

LES ANTENNES

Jacques PEZZANI & Philippe PICARD

Les antennes

Définition :

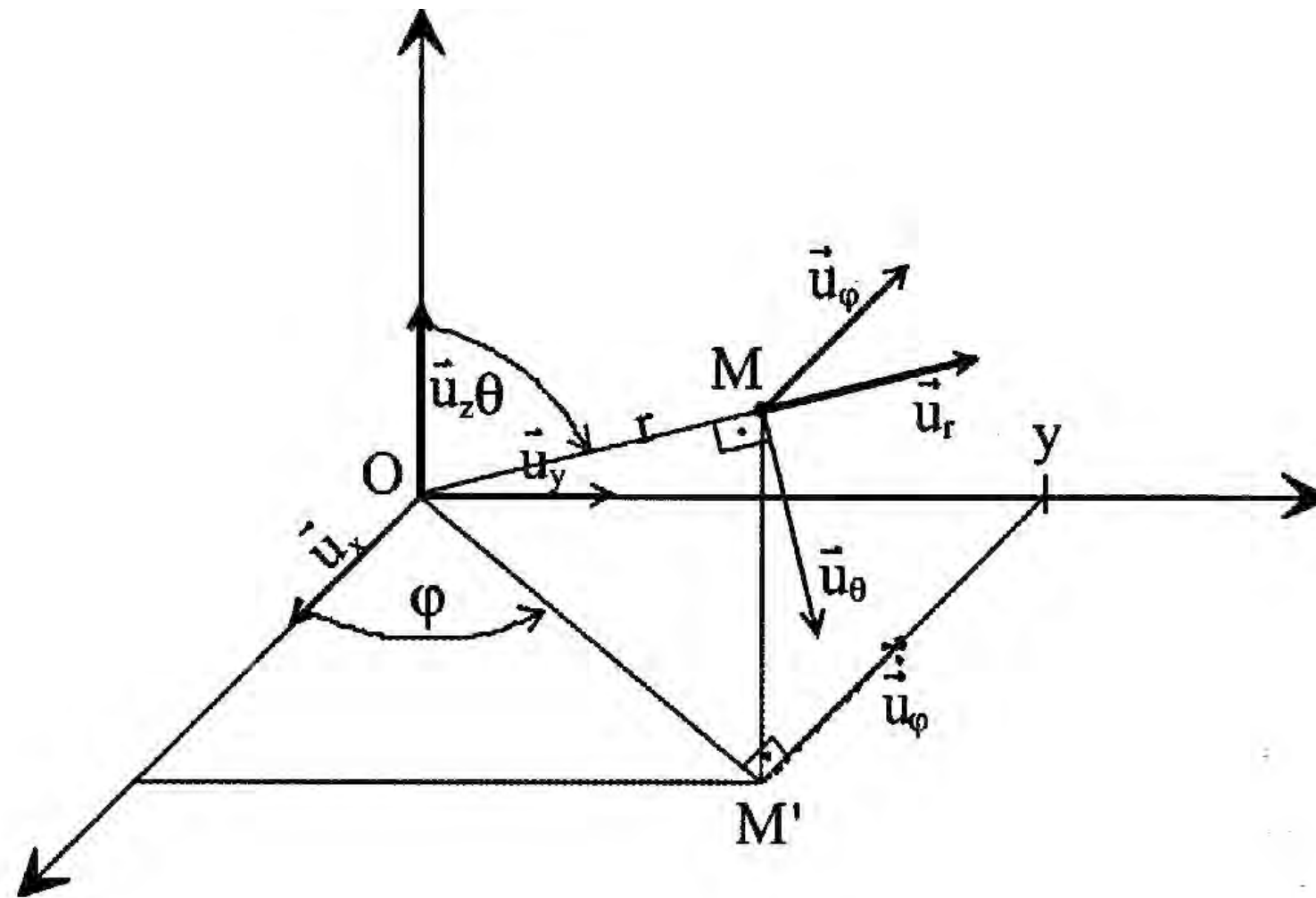
Une antenne est un dispositif qui assure la transmission de l'énergie entre une onde se propageant dans l'espace libre et une ligne de transport de puissance.

Théorème de réciprocité appliqué aux antennes (théorème de Carson)

Les propriétés d'une antenne peuvent être indifféremment utilisées, définies et évaluées en émission ou en réception.

Systeme de coordonnees

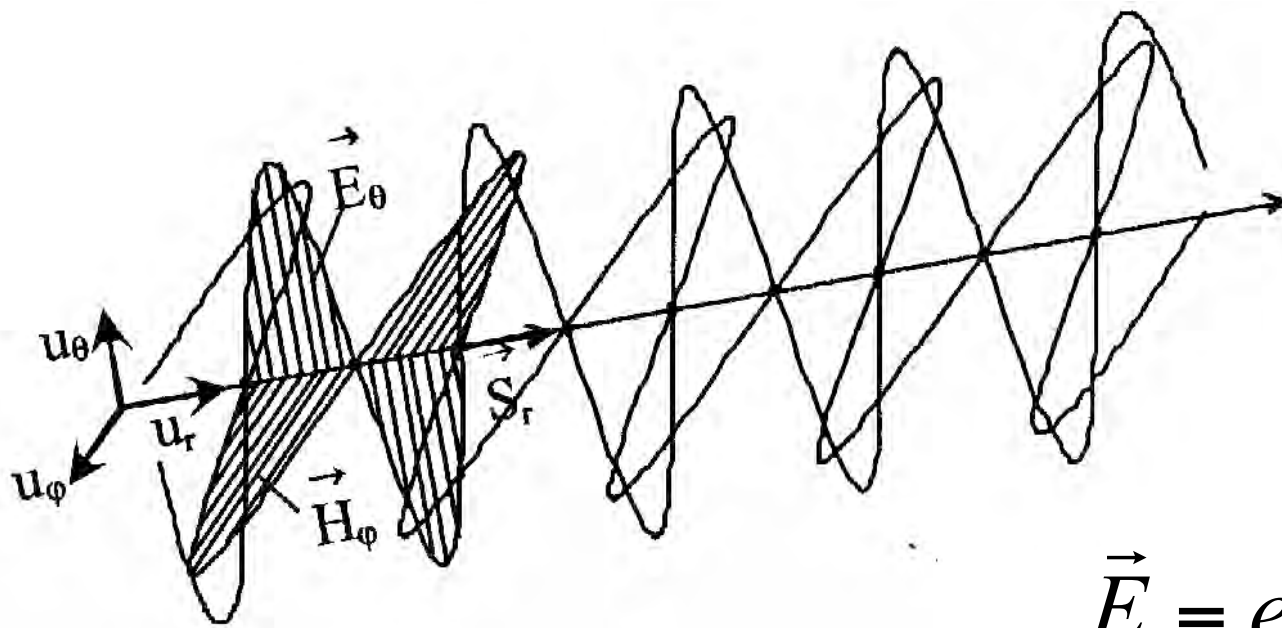
Les coordonnees spheriques (r, θ, φ) constituent un systeme de coordonnees particulierement bien adapte a l'etude des antennes



Onde électromagnétique - rappel (1)

Une onde électromagnétique est constituée :

- d'un champ électrique \vec{E} (V/m)
- d'un champ magnétique \vec{H} (A/m)
- orthogonaux et transverses (perpendiculaires à la direction de propagation)



$$\vec{E} = e^{j\omega t} \left[E_{\theta} e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}r} \vec{u}_{\theta} + E_{\phi} e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}r+\Phi} \vec{u}_{\phi} \right]$$

- $\Phi = 0^{\circ}$ polarisation linéaire
- $\Phi = +90^{\circ}$ polarisation circulaire gauche (LHC left handed circular)
- $\Phi = -90^{\circ}$ polarisation circulaire droite (RHC right handed circular)

Onde électromagnétique - rappel (2)

On a dans le vide $\vec{E} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \vec{H} \times \vec{u}_r$

$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120\pi \approx 377\Omega$ Z_0 : impédance caractéristique du vide

Vecteur de Poynting : $\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$ valeur instantanée

$\vec{S} = \frac{1}{2} \vec{E} \times \vec{H}^*$ valeur moyennée sur une période

\vec{S} décrit l'écoulement de l'énergie S

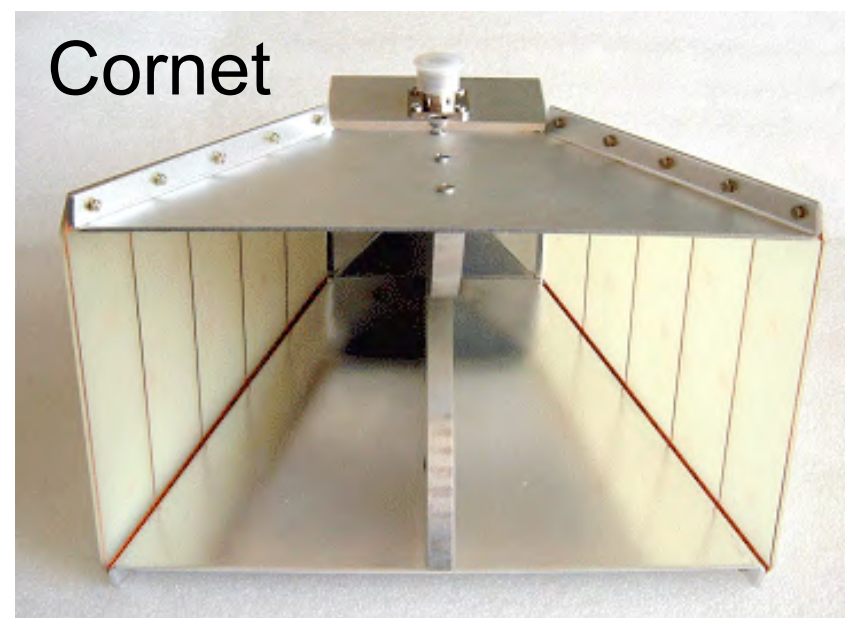
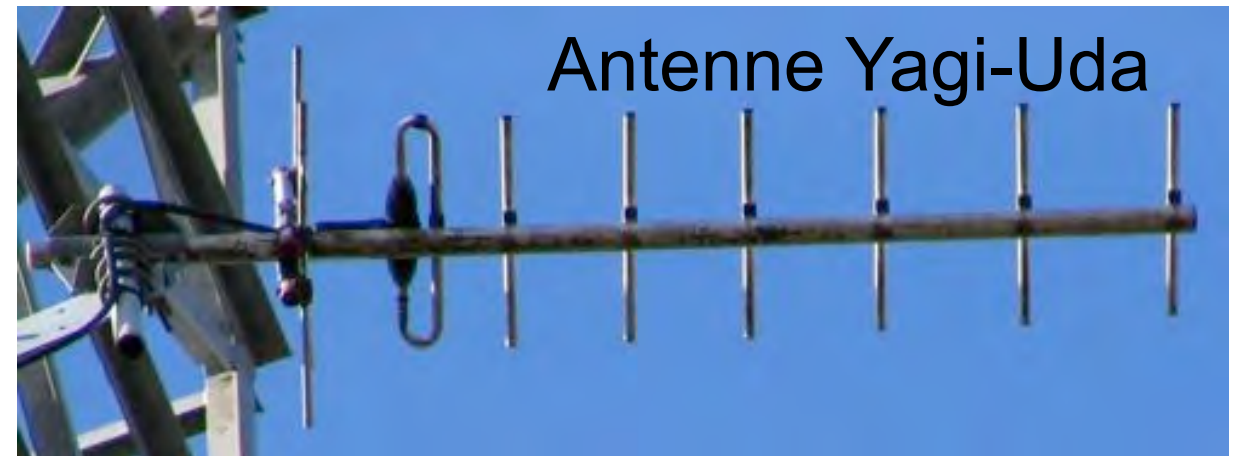
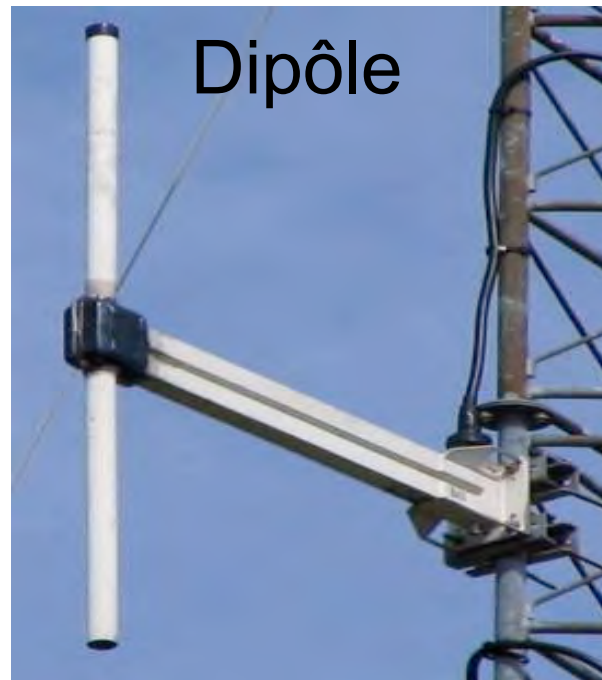
Dans le \vec{S} est $|\vec{S}| = \frac{|\vec{E}|^2}{120\pi}$ (W/m²)

