

**Calcul des brouillages produits par un système à satellites non géostationnaire
du service mobile par satellite ou du service de radionavigation
par satellite au niveau des sites de radioastronomie**

(2002)

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que, dans certains cas, des bandes de fréquences proches ou adjacentes ont été attribuées au service de radioastronomie et aux services spatiaux (espace vers Terre);
- b) que l'exploitation du service de radioastronomie est fondée sur la réception d'émissions à des niveaux de puissance bien inférieurs à ceux généralement utilisés pour d'autres services de radiocommunication;
- c) qu'en raison de ces faibles niveaux de puissance reçue, le service de radioastronomie est généralement plus susceptible que d'autres services d'être brouillé par des rayonnements non désirés;
- d) que plusieurs renvois du Règlement des radiocommunications (RR) (tels que les numéros 5.149, 5.340, 5.372 et 5.443B) portent sur la nécessité de protéger le service de radioastronomie, en particulier contre les brouillages causés par des émetteurs à bord d'engins spatiaux;
- e) que, du fait des caractéristiques des systèmes à satellites non géostationnaires (OSG) et notamment de la nature non stationnaire de leurs émissions, les niveaux de brouillages causés par ce type de satellites aux radiotélescopes ne peuvent être évalués de la même manière que pour le cas de satellites OSG,

recommande

- 1** que les administrations utilisent la méthode décrite dans l'Annexe 1 pour calculer les niveaux de rayonnements non désirés produits par un système à satellites non OSG du service de radionavigation par satellite ou du service mobile par satellite au niveau de sites de radioastronomie;
- 2** que le diagramme d'antenne présenté dans l'Annexe 2 serve à modéliser les antennes de radioastronomie pour ces calculs de brouillage;
- 3** que le pourcentage de temps durant lequel on observe un dépassement d'un niveau de puissance surfacique équivalente (epfd) (défini en supposant un gain d'antenne en réception de 0 dBi en direction des brouillages et une durée d'intégration donnée) soit calculé conformément à la méthode décrite dans l'Annexe 3.

* La présente Recommandation doit être portée à l'attention de la Commission d'études 7 des radiocommunications.

Calculs des niveaux de rayonnements non désirés produits par un système à satellites non OSG du service de radionavigation par satellite ou du service mobile par satellite au niveau des sites de radioastronomie

La méthode décrite ici, fondée sur le concept de «puissance surfacique équivalente» (epfd) défini au numéro 22.5C du Règlement des radiocommunications, vise à permettre le calcul des niveaux de puissance surfacique produits par les rayonnements non désirés d'un système à satellites non OSG et subis par des radiotélescopes, compte tenu des caractéristiques du système à satellites et de l'antenne du radiotélescope considérés. Cette epfd correspond à la somme des rayonnements produits par tous les satellites; on la modélise par la puissance surfacique rayonnée par une source unique équivalente située sur l'axe de visée (valeur maximale du faisceau principal) du radiotélescope.

1 Paramètres requis

Du fait des caractéristiques propres aux systèmes à satellites non OSG, il est clair que les niveaux de brouillages causés par ce type de satellites et subis par un radiotélescope ne peuvent être évalués de la même manière que pour le cas de satellites OSG. Il est nécessaire d'utiliser une méthode statistique tenant compte de l'aspect évolutif lié aux satellites non OSG.

L'estimation des brouillages causés par les satellites et subis par un radiotélescope pendant la durée d'intégration (2 000 s) doit être fondée sur des calculs statistiques et doit tenir compte des paramètres associés aux satellites ou au radiotélescope.

Les paramètres à considérer pour les systèmes à satellites non OSG sont les suivants:

- le nombre de satellites visibles dans le ciel depuis la station de radioastronomie;
- la puissance surfacique au niveau du radiotélescope dans la bande de radioastronomie considérée, estimée en utilisant un masque dBsd ou dBc;
- les distances entre les différents satellites et la station de radioastronomie;
- les caractéristiques orbitales détaillées des satellites.

Les paramètres à considérer pour le radiotélescope sont les suivants:

- l'emplacement de l'antenne;
- le diagramme d'antenne et le gain d'antenne;
- les directions de pointage utilisées dans la pratique;
- la direction de pointage suivant l'axe de visée;
- les angles hors axe entre l'axe de visée de l'antenne de la station de radioastronomie et les directions d'émission des satellites;
- la durée d'intégration (2 000 s).

