Industrie Canada Industry Canada

NT-261
3e édition
Mars 2015

Gestion du spectre et télécommunications

Note technique

Modèle d'évaluation de l'exposition aux champs de radiofréquences selon le Code de sécurité 6 (CS6) (environnements non contrôlés)

Also available in English – TN-261

Canada

Préface

Cette Note technique NT-261, 3e édition, *Modèles d'évaluation de l'exposition aux champs de radiofréquences selon le code de sécurité 6 (CS6) (environnements non contrôlés)*, remplace la NT-261 2e édition, publiée en décembre 2012.

Modifications :

1. Clarification concernant l'analyse approfondie lorsque le modèle d'évaluation identifie des emplacements où le grand public serait exposé à l'énergie radioélectrique supérieure ou égale à 50 % des limites du CS6 pour les environnements non contrôlés.

2. **Section 3.2 :** Clarification concernant les inclinaisons de l'antenne.

3. **Annexe A :** Théorie générale des antennes.

Les questions au sujet du présent document peuvent être envoyées à l'adresse suivante :

Industrie Canada
Direction générale du génie, de la planification et des normes
235, rue Queen
Ottawa (Ontario) K1A 0H5

Aux soins de : Normes réglementaires

Courriel : res.nmr@ic.gc.ca

Toutes les publications de Gestion du spectre et télécommunications peuvent être consultées sur le site Web suivant : http://www.ic.gc.ca/spectre.

Table des matières

1.0 Objet **1**

2.0 Introduction **1**

3.0 Processus d'évaluation **2**

3.1 Description générale de l'analyse de zone de non-exemption 4

3.2 Gain d'antenne 11

3.3 Réflexion 13

3.4 Service unique, services multiples et environnement radioélectrique 13

4.0 Zone de non-exemption **14**

5.0 Conclusion **15**

Références **16**

Annexe A — Théorie générale des antennes **17**

Liste des acronymes et des abréviations

CPC	Circulaires des procédures concernant les clients
CS6	Code de sécurité 6
FCC	Federal Communications Commission
LD	Lignes directrices
NT	Note technique
p.a.r.	Puissance apparente rayonnée
p.i.r.e.	Puissance isotrope rayonnée équivalente
RF	Radiofréquences
RPR	Règles et procédures sur la radiodiffusion
SGAL	Système de gestion des assignations et des licences
SCP	Service de communications personnelles
Z	Impédance

1.0 Objet

L'objet de ce document est de fournir un outil permettant l'évaluation rapide de la conformité des emplacements d'antenne de radiocommunication simple aux normes d'exposition aux radiofréquences. L'intention est d'établir une approche nationale cohérente de l'évaluation de la conformité aux limites d'exposition aux radiofréquences exigées par le Canada[1]. La méthode décrite dans le présent document n'est valide que pour la région du champ éloigné des antennes. Elle n'est pas recommandée pour une analyse de conformité détaillée des radiofréquences. Pour ce type d'analyse, il faudra appliquer une technique basée sur des pratiques reconnues d'ingénierie tenant compte du diagramme de rayonnement des antennes et de leur contribution individuelle, sans oublier le milieu radio local.

2.0 Introduction

Comme il est précisé dans sa Circulaire des procédures concernant les clients, intitulée CPC-2-0-03, *Systèmes d'antennes de radiocommunications et de radiodiffusion*, Industrie Canada exige que toutes les installations radio soient exploitées conformément aux normes de protection stipulées dans les documents intitulés *Limites d'exposition humaine à l'énergie électromagnétique radioélectrique dans la gamme de fréquences de 3 kHz à 300 GHz — Code de sécurité 6* (CS6) de Santé Canada pour la protection du grand public. Le requérant doit, en plus de son propre système de radiocommunication, considérer la contribution de toutes les installations de radiocommunication des environs pour prédire ou mesurer l'intensité des champs.

Normalement, dans les situations où les clients (utilisateurs, entreprises et/ou les fournisseurs de services de radiocommunication) ont fait la preuve (par prédiction ou par mesure du champ) que les limites d'exposition aux environnements non contrôlés établies dans le CS6 pour les zones accessibles au grand public sont respectées, Industrie Canada n'exige pas de mesures correctives. Par contre, Industrie Canada oblige les utilisateurs, les entreprises et/ou les fournisseurs d'installations de radiocommunication à prendre des mesures immédiates afin de s'assurer que les bâtis d'antenne accessibles au grand public comportent des dispositifs pour prévenir leur ascension, ou qu'il existe des mécanismes pour empêcher l'accès aux zones des bâtis d'antenne aux endroits où les limites prescrites pour les environnements non contrôlés peuvent être dépassées.

Pour les endroits accessibles au grand public où les limites d'environnements non contrôlés ne sont pas respectées, si des moyens techniques comme la réduction de la puissance d'émission ou la modification de l'installation d'émission ne sont pas applicables, l'utilisateur, l'entreprise ou le fournisseur de services doit prendre les mesures de démarcation de la zone et de contrôle d'accès décrites dans le document CPC-2-0-20 — *Champs de radiofréquences — Panneaux et contrôle de l'accès*. De plus, dès que les émissions de radiofréquences provenant d'un système d'antennes sont supérieures ou égales à 50 % des limites du CS6 pour les environnements non contrôlés à des emplacements accessibles au grand public, les exploitants de ce système d'antennes sont tenus d'aviser Industrie Canada et de démontrer que ledit système est conforme.

---

[1] Dans le cas des demandes de radiodiffusion, les RPR-1, Règles et procédures sur la radiodiffusion, *Règles générales*, détaillent des exigences spécifiques à ce genre de demandes visant à démontrer la conformité au CS6. Prière de s'y référer pour une description des analyses exigées et des solutions de rechange s'offrant aux promoteurs selon le résultat des analyses soumises.

Pour faciliter la mesure des champs Industrie Canada a publié le document LD-01 — *Lignes directrices relatives à la mesure des champs radioélectriques de la gamme de fréquences de 3 kHz à 300 GHz* pour aider les parties concernées à vérifier si leurs installations sont conformes au CS6. Ces documents couvrent les procédures de mesure des installations de radiodiffusion, de micro-ondes, de services mobiles, de téléavertisseurs, de téléphonie cellulaire, de SCP et de radar.

Pour un grand nombre d'installations simples, le modèle décrit dans ce document permet d'évaluer efficacement la conformité des zones en champ éloigné en utilisant des paramètres techniques comme la puissance, la hauteur des antennes, la longueur des antennes, la fréquence ainsi que la distance aux zones accessibles par le grand public. Pour les zones en champ proche ou dans un environnement radio complexe où plusieurs pylônes d'antenne sont installés dans le voisinage d'un endroit d'intérêt, il peut s'avérer nécessaire de recourir à une technique d'analyse détaillée basée sur des techniques d'ingénierie reconnues et qui tient compte de la contribution de chacune des antennes présentes. Cela peut faire appel à un tableur complexe ou à un outil logiciel d'évaluation des champs RF.

Cette note technique décrit une procédure d'évaluation pour vérifier la conformité aux normes d'exposition aux RF en vertu du CS6. Cette procédure constitue la deuxième étape d'une approche en trois temps décrite ci-dessous.

3.0 Processus d'évaluation

Le processus général d'évaluation de la conformité au CS6 repose sur une approche en trois étapes. Les méthodes d'évaluation décrites à la première et à la deuxième étape devraient suffire à exclure la plupart des installations simples tout en mettant en évidence les installations plus complexes (comme un toit accessible au grand public mais portant plusieurs antennes), ces dernières exigent une analyse plus détaillée (troisième étape).

Première étape — Attestation ou analyse

Le requérant doit attester que la station (ou l'emplacement si co-installé) est conforme au CS6 pour les environnements non contrôlés. Cette attestation peut être soumise en utilisant le formulaire du Ministère IC-2430 — *Attestation de systèmes d'antennes de radiocommunications et de radiodiffusion*. Autrement, une analyse du CS6 acceptable avec déclaration de conformité peut être utilisée comme attestation. Si la demande n'est pas accompagnée du formulaire d'Industrie Canada IC-2430, d'une attestation signée ou d'une analyse acceptable indiquant la conformité aux exigences d'environnements non contrôlés décrites dans le CS6, le traitement de la demande sera retardé tant que l'attestation requise ne sera pas obtenue. Dans tous les cas, l'agent ministériel qui traite la demande doit juger de sa validité. S'il existe le moindre doute quant à la conformité, il faut passer à la deuxième étape du processus.

Deuxième étape — Analyse de la zone de non-exemption

Les paramètres techniques de l'installation et le processus d'évaluation simplifié décrits aux sections 3.1 à 3.4 et 4 de ce document servent à réaliser l'évaluation.

De façon alternative, lorsque le site devient plus complexe, l'agent ministériel peut utiliser un logiciel interne pour évaluer la conformité de l'exposition aux radiofréquences des stations du service mobile et fixe terrestre au lieu du processus d'évaluation simplifié. Ce logiciel utilise le modèle de propagation et

les diagrammes de rayonnement par défaut décrits dans le processus d'évaluation simplifié et fait la distinction entre les régions de champ proche et éloigné des antennes. Les stations émettrices de l'environnement radioélectrique local identifiées selon les distances prescrites à la Section 3.4 sont aussi prises en considération.

S'il est déterminé que le site est conforme en utilisant l'une des deux méthodes ci-dessus, l'évaluation est terminée. Toutefois, si la conformité du site ne peut être démontrée par cette étape (i.e., que le grand public a accès à des emplacements où les niveaux prédits sont égaux ou supérieur à 50% des limites d'environnements non contrôles du CS6 ou encore à l'intérieur du champ proche des antennes) il faut alors passer à l'étape 3.

Troisième étape — Analyse détaillée, mesure des champs ou mesures d'atténuation

La procédure d'évaluation décrite à la section 3.4 relativement aux antennes et aux bandes de fréquences multiples est une méthode prudente qui surestime la puissance d'émission des signaux RF. Plus le nombre d'antennes et de bandes de fréquences augmente, moins les résultats estimés sont réalistes car le niveau RF estimé est plus élevé que si le niveau RF avait été obtenu par mesure. Il faut donc recourir à une méthode différente.

