

RECOMMANDATION UIT-R F.1765

Méthode de calcul de la puissance isotrope rayonnée équivalente cumulative produite par les systèmes à haute densité point à point du service fixe fonctionnant dans les bandes au-dessus de 30 GHz

(2006)

Domaine de compétence

La présente Recommandation décrit des méthodes qui permettent de calculer la puissance isotrope rayonnée équivalente cumulative (p.i.r.e.c.) produite par les stations d'émission des systèmes à haute densité point à point du service fixe (P-P HDFS) dans les bandes au-dessus de 30 GHz. Les administrations peuvent utiliser ces méthodes pour évaluer les brouillages que les stations des systèmes P-P HDFS sont susceptibles de causer à d'autres services.

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que les administrations peuvent avoir besoin d'une estimation de la puissance isotrope rayonnée équivalente cumulative (p.i.r.e.c.) produite par les stations d'émission d'un système P-P HDFS, rapportée à un point central, pour évaluer sur une base nationale ou bilatérale les brouillages que les stations des systèmes à P-P HDFS sont susceptibles de causer à d'autres services;
- b) que l'utilisation d'une commande automatique de la puissance d'émission (CAPE) dans les émetteurs des systèmes point à point permettrait de réduire la puissance rayonnée cumulative;
- c) qu'il est également nécessaire de calculer la p.i.r.e.c. en fonction de l'angle d'élévation à évaluer, compte tenu des mécanismes de propagation en mode (2),

reconnaissant

1 que, selon le numéro 5.547 du Règlement des radiocommunications (RR), les bandes 31,8-33,4 GHz; 37-40 GHz; 40,5-43,5 GHz; 51,4-52,6 GHz; 55,78-59 GHz et 64-66 GHz sont disponibles pour les systèmes HDFS,

notant

- a) que, dans sa Résolution 75, la CMR-2000 a invité l'UIT-R à élaborer d'urgence la base technique permettant de déterminer la zone de coordination d'une station terrienne de réception du service de recherche spatiale (espace lointain) avec des stations d'émission de systèmes à HDFS dans les bandes 31,8-32,3 GHz et 37-38 GHz;
- b) que, dans sa Résolution 79, la CMR-2000 a invité l'UIT-R à mener des études sur la distance de coordination entre des stations de radioastronomie fonctionnant dans la bande 42,5-43,5 GHz et des stations de systèmes HDFS,

recommande

1 d'utiliser provisoirement les modèles mathématiques suivants pour calculer la p.i.r.e.c. produite par les stations d'émission d'un système P-P HDFS dans l'hypothèse où toutes les antennes d'émission de ce système ont un angle d'élévation de 0° (voir les Notes 1, 2, 3, 5, 6 et 9):

1.1 lorsque l'angle d'élévation de la direction de la p.i.r.e.c. à évaluer vaut 0°:

$$p.i.r.e.c. = P_t + 1,061 (\log N_t)^2 + (-0,1164 G_t + 6,103) \log N_t + 0,9428 G_t - 2,62 \text{ dBW}$$

1.2 lorsque l'angle d'élévation de la direction de la p.i.r.e.c. à évaluer vaut 2,5°:

$$p.i.r.e.c. = P_t - 0,13743 (\log N_t)^3 + 1,8243 (\log N_t)^2 + 1,5569 \log N_t + 0,0052917 G_t^3 - 0,57530 G_t^2 + 19,985 G_t - 200,77 \text{ dBW}$$

1.3 lorsque l'angle d'élévation de la direction de la p.i.r.e.c. à évaluer vaut 5°:

$$p.i.r.e.c. = P_t + 0,54858 (\log N_t)^2 + 5,6488 \log N_t - 0,0036218 G_t^3 + 0,42380 G_t^2 - 16,645 G_t + 227,44 \text{ dBW}$$

1.4 lorsque l'angle d'élévation de la direction de la p.i.r.e.c. à évaluer vaut 10°:

$$p.i.r.e.c. = P_t + 9,086 \log N_t - 0,25 G_t + 8,30 \text{ dBW}$$

1.5 lorsque l'angle d'élévation de la direction de la p.i.r.e.c. à évaluer vaut 15°:

$$p.i.r.e.c. = P_t + 9,344 \log N_t - 0,25 G_t + 5,19 \text{ dBW}$$

1.6 lorsque l'angle d'élévation de la direction de la p.i.r.e.c. à évaluer vaut 20°:

$$p.i.r.e.c. = P_t + 9,522 \log N_t - 0,25 G_t + 3,19 \text{ dBW}$$

1.7 lorsque l'angle d'élévation de la direction de la p.i.r.e.c. à évaluer vaut 25°:

$$p.i.r.e.c. = P_t + 9,663 \log N_t - 0,25 G_t + 1,78 \text{ dBW}$$

1.8 lorsque l'angle d'élévation de la direction de la p.i.r.e.c. à évaluer vaut 30°:

$$p.i.r.e.c. = P_t + 9,775 \log N_t - 0,25 G_t + 0,74 \text{ dBW}$$

où:

P_t : puissance d'émission à l'entrée de l'antenne (dBW)

G_t : gain de l'antenne (dBi)

N_t : nombre d'émetteurs;

2 d'utiliser provisoirement les modèles mathématiques suivants pour calculer la p.i.r.e.c. produite par les stations d'émission d'un système P-P HDFS dans l'hypothèse où les antennes d'émission de ce système ont des angles d'élévation variables comme décrit dans l'Annexe 1 (voir les Notes 1, 2, 4, 5, 6, 8 et 9):

2.1 lorsque l'angle d'élévation de la direction de la p.i.r.e.c. à évaluer vaut 0°:

$$p.i.r.e.c. = P_t + 0,82096 (\log N_t)^3 + (-0,15210 G_t - 0,92771) (\log N_t)^2 + (0,024504 G_t^2 - 1,0198 G_t + 27,270) \log N_t - 0,077296 G_t^2 + 5,1982 G_t - 73,62 \text{ dBW}$$

2.2 lorsque l'angle d'élévation de la direction de la p.i.r.e.c. à évaluer vaut 2,5°:

$$p.i.r.e.c. = P_t + 0,93906 (\log N_t)^3 + (-0,31918 G_t + 3,4110) (\log N_t)^2 + (0,023524 G_t^2 + 0,096937 G_t - 4,8156) \log N_t + 0,0011791 G_t^3 - 0,21452 G_t^2 + 8,5619 G_t - 82,88 \text{ dBW}$$

2.3 lorsque l'angle d'élévation de la direction de la p.i.r.e.c. à évaluer vaut 5°:

$$p.i.r.e.c. = P_t + (-0,10457 G_t + 3,0618) (\log N_t)^3 + (0,027889 G_t^2 - 1,1358 G_t + 9,7775) (\log N_t)^2 + (-0,15803 G_t^2 + 9,3247 G_t - 132,36) \log N_t + 0,20619 G_t^2 - 13,901 G_t + 247,30 \text{ dBW}$$

2.4 lorsque l'angle d'élévation de la direction de la p.i.r.e.c. à évaluer vaut 10°:

$$p.i.r.e.c. = P_t + 9,263 \log N_t - 0,2511 G_t + 8,43 \text{ dBW}$$

2.5 lorsque l'angle d'élévation de la direction de la p.i.r.e.c. à évaluer vaut 15°:

$$p.i.r.e.c. = P_t + 9,299 \log N_t - 0,25 G_t + 5,45 \text{ dBW}$$

2.6 lorsque l'angle d'élévation de la direction de la p.i.r.e.c. à évaluer vaut 20°:

$$p.i.r.e.c. = P_t + 9,497 \log N_t - 0,25 G_t + 3,32 \text{ dBW}$$

2.7 lorsque l'angle d'élévation de la direction de la p.i.r.e.c. à évaluer vaut 25°:

$$p.i.r.e.c. = P_t + 9,651 \log N_t - 0,25 G_t + 1,84 \text{ dBW}$$

2.8 lorsque l'angle d'élévation de la direction de la p.i.r.e.c. à évaluer vaut 30°:

$$p.i.r.e.c. = P_t + 9,767 \log N_t - 0,25 G_t + 0,79 \text{ dBW};$$

3 de calculer la p.i.r.e.c. par interpolation, pour un angle d'élévation de la direction de p.i.r.e.c. à évaluer pour lequel aucune formule n'est donnée au point 1 ou 2 du *recommande*;

4 de partir, en règle générale, du centre de la zone de déploiement du système HDFS pour mesurer la distance jusqu'à la station brouillée (voir la Note 7).

