rechtliches/nisv/Nr_measurement_methods_2_1_fr.pdf



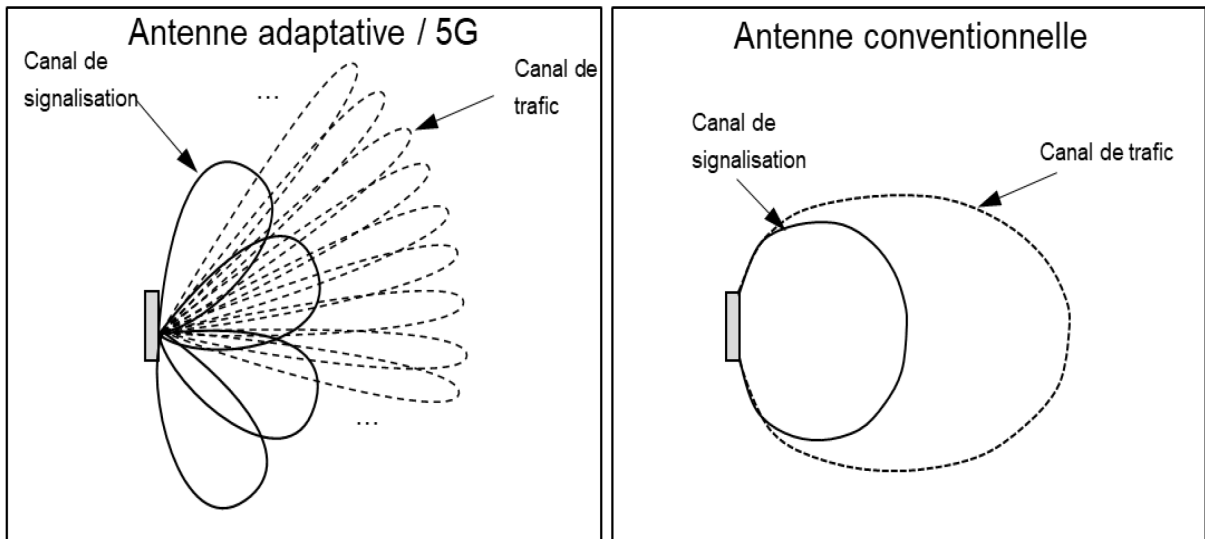


Figure 1: Diagramme d'antenne: 5G vs 4G (Source : Rapport technique: Méthode de mesure des stations de base 5G New radio (NR) jusqu'à 6 GHz, METAS, 2020). Représentation schématique (vue de dessus) du diagramme de rayonnement horizontal d'une cellule d'une station de base NR (à gauche) et d'une station de base conventionnelle (à droite). Il convient de noter que les exemples de diagrammes d'antenne illustrés ci-dessus correspondent à deux différentes puissances d'émission et ne sont pas normalisés à 0 dB. En effet, ces diagrammes illustrent la puissance d'émission pour une direction d'émission donnée. Dans le cas d'une antenne conventionnelle, la forme et l'atténuation directionnelle du canal de signalisation sont identiques à celles du canal de trafic. Cependant, dans le cas d'une antenne adaptative, les canaux de signalisation et les canaux de trafic sont émis suivant différents diagrammes de rayonnement ainsi qu'avec différentes puissances d'émission.

2 Méthode de mesure du rayonnement des stations de bases 5G et les antennes adaptatives

La méthode de mesure développée par le METAS couvre les thèmes suivants :

- l'interface radioélectrique et les signaux choisis pour la mesure ;
- la mesure à sélection de code ;
- la mesure à sélection de fréquence.

