

RECOMMANDATION UIT-R BS.1195

**CARACTÉRISTIQUES DES ANTENNES D'ÉMISSION
EN ONDES MÉTRIQUES ET DÉCIMÉTRIQUES**

(Question UIT-R 76/10)

(1995)

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que, par sa Résolution 76, l'ex-CCIR avait décidé que les résultats des études effectuées par la Commission d'études 10 des radiocommunications, ainsi que les diagrammes d'antennes correspondants, feraient l'objet de Recommandations UIT-R qui seront publiées séparément;
- b) que des informations complètes sur les caractéristiques des systèmes d'antenne d'émission et de réception en ondes métriques et décimétriques sont nécessaires aux fins de la planification des fréquences;
- c) que des procédures assistées par ordinateur sont nécessaires pour obtenir, sous une forme normalisée, les diagrammes de gain et de directivité des systèmes d'antenne d'émission et de réception;
- d) qu'il est essentiel de vérifier, au moyen de mesures, le diagramme de rayonnement des éléments d'un système d'antenne et le diagramme de rayonnement de l'ensemble d'un tel système;
- e) que des méthodes de mesure normalisées sont nécessaires pour vérifier les diagrammes de rayonnement visés du *considérant* d);
- f) que des différences sont à prévoir entre les caractéristiques de fonctionnement théoriques et mesurées, en raison des aspects pratiques des antennes à ondes métriques et décimétriques,

recommande

- 1** que les formules figurant dans la Partie 1 de l'Annexe 1 et les programmes d'ordinateur associés exposés dans la Partie 3 de l'Annexe 1 soient utilisés pour évaluer les caractéristiques de fonctionnement des systèmes d'antenne à ondes métriques et décimétriques pour les besoins de la planification;
- 2** que les méthodes de mesure figurant dans la Partie 2 de l'Annexe 1 soient utilisées pour vérifier les caractéristiques de fonctionnement pratiques des éléments des systèmes d'antennes et celles d'un système d'antenne complet.

**Calcul des diagrammes des antennes en bandes
métriques et décimétriques (B.m et B.dm)**

TABLE DES MATIÈRES

| | <i>Page</i> |
|--|-------------|
| 1 Introduction | 3 |
| 2 Représentation géométrique des diagrammes de rayonnement des antennes | 3 |
| 3 Diagrammes de rayonnement et calcul du gain | 4 |
| 4 Eléments rayonnants | 5 |
| 4.1 Sources ponctuelles | 5 |
| 4.2 Réseaux de sources ponctuelles | 6 |
| 4.2.1 Multiplication des diagrammes | 7 |
| 4.2.2 Addition vectorielle des diagrammes | 7 |
| 4.3 Radiateurs élémentaires en B.m et B.dm | 7 |
| 5 Polarisation | 8 |
| 5.1 Polarisation elliptique | 9 |
| 5.2 Polarisation horizontale et polarisation verticale | 9 |
| 5.3 Polarisation oblique | 9 |
| 5.4 Polarisation circulaire | 10 |
| 6 Réseaux d'antennes | 10 |
| 6.1 Réseaux à rayonnement transversal | 10 |
| 6.1.1 Réseaux d'antennes linéaires à éléments passifs | 14 |
| 6.2 Diagrammes de rayonnement en amplitude et en phase | 15 |
| 6.3 Calcul du diagramme de rayonnement des réseaux d'antennes | 17 |
| 6.4 Réseaux d'antennes en B.m et B.dm | 18 |
| 6.4.1 Antennes de type panneau | 18 |
| 6.4.2 Antennes Yagi | 20 |
| 6.4.3 Autres types de réseaux d'antennes | 20 |
| 7 Systèmes d'antenne | 20 |
| 7.1 Diagramme d'un système d'antenne | 21 |
| 7.1.1 Comblement des zéros | 21 |
| 7.1.2 Inclinaison du faisceau | 24 |
| 7.2 Diagrammes de rayonnement des systèmes d'antenne | 24 |
| 7.3 Exemples de diagrammes de rayonnement de systèmes d'antenne | 27 |
| 7.3.1 Systèmes d'antenne à doublets | 27 |
| 7.3.2 Systèmes d'antenne Yagi | 28 |
| 7.3.3 Systèmes d'antenne à panneaux | 28 |

PARTIE 1
DE L'ANNEXE 1

Calcul des diagrammes des antennes en bandes métriques et décimétriques (B.m et B.dm)

1 Introduction

La Partie 1 expose les principes fondamentaux de la théorie des antennes pour ondes métriques et décimétriques ainsi que les caractéristiques générales des systèmes d'antenne réalisés avec un certain nombre de radiateurs élémentaires.

On trouvera également quelques exemples de systèmes d'antenne, avec indication de leurs caractéristiques de fonctionnement. Ces renseignements pourront guider l'utilisateur dans le choix de la configuration qui répondra le mieux à ses besoins.

En particulier, les § 6.4 et 7.2 décrivent la méthode analytique qui permet de calculer le diagramme de rayonnement global d'un système d'antenne. Cette section a pour but de spécifier une méthode unifiée pouvant être recommandée pour évaluer la qualité de fonctionnement d'un système d'antenne dans des conditions idéales.

Il ne faut pas perdre de vue, cependant, que l'on pourra rencontrer, dans des situations réelles, des écarts par rapport aux diagrammes calculés selon la méthode susmentionnée (voir la Partie 2).

2 Représentation géométrique des diagrammes de rayonnement des antennes

Une antenne peut être constituée par un seul élément rayonnant ou par un réseau d'éléments rayonnants. La répartition spatiale du rayonnement d'une antenne, ou diagramme d'antenne, peut être représentée en trois dimensions par un lieu géométrique dont chaque point correspond à une valeur de la force cymomotrice (f.c.m.)*. Cette représentation est basée sur une demi-sphère située au-dessus du niveau du sol, centrée sur l'antenne et dont le rayon est grand par rapport aux dimensions physiques et électriques de l'antenne.

La f.c.m. en un point de la surface sphérique est exprimée en dB au-dessous de la f.c.m. maximale, qui est prise égale à 0 dB.

Le diagramme de rayonnement tridimensionnel est construit dans le système de coordonnées de référence de la Fig. 1.

On définit les paramètres suivants dans un système de coordonnées polaires sphériques:

θ : angle d'élévation par rapport au plan horizontal ($0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$)

φ : angle d'azimut par rapport à l'axe des x ($0^\circ \leq \varphi \leq 360^\circ$)

r : distance entre l'origine et le point d'observation

Q: point d'observation.

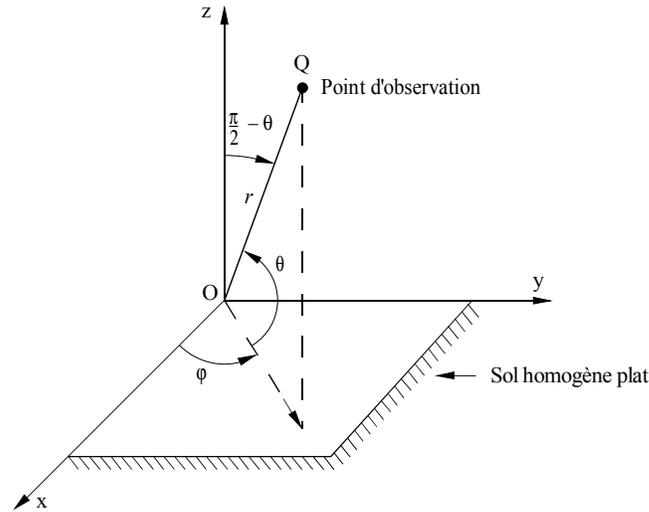
* La définition de la force cymomotrice (f.c.m.) et de la force cymomotrice spécifique est donnée dans la Recommandation UIT-R BS.561.

La force cymomotrice (f.c.m.) en un point donné de l'espace, est le produit du champ électrique produit en ce point par une antenne par la distance de ce point à l'antenne. Cette distance doit être suffisante pour que les composantes réactives du champ soient négligeables.

Exprimée en volts, la f.c.m est numériquement égale au champ électrique (mV/m) à la distance de 1 km.

La f.c.m spécifique en un point de l'espace est la force cymomotrice en ce point quand la puissance rayonnée par l'antenne est de 1 kW.

FIGURE 1
Système de coordonnées de référence



D01

3 Diagrammes de rayonnement et calcul du gain

Dans le système de coordonnées de référence de la Fig. 1, l'amplitude du champ électrique créé par une antenne a pour expression:

$$|E(\theta, \varphi)| = k |f(\theta, \varphi)| \quad (1)$$

où:

$|E(\theta, \varphi)|$: amplitude du champ électrique

$|f(\theta, \varphi)|$: fonction du diagramme de rayonnement

k : facteur de normalisation pour obtenir $|E(\theta, \varphi)|_{max} = 1$, soit 0 dB.

Si on exprime le champ électrique total en fonction de ses composantes dans un système de coordonnées sphériques, on obtient:

$$|E(\theta, \varphi)| = \left[|E_{\theta}(\theta, \varphi)|^2 + |E_{\varphi}(\theta, \varphi)|^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

La directivité, D , d'une source de rayonnement s'exprime par le rapport de son intensité de rayonnement maximale (ou de la densité surfacique de puissance) à l'intensité de rayonnement d'une source isotrope qui rayonne la même puissance. Elle peut s'écrire:

$$D = \frac{4\pi |E(\theta, \varphi)_{max}|^2}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} |E(\theta, \varphi)|^2 \cos \theta \, d\theta \, d\varphi} \quad (3)$$

En appliquant l'équation (1), il est possible d'exprimer D à l'aide de la fonction normalisée du diagramme de rayonnement de la source, $|f(\theta, \varphi)|$:

$$D = \frac{4\pi |f(\theta, \varphi)_{max}|^2}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} |f(\theta, \varphi)|^2 \cos \theta \, d\theta \, d\varphi} \quad (4)$$

La définition de la directivité ci-dessus n'est fonction que de la forme du diagramme de rayonnement de la source.

Pour prendre en compte le rendement de l'antenne, il faut définir son gain, G , qu'on exprime par le rapport de l'intensité de rayonnement maximale à l'intensité maximale de rayonnement d'une antenne de référence excitée par la même puissance d'entrée.

Si l'antenne de référence recommandée est une antenne isotrope sans perte, l'expression du gain, G_i , est:

$$G_i = 10 \log_{10} D \quad \text{dB} \quad (5)$$

alors que le gain relatif, G_d , du doublet demi-onde, utilisé dans la pratique, est:

$$G_d = G_i - 2,15 \quad \text{dB} \quad (6)$$

4 Eléments rayonnants

4.1 Sources ponctuelles

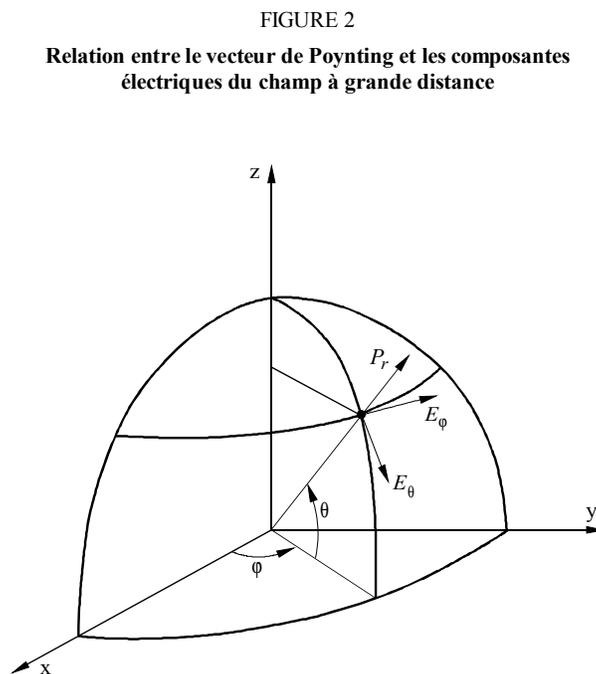
Lorsqu'une antenne rayonne dans des conditions de champ éloigné (zone de Fraunhofer), c'est-à-dire lorsqu'on se trouve à une distance de l'antenne telle qu'on puisse admettre que ses champs électromagnétiques sont orthogonaux à la direction de propagation, on peut considérer l'antenne comme une source ponctuelle.

En B.m et B.dm, cette distance est en général si faible, notamment dans la zone de service, qu'on peut dire que tout élément rayonnant est une source ponctuelle, quelles que soient ses dimensions et sa complexité.

En outre, le diagramme de rayonnement de ces sources ponctuelles, prises comme approximation des éléments rayonnants types en B.m et B.dm, est le plus souvent directif.

En champ lointain, le flux de puissance issu d'une source ponctuelle est toujours radial.

Le vecteur de Poynting ne résulte alors que des deux composantes électriques transversales du champ E_θ et E_φ , que représente la Fig. 2.



Lorsqu'on est à une assez grande distance pour pouvoir considérer que le front de l'onde sphérique est plan, le vecteur de Poynting moyen (composante radiale seule) P_r s'écrit:

$$P_r = \frac{E^2}{2 Z_0} \quad (7)$$

où:

$$E^2 = E_\theta^2 + E_\phi^2 \quad (8)$$

Z_0 : impédance intrinsèque en espace libre

E : intensité totale du champ électrique.

En considérant la variation du champ électrique total à une distance radiale constante, le diagramme résultant sera fonction de θ et de ϕ . En normant les valeurs du diagramme par rapport à sa valeur maximale (supposée dans la direction du rayonnement maximal), on appelle le diagramme résultant diagramme de rayonnement relatif en amplitude.

Le champ électrique E que produit à une distance r une source isotrope qui rayonne une puissance P_{is} est donné par (voir aussi la Recommandation UIT-R P.525):

$$E = \left[30 P_{is} / r^2 \right]^{1/2} \quad \text{V/m} \quad (9)$$

où:

P_{is} : puissance isotrope (W)

r : distance (m).

On appelle aussi la relation ci-dessus: condition de propagation en espace libre.

En rapportant la puissance isotrope rayonnée P_{is} à la puissance P rayonnée par un doublet demi-onde, soit $P_{is} = 1,64 P$, on obtient la nouvelle expression suivante pour le champ électrique:

$$E = 7,014 \sqrt{P} / r \quad \text{V/m} \quad (10)$$

Si on exprime E en mV/m et r en m:

$$E = 7,014 \times 10^3 \sqrt{P} / r \quad \text{V/m} \quad (11)$$

ou encore en exprimant E en dB(μ V/m):

$$E = 20 \log_{10} \left(\sqrt{P} / r \right) + 136,9 \quad \text{dB}(\mu\text{V/m}) \quad (12)$$

Pour une source ponctuelle non isotrope, le champ électrique E_{ni} rayonné dans d'autres directions dépendra du diagramme de rayonnement, d'où:

$$E_{ni} = f(\theta, \phi) \cdot E_{is} \quad (13)$$

où:

E_{ni} : champ électrique produit au point d'observation Q (r, θ, ϕ) par une source ponctuelle non isotrope de puissance P

$f(\theta, \phi)$: diagramme de rayonnement relatif en amplitude de la source ponctuelle non isotrope

E_{is} : champ produit au point d'observation Q par une source ponctuelle isotrope de même puissance P .

4.2 Réseaux de sources ponctuelles

Quand on considère des réseaux de sources ponctuelles tels que ceux qu'on rencontre généralement en B.m et B.dm, où on a souvent besoin de systèmes d'antennes complexes, les deux cas suivants sont les plus intéressants:

- réseaux de sources ponctuelles non isotropes et semblables;
- réseaux de sources ponctuelles non isotropes et différentes.

Le cas a) se rapporte à des réseaux dont les éléments ont des diagrammes de radiation d'amplitude relative égale (même forme) orientés dans la même direction. C'est normalement le cas des réseaux d'antennes panneaux les uns au-dessus des autres (voir le § 6.4.1) pointés dans la même direction.

Le cas b) est le cas le plus général où il n'y a aucune corrélation entre les diagrammes de rayonnement en amplitude relative des sources groupées, dont l'orientation peut être arbitraire.

4.2.1 Multiplication des diagrammes

Pour les réseaux de sources ponctuelles non isotropes mais semblables (cas a) du § 4.2), s'applique le principe de multiplication des diagrammes. Selon ce principe, les amplitudes relatives du diagramme de rayonnement d'un réseau de sources ponctuelles non isotropes mais semblables est le produit du diagramme d'amplitude de la source individuelle et d'un réseau de sources ponctuelles isotropes, alors que le diagramme de phase total résulte de la somme des diagrammes de phase de la source individuelle et du réseau des sources ponctuelles isotropes.

Cela peut s'exprimer de la façon suivante:

$$E(\theta, \varphi) = f(\theta, \varphi) \cdot F(\theta, \varphi) \quad \angle \left(f_p(\theta, \varphi) + F_p(\theta, \varphi) \right) \quad (14)$$

où dans le système de coordonnées de la Fig. 1:

- E : vecteur du champ électrique
- $f(\theta, \varphi)$: fonction du diagramme d'amplitude relative de la source individuelle
- $f_p(\theta, \varphi)$: fonction du diagramme de phase de la source individuelle
- $F(\theta, \varphi)$: fonction du diagramme d'amplitude relative du réseau de sources isotropes (appelé aussi facteur de réseau)
- $F_p(\theta, \varphi)$: fonction du diagramme de phase du réseau de sources isotropes.

4.2.2 Addition vectorielle des diagrammes

Quand on considère le cas le plus général d'un réseau de sources ponctuelles non isotropes (c'est-à-dire des sources non isotropes ayant des diagrammes de rayonnement différents et/ou à orientation différente de la direction de rayonnement maximal (cas b) du § 4.2), on ne peut plus appliquer le principe de multiplication des diagrammes.

C'est une situation classique pour les systèmes d'antenne en B.m et B.dm où les éléments rayonnants (panneaux, Yagi, etc.) sont considérés comme des sources ponctuelles à diagrammes de rayonnement identiques ou non, orientés dans des directions différentes.

En ce cas, le diagramme de rayonnement résultant $E(\theta, \varphi)$, se calcule par addition vectorielle du rayonnement (amplitude et phase) de chaque source ponctuelle individuelle sous tout angle spécifié, comme suit:

$$E(\theta, \varphi) = \sum_{i=1}^n E_i(\theta, \varphi) \quad (15)$$

où:

- $E_i(\theta, \varphi)$: champ électrique rayonné par la i^e source
- $E(\theta, \varphi)$: champ résultant.

4.3 Radiateurs élémentaires en B.m et B.dm

Bien que les radiateurs élémentaires soient rarement utilisés dans la radiodiffusion en B.m et B.dm, on examinera brièvement ci-après ceux qui sont les plus courants et qui servent à constituer la plupart des systèmes d'antennes dans ces bandes de fréquences.

Les principaux radiateurs sont le doublet, la boucle, la fente et l'hélice.

Le doublet est le plus courant des radiateurs élémentaires en B.m et B.dm.

Dans le système de référence de la Fig. 3, les composantes du champ, E_θ et E_φ , que produit un doublet de longueur ℓ à distribution sinusoïdale de courant sont:

$$E_\theta = -60 j I_0 \frac{e^{-j r \beta}}{r} \cdot \frac{\cos(\beta \ell \sin \varphi \cos \theta) / 2 - \cos \beta \ell / 2}{1 - \sin^2 \varphi \cos^2 \theta} \cdot \sin \varphi \sin \theta$$

$$E_\varphi = 60 j I_0 \frac{e^{-j r \beta}}{r} \cdot \frac{\cos(\beta \ell \sin \varphi \cos \theta) / 2 - \cos \beta \ell / 2}{1 - \sin^2 \varphi \cos^2 \theta} \cdot \cos \varphi \quad (16)$$

où:

I_0 : courant d'alimentation

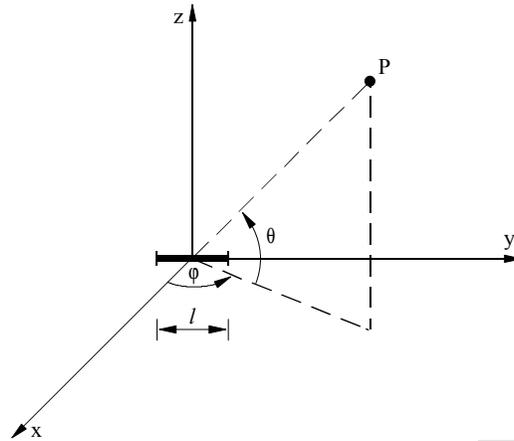
$\beta = 2 \pi / \lambda$

r : distance du point Q où on fait le calcul.

L'expression ci-dessus se simplifie si $\ell = 0,5 \lambda$ (voir également les Diagrammes d'antenne, édition 1984).

FIGURE 3

Doublet élémentaire dans le système de coordonnées de référence



D03

En ce cas, le doublet présente une impédance résistive de 72Ω à sa fréquence de résonance et on peut le considérer comme un circuit résonnant série.

En augmentant le diamètre des conducteurs qui forment les brins du doublet, on accroît la capacité et on diminue l'inductance du circuit résonnant série équivalent. Comme le Q du circuit s'en trouve diminué, le doublet peut servir dans une gamme de fréquences plus large.

5 Polarisation

On utilise traditionnellement en radiodiffusion MF la polarisation horizontale et en télévision les polarisations horizontale ou verticale.

Ces dernières années, les récepteurs MF à antenne incorporée et les autoradios MF se sont largement répandus, ce qui a conduit à recourir à d'autres types de polarisation circulaire ou oblique, par exemple.

On assiste maintenant à l'introduction de cette technique dans l'émission de télévision, surtout en B.dm où il semble qu'en zone urbaine la polarisation circulaire soit moins sensible aux échos.

Le Rapport UIT-R BT.464 donne les informations nécessaires au choix de la polarisation la mieux adaptée à un nouveau service en MF, en fonction des conditions locales.

On décrit brièvement ci-après les diverses formes de polarisation afin de mieux faire comprendre leurs différences.

5.1 Polarisation elliptique

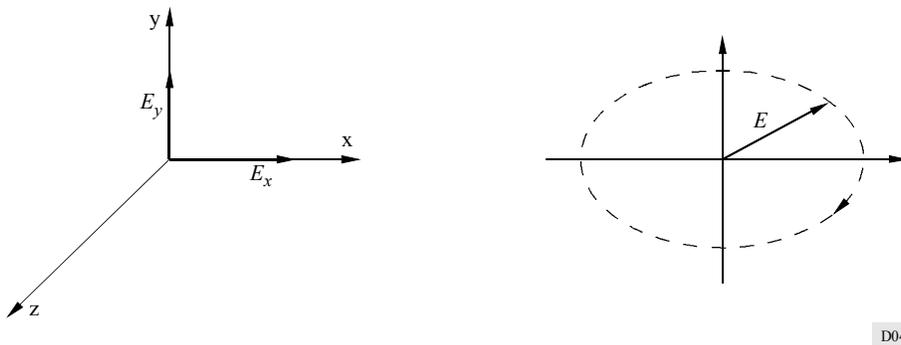
On peut considérer les différents types de polarisation des ondes comme des cas particuliers de la polarisation elliptique.

La Fig. 4 montre qu'on peut représenter une onde à polarisation elliptique au moyen de deux ondes perpendiculaires à polarisation rectiligne, qui se propagent le long de l'axe des z et dont les champs électriques répondent aux équations:

$$\begin{aligned} E_x &= E_1 \sin \omega t \\ E_y &= E_2 \sin(\omega t + \varphi) \end{aligned} \quad (17)$$

où φ est la différence de phase entre les deux ondes. Lorsque l'onde à polarisation elliptique se propage le long de l'axe des z , il en résulte un vecteur E qui décrit une ellipse dont les demi-axes sont donnés par E_1 et E_2 .

FIGURE 4
Polarisation elliptique



D04

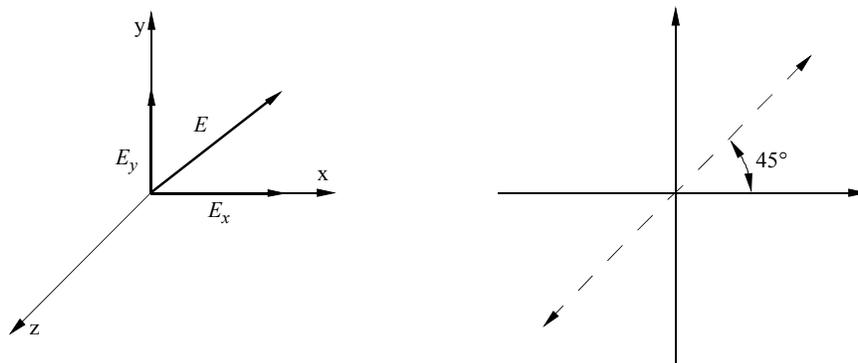
5.2 Polarisation horizontale et polarisation verticale

Ces deux cas se présentent lorsque, dans les équations (17), on a soit $E_y = 0$ (polarisation horizontale) soit $E_x = 0$ (polarisation verticale).

5.3 Polarisation oblique

Une polarisation oblique à 45° apparaît lorsque, dans les équations (17), on a $E_1 = E_2$ et $\varphi = 0$.

FIGURE 5
Polarisation oblique



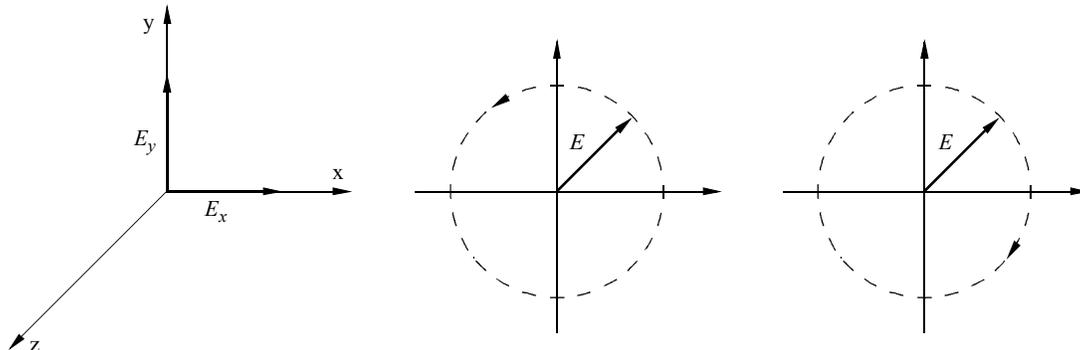
D05

5.4 Polarisation circulaire

On est en polarisation circulaire lorsque, dans les équations (17), on a $E_y = E \sin \omega t$ et $E_x = \pm E \cos \omega t$. Dans le cas du signe +, l'onde tourne dans le sens des aiguilles d'une montre, dans la direction positive de l'axe des z (polarisation circulaire dextrogyre).

Dans le cas du signe -, il s'agit de polarisation circulaire lévogyre.

FIGURE 6
Polarisation circulaire



D06

On peut obtenir les polarisations circulaire ou oblique au moyen de deux antennes à polarisation rectiligne, l'une horizontale et l'autre verticale, avec les relations de phase appropriées, comme indiqué ci-dessus.

6 Réseaux d'antennes

Comme on l'a indiqué au § 4.3, il est très rare qu'en B.m et B.dm les radiateurs élémentaires soient utilisés isolément; ils sont généralement groupés en réseaux, afin d'obtenir:

- un gain plus élevé,
- un diagramme directif.