L'agent ministériel peut présenter au requérant plusieurs options pour démontrer la conformité au CS6. Le requérant peut (i) présenter des calculs détaillés, (ii) effectuer des mesures ou (iii) prendre des mesures d'atténuation sur place.

(i) Des calculs détaillés basés sur des pratiques d'ingénierie reconnues devront être effectués pour toutes les zones accessibles au grand public pour en établir la conformité aux limites d'exposition aux environnements non contrôlés décrites dans le CS6. Les calculs doivent comprendre les paramètres techniques exacts de chacune des antennes émettrices, y compris les diagrammes d'antenne dans les plans vertical et horizontal, la fréquence, la puissance apparente rayonnée (p.a.r.), la hauteur et l'inclinaison des antennes et, dans le cas d'une structure supportant plusieurs antennes, la position horizontale et l'orientation de chacune des antennes par rapport au point de calcul. Les calculs peuvent être faits au moyen de tableurs ou d'un logiciel de modélisation computationnelle et tenir compte des zones du champ proche et du champ éloigné, ainsi que des limites fixées par le CS6. L'agent ministériel doit vérifier les calculs, et dans l'éventualité que les calculs détaillés identifient des zones non contrôlées où les rayonnements RF excèdent 50 % de la limite d'environnement non contrôlés ou si après cette analyse, il n'est toujours pas convaincu que l'installation est conforme au CS6, l'agent peut exiger au requérant de faire des relevés de mesures (comme indiqué dans (ii) ci-dessous) et/ou de mettre en place des mesures d'atténuation afin de démontrer la conformité.

(ii) La prise de mesures détaillées servira à montrer que, dans les zones accessibles au grand public, les champs de radiofréquences sont conformes aux limites d'environnements non contrôlés établies par le CS6. Le requérant doit présenter au Ministère un rapport détaillé (voir LD-08[2]) des mesures effectuées. On se reportera au document LD-01 — *Lignes directrices relatives à la mesure des champs radioélectriques de la gamme de fréquences de 3 kHz à 300 GHz* pour obtenir de plus

[2] LD-08, *Lignes directrices pour la préparation de rapports de conformité sur l'exposition aux radiofréquences (RF) pour les systèmes d'antenne de radiocommunication et de radiodiffusion*.

amples renseignements. L'agent ministériel peut préciser les mesures à effectuer dans certains secteurs, par exemple, ceux qui sont fréquentés par le grand public. Si les résultats indiquent une non-conformité, le requérant doit prendre des mesures d'atténuation. Le Ministère se réserve le droit de vérifier les mesures prises en effectuant des vérifications. Dans de rares cas, l'agent ministériel pourra aussi choisir d'assister à la prise des mesures.

(iii) Pour se conformer au CS6, le requérant peut proposer des mesures d'atténuation plutôt que ou en supplément des relevés de mesures de champs. Celles-ci peuvent comprendre, notamment, la réduction de la puissance d'émission, le remplacement des antennes ou la restriction de l'accès à certaines zones (voir la CPC-2-0-20 — *Champs de radiofréquences — Panneaux et contrôle de l'accès*). L'agent ministériel peut préciser les mesures d'atténuation à prendre s'il estime que celles proposées par le requérant ne sont pas adéquates. Le requérant doit informer le Ministère de la mise en œuvre des mesures d'atténuation.

Bien que la conformité aux exigences indiquées dans le document CPC-2-0-03 — *Systèmes d'antennes de radiocommunications et de radiodiffusion*, et par conséquent dans le CS6, soit une condition d'autorisation normale, l'agent ministériel peut indiquer des conditions spécifiques supplémentaires, comme exiger du requérant qu'il prouve la conformité de son installation en effectuant des mesures ou en prenant des mesures d'atténuation avant d'accorder l'autorisation finale. En plus, d'autres conditions peuvent être ajoutées à l'autorisation.

3.1 Description générale de l'analyse de zone de non-exemption

Cette méthode est basée sur une formule modifiée de la propagation en espace libre (voir l'Annexe A), qui prend en considération une réflexion de 60 % (Section 3.3), et la réduction co-sinusoïdale (Section 3.2) au lieu du diagramme vertical d'antenne. À l'horizontale, on tient pour acquis que l'antenne est omnidirective.

L'analyse de zone de non-exemption est principalement utilisée pour les situations de service unique (bande de fréquence unique), p. ex. les systèmes de téléphonie cellulaires où la p.i.r.e. est le total de la p.i.r.e. de tous les émetteurs et de tous les canaux (Section 3.4). Toutefois, la méthode peut aussi être appliquée à des situations de services multiples (bandes de fréquences multiples) en appliquant une approche prudente où toutes les valeurs de la p.i.r.e. sont additionnées et appliquées au centre de l'antenne la plus basse. La limite au point d'observation est évaluée en fonction de la limite la plus basse indiquée dans le CS6 pour les bandes de fréquences présentes. Aussi, les plus grandes antennes et les fréquences les plus basses sont utilisées pour déterminer où commence le champ éloigné (voir Section 3.4 pour les environnements radioélectriques ayant des services multiples**)**.

Avant d'appliquer cette méthode, on doit d'abord établir si le point d'intérêt (c'est-à-dire le point où l'évaluation de la conformité est vérifiée) se trouve dans la région du champ éloigné de l'antenne, comme il est décrit à la section 4 et à l'Annexe A). Il est important d'établir cette distance, car cette méthode ne peut servir à évaluer les situations en champ proche, car la zone à accès limité générée est basée sur la formule modifiée de l'espace libre, qui n'est valide qu'en champ éloigné. Comme l'indique la figure 1, la sphère qui entoure l'antenne représente la limite sphérique séparant le champ proche du champ éloigné, limite dans laquelle le point d'intérêt ne peut se trouver si on applique cette méthode.

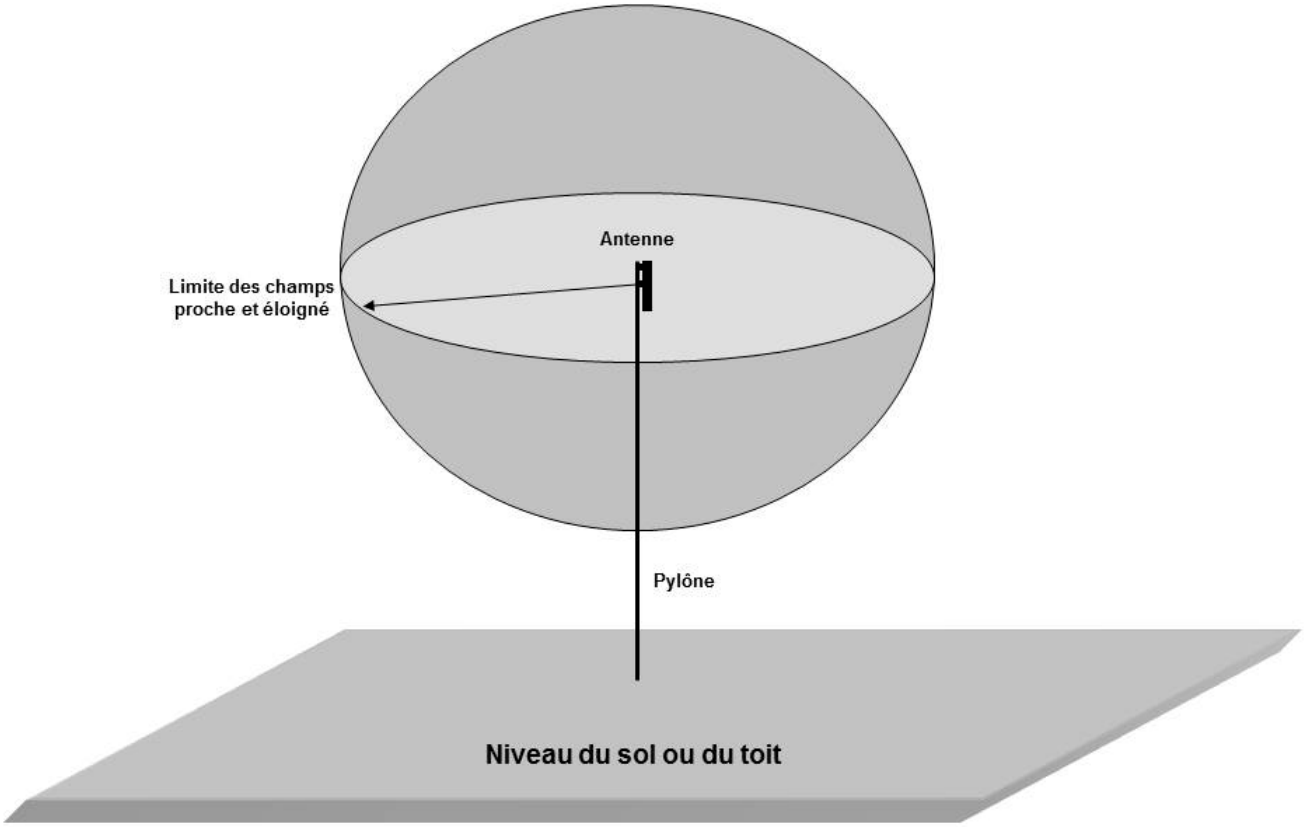

Figure 1 — Limites du champ proche/du champ éloigné autour d'une antenne

L'étape suivante consiste à utiliser les paramètres techniques de l'antenne et la formule modifiée de l'espace libre pour générer une zone à accès limité autour de l'antenne basée sur 50 % de la limite CS6 applicable pour les environnements non contrôlés, dans laquelle le point d'intérêt ne peut aussi se trouver. Cette zone à accès limité est représentée par un cylindre entourant l'antenne, où le sommet du cylindre se trouve dans le plan horizontal qui passe par le centre de l'antenne. On suppose que la même restriction s'applique au-dessus de l'antenne. On ajoute donc un cylindre jumeau au-dessus de l'axe horizontal central de l'antenne. Le résultat est un cylindre plus grand avec l'antenne en son centre, comme l'illustre la figure 2. Dans ce cas, X est la distance horizontale à partir du centre de l'antenne et Y représente la distance verticale en dessous de la direction de l'axe de pointage. Le volume total du cylindre représente l'ensemble de la zone à accès limité, où le point d'intérêt ne peut se trouver.

