

UIT-R

Secteur des Radiocommunications de l'UIT

Recommandation UIT-R SM.575-3

(08/2021)

Protection des stations fixes de contrôle des émissions contre les brouillages causés par des émetteurs voisins ou des émetteurs de forte puissance

Série SM

Gestion du spectre



Avant-propos

Le rôle du Secteur des radiocommunications est d'assurer l'utilisation rationnelle, équitable, efficace et économique du spectre radioélectrique par tous les services de radiocommunication, y compris les services par satellite, et de procéder à des études pour toutes les gammes de fréquences, à partir desquelles les Recommandations seront élaborées et adoptées.

Les fonctions réglementaires et politiques du Secteur des radiocommunications sont remplies par les Conférences mondiales et régionales des radiocommunications et par les Assemblées des radiocommunications assistées par les Commissions d'études.

Politique en matière de droits de propriété intellectuelle (IPR)

La politique de l'UIT-R en matière de droits de propriété intellectuelle est décrite dans la «Politique commune de l'UIT-T, l'UIT-R, l'ISO et la CEI en matière de brevets», dont il est question dans la Résolution UIT-R 1. Les formulaires que les titulaires de brevets doivent utiliser pour soumettre les déclarations de brevet et d'octroi de licence sont accessibles à l'adresse <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/fr>, où l'on trouvera également les Lignes directrices pour la mise en œuvre de la politique commune en matière de brevets de l'UIT-T, l'UIT-R, l'ISO et la CEI et la base de données en matière de brevets de l'UIT-R.

Séries des Recommandations UIT-R

(Également disponible en ligne: <http://www.itu.int/publ/R-REC/fr>)

Séries	Titre
BO	Diffusion par satellite
BR	Enregistrement pour la production, l'archivage et la diffusion; films pour la télévision
BS	Service de radiodiffusion sonore
BT	Service de radiodiffusion télévisuelle
F	Service fixe
M	Services mobile, de radiorepérage et d'amateur y compris les services par satellite associés
P	Propagation des ondes radioélectriques
RA	Radio astronomie
RS	Systèmes de télédétection
S	Service fixe par satellite
SA	Applications spatiales et météorologie
SF	Partage des fréquences et coordination entre les systèmes du service fixe par satellite et du service fixe
SM	Gestion du spectre
SNG	Reportage d'actualités par satellite
TF	Émissions de fréquences étalon et de signaux horaires
V	Vocabulaire et sujets associés

Note: Cette Recommandation UIT-R a été approuvée en anglais aux termes de la procédure détaillée dans la Résolution UIT-R 1.

Publication électronique
Genève, 2022

© UIT 2022

Tous droits réservés. Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite, par quelque procédé que ce soit, sans l'accord écrit préalable de l'UIT.

RECOMMANDATION UIT-R SM.575-3

Protection des stations fixes de contrôle des émissions contre les brouillages causés par des émetteurs voisins ou des émetteurs de forte puissance

(1982-2007-2013-2021)

Domaine d'application

La présente Recommandation spécifie les niveaux de champ maximum garantissant la protection des stations de contrôle des émissions contre les brouillages.

Mots clés

Niveaux de champ, stations de contrôle des émissions, zones de protection

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que des informations de contrôle des émissions fiables et non corrompues sont essentielles pour la gestion du spectre;
- b) que la puissance rayonnée par les émetteurs voisins peut entraîner des champs électromagnétiques de forte intensité au niveau des stations de contrôle des émissions et avoir pour conséquences une diminution de la sensibilité ou un blocage du récepteur;
- c) que ces conséquences peuvent à leur tour être à l'origine de fausses émissions, ce qui est à éviter dans la mesure du possible;
- d) qu'avec le déploiement de stations de radiocommunications cellulaires et de radiodiffusion, il est difficile de trouver des emplacements convenables pour les stations de contrôle des émissions;
- e) que le champ reçu est un paramètre important pour déterminer si un emplacement convient pour le contrôle des émissions;
- f) que les limitations du champ requises varient en fonction des gammes de fréquences,

notant

- a) que le Manuel de l'UIT sur le contrôle du spectre radioélectrique (Edition de 2011) contient des considérations générales et particulières concernant l'emplacement des stations de contrôle des émissions et une liste de vérification à utiliser pour les études d'emplacement;
- b) que le Rapport UIT-R SM.2125 décrit les procédures de mesure à suivre pour déterminer les paramètres techniques des récepteurs et des systèmes de contrôle des émissions,

recommande

d'utiliser la méthode décrite à l'Annexe 1 pour le calcul du champ maximal admissible pour protéger les stations de contrôle des émissions.