Les réseaux les plus couramment utilisés sont les réseaux linéaires de radiateurs élémentaires. Ces réseaux, montés par le constructeur, sont disponibles pour l'ingénieur chargé de la conception sous diverses formes, comme des antennes panneaux, Yagi, etc. On s'en sert pour constituer des ensembles plus complexes (c'est-à-dire des réseaux de réseaux).

Dans la plupart des cas, ces réseaux ont des diagrammes directifs obtenus à l'aide d'un réflecteur qui, selon les cas, peut être une surface métallique réfléchissante ou un élément passif ou actif approprié.

Les paragraphes suivants donnent quelques-unes des propriétés fondamentales de certains réseaux linéaires qui sont d'un intérêt immédiat pour un concepteur de systèmes d'antenne, comme les réseaux à rayonnement transversal ou longitudinal ou les réseaux linéaires à éléments passifs.

6.1 Réseaux à rayonnement transversal

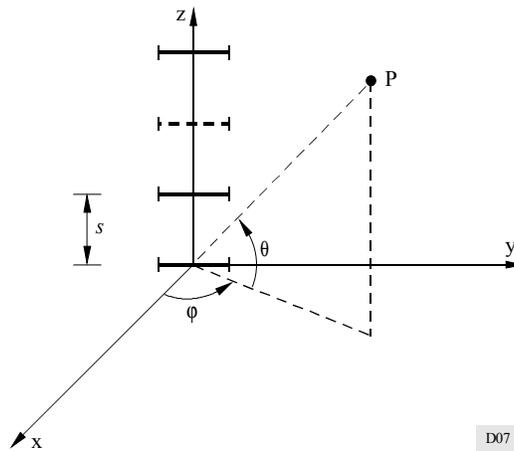
Il est facile de réaliser des réseaux à rayonnement transversal en alimentant les éléments d'un réseau linéaire avec des courants de même amplitude et phase. Il en résulte un diagramme dont le maximum (ou les maxima, en l'absence de réflecteur) est orienté perpendiculairement à l'alignement du réseau (ou au plan qui contient les sources de rayonnement).

En B.m et B.dm, il existe deux types de réseaux à rayonnement transversal intéressants pour la conception d'une antenne: le réseau vertical de doublets horizontaux et le réseau colinéaire équidirectif de doublets verticaux.

Réseaux verticaux de doublets horizontaux

Les réseaux verticaux de doublets horizontaux ont une structure périodique (voir la Fig. 7) qui consiste en doublets horizontaux superposés et régulièrement espacés (en général d'une demi-longueur d'onde), alimentés par des courants de même amplitude et de même phase.

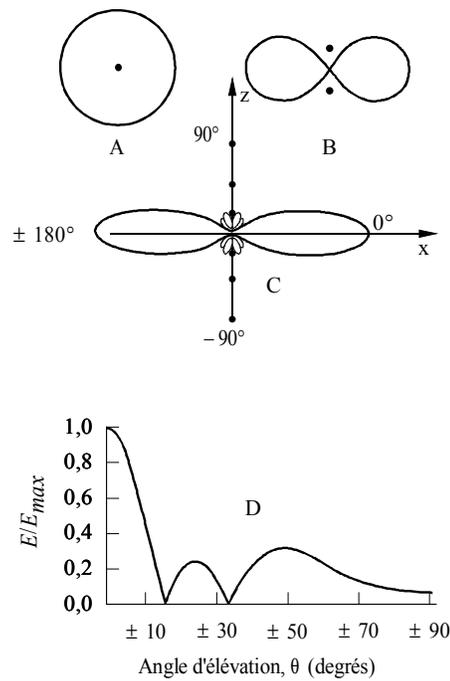
FIGURE 7
Réseau vertical de doublets horizontaux



D07

La Fig. 8 présente des diagrammes types pour ce genre de réseaux (dans le plan x-z).

FIGURE 8
Résultats obtenus avec plusieurs sources ponctuelles
superposées à courants égaux et en phase



- A: diagramme vertical d'une source unique
- B: de deux sources
- C: de six sources
- D: diagramme vertical de C en coordonnées cartésiennes

D08

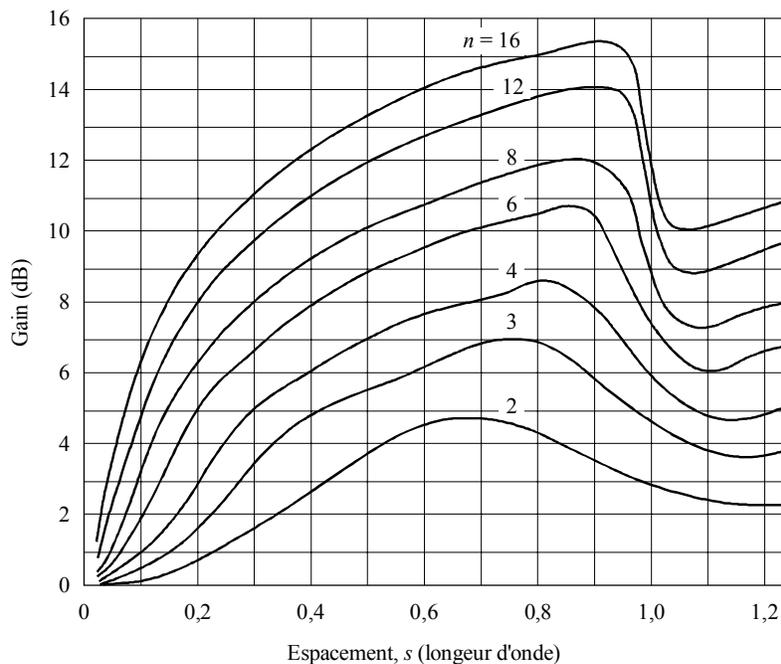
Il est important de noter que le gain d'un réseau est fonction du nombre des éléments et de leur espacement (et donc de la longueur du réseau).

La Fig. 9 illustre cette relation. On y voit que, selon la valeur de n , l'espacement optimal se trouve entre $0,65 \lambda$ et $0,95 \lambda$. Il convient de souligner que cet espacement optimal dépend de la fréquence et que, lorsque le système d'antenne est destiné à fonctionner en large bande (ou pour des canaux adjacents), il faut prendre une marge de sécurité pour éviter une diminution brusque du gain qui se manifeste quand la valeur de l'espacement est supérieure à l'optimum. Pour ce type de réseau d'antennes à panneaux individuels où n peut aller jusqu'à 4 éléments, les valeurs habituelles de l'espacement sont de l'ordre de la demi-longueur d'onde.

Toutefois, lorsqu'on assemble un réseau de radiateurs individuels (doublets) on peut choisir des valeurs plus proches de l'optimum.

FIGURE 9

Gain d'un réseau vertical de doublets horizontaux (sans réflecteur) en fonction du nombre n des éléments et de leur espacement s . Le gain est rapporté à celui d'un élément unique



D09

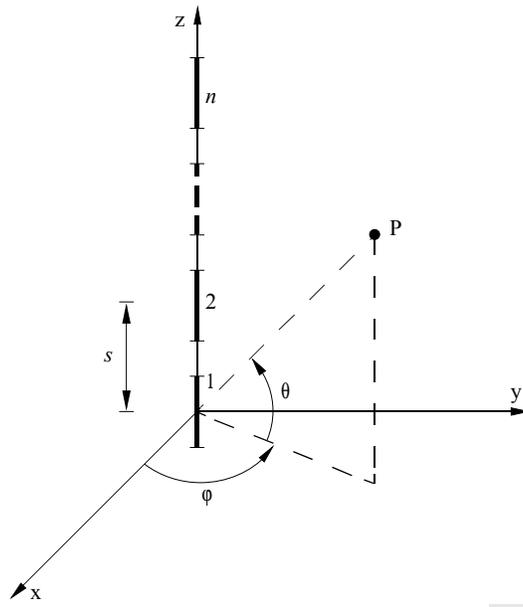
Réseaux colinéaires équidirectifs

Les réseaux colinéaires équidirectifs consistent en alignements verticaux de doublets verticaux régulièrement espacés et alimentés par des courants de même amplitude et phase (voir la Fig. 10).

Avec cette configuration, on obtient un diagramme équidirectif en azimut et directif verticalement. Le gain global est fonction du nombre d'éléments n , et de leur espacement s , comme le montre la Fig. 11.

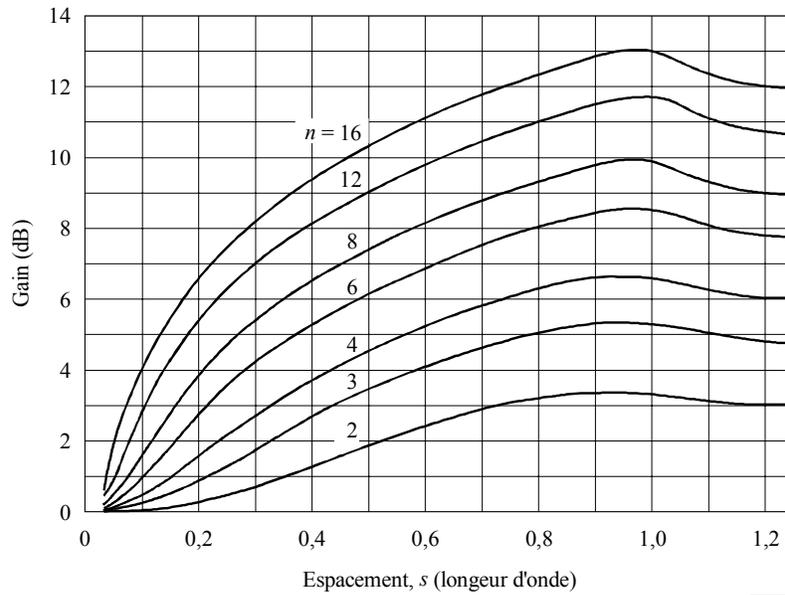
On se sert souvent de ce type de structure rayonnante en B.m, surtout pour les systèmes d'antenne équidirectifs en radiodiffusion MF (voir aussi le § 7.3.1). On le réalise généralement en assemblant des sources individuelles (le plus souvent des doublets repliés) et on aura soin de choisir l'espacement optimal. Lorsqu'il y a plusieurs canaux à diffuser, il faudra prévoir une marge suffisante.

FIGURE 10
Réseau colinéaire équidirectif



D10

FIGURE 11
Gain d'un réseau vertical colinéaire en fonction du nombre n d'éléments et de leur espacement s . Le gain est rapporté à celui d'un élément unique



D11

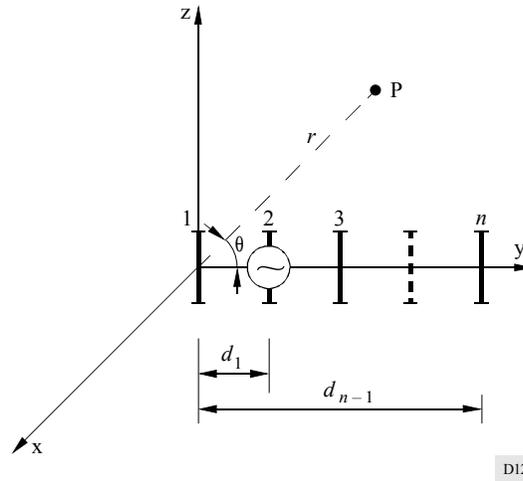
6.1.1 Réseaux d'antennes linéaires à éléments passifs

Dans les antennes en réseau rectiligne possédant des éléments non alimentés, le champ électromagnétique rayonné par l'élément alimenté induit des courants dans les éléments non alimentés.

En B.m et B.dm, l'application la plus répandue des réseaux à éléments passifs est l'antenne Yagi, représentée schématiquement sur la Fig. 12.

L'antenne Yagi comprend un élément excité, un réflecteur et un ou plusieurs directeurs. Son gain global croît avec le nombre de directeurs utilisés.

FIGURE 12
Antenne Yagi



NOTE 1 – On peut calculer le diagramme en considérant que la fonction représentative, dans le plan vertical z-y, du diagramme du $i^{\text{ème}}$ élément de l'antenne Yagi à polarisation verticale de la Fig. 12 s'écrit:

$$f_i = \frac{\cos(\beta h_i \cos \theta) - \cos(\beta h_i)}{\sin \theta} \quad (18)$$

où:

θ : angle d'élévation

h_i : demi-longueur du $i^{\text{ème}}$ élément

$\beta = 2\pi/\lambda$

Comme chacun des éléments d'une antenne Yagi a un diagramme différent, on ne peut appliquer le principe de la multiplication des diagrammes (voir le § 4.2.1) et il faut procéder à une addition vectorielle (voir aussi le § 4.2.2).

Le diagramme est donné par:

$$E(\theta, \varphi) = \sum_{i=1}^n I_i \cdot f_i(\theta) \cdot e^{j\beta d_{i-1} \cos \theta} \quad (19)$$

où:

n : nombre total de doublets

I_i : courant dans le $i^{\text{ème}}$ élément

d_{i-1} : distance entre le réflecteur et le $i^{\text{ème}}$ élément ($d_0 = 0$)

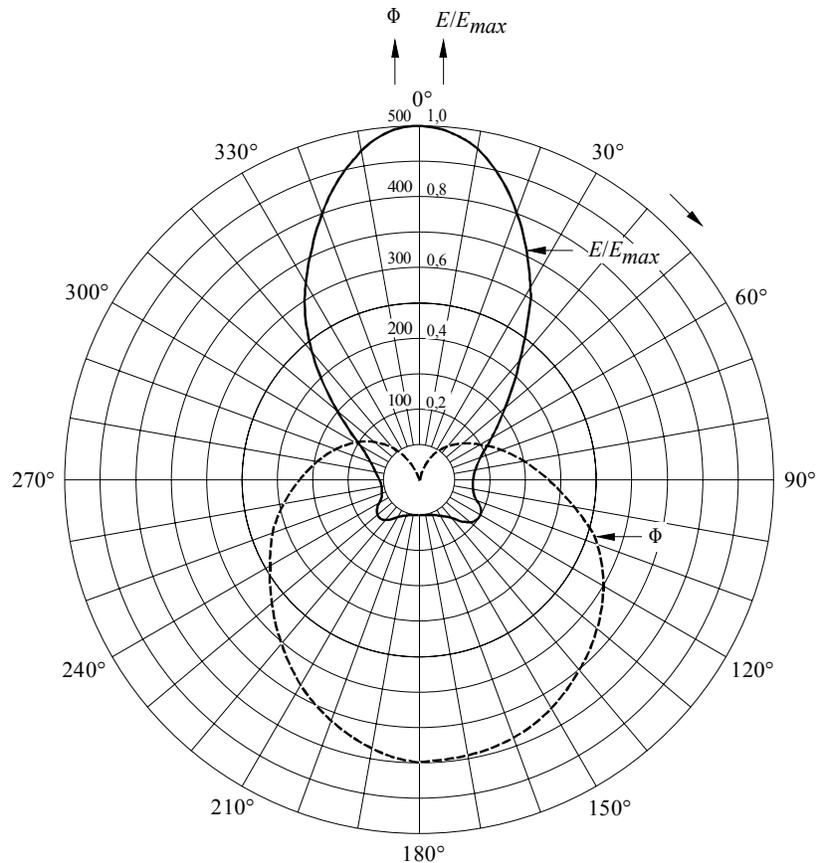
6.2 Diagrammes de rayonnement en amplitude et en phase

Quand on considère une source ponctuelle isotrope unique, la distribution spatiale du signal reçu est parfaitement définie par le diagramme d'amplitude relative du rayonnement, c'est-à-dire que le diagramme de phase associé n'apporte aucun renseignement intéressant.

Dans le cas des sources non isotropes de dimensions finies qui constituent un réseau, on détermine le diagramme de rayonnement résultant en se servant à la fois du diagramme de rayonnement en amplitude relative et du diagramme de phase associé (voir la Fig. 13).

FIGURE 13

Diagramme de rayonnement (amplitude et phase) d'un réseau en B.dm



E/E_{max} : diagramme d'amplitude relative du rayonnement

Φ : diagramme de phase (degrés)

D13

Comme indiqué plus haut, on a besoin de connaître les diagrammes de rayonnement en amplitude et en phase dans la direction du maximum de rayonnement pour évaluer le diagramme global de l'antenne. Ces diagrammes sont généralement fournis par le constructeur, ou mesurés par l'utilisateur à l'aide des méthodes décrites dans la Partie 2. On utilisera ces deux diagrammes comme indiqué au § 7.2 pour calculer le diagramme du système d'antenne.

Il existe, cependant, des cas où l'on a besoin de redéfinir un système existant composé d'antennes individuelles, sans spécifications techniques suffisantes, ou, plus généralement des cas où seul le diagramme des amplitudes relatives est connu. On pourra alors appliquer la méthode suivante, qui est moins précise.

Dans ce cas, il pourra être commode de prendre comme point de référence du rayonnement, c'est-à-dire comme origine du diagramme d'amplitude relative du rayonnement, un point appelé «centre de phase» ou «centre électrique» où le diagramme de phase présente la plus faible variation dans le plus grand secteur angulaire, c'est-à-dire le véritable centre géométrique du front de l'onde rayonnée.

Dans ce secteur angulaire, on peut considérer le réseau comme une source ponctuelle non isotrope, située au centre de phase et dont le diagramme de rayonnement peut aussi être parfaitement défini à l'aide du seul diagramme d'amplitude du rayonnement.

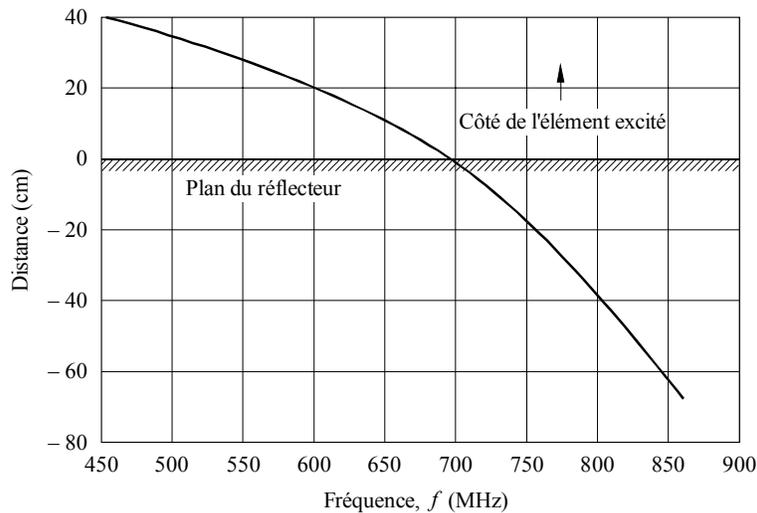
Pour les réseaux de doublets et réflecteurs, le centre de phase se situe généralement entre les bornes d'entrée du doublet et l'écran réflecteur, normalement près des bornes.

Dans le cas d'un panneau (voir le § 6.4.1), le constructeur indique la position exacte du centre de phase, obtenue à l'aide de mesures.

En B.m et B.dm, la plupart des antennes individuelles conviennent pour des largeurs de bande relativement grandes (voir le § 6.4.1). En conséquence, le constructeur effectue les mesures et indique la position du centre de phase pour plusieurs fréquences de la bande d'utilisation. On déduit de ces mesures une courbe qui montre la variation de la position géométrique du centre de phase en fonction de la fréquence (voir la Fig. 14).

La Fig. 14 met aussi en évidence les limites de la méthode du centre de phase lorsqu'on calcule le diagramme de rayonnement dans des directions où l'on prévoit de grandes variations de la position géométrique du centre de phase. Ce défaut de précision est spécialement important aux points où l'on doit calculer les effets des rayonnements combinés de plusieurs antennes, lesquels peuvent modifier profondément le diagramme de rayonnement résultant lorsqu'on est en présence de minima et de lobes latéraux.

FIGURE 14
Position du centre de phase d'une antenne panneau à large bande en B.dm

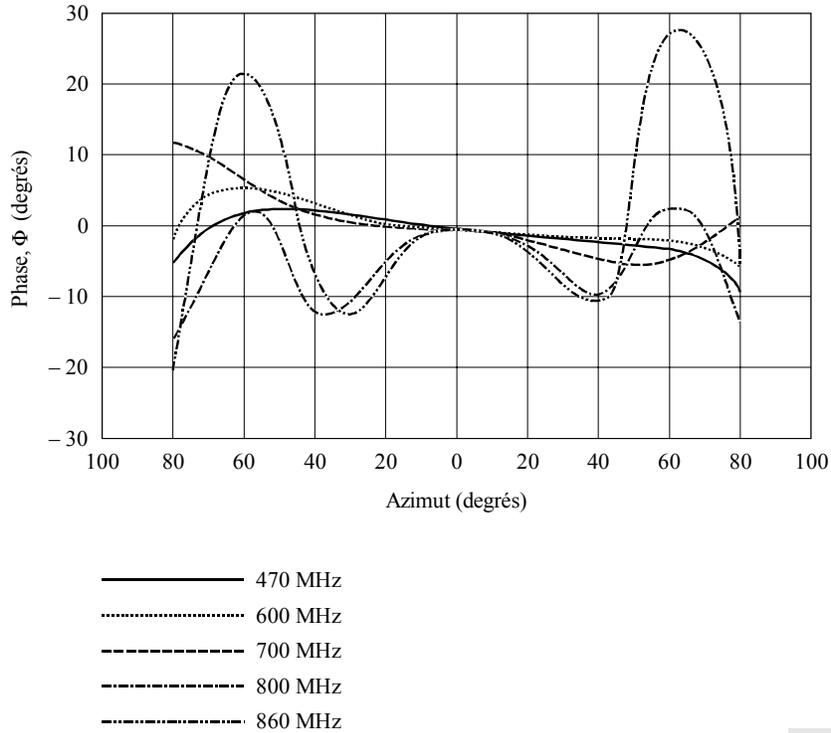


D14

Souvent, le constructeur fournit une famille de courbes qui donne les diagrammes de phase pour plusieurs fréquences. Ces courbes permettent de vérifier l'hypothèse selon laquelle un centre de phase peut constituer l'emplacement de la source ponctuelle dans la bande considérée (voir la Fig. 15).

NOTE 1 – Lorsqu'on ignore où se trouve le centre de phase, par exemple quand on modifie des antennes anciennes pour les faire travailler à des fréquences différentes de celles pour lesquelles elles ont été conçues, ou si les radiateurs ne sont pas décrits avec une précision suffisante, etc., on peut se rabattre sur une règle empirique qui sert souvent à la conception de systèmes d'antenne, à savoir placer le centre de phase là où se trouvent les bornes d'alimentation des doublets rayonnants. C'est une hypothèse prudente pour obtenir le diagramme global. On peut l'appliquer à d'autres types d'éléments rayonnants, par exemple, les antennes Yagi.

FIGURE 15
 Diagrammes de phase d'une antenne panneau en B.dm, pour plusieurs fréquences de fonctionnement



D15

6.3 Calcul du diagramme de rayonnement des réseaux d'antennes

Pour la conception de systèmes d'antenne formés de radiateurs fournis par un constructeur (simples doublets, panneaux ou antennes Yagi, etc.), on connaît généralement les sections verticales et horizontales du diagramme de rayonnement à trois dimensions qui contient la direction du rayonnement maximal. Soit $f_A(\theta, \varphi)$ la fonction du diagramme d'amplitude du radiateur, on peut exprimer comme suit respectivement les diagrammes de rayonnements horizontal et vertical:

$$f_{AH}(\varphi) \Big|_{\theta = \theta_{max}} \quad \text{et} \quad f_{AV}(\theta) \Big|_{\varphi = \varphi_{max}} \quad (20)$$

où θ_{max} et φ_{max} désignent respectivement l'angle d'élévation et l'angle d'azimut du rayonnement maximal.

En pratique, sur la fiche technique du constructeur les angles θ_{max} et φ_{max} sont nuls. On calcule le diagramme du rayonnement pour des valeurs des angles $\theta \neq \theta_{max}$ et $\varphi \neq \varphi_{max}$, par la relation:

$$f_A(\theta, \varphi) = f_{AH}(\varphi) \Big|_{\theta = \theta_{max}} \cdot f_{AV}(\theta) \Big|_{\varphi = \varphi_{max}} \quad (21)$$

De la même façon, la fonction du diagramme de phase peut s'exprimer par la relation:

$$f_P(\theta, \varphi) = f_{PH}(\varphi) \Big|_{\theta = \theta_{max}} + f_{PV}(\theta) \Big|_{\varphi = \varphi_{max}} \quad (22)$$

où $f_{PH}(\varphi) \Big|_{\theta = \theta_{max}}$ et $f_{PV}(\theta) \Big|_{\varphi = \varphi_{max}}$ désignent respectivement les fonctions du diagramme de phase horizontal et du diagramme de phase vertical du radiateur.

Cette expression suppose que toute autre section verticale ou horizontale du diagramme aura une allure semblable à celle de la section verticale ou horizontale qui contient la direction de rayonnement maximal, hypothèse qui se vérifie en pratique.

6.4 Réseaux d'antennes en B.m et B.dm

6.4.1 Antennes de type panneau

En B.m et plus encore en B.dm, les radiateurs élémentaires sont de dimensions suffisamment petites pour qu'on puisse avoir des systèmes d'antenne conçus à partir d'éléments fournis tout prêts par le constructeur.

Celui-ci construit ces éléments, appelés panneaux, en assemblant sous forme de réseaux plus complexes des radiateurs élémentaires. L'ingénieur qui conçoit l'antenne peut utiliser ces panneaux comme «éléments de construction» du système d'antenne définitif.

Cette technique est très courante dans la conception des systèmes d'antenne en B.m et B.dm car elle permet une bonne maîtrise et l'optimisation des diagrammes des systèmes d'antenne. On peut donc utiliser efficacement le spectre et réaliser des systèmes complets économiques.

Un panneau peut consister en un simple doublet demi-onde unique, fixé à une distance déterminée d'un plan réflecteur incorporé, ou, si on a besoin de réseaux plus complexes, de quatre radiateurs élémentaires (ou davantage), à étroite ou large bande, en polarisation rectiligne ou circulaire.

Le constructeur cherche à optimiser les panneaux en ce qui concerne:

- le gain,
- le diagramme de rayonnement,
- l'affaiblissement d'adaptation,
- l'impédance,
- la bande de fréquences de fonctionnement.

Les caractéristiques sur lesquelles il joue sont les suivantes:

- la structure physique des radiateurs élémentaires,
- l'espacement entre les radiateurs élémentaires,
- la distance entre les radiateurs et le réflecteur (et en certains cas la forme du réflecteur),
- le système d'alimentation.

La possibilité de fonctionner dans une large bande est un facteur essentiel dans la conception des antennes à panneaux modernes. Il arrive souvent qu'on demande à un même système d'antenne de rayonner plusieurs programmes simultanément. C'est le cas classique pour les stations d'émission faisant partie de réseaux de radiodiffusion qui ont à diffuser deux ou trois programmes vers une même zone de service, généralement sur des canaux très espacés en fréquence.

Cette contrainte peut être moins rigoureuse en radiodiffusion sonore MF en bande II, où on n'a besoin que d'une largeur de bande égale environ à $\pm 10\%$ de la fréquence centrale, mais elle influence considérablement la conception des panneaux qui sont censés couvrir intégralement à la fois les bandes IV et V (470-960 MHz).