2.1 Mesurande

Pour la mesure de réception ce sont les signaux de références qui ont été sélectionnés. Ceux-ci sont transmis par les faisceaux de signalisation. Chaque canal descendant de diffusion physique « Physical Broadcast Channel » (PBCH) est composé de plusieurs signaux physiques qui sont émis périodiquement. En raison de la précision requise, le signal de synchronisation secondaire « Secondary Synchronization Signal » (SSS) a été choisi pour la mesure de l'intensité du champ électrique. Ce signal occupe une largeur de bande de 1,905 MHz ou 3,810 MHz (127 éléments de ressource), en fonction de l'espacement des sous-porteuses. Pour la 5G, les espacements de 15 kHz, 30 kHz et 60 kHz sont possibles. Un élément de ressource correspond à la plus petite unité qui peut être attribuée à un signal physique. Il correspond à un symbole OFDM (Multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence) dans l'axe temporel et à une sous-porteuse dans l'axe fréquentielle.

2.2 La mesure à sélection de code

2.2.1 Détermination de la valeur d'appréciation pour une cellule i

La valeur obtenue « $E_{i,max}^{SSS(RE)}$ » correspondant au maximum spatial de l'intensité de champ électrique par élément de ressource pour une cellule New Radio (NR) de numéro i . $E_{i,max}^{SSS(RE)}$ est ultérieurement extrapolée à la valeur d'appréciation « $E_{i,h}$ » en la multipliant par un facteur global d'extrapolation « $K_i(\varphi_i, \theta_i)$ » pour une cellule i :

$$E_{i,h} = E_{i,max}^{SSS(RE)} \cdot K_i(\varphi_i, \theta_i)$$

Par rapport aux technologies de téléphonie mobile précédentes, ce facteur $K_i(\varphi_i, \theta_i)$ est plus complexe pour les antennes adaptatives. Il représente une série d'éléments qui reproduisent les aspects de la dynamique des antennes adaptatives comme suit :

$$K_i(\varphi_i, \theta_i) = K_i^{SSS(RE)} \cdot K_i^{antenna}(\varphi_i, \theta_i) \cdot K_i^{stat} \cdot K^{duplex}$$

- $K_i^{SSS(RE)}$: facteur d'extrapolation pour le rapport entre la puissance émettrice (ERP) actuelle $P_i^{SSS(RE)}$ et la puissance émettrice (ERP) admise $P_{i,admise}$:

$$K_i^{SSS(RE)} = \sqrt{\frac{P_{i,admise}}{P_i^{SSS(RE)}}}$$

- $K_i^{antenna}(\varphi_i, \theta_i)$: facteur de correction d'antenne qui prend en compte que les canaux de signalisation et les canaux de données sont séparés et qu'ils ne disposent pas du même diagramme d'antenne. Il considère la différence entre le diagramme d'antenne du signal SSS du PBCH et le diagramme d'antenne enveloppant² du signal total (signalisation et données utiles) dans la condition d'exploitation maximal admise. Ce facteur est fixé selon l'angle entre la direction principale de l'antenne et le lieu de la mesure (l'azimut φ_i et l'élévation θ_i). Donc, ce facteur varie en fonction du lieu de mesure. De plus, il dépend du type et de l'orientation de l'antenne et doit être indiqué dans un fichier pour les différentes positions. La détermination du facteur $K_i^{antenna}(\varphi_i, \theta_i)$ est expliquée en détail dans le chapitre 2.2.2.
- K_i^{stat} : facteur statistique qui prend en compte la variabilité des antennes adaptatives selon l'annexe 1, chiffre 63, ORNI. Tant que les antennes sont traitées selon le scénario du pire des cas, la valeur de K_i^{stat} est égale à 1 et ce facteur reste sans effet. Cela restera ainsi jusqu'à la publication de l'aide à l'exécution pour les antennes adaptatives.
- K^{duplex} : facteur du duplexage. Ce facteur peut être utilisé quand les deux sens de transmission, sens descendant (antenne -> utilisateur, en anglais downlink) et sens montant (utilisateur -> antenne, en anglais uplink) fonctionnent dans la même bande passante mais de façon alternée (mode TDD - Time Domain Duplex). Dans ce mode, la liaison descendante et la liaison ascendante ne peuvent pas exister simultanément³.