2 Calcul des niveaux d'epfd au niveau des sites de radioastronomie

Le gain de réception d'un radiotélescope en direction d'un satellite non OSG varie dans le temps (contrairement au cas d'un satellite OSG), essentiellement parce que le satellite se déplace sur son orbite et que le diagramme des lobes latéraux du radiotélescope présente une structure angulaire

fine. Le gain du télescope en direction d'un satellite donné est parfois bien supérieur à 0 dBi, ou peut être inférieur à cette valeur. Par ailleurs, dans le cas d'un système non OSG à plusieurs satellites, il faut tenir dûment compte des contributions des différents satellites.

On peut pour ce faire utiliser le concept d'epfd défini initialement pour évaluer les conditions de partage possibles entre systèmes OSG et non OSG. Ce concept est développé au paragraphe ci-dessous dans le cas d'une station de radioastronomie brouillée par des satellites non OSG. La définition de l'epfd est basée sur le numéro 22.5C du RR adopté à la Conférence mondiale des radiocommunications (Istanbul, 2000) (CMR-2000).

2.1 Définition de l'epfd

Soit une antenne recevant dans sa largeur de bande de référence une puissance émanant de plusieurs émetteurs situés à des distances diverses suivant des directions variées et émettant différents niveaux de puissance surfacique incidente. La puissance epfd reçue par cette antenne est égale à la puissance surfacique qui, générée par un émetteur unique situé dans le champ lointain de l'antenne suivant la direction de gain maximal de celle-ci, produirait à l'entrée de l'antenne une puissance égale à la somme des différentes puissances effectivement reçues en provenance des divers émetteurs.

On calcule l'epfd instantanée en utilisant la formule suivante:

$$epfd = 10 \log_{10} \left[\sum_{i=1}^{N_a} 10^{10} \cdot \frac{G_t(\theta_i)}{4\pi d_i^2} \cdot \frac{G_r(\phi_i)}{G_{r,max}} \right] \quad (1)$$

où:

N_a : nombre de stations spatiales non OSG visibles depuis le radiotélescope

i : index de la station spatiale non OSG considérée

P_i : puissance radioélectrique de rayonnements non désirés à l'entrée de l'antenne (ou puissance radioélectrique rayonnée dans le cas d'une antenne active) générée par la station spatiale émettrice considérée du système non OSG (dBW) dans la largeur de bande de référence

θ_i : angle (degrés) entre l'axe de visée de la station spatiale émettrice considérée appartenant au système non OSG et la direction du radiotélescope

$G_t(\theta_i)$: gain (exprimé par un rapport de puissances) de l'antenne d'émission de la station spatiale considérée appartenant au système non OSG en direction du radiotélescope

d_i : distance (m) entre la station émettrice considérée appartenant au système non OSG et le radiotélescope

ϕ_i : angle hors axe (degrés) entre la direction de pointage du radiotélescope et la direction de la station spatiale émettrice considérée appartenant au système non OSG

$G_r(\theta_i)$: gain (exprimé par un rapport de puissances) de l'antenne de réception du radiotélescope en direction de la station spatiale d'émission considérée appartenant au système non OSG (voir l'Annexe 2)

$G_{r,max}$: gain (exprimé par un rapport de puissances) maximal du radiotélescope

$epfd$: puissance surfacique équivalente instantanée (dB(W/m²)) dans la largeur de bande de référence au niveau du radiotélescope.

On suppose pour le calcul de l'epfd suivant l'équation (1) que la puissance surfacique résultante de toutes les sources de brouillage est dirigée suivant l'axe de visée de l'antenne de réception (axe de gain maximal). Toutefois, le critère de protection de radioastronomie est fondé sur un contour d'antenne à 0 dBi. En utilisant la même approche que pour l'équation (1), on peut déterminer comme suit la puissance surfacique produite par l'ensemble des sources de brouillage pointant vers le gain à 0 dBi de l'antenne de réception:

$$epfd_{G_r=0 \text{ dBi}} = 10 \log_{10} \left[\sum_{i=1}^{N_a} 10^{10} \cdot \frac{P_i}{4\pi d_i^2} \cdot G_r(\varphi_i) \right] \quad (2)$$

Les valeurs $epfd_{G_r=0 \text{ dBi}}$ résultant de l'équation (2) après établissement des valeurs moyennes pour une durée d'intégration de 2000 s, peuvent être comparées aux niveaux des puissances surfaciques (définis en supposant un gain de l'antenne en réception de 0 dBi en direction des brouillages, pour cette durée d'intégration).