En général une antenne est polarisée linéairement ou circulairement

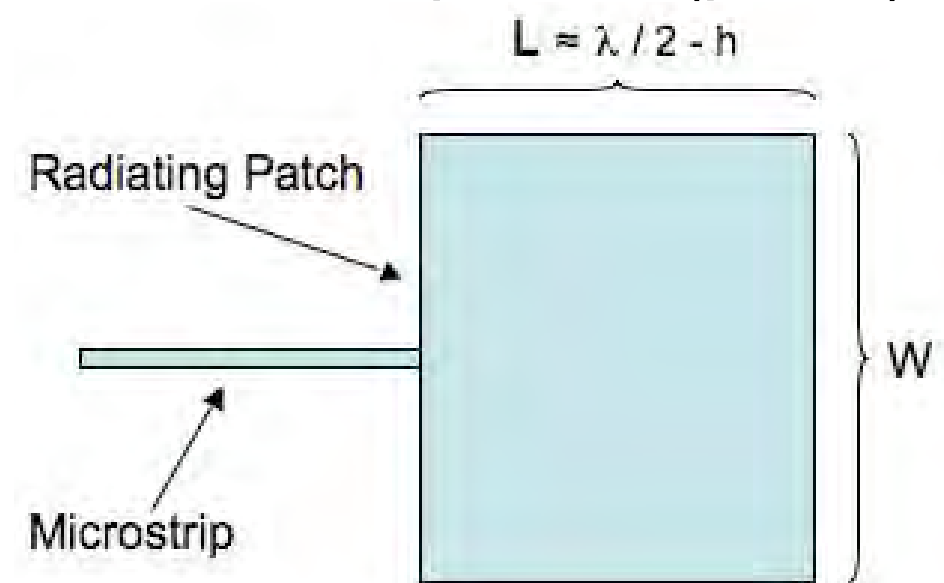
Chaque polarisation reçoit S/2 pour un signal non polarisé

Antennes polarisées linéairement

Il en existe de très nombreux types

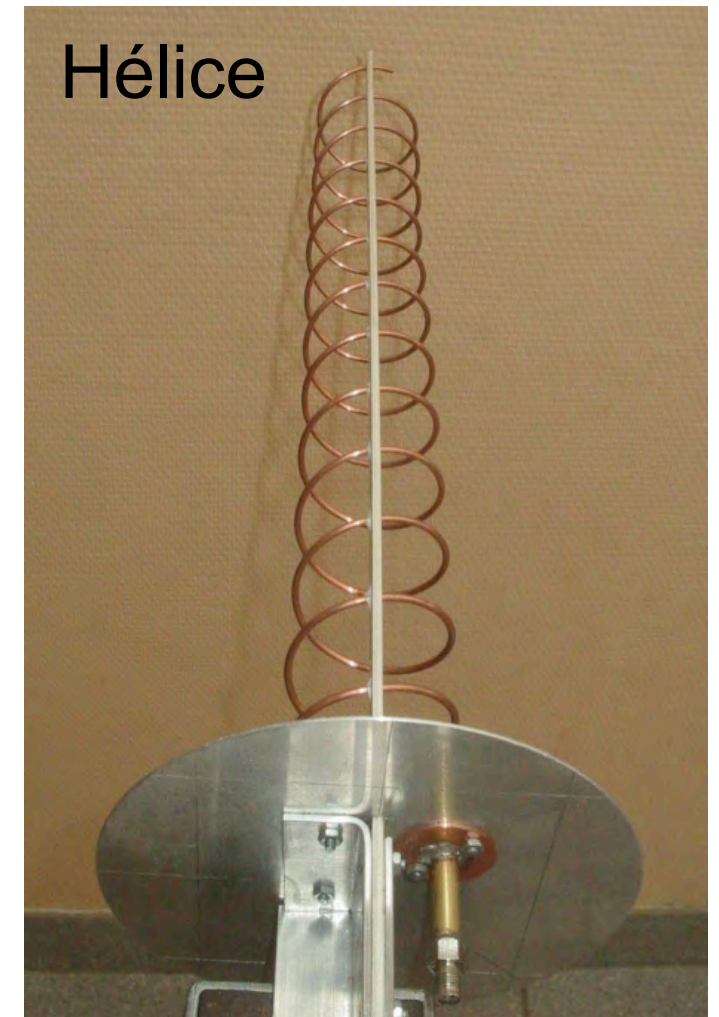


Antenne imprimée (patch)

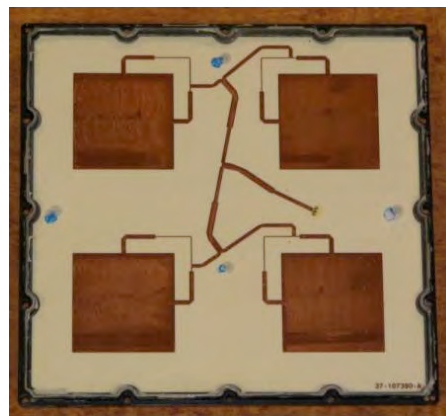


Antennes polarisées circulairement

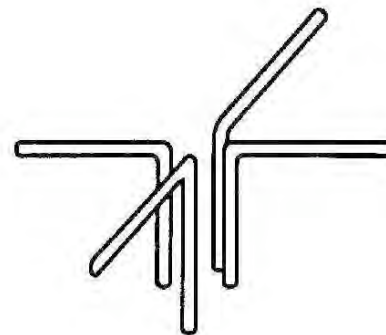
Il y a beaucoup moins de types d'antennes polarisées circulairement



Antenne imprimée (patch)



Dipôles croisés



Interaction onde / antenne :

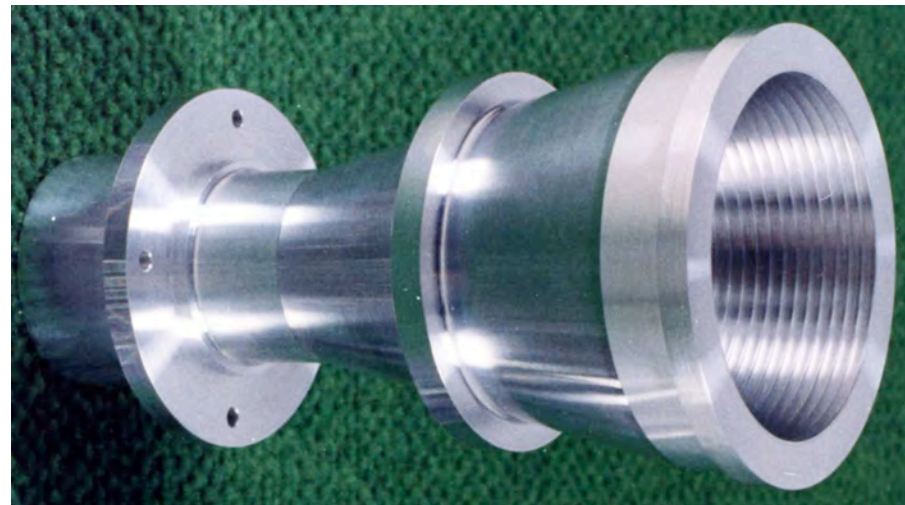
Une onde électromagnétique se propageant dans l'espace peut être produite :

1) par des courants :
antennes filaires

2) par une ouverture dans un volume où
règne un champ EM



Cornet



Réflecteur

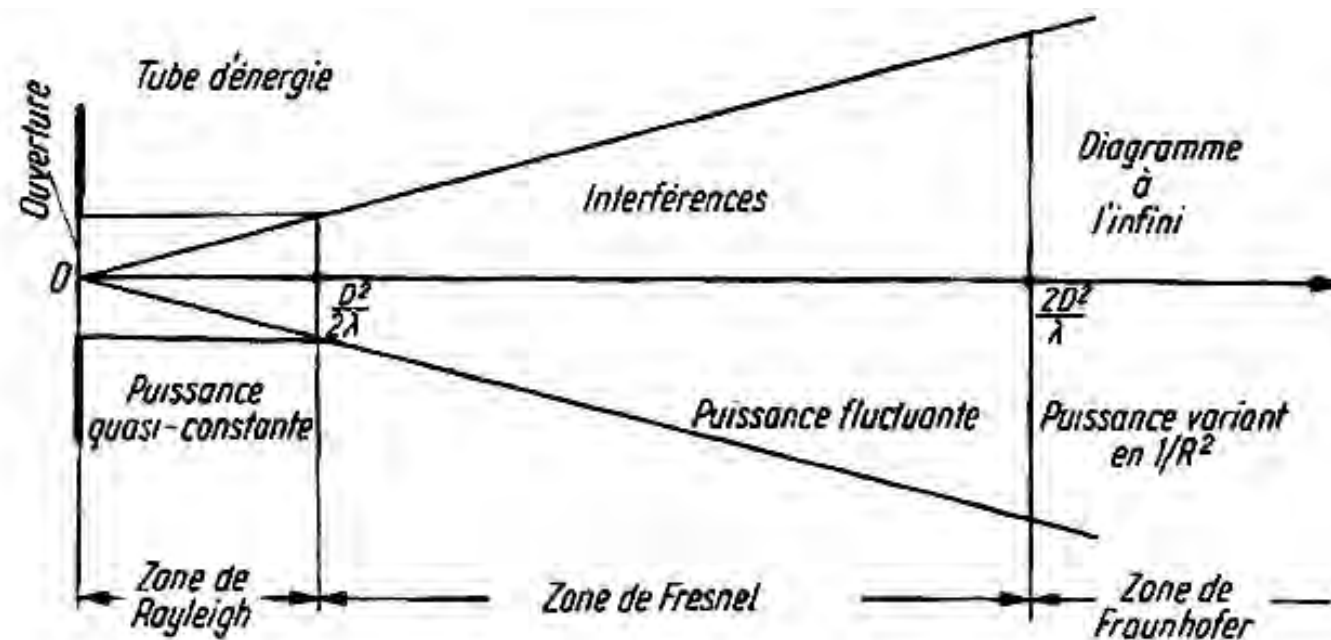


Radiotélescope
décimétrique Nançay

Zones de rayonnement (1)