NOTE 1 – L'Annexe 1 décrit une méthode de calcul des valeurs de p.i.r.e.c. données aux points 1 et 2 du *recommande*. Les valeurs de p.i.r.e.c. qui correspondent à un angle d'élévation de 0 ou à un petit angle d'élévation de la direction de la p.i.r.e.c. à évaluer seront utiles pour évaluer les brouillages selon les mécanismes de propagation en mode (1), tandis que celles qui correspondent à des angles d'élévation élevés de la direction de la p.i.r.e.c. à évaluer seront utiles pour évaluer les brouillages selon les mécanismes de propagation en mode (2).

NOTE 2 – Les formules données aux points 1 et 2 du *recommande* sont des formules approchées pour $G_t = 28$ à 46 dBi et $N_t = 32$ à $8\,192$. La probabilité pour que la p.i.r.e.c. dépasse les valeurs données aux points 1 et 2 du *recommande* est de 5% (autrement dit, le niveau de confiance des calculs est de 95%). Les erreurs maximales données par les formules approchées sont généralement de l'ordre de 0,5 dB, mais d'environ 1 dB pour certaines formules compliquées utilisant les polynômes du troisième ordre de G ou $\log N_t$. La détermination du niveau de confiance le plus approprié nécessite un complément d'étude.

NOTE 3 – Pour les formules données au point 1 du *recommande*, on part de l'hypothèse que les angles d'azimut des antennes de système HDFS sont uniformément distribués entre 0° et 360° et que les angles d'élévation de ces antennes valent 0°.

NOTE 4 – Pour les formules données au point 2 du *recommande*, on part de l'hypothèse que les angles d'azimut des antennes de système HDFS sont uniformément distribués entre 0° et 360° et que les angles d'élévation de ces antennes sont variables comme décrit au § 2.3 de l'Annexe 1. Un complément d'étude est nécessaire pour établir la fonction de distribution de probabilité la plus appropriée de ces angles d'élévation à utiliser dans chaque bande de fréquences.

NOTE 5 – Il est possible que les formules données aux points 1 et 2 du *recommande* surestiment la p.i.r.e.c. réelle étant donné qu'il n'est pas tenu compte de l'éventuel affaiblissement dû au fouillis. Un complément d'étude est nécessaire pour évaluer la valeur de ce facteur.

NOTE 6 – Dans le cas des systèmes HDFS employant la CAPE le terme P_t apparaissant dans les formules des points 1 et 2 du *recommande* devrait être la puissance d'émission dans les conditions normales sans précipitations. D'une manière générale, les brouillages causés à la station brouillée seront moins importants pendant des précipitations.

NOTE 7 – En général, la distance définie au point 4 du *recommande* conviendra pour évaluer la p.i.r.e.c. sous réserve que la distance entre le récepteur brouillé et la zone de déploiement du système HDFS ne soit pas trop courte par rapport au rayon de la zone de déploiement (voir le § 1.3 de l'Annexe 1).

NOTE 8 – La Recommandation UIT-R F.1498 contient d'autres distributions des angles d'élévation d'antennes de système HDFS fonctionnant dans la gamme 37-40 GHz. Un complément d'étude est nécessaire pour prendre en considération ces distributions dans la présente Recommandation.

NOTE 9 – Afin de faciliter la mise en œuvre informatique de la présente Recommandation, l'Appendice 1 à l'Annexe 1 présente les formules approchées des points 1 et 2 du *recommande* sous forme de tableaux.

Annexe 1

Méthode de calcul de la puissance de brouillage cumulative produite par les systèmes P-P HDFS

1 Méthode de simulation

1.1 Introduction

Dans sa Résolution 75, la CMR-2000 a demandé d'élaborer la base technique permettant de déterminer la zone de coordination d'une station terrienne de réception du service de recherche spatiale (espace lointain) avec des stations d'émission de systèmes HDFS dans les bandes 31,8-32,3 GHz et 37-38 GHz. De plus, dans sa Résolution 79, la CMR-2000 a invité l'UIT-R à mener des études sur la distance de coordination entre des stations de radioastronomie fonctionnant dans la bande 42,5-43,5 GHz et des stations de systèmes HDFS.

La présente Recommandation décrit des méthodes qui permettent de calculer la p.i.r.e.c. produite par les stations d'émission des systèmes P-P HDFS et que les administrations peuvent utiliser dans le cadre de leurs discussions nationales et bilatérales pour évaluer les brouillages que les stations des systèmes P-P HDFS sont susceptibles de causer à d'autres services. Ces méthodes pourront servir de base à des études complémentaires menées par les administrations afin de répondre aux *décide* des Résolutions 75 (CMR-2000) et 79 (CMR-2000).

La bande à 38 GHz étant prise comme exemple, des simulations de réseaux P-P HDFS ont été utilisées pour élaborer un modèle mathématique permettant d'évaluer la puissance de brouillage équivalente cumulative rayonnée par ces réseaux. Toutefois, les résultats des calculs ne dépendent pas de la fréquence. La puissance cumulative, qui est exprimée en fonction du nombre d'émetteurs, des gains d'antenne et des niveaux de puissance d'émission, s'avère être inférieure (en valeur logarithmique) à $10 \log N$, où N est le nombre d'émetteurs.

Le présent paragraphe décrit une méthode permettant d'évaluer la puissance rayonnée cumulative produite par une distribution de stations de système P-P HDFS grâce à une simulation informatique.

Pour calculer la puissance rayonnée cumulative équivalente à un seul émetteur se trouvant au point de la périphérie du réseau qui est le plus proche du récepteur de la station brouillée, les émetteurs du réseau P-P HDFS ont fait l'objet d'une simulation dans laquelle on a fait varier le nombre d'émetteurs, les gains d'antenne, les angles d'élévation et les angles d'azimut des antennes. Dans ce contexte, la puissance rayonnée totale est définie en termes de p.i.r.e.c.. Dans le cadre de cette simulation, la p.i.r.e.c. représente la somme des puissances rayonnées produites par un réseau d'émetteurs distribués dans une zone, reçue en un point distant et corrigée afin de tenir compte de l'affaiblissement sur le trajet en espace libre entre ce point et l'émetteur le plus proche, à savoir:

$$p.i.r.e.c. = \sum_{\text{toutes les directions}} P_{\text{reçue}} + L_{fs} \quad \text{dBW}^* \quad (1)$$

où:

L_{fs} : affaiblissement sur le trajet en espace libre.

1.2 Paramètres de système

Un passage en revue détaillé des systèmes P-P HDFS, y compris l'examen de la Recommandation UIT-R F.758 ainsi que de documents soumis à l'UIT-R et par d'autres sources a permis de déterminer un ensemble générique de paramètres, qui ont été utilisés dans les simulations.

Trois gains d'antenne, 28, 36 et 44 dBi, ont été considérés comme paramètres d'entrée du modèle. Un diagramme de rayonnement d'antenne de la Recommandation UIT-R F.1245 a été utilisé comme diagramme type. Une puissance d'émission de 20 dBW a été utilisée dans les simulations, mais la valeur absolue de la puissance n'est pas importante. Il n'a pas été tenu compte des effets de la polarisation.