NOTE 1 – On suppose que chaque émetteur est situé dans le champ lointain du radiotélescope (c'est-à-dire à une distance supérieure à $2D^2/\lambda$, où D est le diamètre réel du radiotélescope et λ la longueur d'onde d'observation). Bien qu'elle ne soit pas satisfaisante dans toutes les conditions, on considère qu'il s'agit là d'une bonne approximation.

NOTE 2 – La direction de gain maximal (c'est-à-dire l'axe de visée) de certains télescopes ne coïncide pas toujours avec l'axe géométrique de l'instrument.

NOTE 3 – Dans le cas d'antennes actives, P_i correspond à la puissance radioélectrique rayonnée et non à la puissance à l'entrée de l'antenne.

NOTE 4 – La valeur à utiliser pour le gain d'antenne $G_t(\theta_i)$ de la station émettrice est celle qui correspond à la fréquence d'observation du radiotélescope. Elle peut être différente de celle associée aux fréquences d'exploitation de la station.

ANNEXE 2

Modèle du diagramme d'antenne du radiotélescope

Les diagrammes d'antenne tels que celui décrit dans la Recommandation UIT-R SA.509 ne peuvent être utilisés dans un environnement évolutif. Dans un tel environnement, on applique aux antennes du service fixe par satellite le modèle figurant dans la Recommandation UIT-R S.1428. Des travaux supplémentaires sont nécessaires pour définir des diagrammes d'antenne de radioastronomie. En attendant et en l'absence de mesures relatives à ces diagrammes, on pourra considérer que les diagrammes de la Recommandation UIT-R S.1428 constituent une bonne approximation applicable aux cas des antennes de radioastronomie, tant pour le faisceau principal que pour les lobes latéraux.

L'exemple suivant, extrait de ladite Recommandation, décrit le diagramme de rayonnement d'un réflecteur de diamètre supérieur à 100λ :

$G(\varphi) = G_{max} - 2,5 \times 10^{-3} (D \varphi/\lambda)^2$	dBi	pour $0^\circ \leq \varphi < \varphi_m$
$G(\varphi) = G_1$	dBi	pour $\varphi_m \leq \varphi < \varphi_r$
$G(\varphi) = 29 - 25 \log \varphi$	dBi	pour $\varphi_r \leq \varphi < 10^\circ$
$G(\varphi) = 34 - 30 \log \varphi$	dBi	pour $10^\circ \leq \varphi < 34,1^\circ$
$G(\varphi) = -12$	dBi	pour $34,1^\circ \leq \varphi < 80^\circ$
$G(\varphi) = -7$	dBi	pour $80^\circ \leq \varphi < 120^\circ$
$G(\varphi) = -12$	dBi	pour $120^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ$

où:

$$G_{max} = 20 \log (D/\lambda) + 8,4 \quad \text{dBi}$$

$$G_1 = -1 + 15 \log (D/\lambda) \quad \text{dBi}$$

$$\varphi_m = 20 (\mathcal{N}D) \sqrt{(G_{max} - G_1)} \quad \text{degrés}$$

$$\varphi_r = 15,85 (D/\lambda)^{-0,6} \quad \text{degrés.}$$

Il est également possible d'utiliser une modélisation plus précise du diagramme pour des angles inférieurs à un degré (voir plus loin).

1 Modèle du faisceau principal

Une approche réaliste consiste à modéliser comme suit le faisceau principal d'une antenne circulaire (voir la Note 1):

$$G_r(\varphi) = G_{r,max} \cdot \left[\frac{J_1(2\pi x)}{\pi x} \right]^2 \quad (3)$$

où:

$$G_{r,max} = \left[\frac{4\pi A_{eff}}{\lambda^2} \right] \text{ est le gain maximal (exprimé par un rapport de puissances)}$$

où:

$$A_{eff} = \pi(D/2)^2 \text{ est la surface d'ouverture du télescope (m}^2\text{)}$$

D : diamètre réel du télescope (m)

λ : longueur d'ondes (m)

$$x = \frac{\pi \cdot D \cdot \varphi}{360 \cdot \lambda} \text{ où } \varphi \text{ est l'angle (degrés) par rapport à l'axe de visée}$$

et

$J_1(x)$: fonction de Bessel du premier ordre.