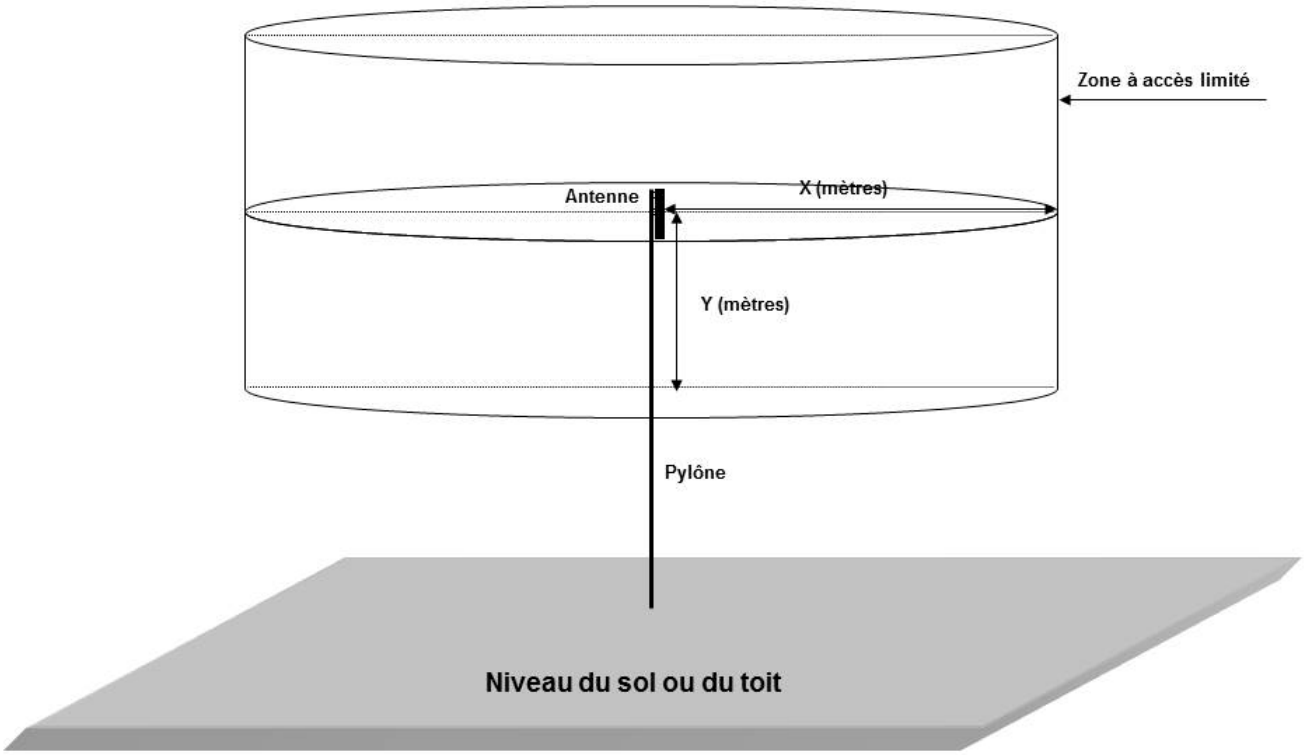

Figure 2 — Représentation graphique de la zone à accès limité entourant une antenne

Une fois établie, la limite séparant le champ proche du champ éloigné doit être utilisée conjointement avec la zone à accès limité. **La plus grande dimension des deux volumes combinés sert à déterminer la nouvelle zone de non-exemption**. Si le grand public n'a accès qu'aux zones situées à l'extérieur de la zone de non-exemption, alors l'installation est conforme au CS6. La figure 3 montre une situation où la zone à accès limité est plus grande que la limite sphérique du champ éloigné. Par conséquent, la zone générale de non-exemption est la même que la zone à accès limité.

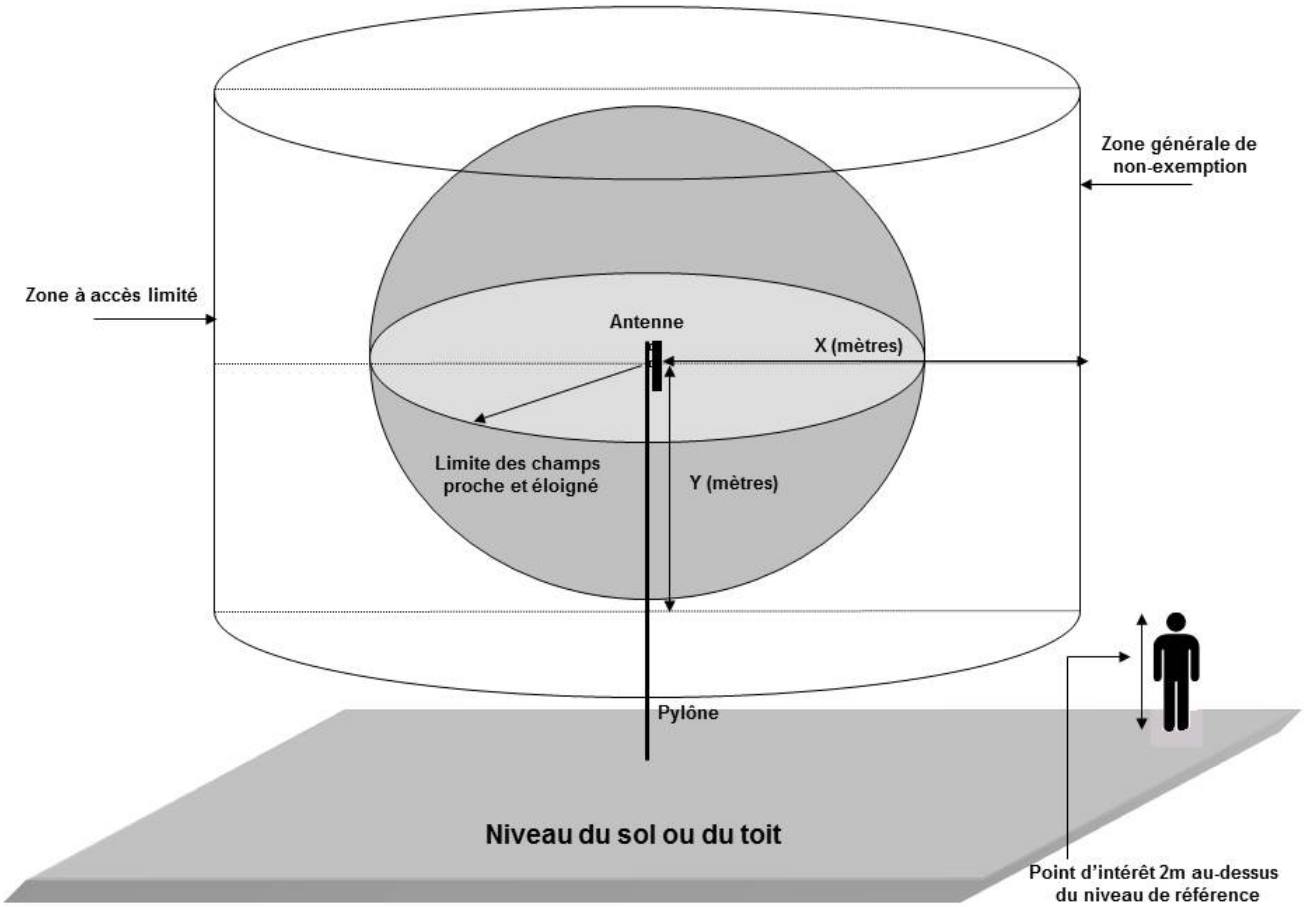

Figure 3 — Situation idéale d'application du modèle d'exemption

Dans la figure 4, la zone à accès limité est plus petite que la limite sphérique séparant le champ proche du champ éloigné. Comme la zone à accès limité est calculée en fonction d'un champ éloigné, lorsque le point d'intérêt se déplace au-delà de la limite sphérique séparant le champ proche du champ éloigné, les conditions relatives au champ éloigné seront satisfaites et les calculs de propagation au point d'intérêt deviendront valides. Par conséquent, dans ce scénario (Figure 4), si le public n'a pas accès dans la zone du champ proche, alors par déduction, l'installation devrait aussi être conforme au CS6 et la zone de non-exemption correspondra à la limite sphérique séparant le champ proche du champ éloigné.

