

## RECOMMANDATION UIT-R S.672-4\*

**Diagramme de rayonnement à utiliser comme objectif de conception  
pour les antennes de satellite dans le service fixe par satellite  
employant des satellites géostationnaires**

(1990-1992-1993-1995-1997)

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

*considérant*

- a) que l'utilisation d'antennes de stations spatiales présentant les meilleurs diagrammes de rayonnement disponibles conduira à l'utilisation la plus rationnelle du spectre radioélectrique et de l'orbite des satellites géostationnaires;
- b) que les stations spatiales en exploitation utilisent aussi bien des antennes elliptiques (ou circulaires) à alimentation unique que des antennes à faisceau conformé et à alimentation multiple;
- c) que, bien que la conception des antennes de stations spatiales fasse actuellement l'objet d'améliorations, d'autres informations sont nécessaires avant que l'on puisse adopter un diagramme de rayonnement de référence aux fins de coordination;
- d) que l'adoption d'un diagramme de rayonnement comme objectif de conception pour les antennes de stations spatiales encouragera la fabrication et l'emploi d'antennes permettant une utilisation rationnelle de l'orbite;
- e) qu'il suffit, aux fins de coordination, de spécifier les caractéristiques de rayonnement des antennes des stations spatiales dans les directions du brouillage potentiel;
- f) que, pour une application générale, les expressions mathématiques doivent être aussi simples que possible et compatibles avec des prédictions réalistes;
- g) qu'il faut, néanmoins, que les expressions tiennent compte des caractéristiques des systèmes d'antennes réels et susceptibles d'être adaptés aux nouvelles technologies;
- h) que la difficulté des mesures a entraîné des inexactitudes dans la modélisation des antennes de satellite pour les grands angles hors axe;
- j) que les limitations de taille des lanceurs entraînent une limitation de la valeur du rapport  $D/\lambda$  des antennes de satellite, notamment aux fréquences inférieures, par exemple dans la bande des 6/4 GHz;
- k) que les paramètres de rayonnement des antennes de stations spatiales comme le point de référence, la zone de couverture, le gain de crête équivalent, qui peuvent être utilisés pour définir un rayonnement de référence d'antenne de station spatiale, sont décrits dans l'Annexe 1;
- l) que deux programmes de calcul ont été développés pour établir des contours de couverture (voir l'Annexe 2),

---

\* La Commission d'études 4 des radiocommunications a apporté des modifications rédactionnelles à cette Recommandation en 2001 conformément aux dispositions de la Résolution UIT-R 44 (AR-2000).

*recommande*

1 que, pour les antennes d'engins spatiaux à alimentation unique et à faisceaux circulaires ou elliptiques du service fixe par satellite (SFS), le diagramme de rayonnement suivant soit utilisé comme objectif de conception, en dehors de la zone de couverture:

$$G(\psi) = G_m - 3(\psi/\psi_b)^\alpha \quad \text{dBi} \quad \text{pour} \quad \psi_b \leq \psi \leq a\psi_b \quad (1)$$

$$G(\psi) = G_m + L_N + 20 \log z \quad \text{dBi} \quad \text{pour} \quad a\psi_b < \psi \leq 0,5b\psi_b \quad (2a)$$

$$G(\psi) = G_m + L_N \quad \text{dBi} \quad \text{pour} \quad 0,5b\psi_b < \psi \leq b\psi_b \quad (2b)$$

$$G(\psi) = X - 25 \log \psi \quad \text{dBi} \quad \text{pour} \quad b\psi_b < \psi \leq Y \quad (3)$$

$$G(\psi) = L_F \quad \text{dBi} \quad \text{pour} \quad Y < \psi \leq 90^\circ \quad (4a)$$

$$G(\psi) = L_B \quad \text{dBi} \quad \text{pour} \quad 90^\circ < \psi \leq 180^\circ \quad (4b)$$

où:

$$X = G_m + L_N + 25 \log(b\psi_b) \quad \text{et} \quad Y = b\psi_b 10^{0,04(G_m + L_N - L_F)}$$

$G(\psi)$ : gain à l'angle  $\psi$  par rapport à la direction du faisceau principal (dBi)

$G_m$ : gain maximal dans le lobe principal (dBi)

$\psi_b$ : demi-ouverture du faisceau à 3 dB dans le plan considéré (3 dB en dessous de  $G_m$ ) (degrés)

$L_N$ : niveau du lobe latéral proche par rapport au gain de crête (dB) requis en raison de la conception du système

$L_F = 0$  dBi niveau du lobe latéral éloigné (dBi)

$z$ : (grand axe/petit axe) pour le faisceau rayonné

$L_B$ :  $15 + L_N + 0,25 G_m + 5 \log z$  dBi ou 0 dBi, quelle que soit la valeur la plus élevée.

NOTE 1 – Les diagrammes applicables aux faisceaux elliptiques doivent être vérifiés expérimentalement. Les valeurs de  $a$  dans le Tableau 1 sont donc provisoires.

TABLEAU 1

$L_N$ (dB)	$a$	$b$	$\alpha$
-20	$2,58 \sqrt{(1 - \log z)}$	6,32	2
-25	$2,58 \sqrt{(1 - 0,8 \log z)}$	6,32	2
-30	–	6,32	–

Les valeurs numériques de  $a$ ,  $b$  et  $\alpha$  pour les valeurs de  $L_N$  de –20 dB et –25 dB sont données dans le Tableau 1. La détermination de  $a$  et de  $\alpha$  pour  $L_N = -30$  dB nécessite des études complémentaires; il est demandé aux administrations de fournir des données pour que les valeurs de  $a$  et de  $\alpha$  pour  $L_N = -30$  dB puissent être déterminées;

2 que, pour des antennes d'engins spatiaux du SFS à faisceaux conformés et à alimentation multiple, le diagramme de rayonnement à utiliser comme objectif de conception soit choisi d'après les formules ci-après selon la classe d'antenne et la gamme des valeurs du rapport de balayage.

**Définition des classes d'antennes**

- Classe A:  
Les antennes de la classe A sont celles dont l'axe de visée tombe à l'intérieur de la zone de couverture.
- Classe B:  
Les antennes de la classe B sont celles dont l'axe de visée d'un ou de plusieurs des faisceaux tombe à l'extérieur des zones de couverture.

**Définition du rapport de balayage**

Il existe deux définitions du rapport de balayage:

Le rapport de balayage  $\delta$  mentionné au § 2.1 est défini comme étant la distance angulaire entre le centre de la couverture (défini en tant que centre de l'ellipse de superficie minimale) et un point du bord de la couverture, divisé par l'ouverture angulaire du faisceau élémentaire.

Le rapport de balayage  $S$  utilisé aux § 2.2 et 2.3 est défini par la distance angulaire entre la ligne de visée de l'antenne et un point du bord de la couverture, divisé par l'ouverture angulaire du faisceau élémentaire.

Pour déterminer la partie du dispositif de la Recommandation qui s'applique à une antenne spécifique de la classe A, il convient d'utiliser d'abord la définition du rapport de balayage  $\delta$ ;

**2.1** que, pour les antennes de la classe A et pour les valeurs du rapport de balayage  $\delta \leq 3,5$ :

$$G_{\text{dBi}}(\Delta\Psi) = \begin{cases} G_{ep} + 0,256 - 13,065 \left( \frac{\Delta\Psi}{Q \psi_0} + 0,5 \right)^2 & \text{pour } 0 \leq \frac{\Delta\Psi}{\psi_0} \leq 0,8904 Q \\ G_{ep} - 25 & \text{pour } 0,8904 Q < \frac{\Delta\Psi}{\psi_0} \leq 1,9244 Q \\ G_{ep} - 25 + 20 \log \left( \frac{1,9244 Q \psi_0}{\Delta\Psi} \right) & \text{pour } 1,9244 Q < \frac{\Delta\Psi}{\psi_0} \leq 18 / \psi_0 \end{cases}$$

où:

$\Delta\Psi$ : angle à partir du contour de la couverture convexe à un point situé en dehors de la région de couverture dans une direction perpendiculaire aux côtés du contour (degrés)

$G_{ep}$ : gain de crête équivalent (dBi)

$$= G_e + 3,0$$

$\psi_0$ : ouverture du faisceau à mi-puissance du faisceau élémentaire (degrés)

$$= 72 (\lambda/D)$$

$\lambda$ : longueur d'onde (m)

$D$ : diamètre physique du réflecteur (m)

$$Q = 10 \left( \frac{0,000075 (\delta - 1/2)^2}{[(F/D_p)^2 + 0,02]^2} \right)$$

$\delta$ : rapport de balayage tel que défini au § 2

$F/D_p$ : rapport entre la longueur focale du réflecteur  $F$  et le diamètre de la parabole  $D_p$

$$D_p = 2(d + h)$$

$d$ : diamètre prévu de l'ouverture du paraboloïde excentré

$h$ : hauteur décalée par rapport au bord du réflecteur;

**2.2** que, pour les antennes de la classe A et pour les valeurs du rapport de balayage  $S \geq 5$ :

$$G_{\text{dBi}}(\Delta\psi) = \begin{cases} G_e - B \left[ \left( 1 + \frac{\Delta\psi}{\psi_b} \right)^2 - 1 \right] & \text{pour } 0^\circ \leq \Delta\psi \leq C \psi_b \\ G_e - 22 & \text{pour } C \psi_b < \Delta\psi \leq (C + 4,5) \psi_b \\ G_e - 22 + 20 \log_{10} \left[ \frac{(C + 4,5) \psi_b}{\Delta\psi} \right] & \text{pour } (C + 4,5) \psi_b < \Delta\psi \leq 18^\circ \end{cases}$$

où:

$\Delta\psi$ : angle à partir du contour de la couverture convexe dans une direction perpendiculaire aux côtés du contour (degrés)

$G_e$ : gain au bord de la couverture (dBi)

$$B = B_0 - (S - 1,25) \Delta B \text{ pour } S \geq 5$$

$$B_0 = 2,05 + 0,5 (F/D - 1) + 0,0025 D/\lambda$$

$$\Delta B = 1,65 (D/\lambda)^{-0,55}$$

$\psi_b$ : rayon du petit faisceau

$$= 36 \lambda/D$$

$\lambda$ : longueur d'onde (m)

$D$ : diamètre physique du réflecteur (m)

$$C = \sqrt{1 + \frac{22}{B}} - 1$$

$S$ : rapport de balayage tel que défini au § 2

$F/D$ : rapport entre la longueur focale et le diamètre physique de l'antenne;

**2.3** que, pour les antennes de la classe B pour lesquelles seulement le rapport de balayage  $S (S \geq 0)$  est utilisé:

$$G_{\text{dBi}}(\Delta\psi) = \begin{cases} G_e - B \left[ \left( 1 + \frac{\Delta\psi}{\psi_b} \right)^2 - 1 \right] & \text{pour } 0^\circ \leq \Delta\psi \leq C \psi_b \\ G_e - 17 + 18,7012 \log_{10} \left( \cos \left[ \frac{\Delta\psi - C \psi_b}{\psi_b} \right] \right) & \text{pour } C \psi_b < \Delta\psi \leq (C + 1) \psi_b \\ G_e - 22 & \text{pour } (C + 1) \psi_b < \Delta\psi \leq (C + 4,5) \psi_b \\ G_e - 22 + 20 \log_{10} \left[ \frac{(C + 4,5) \psi_b}{\Delta\psi} \right] & \text{pour } (C + 4,5) \psi_b < \Delta\psi \leq 18^\circ \end{cases}$$

où:

$\Delta\psi$ : angle à partir du contour de la couverture convexe dans une direction perpendiculaire aux côtés du contour (degrés)

$G_e$ : gain au bord de la couverture (dBi)

$$B = B_0 - (S - 1,25) \Delta B \text{ pour } S \geq 0$$

$$B_0 = 2,05 + 0,5 (F/D - 1) + 0,0025 D/\lambda$$

$$\Delta B = 1,65 (D/\lambda)^{-0,55}$$

$\psi_b$ : rayon du petit faisceau

$$= 36 \lambda/D$$

$\lambda$ : longueur d'onde (m)

$D$ : diamètre physique du réflecteur (m)

$$C = \sqrt{1 + \frac{17}{B}} - 1$$

$S$ : rapport de balayage tel que défini au § 2

$F/D$ : rapport entre la longueur focale et le diamètre physique de l'antenne;

**2.4** que, pour les antennes de la classe A pour lesquelles les valeurs des rapports de balayage sont telles que  $\delta > 3,5$  et  $S < 5$ , l'objectif de conception est toujours à l'étude. En particulier, il est nécessaire d'étudier l'extension de l'application des formules présentées aux § 2.1 et 2.2 à cette région. Une méthode permettant d'étendre l'objectif de conception à cette région est présentée dans l'Annexe 1. Pour la définition des rapports de balayage  $\delta$  et  $S$  et leurs applications, voir le § 2;

**2.5** que les Notes suivantes soient considérées comme faisant partie des § 2.1 et 2.2:

NOTE 1 – La zone de couverture est définie par le contour tracé à partir des points du polygone qui entoure la zone de service suivant la méthode présentée dans l'Annexe 2.

NOTE 2 – Pour les coupes, où le contour de gain de  $-3$  dB est extérieur au contour de la couverture tracé, le diagramme utilisé comme objectif de conception doit provenir du contour de gain à  $-3$  dB.

NOTE 3 – La présente Recommandation doit s'appliquer uniquement dans la direction d'un système sensible au brouillage. Autrement dit, il n'est pas nécessaire de l'appliquer dans les directions où il n'existe pas de risque de brouillage pour d'autres réseaux (par exemple, à l'extérieur du bord de la Terre, dans les régions océaniques inhabitées). 10% des coupes pourraient ne pas respecter le diagramme préconisé.

NOTE 4 – La présente Recommandation ne s'applique pas aux antennes à double fréquence. Les antennes qui utilisent la distorsion en phase induite par le réflecteur pour élargir le faisceau font partie de cette catégorie et doivent faire l'objet d'un complément d'étude.

## ANNEXE 1

### Diagrammes de rayonnement des antennes dans le service fixe par satellite

#### 1 Diagrammes de rayonnement de référence des antennes de satellite

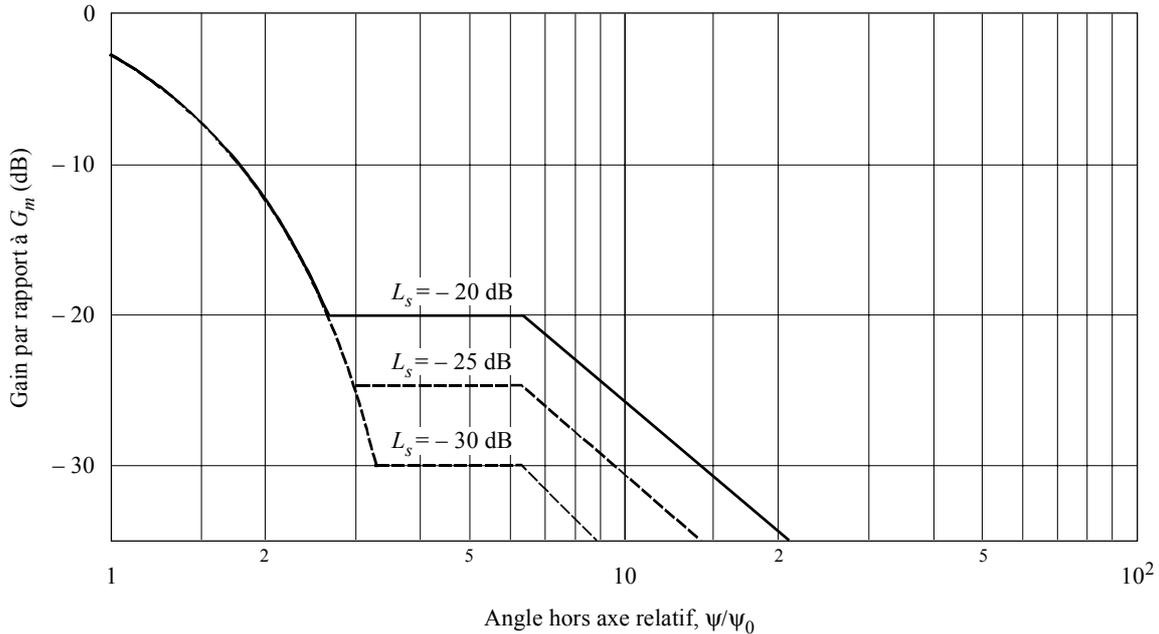
##### 1.1 Faisceaux circulaires à alimentation unique

Le diagramme de rayonnement d'une antenne de satellite est aussi important dans la région du lobe principal que dans celle des lobes latéraux les plus éloignés; les diagrammes possibles commencent à partir du contour à  $-3$  dB du lobe principal et sont divisés en quatre régions qui sont illustrées dans la Fig. 1.

Toutefois, des difficultés ont surgi lorsqu'on a essayé d'appliquer ce diagramme à un faisceau non circulaire. Les administrations sont donc invitées à présenter des diagrammes de rayonnement mesurés avec des faisceaux plus complexes que de simples faisceaux circulaires.

FIGURE 1

## Fonctions de l'enveloppe du diagramme de rayonnement



$$\begin{aligned}
 G(\psi) &= G_m - 3 (\psi/\psi_0)^2 & \text{dBi} & & \text{pour} & \psi_0 \leq \psi \leq a \psi_0 & \text{(I)} \\
 G(\psi) &= G_m + L_s & \text{dBi} & & \text{pour} & a \psi_0 < \psi \leq b \psi_0 & \text{(II)} \\
 G(\psi) &= G_m + L_s + 20 - 25 \log (\psi/\psi_0) & \text{dBi} & & \text{pour} & b \psi_0 < \psi \leq \psi_1 & \text{(III)} \\
 G(\psi) &= 0 & \text{dBi} & & \text{pour} & \psi_1 < \psi & \text{(IV)}
 \end{aligned}$$

où:

$G(\psi)$ : gain correspondant à l'angle  $\psi$  par rapport à l'axe du faisceau (dBi)

$G_m$ : gain maximal dans le lobe principal (dBi)

$\psi_0$ : moitié de l'ouverture du faisceau à 3 dB dans le plan considéré (3 dB en dessous de  $G_m$ ) (degrés)

$\psi_1$ : valeur de  $\psi$  lorsque  $G(\psi)$  dans l'équation (III) est égal à 0 dBi

$L_s$ : niveau du lobe latéral proche requis (dB), par rapport au gain maximal

$a, b$ : valeurs numériques ci-après:

$L_s$	$a$	$b$
-20	2,58	6,32
-25	2,88	6,32
-30	3,16	6,32

0672-01

## 1.2 Faisceaux elliptiques à alimentation unique

Les expressions données dans la Fig. 1 définissent une enveloppe maximale pour les premiers lobes latéraux à un niveau de -20 dB par rapport à la valeur de crête du gain et ce diagramme s'applique aux antennes de conception assez simple. Toutefois, afin de mieux utiliser la capacité de l'orbite, il peut être souhaitable d'abaisser ce niveau à -30 dB et d'employer des antennes de conception plus élaborée. Le diagramme adopté par la Conférence administrative mondiale des radiocommunications pour la radiodiffusion par satellite (Genève, 1977) (CAMR RS-77) pour les antennes de satellite de radiodiffusion satisfait à la demande ci-dessus et est réalisé à l'heure actuelle: il devrait

donc s'appliquer dans ce cas. D'autres études seront peut-être nécessaires pour évaluer la possibilité de réaliser dans la pratique de telles réductions de niveaux dans les lobes latéraux, en particulier dans les bandes des 6/4 GHz.

### 1.3 Faisceaux conformés à alimentation multiple

Un diagramme semblable applicable aux faisceaux conformés doit être basé sur l'analyse de plusieurs faisceaux conformés et aussi sur des considérations théoriques. On doit spécifier des caractéristiques supplémentaires telles que le diamètre du petit faisceau élémentaire et le niveau du premier lobe latéral. En outre, la section et la manière de mesurer les angles font partie de la définition du diagramme.

Lorsqu'on établit ce diagramme de référence, l'important est d'obtenir la discrimination à partir de la limite de couverture de tous les types d'antenne y compris les antennes à faisceau conformé les plus complexes en fonction de la séparation angulaire des zones de couverture, vue de l'orbite. Le diagramme de rayonnement d'une antenne à faisceau conformé est unique et est principalement déterminé par les facteurs opérationnels et techniques suivants:

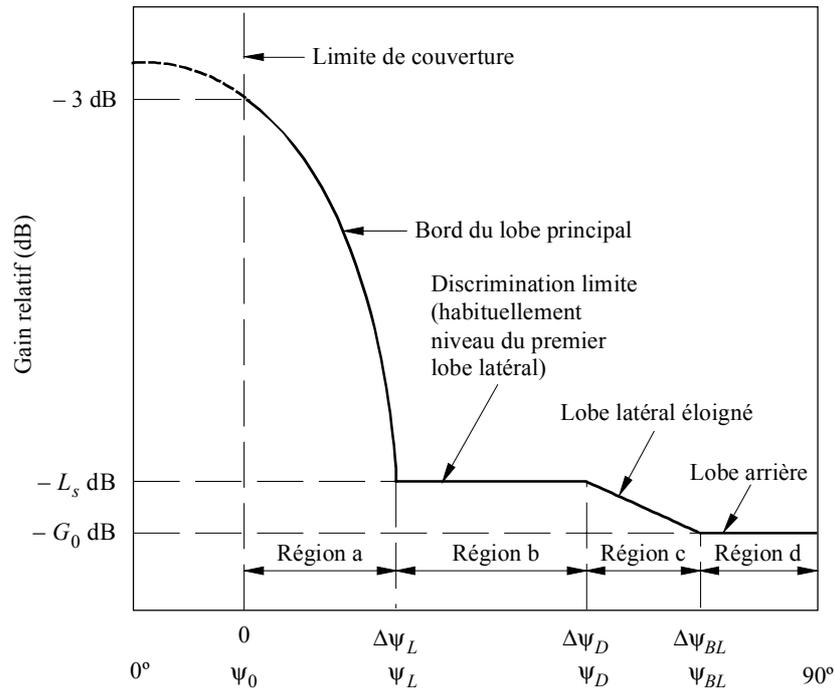
- forme de la zone de couverture,
- longitude du satellite,
- ouverture maximale de l'antenne,
- réalisation de l'alimentation et décroissance progressive de l'illumination,
- diamètre de l'ouverture du réflecteur normalisé ( $D/\lambda$ ),
- rapport de la distance focale au diamètre de l'ouverture ( $F/D$ ),
- nombre de réutilisations des fréquences et d'accès de faisceaux indépendants,
- nombre d'éléments d'alimentation utilisés,
- largeurs de bande,
- besoin de polarisation orthogonale,
- région de couverture angulaire totale assurée,
- stabilité des excitations en phase et en amplitude de l'élément d'alimentation,
- nécessités de reconfiguration,
- nombre de positions orbitales à partir desquelles on doit assurer les couvertures du faisceau,
- tolérances de surface du réflecteur obtenues,
- pointage du faisceau (par exemple: positionnement du faisceau dépendant du satellite ou positionnement du faisceau indépendant grâce à des balises de poursuite situées au sol),
- dégradations des éléments du faisceau dues aux aberrations de balayage qui dépendent du réflecteur ou de la forme de l'antenne dans le cas envisagé (par exemple: réflecteur unique, réflecteur double, système de réflecteur conformé sans axe focal, réseau rayonnant directement, etc.).