2.2.2 Détermination du facteur $K_i^{antenna}(\varphi_i, \theta_i)$

Le facteur $K_i^{antenna}(\varphi_i, \theta_i)$ dépend de l'atténuation directionnelle par rapport à la direction principale de propagation. Il dépend notamment de l'atténuation directionnelle du signal de signalisation ($A_i^{SSS(RE)}(\varphi_i, \theta_i)$) et de celle du signal total ($A_i^{total}(\varphi_i, \theta_i)$). Selon le lieu de mesure, la valeur d'atténuation directionnelle du SSS et celle du signal de trafic peuvent être différentes. Le facteur $K_i^{antenna}(\varphi_i, \theta_i)$ est introduit pour corriger cette différence et déterminer correctement la valeur d'appréciation. Il convient de noter les remarques suivantes :

- Pour miser sur la sécurité, $K_i^{antenna}(\varphi_i, \theta_i)$ n'est supérieur à 1 que si l'atténuation directionnelle du signal de signalisation est supérieur à celle du signal total. Afin de définir une fourchette de valeurs réaliste pour cette approche, le facteur de correction d'antenne est limité par $K_{i,max}^{antenna}(\varphi_i, \theta_i)$. Celui-ci correspond au maximum parmi toutes les directions pour lesquelles le SSS est suffisamment fort et donc que l'atténuation directionnelle $A_i^{SSS(RE)}(\varphi_i, \theta_i)$ est inférieure à 10 (20 dB).
- Pour l'estimation du facteur d'antenne $K_i^{antenna}(\varphi_i, \theta_i)$ on distingue entre trois cas, illustrés à la Figure 2 et à la Figure 3.

² Le diagramme d'antenne enveloppant correspond au mode d'exploitation déterminant. Les canaux de signalisation ne contribuent que de manière marginale au signal total et donc l'enveloppe des canaux de trafic peut être considérée comme le diagramme d'antenne enveloppant correspondant au mode d'exploitation déterminant.

³ Dans les générations de téléphonie mobile précédentes, la liaison descendante et la liaison montante s'effectuent sur des fréquences différentes (duplexage fréquentiel FDD). La 5G applique le mode FDD dans les fréquences basses et le mode TDD dans les fréquences hautes.