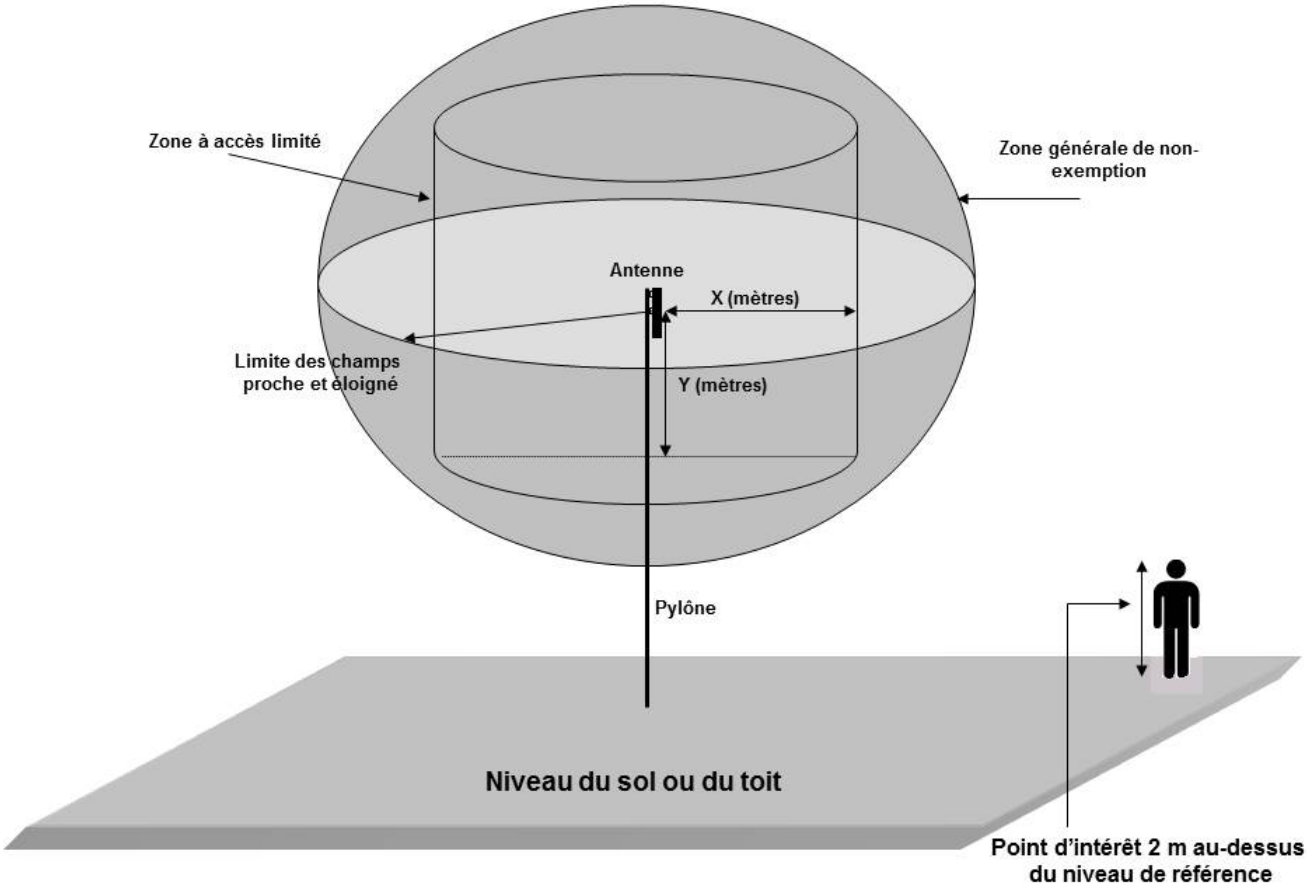

Figure 4 — Si la zone à accès limité se trouve dans le champ proche, la limite séparant le champ proche du champ éloigné devient la nouvelle zone générale de non-exemption

Il peut se produire un recoupement partiel de la limite sphérique séparant le champ proche du champ éloigné et de la zone cylindrique à accès limité. Dans ce cas, la zone de non-exemption prend la forme du volume combiné illustré aux figures 5 et 6.

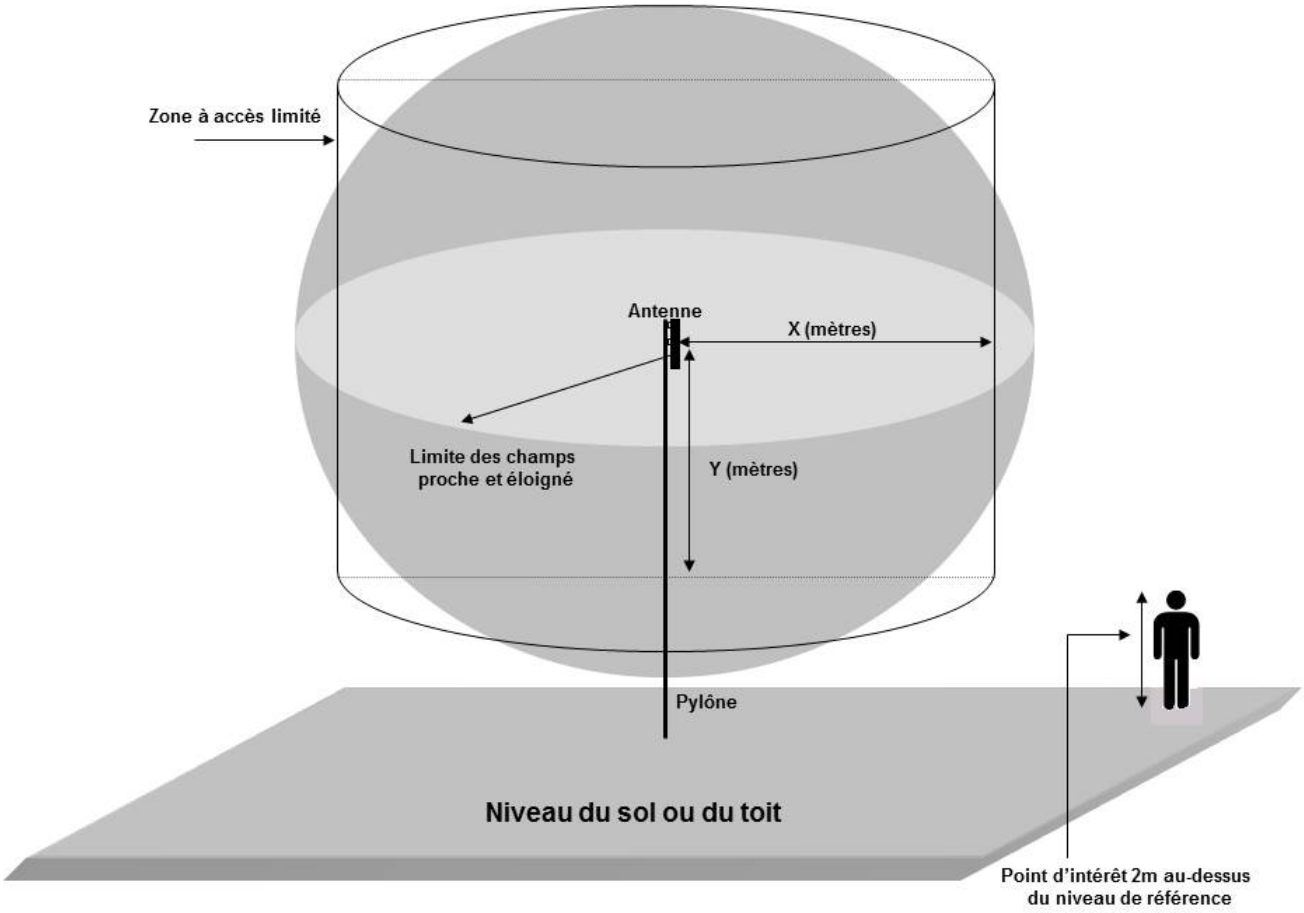

Figure 5 — Si la limite sphérique séparant le champ proche du champ éloigné et la zone cylindrique à accès limité se recoupent, la zone générale de non-exemption est la combinaison de la sphère et du cylindre

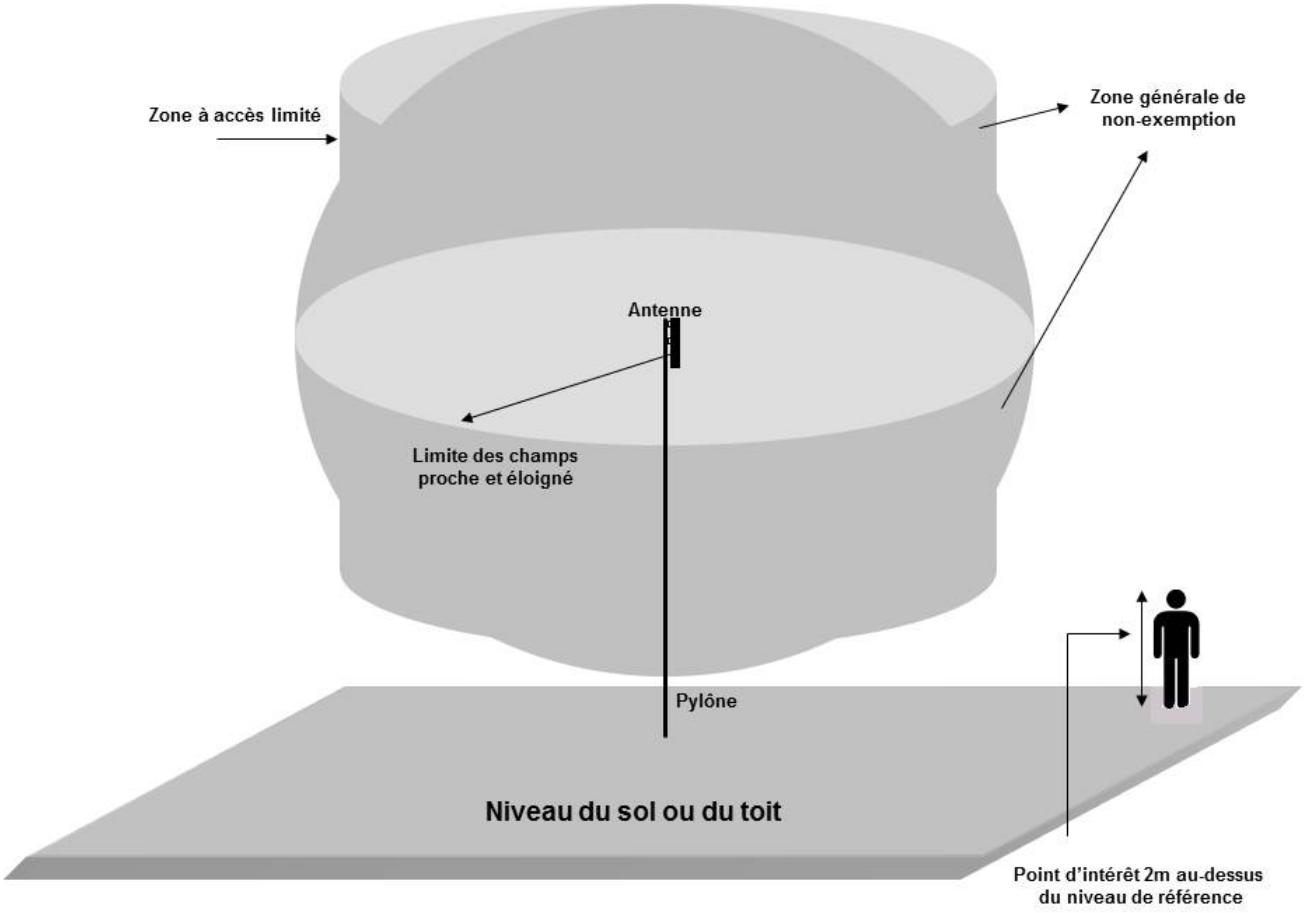

Figure 6 — La zone générale de non-exemption est la combinaison de la sphère et du cylindre

La figure 7 montre un scénario où le public a accès à la zone générale de non-exemption. Dans ce scénario, une analyse détaillée est requise afin de déterminer si l'emplacement est en conformité ou non. Conséquemment, il faut passer à la troisième étape (Section 3.0) du processus d'évaluation.