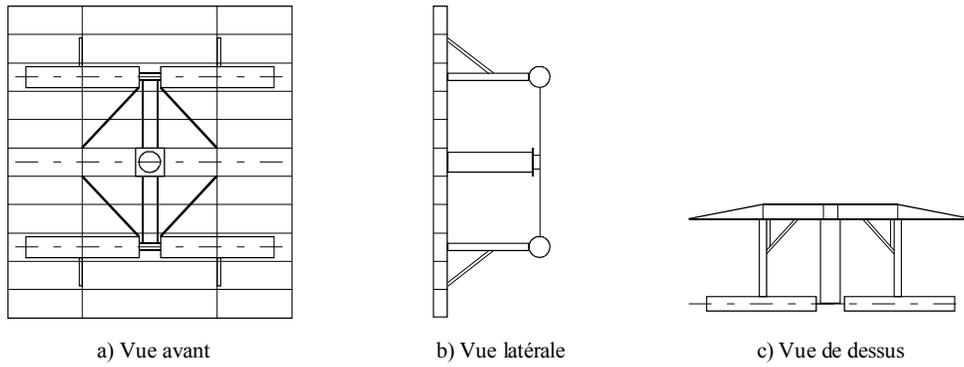
La conception du radiateur élémentaire doit alors être très soignée pour diminuer le Q de son circuit équivalent. Cette réduction s'obtient d'habitude au moyen d'éléments rayonnants de grande surface ou à forte section.

La Fig. 16 représente un panneau typique pour ondes métriques. Ce panneau se compose de deux doublets onde entière superposés, à alimentation centrale. Les diagrammes de rayonnement correspondants, vertical et horizontal, sont représentés à la Fig. 17.

Les panneaux pour la bande I ont normalement un gain (rapporté comme d'habitude au doublet demi-onde) de 5 à 7 dB, tandis qu'en bande II la limite supérieure est de l'ordre de 8 dB aux fréquences de travail les plus élevées. Les panneaux pour la bande III peuvent fonctionner dans toute la bande 174-230 MHz et ont des gains de 10 à 14 dB, un peu plus faibles en polarisation verticale.

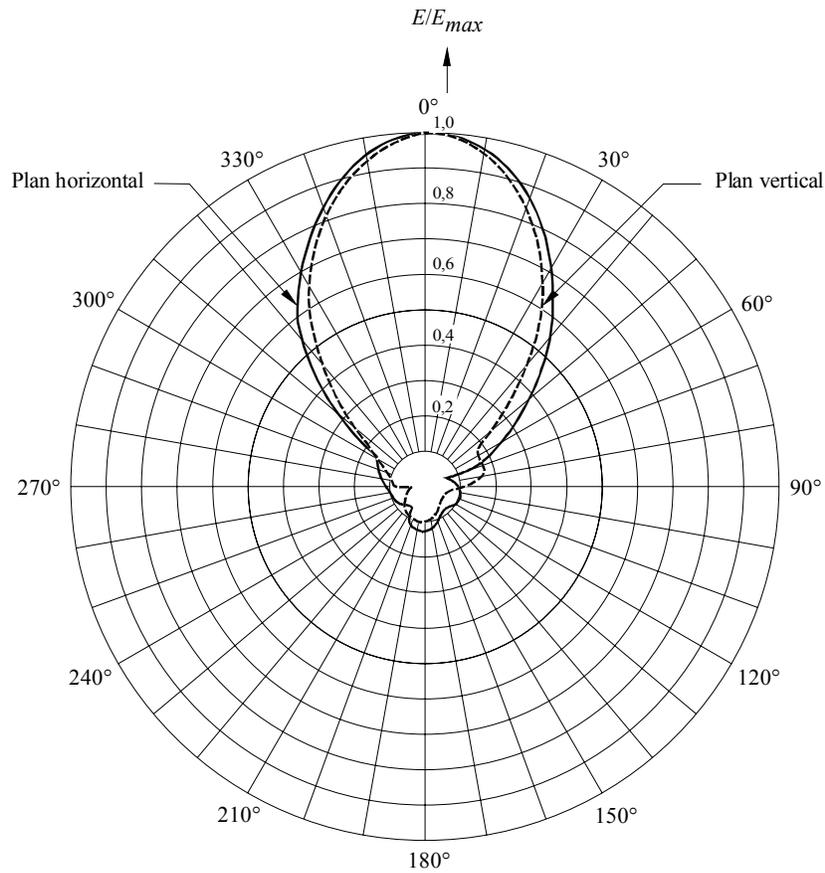
En B.dm, les éléments rayonnants sont de plus faible dimension, ce qui permet de fabriquer des panneaux à diagrammes de rayonnement plus directifs. A ces fréquences, en dépit des contraintes qu'impose la nécessité de fonctionner dans une bande large, on recourt encore largement à la technique des doublets onde entière superposés et à alimentation centrale.

FIGURE 16
Panneau typique de doublets en bande I ou II



D16

FIGURE 17
**Diagrammes de rayonnement vertical et horizontal
 du panneau de doublets de la Fig. 16**



D17

Le fait que les panneaux doivent couvrir une large bande influe aussi sur leur impédance, leur gain et la position du centre de phase; le constructeur doit préciser la variation de ces caractéristiques avec la fréquence. Les valeurs classiques des gains se situent entre 10 et 12 dB, avec des ROS qui ne dépassent pas 1,10 à l'entrée du panneau.

On a besoin d'émissions de télévision en polarisation circulaire, ce qui a conduit à mettre au point des panneaux à polarisation circulaire performants, pour répondre aux exigences suivantes:

- utiliser si possible des doublets en guise de radiateurs élémentaires, pour simplifier la fabrication;
- réaliser des diagrammes horizontaux et verticaux semblables dans une large bande de fréquences;
- réduire le couplage mutuel entre panneaux adjacents pour simplifier la conception;
- prévoir des formes de diagrammes qui conviennent à la réalisation de diagrammes équidirectifs aussi peu ondulés que possible.

On continue à donner la préférence au panneau formé de doublets croisés, bien que cette solution présente quelques limitations en raison de la différence entre les diagrammes verticaux et horizontaux.

6.4.2 Antennes Yagi

Les antennes d'émission Yagi pour la radiodiffusion se composent en général d'un élément alimenté (normalement un doublet demi-onde), d'un réflecteur qui rend le diagramme directif et d'un ou plusieurs directeurs pour augmenter le gain.

On ne peut pas dire, au sens du § 6.4.1, que les antennes Yagi soient des antennes à large bande. Il est possible cependant de les réaliser de telle sorte qu'elles fonctionnent dans une largeur de bande s'étendant de $\pm 5\%$ à $\pm 10\%$ de leur fréquence centrale.

Les antennes Yagi de conception actuelle couvrent entièrement la bande II ou deux canaux de télévision adjacents de la bande III avec une seule antenne. Elles ont des gains de l'ordre de 4 à 5 dB, selon le nombre des directeurs (1 à 3).

La Fig. 18 (a et b) présente une antenne Yagi type pour radiodiffusion MF et son diagramme de rayonnement.

L'antenne Yagi a aussi l'avantage de s'adapter à la polarisation circulaire, par croisement des éléments.

On peut se servir aussi bien d'antennes Yagi que de radiateurs en panneaux comme éléments rayonnants pour constituer des systèmes d'antenne plus complexes. Il est possible de les superposer ou de les juxtaposer pour former des réseaux dont le diagramme global répond à des exigences particulières. On peut calculer les diagrammes obtenus par la méthode du § 4.2, où l'on considère que les antennes Yagi du système sont des sources ponctuelles non isotropes placées à leur propre centre de phase qu'on suppose généralement situé aux bornes de l'élément alimenté.

6.4.3 Autres types de réseaux d'antennes

Parmi les réseaux d'antennes qui composent les systèmes d'antenne pour la radiodiffusion en B.m, l'antenne log-périodique a aussi trouvé des applications intéressantes dans les réémetteurs, tant à la réception qu'à l'émission.

Les possibilités de fonctionnement dans une large bande propres aux antennes log-périodiques rendent possible la réalisation d'ensembles capables de couvrir la totalité d'une bande de radiodiffusion.

Les antennes log-périodiques types ont des caractéristiques de fonctionnement globales qui sont comparables à celles des antennes Yagi à deux éléments superposés.

7 Systèmes d'antenne

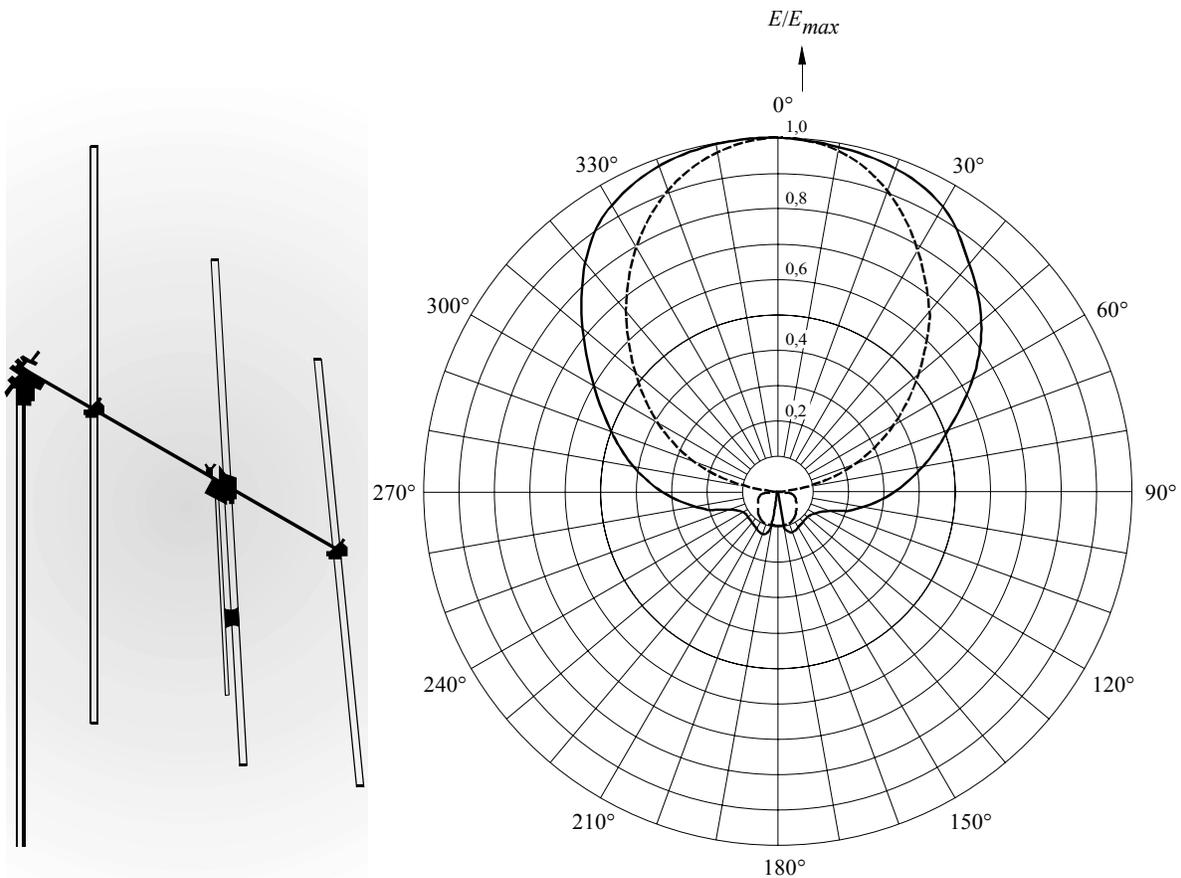
En B.m et B.dm, on réalise des systèmes d'antenne au moyen de réseaux d'éléments rayonnants, pour obtenir un diagramme de rayonnement optimisé.

Le signal que rayonne l'antenne se propage, en première approximation, en visibilité directe. Il est donc évident que toute l'énergie rayonnée par l'antenne au-dessus de son plan horizontal est perdue. On peut réduire cette perte en rétrécissant le diagramme de rayonnement vertical du système d'antenne et en inclinant le faisceau vers le bas.

On peut de même avoir à modeler le diagramme en azimut car il doit correspondre à la zone de service exigée et assurer aux autres stations d'émission sur le même canal ou sur les canaux adjacents la protection nécessaire.

La solution la plus efficace pour agir sur les deux diagrammes de rayonnement est de disposer des éléments rayonnants comme des panneaux, des Yagis, etc., en nombre suffisant et orientés dans l'azimut désiré.

FIGURE 18



a) Antenne Yagi type pour couverture totale de la bande II

b) Diagramme de rayonnement type

- Diagramme dans le plan perpendiculaire aux doublets
- Diagramme dans le plan des doublets

D18

Dans les paragraphes suivants, on passera donc en revue les techniques actuelles les plus courantes pour la conception de systèmes d'antenne optimisés.

Bien qu'on se réfère surtout à des systèmes d'antenne à panneaux, tout ce qu'on va lire s'applique de façon générale à toute technique qui met en œuvre des éléments rayonnants dont le concepteur peut faire varier la position géométrique relative et les caractéristiques d'alimentation pour obtenir le diagramme global voulu.

7.1 Diagramme d'un système d'antenne

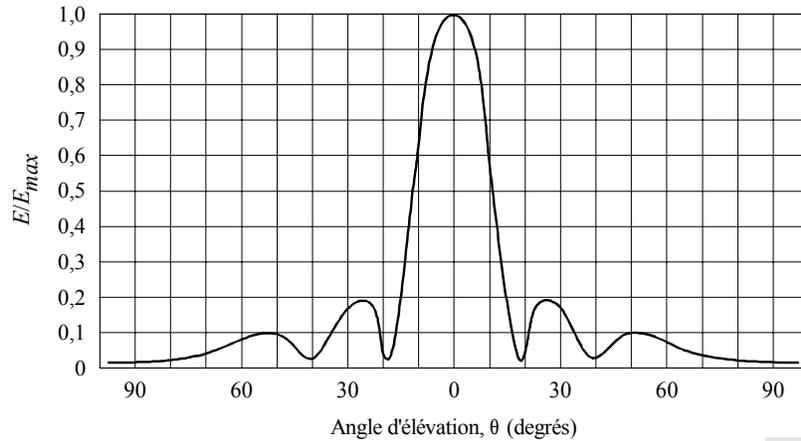
7.1.1 Comblement des zéros

Dans le secteur angulaire qui correspond à la zone de service voulue, il ne faut pas que le diagramme de rayonnement contienne de zéros, car aux points qui correspondent aux angles où apparaissent ces zéros, on aura, en théorie un champ nul. En pratique, le signal reçu sera nettement inférieur à la valeur nécessaire car il proviendra de réflexions non contrôlées se produisant en dehors de la zone de zéros.

La Fig. 19 présente un diagramme de rayonnement vertical typique pour des éléments rayonnants superposés et également espacés, alimentés par des courants d'amplitude et de phase égales (c'est le réseau à rayonnement transversal du § 6.1). On voit que les zéros concernent une grande partie du secteur angulaire qui pourrait correspondre à la zone de service requise.

FIGURE 19

Diagramme de rayonnement vertical d'un réseau de 5 éléments rayonnants verticaux espacés de $0,5 \lambda$ ayant des courants et des phases égaux



D19

Les angles où apparaissent des zéros sont donnés par la formule approchée:

$$\theta = \arctg \frac{\pm k}{n d} \quad (23)$$

où:

k : numéro du zéro (1, 2, ...)

n : nombre d'éléments superposés

d : espacement entre éléments, (longueurs d'onde)

Diverses méthodes de «comblement des zéros» ont été mises au point pour obtenir un diagramme vertical qui soit proche du tracé idéal décrit précédemment.

La solution la plus simple et la plus souvent utilisée est une alimentation des divers éléments superposés au moyen de courants d'amplitudes différentes, c'est-à-dire une distribution convenable de la puissance.

Une technique bien connue pour la distribution de la puissance est la distribution dite «binomiale» où les amplitudes des courants d'alimentation sont proportionnelles aux coefficients du développement du binôme.

Pour les réseaux composés de 3 à 6 éléments superposés, les amplitudes relatives des courants d'alimentation sont données, selon cette loi de distribution, par:

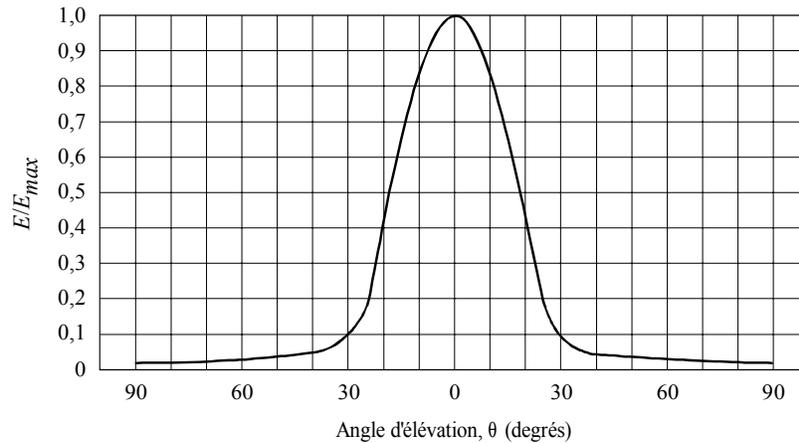
| n | Amplitude relative |
|-----|--------------------|
| 3 | 1, 2, 1 |
| 4 | 1, 3, 3, 1 |
| 5 | 1, 4, 6, 4, 1 |
| 6 | 1, 5, 10, 10, 5, 1 |

La Fig. 20 présente le diagramme vertical du réseau de la Fig. 19 lorsque la distribution des amplitudes est binomiale.

Bien que la distribution binomiale élimine les zéros et les petits lobes, la largeur du faisceau émis par le réseau décroît, donc aussi sa directivité. En outre, dans les grands réseaux les amplitudes des courants peuvent varier considérablement, ce qui risque de causer des difficultés pour obtenir et conserver des niveaux de puissance différents suffisamment stables.

FIGURE 20

Diagramme de rayonnement vertical du réseau de la Fig. 19 lorsqu'on met en œuvre une distribution binomiale des amplitudes



D20

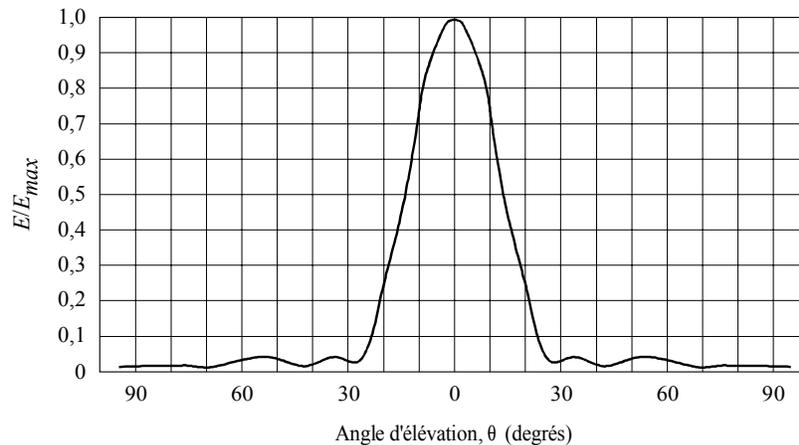
Une autre technique de distribution qui évite les inconvénients ci-dessus est la distribution de Dolph-Tschebycheff.

Lorsqu'on met en œuvre cette distribution, il faut soit spécifier le niveau maximal imposé aux lobes latéraux si on veut réduire au minimum la largeur du faisceau entre les premiers zéros, soit inversement spécifier la largeur du faisceau entre les premiers zéros pour réduire au minimum les lobes latéraux.

La Fig. 21 présente le diagramme vertical du réseau de la Fig. 19 lorsqu'on applique une distribution d'amplitude de Dolph-Tschebycheff 1; 1,6; 1,9; 1,6; 1 qui correspond à un affaiblissement maximal des lobes latéraux de 27 dB.

FIGURE 21

Diagramme de rayonnement vertical du réseau de la Fig. 19 lorsqu'on met en œuvre une distribution des amplitudes de Dolph-Tschebycheff



D21

Avec cette forme de distribution, l'espacement optimal entre éléments est voisin de $\lambda/2$, mais cette distribution est aussi valable pour des espacements plus grands.

On notera que, quelle que soit la technique de comblement des zéros utilisée, le gain obtenu sera inférieur à celui de la distribution uniforme.

On appelle généralement cette réduction du gain la «perte de distribution».

On peut réduire cette perte à un minimum grâce à des techniques appropriées de synthèse des diagrammes, dans lesquelles la puissance qui sert à combler les zéros provient soit de la portion de diagramme qui se trouve au-dessus de l'horizon, soit de la compensation des ondulations du faisceau principal.

D'autres techniques plus élaborées pour combler les zéros combinent une distribution de phase appropriée et la distribution imposée pour les amplitudes.

Dans le cas de cette distribution plus générale, la diminution du gain par rapport au cas de la distribution uniforme des puissances avec concordance de phase est habituellement appelée «perte de compensation».

7.1.2 Inclinaison du faisceau

Il est nécessaire d'incliner le faisceau non seulement pour réduire la puissance rayonnée au-dessus du plan horizontal mais aussi pour envoyer un maximum de puissance vers la surface de la Terre.

En fait, à cause de la courbure de la Terre, le rayonnement maximal d'un réseau d'antenne n'atteindrait jamais la surface du sol si on n'inclinait pas le faisceau.

Il faut incliner de plus de $0,5^\circ$ le faisceau d'une antenne située à 300 m au-dessus du niveau du sol pour que le rayonnement maximal atteigne la surface de la Terre.

Il est facile d'incliner légèrement le faisceau de 1 à 3° en penchant simplement, par des moyens mécaniques, le plan des éléments rayonnants. Il est rare qu'on lui donne mécaniquement une plus forte inclinaison en raison de difficultés matérielles et de difficultés dues à l'environnement.

On peut aussi incliner le faisceau en réglant convenablement la phase des courants d'alimentation des éléments superposés. On obtient ce réglage soit en alimentant la moitié inférieure des éléments superposés avec des courants qui ont par rapport aux courants de la moitié supérieure un déphasage arrière fixe, soit en déphasant progressivement les courants des éléments rayonnants adjacents.

Les plus forts angles d'inclinaison s'obtiennent normalement en combinant de façon appropriée les procédés mécanique et électrique. On notera que lorsqu'on fait varier la distribution des phases dans les éléments rayonnants, il en résulte une perte de «compensation» par rapport au gain qu'on aurait avec une distribution uniforme de la puissance (et à phases égales).

7.2 Diagrammes de rayonnement des systèmes d'antenne

Comme indiqué aux § 6.3 et 6.4, on peut considérer que les éléments rayonnants qui composent un système d'antenne sont des sources non isotropes situées à leur centre de phase. En ce cas, comme l'explique le § 4.2, on calcule le diagramme de rayonnement résultant au moyen d'une addition vectorielle qui tient compte des diagrammes de rayonnement individuels.

Lorsqu'on connaît l'amplitude et la phase du courant d'alimentation de chaque élément, cette addition vectorielle se ramène à la solution d'un problème purement géométrique.

En premier lieu, on se placera dans le cas de deux sources isotropes disposées de façon arbitraire dans un espace à trois dimensions, pour trouver la différence de phase des champs rayonnés en fonction des positions relatives des sources, des phases des courants d'alimentation et de la fréquence.

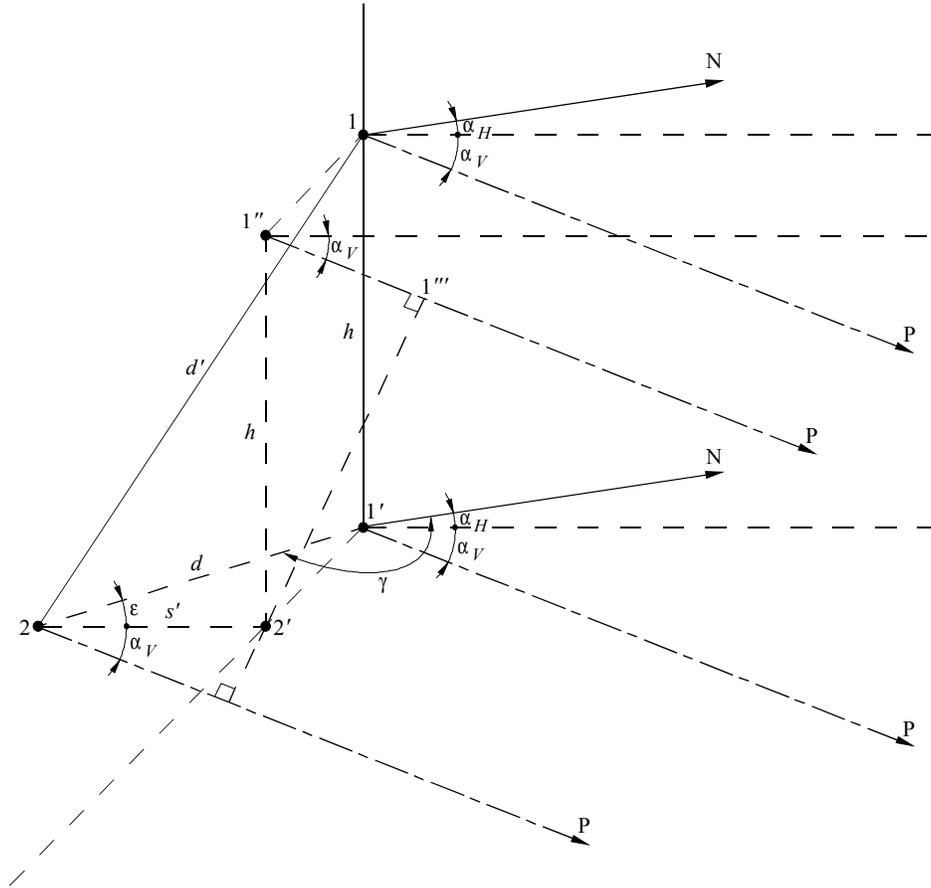
On étendra ensuite les résultats au cas plus général de sources non isotropes. En se reportant à la Fig. 22, où le système de coordonnées n'est pas précisé, on prendra pour référence la source 1 pour calculer le déphasage de la source 2 lorsqu'on évalue le champ résultant en un point P qui correspond à une direction donnée.

Sur la Fig. 22, $1'$ sera la projection de la source 1 sur le plan horizontal où se trouve la source 2. On a indiqué sur ce plan la direction du Nord géographique N, et qui passe par $1'$.