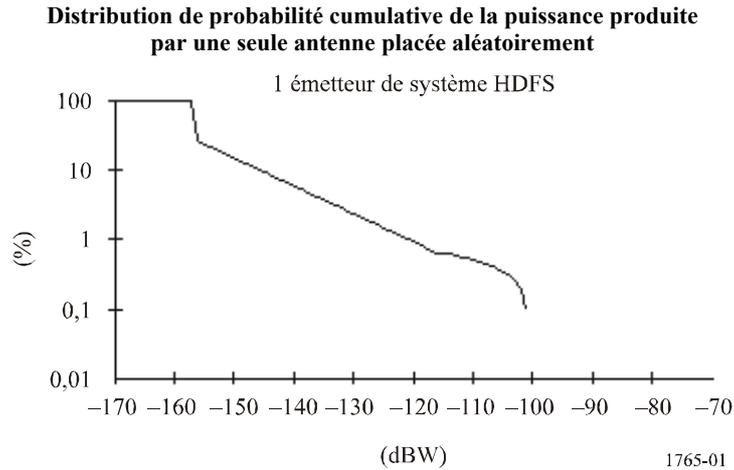
Des stations de réception de test avec des antennes isotropes d'un gain de 0 dBi, destinées à recevoir la puissance cumulative des signaux provenant de tous les émetteurs du réseau point à point, ont été placées à des distances de 50, 100 et 150 km de la périphérie du réseau.

1.3 Simulations analytiques

Des simulations ont été faites avec un nombre variable d'émetteurs dont les antennes tournent en azimut à des vitesses de balayage aléatoires comprises entre 0° et 1°, les azimuts de départ ayant été fixés aléatoirement entre 0° et 360°. En échantillonnant la puissance cumulative sur une certaine période, on obtient des distributions qui décrivent la probabilité pour que les antennes pointent dans une direction donnée et qui permettent ensuite d'évaluer les niveaux de puissance dans le cas le plus défavorable pour un certain degré de risque. L'examen des niveaux de puissance reçus au niveau des trois récepteurs de test, à 50, 100 et 150 km de la périphérie du réseau, indique une faible différence après correction pour tenir compte de l'affaiblissement sur le trajet en espace libre. Les récepteurs de test se trouvaient dans une seule direction par rapport au réseau étant donné qu'une symétrie circulaire était assurée par la rotation azimutale de toutes les antennes d'émission. Les émetteurs étaient répartis uniformément dans une zone circulaire de 25 km de diamètre et certaines simulations ont été répétées avec les émetteurs répartis dans des zones circulaires de 15 km et 35 km de diamètre. La Fig. 1 montre la distribution cumulative des niveaux de puissance pour un seul émetteur avec un gain d'antenne de 44 dBi et un angle d'élévation d'antenne de 0° et fait apparaître clairement le diagramme de rayonnement de l'antenne, comme prévu.

* Puissance reçue par une antenne isotrope (gain d'antenne de 0 dBi).

FIGURE 1



A mesure qu'on inclut davantage d'antennes, la distribution de probabilité change. La Fig. 2 montre la distribution pour 12 antennes tournant aléatoirement. Elle montre que deux distributions se forment: la puissance provenant du lobe principal d'une antenne se combine avec la puissance provenant des lobes latéraux des autres antennes du réseau pour donner un niveau de puissance d'environ -90 dBW (équivalent à environ 68 dBW après correction pour tenir compte de l'affaiblissement sur le trajet en espace libre), tandis que les puissances provenant des lobes latéraux de toutes les antennes se combinent ensemble pour former une distribution asymétrique plus large avec des niveaux de puissance plus faibles. A mesure que le nombre d'émetteurs augmente, cette crête plus faible associée aux lobes latéraux des antennes augmente en amplitude jusqu'à rejoindre la crête associée au lobe principal, et la distribution se rapproche d'une distribution log-normale, comme montré dans les exemples de la Fig. 3.

FIGURE 2

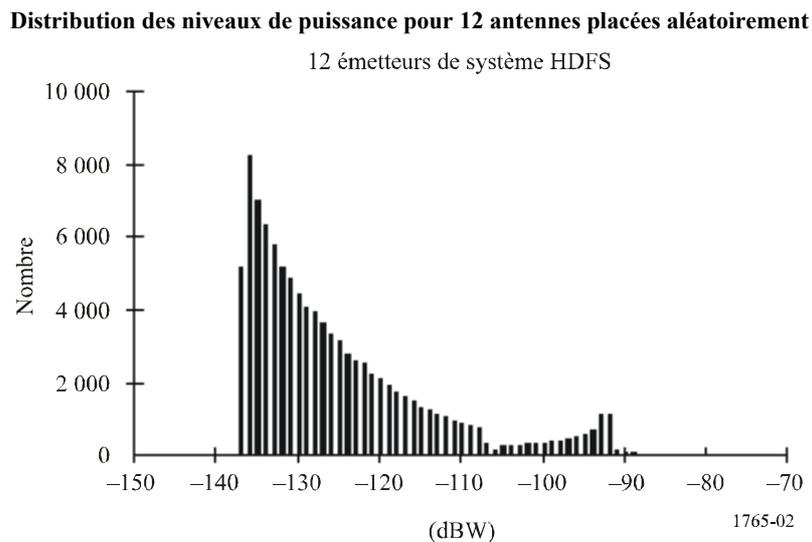
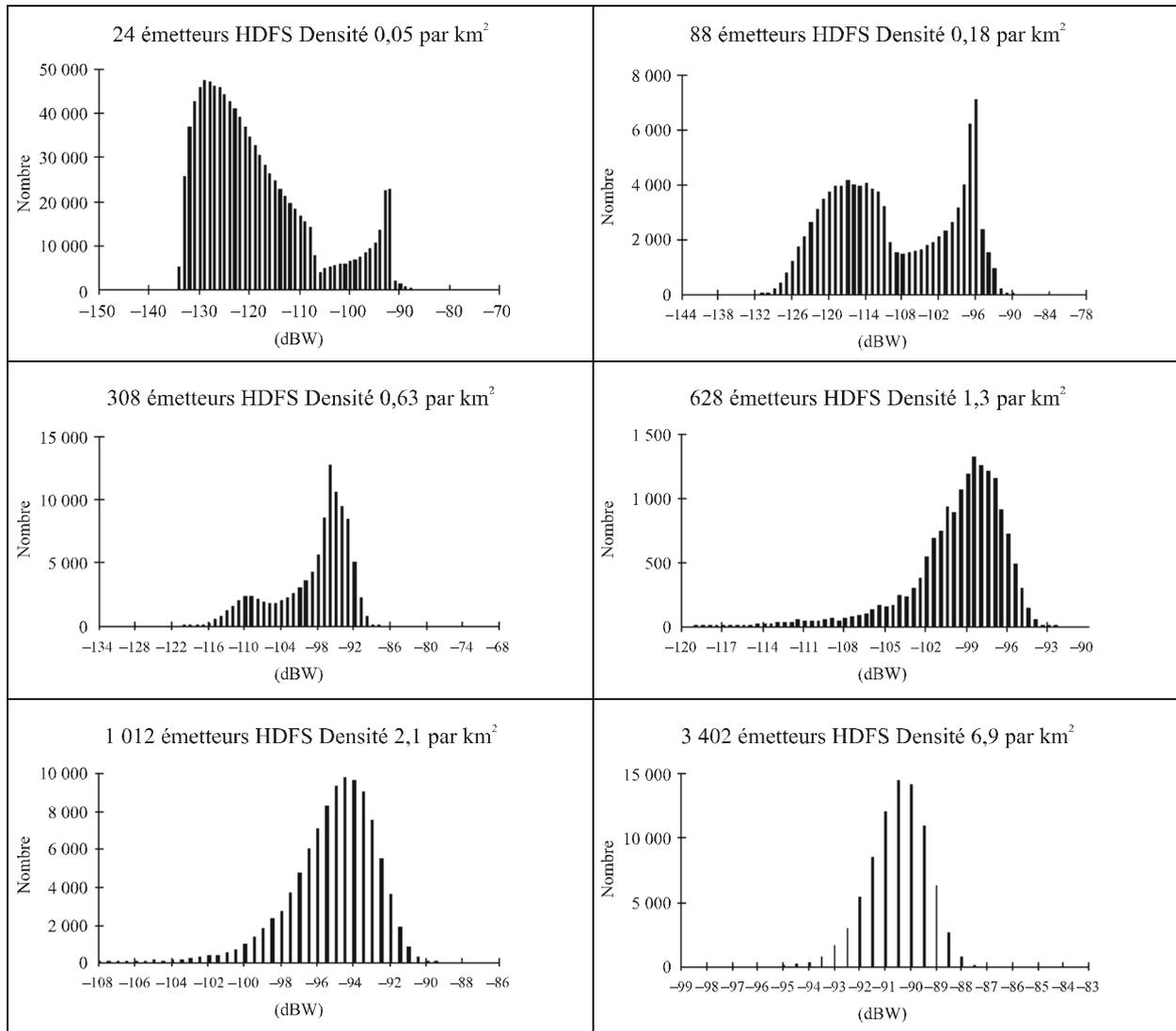