Le premier zéro de ce diagramme d'antenne est atteint pour:

$$\varphi_0 = 69,88/(D/\lambda) \text{ degrés (mesuré par rapport à l'axe de visée de l'antenne)}$$

Par exemple, si $D = 100$ m et $\lambda = 3$ cm, on obtient $G_{r,max} = 1,09 \times 10^8$ (c'est-à-dire +80,4 dBi), et:

$$\varphi_0 = 0,0209 \text{ degré}$$

Ce modèle de faisceau principal correspond au cas idéal d'un rendement d'ouverture de 100%.

NOTE 1 – Les équations (3) et (4) sont exprimées par un rapport de puissances.

2 Modèle des lobes latéraux proches (situés à moins d'1° de l'axe de visée)

Le modèle suivant est proposé pour les lobes latéraux proches ($\varphi_0 \leq \varphi \leq 1^\circ$) (voir la Note 1):

$$G_r(\varphi) = B \cdot \left[\frac{\cos(2\pi x - 3\pi/4 + 0,0953)}{\pi x} \right]^2 \quad (4)$$

où:

$$x = \frac{\pi \cdot D \cdot \varphi}{360 \cdot \lambda} \text{ où } \varphi \text{ est l'angle (degrés) par rapport à l'axe de visée}$$

D : diamètre réel du radiotélescope

λ : longueur d'onde de fonctionnement

$$B = 10^{3,2} \pi^2 ((\pi D/2)/(180 \cdot \lambda))^2.$$

NOTE 1 – Les équations (3) et (4) sont exprimées par un rapport de puissances.

ANNEXE 3

Distribution des niveaux d'epfd

On décrit dans la présente Annexe une méthode permettant de calculer des statistiques de puissance epfd sur la globalité du ciel.

1 Division du ciel en cellules d'angles solides à peu près égaux

La première étape consiste à diviser le ciel en M anneaux parallèles à l'horizon, espacés régulièrement suivant l'axe de l'angle d'élévation (qui varie entre 0° et 90°). La largeur de chaque anneau est de $90/M^\circ$. On divise ensuite ces anneaux en cellules, dont la largeur suivant l'axe

azimutal (choisie de telle manière qu'un anneau contienne un nombre entier de cellules) est approximativement égale à:

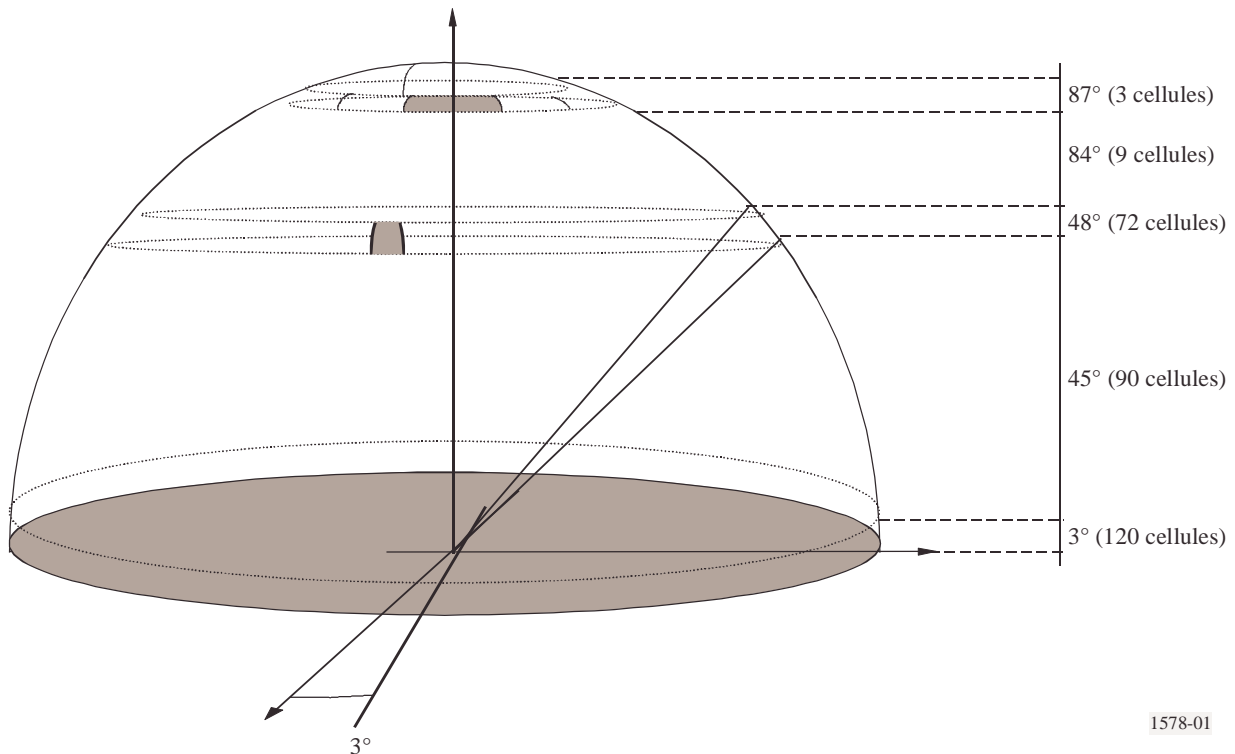
$$\frac{90 / M}{\cos(\text{élévation})} \quad \text{degrés}$$