Sur la Fig. 22, les notations sont les suivantes:

- d : distance de la source 2 à la projection $1'$ de la source 1 sur le plan horizontal de la source 2
- h : distance verticale de la source 1 à sa projection $1'$
- γ : angle entre d et la direction du Nord géographique dans le plan horizontal
- α_H : angle, dans le plan horizontal, entre la direction du Nord géographique et la projection sur le plan horizontal de la direction pour laquelle on effectue le calcul
- α_V : angle, dans le plan vertical, entre la direction pour laquelle on effectue le calcul et sa projection dans le plan horizontal

FIGURE 22
Géométrie de l'addition vectorielle



D22

Si on exprime d et h en mètres et f en MHz, le déphasage électrique en degrés de la source 2 par rapport à la source 1 sera:

$$\psi_2 = 1,2 \cdot f \cdot \left[d \cdot \cos (\gamma - \alpha_H) \cdot \cos \alpha_V + h \cdot \sin \alpha_V \right] \quad (24)$$

En supposant que la source 2 peut rayonner avec un déphasage initial de β en degrés par rapport à la source 1 (en raison par exemple d'un déphasage entre les courants d'alimentation) et avec un déphasage $\Delta\psi_p(\theta, \varphi)$ dû au diagramme de rayonnement de phase, (24) peut s'écrire plus généralement comme suit:

$$\psi_2 = 1,2 \cdot f \cdot \left[d \cdot \cos (\gamma - \alpha_H) \cdot \cos \alpha_V + h \cdot \sin \alpha_V \right] + \beta + \Delta\psi_p(\theta, \varphi) \quad (25)$$

et pour la $i^{\text{ème}}$ source d'un réseau

$$\psi_i = 1,2 \cdot f \cdot \left[d_i \cdot \cos (\gamma_i - \alpha_H) \cdot \cos \alpha_V + h_i \cdot \sin \alpha_V \right] + \beta_i + \Delta\psi_{pi}(\theta, \varphi) \quad (26)$$

Si on considère un réseau de n sources non isotropes, le diagramme de champ résultant dans une direction quelconque sera le résultat de l'addition de n vecteurs dont les amplitudes seront données par les diagrammes individuels en amplitude du rayonnement des sources et dont les phases seront données par l'équation (26), en prenant la source 1 comme référence. Cela s'écrit:

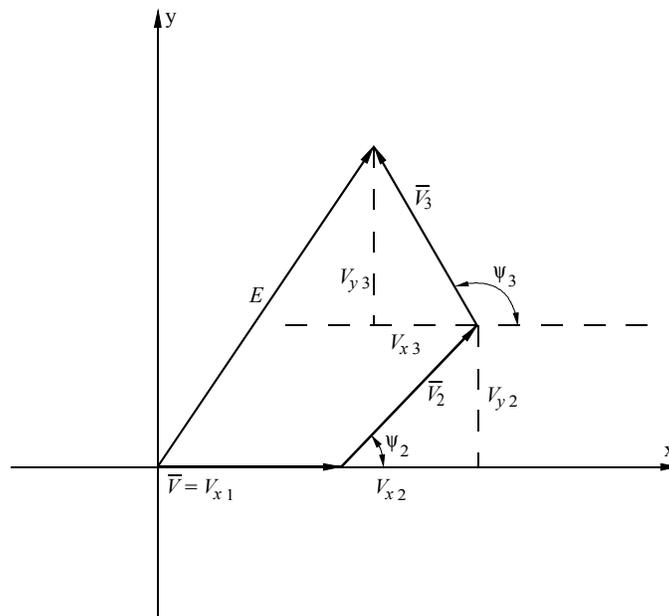
$$E(\theta, \varphi) = \sum_{i=1}^n V_i(\theta, \varphi) = \sum_{i=1}^n K_i \cdot f_i(\theta, \varphi) \cdot e^{j\psi_i(\theta, \varphi)} \quad (27)$$

où:

- V_i : vecteur champ individuel
- K_i : constante qui tient compte des différences entre les puissances d'entrée des sources
- f_i : diagramme de l'amplitude relative du rayonnement d'une source individuelle
- $\psi_i(\theta, \varphi)$: déphasage de la $i^{\text{ème}}$ source par rapport à la source 1 ($\psi_1(\theta, \varphi) = \psi_{p1}(\theta, \varphi)$).

Il peut être commode d'effectuer l'addition vectorielle dans un plan x-y, comme le montre la Fig. 23 pour $n = 3$.

FIGURE 23
Addition vectorielle dans le plan x-y pour $n = 3$



D23

La résultante $E(\theta, \varphi)$ aura pour composantes:

$$E_x(\theta, \varphi) = \sum_{i=1}^n V_{xi}(\theta, \varphi) = \sum_{i=1}^n k_i \cdot f_i(\theta, \varphi) \cdot \cos \psi_i \quad (28)$$

$$E_y(\theta, \varphi) = \sum_{i=1}^n V_{yi}(\theta, \varphi) = \sum_{i=1}^n k_i \cdot f_i(\theta, \varphi) \cdot \sin \psi_i \quad (29)$$

d'où:

$$|E(\theta, \varphi)| = \left[|E_x(\theta, \varphi)|^2 + |E_y(\theta, \varphi)|^2 \right]^{1/2} \tag{30}$$

et:

$$\psi(\theta, \varphi) = \text{arc tg} \left[E_y(\theta, \varphi) / E_x(\theta, \varphi) \right] \tag{31}$$

En pratique, $f_i(\theta, \varphi)$ se calculera comme indiqué au § 6.3, à partir des données fournies par le constructeur, tandis que k_i sera déterminé par la puissance qui alimente le système et ψ_i calculé d'après la géométrie du système d'antenne et le diagramme de phase.

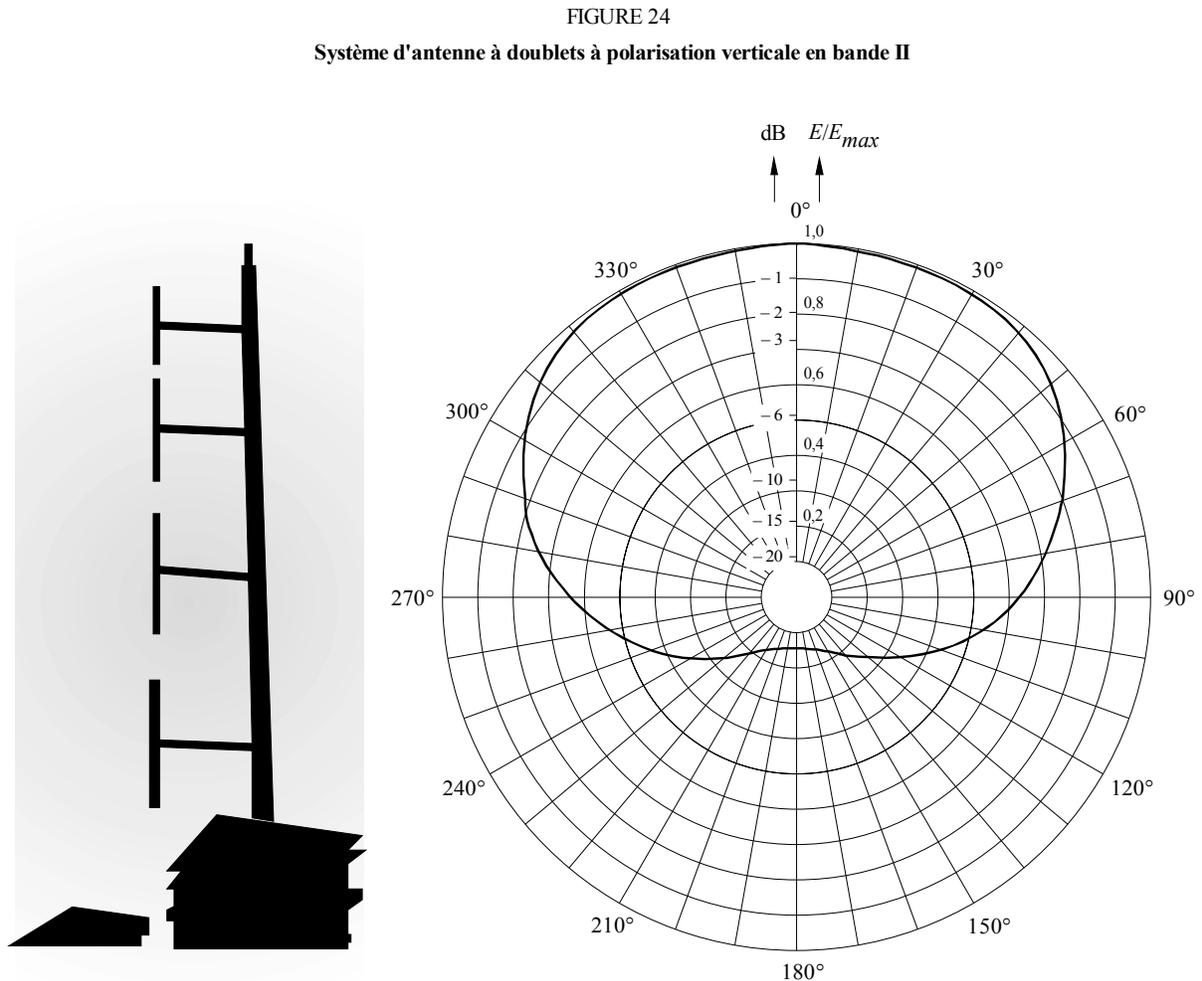
Comme on n'a pas choisi au départ un système de coordonnées particulier, on rapporte généralement tous les angles horizontaux à la direction du Nord et tous les angles verticaux au plan horizontal, quand on calcule le déphasage ψ_i .

7.3 Exemples de diagrammes de rayonnement de systèmes d'antenne

7.3.1 Systèmes d'antenne à doublets

Les systèmes d'antenne à doublets sont très souvent utilisés en radiodiffusion B.m. Ils consistent en général en réseaux colinéaires de doublets verticaux régulièrement superposés et alimentés par des courants d'amplitude et de phase égales.

La Fig. 24 présente un système d'antenne à doublets à polarisation verticale et son diagramme de rayonnement sur le plan horizontal.



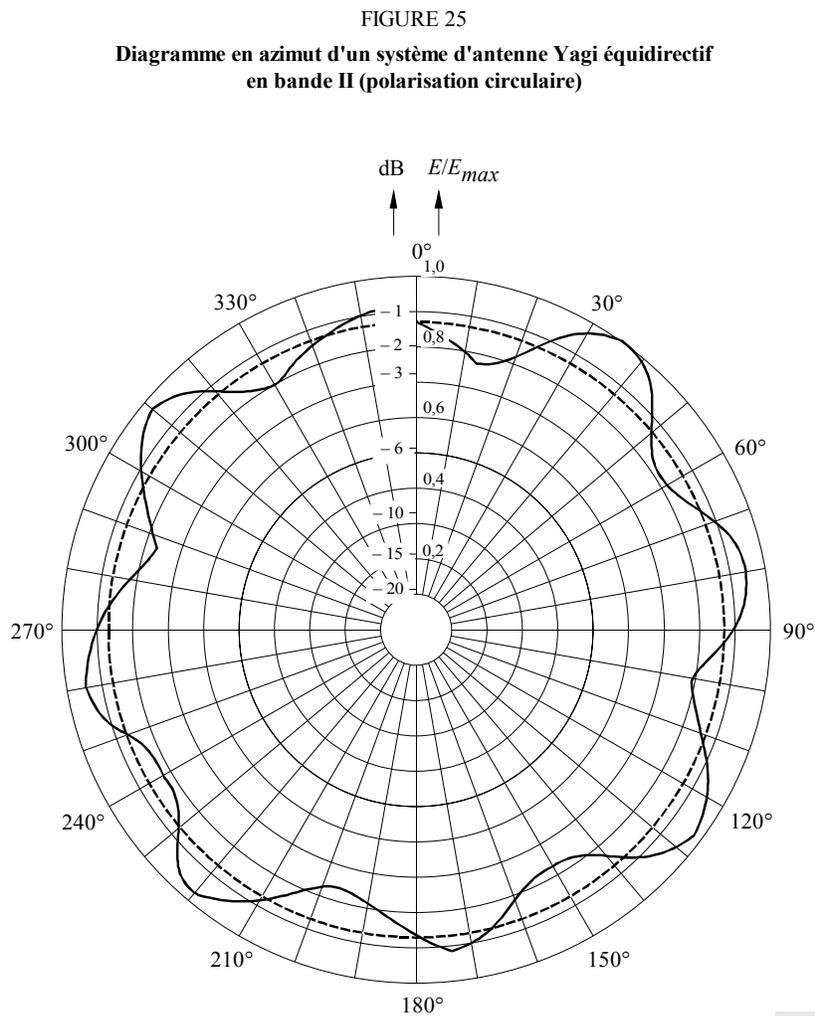
7.3.2 Systèmes d'antenne Yagi

On peut se servir aussi bien d'antennes Yagi que de radiateurs en panneaux comme éléments rayonnants pour constituer des systèmes d'antenne plus complexes. Il est possible de les superposer ou de les juxtaposer pour former des réseaux dont le diagramme global répond à des exigences particulières. On peut calculer les diagrammes obtenus par la méthode du § 4.2, où l'on considère que les antennes Yagi du système sont des sources ponctuelles non isotropes placées à leur propre centre de phase qu'on suppose généralement situé aux bornes de l'élément alimenté.

La Fig. 18 montre bien qu'avec des émissions en polarisation horizontale, on a une très médiocre directivité dans le plan vertical. Pour cette raison, on superpose en pratique les antennes Yagi.

On peut aussi réaliser de bons diagrammes de rayonnement directifs ou équidirectifs en combinant des antennes Yagi.

La Fig. 25 représente un diagramme de rayonnement équidirectif en azimut, obtenu avec un système composé de 4 antennes Yagi pour la bande II. Dans cette application, on a aussi utilisé une technique appropriée pour compenser les minima du diagramme horizontal. Cette technique consiste à ajouter à la structure rayonnante 4 éléments passifs verticaux placés diagonalement (voir la Fig. 26).

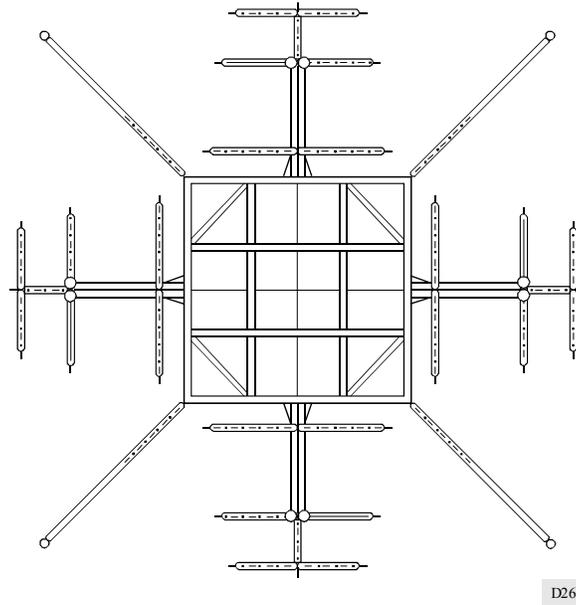


La Fig. 27 représente le diagramme directif en azimut d'un système composé de 2 antennes Yagi fonctionnant en bande II.

7.3.3 Systèmes d'antenne à panneaux

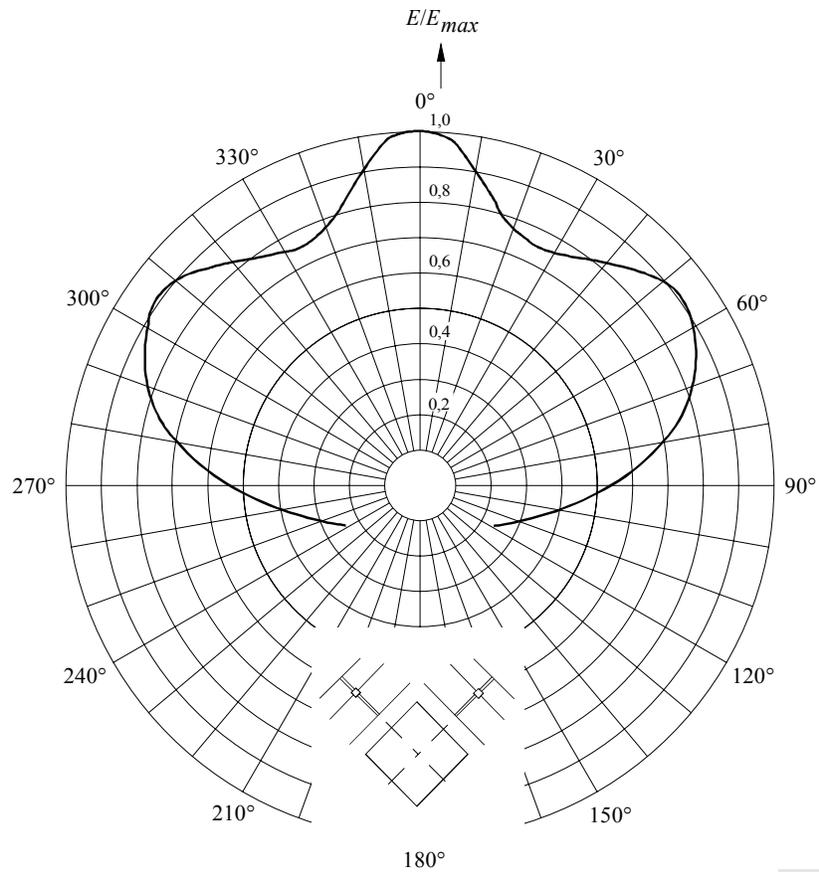
Les panneaux correctement conçus ont des diagrammes directifs, le faisceau principal étant perpendiculaire à la surface du réflecteur. Pour des panneaux montés sur des pylônes à section carrée ou triangulaire, il faut, quand on a besoin d'un diagramme équidirectif, des ouvertures de faisceau à 6 dB de 90° et 120° respectivement.

FIGURE 26
 Système d'antenne Yagi équidirectif donnant le diagramme en azimut représenté Fig. 25



D26

FIGURE 27
 Diagramme en azimut d'un système d'antenne Yagi directif en bande II



D27

Ainsi, quand les panneaux sont alimentés avec des courants en phase dans les directions diagonales, il y a addition des rayonnements de deux panneaux adjacents montés sur les faces, ce qui compense la réduction du gain des panneaux montés sur les côtés.

7.3.3.1 Systèmes d'antenne équidirectifs à panneaux

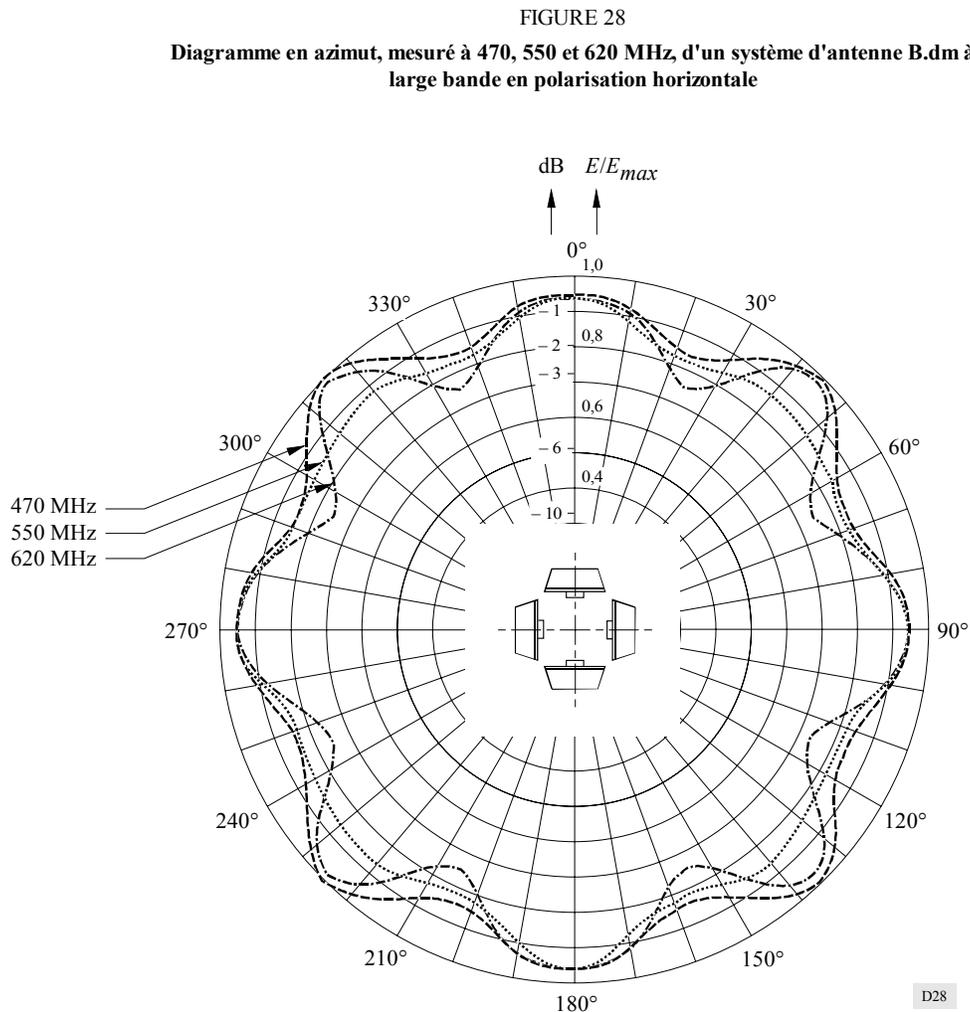
On peut donc obtenir pour les systèmes d'antenne des diagrammes équidirectifs en alimentant les panneaux de chaque section horizontale du réseau avec une puissance égale, les panneaux étant montés au centre des faces du pylône.

Toutefois, le diagramme en azimut qui en résulte (voir la Fig. 28) présentera une ondulation dont l'amplitude est proportionnelle à la largeur des faces du pylône, exprimée en longueur d'onde.

Pour avoir un système d'antenne à panneaux avec diagramme équidirectif en azimut, il faut satisfaire à deux conditions:

- maintenir dans des limites spécifiées (par exemple $\pm 1,5$ dB) les irrégularités du diagramme en azimut qui proviennent du rayonnement des quatre panneaux (ou trois, selon la section du pylône);
- réduire à un minimum le ROS à l'entrée de chaque panneau car toute désadaptation des dérivations d'alimentation provoquera un partage inégal de la puissance entre les divers panneaux et il en résultera un diagramme qui ne sera plus circulaire.

La Fig. 28 montre que le diagramme présente des minima de part et d'autre des directions de transition entre panneaux, là où les rayonnements des panneaux adjacents sont déphasés les uns par rapport aux autres et où le vecteur résultant a une amplitude plus faible.

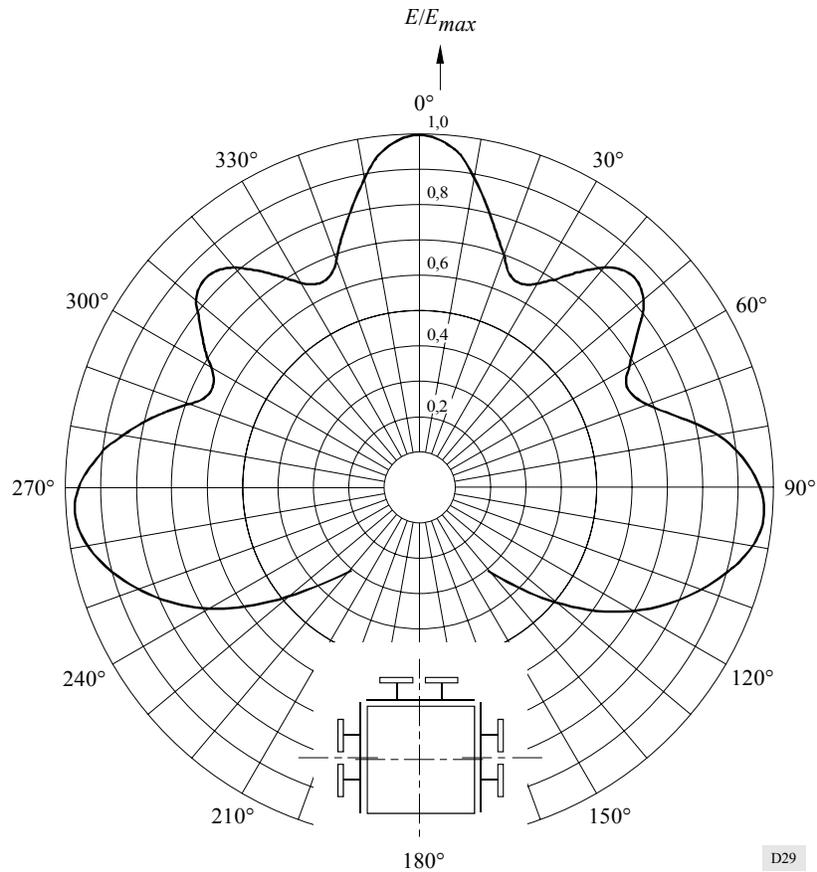


7.3.3.2 Systèmes d'antenne directifs à panneaux

On obtient des diagrammes directifs en azimut en faisant varier le nombre des panneaux sur chaque face du pylône, la puissance appliquée à chaque panneau et l'orientation relative des panneaux, ou en combinant ces trois procédés. La Fig. 29 présente un diagramme directif en azimut obtenu en B.m au moyen d'un système d'antenne à 3 panneaux.

FIGURE 29

Diagramme directif en azimut d'un système d'antenne
à trois panneaux pour la bande III



D29

ANNEXE 1

PARTIE 2

Aspects pratiques des antennes pour ondes métriques et décimétriques

TABLE DES MATIÈRES

| | <i>Page</i> |
|--|-------------|
| 1 Introduction | 33 |
| 2 Mesure des caractéristiques des systèmes d'antenne | 33 |
| 2.1 Considérations sur les emplacements à choisir pour les mesures | 33 |
| 2.2 Caractéristiques à mesurer | 33 |
| 2.3 Méthodes de mesure | 33 |
| 2.3.1 La méthode de mesure dans le domaine fréquentiel (FDM) | 33 |
| 2.3.2 La méthode de mesure dans le domaine temporel (TDM) | 34 |
| 2.4 Equipement de mesure | 37 |
| 2.5 Procédures de mesure | 37 |
| 2.6 Présentation des données | 37 |
| 3 Mesures sur le terrain des caractéristiques des systèmes d'antenne | 38 |
| 3.1 Méthodes de mesure | 38 |
| 3.1.1 Méthode par sondage vertical | 40 |
| 3.1.2 Méthode aéroportée | 41 |
| 3.1.3 Méthode de l'antenne de référence | 43 |
| 3.2 Equipements de mesure | 44 |
| 3.2.1 Equipement pour la mesure par sondage vertical | 44 |
| 3.2.2 Equipement pour la mesure aéroportée | 44 |
| 3.2.3 Equipement pour la mesure avec antenne de référence | 44 |
| 3.3 Procédure de mesure | 45 |
| 3.3.1 Procédure pour la mesure par sondage vertical | 45 |
| 3.3.2 Procédure pour la mesure par la méthode aéroportée | 47 |
| 3.3.3 Procédure pour la mesure avec antenne de référence | 50 |
| 3.4 Présentation des résultats | 52 |
| 4 Différences à prévoir, dans la pratique, entre les caractéristiques de fonctionnement calculées des antennes B.m et B.dm, et les caractéristiques mesurées sur le terrain | 52 |
| 4.1 Facteurs influant sur les caractéristiques de fonctionnement d'une antenne individuelle et sur celles d'un système d'antenne complet | 52 |
| 4.1.1 Structure support | 52 |
| 4.1.2 Ouvrages importants voisins du pylône de l'antenne | 52 |
| 4.1.3 Facteurs climatiques | 53 |
| 4.2 Comparaison entre les caractéristiques des antennes et les diagrammes de rayonnement calculés et mesurés | 53 |

PARTIE 2
DE L'ANNEXE 1

Aspects pratiques des antennes pour ondes métriques et décimétriques

1 Introduction

Dans cette Partie 2, on trouvera la description de méthodes modernes pour mesurer le diagramme de rayonnement d'antennes individuelles et de systèmes d'antenne. On verra, en particulier, que la méthode de mesure dans le domaine temporel semble être la plus précise et la plus performante.