FIGURE 3

Exemples de distributions des niveaux de puissance pour un nombre croissant d'émetteurs de réseau point à point



1765-03

Les émetteurs ont été répartis, en nombre variable, dans une grille uniforme sur une zone circulaire de 25 km de diamètre, certaines simulations ayant été répétées pour des zones de 15 km et de 35 km de diamètre.

Pour évaluer les niveaux de puissance cumulative probables pour les calculs de brouillage, il convient de considérer les pires valeurs de brouillage produites dans les simulations, qui, après correction pour tenir compte de l'affaiblissement sur le trajet en espace libre, sont équivalentes à la puissance rayonnée cumulative, dans le cas le plus défavorable, produite par le réseau d'émetteurs. Comme l'amplitude de ces distributions continue à augmenter à mesure que la simulation progresse, le niveau de puissance de brouillage dans le cas le plus défavorable, augmente aussi et une longue série de tests a été réalisée afin de déterminer dans quelle mesure la valeur correspondant au cas le plus défavorable continue à augmenter avec la durée de simulation. Après une augmentation abrupte initiale, l'augmentation est ensuite plus lente. Des simulations ont été réalisées avec des pas temporels de 1 s et 1 min, la différence constatée entre les deux étant faible après un certain nombre de pas temporels. A mesure qu'on inclut davantage d'émetteurs dans la simulation, la vitesse de la

simulation diminue considérablement. Les simulations utilisées dans l'analyse ont toutes tourné pendant 100 000 pas de 1 min, afin de garantir que les résultats représentent un risque comparable.

1.4 Effets des angles d'élévation des antennes de système HDFS

Dans le paragraphe précédent, on a supposé que tous les angles d'élévation des antennes de système HDFS étaient de 0°. Toutefois, la p.i.r.e.c. peut varier en fonction de la plage d'angles d'élévation des antennes de système HDFS. Par conséquent, la distribution des angles d'élévation pour 8 539 liaisons fixes au Royaume-Uni fonctionnant dans la bande à 38 GHz a été analysée. On obtient alors la proportion d'émetteurs dans quatre plages d'angles d'élévation (voir le Tableau 1) et une autre simulation a été faite avec quatre groupes d'émetteurs dans la même proportion, pour un total de 1 950. Dans chaque groupe, l'angle d'élévation des antennes a été fixé aléatoirement dans la plage indiquée dans le Tableau 1.

La simulation a été exécutée dans deux cas, avec les angles d'élévation fixés aléatoirement dans les groupes énumérés dans le Tableau 1, et avec tous les angles d'élévation mis à zéro. Les résultats sont comparés dans le Tableau 2, qui donne la puissance rayonnée cumulative calculée.

FIGURE 4
Distribution des angles d'élévation des liaisons fonctionnant à 38 GHz au Royaume-Uni
(A noter que l'échelle sur l'axe vertical est logarithmique)

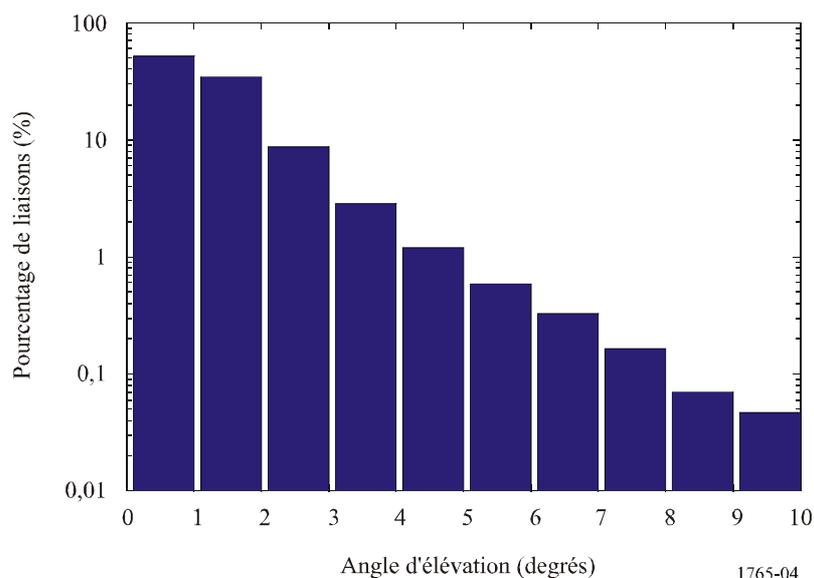


TABLEAU 1
Distribution des angles d'élévation des antennes

Plage d'angles d'élévation (degrés)	Pourcentage de liaisons à 38 GHz dans la plage, d'après la Fig. 4	Nombre d'émetteurs dans chaque groupe de simulation
0-1	51,7	1 012
1-2	34,4	665
2-5	12,7	249
5-10	1,2	24

TABLEAU 2

Gain d'antenne (dBi)	p.i.r.e.c. (dBW)		Différence (dB)
	Angle d'élévation variable	Angle d'élévation nul	
28	64,9	65,4	0,5
36	68,9	70,1	1,2
44	73,3	75,2	1,9

Pour les distributions réelles des angles d'élévation considérées, ces résultats ne présentent pas une grande différence. Toutefois, il est à noter que le Tableau 2 montre le cas où seule la p.i.r.e.c. en direction de l'horizon (0°) a été évaluée. Le § 2 porte sur les cas où la p.i.r.e.c. dans des directions associées à des angles d'élévation supérieurs à 0° a été évaluée. Dans ces cas, les différences entre la situation correspondant aux angles d'élévation variables et la situation correspondant aux angles d'élévation nuls peuvent être importantes suivant le gain des antennes du système HDFS.

Les résultats ci-dessus ont été obtenus pour des émetteurs de réseau P-P HDFS répartis dans une zone circulaire de 25 km de diamètre. Les simulations ont été répétées pour des zones de 15 km et de 35 km de diamètre, pour étudier l'incidence de la densité des liaisons.

Une très légère différence a été constatée concernant la puissance rayonnée cumulative lorsque les émetteurs sont répartis dans des zones avec des diamètres différents, au moins pour un diamètre de 15 km et un diamètre de 35 km. Les niveaux de puissance sont pratiquement indépendants du diamètre de la zone dans laquelle les émetteurs sont répartis, à $\pm 0,5$ dB près. On considère donc qu'il n'est pas nécessaire d'inclure le diamètre de la zone comme paramètre dans le modèle à utiliser pour calculer la p.i.r.e.c. produite par les émetteurs des systèmes P-P HDFS.

2 Calculs théoriques au moyen d'une intégrale de convolution

2.1 Méthode générale d'analyse et niveau de confiance des calculs

Le paragraphe précédent a décrit une méthode de simulation permettant de calculer la p.i.r.e.c. produite par un certain nombre d'émetteurs de système HDFS. Toutefois, on peut rappeler qu'en général une méthode de simulation nécessite beaucoup de temps avant d'arriver à des résultats fiables et devrait être évitée, si d'autres méthodes sont disponibles et que les erreurs de calcul inhérentes aux résultats ne peuvent pas être quantifiées précisément, en particulier dans le cas d'un petit pourcentage pour lequel les valeurs peuvent être dépassées.