En raison de ce qu'on vient d'énumérer, il peut y avoir des difficultés à mettre au point un diagramme de référence unique pour les antennes à faisceau conformé.

Le diagramme de référence de la Fig. 1 n'est pas satisfaisant pour des antennes à faisceau conformé étant donné qu'un paramètre clé du diagramme de référence est  $\psi_0$ , la demi-ouverture à  $-3$  dB, tandis que le centre d'un faisceau conformé est mal défini et ne correspond pas du tout à la réponse hors faisceau. Un diagramme de référence simple comprenant quatre segments, comme indiqué sur la Fig. 2, pourrait être plus satisfaisant comme modèle de diagramme de référence. La pente du bord de ce diagramme serait fonction de la distance angulaire à l'extérieur du contour de couverture.

FIGURE 2

## Forme possible d'un diagramme de rayonnement de référence



$\Delta\psi$ : angle hors axe par rapport au bord de la couverture  
(est par hypothèse équivalent au contour à  $-3$  dB)

$\psi$ : angle hors axe par rapport au point de référence

0672-02

La direction particulière dans laquelle il faut mesurer cette distance angulaire est également un paramètre à définir. Une méthode consiste à mesurer cet angle perpendiculairement au contour de gain constant qui est le plus près de la zone de couverture. Des difficultés surgissent avec cette méthode lorsque des sections des contours de gain sont concaves, comme c'est le cas avec des diagrammes en forme de croissant. Pour ce type de diagramme, la direction perpendiculaire au contour pourrait intercepter à nouveau la zone de couverture. Du point de vue de la conception de l'antenne, la difficulté pour obtenir une discrimination satisfaisante dans la portion concave d'un diagramme augmente avec le degré de concavité. Une autre méthode, qui pourrait permettre de remédier à ces problèmes, consiste à limiter la zone de couverture par un contour qui ne présente pas de concavité et à mesurer ensuite les angles perpendiculairement à partir de ce contour, celui-ci étant considéré comme la limite de couverture. D'autres méthodes permettant de définir la direction dans laquelle il faut faire les mesures sont possibles; ainsi, le centre d'une ellipse de délimitation pourrait être utilisé comme point de référence (voir les § 2.1 et 2.2), mais une définition claire est nécessaire pour un diagramme de référence quelconque.

Une fois la direction définie, les diagrammes de rayonnement peuvent être divisés en quatre régions présentant un intérêt:

**Région a:** Bord du lobe principal (bord de la couverture par rapport à l'angle de discrimination limite)

Cette région est censée correspondre à ce que l'on considère être les régions de couverture adjacentes. La discrimination nécessaire entre réseaux à satellites pourrait être obtenue à partir d'une combinaison de la discrimination d'antenne de satellite et de la séparation orbitale.

Une fonction simple qui pourrait être appliquée à cette région pourrait être semblable à celle indiquée dans l'équation (I) de la Fig. 1.

**Région b:** Région de couverture non adjacente

Cette région commence là où le diagramme de rayonnement offre une discrimination suffisante pour permettre à des satellites occupant presque la même position, de desservir des zones non adjacentes ( $\Delta\psi_L$  dans la Fig. 2). La discrimination limite ( $L_s$ ) serait comprise entre  $-20$  et  $-30$  dB.

**Région c:** Région des lobes latéraux éloignés**Région d:** Région du lobe arrière

Chacune de ces régions est occupée par les lobes latéraux d'ordre élevé; on la prend en considération dans le cas où les zones de service sont très éloignées les unes des autres et, pour les bandes de fréquences utilisées dans les deux sens, pour des parties de l'orbite. Dans ce dernier cas, il faut prendre des précautions quand on considère de très grands angles hors axe, car des effets importants peuvent être produits par des réflexions imprévisibles sur la plate-forme de l'engin spatial et par le débordement sur le réflecteur principal. En attendant d'avoir de plus amples renseignements, il est suggéré de prévoir une enveloppe de gain minimal de 0 dBi (Région d dans la Fig. 2).

## 2 Modèles de diagramme de rayonnement d'antenne à faisceau conformé

Aux fins de modélisation des faisceaux conformés, avant la conception réelle de l'antenne, il est possible d'utiliser un diagramme de référence simplifié. Deux modèles qui peuvent produire ces diagrammes ainsi que les paramètres associés sont présentés ci-après. Ces deux modèles conviennent aux études du brouillage assistées par ordinateur ainsi qu'aux applications manuelles en utilisant des cartes centrées sur le satellite. Ils servent de base pour la recommandation d'un ou plusieurs diagrammes. Toutefois, il serait souhaitable d'appliquer les «coupes des diagrammes» ainsi obtenues seulement dans la direction d'un système sensible au brouillage, c'est-à-dire que ces coupes ne devraient pas être appliquées dans des directions où le potentiel de brouillage pour d'autres réseaux est inexistant (par exemple, hors du contour de la Terre, régions océaniques non peuplées, etc.).

### 2.1 Représentation d'une zone de couverture

Diverses méthodes ont été proposées dans le passé pour représenter la zone de service des antennes du SFS. L'une d'elles consiste à mesurer la distance angulaire à l'extérieur de la zone de couverture dans une direction normale à la topologie de la zone de service (contour de gain constant) telle qu'elle est vue depuis le satellite. Dans la pratique, le contour de gain est conçu pour s'adapter à la zone de service aussi étroitement que possible et en conséquence, il devrait y avoir très peu de différence, que l'on utilise la zone de service ou le contour de gain constant. Toutefois, cette méthode pose des problèmes dans le cas où certaines parties des contours de gain sont concaves, par exemple, avec les diagrammes en forme de croissant. Pour ces diagrammes, la direction normale loin du contour pourrait couper à nouveau la zone de couverture, ce qui provoquerait une certaine ambiguïté (Fig. 3a)). L'autre problème que pose cette représentation est que, pour un emplacement donné à l'extérieur de la zone de couverture, il pourrait y avoir plus d'un point de la zone de service pour lequel la ligne reliant le point d'observation au point de la zone de service, est perpendiculaire au contour de la zone de service en ce point (Fig. 3a)).

Toutefois, une méthode qui permet de contourner les difficultés dont il est fait état plus haut a été mise au point. Elle est basée sur des mesures angulaires perpendiculaires à la zone de couverture et aux diagrammes contenant des parties concaves. Cette méthode fait appel à un certain nombre de constructions graphiques; elle est décrite sous la forme de procédures, par étapes, dans l'Annexe 2.

En outre, ces procédures peuvent être simplifiées au moyen de contours de couverture uniquement convexes. Pour réaliser ces contours, on a suivi la méthode décrite à l'Annexe 2, si ce n'est que seuls les angles convexes, c'est-à-dire ceux où le cercle se trouve à l'intérieur du contour, sont pris en compte. Le contour de couverture qui en résulte est illustré à la Fig. 3b).

Une autre méthode permettant de représenter des diagrammes de faisceaux conformés consiste à circonscrire la zone effective de couverture par une ellipse de superficie minimale. La distance angulaire est mesurée depuis le bord de l'ellipse perpendiculairement à sa périphérie. L'avantage de cette méthode est qu'il est relativement facile d'établir des logiciels très efficaces pour définir la procédure servant à la mesure des angles. Toutefois, cette représentation a tendance à surestimer considérablement la zone définie par la zone de service effective.

Une autre méthode est une méthode mixte qui permet de représenter sans équivoque la zone de couverture d'une antenne à faisceau conformé. On utilise une ellipse, dont la surface est la plus réduite possible, circonscrite à la couverture géographique pour définir le centre dans la zone de couverture. Ce centre ne représente pas nécessairement le centre du faisceau; on ne l'utilise que pour déterminer l'axe des coupes du faisceau. Hormis la détermination du centre de la zone de couverture, cette ellipse minimale n'a pas d'autre utilité.

On utilise ensuite un polygone convexe pour définir les limites de la zone de couverture. Le nombre de côtés formant le polygone est déterminé sur la base de deux critères: il doit circonscrire la zone de couverture de la manière la plus serrée possible et il doit être de forme convexe. Un exemple typique de représentation de la zone de service est montré à la Fig. 3c).

Pour un emplacement d'observation situé à l'extérieur de la zone de couverture, la direction d'application du gabarit et les distances angulaires sont définies sans aucune ambiguïté par rapport au centre de la zone de couverture. Toutefois, cette méthode sous-estime en général l'espacement angulaire entre les contours de gain à l'extérieur de la zone de couverture lorsque l'angle du radial par rapport au contour de couverture s'écarte sensiblement de la perpendiculaire.

En résumé, il semblerait que la méthode la plus acceptable, tant du point de vue de la précision que de la facilité de construction, soit celle du contour de couverture uniquement convexe, la distance angulaire étant mesurée perpendiculairement aux bords du contour, comme le montre la Fig. 3b).