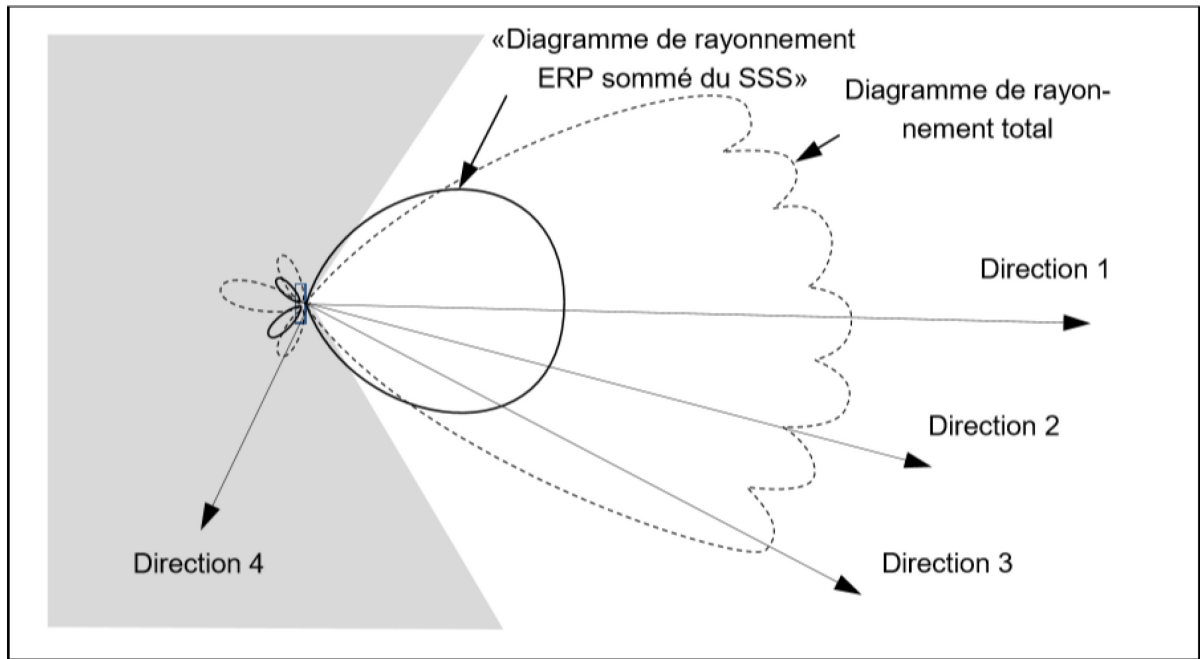


Figure 2 : Représentation schématique (vue de dessus) du diagramme de rayonnement horizontal d'une cellule d'une station de base NR. Il convient de noter que le diagramme d'antenne illustré ci-dessus n'est pas normalisé à 0 dB mais il s'agit de la puissance d'émission dans une direction donnée. (Source : Rapport technique: Méthode de mesure des stations de base 5G NR jusqu'à 6 GHz, METAS, 2020)

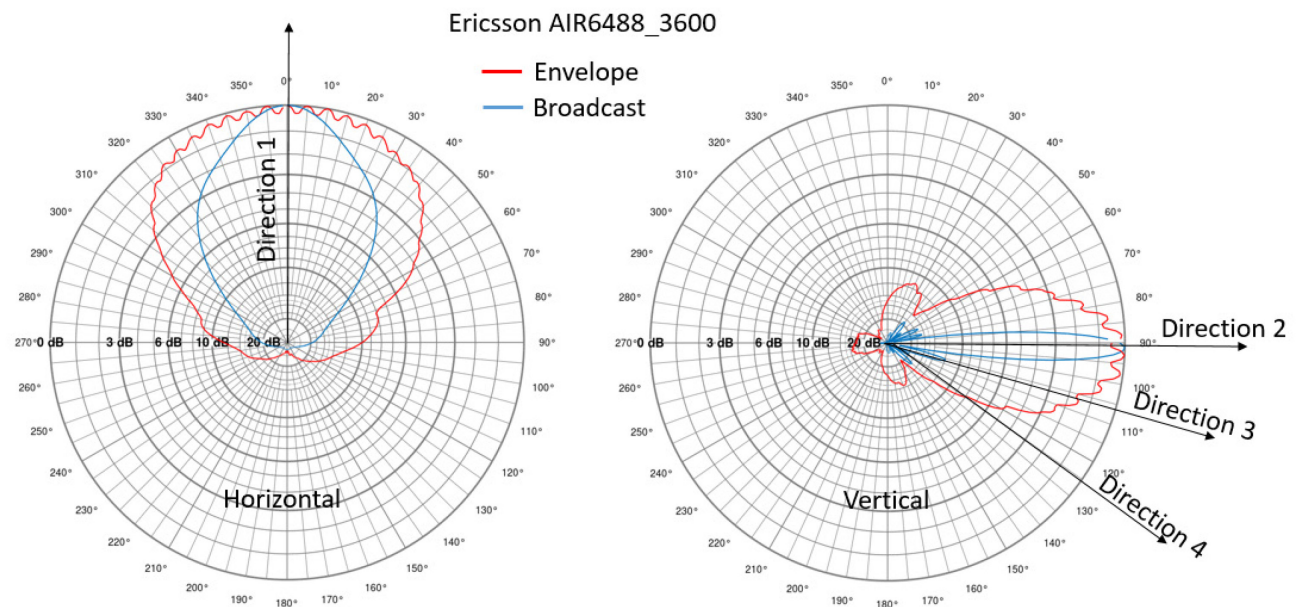


Figure 3: Diagrammes d'antenne Ericsson AIR6488_3600 avec le diagramme de signalisation (en bleu, Broadcast) et le diagramme total (en rouge, Envelope) normalisés à 0 dB.