Cette Partie 2 indique également les écarts qui ont été observés dans la pratique entre les diagrammes de rayonnement mesurés et les diagrammes calculés selon la procédure décrite dans la Partie 1.

On étudiera par ailleurs l'influence exercée sur le diagramme de rayonnement global par un certain nombre de facteurs tels que la structure support de l'antenne, la proximité d'autres systèmes rayonnants, etc.

2 Mesure des caractéristiques des systèmes d'antenne

Des mesures sont nécessaires pour évaluer les caractéristiques de fonctionnement effectives des antennes individuelles, par rapport aux valeurs de conception, préalablement à l'installation sur site.

De plus, il est important d'évaluer aussi les caractéristiques de fonctionnement des antennes individuelles dans plusieurs directions d'azimut lorsqu'on regroupe ces antennes pour former des systèmes plus complexes.

2.1 Considérations sur les emplacements à choisir pour les mesures

On choisira avec soin l'emplacement de mesure, car les caractéristiques de cet emplacement influent sur la précision et la reproductibilité des mesures. En particulier, les conditions suivantes doivent être remplies:

- absence de sources de rayonnement brouilleuses;
- distance suffisante entre l'antenne à mesurer et l'antenne de référence, afin d'empêcher les couplages inductifs, donc les distorsions de phase et d'amplitude;
- hauteur appropriée pour le mât d'antenne, pour un positionnement satisfaisant des antennes;
- choix d'un emplacement de mesure suffisamment plat, pour obtenir avec une bonne approximation une surface réfléchissante ou absorbante idéale;
- dégagement suffisant par rapport aux obstacles provoquant des réflexions multiples.

2.2 Caractéristiques à mesurer

Ces caractéristiques sont le plus souvent les suivantes:

- diagramme des amplitudes,
- diagramme des phases,
- gain,
- adaptation d'impédance.

2.3 Méthodes de mesure

On a recours à deux méthodes fondamentales pour mesurer les caractéristiques de fonctionnement des antennes: la méthode FDM (mesure dans le domaine fréquentiel) et la méthode TDM (mesure dans le domaine temporel).

La méthode FDM, utilisée actuellement, n'exige pas l'emploi d'un équipement de mesure coûteux. De son côté, la méthode TDM, mise au point récemment, est plus performante mais nécessite des équipements plus coûteux.

2.3.1 La méthode de mesure dans le domaine fréquentiel (FDM)

On utilise dans cette méthode une antenne émettrice de caractéristiques connues, reliée à un générateur de radiofréquences approprié. Le signal émis est reçu sur l'antenne étudiée, laquelle peut tourner de 360° dans le plan des azimuts. On obtient les diagrammes d'amplitude et de phase (voir le § 6.2 de la Partie 1) en comparant les signaux reçus dans plusieurs azimuts.

Le signal reçu par l'antenne à l'étude se compose du rayon direct et d'un certain nombre de rayons réfléchis, en fonction des caractéristiques de l'emplacement, de la fréquence, de la position de l'antenne de référence, des lobes latéraux du diagramme de rayonnement, etc.

Pour déterminer les vrais diagrammes, il faut tenir compte seulement du rayon direct. En fait, les rayons réfléchis influent sur le diagramme de rayonnement mesuré des antennes individuelles; aussi lorsqu'on en tient compte pour calculer des systèmes d'antenne plus complexes, il faut s'attendre à avoir des écarts importants entre le diagramme calculé et le diagramme mesuré d'un tel système. Ces écarts peuvent être considérables, surtout lorsqu'il s'agit d'évaluer des minima et des lobes latéraux.

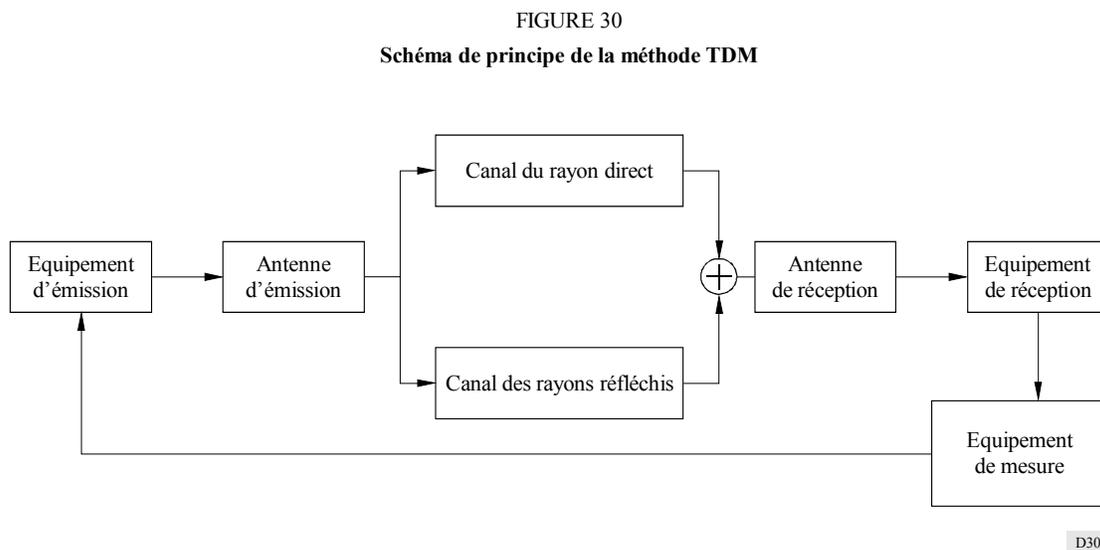
On mesure généralement le gain par la méthode absolue, en prenant bien soin de limiter les effets des rayons réfléchis.

2.3.2 La méthode de mesure dans le domaine temporel (TDM)

La méthode TDM permet de mesurer les diagrammes d'amplitude et de phase avec une précision nettement meilleure, car on peut alors éliminer presque complètement de la mesure les effets des rayons réfléchis.

Cette amélioration est obtenue grâce à l'emploi de la transformée de Fourier, directe et inverse, associée à un processus de portillonnage (gating) analytique.

La Fig. 30 représente le schéma de principe complet du système (avec l'équipement de mesure et l'antenne).



D30

Le rapport de la tension de sortie dans le domaine temporel à une tension d'entrée impulsive est, par définition, la transformée de Fourier de la fonction de transfert du système. Il est donc possible de déterminer la réponse en fréquence du système (pour deux trajets de propagation) au moyen d'un analyseur de spectre ou d'autres appareils similaires.

En calculant la transformée de Fourier inverse de la réponse en fréquence, on peut obtenir la réponse dans le domaine temporel, laquelle englobe les composantes du trajet direct et des trajets de réflexion. Il est possible de séparer ces contributions dans le domaine temporel, parce que leurs trajets respectifs sont de longueur différente. Il conviendra d'optimiser la largeur des impulsions d'entrée en fonction des caractéristiques de l'antenne individuelle à étudier, en se rappelant que la discrimination est d'autant plus précise que les impulsions sont plus courtes.

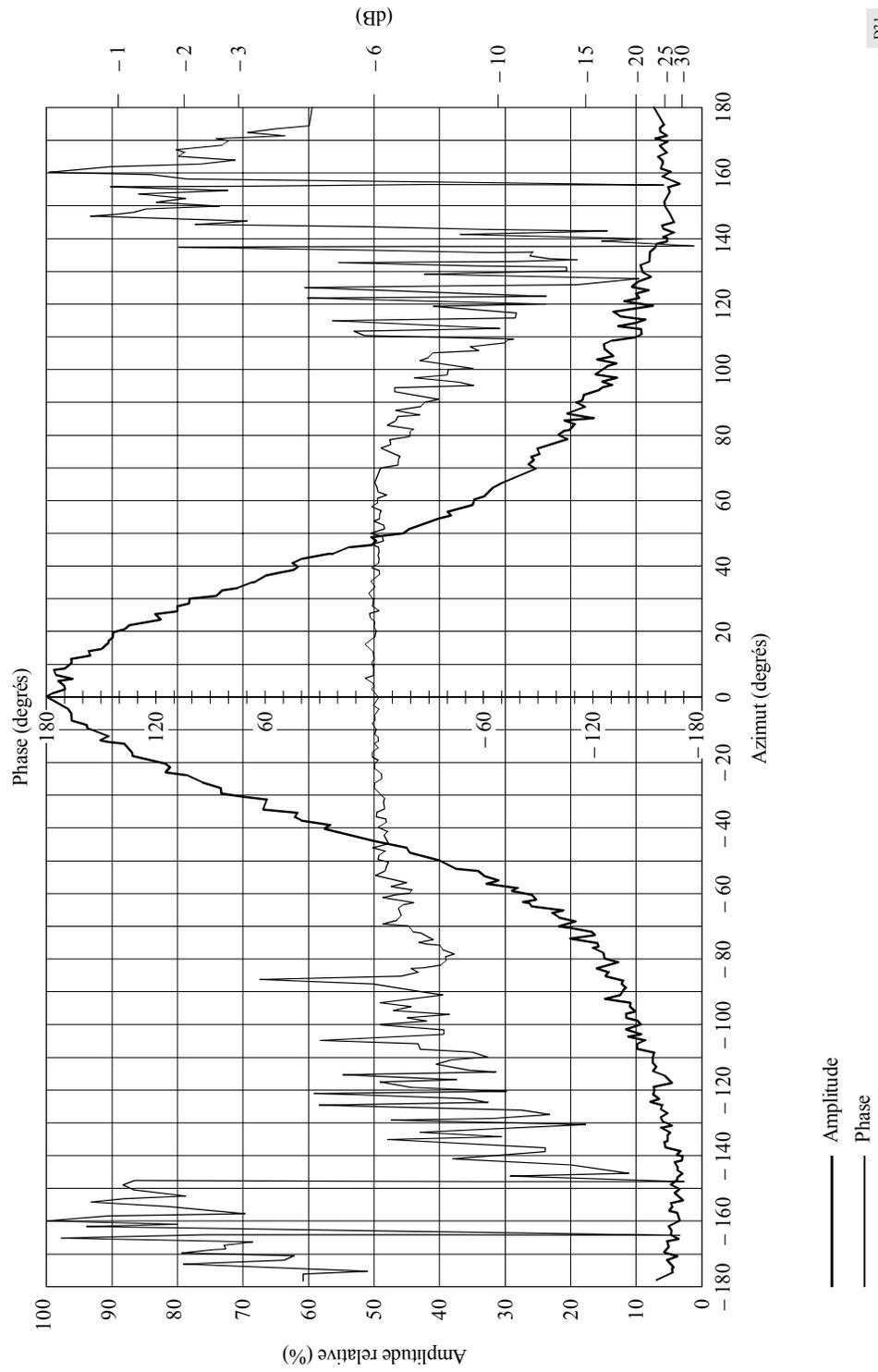
Le processus de portillonnage analytique améliore la discrimination en éliminant les réponses parasites dans le domaine temporel. On peut l'appliquer aux diverses composantes mises en évidence dans ce domaine, ce qui permet d'obtenir la réponse en fréquence de la composante du trajet direct ou de la composante des trajets de réflexion.

Comme la caractéristique des canaux est linéaire, les réponses en fréquence de ces deux composantes ne diffèrent que d'un facteur d'affaiblissement pour la réponse en amplitude et d'un déphasage linéaire pour la réponse en phase.

Toutefois, il faudra ramener à des valeurs acceptables les réflexions dues au défaut d'adaptation entre l'émetteur et son antenne et entre le récepteur et son antenne. Il faut pour cela utiliser des câbles et des connecteurs de haute qualité. Les raccords rotatifs sont à proscrire.

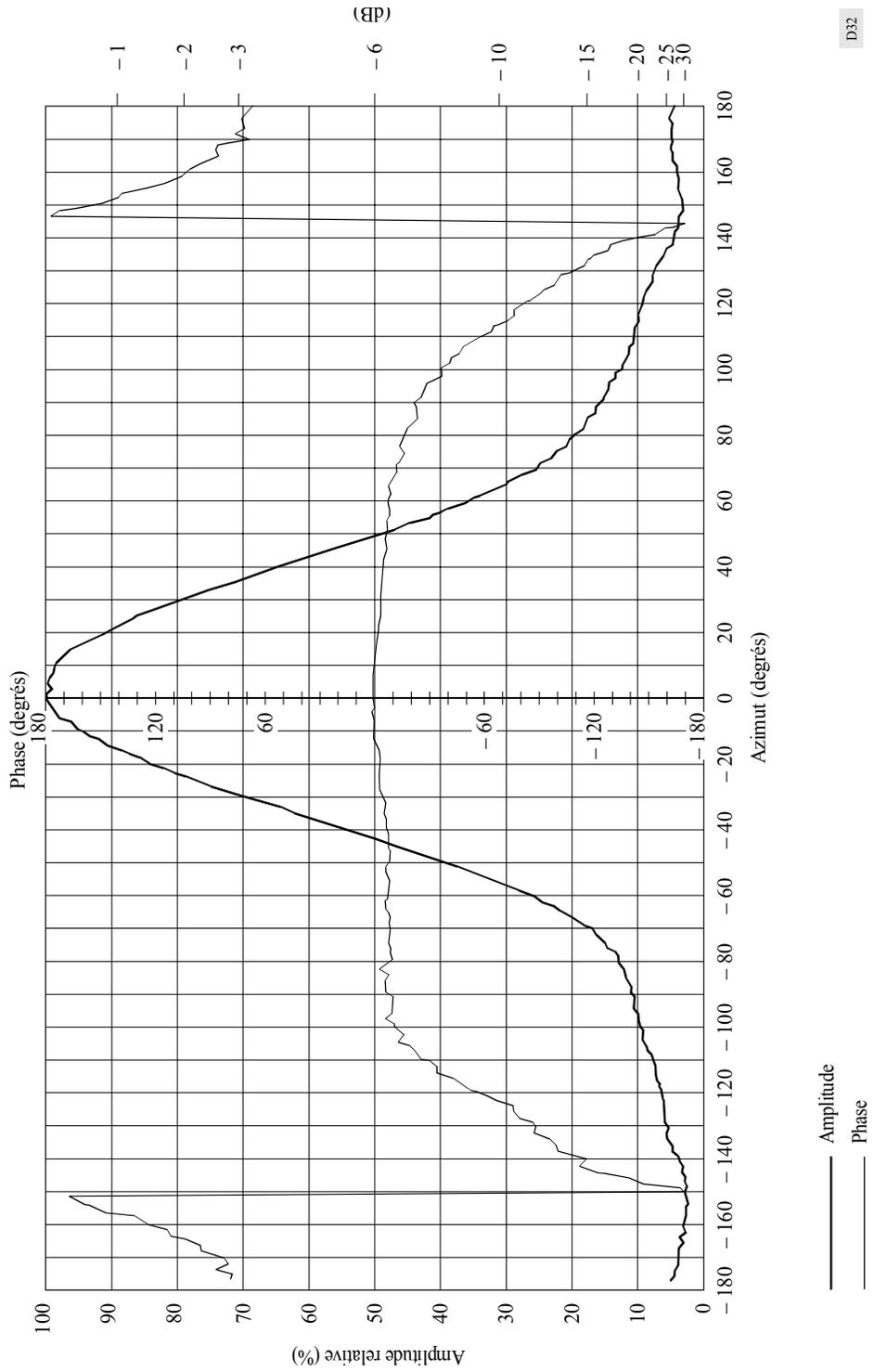
Les Fig. 31 et 32 montrent des exemples de diagrammes d'amplitude et de phase obtenus selon qu'on applique ou qu'on n'applique pas la méthode du domaine temporel.

FIGURE 31
Diagrammes d'amplitude et de phase obtenus lorsque la mesure
n'est pas effectuée dans le domaine temporel



D31

FIGURE 32
 Diagrammes d'amplitude et de phase obtenus lorsque la mesure est effectuée dans le domaine temporel



2.4 Equipement de mesure

Le système de mesure se compose des appareils suivants: un générateur de radiofréquences à grande puissance fournissant un niveau suffisant pour donner un rapport signal/bruit approprié; un mesureur de champ, et un voltmètre vectoriel pour la détermination du centre de phase. Il est recommandé d'utiliser des moyens de mesure plus perfectionnés, pilotés par ordinateur, comme un analyseur de spectre ou un analyseur de réseau.

2.5 Procédures de mesure

Les procédures de mesure sont variables, elles dépendent des caractéristiques à mesurer et des appareils dont on dispose. Dans tous les cas, il faudra satisfaire aux conditions suivantes:

- le couplage inductif entre les antennes doit être minimum, c'est-à-dire que la distance R entre les antennes doit être supérieure à 10λ . On sera assuré ainsi d'obtenir, en champ lointain, un rapport d'amplitudes d'au moins 36 dB;
- il faut aussi réduire à un minimum la distorsion de phase dans le plan de l'onde incidente, pour obtenir une discrimination minimale satisfaisante. Cette distorsion de phase ne devra donc pas dépasser $\pi/8$, soit: $R > 2 D^2/\lambda$;
- l'ouverture de faisceau de l'antenne d'émission doit être telle que les variations d'amplitude du front de l'onde émise ne dépassent pas 0,25 dB dans la direction de l'antenne étudiée;
- on choisira la hauteur d'antenne de telle manière que la surface d'intersection entre le terrain de l'emplacement de mesure et le lobe principal de l'antenne d'émission soit minimale. Cela permet de réduire l'amplitude des rayons réfléchis. Il est recommandé de procéder comme suit: choisir la hauteur d'antenne pour laquelle le premier zéro du diagramme vertical de l'antenne d'émission se trouve dans la direction de la base du pylône;

Pour mesurer l'adaptation d'impédance, il faut choisir avec grand soin la position de l'antenne, pour éviter d'avoir des couplages inductifs et des réflexions sur des obstacles. De façon générale, on fera en sorte que le lobe principal de l'antenne pointe vers le haut, ce qui facilite la mesure des puissances réfléchie et émise effectives.

Dans la méthode FDM, on utilise un signal sinusoïdal dont la fréquence est comprise à l'intérieur de la bande de fréquences de fonctionnement de l'antenne. On effectue une série de mesures du signal capté sur l'antenne de réception, pour plusieurs fréquences dans un secteur angulaire prédéterminé. Les amplitudes mesurées sont ensuite normalisées par rapport au maximum, ce qui donne des valeurs relatives de l'affaiblissement exprimées en dB. Les valeurs de mesure de la phase seront exprimées par des différences de phase par rapport à l'angle de référence. Dans la méthode TDM, on utilise une impulsion d'essai de durée convenable. Pour obtenir le diagramme de rayonnement, on se sert des valeurs fournies par la réponse en fréquence de l'impulsion «reconstituée» sur toute l'étendue du secteur angulaire.

On procède de la façon habituelle pour déterminer les diagrammes d'amplitude et de phase servant aux calculs du diagramme de rayonnement.

Pour mesurer le gain d'antenne, on utilise deux dispositifs identiques comme antenne d'émission et antenne de réception. Ces dispositifs sont placés à la même hauteur et orientés de manière à transférer la puissance maximale. Dans ces conditions, lorsqu'on applique la méthode du sondage vertical en mode FDM, il convient de placer l'antenne à une hauteur commune appropriée pour chaque fréquence d'essai, afin de pouvoir déterminer aisément le rayon direct.

Dans la méthode TDM, les deux antennes sont aussi orientées de manière à transférer la puissance maximale. Comme il est possible d'éliminer le rayon réfléchi, il est inutile de changer la position de l'antenne, comme dans la méthode FDM. Pour déterminer l'adaptation d'impédance, on mesure le rapport puissance émise/puissance réfléchie au moyen d'un coupleur directif.

On dispose maintenant de systèmes de mesure perfectionnés qui permettent de transférer le plan de référence aux bornes d'entrée de l'antenne, ce qui élimine les erreurs pouvant être introduites par l'équipement de mesure. Avec la méthode TDM, il est possible de déterminer les défauts d'adaptation qui pourraient exister dans l'équipement de mesure.

2.6 Présentation des données

Le plan contenant les éléments de l'antenne est pris comme plan de référence pour la présentation du diagramme d'antenne.

Dans le plan de référence et dans le plan orthogonal correspondant, le diagramme des amplitudes sera représenté en coordonnées cartésiennes et en coordonnées polaires. Le diagramme des phases sera représenté exclusivement en coordonnées cartésiennes.

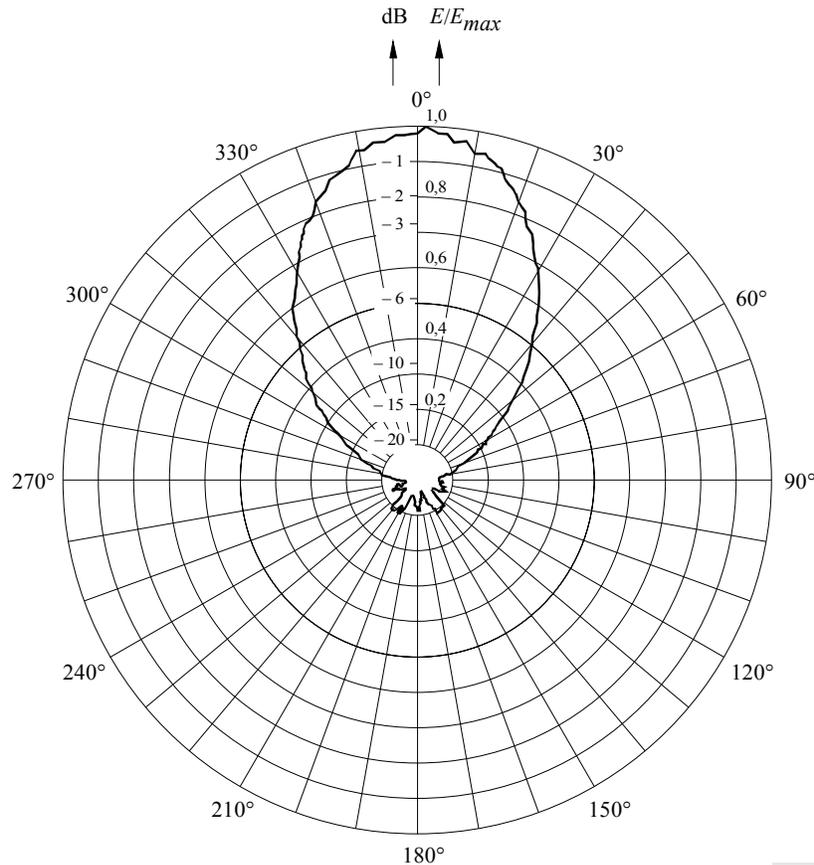
Les données relatives à l'adaptation des gains et des impédances seront présentées sous forme cartésienne.

Les Fig. 33 à 38 donnent quelques exemples de diagrammes d'amplitude et de phase obtenus dans les deux plans, en coordonnées polaires et en coordonnées cartésiennes.

Pour tracer ces figures, on a utilisé une échelle linéaire et on a exprimé les valeurs en pourcentage et en dB.

FIGURE 33

Diagramme des amplitudes (coordonnées polaires) d'une antenne-panneau de 8 doublets, mesuré dans le plan E



D33

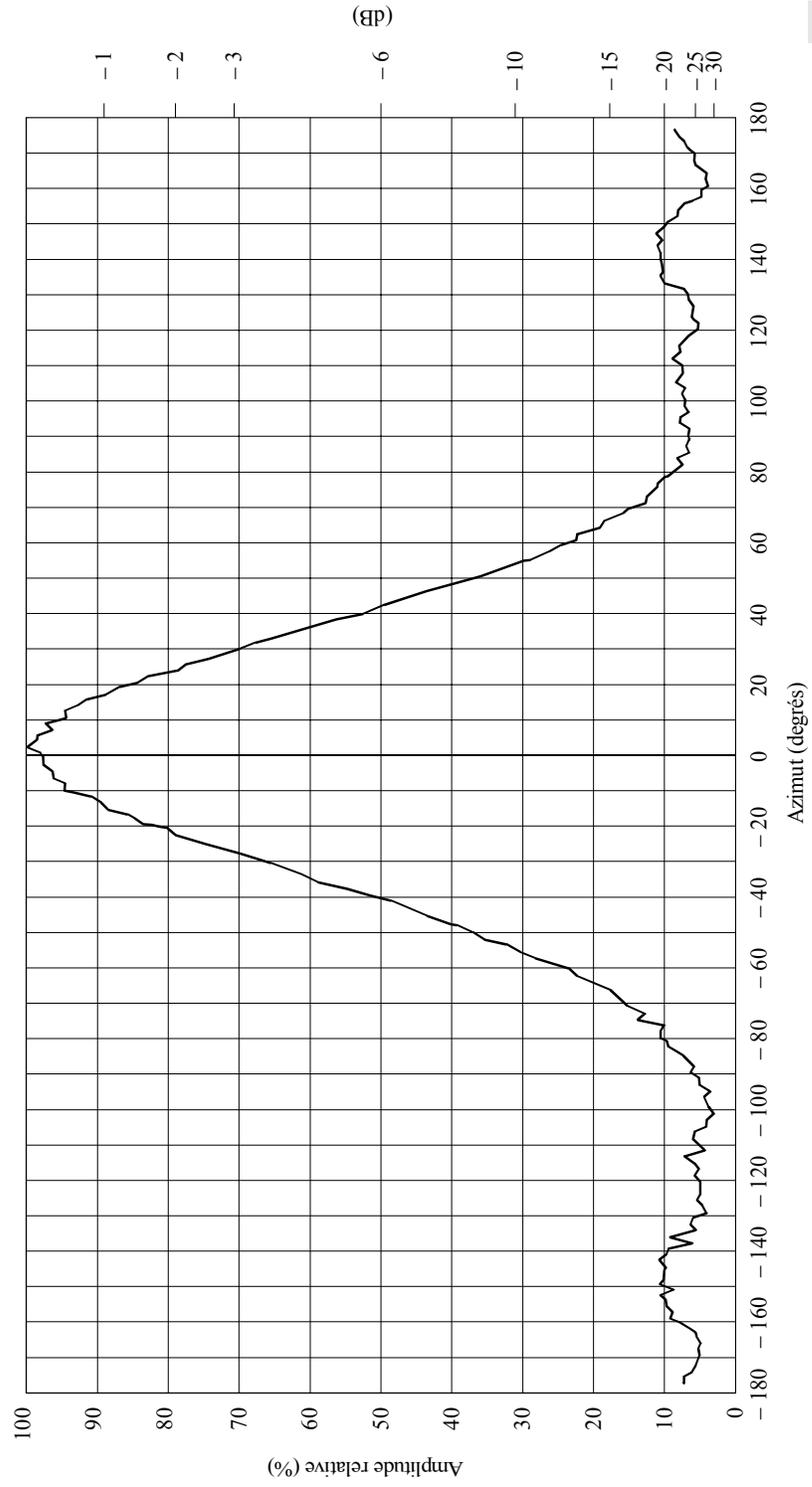
3 Mesures sur le terrain des caractéristiques des systèmes d'antenne

L'efficacité d'un système radioélectrique dépend principalement de l'antenne du système; il faut par conséquent déterminer les diagrammes de rayonnement et le gain avec suffisamment de précision. Si le diagramme de rayonnement d'un système d'antenne complexe est influencé par plusieurs facteurs sur lesquels on n'a aucun moyen d'agir dans le contexte de fonctionnement du système, la seule manière de déterminer le diagramme est d'effectuer des mesures sur le terrain.