➤ 3 zones de rayonnement :

- zone de Rayleigh (zone de champ proche, NF near field)
- zone de Fresnel
- zone de Fraunhofer (zone de champ lointain, FF far field)



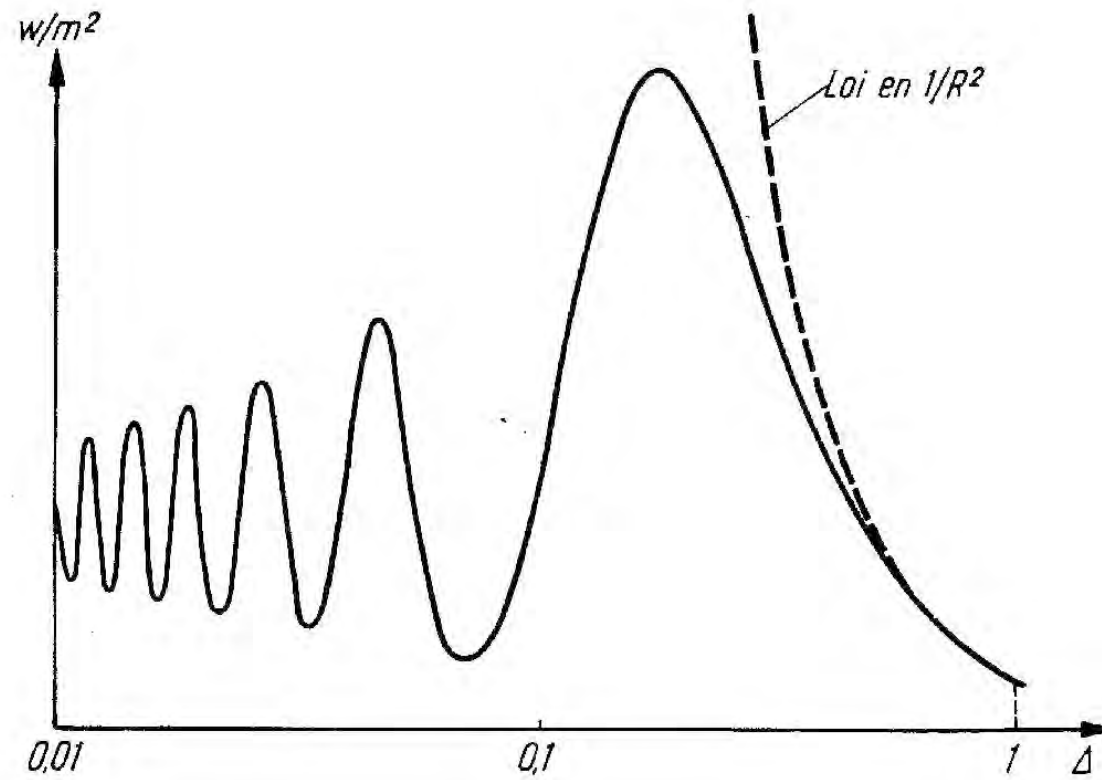
➤ Zone de champ lointain : $r > \frac{2D^2}{\lambda}$ D dimension de l'antenne

Exemples :

• Pour le RT Nançay : D = 200 m @ $\lambda = 0,21$ m $\frac{2D^2}{\lambda} = 380km$

• Pour le RH Nançay : D = 10 m @ $\lambda = 1$ m $\frac{2D^2}{\lambda} = 200m$

Zones de rayonnement (2)



$$\Delta = \frac{R}{2D^2/\lambda}$$

- Dans la zone de champ lointain :

$ \vec{H} $	décroît en $1/$
$ \vec{E} $	décroît en $1/$
$ \vec{S} $	décroît en $1/$
- L'onde est donc sphérique en tout point de l'espace
- Le point apparent d'origine de l'onde est le centre de phase (phase center) de l'antenne

Antenne isotrope (isotropic radiator)

- Antenne théorique rayonnant uniformément dans toutes les directions de l'espace
- Une telle antenne n'a pas de direction privilégiée : elle n'est pas directive

- Densité de puissance :

$$p_{iso}(r, \theta, \varphi) = \frac{P_E}{4\pi r^2} \quad P_E \text{ puissance émise}$$

- L'antenne isotrope est impossible à réaliser dans la pratique

Directivité (directivity)

La directivité dans la direction (θ, φ) est le rapport entre la puissance rayonnée par unité d'angle solide dans cette direction et la puissance qui serait rayonnée par une source isotrope qui émet la même puissance totale.

$$D(\theta, \varphi) = \frac{p(r, \theta, \varphi)}{p_{iso}(r, \theta, \varphi)} \quad \text{avec même } P_E \text{ dans les 2 cas}$$

$D(\theta, \varphi)$ indépendant de r car p et p_{iso} sont en $1/r^2$

On a
$$\int_0^{4\pi} D(\theta, \varphi) d\Omega = 4\pi \quad \text{avec } d\Omega = \sin(\theta).d\theta.d\varphi$$

$$\Rightarrow \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{2\pi} D(\theta, \varphi) \sin(\theta) d\theta d\varphi = 4\pi$$

Gain (1)

Si P_F puissance fournie à une antenne via une ligne de pertes L avec un coefficient de réflexion en tension Γ , la puissance émise est :

$$P_E = (1 - |\Gamma|^2)LP_F$$

$$\eta_a = (1 - |\Gamma|^2)L \longrightarrow \eta_a \text{ est le rendement d'antenne à ne pas confondre avec les rendements d'illumination et de spillover (cf plus loin)}$$

$$\eta_a = \frac{P_E}{P_F}$$

Le gain est

$$G(\theta, \varphi) = \eta_a \cdot D(\theta, \varphi)$$

Gain (2)

$$D(\theta, \varphi) = \frac{p(\theta, \varphi)}{\frac{P_E}{4\pi}}$$

$$G(\theta, \varphi) = \frac{p(\theta, \varphi)}{\frac{P_F}{4\pi}}$$

avec $\int_0^{4\pi} p(\theta, \varphi) d\Omega = P_E$

Attention :

Une antenne est un élément strictement passif qui n'amplifie pas le signal, son gain représente la concentration de puissance dans une direction privilégiée par rapport à une antenne isotrope sans pertes.

Pour simplifier, on considère à partir de maintenant une antenne sans pertes et parfaitement adaptée donc

$$D(\theta, \varphi) = G(\theta, \varphi)$$

Note : dans cette présentation, on ne traite pas le cas particulier des antennes actives.

Diagramme de rayonnement (1)

Gain maximum $G_0 = \max[G(\theta, \varphi)]$

Représentation de $G(\theta, \varphi)$ ou de $G(\theta, \varphi)/G_0$ en fonction de θ et/ou de φ en coordonnées polaires, rectangulaires ...

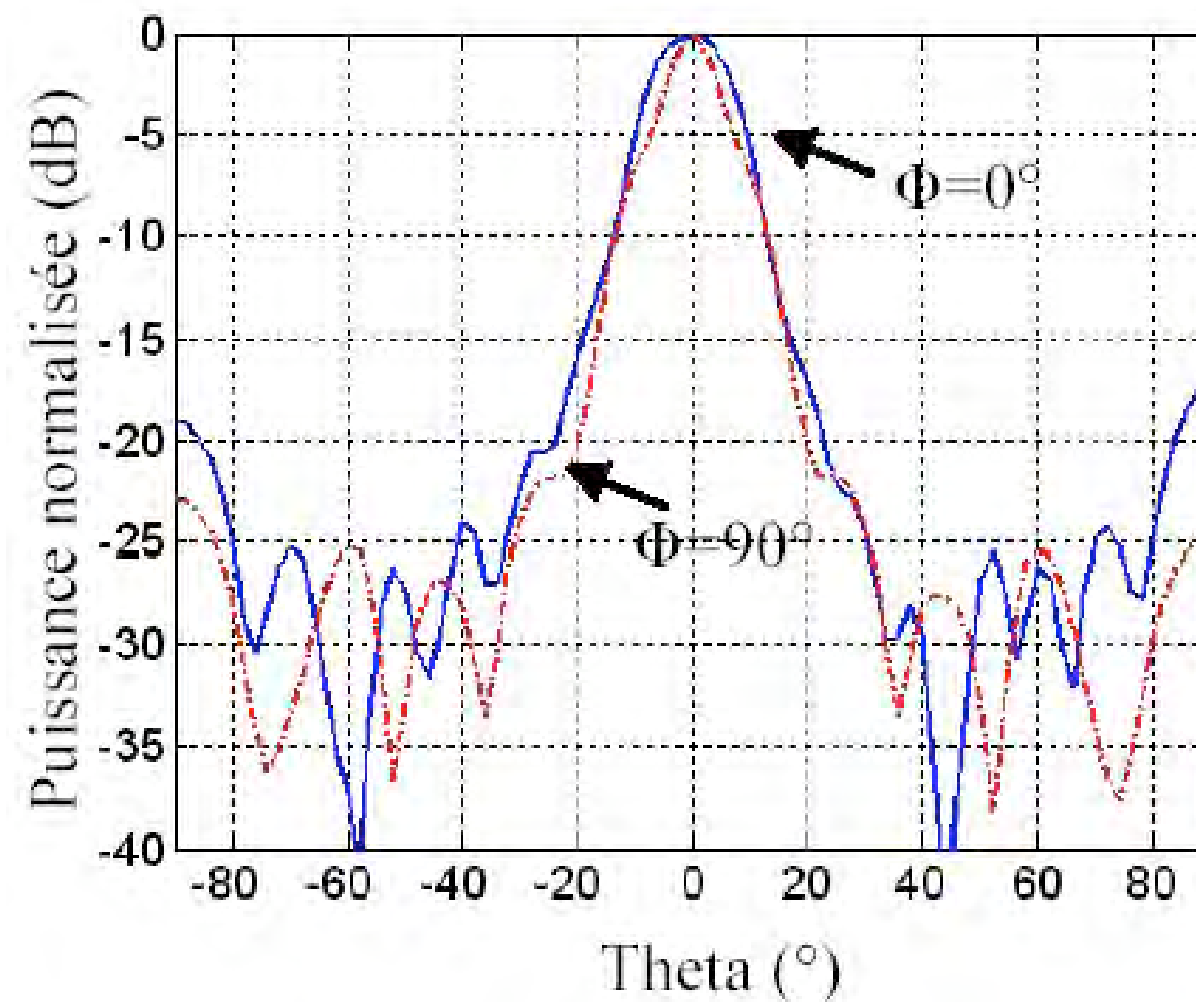
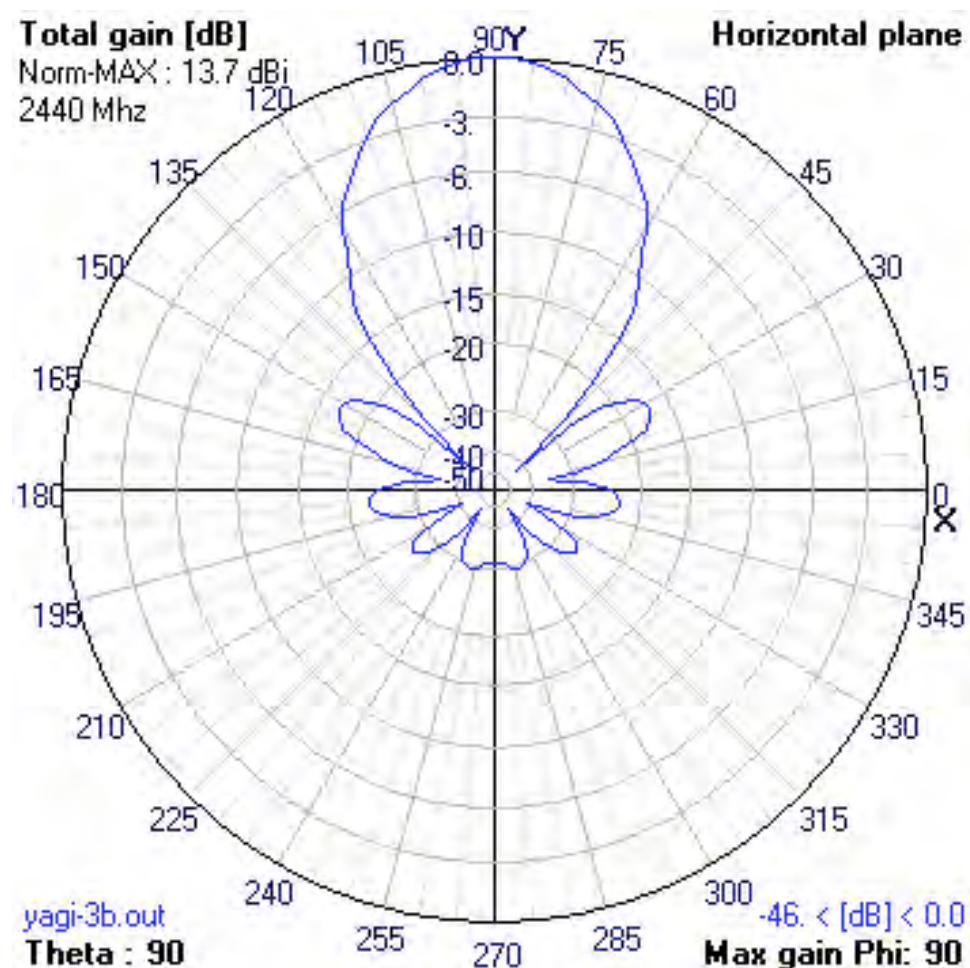