Annexe 1

Calcul du champ maximal admissible pour protéger les stations de contrôle des émissions

1 Introduction

Les signaux RF de forte intensité peuvent limiter la capacité d'une station de contrôle des émissions à recevoir des signaux de faible intensité et à les mesurer correctement. La protection des stations de contrôle des émissions contre les signaux RF de forte intensité est particulièrement importante compte tenu de l'augmentation du nombre d'antennes installées pour les services mobiles et d'autres services de radiocommunication. Étant donné que les stations de contrôle des émissions sont souvent situées dans des zones urbaines et dans des endroits exposés, il est de plus en plus difficile d'identifier de nouveaux emplacements adaptés et de protéger les emplacements existants.

La présente annexe décrit les procédures et les calculs à utiliser pour établir les zones de protection autour des stations de contrôle des émissions.

2 Considérations générales

Pour la spécification des critères de protection des stations de contrôle des émissions, qui repose avant tout sur la prise en compte d'aspects techniques, le principe de base est que les rayonnements des stations d'émission adjacentes ne doivent pas brouiller les stations de contrôle des émissions.

Même si en principe les brouillages peuvent avoir diverses conséquences possibles, comme les rayonnements dans les bandes latérales, la conséquence la plus grave est la génération dans un récepteur de produits d'intermodulation du troisième ordre, qui peuvent être à l'origine de fausses émissions. C'est donc la seule conséquence prise en compte dans la présente Recommandation.

Pour une immunité donnée aux signaux de forte intensité, la survenue d'une intermodulation dépend directement de la puissance à l'entrée du récepteur de contrôle des émissions. La solution la plus simple serait donc de spécifier, comme critère de protection, la puissance maximale que les émetteurs environnants peuvent créer à l'entrée du récepteur de contrôle des émissions. Toutefois, l'inconvénient de cette solution est que la distance de protection résultante dépendrait des propriétés techniques du récepteur de contrôle des émissions et de l'antenne associée qui ne sont pas connues des exploitants des émetteurs voisins et qui sont différentes d'un site de contrôle des émissions à un autre. De plus, la protection serait assurée uniquement pour les équipements de contrôle des émissions considérés. En cas de modification future de ces équipements (par exemple de l'installation d'une antenne de gain différent), les critères de protection seraient modifiés et la zone de protection serait différente.

En dehors des aspects techniques, les aspects financiers et de gestion sont également très importants. Afin de réduire les dépenses administratives, il est nécessaire d'établir une procédure de contrôle simple et efficace. Une procédure simple sera plus facilement acceptée par les exploitants des émetteurs.

Ce sont les raisons pour lesquelles des critères de protection uniformes doivent être appliqués, indépendamment de l'emplacement des stations de contrôle des émissions et de leurs spécifications techniques (antenne de radiogoniométrie ou antenne orientable, type de récepteur, gain d'antenne). L'approche consiste alors à définir comme critère de protection une valeur de champ à ne pas dépasser. Il s'agit par ailleurs de l'approche la plus transparente pour les autres parties concernées car il est facile de calculer ou de mesurer le champ qu'un émetteur produit à l'emplacement de la station de contrôle des émissions.

La question de savoir si le champ maximal produit effectivement des brouillages au niveau du récepteur de contrôle des émissions dépend toutefois des paramètres suivants:

- immunité du récepteur aux signaux de forte intensité;
- sensibilité du récepteur;
- niveau de bruit externe;
- gain d'antenne;
- affaiblissement dans le câble RF entre l'antenne et le récepteur;
- largeur de bande et fréquence du ou des signaux perturbateurs.

Étant donné que ces paramètres peuvent varier dans une large mesure, une valeur définie de champ maximal ne garantit pas la protection de la station de contrôle des émissions contre les brouillages pour toutes les combinaisons possibles de ces paramètres. À titre d'exemple, pour un récepteur très sensible associé à une antenne de gain élevé, le champ maximal serait si faible qu'il serait impossible de trouver un site de contrôle des émissions adapté dans tout le pays.

La procédure ci-après donne une méthode générale de calcul du champ maximal admissible. La valeur résultante de ce champ dépend ensuite du choix de valeurs types raisonnables pour les paramètres ci-dessus.