En réalité, il s'agit d'un problème purement mathématique dans lequel une fonction de densité de probabilité (pdf) de la puissance rayonnée cumulative produite par un certain nombre d'émetteurs de système HDFS doit être examinée. D'après une certaine théorie, une fonction pdf exacte peut être obtenue analytiquement comme suit:

Supposons que $p(N_t, x)$ est la fonction pdf de la puissance rayonnée cumulative, x (exprimée en valeur numérique), produite par N_t émetteurs, la fonction pdf de la p.i.r.e.c. produite par $M_t + N_t$ émetteurs peut alors être calculée comme suit par une intégrale de convolution:

$$p(M_t + N_t, x) = \int_0^x p(M_t, u) \cdot p(N_t, x - u) \cdot du \quad (2)$$

Dans la formule (2), on suppose que l'angle d'azimut de chaque émetteur a une valeur aléatoire comprise entre 0° et 360° et qu'on peut ignorer certaines différences d'emplacements des émetteurs de système HDFS à l'intérieur de la zone de déploiement. En répétant cette intégrale de convolution, on peut calculer la fonction pdf pour un nombre quelconque d'émetteurs. Dans les calculs réels, M_t a été choisi égal à N_t et les fonctions pdf ont été calculées pour $N_t = 1, 2, 4, 8, 16, \dots, 32\ 768$ émetteurs.

Tout d'abord, pour $N_t = 1$, on désigne respectivement par ε_f et α_f l'angle d'élévation et l'angle d'azimut d'une antenne d'émission de système HDFS et par ε_u et α_u l'angle d'élévation et l'angle d'azimut de la direction du brouillage à évaluer. Dans ce cas, l'angle de séparation, φ , entre la direction de l'antenne du système HDFS et la direction du brouillage à évaluer peut être calculé comme suit:

$$\varphi = \arccos(\cos\varepsilon_f \cdot \cos\varepsilon_u \cdot \cos(\alpha_f - \alpha_u) + \sin\varepsilon_f \cdot \sin\varepsilon_u) \quad (3)$$

Sans perte de généralité, il est possible de supposer que $\alpha_u = 0$ et que ε_u a une valeur donnée (0 ou une valeur positive). En outre, on peut supposer que α_f est uniformément distribué entre 0° et 360° . Il faut définir la distribution de ε_f , ce qui fera l'objet d'un examen détaillé dans les paragraphes qui suivent.

Si la valeur de φ est déterminée par la formule (3), le gain de l'antenne de système HDFS dans la direction du brouillage à évaluer est calculé conformément au diagramme de rayonnement d'antenne défini dans la Recommandation UIT-R F.1245. On peut donc déterminer la fonction pdf de la p.i.r.e.c. pour $N_t = 1$.

Ensuite, pour $N_t = 2$, la fonction pdf (pas de 0,01 dB) peut être calculée conformément à la formule (2). On peut répéter cette procédure pour $N_t = 4, 8, 16, \dots, 32\ 768$.

Dans le cadre de cette étude, un niveau de confiance de 95% a généralement été utilisé. Cela signifie que la probabilité pour que la p.i.r.e.c. dépasse les résultats de calcul est aussi faible que 5%. En outre, certains résultats (Tableau 3b) sont présentés avec un niveau de confiance de 99,9%.

2.2 Cas d'antennes de système HDFS avec un angle d'élévation nul

Dans ce cas, les angles d'élévation de toutes les antennes de système HDFS sont supposés être de 0° ($\varepsilon_f = 0$ pour toutes les antennes de système HDFS). Pour $N_t = 1$, la plage d'azimuts de 180° a été divisée en 10 000 portions. Ainsi, la probabilité pour chaque intervalle de 0,01 dB a été calculée. Comme le niveau de puissance d'émission n'est pas un facteur important, il a été supposé être de 0 dBW.

Pour N_t supérieur à 1, la fonction pdf a été calculée conformément à la formule (2). La Fig. 5a présente les résultats pour $G_t = 28$ dB et $\varepsilon_u = 0^\circ; 2,5^\circ; 5^\circ; 10^\circ; 15^\circ; 20^\circ$. La Fig. 5b correspond au cas où $G_t = 44$ dB. P_t est supposé être de 0 dBW dans tous les cas.

On constate que sur la Fig. 5a, la différence entre les courbes pour $\varepsilon_u = 0^\circ$ et $\varepsilon_u = 2,5^\circ$ est très faible car l'ouverture de faisceau d'une antenne de 28 dBi de gain atteint $6,7^\circ$ alors que sur la Fig. 5b, la différence entre les courbes pour $\varepsilon_u = 0^\circ$ et $\varepsilon_u = 2,5^\circ$ est très grande car l'ouverture de faisceau d'une antenne de 44 dBi de gain ne vaut que $1,1^\circ$.

FIGURE 5a

p.i.r.e.c. dans diverses directions associées à divers angles d'élévation en fonction du nombre total d'émetteurs de système HDFS ($G_t = 28$ dB et tous les angles d'élévation des antennes de système HDFS sont de 0°)

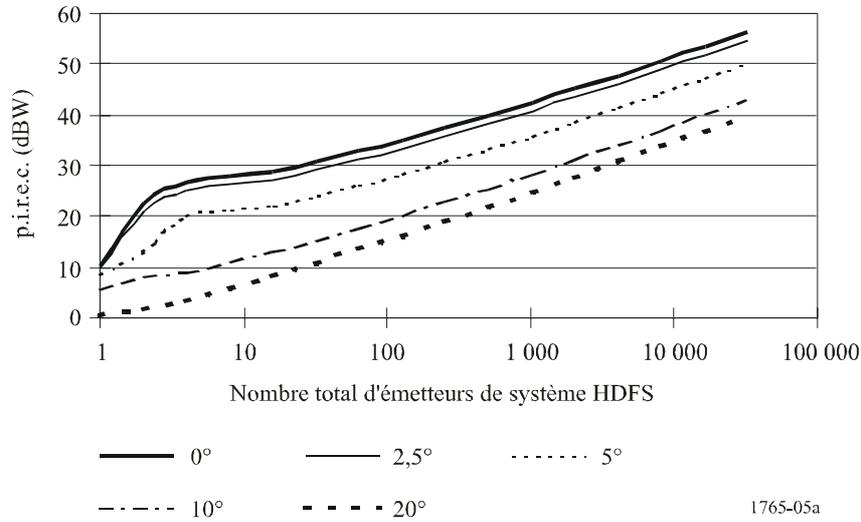
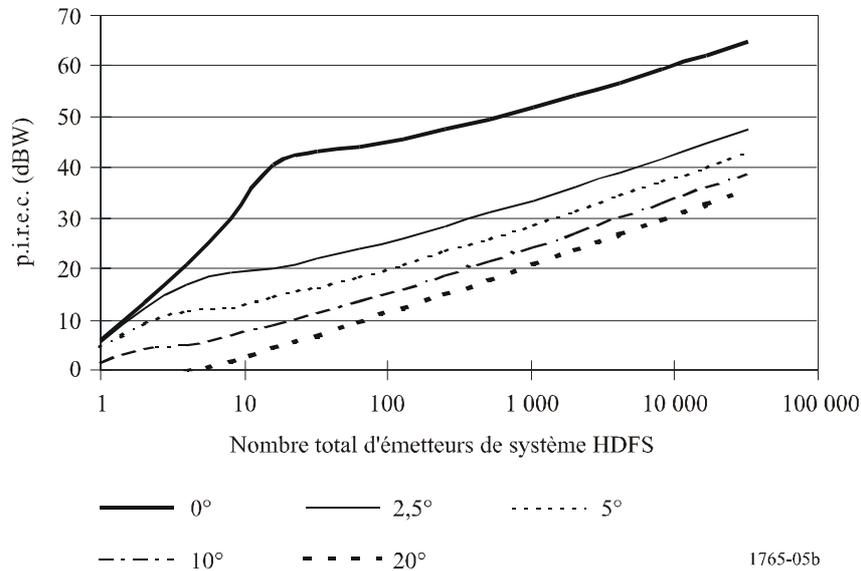


FIGURE 5b

p.i.r.e.c. dans diverses directions associées à divers angles d'élévation en fonction du nombre total d'émetteurs de système HDFS ($G_t = 44$ dB et tous les angles d'élévation des antennes de système HDFS sont de 0°)



On constate également que sur la Fig. 5b, pour $\epsilon_u = 0^\circ$, l'augmentation de la p.i.r.e.c. est rapide pour un petit nombre d'émetteurs de système HDFS et devient plus lente pour un grand nombre d'émetteurs de systèmes HDFS. Les valeurs de p.i.r.e.c. (dBW) en fonction de G_t (dBi) et du nombre d'émetteurs de système HDFS (N_t) sont données dans le Tableau 3a pour $\epsilon_u = 0^\circ$ et pour un niveau de confiance de 95%.