Sur la Fig. 1 le pas de division choisi suivant l'axe de l'angle d'élévation est de 3°, ce qui conduit à diviser le ciel en 30 anneaux. La largeur d'une cellule suivant l'axe azimutal est donc d'environ:

$$\frac{90 / 30}{\cos(\text{élévation})} \quad \text{degrés}$$

Le terme élévation apparaissant dans la formule précédente correspond à l'élévation moyenne de l'anneau considéré.

FIGURE 1
Exemple de division du ciel en cellules d'environ 9 degrés carrés d'angle solide



On divise ainsi le ciel en 2 334 cellules d'environ 9 degrés carrés d'angle solide. Le Tableau 1 indique notamment le nombre de cellules des différents anneaux de notre exemple.

TABLEAU 1

Exemple de division du ciel en cellules rectangulaires d'environ 9 degrés carrés d'angle solide

Angle d'élévation de la partie inférieure de l'anneau (degrés)	Angle solide de l'anneau (degrés carrés)	Angle solide cumulé (degrés carrés)	Pas azimutal (degrés)	Nombre de cellules dans l'anneau	Angle solide d'une cellule (degrés carrés)	Nombre de cellules cumulées	Pourcentage d'angle solide (%)	Angle solide cumulé (%)
0	1 079,51	1 079,51	3	120	9,00	120	5,23	5,23
3	1 076,55	2 156,05	3	120	8,97	240	5,22	10,45
6	1 070,64	3 226,69	3	120	8,92	360	5,19	15,64
9	1 061,79	4 288,49	3	120	8,85	480	5,15	20,79
12	1 050,04	5 338,53	3	120	8,75	600	5,09	25,88
15	1 035,41	6 373,93	3	120	8,63	720	5,02	30,90
18	1 017,94	7 391,87	3	120	8,48	840	4,94	35,84
21	997,68	8 389,55	3	120	8,31	960	4,84	40,67
24	974,68	9 364,23	3	120	8,12	1 080	4,73	45,40
27	949,01	1 0313,24	3	120	7,91	1 200	4,60	50,00
30	920,75	11 233,99	4	90	10,23	1 290	4,46	54,46
33	889,95	12 123,94	4	90	9,89	1 380	4,31	58,78
36	856,72	12 980,66	4	90	9,52	1 470	4,15	62,93
39	821,14	13 801,81	4	90	9,12	1 560	3,98	66,91
42	783,31	14 585,12	4	90	8,70	1 650	3,80	70,71
45	743,34	15 328,46	4	90	8,26	1 740	3,60	74,31
48	701,32	16 029,79	5	72	9,74	1 812	3,40	77,71
51	657,39	16 687,17	5	72	9,13	1 884	3,19	80,90
54	611,65	17 298,82	5	72	8,50	1 956	2,97	83,87
57	564,23	17 863,06	6	60	9,40	2 016	2,74	86,60
60	515,27	18 378,33	6	60	8,59	2 076	2,50	89,10
63	464,90	18 843,23	6	60	7,75	2 136	2,25	91,35
66	413,25	19 256,48	8	45	9,18	2 181	2,00	93,36
69	360,47	19 616,95	9	40	9,01	2 221	1,75	95,11
72	306,70	19 923,65	10	36	8,52	2 257	1,49	96,59
75	252,09	20 175,74	12	30	8,40	2 287	1,22	97,81
78	196,79	20 372,53	18	20	9,84	2 307	0,95	98,77
81	140,95	20 513,49	24	15	9,40	2 322	0,68	99,45
84	84,73	20 598,21	40	9	9,41	2 331	0,41	99,86
87	28,27	20 626,48	120	3	9,42	2 334	0,14	100,00

2 Distribution de l'epfd pour une cellule

On choisit aléatoirement une direction de pointage de l'antenne du service de radioastronomie, qui pointe alors vers une des cellules du ciel définies ci-dessus. On choisit ensuite aléatoirement l'instant de début d'exploitation de la constellation de satellites. La valeur d'epfd est alors évaluée à différents instants de cette durée d'intégration de 2000 s. On calcule enfin la valeur moyenne de puissance epfd obtenue durant ce temps d'intégration, pour la direction de pointage et l'instant de début d'exploitation choisis.