3 Détermination du champ maximal admissible

Pour le calcul du champ maximal admissible, il est tenu compte:

- de l'immunité (troisième ordre) du récepteur aux signaux de forte intensité;
- de la sensibilité du récepteur;
- de la largeur de bande et de la fréquence du ou des signaux perturbateurs;
- du gain de l'antenne;
- de l'affaiblissement dans le câble RF entre l'antenne et le récepteur;
- du niveau du bruit externe.

3.1 Immunité du récepteur aux signaux de forte intensité

Le niveau des produits d'intermodulation du troisième ordre est généralement calculé à partir de la puissance d'entrée et du point d'intersection du troisième ordre du récepteur de contrôle des émissions. La situation la plus critique correspond à l'intermodulation de trois signaux de même puissance.

Conformément au Tableau 2 de la Recommandation UIT-R SM.1134-1, la puissance du produit d'intermodulation dans notre cas peut être calculée à l'aide de l'équation pour IM3(1;1;1) (cas de trois signaux).

$$P_{IM3} = 3P_S - 2P_{IP3} + 6 \text{ dB} \quad (1)$$

où:

- P_{IM3} : puissance du produit d'intermodulation du troisième ordre IM3(1;1;1) (dBm)
- P_S : puissance de chacun des signaux intervenant dans l'intermodulation (dBm)
- P_{IP3} : point d'intersection du troisième ordre (IP3) du récepteur (dBm).

La valeur de IP3 peut être tirée de la notice technique du récepteur. Il s'agit de la puissance des signaux d'entrée au point où le niveau du produit d'intermodulation du troisième ordre est égal au niveau d'entrée des signaux de forte intensité contribuant à cette intermodulation.

3.2 Sensibilité du récepteur

Un signal de faible intensité peut être détecté par un récepteur lorsque son niveau dépasse le bruit interne du récepteur. Il s'agit du niveau indiqué lorsqu'aucune antenne n'est connectée et que le récepteur fonctionne en mode le plus sensible (par exemple aucun affaiblissement à l'entrée).

La valeur quadratique moyenne du bruit interne d'un récepteur est généralement calculée comme suit:

$$P_R = (f - 1)kt_0B_n = (f - 1)p_nB_n \quad (2)$$

où:

f : facteur de bruit du récepteur

k : constante de Boltzmann

t_0 : température de référence prise égale à 290 K

B_n : largeur de bande de bruit du récepteur

$p_n = kt_0$: puissance de bruit thermique disponible (W) dans une largeur de bande de 1 Hz.

La sensibilité d'un récepteur est caractérisée dans les notices par le facteur de bruit NF . L'équation (2) s'écrit alors:

$$P_R = (10^{\frac{NF}{10}} - 1)p_nB_n \quad (3)$$

où:

$NF = 10 \log(f)$: facteur de bruit du récepteur (dB).

Exprimée en dBm, la valeur quadratique moyenne du bruit interne du récepteur s'écrit:

$$P_R(\text{dBm}) = 10 \log(10^{\frac{NF}{10}} - 1) + 10 \log(B_n) - 174(\text{dBm}) \quad (4)$$

où:

-174 dBm: puissance de bruit thermique disponible à la température ambiante dans une largeur de bande de 1 Hz.

En règle générale, la largeur de bande de mesure d'un récepteur est approximativement égale à sa largeur de bande de bruit. En outre, le facteur de bruit (NF) des récepteurs de contrôle des émissions est généralement égal ou supérieur à 10 dB. Ces éléments permettent de simplifier l'équation donnant la valeur quadratique moyenne du bruit interne du récepteur, qui devient:

$$P_R(\text{dBm}) = P_n + NF + 10 \log(B) \quad (5)$$

où:

P_n : puissance de bruit thermique disponible à la température ambiante dans une largeur de bande de 1 Hz (-174 dBm)

B : largeur de bande de mesure (Hz).

La valeur du facteur de bruit peut être tirée de la notice technique du récepteur. Le paramètre P_R est également appelé «niveau de bruit moyen affiché» (DANL, *displayed average noise level*).

3.3 Largeur de bande du récepteur

Lorsqu'on spécifie un niveau de signal RF, il faut aussi spécifier la largeur de bande de référence utilisée pour mesurer ce niveau. Sans autre information, le champ maximal pour assurer la protection d'une station de contrôle des émissions devrait en principe être mesuré dans la largeur de bande totale du signal en question.