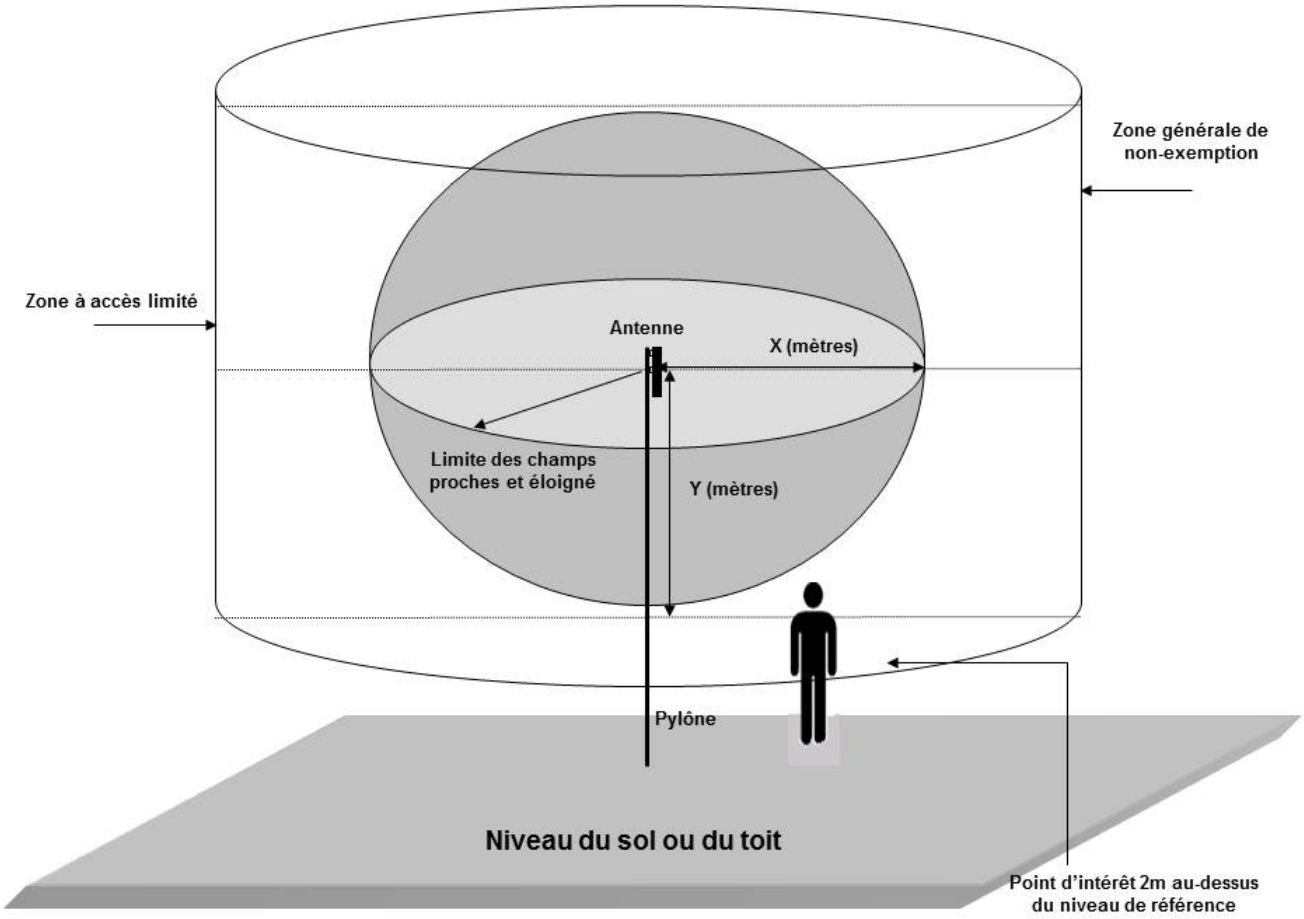

Figure 7 — La conformité n'est pas démontrée par l'analyse parce que le point d'intérêt se trouve dans la zone de non-exemption

Dans les situations plus complexes où des pylônes d'antenne sont installés à proximité d'un lieu d'intérêt, on exige une analyse détaillée basée sur des pratiques d'ingénierie reconnues. Dans ce cas, la contribution de chacune des antennes doit être prise en considération. Les analyses complexes peuvent être exécutées au moyen de tableurs ou d'un logiciel de modélisation computationnelle.

3.2 Gain d'antenne

Le gain d'antenne G varie en fonction de l'angle horizontal et vertical par rapport à l'axe de l'antenne. Aux fins de la procédure d'évaluation simplifiée décrite dans la deuxième étape de la section 3.0, une approche simple a été sélectionnée. Cette approche ne tient pas compte des diagrammes d'antenne réels ou les inclinaisons mécanique et électrique. À ce titre, le faisceau principal de l'antenne est considéré comme pointant vers l'horizon dans le plan horizontal. Se référer à la section *Analyse de la densité de*

puissance de l'Annexe A pour une explication détaillée sur la façon d'évaluer ces paramètres.

Comme mentionné dans la section 3.1, l'antenne sera considérée comme étant omnidirective aux fins de l'analyse de la zone à accès limité autour de l'antenne. À ce titre, le gain horizontal numérique normalisé est fixé à un (1). L'étude de plusieurs antennes à diverses bandes de fréquences a montré que pour les antennes de radiocommunication, le gain vertical numérique normalisé peut être simplifié en deux fonctions : une variation $\cos(\alpha)$ pour les bandes de fréquences de 30 à 54 MHz, et une variation $\cos^3(\alpha)$ au-delà de 54 MHz où α est l'angle de dépression verticale entre le plan de radiation horizontal de l'antenne et la direction du point d'observation (**Note :** Ce processus d'évaluation simplifié n'a pas été validé pour les fréquences au-dessous de 30 MHz).

En termes symboliques, pour une situation simple où aucune inclinaison n'est appliquée, ceci est représenté par :

$$G(\alpha,\theta) = G_{\max} \times G_v(\alpha) \times G_h(\theta) = G_{\max} \times G_v(\alpha) \times 1 = \begin{cases} G_{\max} \times \cos(\alpha) & 30\,\text{MHz} \le \text{f} \le 54\,\text{MHz} \\ G_{\max} \times \cos^3(\alpha) & 54\,\text{MHz} < \text{f} \end{cases}$$

Où :

G(α, θ) représente le gain d'antenne dans la direction du point observation
α est l'angle de dépression verticale (°) (voir la figure 8, pour une situation où aucune inclinaison n'est appliquée)
θ est l'angle de discrimination horizontal à partir du faisceau principal (°)
G_{max} est le gain maximal de l'antenne
$G_v(\alpha)$ est le gain de l'antenne vertical numérique normalisé en fonction du cosinus ($0 \le G_v(\alpha) \le 1$)
$G_h(\theta)$ est le gain de l'antenne horizontal numérique normalisé ($0 \le G_h(\theta) \le 1$). *Note: Puisque l'antenne est considérée comme étant omnidirective,* $G_h(\theta) = 1$.
$\cos(\alpha)$ peut être exprimé comme suit : $\frac{X}{\sqrt{X^2+Y^2}}$ ou $\frac{X}{R}$, où $R = \sqrt{X^2+Y^2}$ est la distance entre le centre de l'antenne et le point d'observation (Figure 8).

Comme mentionné ci-dessus, référez vous à l'Annexe A, sous la section intitulée *Analyse de la densité de puissance*, pour une explication détaillée de situations plus complexes où les inclinaisons mécanique et électrique sont appliquées et où les diagrammes d'antenne sont pris en considération.