Diagramme de rayonnement (2)

... ou en 3D :

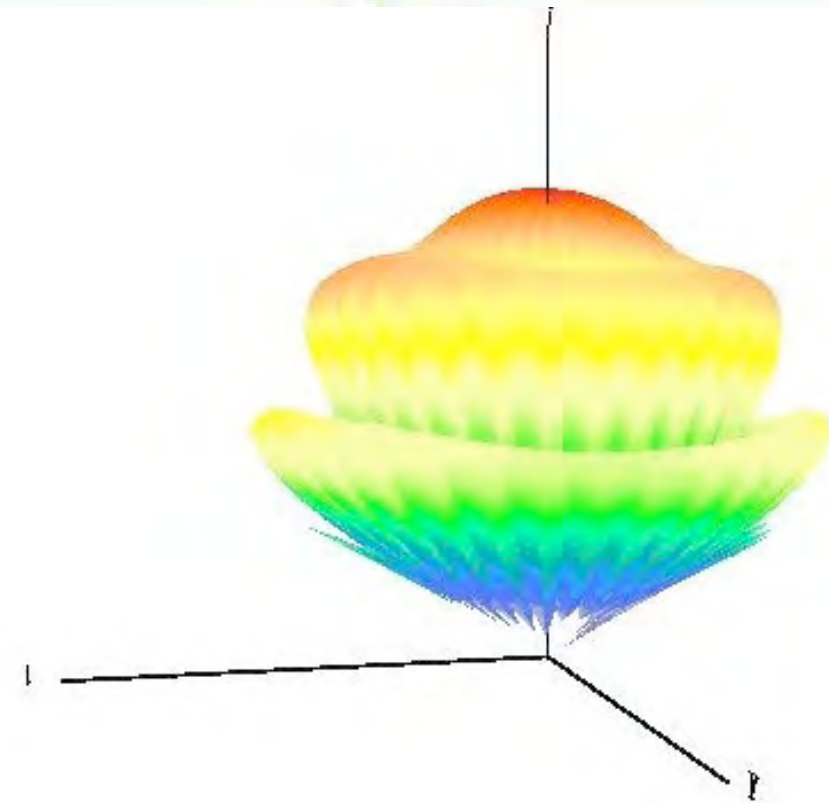
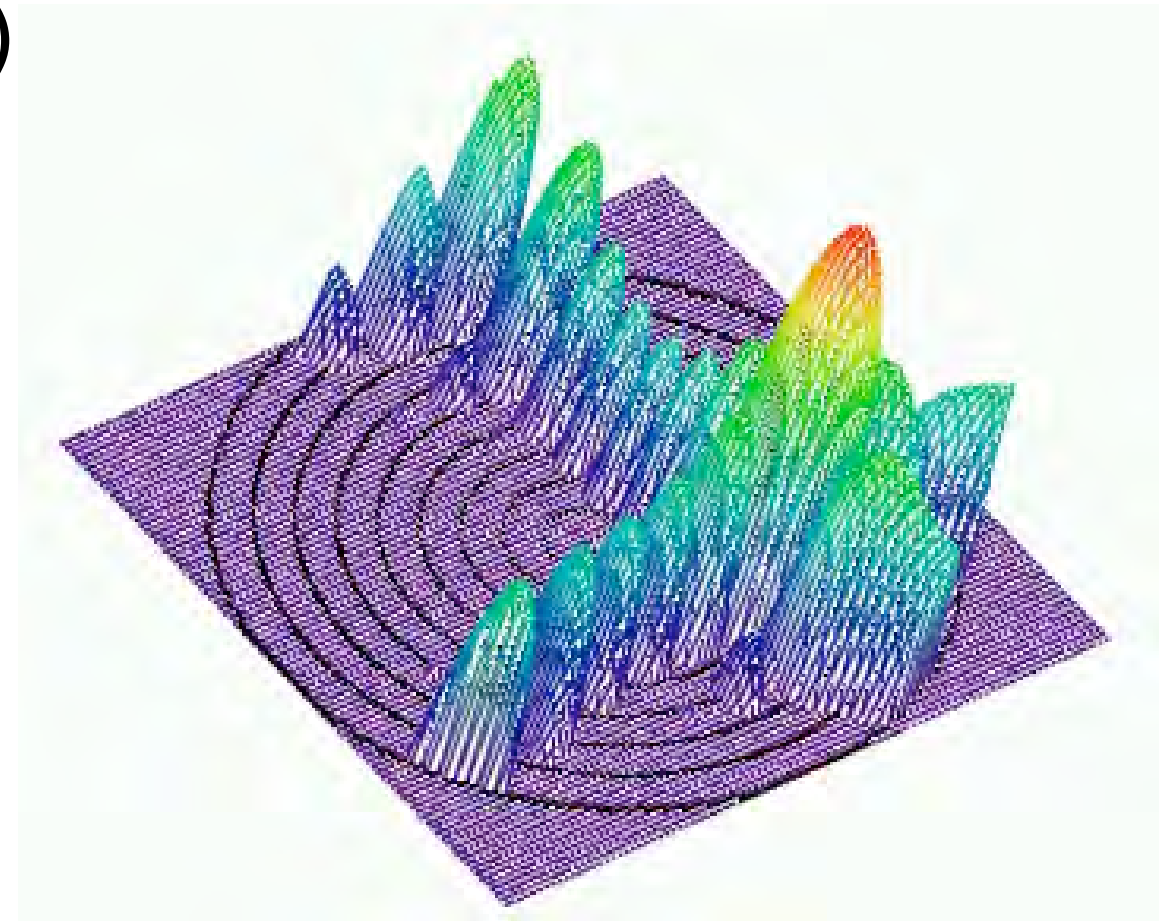
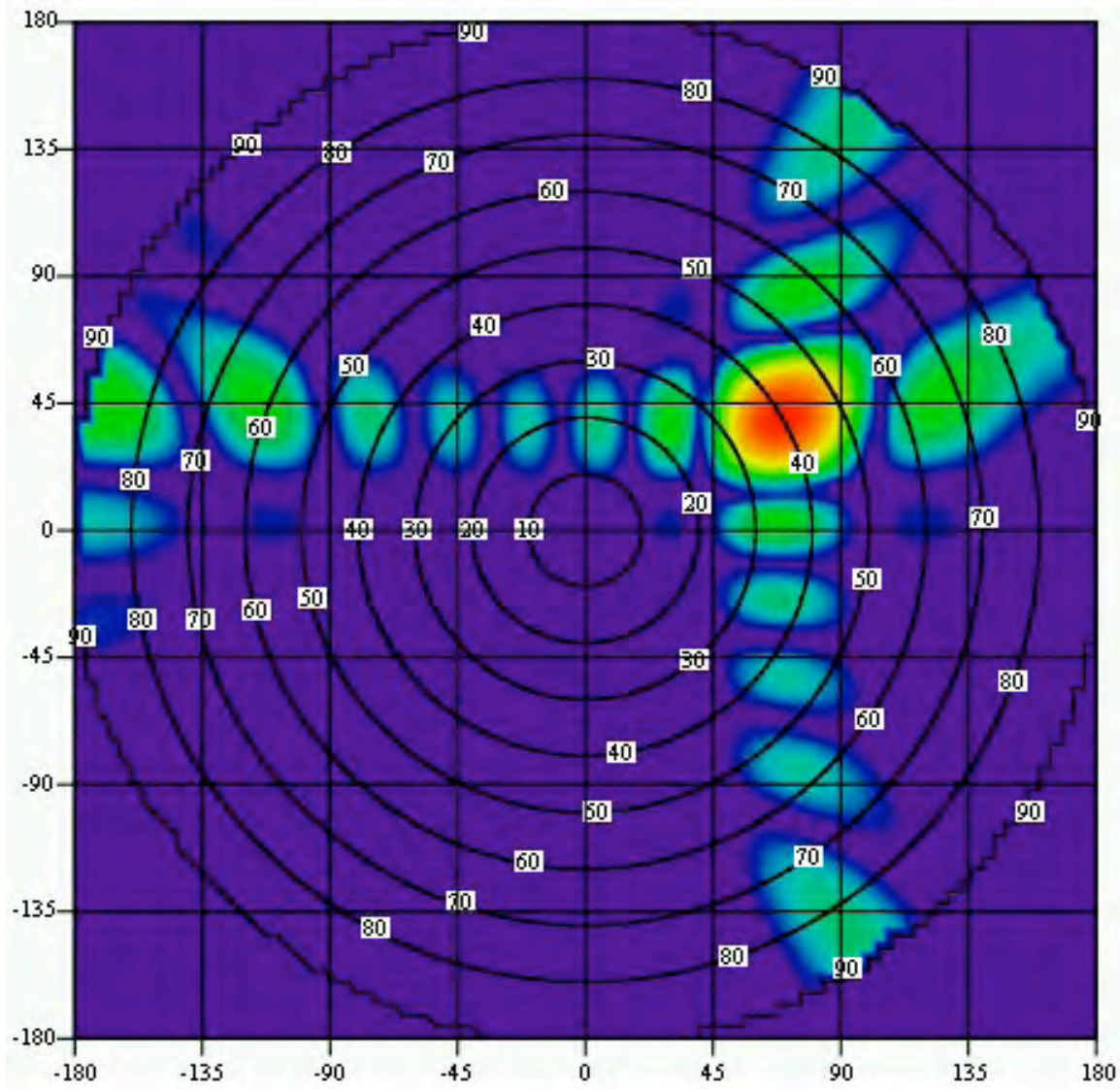