Le Tableau 3b donne les résultats pour un niveau de confiance de 99,9%.

TABLEAU 3a

p.i.r.e.c. en dBW en fonction de G_t (dBi) et du nombre d'émetteurs (N_t)
(niveau de confiance de 95%)

G_t (dBi)	p.i.r.e.c. (dBW) pour divers nombres d'émetteurs de système HDFS ($N_t = 32$ à 32 768)										
	32	64	128	256	512	1024	2 048	4 096	8 192	16 384	32 768
28	30,86	32,81	34,97	37,29	39,75	42,34	45,04	47,82	50,66	53,54	56,46
30	32,35	34,18	36,25	38,51	40,92	43,47	46,14	48,89	51,72	54,58	57,49
32	33,69	35,49	37,54	39,74	43,11	44,61	47,24	49,96	52,76	55,62	58,52
34	34,89	36,89	38,84	41,00	43,31	45,77	48,36	51,05	53,83	56,67	59,55
36	36,10	38,38	40,20	42,27	44,53	46,94	49,49	52,15	54,90	57,72	60,59
38	37,98	39,72	41,51	43,56	45,76	48,13	50,63	53,26	55,98	58,78	61,63
40	39,84	40,92	42,90	44,86	47,01	49,33	51,79	54,38	57,07	59,84	62,68
42	41,62	42,12	44,39	46,22	48,29	50,54	52,96	55,50	58,16	60,91	63,73
44	43,24	43,98	45,74	47,53	49,58	51,78	54,14	56,65	59,27	61,99	64,79
46	44,72	45,85	46,94	48,92	50,88	53,03	55,34	57,80	60,39	63,08	65,86

TABLEAU 3b

p.i.r.e.c. en dBW en fonction de G_t (dB) et du nombre d'émetteurs (N_t)
(niveau de confiance de 99,9%)

G_t (dB)	p.i.r.e.c. (dBW) pour divers nombres d'émetteurs ($N_t = 32$ à 32 768)										
	32	64	128	256	512	1 024	2 048	4 096	8 192	16 384	32 768
28	33,59	35,11	36,85	38,79	40,92	43,24	45,71	48,31	51,02	53,81	56,65
30	35,13	36,60	38,26	40,13	42,20	44,46	46,88	49,44	52,11	54,87	57,70
32	36,67	38,10	39,70	41,50	43,50	45,70	48,06	50,58	53,22	55,95	58,76
34	38,34	39,64	41,16	42,89	44,82	46,95	49,26	51,73	54,33	57,03	59,82
36	39,94	41,18	42,64	44,30	46,16	48,23	50,48	52,90	55,46	58,13	60,89
38	41,44	42,71	44,14	45,73	47,53	49,52	51,72	54,08	56,60	59,23	61,96
40	43,00	44,37	45,67	47,19	48,91	50,84	52,97	55,28	57,75	60,35	63,05
42	44,85	45,98	47,21	48,67	50,32	52,18	54,25	56,50	58,91	61,47	64,14
44	46,66	47,48	48,73	50,16	51,75	53,54	55,54	57,73	60,10	62,61	65,24

On a cherché à établir une formule approchée pour les valeurs de p.i.r.e.c. données dans le Tableau 3a en appliquant la méthode d'approximation mini-max pour deux variables. On a établi la formule suivante comme formule approchée raisonnable pour $G_t = 28$ à 46 dBi et $N_t = 32$ à 8 192:

$$p.i.r.e.c. = P_t + 1,061 (\log N_t)^2 + (-0,1164 G_t + 6,103) \log N_t + 0,9428 G_t - 2,62 \quad \text{dBW} \quad (4)$$

Il s'agit de la formule présentée au point 1.1 du *recommande* du texte principal. L'erreur maximale donnée par cette formule approchée est de 0,52 dB. On a appliqué la même méthode d'approximation pour d'autres valeurs de ϵ_u , ce qui a permis d'établir les formules données aux points 1.2 à 1.8 du *recommande* du texte principal. Lorsque $\epsilon_u = 2,5^\circ$ ou 5° , les courbes sont plus compliquées et les formules approchées nécessitent donc des polynômes d'ordre plus élevé.

2.3 Cas d'antennes de système HDFS avec des angles d'élévation variables

L'hypothèse d'un angle d'élévation nul adoptée dans le paragraphe précédent est quelque peu fictive. Dans les situations réelles, les antennes de système HDFS ont des angles d'élévation variables. Toutefois, il est difficile d'établir une fonction pdf type des angles d'élévation. Dans l'analyse présentée ici, on utilise l'exemple de fonction pdf des angles d'élévation des antennes de système HDFS donné sur la Fig. 4. Toutefois, il est à noter que tous les angles d'élévation présentés sur la Fig. 4 sont supérieurs ou égaux à 0. Dans la réalité, il est raisonnable de supposer que les angles d'élévation peuvent être positifs ou négatifs et que la fonction pdf des angles d'élévation est symétrique par rapport à 0. Par conséquent, la fonction pdf donnée sur la Fig. 4 est convertie en distribution symétrique, présentée sur la Fig. 6 et dans le Tableau 4.

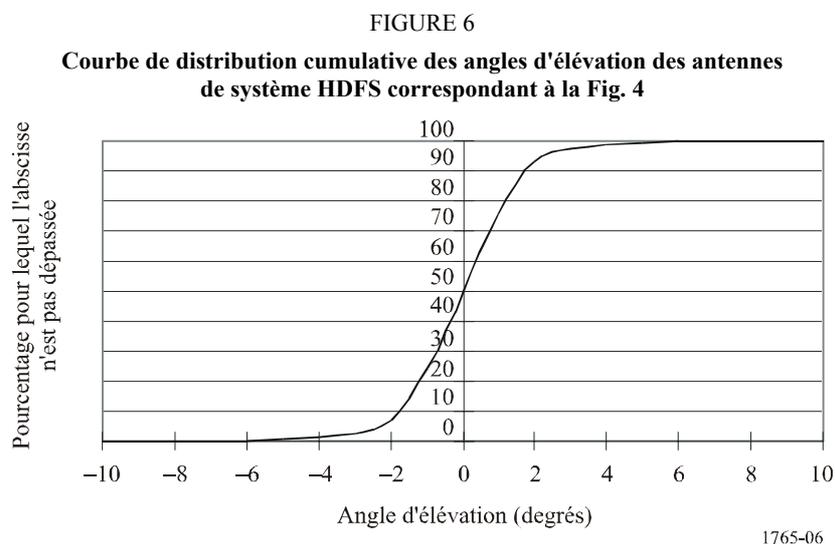


TABLEAU 4
 Distribution cumulative des angles d'élévation des antennes
 de système HDFS correspondant à la Fig. 4

Degrés	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0
Pourcentage	0	0,023	0,06	0,145	0,31	0,6	1,2	2,7	6,95	24,15	50
Degrés	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Pourcentage	75,85	93,05	97,3	98,8	99,4	99,69	99,855	99,94	99,977	100	

Cette hypothèse étant prise, la fonction pdf de la p.i.r.e.c. a été calculée pour $N_t = 1$. Pour les valeurs de N_t plus grandes, les fonctions pdf ont été calculées conformément à la formule (2). Les résultats sont présentés sur les Fig. 7a et 7b. P_t est supposé être égal à 0 dBW dans tous les cas.