a) Direction 1/Direction 2

L'atténuation du canal de signalisation (SSS du PBCH) $A_i^{SSS(RE)}(\varphi_i, \theta_i)$ est inférieure à 10 (20 db) et inférieure (direction 2) ou égale (direction 1) à celle du canal de trafic $A_i^{total}(\varphi_i, \theta_i)$. Dans ces directions, le facteur d'extrapolation $K_i^{antenna}(\varphi_i, \theta_i)$ n'est pas appliqué et prend la valeur 1 (0 db) :

$$K_i^{antenna}(\varphi_i, \theta_i) = 1$$

b) Direction 3

L'atténuation directionnelle du canal de signalisation $A_i^{SSS(RE)}(\varphi_i, \theta_i)$ est inférieure à 10 (20 db) et supérieure à celle du canal de trafic $A_i^{total}(\varphi_i, \theta_i)$. Dans cette direction, le facteur d'extrapolation $K_i^{antenna}(\varphi_i, \theta_i)$ s'applique et correspond au ratio de l'atténuation directionnelle du canal de signalisation sur l'atténuation directionnelle du canal de trafic. Ce facteur tient compte du fait que, dans cette direction, le faisceau SSS du PBCH est davantage atténué que le faisceau de trafic total :

$$K_i^{antenna}(\varphi_i, \theta_i) = A_i^{SSS(RE)}(\varphi_i, \theta_i) / A_i^{total}(\varphi_i, \theta_i)$$

c) Direction 4

L'atténuation directionnelle du canal de signalisation $A_i^{SSS(RE)}(\varphi_i, \theta_i)$ est supérieure ou égale à 10 (20 db). Tel est le cas lorsque le lieu de mesure considéré se trouve dans une zone où le diagramme de l'antenne émettrice n'est pas suffisamment déterminé et le rayonnement est nettement plus faible que dans la direction frontale. Considérant le degré de différence entre l'atténuation directionnelle du canal de signalisation et celle du canal de trafic dans cette zone, le facteur d'atténuation directionnelle $K_i^{antenna}(\varphi_i, \theta_i)$ peut atteindre des valeurs extrêmement élevées. Pour éviter cela, le facteur d'atténuation directionnelle $K_i^{antenna}(\varphi_i, \theta_i)$ est fixé à la valeur maximale du facteur de correction d'antenne $K_{i,max}^{antenna}(\varphi_i, \theta_i)$ qui peut être obtenue dans la direction frontale. Ce facteur correspond au maximum parmi toutes les directions pour lesquelles le faisceau du SSS est assez fort (atténuation directionnelle $A_i^{SSS(RE)}(\varphi_i, \theta_i)$ est inférieure à 10). Cette zone est représentée en blanc dans la figure 2 tandis que la zone dans laquelle cette condition n'est pas remplie est représentée en gris clair. Dans ce cas, les dispositions suivantes s'appliquent :

$$K_i^{antenna}(\varphi_i, \theta_i) = K_{i,max}^{antenna} = \max_{\{\varphi_i, \theta_i | A_i^{SSS(RE)}(\varphi_i, \theta_i) < 10\}} A_i^{SSS(RE)}(\varphi_i, \theta_i) / A_i^{total}(\varphi_i, \theta_i)$$

2.2.3 Détermination de la valeur d'appréciation pour l'ensemble de l'installation

Dès que le facteur global d'extrapolation pour une cellule i « $K_i(\varphi_i, \theta_i)$ » est obtenue, la valeur d'appréciation peut être calculé comme suit (voir Figure 4):

$$E_{i,h} = E_{i,max}^{SSS(RE)} \cdot K_i(\varphi_i, \theta_i)$$

Ensuite pour évaluer la conformité de l'installation, les valeurs déterminées de l'intensité du champ électrique pour chaque cellule i ($E_{i,h}$) de la station de base doivent être additionnées :

$$E_h = \sqrt{\sum_{i=1}^n E_{i,h}^2}$$

Dans le cas de l'existence de plusieurs opérateurs et des services de radiocommunication, la valeur d'appréciation est obtenue par l'addition des contributions $E_{Réseau k,h}$ de tous les réseaux appartenant à une même installation :