Diagramme de rayonnement (3)

Exprimé en dBi (dB / isotrope, dB : décibel) : $10 \log[G(\theta, \varphi)]$

Exemples :

- Pour un dipôle demi-onde : $G_0 = 2,14$ dBi
- Pour le RT Nançay @ $\lambda = 0,21$ m : $G_0 = 61,4$ dBi

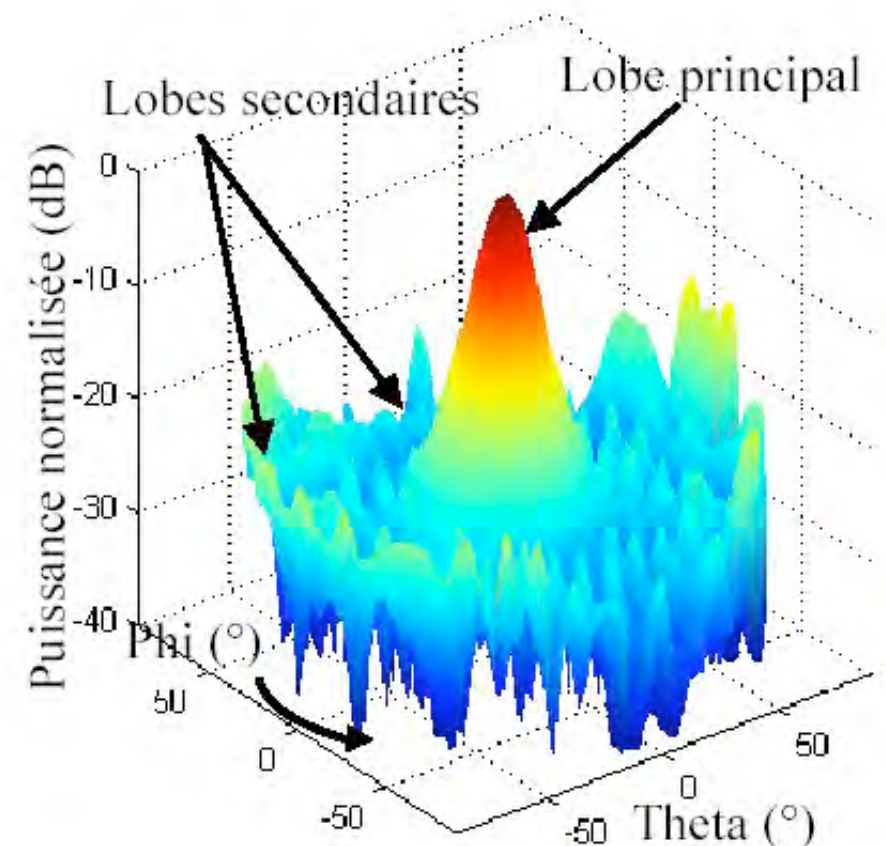
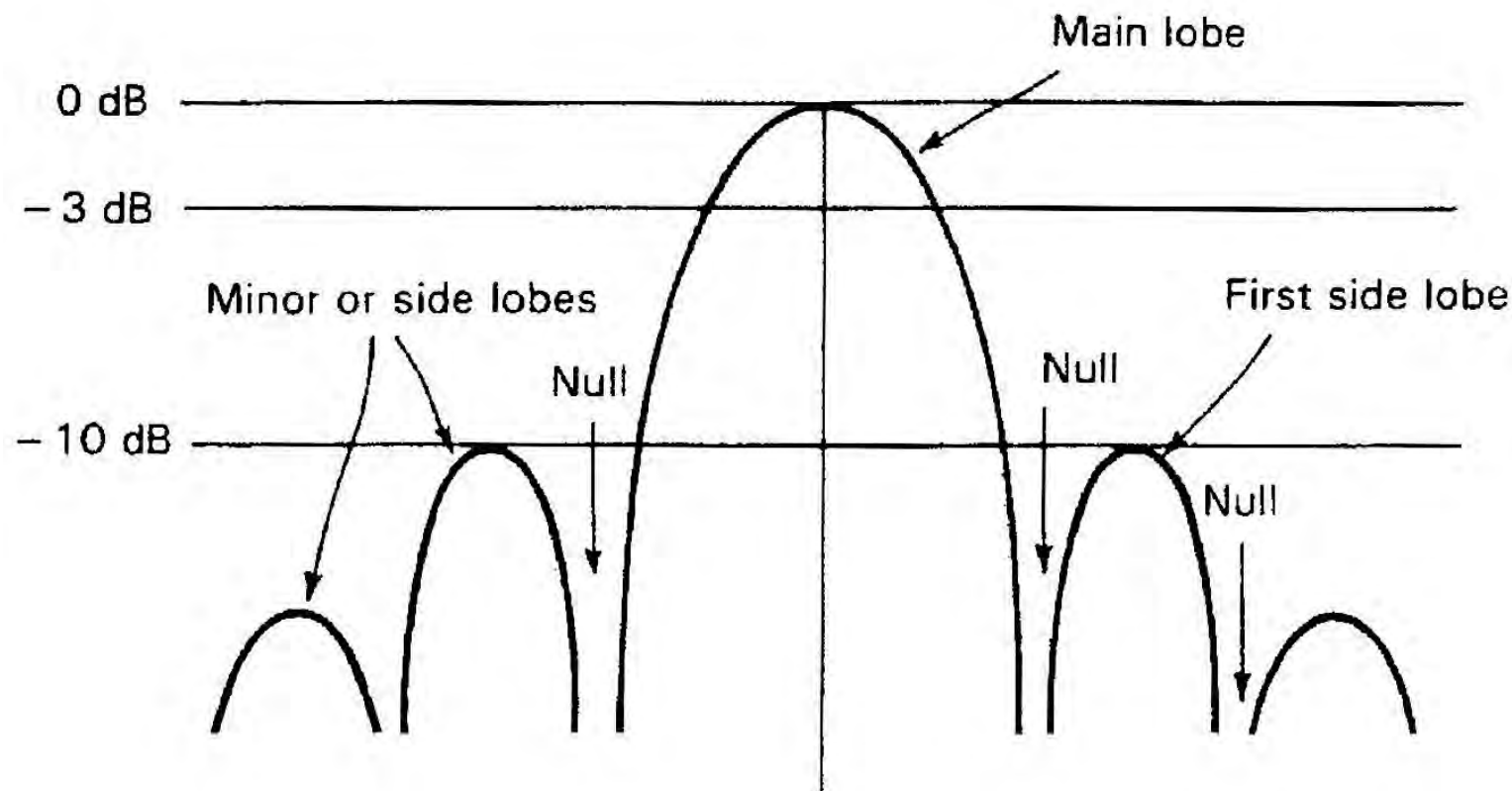
ou en dBc (dB / gain maximum) : $10 \log \frac{G(\theta, \varphi)}{G_0}$

Exemple : premier lobe secondaire

- Pour une ouverture rectangulaire illuminée en créneau : - 13,2 dBc
- Pour une ouverture circulaire illuminée en créneau : - 17,6 dBc

Éléments caractéristiques du diagramme (1)

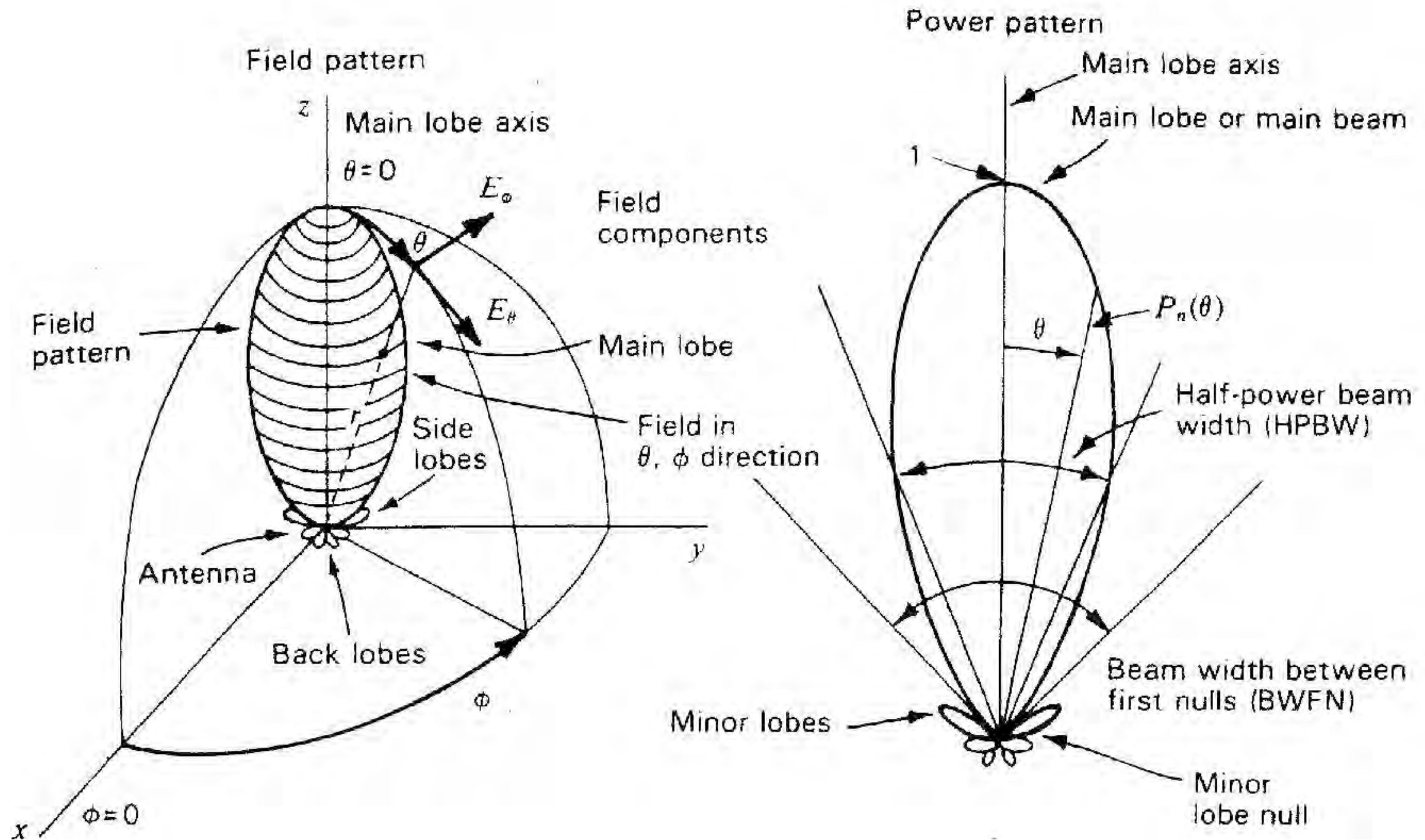
- Lobe principal (main beam)
- Lobes secondaires (minor lobes ou side lobes)
- Lobe arrière (back lobe)
- Largeur à mi-puissance, lobe à - 3 dB (HPBW : half power beam width)