3.4 Gain de l'antenne

Pour convertir des niveaux d'entrée mesurés en champ, il est important de connaître les propriétés de l'antenne et l'affaiblissement dans le câble RF entre l'antenne et le récepteur. Le gain d'antenne est relié au facteur d'antenne par l'équation:

$$G_i = 20 \log(f) - k - 30 \text{ dB} \quad (6)$$

où:

G_i : gain de l'antenne dans la direction du faisceau principal (dBi)

f : fréquence (MHz)

k : facteur d'antenne (dB/m).

Le facteur d'antenne et l'affaiblissement dans le câble RF peuvent être utilisés conjointement avec la tension à l'entrée du récepteur pour calculer le champ selon l'équation suivante:

$$E = U + k + \alpha_c \quad (7)$$

où:

E : champ électrique (dB μ V/m)

U : tension à l'entrée du récepteur (dB μ V)

α_c : affaiblissement dans le câble RF (dB).

Les valeurs du facteur d'antenne et/ou du gain d'antenne ainsi que de l'affaiblissement dans le câble RF peuvent être tirées des notices techniques de l'antenne et du câble.

Pour des systèmes de 50 ohms, la puissance RF est reliée à la tension RF par l'équation:

$$P(\text{dBm}) = U(\text{dB}\mu\text{V}) - 107 \text{ dB} \quad (8)$$

de sorte que:

$$E \left(\frac{\text{dB}\mu\text{V}}{\text{m}} \right) = P(\text{dBm}) + 20 \log(f(\text{MHz})) - G_i(\text{dB}) + \alpha_c(\text{dB}) + 77 \text{ dB} \quad (9)$$

3.5 Bruit externe

Dans ce contexte, le bruit externe correspond à tous les rayonnements non désirés, artificiels ou naturels, que le récepteur de contrôle des émissions reçoit depuis l'antenne. Aux fréquences supérieures à environ 30 MHz, la principale composante est le bruit artificiel. Toutefois, le niveau du bruit artificiel est souvent inférieur au niveau de bruit du récepteur, en particulier dans les zones rurales, et peut donc être négligé dans le processus de calcul.

Aux fréquences inférieures à 30 MHz, la sensibilité du montage de contrôle des émissions est déterminée par le bruit externe et non par le bruit du récepteur. Le niveau réel du bruit externe dépend fortement de l'emplacement de la station de contrôle des émissions et même de l'heure du jour.

En outre, la propagation par l'onde ionosphériques des signaux au-dessous de 30 MHz a généralement pour conséquence que les signaux de plus forte intensité reçus sont des signaux provenant de stations étrangères de radiodiffusion MA. Bien que le niveau de réception des signaux de ces stations puisse être si élevé qu'il entraîne une diminution considérable des performances du contrôle des émissions, l'administration chargée du contrôle des émissions n'a aucun pouvoir juridique sur la présence de ces signaux. De plus, ces signaux sont présents à tous les emplacements possibles de contrôle des émissions. Par conséquent, il ne semble pas judicieux de calculer des champs pour assurer la protection aux fréquences inférieures à 30 MHz.

Le calcul suivant n'est valable que pour les fréquences supérieures à 30 MHz pour lesquelles le bruit externe n'est pas dominant.

3.6 Processus de calcul

Pour le calcul de la puissance du produit d'intermodulation du troisième ordre (IM3), nous supposons que trois signaux au total de même puissance et de même largeur de bande interagissent dans le circuit d'entrée du récepteur.

La largeur de bande d'un produit d'intermodulation résultant de trois signaux est le triple de la largeur de bande d'un signal B_S .

Il n'est pas aisé de déterminer la largeur de bande d'un produit d'intermodulation lorsque des signaux réels interagissent (par exemple, DVB-T ou LTE). En règle générale, ces spectres n'ont pas de minima ou de maxima significatifs. Il est donc possible de supposer, sans faire d'erreur, que le spectre de ce produit d'intermodulation est rectangulaire.