3.1 Méthodes de mesure

On trouvera ci-après la description de trois méthodes principales pour la mesure des caractéristiques des antennes. En principe, l'une ou l'autre de ces méthodes peut être utilisée indifféremment, mais en fait un choix est nécessaire, en fonction des caractéristiques économiques du système, de son degré de complexité, des équipements requis et de la durée des mesures. Par exemple, la méthode aéroportée est la plus coûteuse des trois, mais elle permet de mesurer plus rapidement plusieurs systèmes d'antenne installés sur le même pylône ou voisins les uns des autres. Au contraire, des méthodes «terrestres» plus économiques exigent généralement plus de temps pour donner les mêmes résultats; dans certains cas, il est même impossible de faire des mesures fiables avec ces méthodes, pour cause de contraintes environnementales.

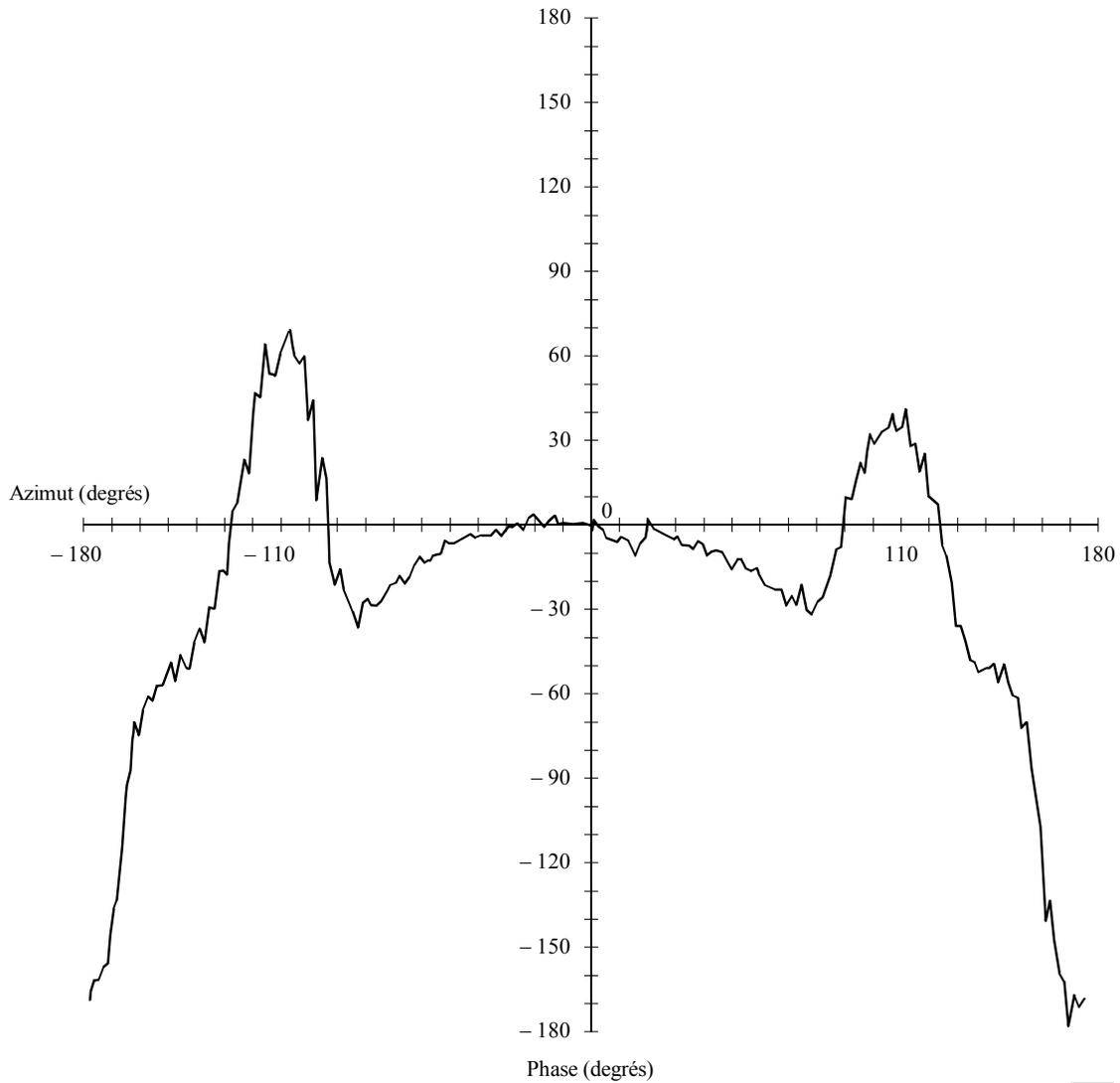
FIGURE 34
 Diagramme des amplitudes (coordonnées cartésiennes) d'une antenne-panneau de 8 doublets, mesuré dans le plan E



D34

FIGURE 35

**Diagramme des phases (coordonnées polaires) d'une antenne-panneau
de 8 doublets, mesuré dans le plan E**



D35

3.1.1 Méthode par sondage vertical

Pour appliquer cette méthode, il faut disposer d'un fourgon automobile spécial, équipé d'une antenne placée sur un mât pouvant être réglé à plusieurs hauteurs à la verticale du point de mesure. Ce dispositif permet d'évaluer les variations du champ électromagnétique en fonction de la hauteur au-dessus du sol.

La mesure fournit un diagramme d'interférence résultant des interactions entre le rayon direct et les rayons réfléchis. Lorsqu'un seul rayon réfléchi est présent, le diagramme est représenté par une fonction cosinusoidale dont le premier maximum correspond à la hauteur $h = \lambda d/4H$, où:

λ : longueur d'onde

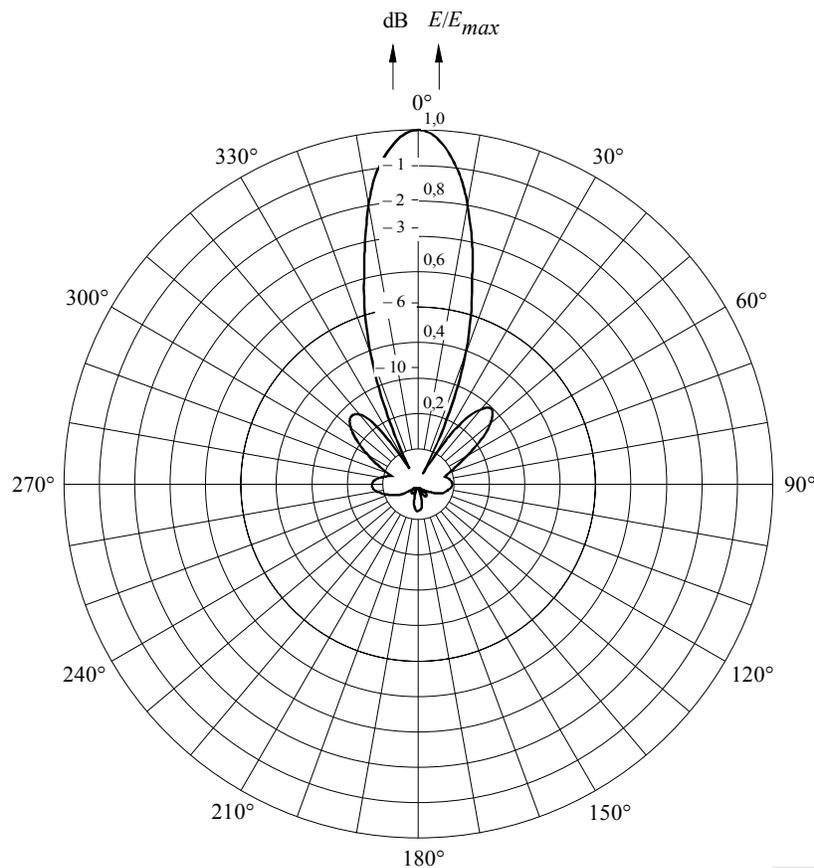
d : distance entre l'antenne d'émission et l'antenne de réception

H : hauteur relative de l'antenne d'émission par rapport au point de mesure.

Cela étant, il est facile de déterminer le champ électromagnétique dans la propagation en espace libre et de comparer sa valeur avec la valeur théorique correspondante (calculée comme indiqué dans la Recommandation UIT-R P.525), pour évaluer les caractéristiques de fonctionnement globales de l'antenne. D'une manière générale, on ne tiendra pas compte des points de mesure qui donneraient un diagramme d'interférence présentant de grands écarts par rapport à la fonction théorique. De toute façon, s'il apparaît impossible de trouver des points de mesure adéquats à cause des contraintes environnementales, il faut envisager le recours à d'autres méthodes.

FIGURE 36

Diagramme des amplitudes (coordonnées polaires) d'une antenne-panneau de 8 doublets, mesuré dans le plan H



D36

3.1.2 Méthode aéroportée

Cette méthode repose sur l'utilisation d'un équipement de mesure aéroporté. On considère qu'elle donne les résultats les plus précis et les plus fiables lorsqu'il s'agit de mesurer le gain ainsi que les diagrammes de rayonnement horizontal et vertical d'une antenne. Le récepteur de mesure est monté sur un hélicoptère (type d'aéronef préféré pour ces mesures) et l'antenne étudiée fonctionne en mode émission. Dans certains cas, notamment pour la mesure des zéros d'un diagramme, il peut être nécessaire d'utiliser une assez grande puissance d'émission afin d'obtenir un rapport signal/brouillage suffisamment élevé dans le récepteur.

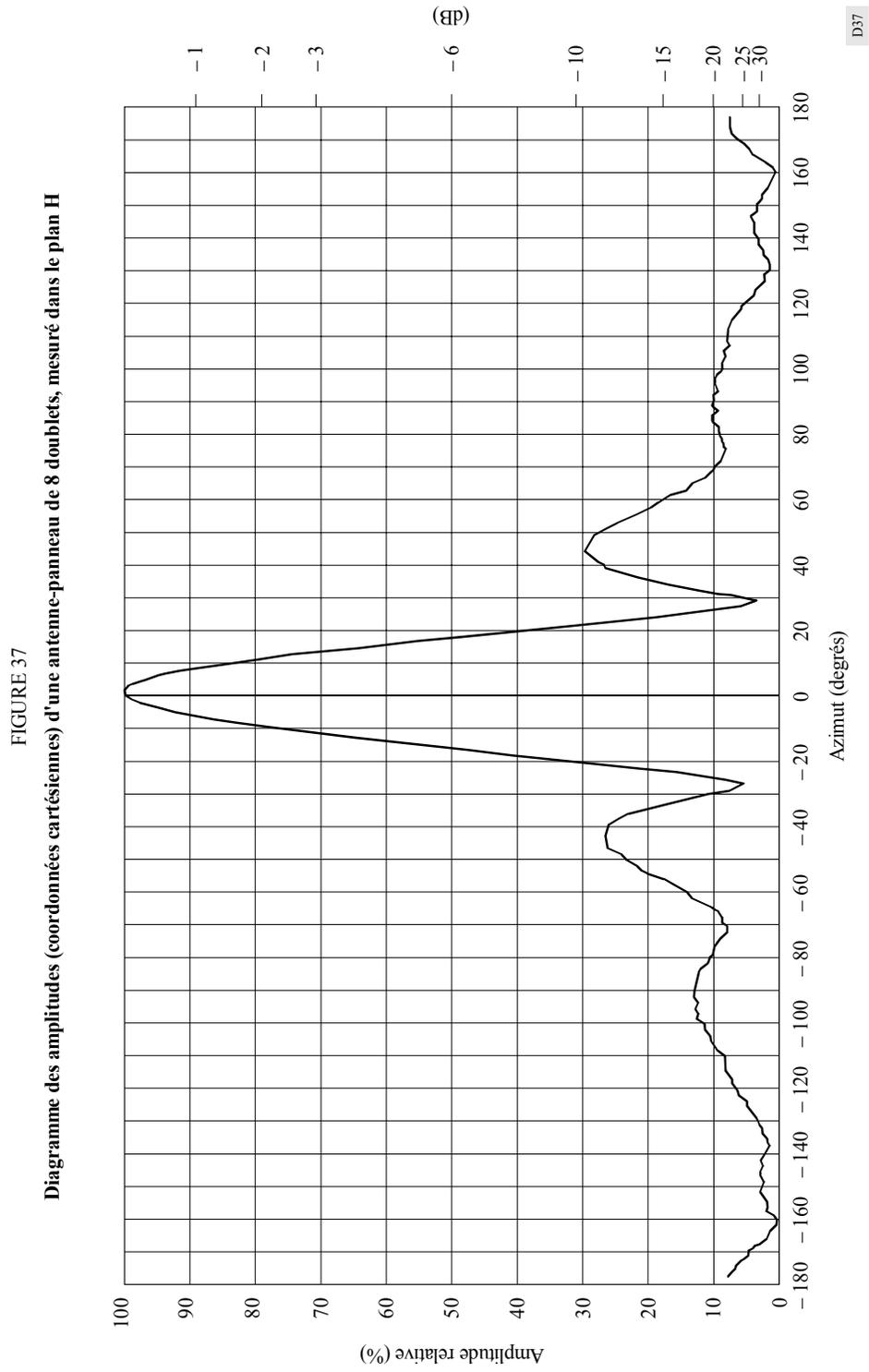
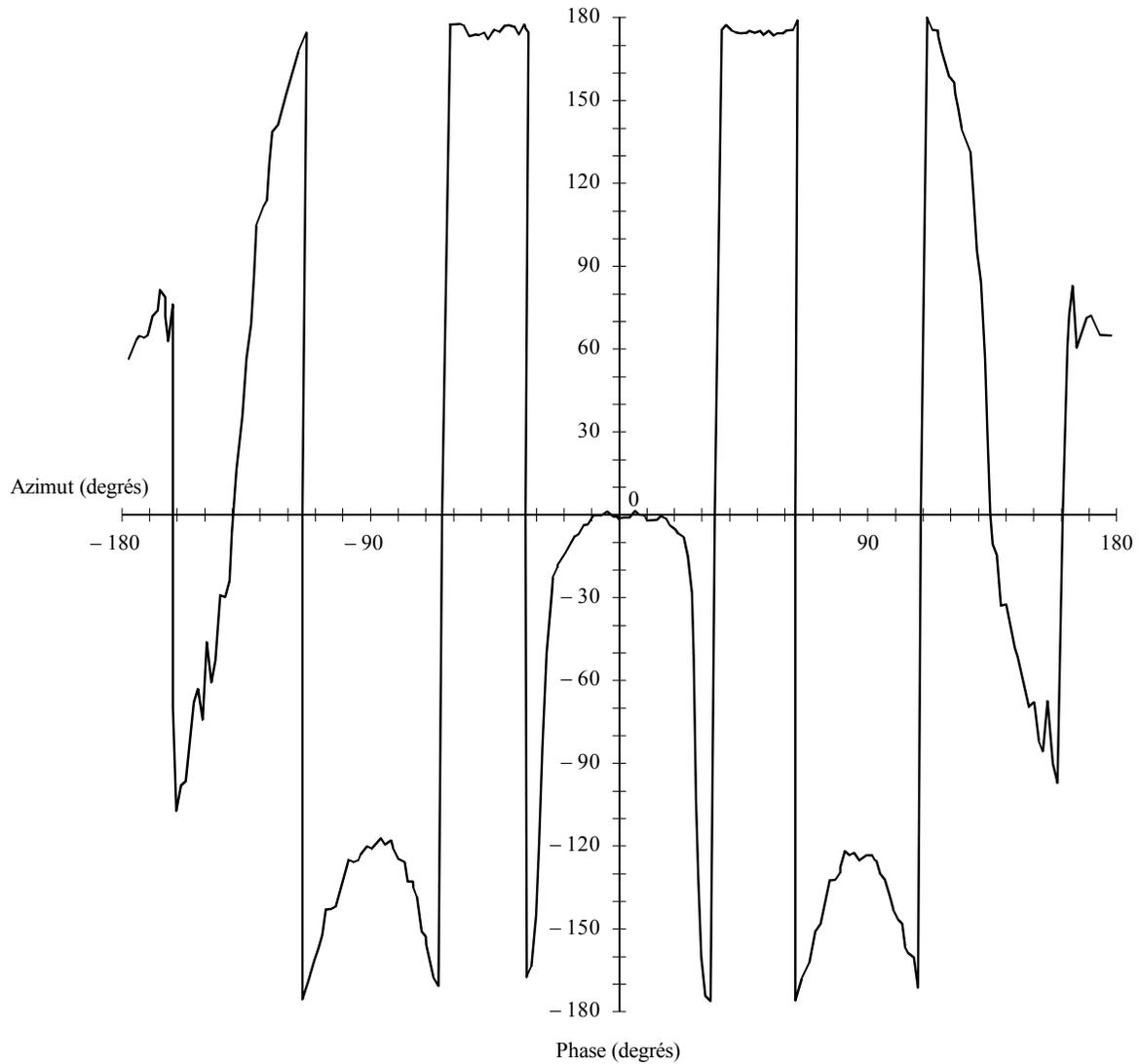


FIGURE 38

Diagramme des phases (coordonnées polaires) d'une antenne-panneau de 8 doublets, mesuré dans le plan H



D38

3.1.3 Méthode de l'antenne de référence

Dans cette méthode, on utilise une antenne de référence ayant des caractéristiques connues. L'antenne de référence est installée aussi près que possible de l'antenne à mesurer et reçoit un signal ayant, autant que possible, la même fréquence de fonctionnement. En comparant les champs (mesurés) produits par les deux antennes en un même point, on peut déterminer le diagramme de rayonnement de l'antenne à étudier. Ce procédé élimine par conséquent les effets que le terrain exerce sur le champ reçu.

3.2 Equipements de mesure

3.2.1 Equipement pour la mesure par sondage vertical

L'équipement ci-après est installé sur un fourgon spécialement aménagé, doté d'un générateur électrique indépendant:

- un mât télescopique pouvant coulisser jusqu'à la hauteur du premier maximum d'intensité du champ (voir aussi le § 3.3.1), relié par l'intermédiaire d'une interface appropriée à l'ordinateur qui enregistrera l'angle d'élévation et l'azimut de l'antenne de réception placée sur le mât;
- un récepteur d'essai approprié, ayant les caractéristiques suivantes:
 - grande dynamique,
 - bonne compatibilité électromagnétique,
 - robustesse et stabilité en présence de vibrations et de variations de la température,
- une antenne de réception, montée sur le mât,
- un système de localisation tel que le GPS (Global Positioning System),
- un ordinateur pilote, relié au système de localisation et à l'interface du mât, pour le traitement des données de mesure.

3.2.2 Equipement pour la mesure aéroporté

Le système de mesure des diagrammes de rayonnement peut comporter les éléments suivants:

- un récepteur d'essai (pouvant fonctionner en mode balayage), ayant les caractéristiques suivantes:
 - grande dynamique,
 - bonne compatibilité électromagnétique,
 - grande robustesse et excellente stabilité (en présence de vibrations et de variations de la température dans l'hélicoptère),
- une antenne de réception (sonde de mesure) montée de telle façon que l'influence de l'hélicoptère sur le diagramme de rayonnement de l'antenne réceptrice soit réduite à un minimum. On peut obtenir ce résultat avec un mât pouvant descendre jusqu'à 3 m, au moins en dessous de l'hélicoptère;
- un système de localisation tel que le GPS (Global Positioning System), composé d'un récepteur aéroporté, d'un récepteur au sol et d'un altimètre de précision;
- un ordinateur pilote aéroporté avec périphériques pour le traitement des données.

La Fig. 39 représente le schéma de principe de l'équipement.

Les récepteurs de référence au sol (GPS) ont pour fonction de réaliser un GPS différentiel de très haute précision. Il convient de signaler cependant que si le GPS est le système le plus performant pour déterminer les positions en vol, il existe d'autres systèmes donnant une précision satisfaisante qui peuvent être utilisés.

L'équipement de traitement de données se compose d'un ordinateur et d'un périphérique traceur de courbes.

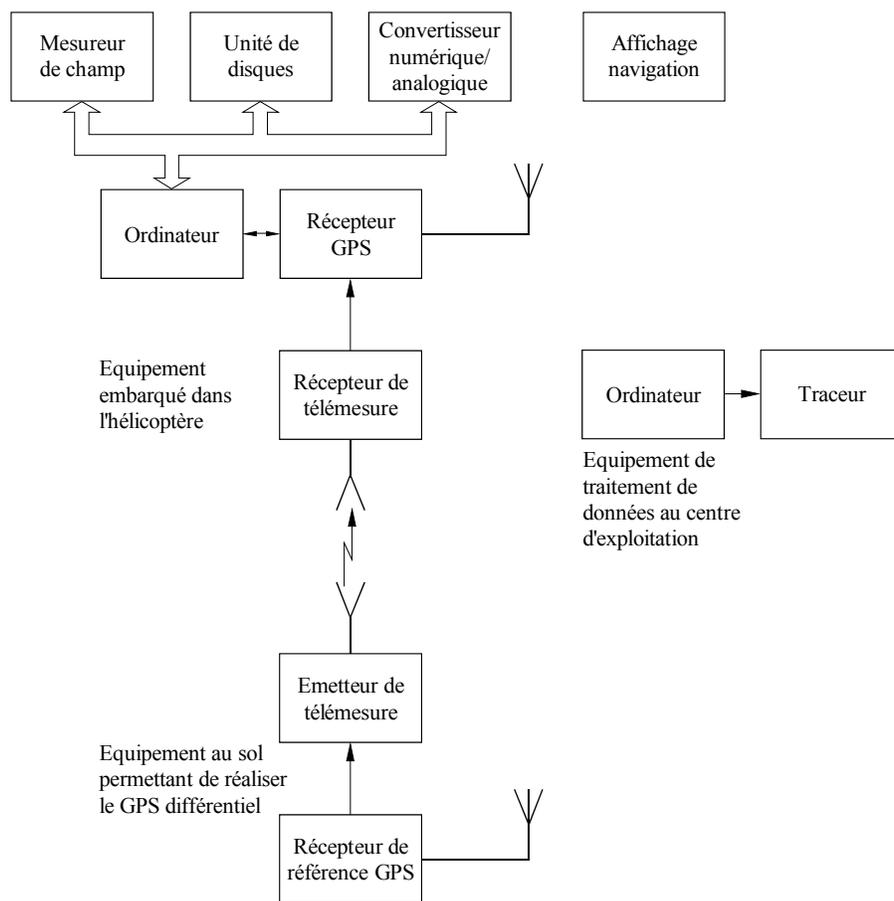
Côté émission, il faut une source de signaux donnant un niveau de sortie stable et étalonné. Cette source pourrait être un émetteur ordinaire.

3.2.3 Equipement pour la mesure avec antenne de référence

Cet équipement peut comporter les éléments suivants:

- un ou deux récepteurs d'essai, selon la procédure de mesure adoptée, ayant les caractéristiques suivantes:
 - grande dynamique,
 - grande compatibilité électromagnétique,
 - grande robustesse et grande stabilité (en présence de vibrations et de variations de la température dans le fourgon de mesure),
- une antenne de réception montée sur le toit du fourgon (antenne log-périodique ou antenne tourniquet, selon la procédure choisie);
- un ordinateur pilote avec périphérique de traitement de données installé dans le fourgon;
- un système de localisation;
- une antenne de référence avec diagramme de rayonnement étalonné;
- un mesureur de champ portatif alimenté par batterie.

FIGURE 39
Schéma de principe de l'équipement de mesure



D39

3.3 Procédure de mesure

3.3.1 Procédure pour la mesure par sondage vertical

Il faut appliquer tout d'abord une procédure d'entrée de données (données sur les antennes d'émission et de réception) avant de pouvoir faire effectivement les mesures.

Données à entrer pour l'antenne d'émission:

- nom et emplacement de la station d'émission,
- coordonnées géographiques,
- fréquence et polarisation de l'émission,
- p.a.r. maximale (dBK),
- hauteur de l'antenne au-dessus du niveau de la mer,
- diagramme vertical théorique (à corriger éventuellement par comparaison avec le diagramme mesuré).

Données à entrer pour l'antenne de réception:

- gain,
- affaiblissement du câble.

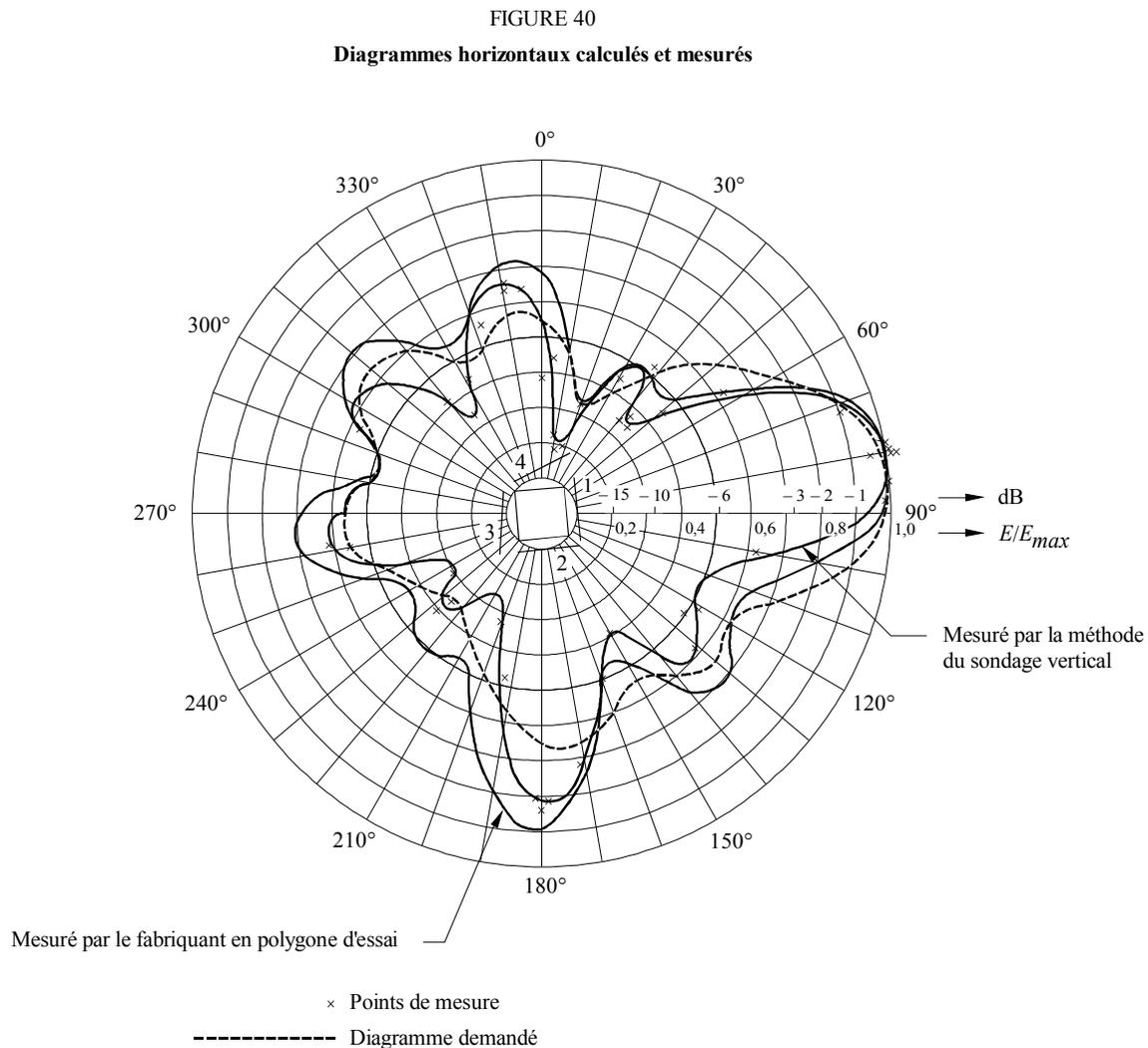
Une fois qu'un point de mesure adéquat a été choisi, on entre les données géographiques correspondantes, telles que: nom de l'emplacement, hauteur au-dessus du niveau de la mer et coordonnées correspondantes (acquises, éventuellement, à l'aide du GPS).