Ce processus est répété pour obtenir une distribution statistique de l'epfd produite par la cellule visée. On procède ainsi à un certain nombre de tirages aléatoires, conduisant chacun au calcul d'epfd moyenne pour une durée d'intégration de 2000 s. Plus le nombre de tirages est grand, et plus la distribution obtenue est précise. Le nombre de tirages doit être suffisamment élevé pour conférer aux résultats obtenus le degré de confiance requis. En particulier, le produit du nombre de tirages par la durée d'intégration de 2000 s doit être bien supérieur à la période orbitale de la constellation. Il faut également s'assurer que ces tirages correspondent à un échantillonnage régulier de cette période orbitale. Lorsque de nouveaux tirages ne modifient pratiquement plus la distribution existante, on considérera que le nombre de tirages effectués est suffisant. Cette vérification peut être automatique et intégrée à la simulation ou manuelle (par interruption régulière de celle-ci).

3 Distribution de l'epfd pour les directions de pointage les plus défavorables (cette méthode est applicable uniquement si les niveaux de puissances surfaciques rayonnées par les satellites sont constants pour un angle d'élévation donné de l'antenne du service de radioastronomie)

L'estimation des distributions d'epfd des cellules du ciel peut être simplifiée en se restreignant (dans un premier temps) aux directions de pointage les plus défavorables. On peut considérer que celles-ci correspondent aux directions de pointage suivant lesquelles la probabilité de visibilité des satellites est la plus grande. La Recommandation UIT-R S.1257 – Méthode analytique pour calculer les statistiques de visibilité et de brouillage à court terme des satellites non OSG à partir d'un point à la surface de la terre, et les équations (28) et (29) en particulier permettent de déterminer ces directions. On peut ainsi, pour un angle d'élévation et une constellation de satellites non OSG donnés, calculer les valeurs azimutales des directions de pointage les plus défavorables (deux valeurs azimutales de direction la plus défavorable sont généralement associées à un angle d'élévation).

La distribution d'epfd est ensuite estimée à partir d'un nombre suffisant de durées d'intégration de 2000 s, pour chacune des cellules correspondant à ces directions de pointage les plus défavorables. Ces distributions peuvent être comparées à un niveau seuil de puissance surfacique (défini en supposant un gain d'antenne de réception de 0 dBi suivant la direction des brouillages et pour une durée d'intégration de 2000 s).

Le pourcentage de temps durant lequel un niveau seuil de puissance surfacique est dépassé pour une cellule donnée correspond au pourcentage des durées d'intégration de 2000 s pour lesquelles la puissance surfacique moyenne reçue par le radiotélescope est supérieure à ce niveau seuil.

La comparaison des distributions d'epfd avec le niveau seuil de puissance surfacique pour le cas des cellules correspondant aux directions de pointage les plus défavorables permet d'aboutir aux conclusions suivantes:

- Si, pour tous les M anneaux, le seuil de puissance surfacique est respecté pour les directions de pointage les plus défavorables durant un pourcentage de temps supérieur à une certaine valeur seuil, on conclura que le critère est satisfait pour toutes les cellules du ciel.
- Si, pour un anneau donné (défini par son angle d'élévation), le seuil de puissance surfacique est respecté pour les directions de pointage les plus défavorables durant un pourcentage de temps supérieur à une certaine valeur seuil, on conclura que le critère est toujours satisfait pour l'ensemble des cellules de cet anneau.
- Si ce critère de brouillage n'est pas satisfait, des études complémentaires seront nécessaires.

L'examen des directions de pointage les plus défavorables permet de déterminer l'emplacement des cellules correspondantes.

4 Résultat en termes de distribution d'epfd

La méthode de calcul de l'epfd décrite au § 2 permet de déterminer la distribution de puissance epfd produite par une cellule du ciel donnée (voir la Fig. 2).