La partie de la puissance ΔP_{IM3} du produit d'intermodulation mesurée dans la largeur de bande B peut être calculée comme suit:

$$\Delta P_{IM3}(\text{dBm}) = P_{IM3} + 10 \log \left(\frac{B}{3B_S} \right) \quad (10)$$

En utilisant l'équation (1), on a alors:

$$\Delta P_{IM3}(\text{dBm}) = 3P_S - 2P_{IP3} + 6 \text{ dB} + 10 \log \left(\frac{B}{3B_S} \right) = 3P_S - 2P_{IP3} + 6 \text{ dB} + 10 \log(B) - 10 \log(3B_S) \quad (11)$$

Le brouillage dû aux produits d'intermodulation commence à être visible lorsque le niveau ΔP_{IM3} dépasse le bruit de fond du récepteur:

$$\Delta P_{IM3} \geq P_R \quad (12)$$

Le point «critique» où cette situation se produit peut être calculé à l'aide des équations (5) et (11) comme suit:

$$3P_S - 2P_{IP3} + 6 \text{ dB} + 10 \log(B) - 10 \log(3B_S) = NF + 10 \log(B) - 174 \text{ dBm} \quad (13)$$

$$P_S = \frac{2P_{IP3} + NF + 10\log(B_S) + 10\log(3) - 6 \text{ dB} - 174 \text{ dB}}{3} \quad (14)$$

$$P_S = \frac{2P_{IP3} + NF + 10\log(B_S)}{3} - 58,4 \text{ dBm} \quad (15)$$

Le champ correspondant à P_S peut être calculé à partir de l'équation (9) comme suit:

$$E_{max} \left(\frac{dB\mu V}{m} \right) = \frac{2P_{IP3}(\text{dBm}) + NF(\text{dB}) + 10\log B_S(\text{Hz})}{3} + 20 \log(f)(\text{MHz}) - G_i(\text{dB}) + \alpha_c(\text{dB}) + 18,6 \text{ dB} \quad (16)$$

3.7 Conséquence du brouillage causé par un grand nombre de stations

L'équation (16) donne déjà le champ maximal admissible de chaque émetteur perturbateur susceptible d'intervenir dans un éventuel produit d'intermodulation.

Si les signaux de plus de trois émetteurs sont reçus avec ce champ maximal, la seule conséquence sera l'apparition de produits d'intermodulation supplémentaires à des fréquences différentes, mais le niveau de chacun des produits d'intermodulation ne sera pas plus élevé. Il n'est donc pas nécessaire de procéder à une adaptation supplémentaire des valeurs du champ maximal admissible.

4 Valeurs types des paramètres

Pour obtenir une valeur numérique pour le champ maximal admissible à partir de l'équation (16), il faut choisir des valeurs réalistes pour les paramètres suivants: facteur de bruit du récepteur, point d'intersection du troisième ordre, largeur de bande de référence et gain de l'antenne. La présente section indique comment choisir ces valeurs.

4.1 Facteur de bruit du récepteur

Le facteur de bruit des récepteurs de contrôle des émissions et des analyseurs de spectre est souvent compris entre 7 et 24 dB. Il est possible d'abaisser le facteur de bruit d'ensemble du montage de mesure jusqu'à des valeurs inférieures à 1 dB en utilisant des amplificateurs à faible bruit (LNA) externes, mais pour une station fixe de contrôle des émissions, ce n'est pas une configuration type. Dans l'hypothèse où des préamplificateurs sont intégrés, il est proposé d'utiliser un facteur de bruit type d'environ 10 dB lors du calcul du champ maximal admissible dans le contexte de la présente Recommandation.

4.2 IP3

Le niveau IP3 des récepteurs de contrôle des émissions et des analyseurs de spectre est souvent compris entre +10 et +30 dBm. Une valeur de +15 dBm peut être considérée comme une valeur type même si des récepteurs numériques spéciaux à bande élargie sans aucune présélection et avec une plage dynamique médiocre peuvent avoir un niveau IP3 inférieur.

4.3 Largeur de bande du signal

En cas de mesure de signaux de faible intensité, on obtiendrait le rapport S/N le plus élevé en utilisant la largeur de bande de mesure la plus étroite possible car on aurait alors le niveau DANL le plus bas possible. Cela ne vaut toutefois que pour les porteuses non modulées. En cas de mesure de signaux numériques, par exemple, des largeurs de bande de mesure plus étroites n'ont pas pour effet d'augmenter le rapport signal/bruit (S/N) et ne permettent donc pas d'augmenter la sensibilité de la

mesure. En outre, les produits d'intermodulation interférant avec une mesure ne sont pas des porteuses non modulées. Leur largeur de bande est même plus grande que celle des signaux de forte intensité présents, de sorte que leur risque de brouillage n'est pas plus élevé lorsqu'on utilise une largeur de bande de mesure plus étroite que la largeur de bande du signal.