En première approximation
on peut estimer la largeur
à mi puissance

$$HPBW \approx \frac{\lambda}{D} \quad \text{en radians}$$

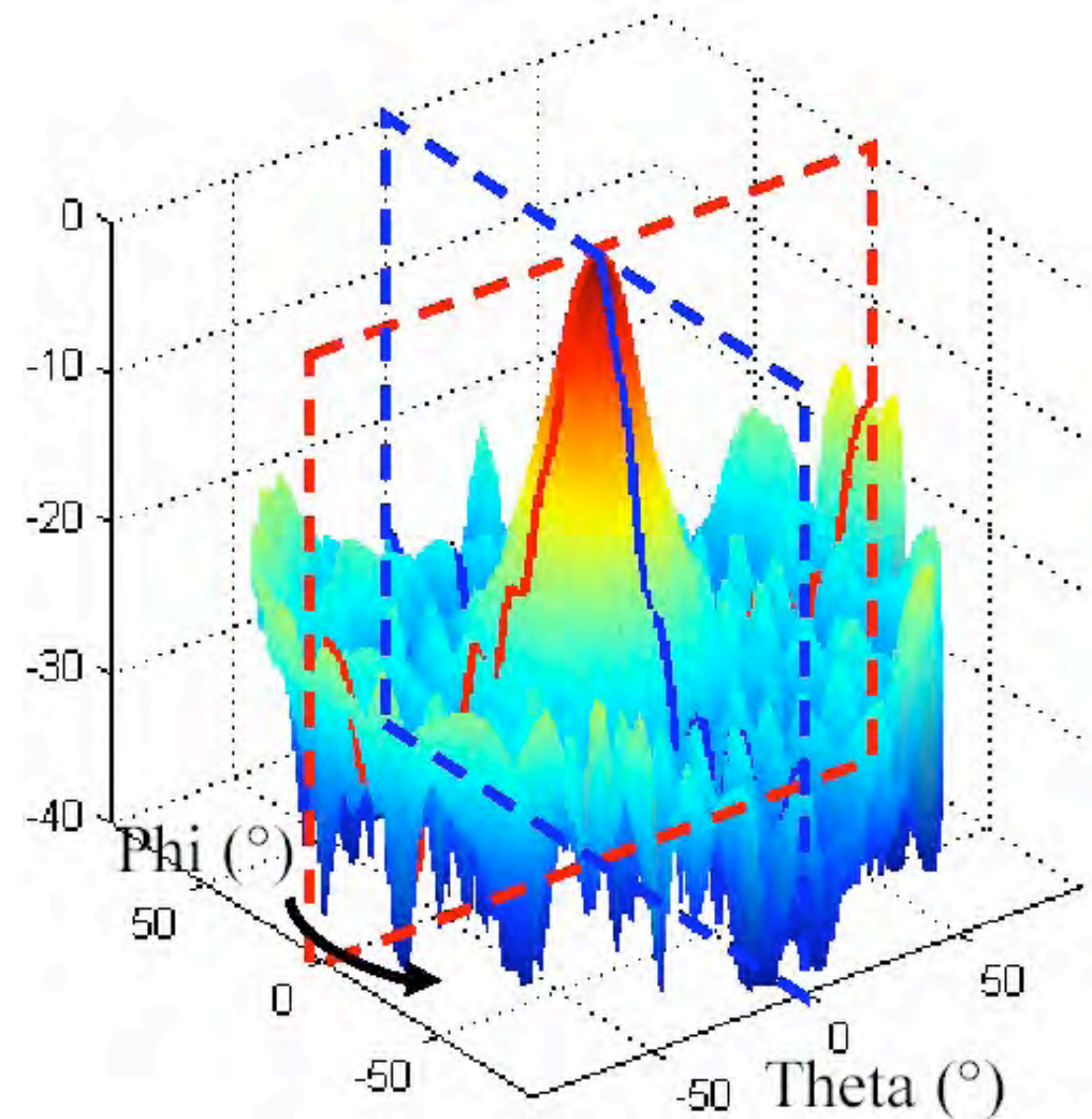
Eléments caractéristiques du diagramme (2)



Plans principaux (1)

➤ 2 plans orthogonaux passant par le maximum de rayonnement dans lesquels on étudie habituellement le diagramme de rayonnement

➤ Pour une antenne polarisée linéairement, un des plans principaux contient $\vec{E} \rightarrow$ plan E, l'autre contient $\vec{H} \rightarrow$ plan H

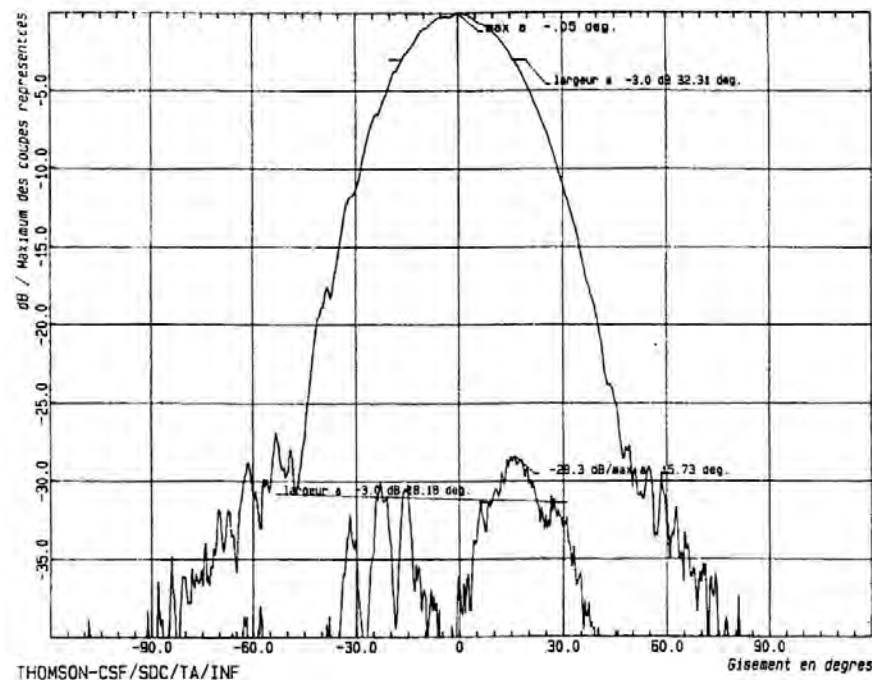


Plans principaux (2)

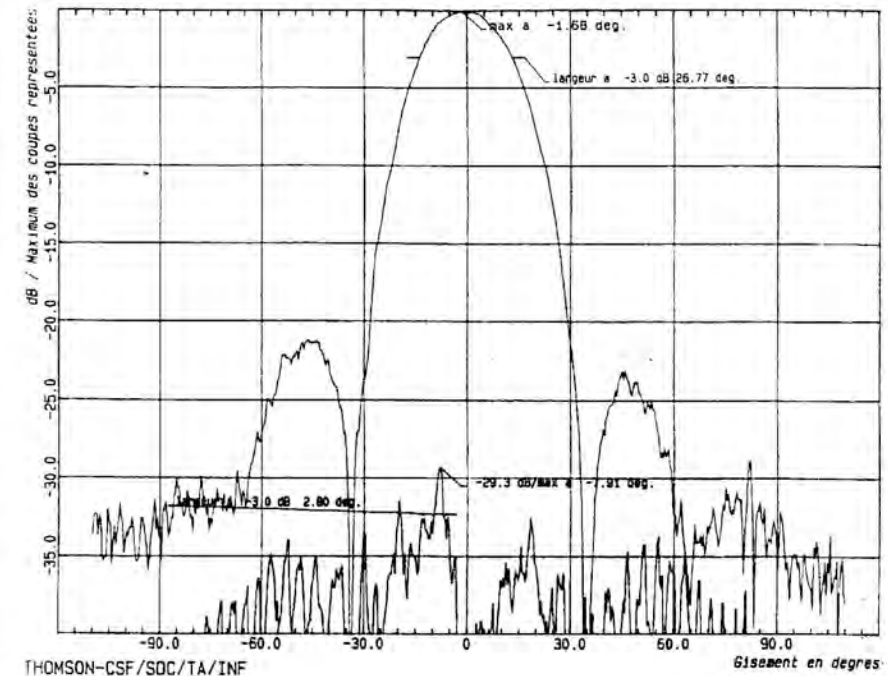
Même pour une antenne parfaitement symétrique, les diagrammes pour les plans E et H sont différents, sauf cas très particulier (cornets corrugués par exemple). Dû aux conditions aux limites.

Conséquence : dans un plan le diagramme pour une polarisation est différent de celui pour la polarisation croisée

Coupe horizontale pour le cornet hoghorn ayant équipé le RT Nançay jusqu'en 2000



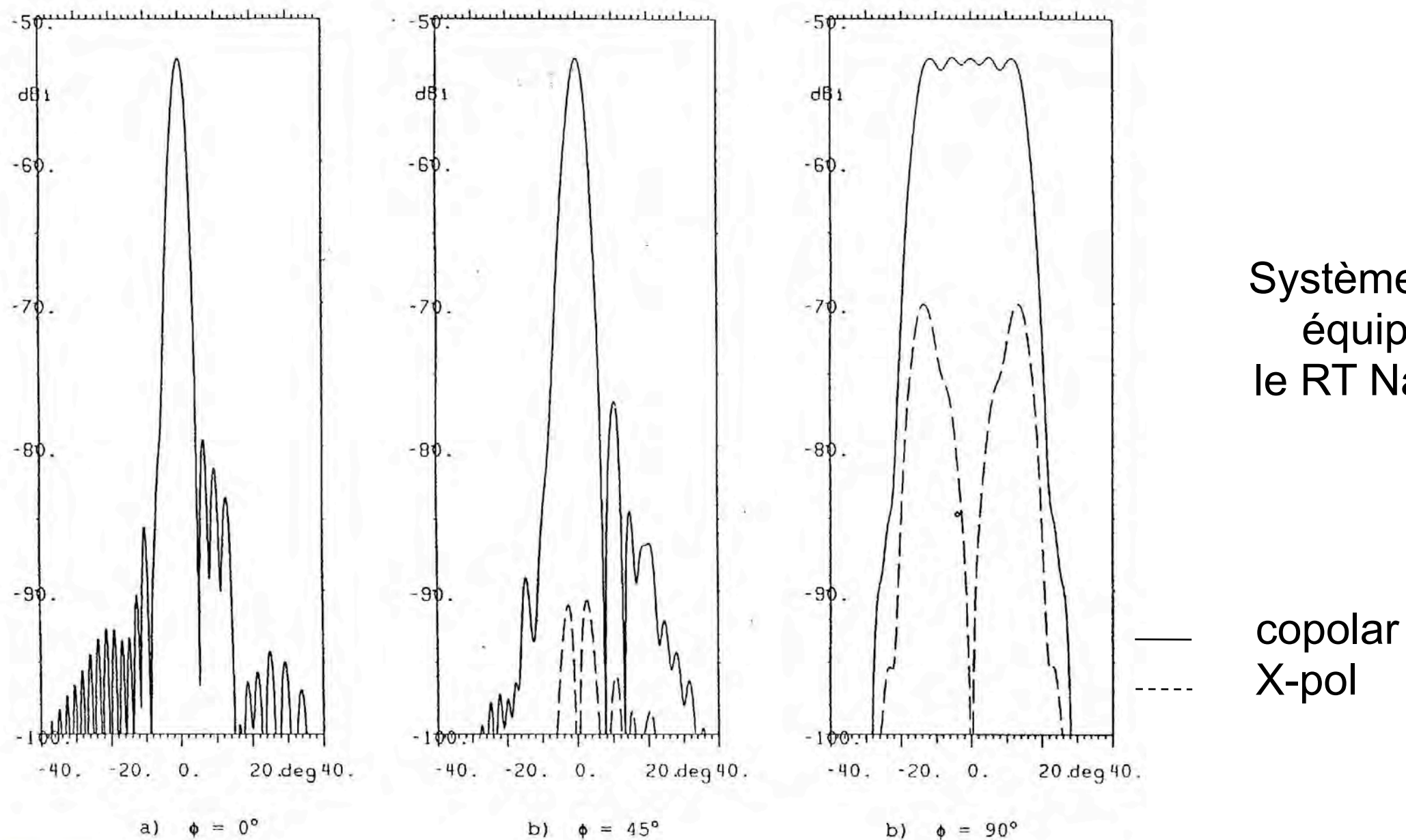
Polarisation horizontale plan E



Polarisation verticale plan H

Taux de polarisation croisée (cross polarisation, X-pol)