FIGURE 7a

p.i.r.e.c. dans diverses directions associées à divers angles d'élévation en fonction du nombre total d'émetteurs de système HDFS ($G_t = 28$ dB et les angles d'élévation des antennes de système HDFS sont variables)

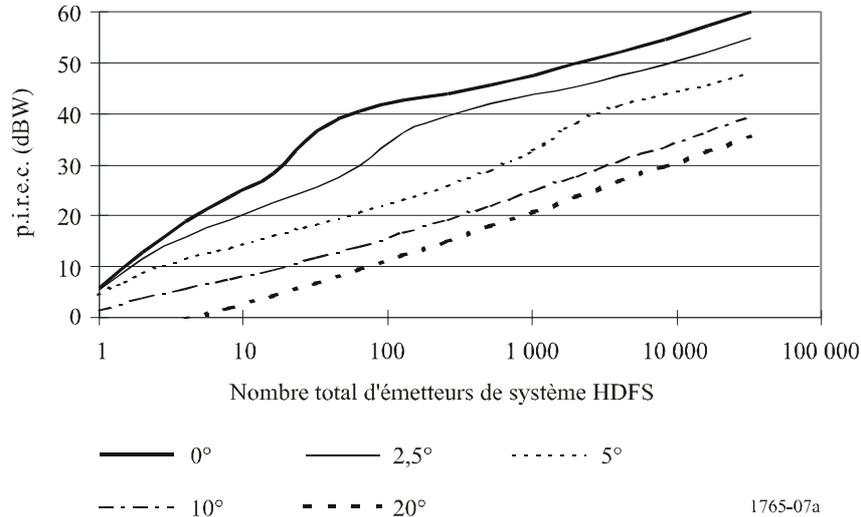
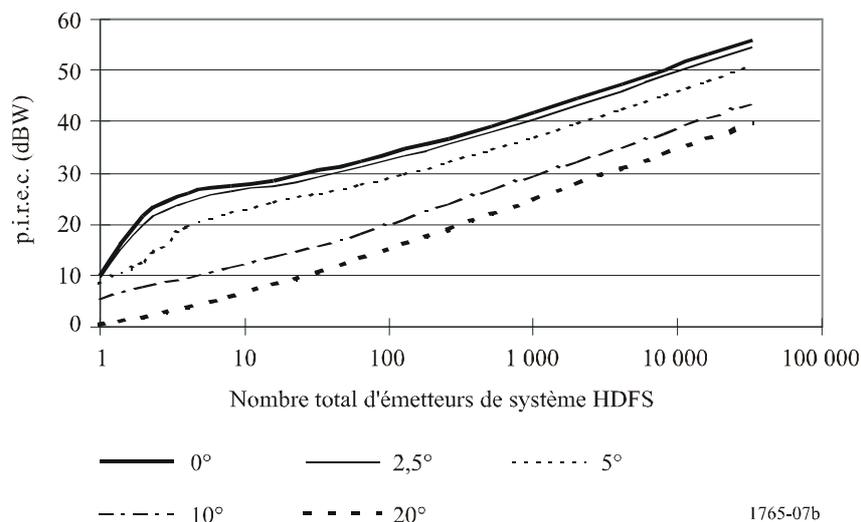


FIGURE 7b

p.i.r.e.c. dans diverses directions associées à divers angles d'élévation en fonction du nombre total d'émetteurs de système HDFS ($G_t = 44$ dB et les angles d'élévation des antennes de système HDFS sont variables)



Si on compare les Fig. 5a et 7a, on constate que les différences sont très faibles. Cela signifie que, lorsque le gain des antennes de système HDFS est faible, l'hypothèse d'angles d'élévation variables a une faible incidence sur la p.i.r.e.c., car l'ouverture de faisceau des antennes est relativement grande. En revanche, les différences entre les Fig. 5b et 7b sont grandes, car l'ouverture de faisceau des antennes est très petite. Autrement dit, l'incidence des angles d'élévation variables varie en fonction du gain des antennes de système HDFS.

Un certain nombre de formules approchées ont été établies pour $G_t = 28$ à 46 dBi et $N_t = 32$ à 8 192 et pour diverses valeurs de ε_u . Les résultats sont présentés au point 2 du *recommande* du texte principal. On constate que lorsque $\varepsilon_u = 0^\circ; 2,5^\circ$ ou 5° , les courbes sont plus compliquées et nécessitent donc des polynômes d'ordre plus élevé pour pouvoir établir une bonne approximation.

3 Comparaison entre la simulation analytique et la simulation probabiliste

Une simulation a été faite afin de comparer les résultats obtenus dans le § 2. Cette simulation était fondée sur une cellule carrée de 1 km de côté avec une densité donnée (égale dans ce cas au nombre) d'émetteurs de système HDFS sans aucune commande de puissance, un gain d'antenne maximal de 44 dBi avec un diagramme d'antenne conforme à la Recommandation UIT-R F.1245 et un angle d'élévation de 0° , un récepteur situé à un azimut aléatoire par rapport à la cellule HDFS et à une distance de 100 km, avec un gain d'antenne de 0 dBi.

Dans ce cas, la puissance reçue au niveau du récepteur est donnée par la formule (5).

$$P_r = PIREC + 20 \log \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right) \quad (5)$$

où:

- P_r : puissance reçue au niveau d'une antenne de 0 dBi située à une distance d de la cellule HDFS (dBW)
- $PIREC$: p.i.r.e. cumulative produite par les émetteurs de la cellule (dBW)
- λ : longueur d'onde (m)
- d : distance entre la cellule et l'antenne de 0 dBi au niveau de laquelle la puissance est évaluée (m).

Pour un seul émetteur, P_r est donné par la formule (6).

$$P_r = P_e + G_e + 20 \log \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right) \quad (6)$$

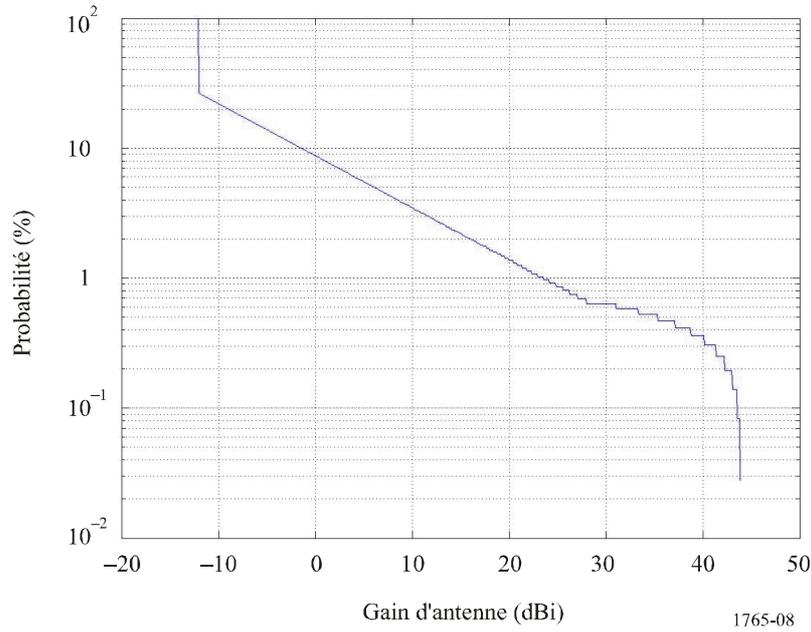
où:

- P_r : puissance reçue au niveau d'une antenne de 0 dBi située à une distance d de la cellule HDFS (dBW)
- P_e : puissance d'émission produite par l'unique émetteur de la cellule (dBW)
- G_e : gain d'antenne de l'émetteur dans la direction du récepteur avec une antenne de 0 dBi
- λ : longueur d'onde (m)
- d : distance entre la cellule et l'antenne de 0 dBi au niveau de laquelle la puissance est évaluée (m).