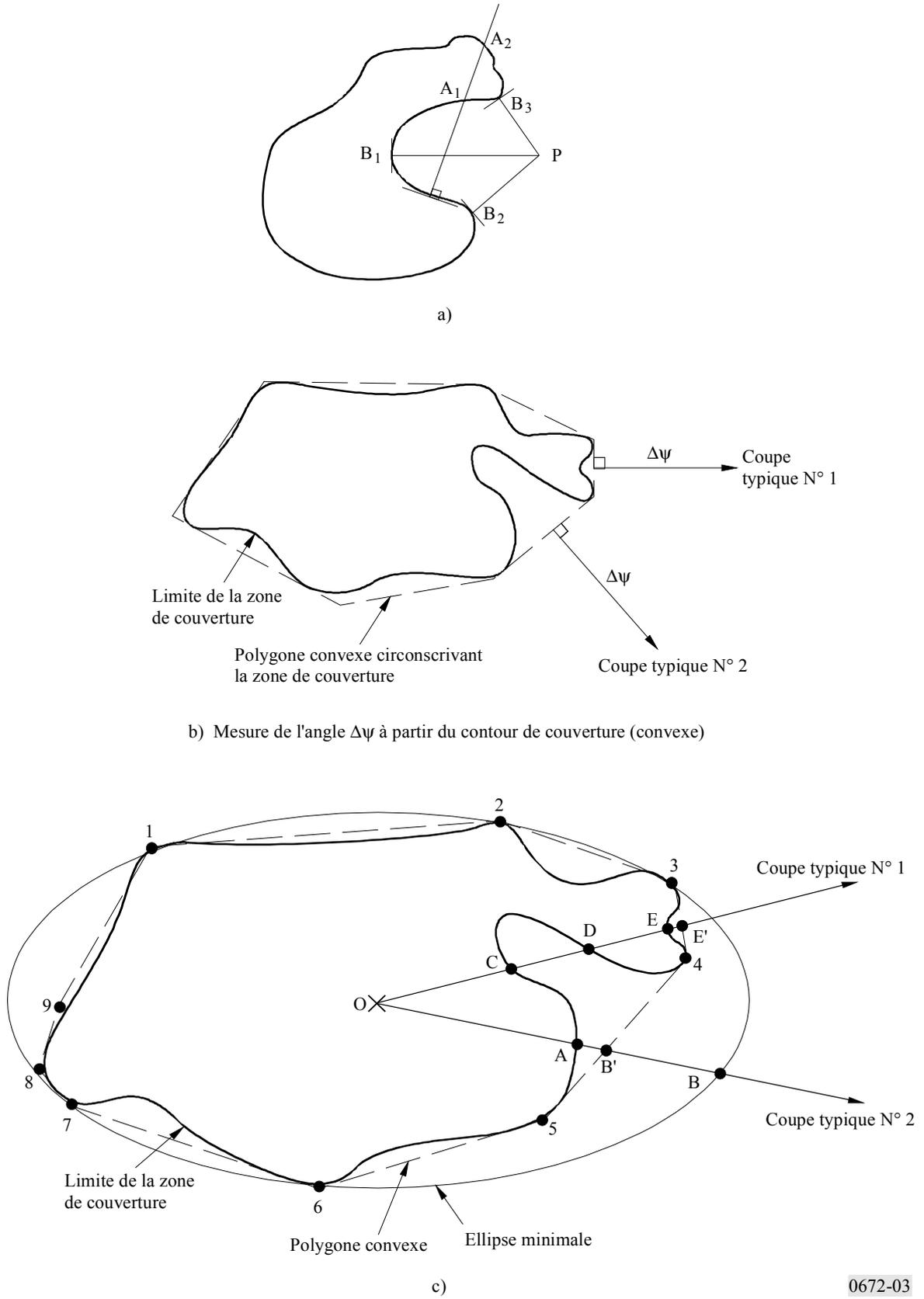
## 2.2 Gain de crête équivalent

Dans les cas où il n'est pas nécessaire d'adapter le faisceau pour compenser les variations des conditions de propagation sur l'étendue de la zone de service, on considère que le gain minimal sur la zone de couverture, obtenu sur le contour de cette zone, est inférieur de 3 dB au gain de crête équivalent ( $G_{ep}$ ). Dans la pratique, le gain de crête effectif peut être supérieur ou inférieur au gain de crête équivalent et il n'est pas forcément obtenu sur l'axe.

Dans certains cas, les conditions de propagation pourraient varier considérablement sur la zone de service, ou les exigences du service pourraient justifier un ajustement spécial du faisceau dans cette zone. En pareils cas, on calcule le gain relatif minimal nécessaire (par rapport au gain moyen sur le contour de la zone de couverture) à chaque sommet du polygone, et on peut ensuite appliquer une interpolation linéaire (en azimut à partir de l'axe du faisceau) pour déterminer le gain relatif dans les azimuts intermédiaires. Dans cette situation, le gain sur le contour de la zone de couverture dépend de la direction.

Il faut noter que, pour un faisceau conformé, la variation du gain dans la zone de couverture n'est pas liée à sa décroissance progressive au-delà de la limite de couverture. La qualité opérationnelle de l'antenne dans la zone de couverture, y compris au point de vue du gain, n'est pas liée au brouillage introduit dans les systèmes adjacents. La variation du gain dans la zone de couverture ne doit donc pas nécessairement être précisée dans les diagrammes de référence du faisceau conformé.

FIGURE 3  
Différentes représentations de la zone de couverture



### 2.3 Taille des petits faisceaux élémentaires

Les niveaux dans les lobes latéraux sont déterminés par la fonction d'illumination de l'ouverture. Considérons une loi d'illumination de la forme:

$$f(x) = \cos^N \left( \frac{\pi}{2} \cdot x \right) \quad |x| \leq 1 \quad (5)$$

Cette fonction s'annule sur le bord de l'ouverture pour  $N > 0$ . Le rayon du petit faisceau élémentaire, en fonction du niveau dans les lobes latéraux (dB) et du rapport  $D/\lambda$ , est donné en première approximation, dans l'intervalle considéré, par l'expression:

$$\psi_b = (16,56 - 0,775 L_s) \lambda/D \quad \text{degrés} \quad (6)$$

où  $L_s$  désigne le niveau relatif dans le premier lobe latéral (dB).

Cette expression illustre le compromis que l'on fait entre le diamètre d'antenne, le niveau dans les lobes latéraux et la pente de l'enveloppe du lobe principal. On l'a établie à partir de résultats de mesure pour différents niveaux de lobes latéraux. Cette relation a servi de point de départ aux modèles décrits ci-dessous.

### 2.4 Elaboration de modèles de diagramme de référence copolaire

On trouvera dans ce paragraphe la description de diagrammes copolaires généralisés pour les futures antennes à faisceau conformé. Ils ont été établis sur la base de mesures faites sur plusieurs antennes de ce type (Brazilsat, Anik-C, Anik-E, TDRSS, Intelsat-V, G-Star, Intelsat-VI, Intelsat-VII, Cobra) et d'après des considérations théoriques.

Les modèles antérieurs ne semblent pas avoir quantifié les effets d'élargissement du faisceau. Les modèles décrits dans ce paragraphe correspondent à deux méthodes distinctes permettant de tenir compte de ces effets, ce qui est essentiel pour prévoir avec précision la performance de l'antenne à faisceau conformé.

#### 2.4.1 Premier modèle

Le diagramme d'antenne à faisceau conformé décrit dans le présent paragraphe est défini en fonction de paramètres primaires et secondaires. Les paramètres primaires sont la taille du petit faisceau secondaire, la largeur de la zone de couverture dans la direction voulue et le niveau de crête des lobes latéraux. Les paramètres secondaires sont les paramètres d'occultation, la déviation à la surface et le nombre de faisceaux de balayage. Les paramètres secondaires ont pour effet, en ce qui concerne le rayonnement de l'antenne, d'élargir le faisceau principal et d'accroître le niveau des lobes latéraux. Bien que le paramètre dominant en ce qui concerne l'élargissement du faisceau soit le nombre de faisceaux de balayage, l'effet des deux autres paramètres est donné ici par souci d'exhaustivité. Toutefois, l'effet de l'occultation sur le niveau des lobes latéraux ne doit pas être négligé. Il est en effet vrai que, en raison de limitations pratiques, même si, au niveau de la conception d'une antenne de satellite on exige le maintien de critères exempts d'occultation, il existe normalement une faible occultation aux bords, en particulier pour les antennes rectilignes à double polarisation employant une ouverture commune, comme c'est le cas des réflecteurs à double grille utilisés pour Anik-E, G-Star, Anik-C, Brazilsat, etc. Cela est dû à l'espacement requis entre les centres des deux réflecteurs qui se chevauchent aux fins de l'isolation et du volume nécessaire pour tenir compte de deux jeux de cornets.

Dans les régions des lobes latéraux éloignés, on possède très peu de données mesurées pour pouvoir élaborer un modèle. Les réflexions sur la structure de l'engin spatial, les débordements du réseau d'alimentation et le rayonnement direct des groupes d'alimentation peuvent introduire des incertitudes pour les grands angles hors axe et peuvent réduire à néant les raisonnements théoriques.

Il est aussi extrêmement difficile de faire des mesures dans cette région; il faudra donc poursuivre l'étude si l'on veut que le modèle inspire confiance pour des applications dans cette région. Dans l'intervalle, il est suggéré d'introduire un palier de gain minimal de 0 dBi.

Il convient de noter que le diagramme proposé s'applique uniquement dans les directions où la valeur du niveau des lobes latéraux est à considérer. Dans des directions non critiques – par exemple vers les océans, au-delà du bord de la Terre ou dans toute direction où il n'y a pas de problème de brouillage – ce diagramme ne constitue pas forcément un modèle représentatif.

### Modèle copolaire général N° 1

Il est proposé d'utiliser le modèle suivant à trois segments qui représente l'enveloppe du diagramme de rayonnement d'une antenne de satellite à faisceau conformé en dehors de la zone de couverture:

Bord du lobe principal:

$$G_{\text{dBi}}(\Delta\psi) = G_{ep} + U - 4V \left( \frac{\Delta\psi}{Q\psi_0} + 0,5 \right)^2 \quad \text{pour} \quad 0 \leq \Delta\psi \leq W \cdot Q \cdot \psi_0$$

Région des premiers lobes latéraux:

$$G_{\text{dBi}}(\Delta\psi) = G_{ep} + SL \quad \text{pour} \quad W \cdot Q \cdot \psi_0 \leq \Delta\psi \leq Z \cdot Q \cdot \psi_0$$

Région des lobes latéraux éloignés:

$$G_{\text{dBi}}(\Delta\psi) = G_{ep} + SL + 20 \log(Z \cdot Q \cdot \psi_0 / \Delta\psi) \quad \text{pour} \quad Z \leq \Delta\psi \leq 18$$

où:

$\Delta\psi$ : angle par rapport au bord de la zone de couverture (degrés)

$G_{\text{dBi}}(\Delta\psi)$ : gain à  $\Delta\psi$  (dBi)

$G_{ep}$ : gain de crête équivalent

$$G_{ep} = G_e + 3,0 \text{ (dBi)}$$

$\psi_0$ : diamètre à demi-puissance du faisceau élémentaire (degrés)

$$\psi_0 \approx (33,12 - 1,55 SL) \lambda / D$$

$\lambda$ : longueur d'onde (m)

$D$ : diamètre du réflecteur (m)

$SL$ : niveau des lobes latéraux par rapport au niveau de crête (dB)

$U = 10 \log A$ ,  $V = 4,3429 B$  sont les principaux paramètres de faisceau

$$B = [\ln(0,5/10^{0,1SL})] / [[(16,30 - 3,345 SL) / (16,56 - 0,775 SL)]^2 - 1]$$

$$A = 0,5 \exp(B)$$

$$W = (-0,26 - 2,57 SL) / (33,12 - 1,55 SL)$$

$$Z = (77,18 - 2,445 SL) / (33,12 - 1,55 SL)$$

$Q$ : facteur d'élargissement du faisceau dû aux effets secondaires:

$$Q = \exp[(8\pi^2(\epsilon/\lambda)^2) \cdot [\eta_i(\Delta)]^{-0,5} \cdot 10^{\left( \frac{0,000075(\delta - 1/2)^2}{[(F/D_p)^2 + 0,02]^2} \right)}] \quad (7)$$

Les variables de l'équation (7) sont:

$\epsilon$ : valeur quadratique moyenne de l'erreur de surface

$\Delta$ : paramètre d'occultation (racine carrée du rapport de la surface occultée à la surface d'ouverture)

$\delta$ : largeur du faisceau, en dehors de l'axe, soumise à balayage  
 $= \theta_0 / \psi_0$

$\theta_0$ : angle entre le centre de la zone de couverture (centre de l'ellipse d'aire minimale) et le bord de la zone de couverture

$$\eta_i(\Delta) = 1 - \Delta^2 \quad \text{pour l'occultation centrale}$$

$$= [1 - [1 - A(1 - \Delta)^2] \Delta^2]^2 \quad \text{pour l'occultation aux bords} \quad (8)$$

Le paramètre  $A$  de l'équation (8) est la hauteur du piédestal dans la fonction d'éclairement primaire  $(1 - Ar^2)$  sur le réflecteur et  $r$  est la distance normalisée à partir du centre dans le plan de l'ouverture du réflecteur ( $r = 1$  au bord).  $F/D_p$  dans l'équation (7) est le rapport de la longueur focale au diamètre de la parabole. Pour concevoir effectivement une antenne de satellite, on utilise un rapport  $F/D_p$  compris entre 0,35 et 0,45.