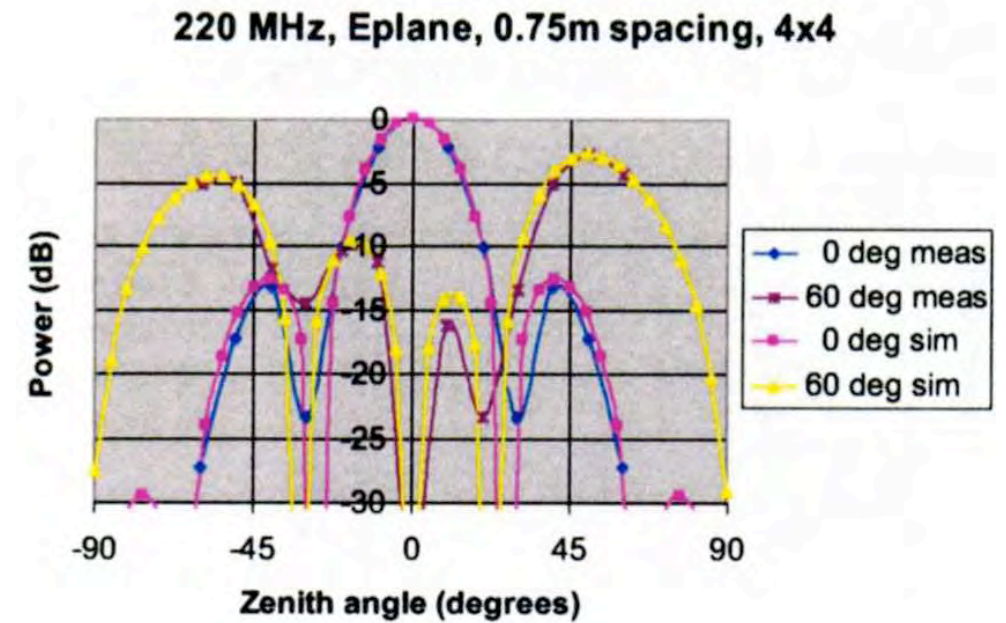
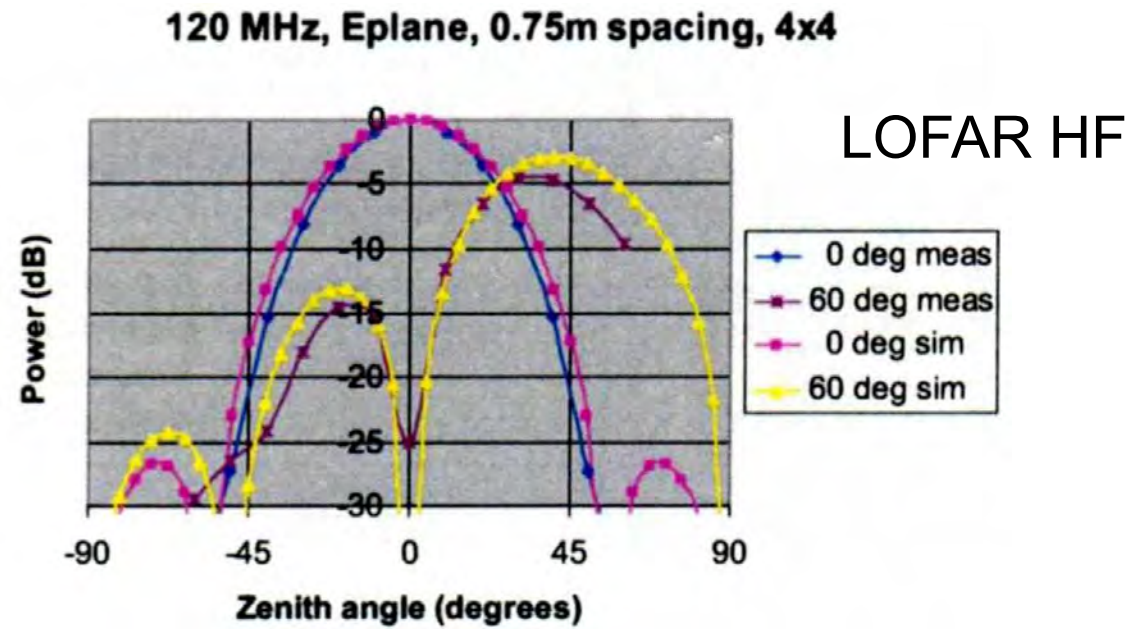
- Réponse d'une antenne à la polarisation orthogonale à sa polarisation de réception
- La cross polarisation est nulle dans les plans de symétrie



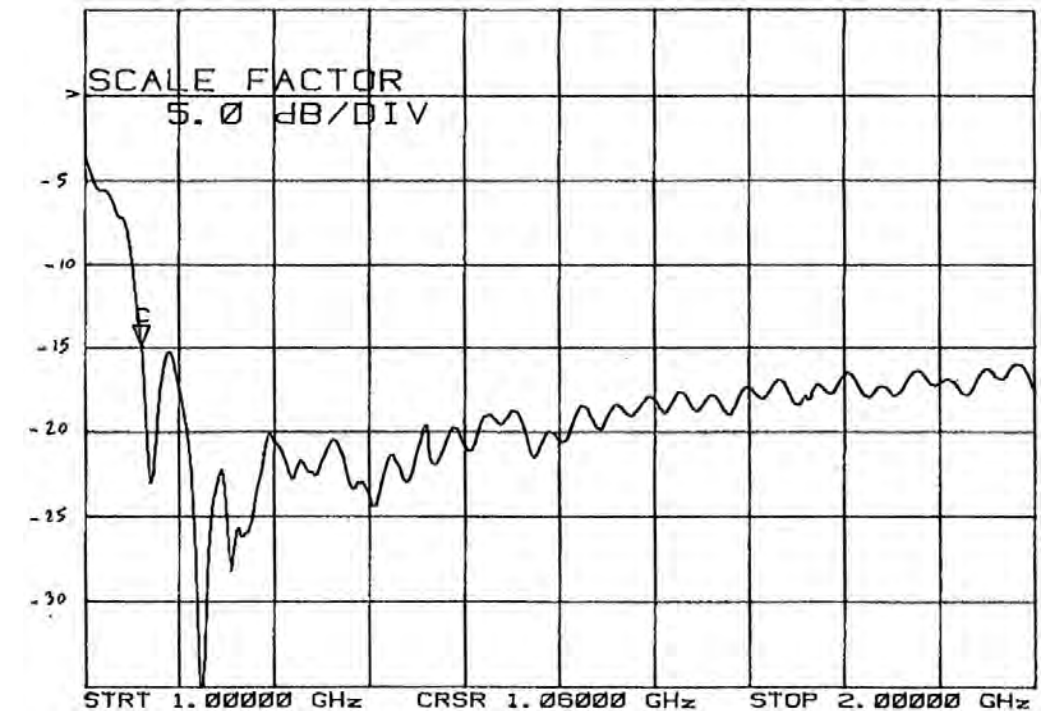
Systeme focal
equipant
le RT Nançay

Bande de fonctionnement

Limitée par la variation du diagramme de rayonnement en fonction de f ...

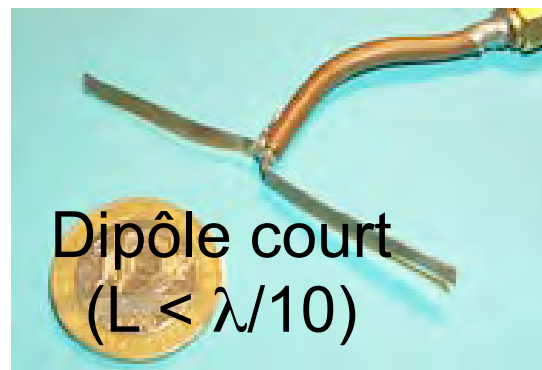


... et par les variations d'impédance

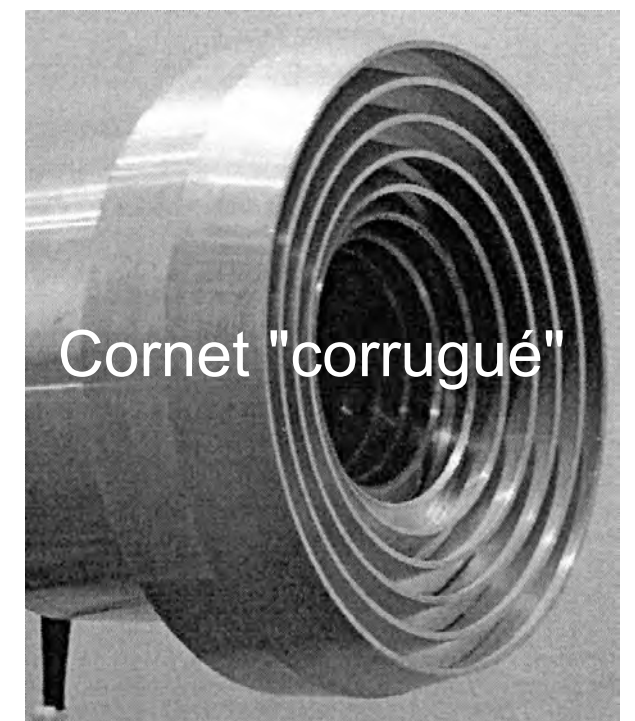


Antennes large bande

- Il est très difficile d'avoir une bande passante dépassant l'octave.
- Des bandes dépassant une décade ont toutefois été réalisées.