$$E_B = \sqrt{E_{Réseau 1,h}^2 + E_{Réseau 2,h}^2 + \dots}$$

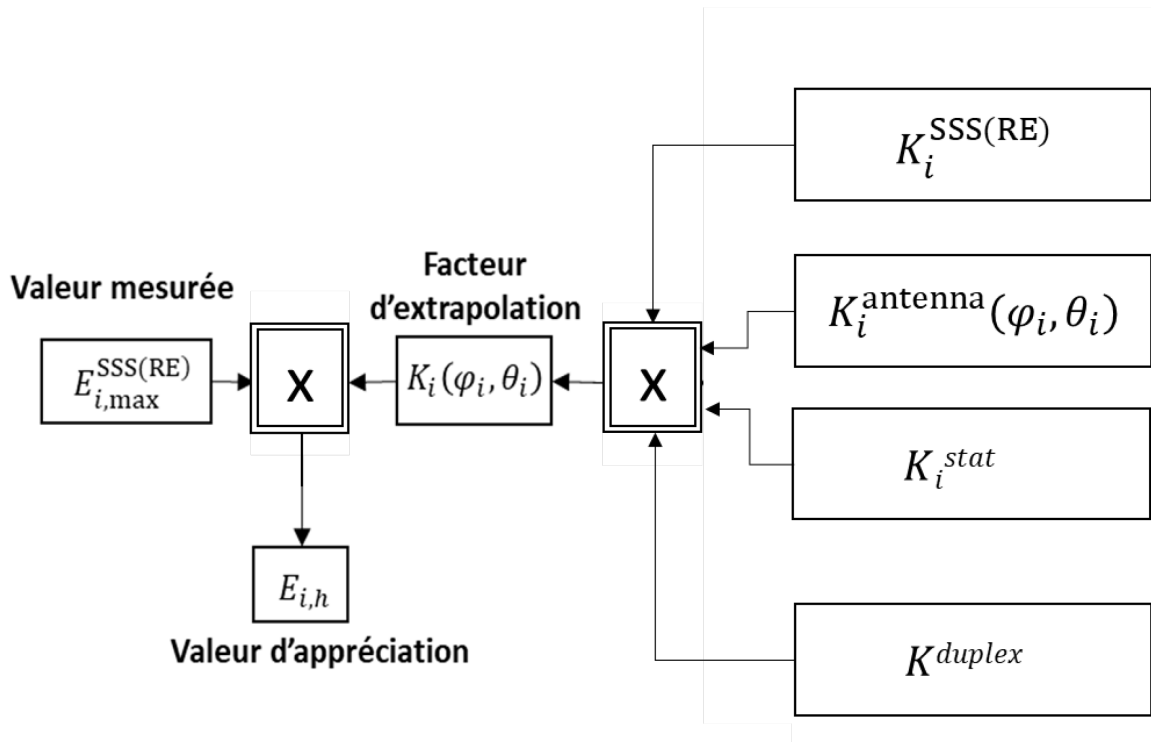


Figure 4: Ordinogramme de la méthode de mesure de réception pour une cellule i . La figure illustre schématiquement la procédure de détermination du facteur d'extrapolation et la multiplication de celui-ci avec la valeur mesurée pour obtenir la valeur d'appréciation.

2.3 La mesure à sélection de fréquence

2.3.1 Généralités sur la mesure à sélection de fréquence

En cas d'absence d'appareil de mesure à sélection de code, une mesure à sélection de fréquence peut être appliquée. Cette méthode surestime généralement l'intensité du champ électrique. Cette surestimation a les conséquences suivantes sur la preuve du respect de la valeur limite de l'installation (VLinst) de l'ORNI :

- Si la valeur d'appréciation ne dépasse pas la VLinst, le respect de cette dernière est démontré de façon fiable et aucune mesure supplémentaire n'est nécessaire.
- Si la valeur d'appréciation indique une valeur plus élevée que la VLinst, il est impossible d'établir définitivement que cela est effectivement le cas. Par conséquent, l'installation doit être adaptée de sorte à ce que le résultat de l'évaluation soit en dessous de la valeur limite de l'installation.