Le gain des lobes latéraux éloignés dépend des effets de débordement du réseau de la source primaire et des effets de réflexion et de diffraction de la structure de l'engin spatial. Ces effets dépendent des modèles individuels et pour cette raison il est difficile d'en tirer des conclusions générales.

Comme il est indiqué dans l'équation (7), le facteur d'élargissement du faisceau,  $Q$ , dépend de la valeur quadratique moyenne de l'erreur de surface,  $\varepsilon$ , du paramètre d'occultation,  $\Delta$ , du nombre de faisceaux balayés  $\delta$ , et du rapport  $F/D_p$ . Toutefois, dans la pratique, l'effet de  $\varepsilon$  et de  $\Delta$  sur l'élargissement du faisceau est en général faible et peut être négligé. En conséquence, on peut simplifier comme suit l'équation (7):

$$Q = 10^{\left( \frac{0,000075 (\delta - 1/2)^2}{[(F/D_p)^2 + 0,02]^2} \right)} \quad (9)$$

où:

$$D_p = 2(d + h)$$

$d$ : diamètre prévu d'ouverture du paraboloïde excentré

$h$ : hauteur décalée par rapport au bord du réflecteur.

L'équation (9) démontre clairement que l'élargissement du faisceau dépend du nombre de faisceaux balayés et du rapport  $F/D_p$  de l'antenne du satellite. Cette expression est valable pour un nombre  $\delta$  de faisceaux de balayage pouvant aller jusqu'à neuf, ce qui est plus que suffisant pour assurer une couverture globale, même dans la bande des 14/11 GHz. Pour les zones de service aussi grandes que celles du Canada, des Etats-Unis d'Amérique ou de la Chine, la valeur de  $\delta$  correspond en général à un ou deux faisceaux dans la bande des 6/4 GHz et de quatre faisceaux environ dans la bande des 14/11 GHz dans l'application de ce modèle. En conséquence, pour la plupart des systèmes, la valeur de  $Q$  est en général inférieure à 1,1, c'est-à-dire que l'effet d'élargissement du faisceau représente en général près de 10% de la largeur du faisceau secondaire élémentaire de l'antenne à faisceau conformé.

En négligeant l'élargissement du faisceau principal dû à l'occultation et aux erreurs de surface de réflexion, et dans l'hypothèse d'une valeur de 0,35 pour le rapport  $F/D_p$  du réflecteur, qui est le cas le plus défavorable, le facteur d'élargissement du faisceau,  $Q$ , peut être simplifié comme suit:

$$Q = 10^{0,0037 (\delta - 1/2)^2}$$

Dans la bande des 6/4 GHz, on peut obtenir sans peine un niveau de  $-25$  dB dans les lobes latéraux, avec une antenne, constituée par un réflecteur plein de 2 m de diamètre et plusieurs cornets d'alimentation, compatible avec un lanceur du type PAM-D. Pour obtenir une discrimination de 30 dB, il pourrait être nécessaire de prévoir un plus grand diamètre d'antenne, si l'on veut assurer

une protection ou une régulation dans un large intervalle angulaire. Dans les bandes des 14/11 GHz attribuées au SFS, on peut généralement réaliser une discrimination de 30 dB avec l'antenne de 2 m et en utilisant un système d'alimentation plus élaboré.

Les équations définissant le diagramme de référence dépendent de l'angle de balayage du faisceau à la limite de couverture dans la direction de la coupe à laquelle le diagramme est appliqué. Pour utiliser un diagramme de référence à titre d'objectif de conception, il est souhaitable de disposer d'un diagramme simple, dépendant le moins possible des éléments paramétriques. En conséquence, il conviendrait de choisir et d'incorporer dans les équations qui précèdent une ou plusieurs valeurs de  $Q$  correspondant aux couvertures types des satellites.

On peut obtenir une pente de décroissance du faisceau principal plus raide pour les zones desservies par un service à satellite national que pour les zones de couverture régionales très étendues. Inversement, un diagramme de référence convenant à une couverture régionale ne sera pas assez restrictif pour une couverture nationale par satellite.

Il est donc proposé de simplifier le modèle N° 1 en le ramenant à deux cas pour les antennes du SFS. On a supposé dans ces deux cas un palier de niveau des lobes secondaires de -25 dB.

**a) Régions à couverture réduite ( $\delta < 3,5$ )**

La plupart des zones de couverture nationale par satellite relèvent de cette catégorie. Pour tenir compte de la faible dégradation due au balayage dans le cas des régions à couverture réduite, on adopte la valeur 1,10 pour le facteur d'élargissement du faisceau,  $Q$ . Les diagrammes de référence sont définis comme suit:

$$G_{\text{dBi}}(\Delta\psi) = \begin{cases} G_{ep} + 0,256 - \frac{10,797}{\psi_0^2} (\Delta\psi + 0,55 \psi_0)^2 & \text{pour } 0 \leq \Delta\psi \leq 0,9794 \psi_0 \\ G_{ep} - 25 & \text{pour } 0,9794 \psi_0 < \Delta\psi \leq 2,1168 \psi_0 \\ G_{ep} - 25 + 20 \log(2,1168 \psi_0 / \Delta\psi) & \text{pour } 2,1168 \psi_0 < \Delta\psi \leq 18 \end{cases}$$

**b) Régions à large couverture ( $\delta > 3,5$ )**

Les couvertures hémisphériques et globales des satellites INTELSAT et INMARSAT relèvent, par exemple, de cette catégorie. Pour tenir compte de la dégradation due à l'importance du balayage, on adopte pour  $Q$  la valeur 1,3. Les diagrammes de référence applicables à ce type de couverture ( $\delta > 3,5$ ) sont définis comme suit:

$$G_{\text{dBi}}(\Delta\psi) = \begin{cases} G_{ep} + 0,256 - \frac{7,73}{\psi_0^2} (\Delta\psi + 0,65 \psi_0)^2 & \text{pour } 0 \leq \Delta\psi \leq 1,1575 \psi_0 \\ G_{ep} - 25 & \text{pour } 1,1575 \psi_0 < \Delta\psi \leq 2,5017 \psi_0 \\ G_{ep} - 25 + 20 \log(2,5017 \psi_0 / \Delta\psi) & \text{pour } 2,5017 \psi_0 < \Delta\psi \leq 18 \end{cases}$$

**2.4.2 Deuxième modèle**

La mise au point d'un diagramme relativement simple pouvant être appliqué à différentes antennes de satellite sans préjudice de tel ou tel projet ou système, se heurtera à de nombreuses difficultés. Pour cette raison, le gabarit présenté dans le modèle N° 2 n'a pas pour objet de décrire une seule enveloppe, mais une configuration générale. Le gabarit peut être envisagé non seulement pour une seule application d'antenne, mais aussi comme représentation globale d'une famille de gabarits décrivant des antennes convenant aux différentes applications.

Dans le modèle, on s'est efforcé de tenir pleinement compte de l'élargissement du faisceau qui résulte de faisceaux composants balayant à l'extérieur de l'axe de visée des antennes à faisceau conformé. On a particulièrement veillé à tenir compte des effets du brouillage et du couplage

mutuel des faisceaux élémentaires adjacents entourant le faisceau élémentaire étudié. Pour simplifier la formulation, on a pris en considération deux faisceaux élémentaires adjacents supplémentaires dans la direction de balayage des faisceaux élémentaires composants. La variation de l'élargissement du faisceau avec le rapport  $F/D$  a également été prise en compte, soumise à des essais dans la gamme  $0,70 \leq F/D \leq 1,3$  et mise en modèle pour un plan de balayage moyen entre le plan de l'angle d'élévation et le plan de l'azimut. Si la mise en modèle n'avait été effectuée que pour le seul plan de l'azimut, on aurait pu obtenir des caractéristiques plus marquées que prévu. Les autres hypothèses formulées dans le modèle sont les suivantes:

- il a été admis que la frontière des faisceaux composants correspondant aux éléments individuels correspond au contour idéal à  $-3$  dB du faisceau à couverture conformée;
- le rayon du faisceau composant  $\psi_b$  est donné par la formule (6) et correspond à une décroissance de  $-4$  dB en limite d'ouverture;
- la valeur de  $B$  qui commande la région du faisceau principal est modélisée directement en tant que fonction de l'angle de balayage du faisceau composant, du diamètre  $D$  de l'antenne et du rapport  $F/D$  du réflecteur de l'antenne.

La valeur de  $F/D$  utilisée dans ce modèle est le rapport de la longueur focale au diamètre physique du réflecteur. Le modèle est valable pour des réflecteurs de diamètre allant jusqu'à  $120 \lambda$ , avec un balayage de faisceau allant jusqu'à 13 largeurs de faisceau, et s'est avéré avoir une bonne corrélation avec 34 coupes de diagramme environ, prises sur 4 antennes différentes.

Compte tenu du fait que, dans l'avenir, on aurait avantage à imposer un contrôle plus strict au fonctionnement de l'antenne, ce modèle fournit deux facteurs d'amélioration simples,  $K_1$  et  $K_2$ , qui modifient le diagramme général obtenu jusqu'à présent.

### Modèle copolaire général N° 2

Les équations pour les diverses régions et les valeurs correspondantes du gain de l'antenne en dehors de son axe principal sont données ci-après. Ces valeurs de gain sont mesurées dans une direction perpendiculaire à la zone de couverture pour chaque point et cette technique est associée à la définition de la zone de couverture donnée dans l'Annexe 2.

On donne à  $K_1$  et  $K_2$  la valeur 1:  $K_1 = K_2 = 1$ .

Les équations utilisées dans ce modèle sont normalisées sur la base d'un niveau de  $-20$  dB pour le premier lobe latéral ( $L_S$ ). Par la suite, cette valeur sera remplacée par la valeur spécifique choisie pour l'application considérée.

#### a) Région limite du lobe principal: ( $0^\circ \leq \Delta\psi < C\psi_b$ )

Dans cette région, la fonction de gain est donnée par:

$$G(\Delta\psi) = G_e - K_1 B \left[ \left( 1 + \frac{\Delta\psi}{\psi_b} \right)^2 - 1 \right] \quad \text{dBi} \quad (10)$$

où:

$G(\Delta\psi)$ : gain dans le diagramme de référence (dBi)

$G_e$ : gain en limite de couverture (dBi)

$\Delta\psi$ : angle (degrés), par rapport au contour de couverture (convexe), dans une direction perpendiculaire au contour

$\psi_b = 32 \lambda/D$  est le rayon du faisceau élémentaire (degrés) (correspondant à  $L_S = -20$  dB dans l'équation (6))

$B = B_0 - (S - 1,25) \Delta B$  pour  $S \geq 1,25$  et

$$B = B_0 \quad \text{pour } S < 1,25$$

$$B_0 = 2,05 + 0,5 (F/D - 1) + 0,0025 D/\lambda$$

$$\Delta B = 1,65 (D/\lambda)^{-0,55}.$$

Les équations du plan d'azimut et du plan de site sont données ici pour répondre au cas général.