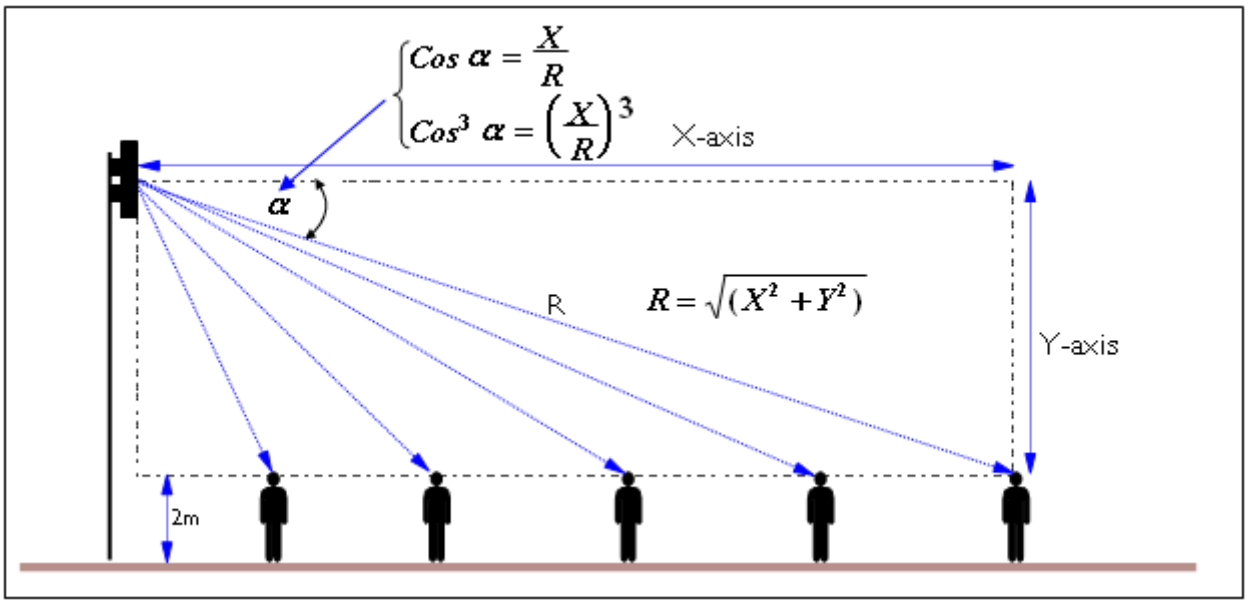

Figure 8 — Gain d'antenne en fonction du cosinus (aucune inclinaison appliquée)

3.3 Réflexion

Dans tous les cas, on tient compte de la réflexion. Dans cette situation, on suppose que le point d'observation se trouve à 2 mètres au-dessus du niveau de référence, soit le sol ou le toit. La réflexion de l'onde de sol est basée sur une étude de la FCC, qui montre que le rayonnement indirect ajoute, en moyenne, 60 % au rayonnement direct. Par conséquent, la réflexion est calculée à 60 %. C'est-à-dire que la force du rayonnement électrique réfléchi est estimée à 60 % du rayonnement direct à tous les points d'observation (Gailey, P. C., et Richard A. Tell, *An Engineering Assessment of the Potential Impact of Federal Radiation Protection Guidance on the AM, FM, and TV Broadcast Services, U.S. Environmental Protection Agency*, avril 1985). Comme détaillé dans l'Annexe A, le modèle de propagation utilisant cette contribution simplifiée de la réflexion se nomme la propagation en espace libre modifiée.

3.4 Service unique, services multiples et environnement radioélectrique

Dans le cas d'un service unique (une seule bande de fréquences), comme une installation à un pylône ou à une seule antenne sur un toit, de service mobile, cellulaire ou services de communications personnelles (SCP), la p.i.r.e. est la somme de la p.i.r.e. de tous les émetteurs et/ou de tous les canaux.

Dans le cas des services multiples (multiples bandes de fréquences), comme une combinaison d'antennes des services mobiles, cellulaires et SCP, on utilisera une technique d'analyse détaillée reposant sur des pratiques d'ingénierie reconnues et tenant compte de chacune des antennes. Toutefois, aux fins du présent document, on pourra opter pour la méthode conventionnelle du scénario de la pire éventualité (pour les installations d'antennes et les emplacements simples sur un toit), celle-ci donnant une plus grande protection au public. Dans cette approche, les valeurs de la p.i.r.e. peuvent être additionnées et appliquées au centre de la plus basse des antennes, qu'on estime être celle dont la distance du champ éloigné est la plus grande. La puissance du champ électrique ou la densité de

puissance au point d'intérêt (le point d'observation) est comparée à la plus faible limite mentionnée dans le CS6 compte tenu des bandes de fréquences présentes.

Les antennes émettrices voisines, autres que celles de l'installation examinée, peuvent aussi influencer l'évaluation, particulièrement si elles sont puissantes. Il est donc important d'évaluer l'environnement radioélectrique quand on procède à une analyse de la conformité. Les prédictions mathématiques et les mesures des champs ont indiqué qu'au-delà de 100 mètres, les stations émettrices sans fil ont un impact négligeable sur le niveau d'exposition général. Pour les stations de radiodiffusion, on doit particulièrement porter attention à celles qui se trouvent dans un rayon d'un kilomètre de l'installation proposée. Si on croit que des stations émettrices se trouvent à proximité et qu'elles peuvent augmenter le niveau de RF de l'installation examinée, il faut tenir compte de ces stations dans une analyse détaillée (voir la section 3.0, troisième étape).

4.0 Zone de non-exemption

Comme il est indiqué à la section 3.1, la zone générale de non-exemption est évaluée en tenant compte, à la fois de la limite séparant le champ proche du champ éloigné, et de la zone à accès limité (qui est basée sur 50 % de la limite CS6 applicable pour les environnements non contrôlés). Pour une p.i.r.e. et une dimension d'antenne données, le point d'intérêt **doit** se situer dans le champ éloigné **et** hors de la zone à accès limité. Si le point d'intérêt se trouve **à l'intérieur** de la zone générale de non-exemption, il faut appliquer des méthodes plus précises pour évaluer la conformité (voir la section 3.0, troisième étape).

Le **tableau 1** montre les formules utilisées pour établir la limite entre les champs proche et éloigné. On doit se reporter à la section 3.4 avant de les appliquer à des installations à antennes multiples.

Tableau 1 : limite des zones des champs proche et éloigné

Antennes électriquement petites ($D \leq \lambda$)	$R_{champ\ éloigné} = \lambda/2\pi$
Antennes électriquement grandes ($D > \lambda$)	$R_{champ\ éloigné} = ½D^2/\lambda$

Où : D est la plus grande dimension de l'antenne (m),
$R_{champ\ éloigné}$ est la distance entre le centre de rayonnement et la limite séparant le champ proche du champ éloigné (m),

et

λ est la longueur d'onde (m) [$\lambda=c/f$, où : c est la vitesse de la lumière ($3x10^8$m/s) et f est la fréquence d'exploitation (Hz)].

Exemple : Pour une antenne cellulaire d'une longueur de 1,22 m à 875 MHz :
$D=1,22$ m, $\lambda=0,34$ m, $D>\lambda$, par conséquent $R_{champ\ éloigné} = ½D^2/\lambda = 2,17$ m

5.0 Conclusion

Cette note technique propose un outil d'évaluation rapide pour évaluer la conformité aux normes d'exposition aux radiofréquences du CS6 de Santé Canada pour les installations d'antennes simples. La méthode permet d'évaluer, à la fois les installations à antenne unique et celles à antennes multiples. En outre, elle simplifie le processus d'évaluation. Toutefois, elle n'est pas recommandée pour l'analyse de conformité détaillée, où on doit appliquer des techniques basées sur des pratiques d'ingénierie reconnues prenant en considération la contribution de chacune des antennes présentes sur le site.

Références

1. Santé Canada. *Limites d'exposition humaine à l'énergie électromagnétique radioélectrique dans la gamme de fréquences de 3 kHz à 300 GHz — Code de sécurité 6*

2. Santé Canada. *Guide technique pour l'interprétation et l'évaluation de la conformité aux lignes directrices de Santé Canada sur l'exposition aux radiofréquences*

3. Industrie Canada. Règles et procédures sur la radiodiffusion, RPR-1 — *Règles générales*

4. Industrie Canada. Circulaire des procédures concernant les clients, CPC-2-0-03 — *Systèmes d'antennes de radiocommunications et de radiodiffusion*

5. Industrie Canada. Circulaire des procédures concernant les clients, CPC-2-0-20 — *Champs de radiofréquences — Panneaux et contrôle de l'accès*

6. Industrie Canada. LD-01 — *Lignes directrices relatives à la mesure des champs radioélectriques de la gamme de fréquences de 3 kHz à 300 GHz*

7. Industrie Canada. LD-08 —*Lignes directrices pour la préparation de rapports de conformité sur l'exposition aux radiofréquences (RF) pour les systèmes d'antenne de radiocommunication et de radiodiffusion*

Annexe A — Théorie générale des antennes

Régions des champs d'antenne

Dans le *Guide technique* de Santé Canada, les antennes sont groupées en deux catégories : les antennes électriquement petites et les antennes électriquement grandes. Les antennes électriquement petites sont celles dont la valeur D, la plus grande dimension de l'antenne (habituellement la longueur), est inférieure à la longueur d'onde de la fréquence d'exploitation recommandée ($D < \lambda$). Les antennes électriquement grandes sont celles dont la plus grande dimension est supérieure à la longueur d'onde de la fréquence d'exploitation recommandée ($D > \lambda$).

Très près d'une antenne, les caractéristiques des champs électromagnétiques sont imprévisibles et le champ E peut dominer en un endroit tandis qu'à quelques centimètres plus loin, il est possible que ce soit le champ H qui domine. Il est très difficile de faire des prédictions dans cette région et les ingénieurs de transmissions par antenne ont défini des régions limites pour catégoriser les comportements et les caractéristiques des champs électromagnétiques en fonction de la distance par rapport à l'élément rayonnant. La réflexion est un autre facteur de complexité. Toutes les ondes sont assujetties à la réflexion et les ondes électromagnétiques ne font pas exception. Les recherches entreprises par la FCC l'ont amenée à recommander qu'on estime la force du champ électrique réfléchi à 60 % de celui des ondes directes à tous les points d'observation.

En général, l'espace entourant une antenne est divisé en régions de champ appelées région du champ proche (région réactive ou évanescente du champ proche), région du rayonnement du champ proche (de Fresnel), région de transition (champ intermédiaire) et région du champ éloigné (zone de Fraunhofer). Voir la figure A1.