La mesure à sélection de fréquence s'appuie également sur la mesure du signal de synchronisation secondaire (SSS) et nécessite l'emploi d'un analyseur de spectre avec un détecteur de la valeur RMS. Il n'est pas possible de mesurer la valeur de $E_{i,max}^{SSS(RE)}$ directement au moyen d'un instrument de mesure à sélection de fréquence. La valeur mesurée $E_{i,max}^{mesurée}$ correspond au maximum spatial de tous les signaux de synchronisation contenus dans la bande du SSS. Pour obtenir la valeur de $E_{i,max}^{SSS(RE)}$, des facteurs supplémentaires doivent être appliqués.

2.3.2 La mesure à sélection de fréquence selon le rapport technique du 18 février 2020

Dans son rapport technique du 18 février 2020, METAS a proposé les facteurs suivants :

- Nombre de sous-porteuse : Le nombre de sous-porteuse dans la bande des signaux de synchronisation est de 127. La valeur mesurée $E_{i,max}^{mesurée}$ doit être multipliée par $\sqrt{\frac{1}{127}}$ pour obtenir l'intensité du champ électrique par élément de ressource.

- Nombre de faisceaux de signalisation : Le facteur FSM (méthode de mesure à sélection de fréquence) K_i^{FSM} est appliqué pour tenir compte du fait qu'il est impossible de mesurer le champ électrique produit individuellement par chaque faisceau. Ce facteur est activé à partir d'un nombre de faisceaux plus grand ou égale à 2 et correspond à $\sqrt{2}$.

La valeur $E_{i,\max}^{SSS(RE)}$ est donc obtenue en se basant sur la formule suivante :

$$E_{i,\max}^{SSS(RE)} \cong E_{i,\max}^{mesurée} \cdot \sqrt{\frac{1}{127}} \cdot K_i^{FSM}$$

Enfin, l'intensité extrapolée E_h est calculée par la formule suivante, qui tient compte du facteur d'extrapolation global $K_i(\phi_i, \theta_i)$ selon les explications dans le chapitre 2.2.1:

$$E_h \cong \left(E_{i,\max}^{mesurée} \cdot \sqrt{\frac{1}{127}} \cdot K_i^{FSM} \right) \cdot \max_{i=1..n}(K_i(\phi_i, \theta_i))$$

La valeur d'appréciation E_B s'obtient en faisant la somme des contributions de tous les opérateurs de réseau et/ou de tous les services, comme indiqué au chapitre 2.2.3.

Les premières utilisations ont révélé que la méthode de mesure à sélection de fréquence présentée ci-dessus pourrait entraîner une surestimation considérable de la valeur de l'intensité du champ électrique. Ceci est lié principalement aux facteurs suivants :

- Cette méthode ne permet pas de distinguer entre les différentes cellules contribuant au rayonnement mesuré. Pour cette raison, le rapport technique du METAS du 18 février 2020 impose la prise en compte du facteur d'extrapolation global maximal de l'installation $\max_{i=1..n}(K_i(\phi_i, \theta_i))$ même si ce dernier n'appartient pas forcément à la cellule principale.
- Pour certaines antennes, le facteur de correction $K_i(\phi_i, \theta_i)$ dépend fortement de l'azimut et l'inclinaison de l'antenne (jusqu'à un facteur de 10).

2.3.3 La mesure à sélection de fréquence selon le rapport technique du 15 juin 2020

Pour éviter les surestimations liées à cette méthode, le METAS a introduit à cette approche les adaptations suivantes⁴ :

1. Adaptation du facteur d'extrapolation :

Le facteur d'extrapolation global maximal $\max_{i=1..n}(K_i(\phi_i, \theta_i))$ dans la formule pour déterminer l'intensité extrapolée E_h est remplacé par $K_i^R(\phi_i, \theta_i)$. Ce dernier permet de ne prendre en compte que les cellules qui contribuent considérablement au rayonnement.