Plan d'azimut:  $B_0 = 2,15 + T$

Plan de site:  $B_0 = 1,95 + T$

où  $T = 0,5 (F/D - 1) + 0,0025 D/\lambda$

Plan d'azimut:  $\Delta B = 1,3 (D/\lambda)^{-0,55}$

Plan de site:  $\Delta B = 2,0 (D/\lambda)^{-0,55}$

$D$ : diamètre d'antenne (m)

$\lambda$ : longueur d'onde (m)

$S$ : déplacement angulaire  $A$  par rapport à la ligne de visée de l'antenne du point situé sur la limite de couverture de la largeur du faisceau à mi-puissance du faisceau secondaire comme l'indique la Fig. 4, c'est-à-dire:  $S_1 = A_1 / 2\psi_b$  et  $S_2 = A_2 / 2\psi_b$

$$C = \sqrt{1 + \frac{(20 K_2 - 3)}{K_1 B}} - 1$$

et correspond à la limite où  $G(\Delta\psi)$  correspond à un niveau  $-20 K_2$  (dB) par rapport au gain équivalent en crête  $G_{ep}$ , c'est-à-dire  $G(\Delta\psi) = G_e + 3 - 20 K_2$ .

**b) Région voisine du lobe principal:**  $C\psi_b \leq \Delta\psi < (C + 0,5)\psi_b$

On a délibérément conservé cette région très étroite pour les raisons suivantes. De forts lobes latéraux de l'ordre de  $-20$  dB apparaissent dans quelques plans seulement et sont suivis par des lobes latéraux à décroissance monotone. Dans les régions où l'on observe un élargissement du faisceau, le premier lobe latéral fusionne avec le lobe principal qui a déjà été modélisé par  $B$  pour la jupe du faisceau. De ce fait, il est nécessaire de garder cette région très étroite afin de ne pas surestimer le niveau de rayonnement (pour les antennes de la classe B, cette région a été légèrement élargie et la fonction du gain modifiée). La fonction de gain de cette région est constante et elle est donnée par la formule:

$$G(\Delta\psi) = G_e + 3 - 20 K_2 \quad (11)$$

**c) Région des lobes latéraux intermédiaires:**  $(C + 0,5)\psi_b \leq \Delta\psi < (C + 4,5)\psi_b$

Cette région se caractérise par des lobes latéraux à décroissance monotone. Généralement, l'enveloppe diminue d'environ 10 dB sur une largeur de  $4\psi_b$ . De ce fait, elle est donnée par la formule:

$$G(\Delta\psi) = G_e + 3 - 20 K_2 + 2,5 \left[ (C + 0,5) - \frac{\Delta\psi}{\psi_b} \right] \quad \text{dBi} \quad (12)$$

Cette expression décroît de la valeur  $G_e + 3 - 20 K_2$  pour  $(C + 0,5)\psi_b$  à la valeur  $G_e + 3 - 10 - 20 K_2$  pour  $(C + 4,5)\psi_b$ .

**d) Région des lobes latéraux à grand angle:**  $(C + 4,5)\psi_b \leq \Delta\psi < (C + 4,5)\psi_b D,$

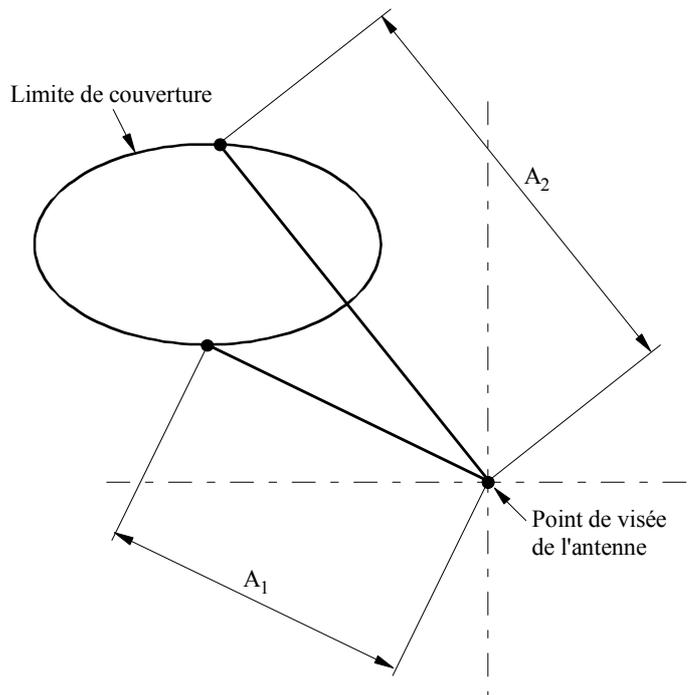
où  $D = 10^{[(G_e - 27)/20]}$

Elle correspond à la région dominée par la diffraction en limite du réflecteur et décroît d'environ 6 dB par octave. Elle est décrite par la formule:

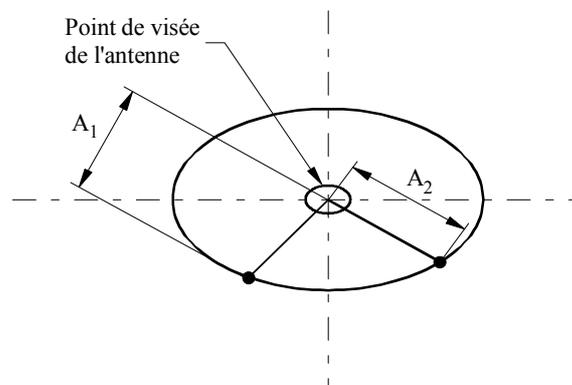
$$G(\Delta\psi) = G_e + 3 - 10 - 20 K_2 + 20 \log \left[ \frac{(C + 4,5) \psi_b}{\Delta\psi} \right] \quad \text{dBi} \quad (13)$$

Dans cette région,  $G(\Delta\psi)$  décroît de la valeur  $G_e + 3 - 10 - 20 K_2$  pour  $(C + 4,5) \psi_b$  à la valeur  $G_e + 3 - 16 - 20 K_2$  pour  $2(C + 4,5) \psi_b$ . La limite supérieure correspond au point où  $G(\Delta\psi) = 3$  dBi.

FIGURE 4  
Diagramme d'une zone de couverture



a) Point de visée à l'extérieur de la zone de couverture



b) Point de visée à l'intérieur de la zone de couverture

$A_1, A_2$ : écart angulaire (degrés) des deux points sur la limite de couverture à partir du point de visée de l'antenne

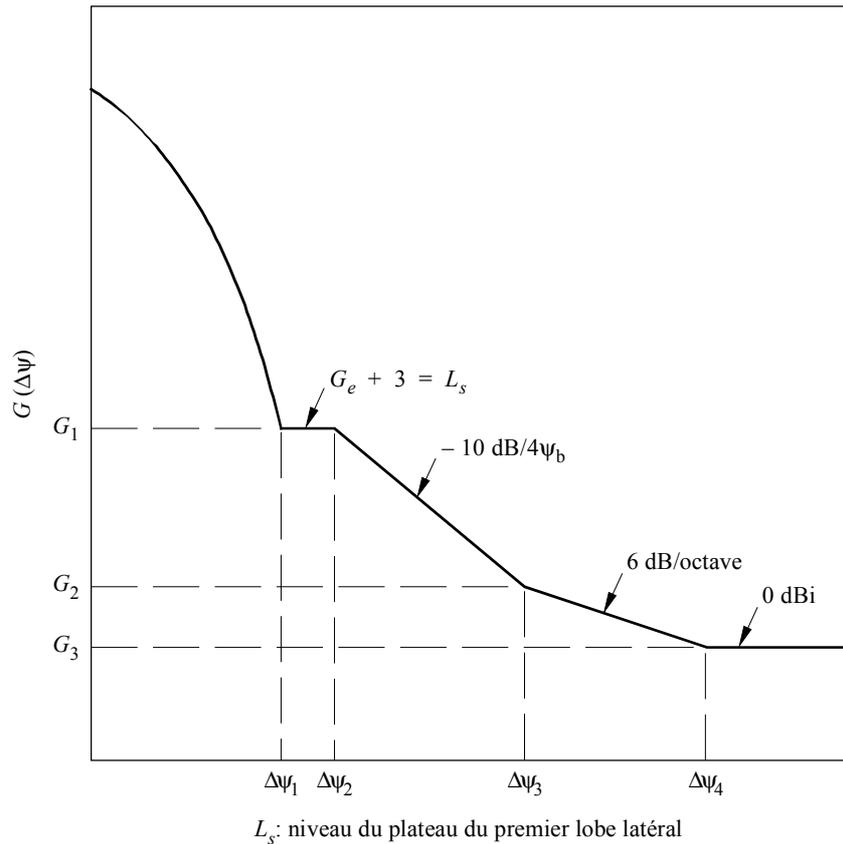
e) **Région des lobes latéraux éloignés:**  $(C + 4,5) \psi_b D \leq \Delta\psi \leq 90,$

où  $D = 10^{[(G_e - 27) / 20]}$

$$G(\Delta\psi) = 3 \quad \text{dBi} \quad (14)$$

Ces régions sont décrites à la Fig. 5.

FIGURE 5  
Diverses régions du modèle proposé N° 2



0672-05

Le modèle peut aussi être étendu aux cas de faisceaux circulaires simples, de faisceaux elliptiques et d'antennes à réflecteur conformé. Ces cas sont couverts par ajustement à la valeur de  $B$  indiquée dans le modèle général ci-dessus:

- pour les faisceaux circulaires simples et les faisceaux elliptiques, on donne à  $B$  la valeur de 3,25;
- pour les réflecteurs conformés, les paramètres ci-après sont modifiés comme suit:

$$B = \begin{cases} 1,3 & \text{pour } 0,5 \leq S \leq 0,75 \\ 1,56 - 0,34 S & \text{pour } 0,75 < S \leq 2,75 \\ 0,62 & \text{pour } S > 2,75 \end{cases}$$

où:

$S$ : (déplacement angulaire par rapport au centre de la couverture) /  $2\psi_b$

$$\psi_b = 40 \lambda/D$$

$$K_2 = 1,25$$

Il est à noter que les valeurs proposées pour les antennes à réflecteur conformé correspondent aux renseignements disponibles pour des configurations d'antenne simples. Cette nouvelle technologie se développe rapidement et par conséquent ces valeurs doivent être considérées comme provisoires. De plus, il sera peut-être nécessaire de procéder à un complément d'étude pour vérifier les niveaux de plateau pouvant être atteints dans les lobes latéraux.

### Utilisation des facteurs d'amélioration $K_1$ et $K_2$

Les facteurs d'amélioration  $K_1$  et  $K_2$  ne servent pas à exprimer un quelconque processus physique dans le modèle, mais sont de simples constantes destinées à effectuer des ajustements permettant l'adaptation à la forme globale du diagramme de rayonnement de l'antenne sans en changer sa substance.