Ces données sont soumises à un traitement approprié qui donne la distance, l'azimut et la distance zénithale du point de mesure choisi par rapport à l'émetteur, ainsi que la valeur correspondante du diagramme de rayonnement vertical théorique des amplitudes relatives.

Après avoir orienté correctement l'antenne de réception dans la direction de l'émetteur, on fait coulisser le mât vers le haut et on mesure des échantillons de tension reçue à des intervalles verticaux réguliers (normalement 20 cm). Toutes ces valeurs de tension sont ensuite mises en mémoire et traitées pour donner le diagramme d'interférence type. Ce diagramme sera analysé ultérieurement pour le calcul du champ direct.

3.3.1.1 Traitement des données

On applique une procédure appropriée de validation des données d'entrée, après quoi les valeurs acceptées subissent un nouveau traitement qui donne une série de valeurs relatives E/E_{max} , où E_{max} désigne la valeur maximale mesurée pour le lobe principal. Ces données sont ensuite portées dans un diagramme polaire et comparées au diagramme vertical théorique (voir la Fig. 40).



D40

3.3.1.2 Mise en œuvre pratique de la méthode par sondage vertical

Avant de pouvoir effectuer les mesures proprement dites, il faut faire une analyse des abords immédiats de l'antenne, en se rappelant que tous les points de mesure doivent être choisis sur des routes carrossables pour le fourgon de mesure.

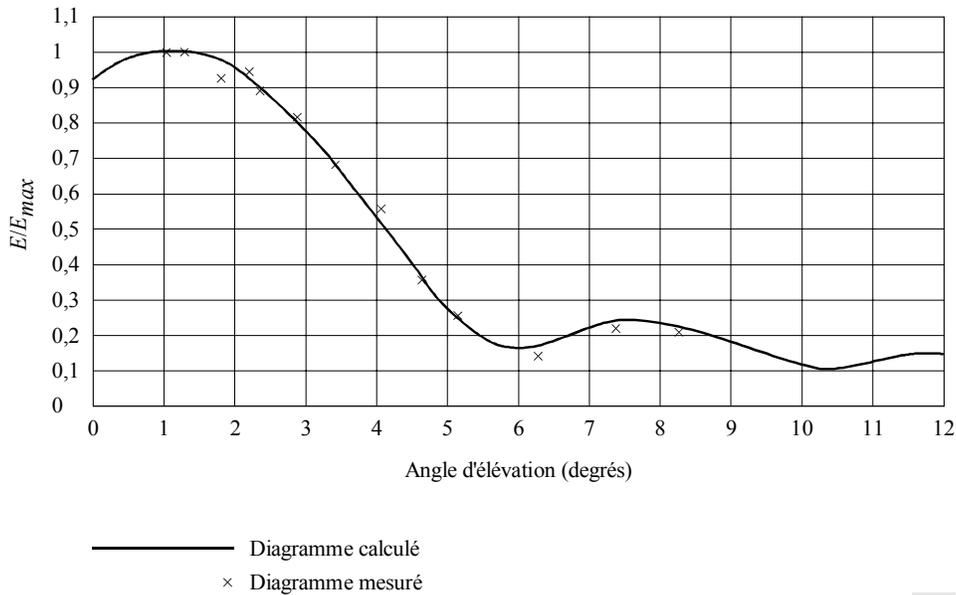
Il est recommandé d'établir une carte numérique du terrain sur la base d'une procédure informatique appropriée, pour déterminer le profil du terrain entre l'emplacement de l'antenne et le point de mesure. Ce profil permet de mieux évaluer les conditions de propagation en visibilité directe au point de mesure choisi depuis l'antenne d'émission.

Les valeurs mesurées du diagramme horizontal doivent être rapportées au maximum mesuré du diagramme vertical. C'est donc le diagramme vertical qui doit être déterminé en premier.

Un cas typique est le suivant: système d'antenne installé sur une structure support de section carrée, avec différentes antennes individuelles montées sur chaque côté du carré. Pour un tel dispositif, il faut effectuer une série de mesures différentes en des points choisis dans chaque secteur angulaire couvert par une antenne individuelle. Dans ce cas, on choisit un premier point convenable dans le secteur pertinent. On commence la mesure du diagramme vertical en ce point, afin d'obtenir un graphique montrant la variation relative du champ électromagnétique par rapport à son maximum. Le graphique de la Fig. 41 se rapporte à un cas typique, celui où l'antenne d'émission est installée au sommet d'une colline dominant la zone de service.

FIGURE 41

Diagrammes verticaux, calculé et mesuré



D41

La mesure du diagramme de rayonnement horizontal se fait après celle du diagramme vertical. Dans le diagramme d'interférence, le premier maximum du champ reçu se trouve à la hauteur $h = \lambda d/4H$ (voir le § 3.1.1); il faut par conséquent choisir avec soin la hauteur h du mât télescopique. La valeur exacte doit résulter d'un compromis approprié entre deux grandeurs: le maximum déterminé sur la base de considérations mécaniques et le minimum déterminé en fonction de l'angle d'inclinaison pouvant influencer sur le maximum auquel les valeurs relatives du diagramme vertical sont rapportées.

En B.m, il peut être difficile de trouver une bonne valeur de compromis. En effet, les variations du diagramme vertical peuvent influencer considérablement les mesures du diagramme horizontal.

De plus, dans les directions où la valeur mesurée résulte du rayonnement de deux antennes individuelles ayant des diagrammes verticaux différents, comme dans les directions diagonales, il n'est pas facile d'identifier la contribution prédominante. Dans des cas de ce genre, on pourrait adopter une solution consistant à choisir un point de mesure à une distance d où l'angle négatif donne à peu près la même valeur pour les deux diagrammes de rayonnement verticaux. De toute façon, l'évaluation du champ électromagnétique direct appartient en dernier ressort à l'opérateur: en examinant la forme du diagramme d'interférence, celui-ci devra rejeter les valeurs de mesure qui présentent des différences importantes par rapport à la fonction théorique.

3.3.2 Procédure pour la mesure par la méthode aéroportée

En règle générale, un ensemble de diagrammes de rayonnement mesurés se compose d'un diagramme de rayonnement horizontal ou HRP (Horizontal Radiation Pattern) mesuré à l'angle d'élevation du rayonnement maximum et de cinq diagrammes de rayonnement verticaux ou VRP (Vertical Radiation Patterns) mesurés sur chaque fréquence dans des directions déterminées et sous un angle d'élevation compris entre -15° et $+3^\circ$.

Les mesures proprement dites doivent être précédées d'une préparation réalisée avec soin. Il faut vérifier le bon fonctionnement de l'équipement aéroporté et de l'équipement au sol. Il faut, par ailleurs, que le générateur de signaux d'essai (ou l'émetteur normal) qui alimente l'antenne étudiée soit réglé à sa valeur de puissance étalonnée.

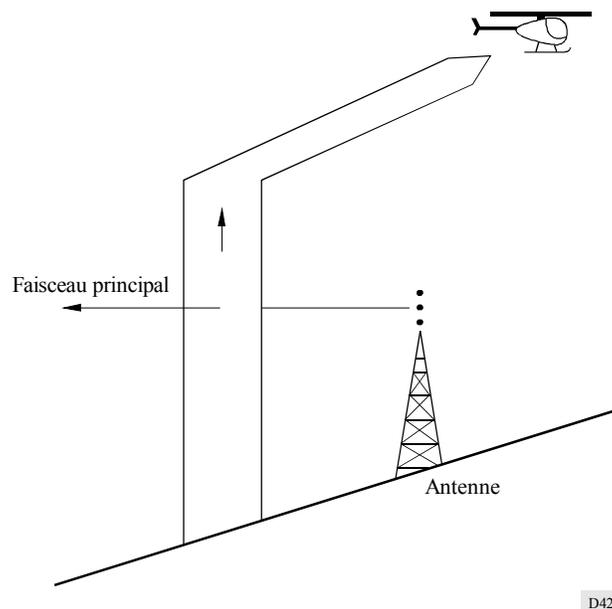
Après le décollage de l'aéronef, on vérifie le fonctionnement de l'équipement de détermination des positions (GPS). Si nécessaire, on détermine les coordonnées de l'antenne étudiée et on les introduit dans l'ordinateur pour servir d'origine du système de coordonnées de mesure.

Pendant le vol de mesure, l'hélicoptère doit suivre des itinéraires prédéterminés (voir ci-après). Les itinéraires effectifs sont enregistrés grâce aux données fournies par l'équipement GPS qui, moyennant un traitement informatique approprié, donne la position instantanée de l'hélicoptère par rapport à l'antenne étudiée. Cette information de position est aussi présentée en temps réel au pilote, qui peut ainsi maintenir le cap voulu.

Pour effectuer les mesures verticales, le pilote procède par une combinaison de vols ascensionnels et de vols d'approche. L'hélicoptère commence les mesures près du sol, à une distance appropriée, qui dépend du type de l'antenne étudiée. Il s'élève ensuite jusqu'à une altitude qui correspond à l'angle d'élévation maximal recherché. Si on désire obtenir la totalité du diagramme vertical, jusqu'au zénith, le pilote fera effectuer à l'hélicoptère un vol d'approche au-dessus de l'antenne après avoir atteint une altitude d'environ 1 000 m (20°) (voir la Fig. 42).

FIGURE 42

Trajectoire de vol dans le plan vertical



D42

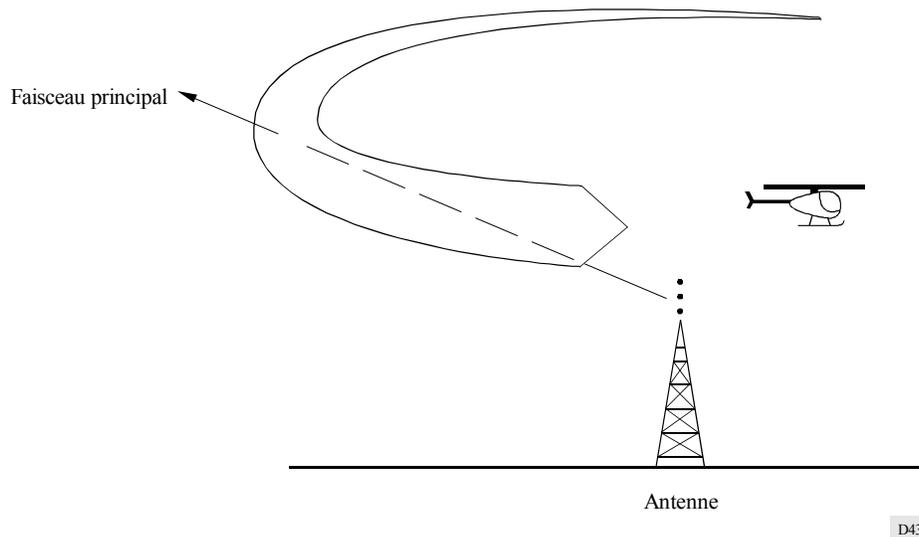
Les résultats des mesures verticales comprennent la valeur de l'angle d'élévation du gain maximal (maximum du lobe principal) pour lequel il faut mesurer le diagramme horizontal. A cet angle d'élévation, le pilote fait décrire à l'hélicoptère, autour de l'antenne, un cercle dont le rayon dépend du type de l'antenne étudiée (voir la Fig. 43). Dans cet itinéraire de vol, il est très important de maintenir avec précision l'angle d'élévation correct, car la compensation des écarts est difficile.

Il convient de déterminer les distances pour les mesures des diagrammes VRP et HRP, cela avant chaque mesure (voir le § 3.3.2.2).

Le champ reçu est mesuré par le récepteur d'essai embarqué (ou par le mesureur de champ). En même temps, l'ordinateur embarqué reçoit du GPS des informations de mise à jour de position. Les données de position sont ensuite utilisées pour convertir les niveaux (mesurés) du signal d'entrée en valeurs de champ pour une distance normalisée, compte tenu des caractéristiques de l'antenne de réception.

Le récepteur d'essai doit effectuer les mesures en mode de formation de moyennes: chaque échantillon de niveau du signal sera constitué par la moyenne des signaux reçus pendant un intervalle de temps de 100 ms, ce qui élimine les effets dus à la modulation. Ce récepteur doit pouvoir fonctionner en mode balayage, afin de permettre les mesures sur un minimum de trois fréquences pendant un même vol. Par ailleurs, le système de mesure doit permettre l'acquisition d'au moins deux échantillons par degré dans le plan horizontal et au moins cinq échantillons par degré dans le plan vertical. Ces échantillons seront mis en mémoire en même temps que les données de position qui leur correspondent.

FIGURE 43

Trajectoire de vol dans le plan horizontal

Les valeurs mesurées sont affichées sur un écran sous la forme d'un diagramme d'antenne. L'opérateur qui se trouve à bord peut ainsi vérifier le bon fonctionnement du système de mesure en cours de vol.

3.3.2.1 Traitement des données de mesure

Une fois les mesures aéroportées terminées, on procède à l'analyse des données de mesure ainsi qu'au calcul et au tracé des diagrammes. Dans cette analyse, les échantillons de valeurs du niveau des signaux sont convertis en valeurs de champ pour une distance normalisée, compte tenu des caractéristiques de l'antenne de réception et de l'information de position. Tous les échantillons manifestement erronés sont rejetés.

On calcule ensuite la p.a.r. dans une direction donnée, en fonction du champ et de la distance correspondante. En règle générale, les diagrammes tracés sont exprimés en valeurs relatives par rapport à la p.a.r. dans la direction du rayonnement maximal.

Le gain de l'antenne a pour expression:

$$G_d = \frac{p.a.r.}{P_{in}}$$

où P_{in} désigne la puissance injectée à l'antenne.

3.3.2.2 Conditions d'utilisation de la méthode aéroportée (hélicoptère)

Dans les mesures portant sur les antennes utilisées en B.m et B.dm, il faut réduire les effets dus au sol à un minimum.

La Fig. 44 montre comment il convient de choisir la distance de mesure pour réduire les réflexions à un minimum, pour une valeur donnée de la hauteur d'antenne. Avec des distances plus courtes, on aura des angles plus grands au point de réflexion, ce qui entraîne une diminution de l'énergie réfléchi. La distance choisie doit donc être aussi courte que possible, mais assez grande pour que l'on soit dans les conditions du champ lointain. Par ailleurs, l'antenne de réception doit être directive et orientable, de façon à toujours être pointée sur l'antenne étudiée.

La formule suivante est généralement utilisée pour calculer la distance de mesure minimale avec une précision suffisante pour que l'on soit dans les conditions du champ lointain:

$$d = \frac{2h^2}{\lambda}$$

où:

d : distance de mesure (m)

h : ouverture (m) de l'antenne

λ : longueur d'onde (m).

Dans la pratique, on adopte en général une distance de mesure type comprise entre 2 000 et 2 500 m.

La précision des résultats dépend de la qualité de fonctionnement de l'équipement utilisé pour mesurer le champ et déterminer les positions. Il faudra par conséquent choisir avec soin les éléments suivants:

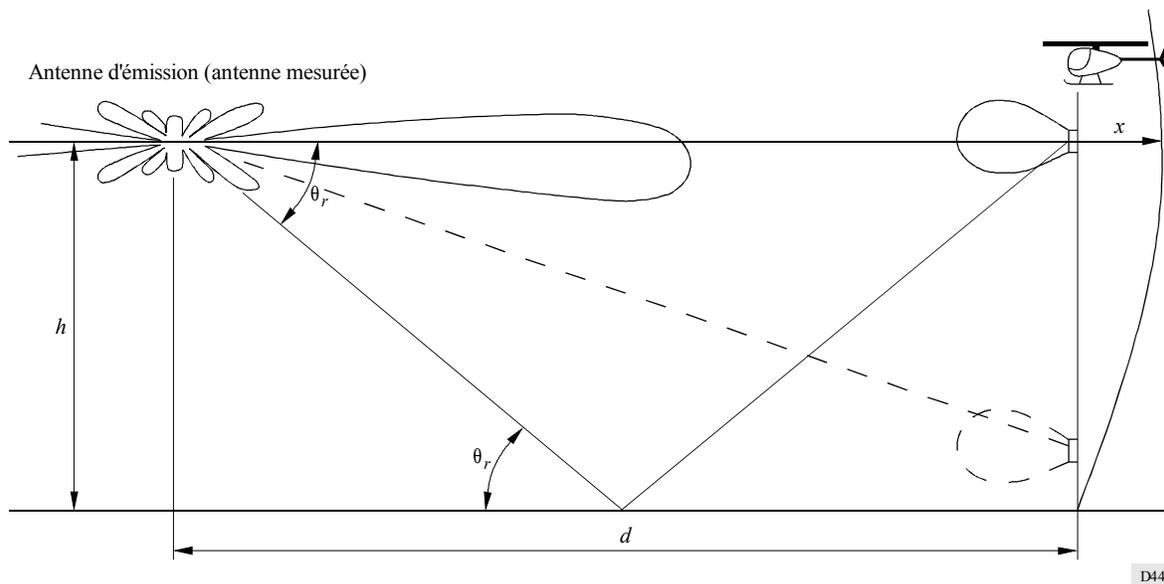
- les caractéristiques de l'antenne de réception et son montage sur l'hélicoptère;
- le récepteur d'essai (mesureur de champ), y compris les câbles;
- le système de détermination des positions utilisé pour obtenir les trois coordonnées vraies dans l'espace et pour aider le pilote.

En cas d'utilisation du système GPS, la position enregistrée de l'hélicoptère (deux dimensions) est entachée d'une erreur de l'ordre de 5 m. Cela correspond à une erreur inférieure à 0,5 dB sur la position.

Un problème délicat est le maintien d'une altitude correcte sur la trajectoire de vol horizontale. Lorsqu'on mesure une antenne B.dm à gain élevé, un écart angulaire vertical de $0,3^\circ$ (vu de l'antenne mesurée) peut entraîner une erreur de 0,5 dB. On en conclut qu'il sera plus difficile de maintenir l'altitude correcte aux petites distances. Si l'on veut obtenir une bonne fiabilité dans les mesures sur trajectoire de vol horizontale, il faut mesurer les diagrammes horizontaux (HRP) au moins deux fois pour avoir des résultats significatifs.

FIGURE 44

Représentation de la trajectoire de vol



D44

3.3.3 Procédure pour la mesure avec antenne de référence

Pour mesurer le diagramme vertical avec une antenne de référence, on commence aux maxima du diagramme horizontal. Pour mesurer le diagramme horizontal, on est obligé de commencer au maximum du diagramme vertical. Plusieurs facteurs d'environnement, par exemple une forêt ou une végétation épaisse, peuvent influencer les mesures effectuées avec un mesureur de champ ordinaire; ces facteurs peuvent induire des fluctuations du champ mesuré en fonction du temps. Si l'on veut obtenir des résultats significatifs, il faut si possible faire une intégration sur un intervalle de temps de quelques minutes.

Deux procédures de mesure différentes sont envisageables:

- mesures ponctuelles du champ avec un mesureur de champ et une antenne de mesure log-périodique placée à 50 cm au-dessus du sol;
- enregistrement continu simultané des deux champs à l'aide de deux mesureurs de champ reliés à un enregistreur approprié installé dans un fourgon de mesure. On utilise pour cela une antenne tourniquet de mesure typique de 0,7 m montée sur le toit du véhicule et placée à 3,2 m au-dessus du sol.

On obtient généralement de bons résultats en faisant des mesures de bout en bout au moyen d'une antenne de référence avec enregistrement continu du champ, même si l'émetteur n'est pas en position de visibilité directe.

Les mesures de distance exigent un certain temps pour la conversion et l'adaptation des valeurs de champ enregistrées au système de coordonnées choisi (c'est-à-dire pour déterminer l'angle d'élévation en fonction de la distance de l'émetteur et en fonction de la hauteur au-dessus du niveau de la mer). Par ailleurs, il peut s'avérer pratiquement impossible de maintenir une tolérance de $\pm 3^\circ$ dans la direction radiale à partir de l'émetteur lorsqu'on circule sur des routes carrossables pour le fourgon de mesure.

Les mesures ponctuelles sont de nature moins élaborée que les mesures de bout en bout; elles fournissent néanmoins des résultats comparables, mais seulement si la propagation se fait en visibilité directe et si le terrain est bien dégagé. Dans ces conditions, avec un mesureur de champ portatif de conception simple, alimenté par batterie, on peut se déplacer librement dans la zone de mesure sans être limité aux routes existantes et disponibles.

Comme la puissance rayonnée sous les petits angles d'élévation n'atteint pas le sol, il est possible généralement de choisir pour le point de mesure une distance qui permet d'obtenir un diagramme «propre». Certains points de mesure devront être rejetés pour cause de conditions de terrain défavorables (végétation ou site inaccessible), mais en général il est possible de déterminer la position et la profondeur des maxima avec une précision suffisante.

3.3.3.1 Traitement des données de mesure

Les courbes représentant les diagrammes mesurés pourraient être tracées sur la base des valeurs du champ enregistrées de façon continue ou ponctuellement.

Les diagrammes de rayonnement ainsi tracés sont des courbes absolues qui donnent la puissance apparente rayonnée (p.a.r.) en fonction de l'angle d'élévation, si l'on connaît la valeur exacte de la puissance rayonnée par le radiateur de référence.

Si l'on applique la méthode de mesure de bout en bout, avec une résolution en distance d'environ 200 m et égalisation selon la loi trinomiale basée sur des moyennes glissantes, les fluctuations erratiques se trouvent éliminées et la forme réelle du diagramme vertical apparaît clairement. On obtient une meilleure précision aux petits angles d'élévation qu'aux grands angles, car le nombre des valeurs de mesure recueillies est plus élevé. En conséquence, pour les angles d'élévation supérieurs à 3° , les mesures devraient être faites avec une résolution en distance inférieure à 200 m, ce qui permet d'obtenir un nombre suffisant de résultats.

L'expérience acquise avec les mesures de bout en bout sur fourgon a montré que si l'on veut obtenir des diagrammes fiables avec une antenne de référence, il faut recueillir un très grand nombre de valeurs de mesure. C'est à cette condition qu'on pourra faire une évaluation statistique convenable et réaliser un lissage satisfaisant du diagramme de rayonnement.

Dans certains cas, il se produit de fortes réflexions qui provoquent de grandes variations et rendent impossible l'obtention d'une valeur médiane stable. Le point de mesure ne présente alors aucune utilité. Ces points sont caractérisés par la présence de signaux réfléchis provenant de directions différentes qui ne correspondent pas à la direction de l'émetteur.

Pour chaque angle d'élévation, la distance entre les points de mesure successifs peut aller de quelques mètres jusqu'à environ 100 m, selon les conditions locales. Il importe par conséquent de déterminer l'angle d'élévation avec une tolérance inférieure à $+0,05^\circ$ et un azimut de l'ordre de $+2,5^\circ$.

L'évaluation des résultats de mesure, c'est-à-dire la détermination de la valeur médiane, de l'angle d'élévation correspondant et du tracé du diagramme, doit être effectuée à la position de mesure. C'est seulement ainsi qu'on pourra déterminer si les valeurs de mesure sont suffisantes pour tracer le diagramme ou si l'on doit trouver d'autres valeurs.

3.3.3.2 Conditions d'utilisation de la méthode avec antenne de référence

Il est recommandé de procéder avec prudence lorsqu'on détermine l'angle d'élévation du point de mesure par la distance et la hauteur relative de ce point. La distance par rapport à l'émetteur peut être déterminée avec précision grâce aux cartes géographiques, mais il en est rarement de même en ce qui concerne la hauteur au-dessus du niveau de la mer, surtout en terrain vallonné. Pour les petites distances entre le point de mesure et l'émetteur, les mesures peuvent être entachées de très grandes erreurs angulaires. On peut améliorer les choses en utilisant un altimètre barométrique. Si l'émetteur est en position de visibilité, il est possible de mesurer directement l'angle d'élévation avec un théodolite.

On peut aussi obtenir des informations supplémentaires à partir des résultats fournis par les procédures de mesure avec antenne de référence. En effet, les caractéristiques du rayonnement en espace libre ne sont pas les seules informations intéressantes; il est bon de connaître aussi l'amélioration que l'on obtient pour le champ reçu lorsqu'on utilise une antenne d'émission directive.

Ce gain accru, appelé parfois gain d'exploitation, indique l'augmentation de l'énergie reçue en un point de réception donné lorsqu'on met en œuvre une antenne plus directive que l'antenne de référence. Il a été démontré que la valeur médiane de l'affaiblissement d'exploitation diffère d'environ +1 dB par rapport au gain en espace libre et d'environ +2 dB sur un terrain irrégulier. Avec des antennes dont le point central est peu élevé, installées en zone montagneuse, on a un gain d'exploitation inférieur de plus de 2 dB au gain en espace libre.

Ainsi, les mesures avec radiateur de référence fournissent les caractéristiques de rayonnement des systèmes d'antenne d'émission, compte tenu des propriétés du terrain de la zone de mesure. A l'inverse des mesures effectuées avec un hélicoptère, on mesure ici le diagramme en espace libre.

3.4 Présentation des résultats

En prenant comme référence le plan azimutal et le plan zénithal, il est suggéré de présenter le diagramme d'amplitude horizontal en coordonnées polaires et le diagramme d'amplitude vertical en coordonnées cartésiennes.

4 Différences à prévoir, dans la pratique, entre les caractéristiques de fonctionnement calculées des antennes B.m et B.dm, et les caractéristiques mesurées sur le terrain

En comparant les diagrammes de rayonnement calculés et mesurés, il est possible de mettre en évidence l'influence de certains facteurs qui ne sont pas pris en compte dans le calcul. On trouvera ci-après des indications sur quelques facteurs importants.

4.1 Facteurs influant sur les caractéristiques de fonctionnement d'une antenne individuelle et sur celles d'un système d'antenne complet

4.1.1 Structure support

Les facteurs suivants influent sur les caractéristiques de fonctionnement d'un système d'antenne:

- le couplage mutuel entre les antennes individuelles fait varier l'amplitude et la phase de leur courant d'excitation. Le diagramme de rayonnement obtenu sera donc différent du diagramme calculé;
- il est probable que le treillis métallique portant la structure se comportera comme une antenne à fente parasite, surtout si les dimensions sont voisines des dimensions de la résonance;
- le décalage latéral est utile si l'on veut obtenir des caractéristiques de fonctionnement stables en ce qui concerne l'adaptation. Il faut cependant limiter ce décalage s'il exerce un effet d'écran à l'égard des antennes individuelles voisines;
- dans la majorité des antennes individuelles directives, le réflecteur a des dimensions limitées. De ce fait, la structure support placée derrière l'antenne individuelle se comportera elle aussi, dans une certaine mesure, comme un réflecteur secondaire.

Si on a un décalage sur le côté de la structure support, ce réflecteur secondaire sera asymétrique par rapport au radiateur, la conséquence étant l'obtention d'un diagramme oblique.