Le gain d'antenne est la seule variable, il varie entre -12 et 44 dBi en fonction de l'azimut conformément à la courbe de la fonction cdf donnée sur la Fig. 8.

FIGURE 8

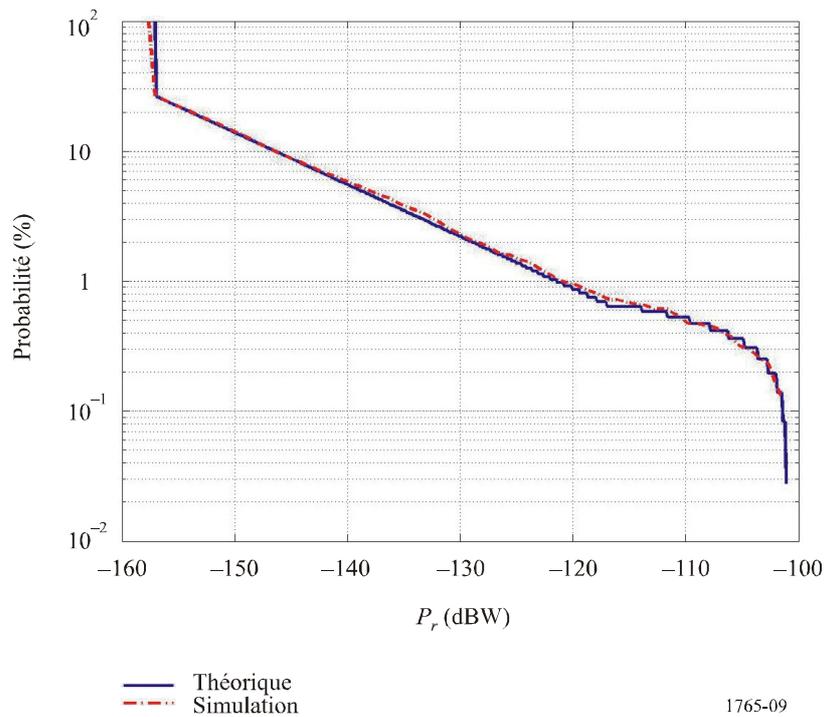
Fonction cdf de gain d'antenne, Recommandation UIT-R F.1245, pour un gain d'antenne maximal de 44 dBi



La puissance théorique reçue par un récepteur de 0 dBi est donc donnée sur la Fig. 9 ainsi que la puissance obtenue pour un seul émetteur de système HDFS.

FIGURE 9

Puissance reçue au niveau d'une antenne de 0 dBi située à 100 km de l'émetteur de système HDFS avec une puissance de 20 dBW



Si on suppose maintenant que la puissance d'émission est de 0 dBW pour tous les émetteurs, il est possible de comparer les résultats obtenus par la simulation analytique donnée au § 2 de la présente Annexe avec ceux obtenus par l'approche probabiliste, pour un niveau de confiance de 95% calculé sur 10 000 essais (voir le Tableau 3a).

TABLEAU 5

Gain d'antenne maximal de système HDFS de 44 dBi

	p.i.r.e.c. (dBW) pour divers nombres d'émetteurs de système HDFS ($N_t = 32$ à 2 048)						
	32	64	128	256	512	1 024	2 048
Simulation analytique	43,24	43,98	45,74	47,53	49,58	51,78	54,14
Simulation probabiliste	43,33	43,94	45,73	47,37	49,59	51,81	54,19

TABLEAU 6

Gain d'antenne maximal de système HDFS de 28 dBi

	p.i.r.e.c. (dBW) pour divers nombres d'émetteurs de système HDFS ($N_t = 32$ à 2 048)						
	32	64	128	256	512	1 024	2 048
Simulation analytique	30,86	32,81	34,97	37,29	39,75	42,34	45,04
Simulation probabiliste	30,84	32,78	34,97	37,28	39,74	42,37	45,04

Lorsqu'on compare les résultats obtenus par la méthode probabiliste et par la méthode analytique, on constate qu'ils concordent très bien.

Appendice 1 à l'Annexe 1

Formules approchées pour la p.i.r.e.c.

Dans le présent Appendice, les formules approchées des points 1 et 2 du *recommande* de cette Recommandation sont données sous forme de tableaux afin de faciliter la mise en œuvre informatique.

Formules du point 1 du *recommande* (les angles d'élévation de toutes les antennes de système HDFS sont de 0°)

Angle d'élévation de la direction de la p.i.r.e.c. à évaluer: 0°; 2,5° ou 5°:

$$p.i.r.e.c. = P_t + a_{30} (\log N_t)^3 + a_{20} (\log N_t)^2 + (a_{11} G_t + a_{10}) \log N_t + a_{03} G_t^3 + a_{02} G_t^2 + a_{01} G_t + a_{00}$$

TABLEAU 7a

Angle d'élévation à évaluer (degrés)	a_{30}	a_{20}	a_{11}	a_{10}	a_{03}	a_{02}	a_{01}	a_{00}
0	0	1,061	-0,1164	6,103	0	0	0,9428	-2,62
2,5	-0,13743	1,8243	0	1,5569	0,0052917	-0,57530	19,985	-200,77
5	0	0,54858	0	5,6488	-0,0036218	0,42380	-16,645	227,44

Angle d'élévation de la direction de la p.i.r.e.c. à évaluer: 10°, 15°, 20°, 25° ou 30°:

$$p.i.r.e.c. = P_t + a_{10} \log N_t + a_{01} G_t + a_{00}$$

TABLEAU 7b

Angle d'élévation à évaluer (degrés)	a_{10}	a_{01}	a_{00}
10	9,086	-0,25	8,30
15	9,344	-0,25	5,19
20	9,522	-0,25	3,19
25	9,633	-0,25	1,78
30	9,775	-0,25	0,74

Formules du point 2 du *recommande* (les angles d'élévation de toutes les antennes de système HDFS sont variables)

Angle d'élévation de la direction de la p.i.r.e.c. à évaluer: 0°, 2,5° ou 5°:

$$p.i.r.e.c. = P_t + (a_{31} G_t + a_{30}) (\log N_t)^3 + (a_{22} G_t^2 + a_{21} G_t + a_{20}) (\log N_t)^2 + (a_{12} G_t^2 + a_{11} G_t + a_{10}) \log N_t + a_{03} G_t^3 + a_{02} G_t^2 + a_{01} G_t + a_{00}$$

TABLEAU 8a

Angle d'élévation à évaluer (degrés)	a_{31}	a_{30}	a_{22}	a_{21}	a_{20}	a_{12}
0	0	0,82096	0	-0,15210	0,92771	0,024504
2,5	0	0,93906	0	-0,31918	3,4110	0,023524
5	-0,10457	3,0618	0,027889	-1,1358	9,7775	-0,15803

Angle d'élévation à évaluer (degrés)	a_{11}	a_{10}	a_{03}	a_{02}	a_{01}	a_{00}
0	-1,0198	27,270	0	-0,077296	5,1982	-73,62
2,5	0,096937	-4,8156	0,0011791	-0,21452	8,5619	-82,88
5	9,3247	-132,36	0	0,20619	-13,901	247,30

Angle d'élévation de la direction de la p.i.r.e.c. à évaluer: 10°, 15°, 20°, 25° ou 30°:

$$p.i.r.e.c. = P_r + a_{10} \log N_r + a_{01} G_r + a_{00}$$

TABLEAU 8b

Angle d'élévation à évaluer (degrés)	a_{10}	a_{01}	a_{00}
10	9,263	-0,2511	8,43
15	9,299	-0,25	5,45
20	9,497	-0,25	3,32
25	9,651	-0,25	1,84
30	9,767	-0,25	0,79