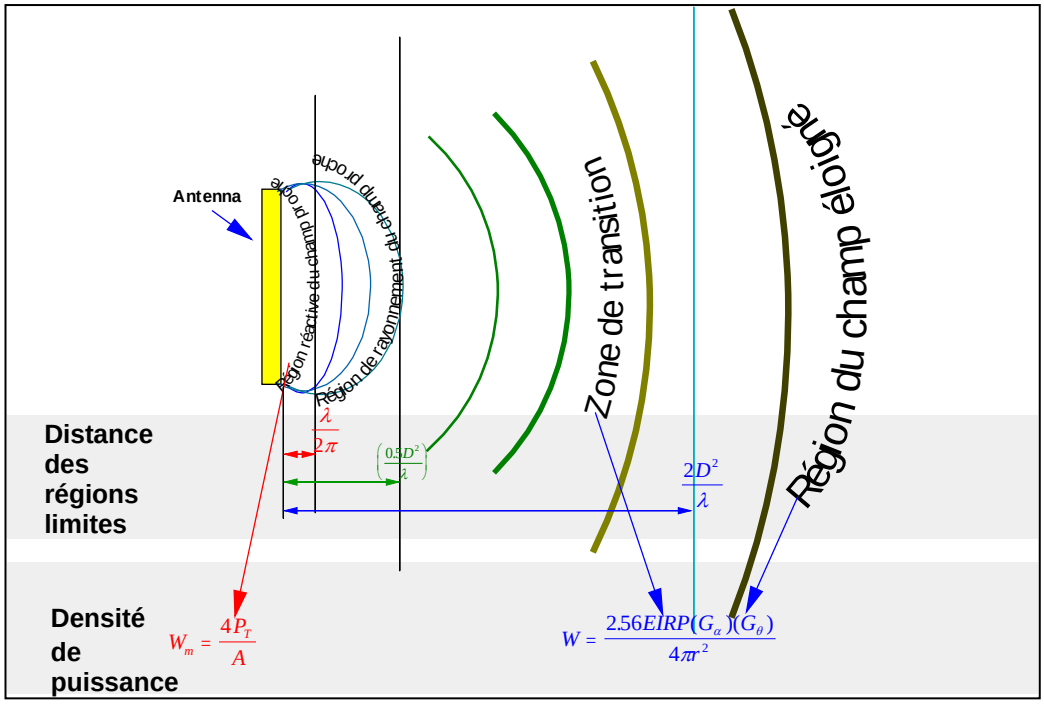

Figure A1 — Régions générales des champs d'antenne

Région réactive du champ proche — On l'appelle parfois région évanescente (évanouissement rapide). C'est l'espace à proximité immédiate de l'antenne ou la source de fuite où prédominent les éléments réactifs (énergie emmagasinée) et où l'énergie est emmagasinée dans le champ. Dans cette région, les champs E et H ne sont pas orthogonaux. Par conséquent, la valeur de l'impédance (Z) n'est pas 377 ohms, mais plutôt une impédance complexe. Toutefois, la relation mathématique de Z=E/H s'applique toujours. La valeur Z pourrait être une petite fraction des 377 ohms dans un champ à prédominance magnétique ou un grand nombre de fois 377 ohms dans un champ à prédominance électrique. La région s'étend à une distance de $\lambda/2\pi$ ou 0,159 λ. Pour les antennes électriquement petites (où $D < \lambda$), la limite de la région réactive du champ proche est aussi l'endroit où commence la région du champ éloigné. En termes de distance c'est : 1,6 m à 30 MHz, 32 cm à 150 MHz, 11 cm à 450 MHz, 5 cm à 875 MHz, et 2,5 cm à 1 950 MHz.

Région de rayonnement du champ proche — On l'appelle parfois zone de Fresnel. Dans cette région, qui commence à la distance de l'antenne où l'énergie du champ proche réactif a diminué, pour se réduire ensuite à presque rien, le gain d'antenne et la distribution angulaire du champ rayonnant varient proportionnellement à la distance de l'antenne. Ceci s'explique par le fait que les relations de phase et d'amplitude des ondes arrivant de différentes zones de l'antenne au point d'observation changent selon la distance. Pour les antennes électriquement *grandes* ($D > \lambda$), cette région s'étend de $\lambda/2\pi$ à $\frac{1}{2}D^2/\lambda$.

Région de transition (région du champ intermédiaire) — Pour une antenne électriquement petite comparativement à la longueur d'onde en question, on considère que la zone de transition se trouve à des distances situées entre 0,1 et 1,0 fois la longueur d'onde à partir de l'antenne, essentiellement entre la région de rayonnement du champ proche et la région du champ éloigné. Cette région présente une combinaison des caractéristiques trouvées dans les zones du champ proche et du champ éloigné, mais les caractéristiques du champ éloigné sont de plus en plus évidentes à mesure qu'on s'éloigne de l'antenne. Les champs E et H sont presque orthogonaux (la valeur Z est presque de 377 ohms). La région s'étend de $\frac{1}{2}D^2/\lambda$ à $2D^2/\lambda$ et aux fins du CS6, on estime que c'est dans cette région que commence le champ éloigné.

Région du champ éloigné (région de Fraunhofer) — Cette région est aussi appelée région de Fraunhofer. Elle est suffisamment loin de la source pour que les relations de phase et d'amplitude des ondes arrivant de diverses parties de l'antenne ne changent pas de façon appréciable avec la distance. Le gain d'antenne et la configuration angulaire sont indépendants de la distance, et la densité de puissance est inversement proportionnelle au carré de la distance de la source. Bien que la transition de la région du champ proche sans rayonnement se fasse graduellement, lors de la conception et l'ingénierie des antennes, on estime généralement que la région du champ éloigné commence à une distance d'environ $2D^2/\lambda$ pour les antennes à grande puissance et s'étend à l'infini (« D » étant la plus grande dimension d'ouverture linéaire et λ la longueur d'onde à la fréquence d'intérêt). Les champs E et H sont orthogonaux et Z=E/H=377 ohms. Cette région s'étend de $2D^2/\lambda$ à l'infini, mais le CS6 recommande que son étendue soit considérée comme étant $\frac{1}{2}D^2/\lambda$ à l'infini parce les auteurs de cette publication estiment que la région de transition et celle du champ éloigné représentent une seule et même région.

Établissement des limites des régions de l'antenne

Pour les antennes électriquement petites, les limites des régions des champs proche et éloigné se calculent comme suit :

Longueur d'onde $\lambda = \frac{c}{f}$

Champ proche (réactive)/Champ éloigné $= \frac{\lambda}{2\pi}$

Où : *f* est la fréquence d'opération (MHz)
λ est la longueur d'onde (m), et
c est la vitesse de la lumière (m/s)

Pour les antennes électriquement grandes, les limites des régions des champs proche et éloigné se calculent comme suit :

Champ proche (réactive)/Champ proche (région de rayonnement) $= \frac{\lambda}{2\pi}$

Champ proche (région de rayonnement) = Champ éloigné $= \frac{0{,}5D^2}{\lambda}$

Exemple :

Type d'antenne	Réseau d'antennes doublets à large bande
Longueur d'antenne (D)	1,22 m
Fréquence d'opération	875 MHz

Longueur d'onde $\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3x10^8}{875x10^6} = 0{,}34m$

Champ proche (réactive) $= \frac{\lambda}{2\pi} = \frac{0{,}34}{2\pi} = 0.05m$ *(ou 5 cm)*

Champ proche (région de rayonnement)/Champ éloigné $= \frac{0{,}5D^2}{\lambda} = \frac{0{,}5(1{,}22)^2}{0{,}34} = 2{,}17m$

Cette antenne est considérée comme étant électriquement grande, car D > λ.

Analyse de la densité de puissance

Les prédictions de la densité de puissance se font dans les régions du champ proche et du champ éloigné d'une antenne. Le type de modèle prédictif dépend de la région où la prédiction aura lieu. Comme la mesure des champs, la prédiction dans la région du champ proche est complexe et dépend du type d'antenne en cause. Toutefois, dans la région du champ éloigné, le modèle de l'espace libre utilisé est indépendant du type d'antenne. Pour les installations à antennes ou à fréquences multiples, il n'est pas toujours possible d'établir où se trouvent ces régions. Il peut se produire des situations où bien que le point d'intérêt soit dans le champ éloigné d'une antenne, il se trouve aussi dans la région du champ proche d'une autre antenne de la même installation. Ainsi, il est difficile et compliqué de prédire la densité de puissance, surtout quand il y a grand nombre d'antennes.

Dans la région du champ proche, il est très difficile de déterminer la densité de puissance avec exactitude. Dans la zone réactive du champ proche l'énergie (emmagasinée) diminue très rapidement avec la distance et a complètement disparu à une distance de plusieurs longueurs d'onde de la surface de l'antenne, car cette région s'étend à seulement $\lambda/2\pi$ ($0{,}159\lambda$). Par conséquent, la méthode du pire scénario possible entre en ligne de compte (pour les demandes de systèmes mobiles terrestres et hertziens).

$$W = 4\frac{P_T}{A}$$

Où : W est la puissance maximale (W/m^2),
P_T est la puissance d'alimentation de l'antenne (W), et
A est la surface d'ouverture équivalente de l'antenne (m).

Il est possible de prédire la densité de puissance dans la région de rayonnement du champ proche en utilisant plusieurs modèles d'ingénierie établis. Toutefois, les modèles choisis dépendent du type d'antenne examiné.

Pour les régions de transition et du champ éloigné, on utilise couramment la formule de densité de puissance d'onde plane et d'espace libre. Toutefois, conformément à la recommandation de la FCC, on utilise **une formule modifiée de la densité de puissance de l'espace libre** pour tenir compte de la réflexion des ondes de sol. Au point de réception, 2 m au-dessus du niveau du sol ou du toit, le champ E équivalent comprend les champs directs et réfléchis. La partie réfléchie du champ E est estimée à 60 % de la valeur du champ E direct conformément à la recommandation de la FCC (on ne tient pas compte de la réflexion sur les objets, comme des édifices, qui entourent le point de réception).

Densité de puissance $W = \frac{E_T^2}{Z}$

Au point de réception

$E_t = E_{Direct} + E_{Re\,flété} = E_{Direct} + \Gamma\, E_{Direct} = E + 0{,}6E = 1{,}6E$

$$W_M = \frac{(1{,}6E)^2}{120\pi} = \frac{1.6^2\left(\frac{\sqrt{30PIRE}}{r}\right)^2}{120\pi} = \frac{2{,}56\left(\frac{30PIRE}{r^2}\right)}{120\pi} = \frac{2{,}56PIRE}{4\pi r^2}$$

Où : W est la densité de puissance (W/m^2),
W_M est la densité de puissance en espace libre modifiée (W/m^2),
E_{Direct} est le champ électrique direct (V/m),
E_T est le champ électrique total (V/m),
Z est l'impédance en espace libre (ohms) et
Γ est le coefficient de réflexion.