On a des effets similaires dans tous les cas de montage asymétrique sur un pylône;

- les caractéristiques de fonctionnement peuvent aussi être influencées par d'autres circonstances: montage d'autres systèmes d'antenne sur le même pylône, plates-formes, haubans, échelles, mauvais agencement des câbles feeders de distribution, etc. Il est généralement impossible de prévoir quelle sera cette influence.

4.1.2 Ouvrages importants voisins du pylône de l'antenne

Les facteurs influant sur les systèmes d'antenne peuvent être la conséquence de l'environnement naturel et des ouvrages construits par l'homme.

L'environnement influence la forme des diagrammes de façon permanente et uniforme, en fonction des caractéristiques naturelles du site.

De leur côté, les ouvrages proches du pylône d'antenne modifient le diagramme de rayonnement dans des directions particulières, selon la distance et les caractéristiques physiques de ces ouvrages. L'effet global peut être extrêmement important, suivant le nombre et la taille des ouvrages en question.

Ces facteurs peuvent agir différemment sur les caractéristiques de fonctionnement des antennes individuelles et des systèmes d'antenne plus complexes. Ces différences sont imputables aux effets de couplage, à l'affaiblissement et, en général, à la combinaison de ces deux phénomènes. Selon que l'influence de tel ou tel effet prédomine, on peut avoir des caractéristiques de fonctionnement nettement différentes en B.m et B.dm.

4.1.3 Facteurs climatiques

Le réchauffement d'origine solaire entraîne une déformation de la structure support par courbure et une variation de l'inclinaison de l'ensemble du faisceau.

Les antennes Yagi sont très sensibles aux effets du givrage. Dans les cas extrêmes, ce phénomène est capable d'inverser le rapport avant/arrière. Pour tous les types d'antenne, le givrage accroît les défauts d'adaptation d'impédance.

4.2 Comparaison entre les caractéristiques des antennes et les diagrammes de rayonnement calculés et mesurés

Les différences prévisibles entre les diagrammes de rayonnement calculés et mesurés peuvent aller de quelques dixièmes à quelques dizaines de décibels.

Ces différences peuvent être plus importantes notamment près des zéros des diagrammes et près des lobes latéraux. Quand il y a prédominance des effets de couplage, on peut prévoir des différences plus grandes en B.m qu'en B.dm. Au contraire, il faut prévoir des différences plus grandes en B.dm lorsque les effets d'affaiblissement prédominent. De plus, l'influence de ces variations dépend aussi du degré de complexité du système d'antenne.

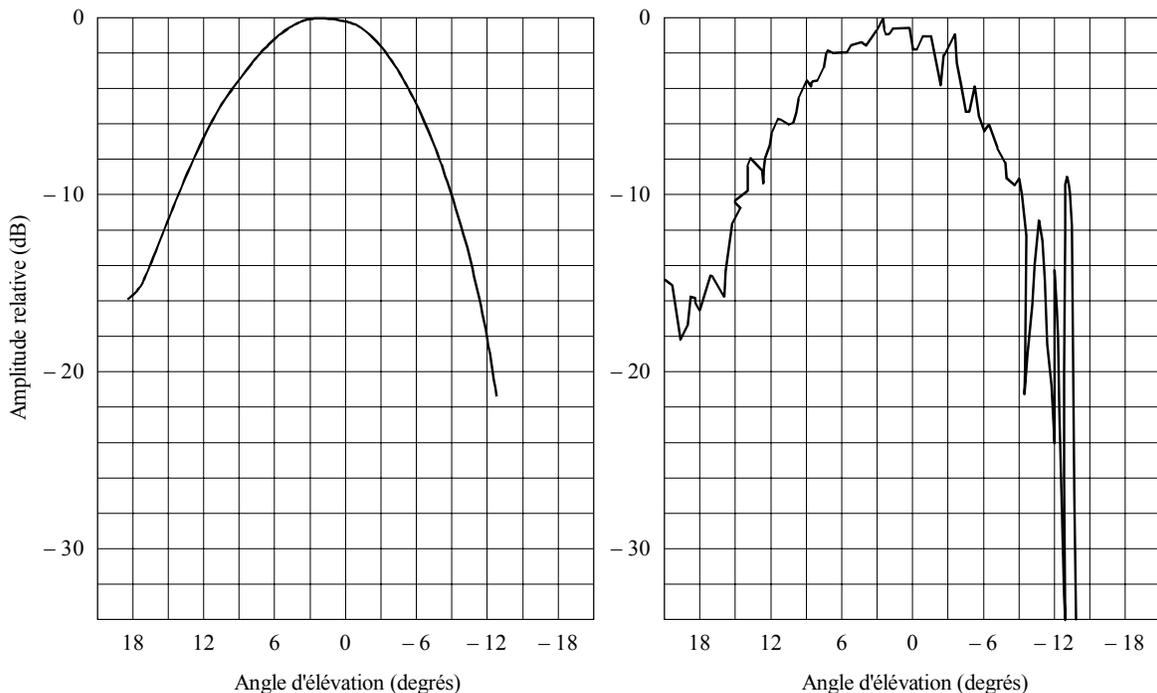
En règle générale, la différence entre les caractéristiques de fonctionnement calculées et mesurées est plus petite pour les éléments d'un système d'antennes individuelles, car il est facile d'ajuster les paramètres, aussi bien en B.m qu'en B.dm.

Dans le cas d'un système complexe, la différence est due principalement à l'effet combiné des montages mécaniques et électriques, ainsi qu'à l'environnement (structures avoisinantes). Par ailleurs, la présence de bâtiments peut être la cause de différences importantes, surtout près des minima; voir la Fig. 45.

Cette figure montre le diagramme calculé et le diagramme mesuré d'un système d'antenne panneau fonctionnant en B.m. L'écart est manifeste, par exemple, à un angle négatif d'environ 10°, où le calcul a donné 10 dB et la mesure une valeur d'environ 20 dB. La forme du diagramme est déterminée en grande mesure par les réflexions sur le sol et sur les toits.

FIGURE 45

Diagrammes verticaux, calculé et mesuré



a) Diagramme calculé

b) Diagramme mesuré

Logiciel pour le calcul des antennes de radiodiffusion B.m et B.dm

1 Introduction

On trouvera dans cette Partie 3 l'explication de la mise en œuvre pratique d'un programme d'ordinateur à utiliser pour calculer les diagrammes de rayonnement des systèmes d'antenne, sur la base des formules données dans le § 7.2 de la Partie 1.

L'Appendice 1 de la Partie 3 énumère les programmes de base à utiliser dans un progiciel pouvant être adapté aux besoins particuliers de l'utilisateur, par exemple pour la planification des fréquences, la conception des systèmes d'antenne, etc.

Le matériel nécessaire dépend en grande partie de l'application informatique. Celle-ci peut influencer la mise en œuvre du matériel minimum, qui peut aller de simples calculateurs de poche programmables jusqu'aux grands ordinateurs utilisés pour la gestion du spectre.

2 Architecture du programme

Pour pouvoir appliquer les formules données au § 7.2 de la Partie 1 afin de calculer le diagramme de rayonnement d'un système d'antenne, on a besoin de connaître un certain nombre de paramètres d'entrée qui définissent de façon appropriée les conditions du calcul. Ces paramètres peuvent être de nature générale, par exemple:

- fréquence de la porteuse image (télévision) ou fréquence du canal (modulation de fréquence),
- fréquence centrale de la bande de fonctionnement du système d'antenne,
- nombre d'antennes individuelles constituant le système et types de ces antennes,
- section transversale du pylône et longueur des côtés de cette section,

d'autres paramètres peuvent être propres à chaque antenne individuelle, par exemple:

- pourcentage de la puissance d'émission appliquée,
- phase de la tension d'alimentation,
- angle d'inclinaison,
- décalage par rapport au côté du pylône,
- espacement vertical des éléments

Une fois que l'on connaît le type des antennes individuelles choisies pour constituer le système, on peut en déduire leurs diagrammes de rayonnement en amplitude et en phase.

Ces diagrammes devront être mémorisés au préalable par un programme d'entrée spécifique du progiciel, dont la tâche est la suivante: créer un fichier adéquat qui donnera une représentation numérisée des diagrammes de rayonnement (amplitude et phase) des antennes individuelles sélectionnées. Ce programme simple devrait permettre d'introduire les valeurs des amplitudes et des phases des diagrammes de rayonnement horizontal et vertical (au gain maximum, voir le § 6.3) indiqués par le constructeur, avec la résolution angulaire souhaitée. Ensuite, on appliquera une interpolation appropriée pour déterminer les valeurs des diagrammes de rayonnement dans des directions autres que celles considérées dans le processus d'échantillonnage.

Moyennant une transformation convenable, tous les paramètres précités peuvent définir l'entrée nécessaire pour le programme fondamental de calcul des diagrammes (voir l'Appendice 1). La donnée de sortie de ce programme est la valeur de la p.a.r. dans la direction angulaire considérée, spécifiée par les angles d'azimut et d'élévation.

APPENDICE 1
DE LA PARTIE 3

Sous-programme de base pour le calcul des diagrammes d'antenne

1 Introduction

Une des fonctions disponibles dans la procédure permet de calculer le diagramme de rayonnement d'un système d'antenne composé de sources rayonnantes élémentaires disposées arbitrairement dans un espace à trois dimensions.

Dans le présent Appendice, on analysera les aspects théoriques et les modalités de mise en œuvre de cette fonction.

Les informations d'entrée nécessaires sont les suivantes:

- les diagrammes horizontal et vertical de chaque source élémentaire entrant dans la composition du système d'antenne,
- la description géométrique du système d'antenne: position et axe de visée de chaque source élémentaire,
- la spécification de la puissance d'alimentation de chaque source.

Les informations pouvant être obtenues à la sortie sont les suivantes:

- les diagrammes de rayonnement horizontaux à un angle d'élévation quelconque,
- les diagrammes de rayonnement verticaux dans un azimut quelconque,
- le gain du système d'antenne.

Par ailleurs, une représentation graphique permet de superposer certaines parties d'un diagramme de rayonnement à trois dimensions. On peut ainsi comparer immédiatement les parties d'un diagramme correspondant à différentes directions dans l'espace.

On trouvera ci-après les considérations théoriques qui sont à la base de calcul des diagrammes de rayonnement. Ces considérations seront ensuite traduites en un langage de programmation évolué.

2 Considérations théoriques fondamentales

Considérons N sources rayonnantes dans un système de coordonnées cartésiennes x-y-z (voir la Fig. 46) où:

- le plan x-y est le plan horizontal,
- l'axe des y donne la direction du Nord dans le plan horizontal,
- l'axe des z correspond à la verticale locale.

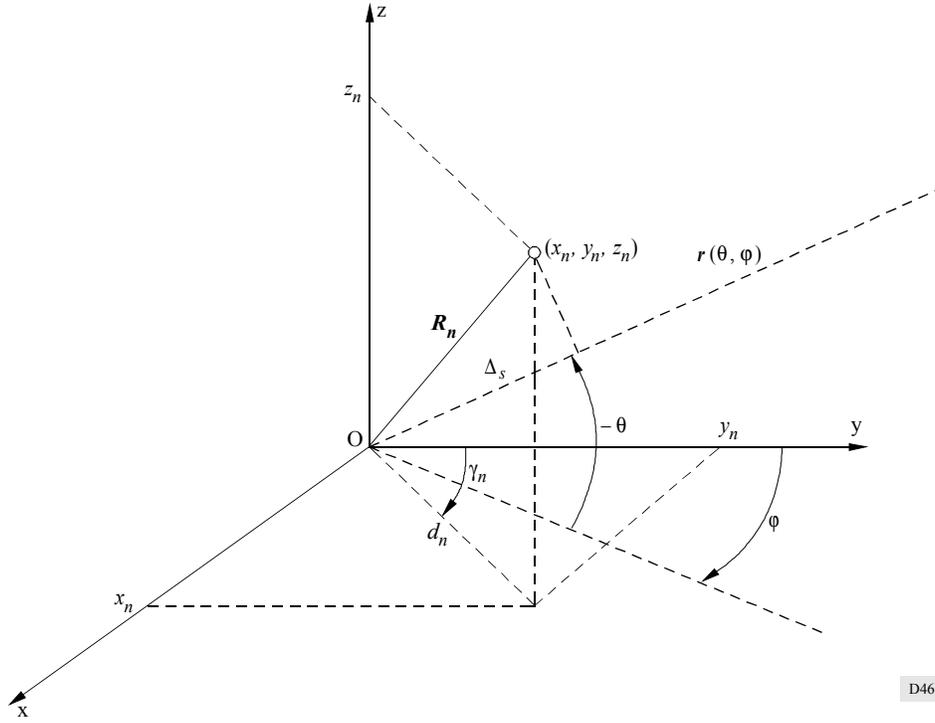
La position de la n^e source rayonnante est définie par ses coordonnées cartésiennes (x_n, y_n, z_n) ou par le vecteur de position:

$$\mathbf{R}_n = x_n \mathbf{x}_0 + y_n \mathbf{y}_0 + z_n \mathbf{z}_0 \quad (32)$$

La position de la n^e source peut aussi être définie en coordonnées cylindriques (d_n, γ_n, h_n) , celles-ci étant reliées aux coordonnées cartésiennes correspondantes (x_n, y_n, z_n) par les relations suivantes (voir la Fig. 46):

$$\begin{aligned} x_n &= d_n \sin \gamma_n \\ y_n &= d_n \cos \gamma_n \\ z_n &= h_n \end{aligned} \quad (33)$$

FIGURE 46



D46

Le gain en tension qui résulte de la composition des champs électromagnétiques de n sources rayonnantes dans la direction d'observation (θ, φ) a pour expression:

$$G_{Vtot}(\theta, \varphi) = \left| \sum_n \sqrt{a_n} G_{Vn}(\theta, \varphi) e^{j\Delta\Psi_n(\theta, \varphi)} \right| \quad (34)$$

où a_n est le pourcentage de puissance alimentant le n^e radiateur et $G_{Vn}(\theta, \varphi)$ son gain en tension dans la direction (θ, φ) ; ce gain peut être déduit des diagrammes horizontal et vertical de la n^e source, compte tenu de l'axe de visée de cette source et de la rotation autour de cet axe.

Considérons la phase du vecteur dans la somme de l'expression (34). La différence de phase totale (rad) de la n^e source dans la direction d'observation est:

$$\Delta\Psi_n(\theta, \varphi) = \Delta\Psi_{n\ pos}(\theta, \varphi) + \Delta\Psi_{n\ diag}(\theta, \varphi) + \Delta\Psi_{n\ el} \quad (35)$$

où $\Delta\Psi_{n\ pos}(\theta, \varphi)$ représente la différence de phase en position (rad) de la n^e source dans la direction d'observation par rapport à une source placée à l'origine du système de coordonnées (voir la Fig. 46). Ce terme s'explique comme suit:

$$\Delta\Psi_{n\ pos}(\theta, \varphi) = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta s \quad (36)$$

où:

$$\Delta s = (\mathbf{R}_n \cdot \mathbf{r})$$

\mathbf{R}_n étant donné par la formule (32) et \mathbf{r} pouvant s'exprimer comme suit:

$$\mathbf{r} = \cos \theta \sin \varphi \mathbf{x}_0 + \cos \theta \cos \varphi \mathbf{y}_0 - \sin \theta \mathbf{z}_0 \quad (37)$$

compte tenu du fait que la coordonnée θ est positive dans le demi-espace $z < 0$.

En développant le produit scalaire, on obtient la différence de phase en position de la n^e source:

$$\Delta\Psi_{n\ pos}(\theta, \varphi) = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\cos \theta \sin \varphi x_n + \cos \theta \cos \varphi y_n - \sin \theta z_n \right) \quad (38)$$

Si on exprime la position de la n^e source en coordonnées cylindriques (d_n, γ_n, h_n) (voir la formule (33)), la formule (38) devient:

$$\Delta\Psi_{n\ pos}(\theta, \varphi) = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\cos \theta \sin \varphi d_n \sin \gamma_n + \cos \theta \cos \varphi d_n \cos \gamma_n - \sin \theta h_n \right) \quad (39)$$

soit:

$$\Delta\Psi_{n\ pos}(\theta, \varphi) = \frac{2\pi}{\lambda} \left[\cos \theta \cos(\gamma_n - \varphi) d_n - h_n \sin \theta \right] \quad (40)$$

Dans l'expression (35), $\Delta\Psi_{n\ diag}(\theta, \varphi)$ représente la différence de phase (rad), dans le diagramme des phases, de la n^e source dans la direction (θ, φ) et $\Delta\Psi_{n\ el}$ représente la différence de phase d'alimentation de la n^e source, qui est indépendante de la direction d'observation (θ, φ).

En développant l'expression (34), on obtient:

$$\begin{aligned} G_{Vtot}(\theta, \varphi) &= \left| \sum_n \sqrt{a_n} G_{Vn}(\theta, \varphi) \cos \Delta\Psi_n(\theta, \varphi) + j \sum_n \sqrt{a_n} G_{Vn}(\theta, \varphi) \sin \Delta\Psi_n(\theta, \varphi) \right| = \\ &= \sqrt{\left(\sum_n \sqrt{a_n} G_{Vn}(\theta, \varphi) \cos \Delta\Psi_n(\theta, \varphi) \right)^2 + \left(\sum_n \sqrt{a_n} G_{Vn}(\theta, \varphi) \sin \Delta\Psi_n(\theta, \varphi) \right)^2} \quad (41) \end{aligned}$$

3 Réalisation du logiciel de calcul

Pour plus de souplesse, la procédure a été mise en œuvre avec une structure modulaire et la traduction en langage de programmation évolué a été faite en langage C.

On trouvera dans les paragraphes suivants le module relatif à la fonction $G_{Vtot}(\theta, \varphi)$ ainsi que toutes les autres fonctions mises en jeu par ce module. Ces fonctions sont utilisées pour calculer le gain en tension total du système d'antenne constitué par toutes les n sources rayonnantes, dans la direction d'observation (θ, φ).

3.1 Variables globales

Ci-après la liste des variables globales utilisées par le module décrit plus loin, avec une brève description de la grandeur représentée par chaque variable.

| | |
|--------------------------|---|
| NUMS: | nombre de sources rayonnantes |
| TIPO[n]: | type de la n^e source rayonnante, si toutes les sources sont du même type, TIPO[n]=1 pour tous les n |
| DIAG_AMPH[]: | vecteur contenant le gain en tension, normalisé par rapport au maximum, dans le plan horizontal, par échelons de 1° |
| AMPV_FRONT[]: | vecteur contenant le gain en tension, normalisé par rapport au maximum, dans la partie avant du plan vertical, par échelons de 1° |
| AMPV_BACK[]: | vecteur contenant le gain en tension, normalisé par rapport au maximum, dans la partie arrière du plan vertical, par échelons de 1° |
| GVMAX[n]: | gain en tension maximum de la n^e source |
| LAMBDA_LAV: | longueur d'onde (cm) |
| FI_O[n],TETA_O[n]: | azimut et site, (rad), de l'axe de visée de la n^e source rayonnante |
| RIB[n]: | valeur de l'angle de rotation (degrés) de la n^e source par rapport à son axe de visée |
| POSX[n],POSY[n],POSZ[n]: | coordonnées cartésiennes de la position de la n^e source (voir la Fig. 46) |
| FASE_EL[n]: | angle de phase d'alimentation de la n^e source (rad) |
| A[n]: | pourcentage de puissance alimentant la n^e source |

3.2 Fonctions de calcul

3.2.1 Fonction DIAG

Cette fonction calcule le gain en tension de «NUMS» sources rayonnantes dans la direction d'observation (FI, TETA). Elle correspond au terme $G_{V_{tot}}$ (φ , θ), spécifié dans les considérations théoriques.

```
float DIAG(fi,teta)
double fi ,teta;          /* coordonnées polaires (azimut, site) de la direction
                           d'observation, exprimées en radians */ /*indicateur de source
                           rayonnante */

{
  int n;
  double fase_tot;
  double aux0,reale,imag,aux;
  float amp_rad();
  double fase_rad();
  double fase_pos();
  double faseaux;
  reale=0.0;
  imag=0.0;
  for (n=0; n<NUMS;n++)
    {
      fase_tot = fase_rad (fi,teta,n) + fase_pos (fi,teta,n) + fase_el [n];
      aux0 = sqrt(a[n]) * amp_rad (fi,teta,n);
      reale = reale + aux0 * cos(fase_tot);
      imag = imag + aux0 * sin(fase_tot);
    }
  aux = sqrt((reale*reale)+(imag*imag));
  return(aux);
}
```

3.2.2 Fonction AMP_RAD

Cette fonction calcule le gain en tension, dans la direction d'observation (FI, TETA), de la n^e source, compte tenu de son diagramme d'amplitude horizontal (DIAG_AMPH[]), de son diagramme d'amplitude vertical dans la partie avant (AMPV_FRONT[]) et dans la partie arrière (AMPV_BACK[]), de la direction et de la rotation de la source. Cette fonction correspond au terme G_{Vn} (φ , θ) spécifié dans les considérations théoriques.

```
float AMP_RAD(fi,teta,n)
double fi ,teta;          /* coordonnées polaires (azimut, site) de la direction
                           d'observation, exprimées en radians */
int n;                    /* indicateur de source rayonnante */
{
  double f2,t2;
  int m;
  int az,abb1,abb2;
  float aux;
  double abb;
  float ampv1,ampv2,ampv;
  m = tipo[n];
  RUOTA_RIB(n,fi,teta,&f2,&t2);
  az = (180./PI)*f2;
  abb = (180./PI)*t2;
  abb1 = abb;
  if (abb1 < 0)
    abb1 += 360;
  abb2 = abb1 + 1;
  if (az1 < 0)
    az1 += 360;
```

```

if ((abb1==90)||((abb1==90)))
    az1 = 0;
/* gain de tension de la ne source dans la direction (φ, θ) */
if ((az > 90) && (az < 270))
{
/* interpolation de la valeur du diagramme d'amplitude vertical arrière */
    ampv1 = ampv_back[m][abb1+90];
    ampv2 = ampv_back[m][abb2+90];
    ampv = ampv1 + (ampv2-ampv1)*(abb-abb1);
    aux = gvmax[m]*diag_amph[m][az]*ampv;
}
else
{
/* interpolation de la valeur du diagramme d'amplitude vertical avant */
    ampv1 = ampv_front[m][abb1+90];
    ampv2 = ampv_front[m][abb2+90];
    ampv = ampv1 + (ampv2-ampv1)*(abb-abb1);
    aux = gvmax[m]*diag_amph[m][az]*ampv;
}
return(aux);
}

```

3.2.3 Fonction FASE_RAD

Cette fonction calcule la phase (rad) du champ, dans la direction d'observation (FI,TETA), de la n^e source rayonnante, compte tenu de son diagramme de phase horizontal (DIAG_FASE[]), de son diagramme de phase vertical dans la partie avant (FASEV_FRONT[]), et dans la partie arrière (FASEV_BACK []), de la direction et de la rotation de la source.

```

double FASE_RAD(fi,teta,n)
    double fi ,teta;          /* coordonnées polaires (azimut, site) de la direction
                               d'observation, exprimées en radians */
    int n;                    /* indicateur de source rayonnante
    {
        double f2,t2;
        int m,az,abb1,abb2;
        double aux,aux1,aux2,aux3,aux4;
        double abb;
        double fasev1,fasev2,fasev;
        m = tipo[n];

/* calcul de la direction (F2, T2) où lire le diagramme de la ne source pour prendre en
compte son axe de visée fi_o[n], teta_o[n] et sa rotation de rib[n] degrés autour de cette
direction */
        RUOTA_RIB(n,fi,teta,&f2,&t2);
        az = (180./PI)*f2;
        abb = (180./PI)*t2;
        abb1 = abb;
        if (abb1 < 0)
            abb1 += 360;
        abb2 = abb1 + 1;
        if (az1 < 0)
            az1 += 360;
        if ((abb1==90)||((abb1==90)))
            az1 = 0;
        aux1 = diag_faseh[m][0];
        aux2 = diag_faseh[m][180];
        aux3 = fasev_front[m][90];
        aux4 = fasev_back[m][90];

```

```

/* diagramme de phase de la ne source dans la direction (φ,θ) */
if ((az1 > 90) && (az1 < 270))
{
/* interpolation de la valeur du diagramme de phase vertical arrière */
fasev1 = fasev_back[m][abb1+90];
fasev2 = fasev_back[m][abb2+90];
fasev = fasev1 + (fasev2-fasev1)*(abb-abb1);
aux = (diag_faseh[m][az]-aux2) * cos(t2) + (fasev - aux4) + aux2 - aux1 ;
}
else
{
/* interpolation de la valeur du diagramme de phase vertical avant */
fasev1 = fasev_front[m][abb1+90];
fasev2 = fasev_front[m][abb2+90];
fasev = fasev1 + (fasev2-fasev1)*(abb-abb1);
aux = (diag_faseh[m][az]-aux2) * cos(t2) + (fasev - aux4) + aux2 - aux1 ;
}
aux *= (PI/180.);
return(aux);
}

RUOTA_RIB (n,fi,teta,fout,tout)
double fi ,teta;          /* coordonnées polaires (azimut, site) de la direction
                          d'observation, exprimées en radians */
int n;                   /* indicateur de source rayonnante */
double *fout,*tout;     /* coordonnées polaires (azimut, site) de la direction
                          où lire le diagramme de la ne source pour prendre en compte
                          son axe de visée et sa rotation */

{
float aux;
double trib,fin,tin,arg;
double faux,taux,tgnum,tgden;
int az1,abb1;
/* axe de visée (fi_o[n],teta_o[n]) de la ne source rayonnante */
tgnum= cos(teta)*sin(fi-fi_o[n]);
tgden= ( cos(teta)*cos(teta_o[n])*cos(fi-fi_o[n]) + sin(teta)*sin(teta_o[n]) );
fin = atan2(tgnum,tgden);
tin = asin( -cos(teta)*sin(teta_o[n])*cos(fi-fi_o[n]) + sin(teta)*cos(teta_o[n]) );
/* rib[n] degrés, rotation continue de la ne source */
if (rib[n] != 0)
{
trib = (double) (PI/180.)*rib[n];
faux = atan2( cos(trib)*cos(tin)*sin(fin) - sin(trib)*sin(tin) , cos(tin)*cos(fin) );
arg = sin(trib)*cos(tin)*sin(fin) + cos(trib)*sin(tin);
if (arg >= 1)
arg = 1.0;
if (arg <= -1)
arg = -1.0;
taux = asin(arg );
}
else
{
faux = fin;
taux = tin;
}
if (faux>0)
faux += 0.01;
else
faux -= 0.01;
}

```

```

if (taux>0)
    taux += 0.01;
else
    taux -= 0.01;
(*fout) = faux;
(*tout) = taux;
}

```

3.2.4 Fonction FASE_POS

Cette fonction calcule la différence de phase, dans la direction d'observation (φ , θ), de la n^e source rayonnante placée en (x_n, y_n, z_n) (voir la Fig. 46).

```

double FASE_POS (fi,teta,n)
double fi ,teta;          /* coordonnées polaires (azimut, site) de la direction
                           d'observation, exprimées en radians */
int n;                   /* indicateur de source rayonnante */
{
    double aux;
    double deltas;
    deltas = cos(teta)*sin(fi)*posx[n] + cos(teta)*cos(fi)*posy[n] - sin(teta)*posz[n] ;
    aux = (2*PI/lambda_lav) * deltas;
    return(aux);
}

```