Il est donc recommandé de spécifier une largeur de bande de signal type dans la bande de fréquences considérée lors du calcul du champ maximal pour assurer la protection de la station de contrôle des émissions.

4.4 Gain de l'antenne

Une antenne doublet accordée à un gain de 2,15 dBi. De nombreuses antennes de contrôle des émissions sont équidirectives et n'ont pas un gain plus élevé. De même, les antennes utilisées dans les radiogoniomètres peuvent généralement être considérées comme ayant le même gain qu'un doublet. Toutefois, de nombreuses stations de contrôle des émissions sont également équipées d'antennes directives. Le gain de ces antennes aurait pour effet de diminuer le champ admissible. Néanmoins, il est recommandé de prendre en considération le cas d'une antenne doublet lors du calcul du champ maximal admissible pour les raisons suivantes:

- Si on prend en considération le cas d'antennes directives, le champ admissible dépendrait des équipements de contrôle des émissions, ce que l'on souhaite éviter (voir le § 2) afin d'avoir des limites de champ uniformes et transparentes.
- Les produits d'intermodulation tels qu'ils sont considérés ici font toujours intervenir au moins deux signaux de forte intensité. Un calcul effectué avec le gain d'une antenne directive dans son faisceau principal revient à supposer que tous les signaux de forte intensité reçus proviennent de la même direction, ce qui n'est pas toujours réaliste et conduit à une surestimation du risque de brouillage.
- Le risque de brouillage dû à un niveau de signal plus élevé avec des antennes directives ne serait effectif que dans une certaine direction tandis que dans toutes les autres directions, le champ et, par conséquent, le risque de brouillage sont même moins élevés qu'avec des antennes équidirectives.

Il convient de noter que l'utilisation d'antennes directives de gain élevé peut entraîner des brouillages dans certaines directions en raison de niveaux de champ plus élevés que ceux calculés dans l'hypothèse d'antennes équidirectives. Si ces brouillages sont inacceptables, des filtres coupe-bande ou des affaiblisseurs peuvent être insérés pour éviter toute mesure incorrecte.

4.5 Affaiblissement dans le câble RF

Pour convertir des niveaux d'entrée mesurés en champ, il est important de connaître non seulement les propriétés de l'antenne, mais aussi l'affaiblissement dans le câble RF entre l'antenne et le récepteur. Il convient de noter que lorsque le diamètre du câble augmente, sa limite de fréquence supérieure ainsi que son affaiblissement diminuent. Par conséquent, le câble ayant la fréquence de fonctionnement maximale requise la plus petite présentera l'affaiblissement le plus faible. Ainsi, un câble ayant une gamme de fréquences de fonctionnement plus élevée que nécessaire peut ne pas être optimal en raison de l'affaiblissement plus important qu'il présente.

Prenons un exemple concret: considérons une station dont la fréquence de fonctionnement maximale est de 6 GHz et un câble entre l'antenne et le récepteur d'une longueur de 40 mètres. L'affaiblissement sur une telle longueur dans ce câble classique ayant une fréquence de coupure de 6 GHz est de 8 dB, alors que l'affaiblissement dans le même modèle de câble mais pour une fréquence de coupure de 12 GHz est de 12,8 dB. Dans la bande GSM des 950 MHz, l'affaiblissement dans ces câbles serait de 2,8 dB et de 4,5 dB, respectivement.

5 Exemple de calcul avec les valeurs types

La présente section donne un exemple de calcul avec les valeurs types des paramètres proposées au § 4. D'après l'équation (16) et les différentes largeurs de bande de référence, il est évident que le champ maximal résultant dépendra de la fréquence.

Pour la gamme de fréquences GSM au voisinage de 950 MHz, par exemple, l'équation (16) devient:

$$E_{max} \left(\frac{\text{dB}\mu\text{V}}{\text{m}} \right) = \frac{2 \cdot 15 \text{ dBm} + 10 \text{ dB} + 10 \log(250,000 \text{ Hz})}{3} + 20 \log(950 \text{ MHz}) - 2,15 \text{ dB} + 2,8 \text{ dB} + 18,6 \text{ dB} = 110,1 \text{ dB}\mu\text{V}/\text{m}$$