Pour déterminer $K_i^R(\phi_i, \theta_i)$, il faut distinguer entre les cas suivants :

- Pour des mesures dans la zone d'émission principale d'une cellule i_1 , $K_i^R(\phi_i, \theta_i)$ correspond à $K_{i_1}(\phi_i, \theta_i)$
- Pour des mesures dans la zone d'émission principale d'une cellule i_2 , $K_i^R(\phi_i, \theta_i)$ correspond à $K_{i_2}(\phi_i, \theta_i)$
- Pour des mesures dans la zone intermédiaire entre les cellules i_1 et i_2 , $K_i^R(\phi_i, \theta_i)$ correspond à $\max_{i_1, i_2}(K_{i_1}(\phi_i, \theta_i), K_{i_2}(\phi_i, \theta_i))$

Les trois zones d'émission correspondantes à deux cellules i_1 et i_2 sont illustrées sur la Figure 5.

⁴ <https://www.metas.ch/metas/fr/home/dok/rechtliches/messempfehlung-nisv.html> > Rapports techniques

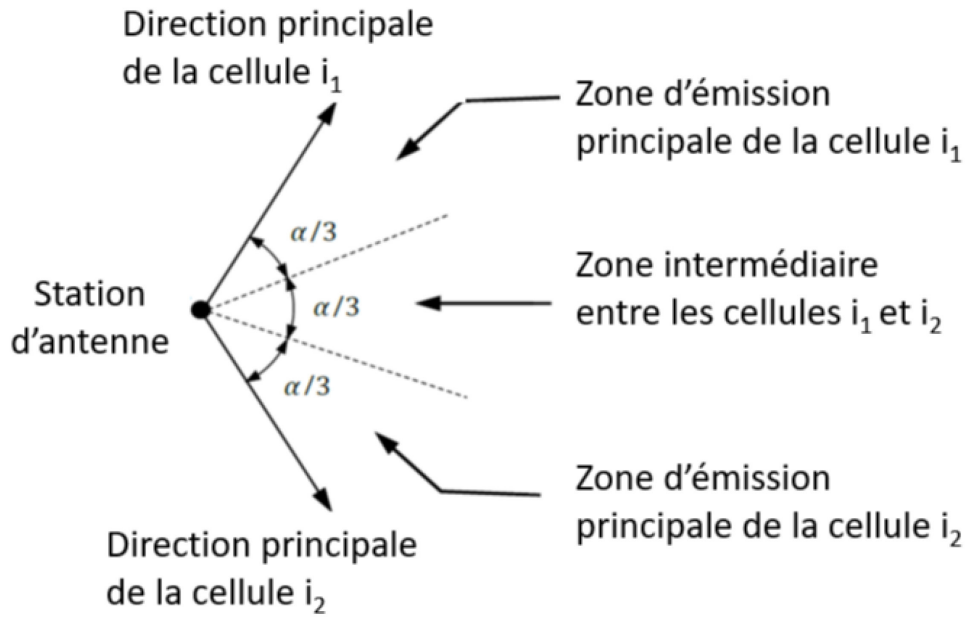


Figure 5 : La subdivision de la zone d'émission pour deux cellules i_1 et i_2

L'intensité extrapolée E_h est donc calculée par la formule modifiée suivante :

$$E_h \cong \left(E_{i,max}^{mesurée} \cdot \sqrt{\frac{1}{127}} \cdot K_i^{FSM} \right) \cdot K_i^R(\phi_i, \theta_i)$$

2. Adaptation de la résolution minimale

La résolution minimale actuelle ($127 \cdot \Delta f$) de la largeur de bande nécessaire pour le calcul de l'intensité du champ électrique par élément de ressource $E_{i,max}^{SSS(RE)}$ est modifiée. La largeur de bande de l'analyseur de spectre (RBW) peut désormais être prise en considération et $E_{i,max}^{SSS(RE)}$ est donc obtenue en se basant sur la formule suivante :

$$E_{i,max}^{SSS(RE)} \cong E_{i,max}^{mesurée} \cdot \max \left(\sqrt{\frac{1}{127}}, \sqrt{\frac{\Delta f}{RBW}} \right) \cdot K_i^{FSM}$$

Ces adaptations limitent la surestimation du rayonnement mesuré par la méthode à sélection de fréquence tout en empêchant la sous-estimation de celui-ci.