Un accroissement de la valeur de  $K_1$  par rapport à sa valeur actuelle de 1 entraînera un accroissement de la rapidité de décroissance dans le faisceau principal.

On peut utiliser le paramètre  $K_2$  pour ajuster les niveaux de la région du plateau des lobes latéraux en accroissant  $K_2$  par rapport à sa valeur unitaire.

## 2.5 Caractéristiques de réduction des diagrammes de rayonnement de faisceaux conformés

Les caractéristiques de décroissance du faisceau principal des antennes à faisceau conformé dépendent principalement de la taille de l'antenne. La distance angulaire  $\Delta\psi_L$  du bord de la zone de couverture jusqu'au point où le gain a diminué de 22 dB (par rapport au gain sur les bords) est un paramètre utile pour les besoins de la planification de l'orbite. Elle est liée de la manière suivante à la taille de l'antenne:

$$\Delta\psi_L = C (\lambda/D)$$

En ce qui concerne les faisceaux centraux qui sont peu ou pas conformés, la valeur de  $C$  est de 64 pour un niveau de crête des lobes latéraux de -25 dB. Toutefois, dans le cas des faisceaux soumis à balayage, la valeur de  $C$  est généralement de 64 à 80 selon l'importance de l'élargissement du faisceau principal.

## 2.6 Diagramme de référence pour des rapports de balayage intermédiaires

Les § 2.1 et 2.2 du dispositif prévoient deux diagrammes de référence pour les antennes de satellite du SFS: l'un pour des zones de couverture réduites, dont le rapport de balayage est inférieur à 3,5 et l'autre pour des zones de couverture étendues dont le rapport de balayage est supérieur à 5,0. Toutefois, on n'a pas défini de diagrammes de rayonnement pour des rapports de balayage intermédiaires ( $3,5 < \delta < 5,0$ ) d'antennes de satellite.

Afin de tirer pleinement parti de la Recommandation, il conviendrait de définir le diagramme de rayonnement des antennes dont les rapports de balayage intermédiaires se situent entre 3,5 et 5,0. Une méthode consisterait à redéfinir l'un des deux modèles afin qu'il couvre l'autre région. Il est toutefois proposé, comme solution provisoire, de relier les deux modèles par un diagramme de référence défini au moyen de paramètres semblables à ceux qui sont utilisés aux § 2.1 et 2.2 du dispositif.

A l'aide de cette méthode, on a mis au point un nouveau diagramme de référence uniquement applicable aux antennes de la classe A, et conçu de façon à satisfaire les diagrammes des antennes existantes pour des zones de couverture réduites et étendues pour  $\delta = 3,5$  et  $\delta = 5,0$  respectivement. Il est défini en fonction du facteur d'élargissement du faisceau  $Q_i$  qui est le rapport entre les limites

supérieures des régions de réduction du faisceau principal dans le faisceau modelé ( $\delta > 1/2$ ) et le faisceau pinceau ( $\delta = 1/2$ ). Pour des rapports de balayage compris dans l'intervalle  $3,5 < \delta < 5,0$  on calcule  $Q_i$  comme suit:

$$Q_i = Q + \left( \frac{C}{1,7808} - Q \right) \left( \frac{\delta - 3,5}{1,5} \right)$$

où:

$$Q = 10 \left( \frac{0,000075 (\delta - 1/2)^2}{[(F/D_p)^2 + 0,02]^2} \right)$$

$$C = \sqrt{1 + \frac{22}{B}} - 1$$

$$B = 2,05 + 0,5 (F/D - 1) + 0,0025 D/\lambda - (\delta - 1,25) 1,65 (D/\lambda)^{-0,55}$$

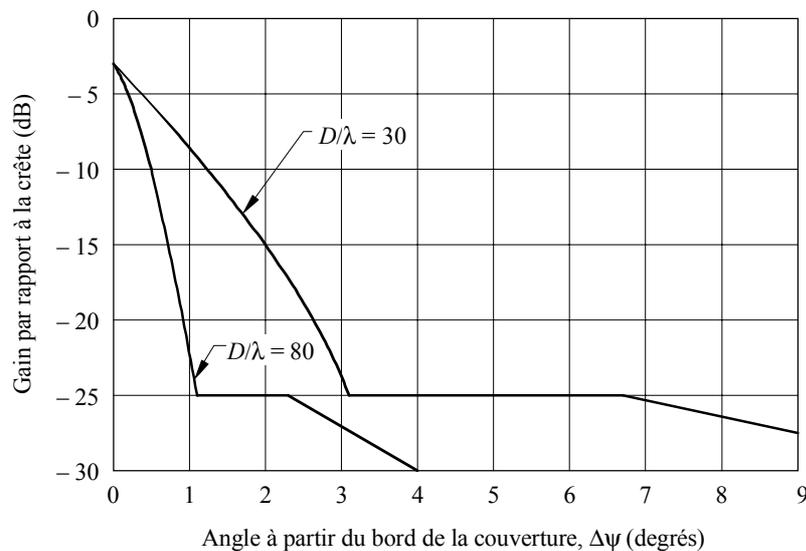
Pour les rapports de balayage intermédiaires ( $3,5 < \delta < 5,0$ ), le diagramme de référence est défini comme suit:

$$G_{\text{dBi}}(\Delta\Psi) = \begin{cases} G_{ep} + 0,256 - 13,065 \left( \frac{\Delta\Psi}{Q_i \Psi_0} + 0,5 \right)^2 & \text{pour } 0 \leq \frac{\Delta\Psi}{\Psi_0} \leq 0,8904 Q_i \\ G_{ep} - 25 & \text{pour } 0,8904 Q_i < \frac{\Delta\Psi}{\Psi_0} \leq 1,9244 Q_i \\ G_{ep} - 25 + 20 \log \left( \frac{1,9244 Q_i}{\Delta\Psi} \right) & \text{pour } 1,9244 Q_i < \frac{\Delta\Psi}{\Psi_0} \leq \frac{18}{\Psi_0} \end{cases}$$

Les variables des équations ci-dessus ont été définies aux § 2.1 et 2.2 du dispositif.

La Fig. 6 donne un exemple du nouveau diagramme de référence pour  $\delta = 4,25$  et pour deux valeurs différentes du rapport  $D/\lambda$ .

FIGURE 6  
Diagramme de référence proposé pour des rapports de balayage intermédiaires ( $3,5 < \delta < 5,0$ )



$D/\lambda$  : paramètre des courbes  
 $\delta = 1,25$   
 $F/D = 1, F/D_p = 0,35$

Un complément d'étude est nécessaire afin de valider ce modèle pour la région correspondant à des rapports de balayage intermédiaires.

## ANNEXE 2

### 1 Définition des contours de la zone de couverture et des contours de gain autour de la zone de couverture

#### 1.1 Définition des contours de la zone de couverture

Il est possible de définir une zone de couverture par une suite de points géographiques tels qu'on les voit d'un satellite. Le nombre de points nécessaire pour définir valablement la zone de couverture est fonction de la complexité de la zone. On peut déplacer ces points pour rendre compte des tolérances de pointage d'antenne et des variations dues à des considérations concernant l'arc de service. On obtient un polygone en reliant les points adjacents. Un contour de zone de couverture est tracé autour de ce polygone en observant les deux principes suivants:

- le rayon de courbure du contour de la zone de couverture devrait être supérieur ou égal à  $\psi_b$ ;
- la séparation entre les segments de droite du contour de la zone de couverture devrait être supérieure à  $2\psi_b$  (voir la Fig. 7).

S'il est possible d'inscrire le polygone de couverture dans un cercle de rayon  $\psi_b$ , ce cercle est le contour de la zone de couverture. Le centre du cercle est le centre d'un cercle de rayon minimal qui entoure exactement le contour de la zone de couverture. S'il n'est pas possible d'inscrire le polygone de couverture dans un cercle de rayon  $\psi_b$ , on procède alors de la manière suivante:

*Etape 1:* Pour tous les angles intérieurs de couverture des polygones inférieurs à  $180^\circ$ , tracer un cercle de rayon  $\psi_b$  ayant son centre à une distance  $\psi_b$  sur la bissectrice interne de l'angle. Si tous les angles sont inférieurs à  $180^\circ$  (sans concavités), les Etapes 2 et 4 ci-après sont éliminées.

*Etape 2:*

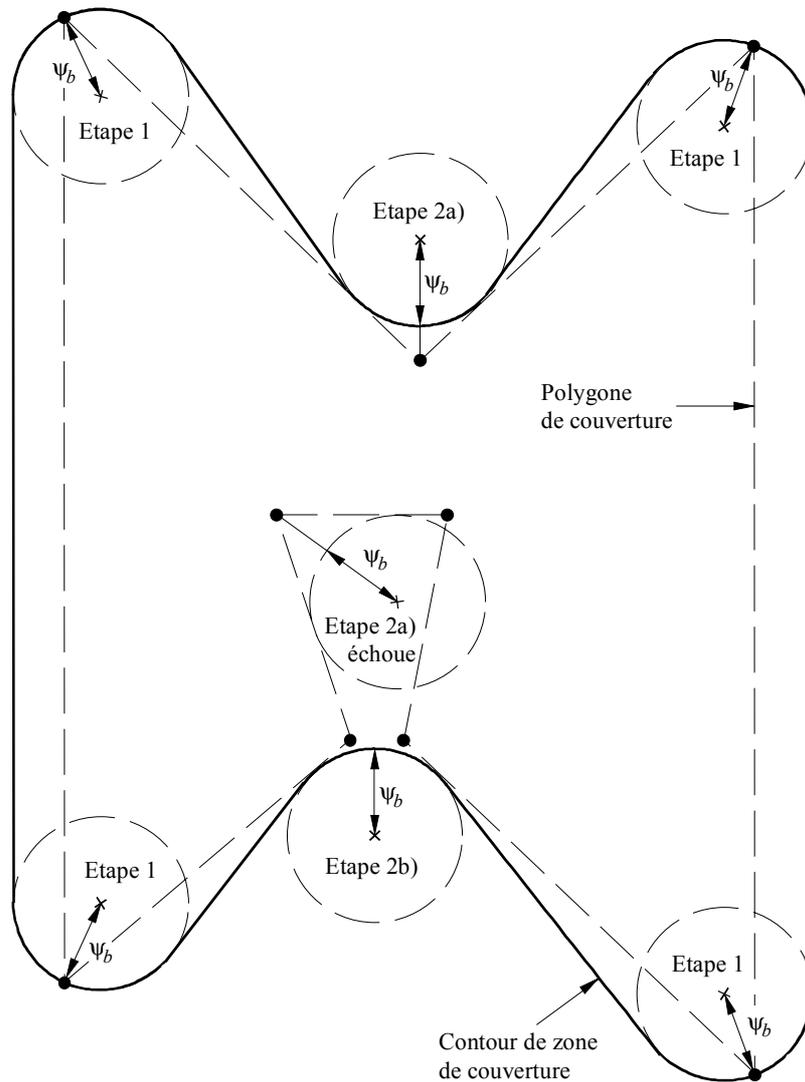
- a) pour tous les angles intérieurs supérieurs à  $180^\circ$ , tracer un cercle de rayon  $\psi_b$  tangent aux lignes reliées au point de couverture, et dont le centre est situé sur la bissectrice extérieure de l'angle;
- b) si ce cercle n'est pas entièrement à l'extérieur du polygone de couverture, tracer alors un cercle de rayon  $\psi_b$  tangent au polygone de couverture aux deux points les plus proches de ce polygone et situé entièrement à l'extérieur du polygone de couverture.