Outre les modifications à la formule de densité de puissance en espace libre pour prendre en compte la réflexion des ondes sur le sol, une modification à également été apportée pour les diagrammes d'antenne vertical et horizontal. Les gains normalisés numériques vertical et horizontal sont introduits relativement au point d'observation comme il est indiqué à la figure A2.

Formule espace libre

$$W = \frac{P_T G}{4\pi r^2} = \frac{PIRE}{4\pi r^2}$$

Formule espace libre modifiée

$$W_M = \frac{2{,}56 P_T G}{4\pi r^2} = \frac{2{,}56 PIRE}{4\pi r^2} = \frac{2{,}56 PIRE_{\max} G_v(\beta) G_h(\theta)}{4\pi r^2}$$

Où : W est la densité de puissance en espace libre (W/m^2),
W_M est la densité de puissance en espace libre modifiée (W/m^2),
P_T est la puissance de l'émetteur alimentée dans l'antenne (W),
G est le gain numérique de l'antenne relative à une source isotropique,
PIRE est la puissance isotrope rayonnée équivalente de l'antenne (W),
$PIRE_{max}$ est la puissance isotrope rayonnée équivalente avec le gain d'antenne maximum (W),
β est l'angle vertical d'intérêt ou angle de discrimination verticale (voir la figure A2 ci-dessous),
β est égal à (α -inclinaison mécanique – inclinaison électrique) où α est l'angle de dépression verticale (°) (voir la figure A2 ci-dessous),
θ est l'angle de discrimination horizontale à partir du faisceau principal de l'antenne (°) (voir la figure A2 ci-dessous),
$G_v(\beta)$ est le gain de l'antenne vertical numérique normalisé ($0 \leq G_v(\beta) \leq 1$),
$G_h(\theta)$ est le gain de l'antenne horizontal numérique normalisé ($0 \leq G_h(\theta) \leq 1$), et
r est la distance du centre de radiation de l'antenne au point d'intérêt (m).

β et θ sont utilisés pour déterminer respectivement les réductions de gain vertical et horizontal qui sont appliquées à la $PIRE_{max}$.

Notes : En se référant à la section 3.2 du document principal (NT-261) et en utilisant la figure A2 ci-dessous comme référence,

(i) l'approximation du cosinus pour le gain de l'antenne vertical numérique normalisé $G_v(\beta)$ peut être généralisée avec l'introduction des inclinaisons comme suit :
$G_v(\beta) = \cos(\alpha$ – inclinaison mécanique – inclinaison électrique) où 30 MHz ≤ fréquence ≤ 54 MHz
$G_v(\beta) = \cos^3(\alpha$ - inclinaison mécanique – inclinaison électrique) où 54 MHz < fréquence

(ii) $G_h(\theta)$ est équivalent à 1 (un) car le diagramme horizontal de l'antenne est considéré omnidirectif.

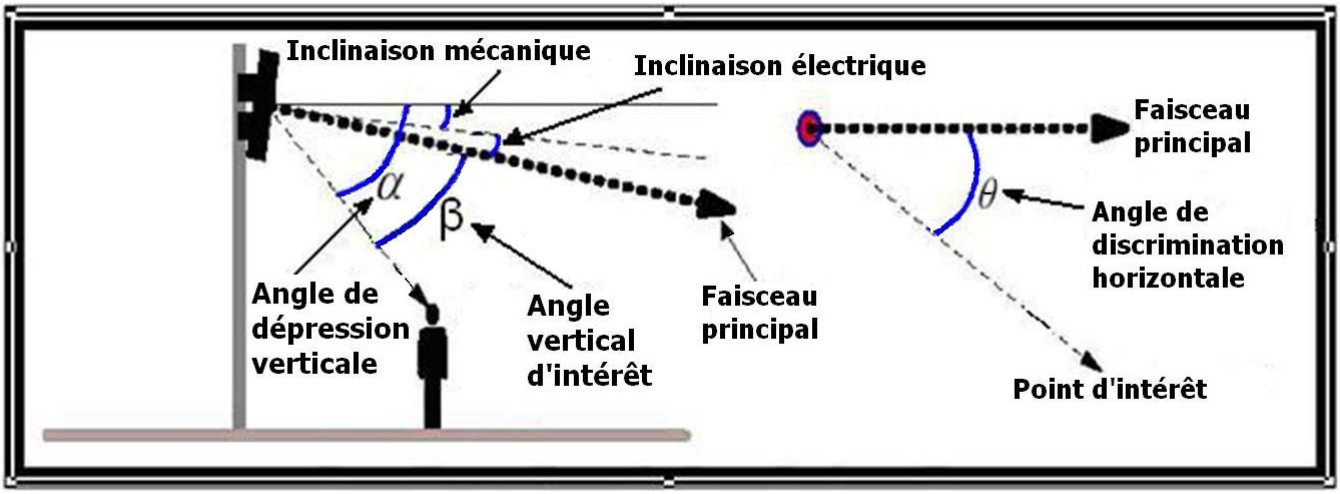

Figure A2 — Prise en compte des angles de discrimination vertical et horizontal avec les inclinaisons de l'antenne appliquées

Il existe de nombreux facteurs qui faussent la prédiction de l'intensité du champ. Un de ces facteurs est l'installation même de l'antenne émettrice. Ce facteur est généré par la précision limitée de l'azimut horizontal (pour les antennes directives) et dans l'inclinaison mécanique lors de l'installation de l'antenne. L'industrie des télécommunications estime que la précision est de l'ordre d'environ ±3° pour l'azimut et d'environ ±1° pour l'inclinaison mécanique. Essentiellement, cela signifie que l'angle réel au point d'intérêt pour les angles vertical (α) et horizontal (θ) peut être plus ou moins grand que l'angle calculé. Il est important de tenir compte de ces facteurs quand on prédit le niveau de densité de puissance. Pour éviter les erreurs, on adopte une méthode stricte en utilisant les diagrammes d'enveloppe d'antenne horizontal et vertical.

Considérations générales

Il est important de rassembler autant d'information que possible sur l'installation d'antennes examinée. On doit analyser les paramètres techniques de chacune des antennes émettrices présentes en tenant compte de la hauteur au-dessus du sol et du toit, des types d'antennes, de l'inclinaison mécanique vers le bas, de l'inclinaison électrique, des gains et des diagrammes de rayonnement (à la fois horizontal et vertical), de la bande de fréquences et de la puissance d'émission fournie à l'antenne (ou de la puissance d'émission et des pertes en ligne).

Calculs

Les calculs sont généralement faits à 2 m au-dessus du sol ou du toit. Pour les installations sur un toit, il faut envisager le scénario le moins favorable comme point de mesure lors de l'analyse du diagramme de disposition du toit.

Étapes :

(1) Définir la limite des régions des champs proche et éloigné pour les antennes examinées;
(2) Déterminer si le point de mesure se trouve dans la région du champ proche ou éloigné pour chacune des antennes en présence;
(3) Si le point de mesure se trouve dans le champ proche, utiliser le modèle approprié;

(4) Si le point de mesure se trouve dans le champ éloigné, utiliser la formule de l'espace libre (avec le cosinus ou le diagramme d'antenne) + une réflexion de 60 p. 100 (pour le champ électrique) à 2 m au-dessus du sol ou du toit seulement;
(5) Déterminer les angles horizontal et vertical au point de mesure;
(6) Tenir compte de l'inclinaison électrique et mécanique vers le bas de l'antenne;
(7) Utiliser le diagramme d'antenne pour estimer les gains H et V normalisés numériques;
(8) Tenir compte de la précision de l'installation des antennes (±3° pour le plan horizontal, ±1° pour le plan vertical);
(9) Répéter les procédures précédentes pour chacune des antennes émettrices dans une installation à antennes multiples;
(10) Calculer la densité de puissance de chacune des antennes émettrices au point de mesure;
(11) Normaliser la densité de puissance de chacune des antennes émettrices au point de mesure en fonction des limites du CS6 relativement aux fréquences d'exploitation (aux environnements non contrôlés ou aux environnements contrôlés);
(12) Additionner les valeurs de densité de puissance normalisées de toutes les sources au point de mesure;
(13) Répéter la procédure pour plusieurs points de mesure en déplaçant le point de mesure horizontalement (dans l'axe principal) en s'éloignant de l'antenne examinée;
(14) Identifier les points chauds, c'est-à-dire, où la densité de puissance normalisée = 0,5 ou > 0,5 (en termes de pourcentage, = 50 % ou > 50 %). Ces zones sont assujetties à des relevés de mesures ou à des mesures d'atténuation (voir la troisième étape décrite à la Section 3.0 du document principal, NT-261).

$$N_{CS6\%} = 100 \cdot \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{W_i}{W_{Limite_CS6}} \right), \text{ où } W_i = \sum_{j=1}^{m} W_{j,i}$$

$$N_{CS6\%} = 100 \cdot \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{E_i}{E_{Limite_CS6}} \right)^2, \text{ où } E_i = \sqrt{\sum_{j=1}^{m} E_{j,i}^2}$$

$$N_{CS6\%} = 100 \cdot \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{H_i}{H_{Limite_CS6}} \right)^2, \text{ où } H_i = \sqrt{\sum_{j=1}^{m} H_{j,i}^2}$$

Où :
n est le nombre total de fréquences présentes au point d'intérêt
m est le nombre total d'antennes
$W_{j,i}$, $E_{j,i}$ and $H_{j,i}$ sont respectivement la densité de puissance, le champ électrique et le champ magnétique au point d'intérêt associé à l'antenne *j* pour la composante de fréquence *i*.