*Etape 3:* Tracer des segments de droite tangents aux portions des cercles des Etapes 1 et 2 qui sont les plus rapprochées du polygone de couverture, mais extérieures à ce polygone.

*Etape 4:* Si la distance intérieure entre deux segments de droite quelconques obtenus dans l'Etape 3 est inférieure à  $2\psi_b$ , les points de détermination sur le polygone de couverture doivent être ajustés de telle sorte qu'une nouvelle application des Etapes 1 à 3 donne une distance intérieure égale à  $2\psi_b$  entre les deux segments de droite.

Un exemple de la technique de détermination du tracé est indiqué à la Fig. 7.

FIGURE 7  
Tracé d'un contour de zone de couverture



0672-07

## 1.2 Contours du gain au voisinage des contours de la zone de couverture

Comme indiqué dans l'Annexe 1, des difficultés surviennent là où le contour de la zone de couverture présente des parties concaves. En utilisant un  $\Delta\psi$  mesuré perpendiculairement au contour de la zone de couverture, on obtiendra des intersections des normales et on pourrait avoir des intersections avec le contour de la zone de couverture.

Afin de tourner cette difficulté, ainsi que d'autres, on propose un processus en deux étapes. S'il n'existe pas de parties concaves dans les contours de couverture, l'Étape 2 suivante est éliminée.

*Étape 1:* Pour chaque  $\Delta\psi$ , tracer un contour établi de manière que la distance angulaire entre ce contour et le contour de la zone de couverture ne soit jamais inférieure à  $\Delta\psi$ .

Il suffit à cet effet de tracer des arcs de longueurs  $\Delta\psi$  à partir de points situés sur le contour de la zone de couverture. L'enveloppe extérieure de ces arcs est le contour de gain.

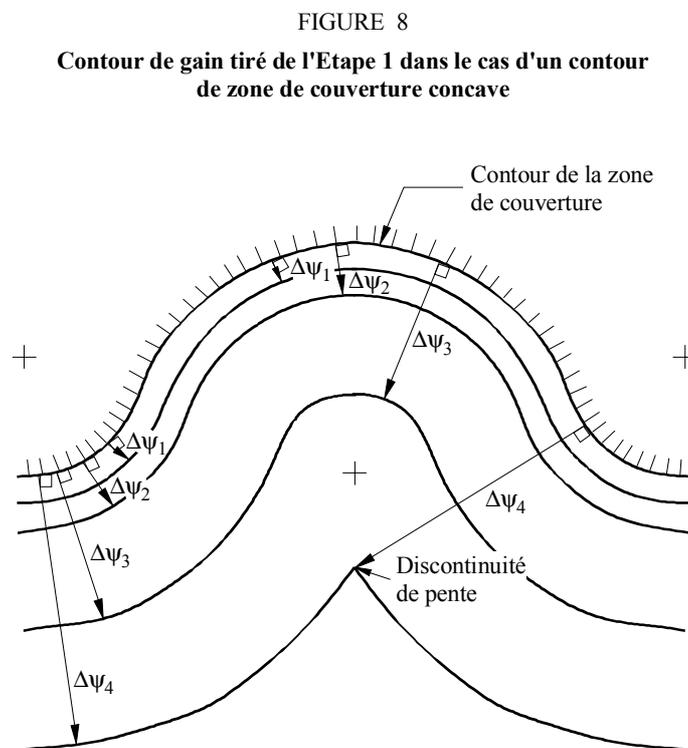
Là où le contour de la zone de couverture est rectiligne ou convexe, on satisfait à cette condition en faisant la mesure suivant la perpendiculaire au contour de la zone de couverture. Il n'y aura pas d'intersections de perpendiculaires dans ce cas.

L'emploi du processus décrit à l'Etape 1 contourne ces problèmes de tracé dans les zones de concavité. Cependant, d'un point de vue pratique, il reste encore un certain nombre de problèmes. Comme indiqué dans l'Annexe 1, l'action sur les lobes latéraux dans des régions de concavité peut devenir plus difficile lorsque le degré de concavité augmente, la section droite du diagramme tend à s'élargir et l'application de l'Etape 1 peut conduire à des discontinuités dans la pente du contour de gain.

Il semblerait raisonnable de postuler que les contours de gain doivent avoir des rayons de courbure qui ne soient jamais inférieurs à  $(\psi_b + \Delta\psi)$ , vus de l'intérieur ou de l'extérieur du contour de gain. Cette condition est satisfaite grâce au processus de l'Etape 1 là où le contour de la zone de couverture est rectiligne ou convexe, mais non dans les zones de concavité de ce contour. Les foyers correspondant aux rayons de courbure où le contour de la zone de couverture est rectiligne ou convexe sont à l'intérieur du contour de gain. Dans les zones de concavité, l'emploi de l'Etape 1 peut conduire à des rayons de courbure qui, vus de l'extérieur du contour de gain, soient inférieurs à  $(\psi_b + \Delta\psi)$ .

La Fig. 8 présente un exemple du processus de l'Etape 1 dans une zone de concavité. Des segments semi-circulaires sont utilisés pour le contour de la zone de couverture, afin de faciliter le tracé. Noter la discontinuité de la pente.

Pour tenir compte des problèmes énumérés ci-dessus et pour éliminer toute discontinuité de pente, on propose une Etape 2 pour les cas de parties concaves.



*Etape 2:* Dans les zones du contour de gain déterminé par l'Etape 1 où le rayon de courbure, vu de l'extérieur de ce contour, est inférieur à  $(\psi_b + \Delta\psi)$ , cette portion du contour de gain devrait être remplacée par un contour de rayon à  $(\psi_b + \Delta\psi)$ .

La Fig. 9 présente un exemple d'application du processus de l'Etape 2 à la concavité de la Fig. 8. A des fins d'illustration, on a indiqué les valeurs du contour de gain relatif en admettant  $\psi_b$  comme indiqué et une valeur de  $B$  égale à 3 dB.

Cette méthode de détermination de tracé ne présente pas d'ambiguïté et donne des résultats auxquels on peut normalement s'attendre pour les contours qui comportent des concavités. Mais l'élaboration d'un logiciel permettant d'appliquer cette méthode est difficile et ne convient pas parfaitement aux zones de couverture de faible étendue. Il faut continuer à améliorer la méthode.

Pour obtenir les valeurs de gain en des points particuliers sans établir de contours, on peut utiliser la méthode suivante.

On peut obtenir les valeurs de gain en des points éloignés d'une zone de concavité en déterminant l'angle  $\Delta\psi$  mesuré normalement au contour de la zone de couverture et en calculant le gain à partir de l'équation appropriée: (10), (11), (12), (13) ou (14). On peut déterminer le gain en un point situé dans une concavité de la façon suivante.

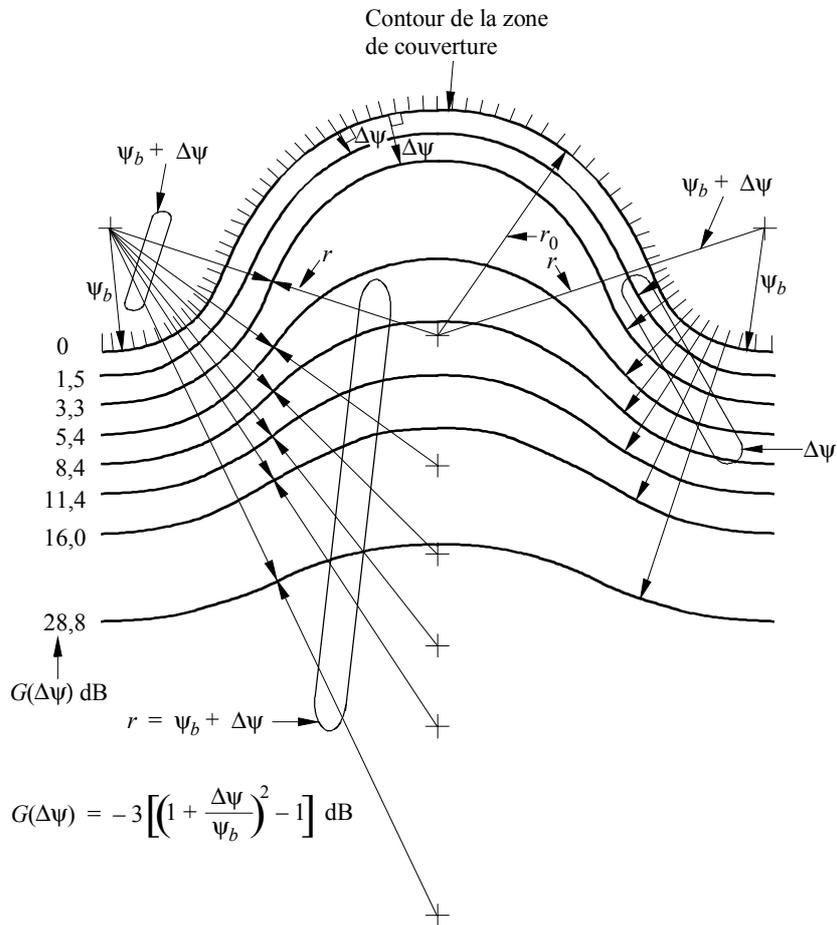
Tout d'abord, on procède à un essai simple. Tirer une droite traversant la concavité de telle sorte qu'elle touche le bord de la couverture en deux points sans le couper. Tracer les normales au contour de couverture aux points de tangence. Si le point considéré se trouve à l'extérieur de la zone de couverture entre les deux normales, il est possible que la discrimination de l'antenne subisse l'influence de la concavité de la couverture. Il est alors nécessaire de procéder comme suit:

Déterminer l'angle le plus faible  $\Delta\psi$  entre le point considéré et le contour de la zone de couverture. Tracer un cercle de rayon  $(\psi_b + \Delta\psi)$  dont la circonférence contient le point, de façon telle que sa distance angulaire de n'importe quel point du contour de la zone de couverture soit rendue maximale lorsque le cercle est entièrement à l'extérieur de la zone de couverture; soit  $\Delta\psi'$  cette distance angulaire maximale. Elle peut prendre toute valeur comprise entre 0 et  $\Delta\psi$  tout en demeurant inférieure ou égale à  $\Delta\psi$ . La discrimination d'antenne pour le point considéré est alors obtenue au moyen des équations (10), (11), (12), (13), ou (14) suivant le cas, en remplaçant  $\Delta\psi$  par  $\Delta\psi'$ .

Deux programmes informatiques permettant d'établir les contours de la zone de couverture à l'aide de la méthode précitée ont été mis au point; ils sont disponibles auprès du Bureau des radiocommunications.

FIGURE 9

Tracé du contour de gain dans le cas d'un contour de zone de couverture concave: Etape 1, puis Etape 2



$r = \psi_b + \Delta\psi$

$r_0 = 1,9 \psi_b$

$r_0$ : rayon de courbure de la concavité du contour de couverture

$r$ : rayon de courbure