Antennes "log périodiques"



Surface équivalente (effective area ou effective aperture)

➤ Aussi appelée surface de captation ou aire efficace

➤ Indique la surface sur laquelle l'antenne collecte l'énergie de l'onde incidente

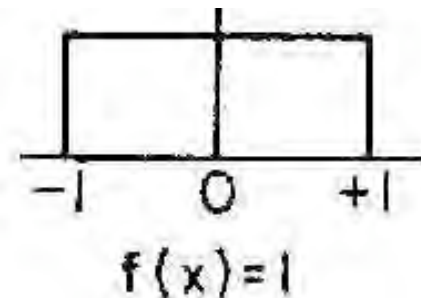
$$G_0 = \frac{4\pi Ae}{\lambda^2}$$

➤ Il n'est pas nécessaire que l'antenne ait la forme d'une surface pour définir Ae

➤ Ae peut être définie pour des antennes filaires par la formule précédente

➤ Pour une ouverture avec illumination constante en phase et amplitude (créneau) :

$$Ae = A \quad \text{A aire physique}$$



➤ Rendement ou facteur de gain (aperture efficiency ou gain factor)

$$\frac{Ae}{A} = \eta$$

Rendement

➤ Pour une ouverture, η se décompose en :

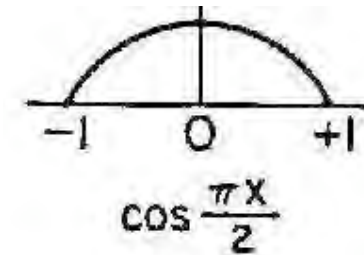
- écart au créneau en amplitude et en phase : rendement d'illumination η_i

- énergie non interceptée par une partie du système : rendement de spillover η_s

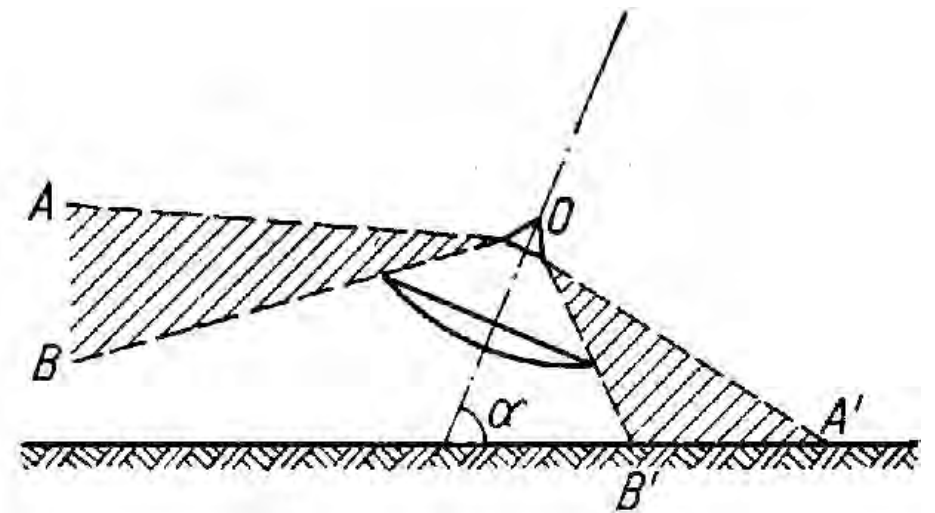
- erreurs de surface $\eta_{RMS} = e^{-\left(\frac{4\pi\sigma}{\lambda}\right)^2}$ (Formule de Ruze)

σ : éqm des erreurs de surface

➤ $\eta = \eta_i \eta_s \eta_{RMS}$ est de l'ordre de 0,70 pour une bonne antenne parabolique

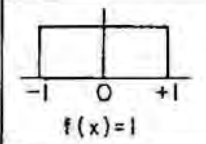
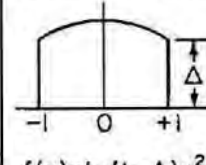
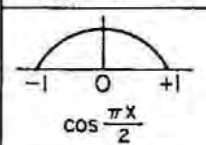
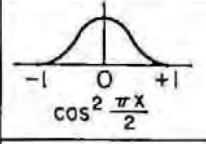
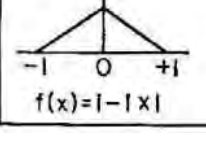


0,81 pour un cosinus

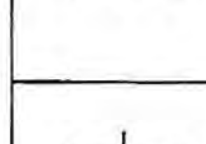
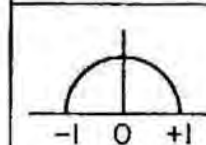
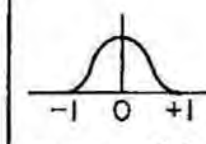


Effet de l'illumination sur les propriétés

Pour un alignement

TYPE OF DISTRIBUTION $-1 \leq x \leq 1$	DIRECTIVITY PATTERN $E(u)$	HALF POWER BEAMWIDTH IN DEGREES	ANGULAR DISTANCE TO FIRST ZERO	INTENSITY OF 1st SIDELobe db BELOW MAX.	GAIN FACTOR	
 $f(x)=1$	$\frac{\sin u}{u}$	$50.8 \frac{\lambda}{L}$	$57.3 \frac{\lambda}{L}$	13.2	1.0	
 $f(x)=1-(1-\Delta)x^2$	$\Delta = \frac{\mathcal{L}}{L}$ $\mathcal{L} = (1-\Delta) \frac{d^2}{du^2}$ $\frac{\sin u}{u} \left(1 + \frac{\Delta}{2} \left(\frac{u}{L} \right)^2 \right)$	1.0 0.8 0.5 0	$50.8 \frac{\lambda}{L}$ $52.7 \frac{\lambda}{L}$ $55.6 \frac{\lambda}{L}$ $65.9 \frac{\lambda}{L}$	$57.3 \frac{\lambda}{L}$ $60.7 \frac{\lambda}{L}$ $65.3 \frac{\lambda}{L}$ $81.9 \frac{\lambda}{L}$	13.2 15.8 17.1 20.6	1.0 .994 .970 .833
 $\cos \frac{\pi x}{2}$	$\frac{\pi L}{2} \frac{\cos u}{(\frac{\pi}{2})^2 - u^2}$	$68.8 \frac{\lambda}{L}$	$85.9 \frac{\lambda}{L}$	23	.810	
 $\cos^2 \frac{\pi x}{2}$	$\frac{L}{2} \frac{\sin u}{u} \frac{\pi^2}{\pi^2 - u^2}$	$83.2 \frac{\lambda}{L}$	$114.6 \frac{\lambda}{L}$	32	.667	
 $f(x)=1- x $	$\frac{L}{2} \left(\frac{\sin \frac{u}{2}}{\frac{u}{2}} \right)^2$	$73.4 \frac{\lambda}{L}$	$114.6 \frac{\lambda}{L}$	26.4	.75	

Pour une ouverture circulaire

TYPE OF DISTRIBUTION $0 \leq r \leq 1$	DIRECTIVITY PATTERN $E(u)$	HALF POWER BEAMWIDTH IN DEGREES	ANGULAR DISTANCE TO FIRST ZERO	INTENSITY OF 1st SIDELobe db BELOW MAX.	GAIN FACTOR
 $f(r)=(1-r^2)^0=1$	$\pi a^2 \frac{J_1(u)}{u}$	$58.9 \frac{\lambda}{D}$	$69.8 \frac{\lambda}{D}$	17.6	1.00
 $f(r)=(1-r^2)$	$2\pi a^2 \frac{J_2(u)}{u^2}$	$72.7 \frac{\lambda}{D}$	$93.6 \frac{\lambda}{D}$	24.6	0.75
 $f(r)=(1-r^2)^2$	$8\pi a^2 \frac{J_3(u)}{u^3}$	$84.3 \frac{\lambda}{D}$	$116.2 \frac{\lambda}{D}$	30.6	0.56

Pour une ouverture rectangulaire le diagramme est séparable :

$$G_{xy}(\theta, \varphi) = G_x(\theta, \varphi) \cdot G_y(\theta, \varphi)$$

Par exemple pour le créneau :

$$G_{xy}(\theta, \varphi) = \frac{\sin\left(\frac{\pi D_x \sin\theta \cos\varphi}{\lambda}\right)}{\frac{\pi D_x \sin\theta \cos\varphi}{\lambda}} \times \frac{\sin\left(\frac{\pi D_y \sin\theta \sin\varphi}{\lambda}\right)}{\frac{\pi D_y \sin\theta \sin\varphi}{\lambda}}$$

Diagramme de rayonnement vs champ sur l'ouverture

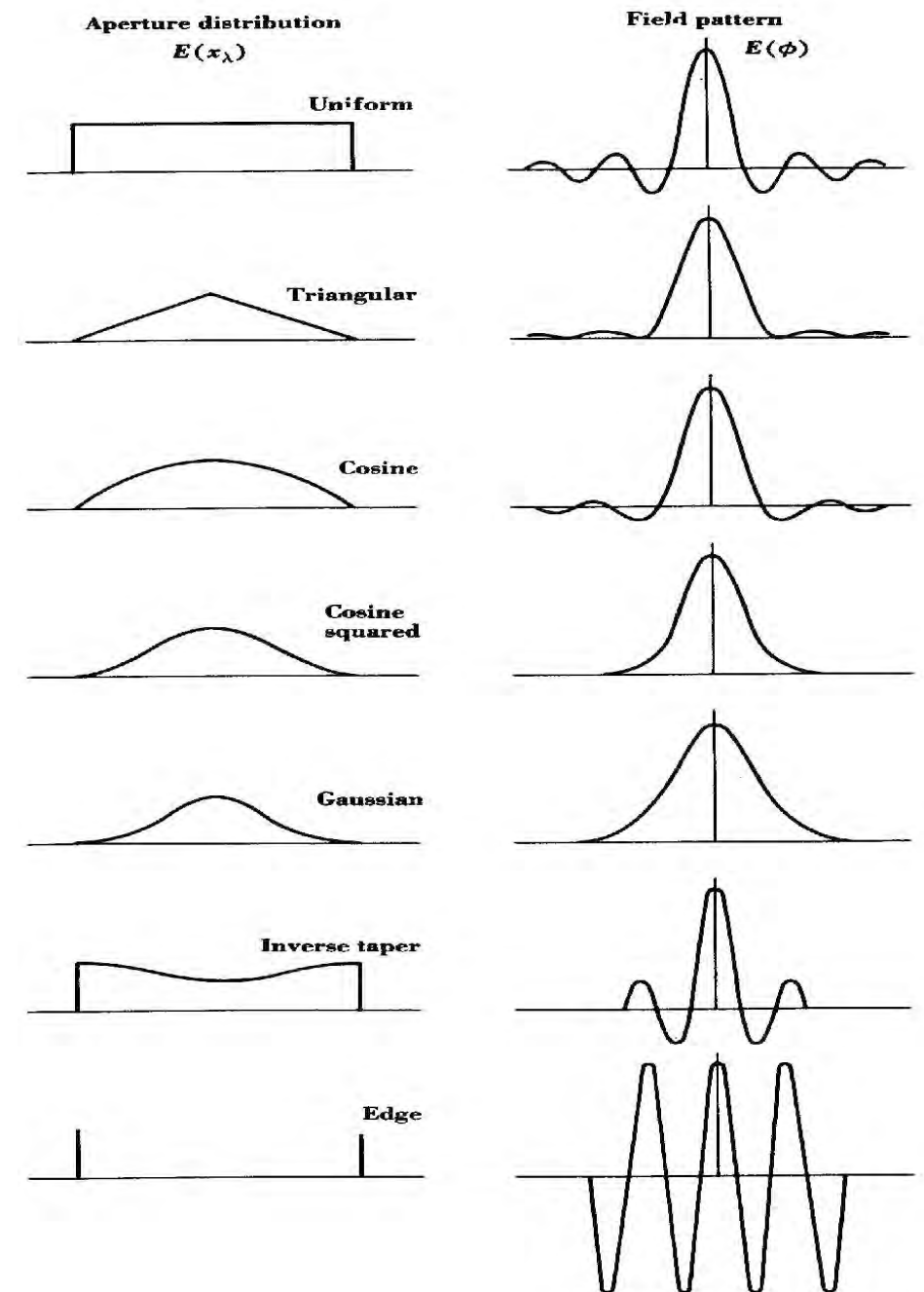
- Pour une ouverture le champ dans le diagramme de rayonnement et la distribution de champ sur l'ouverture sont reliés par une transformation de Fourier

$$E(\theta) = \int E(x) e^{j2\pi x \sin\theta} dx$$

$$E(x) = \int E(\sin\theta) e^{-j2\pi x \sin\theta} d(\sin\theta)$$

⇒ Le niveau des lobes secondaires dépend fortement de la distribution de champ sur l'ouverture

- Pour un réflecteur on a la même relation entre le champ sur l'ouverture et la tache de diffraction au foyer



Température d'antenne (1)

$$T_a = \frac{\iint_{4\pi} T(\theta, \varphi) G(\theta, \varphi) d\Omega}{\iint_{4\pi} G(\theta, \varphi) d\Omega}$$

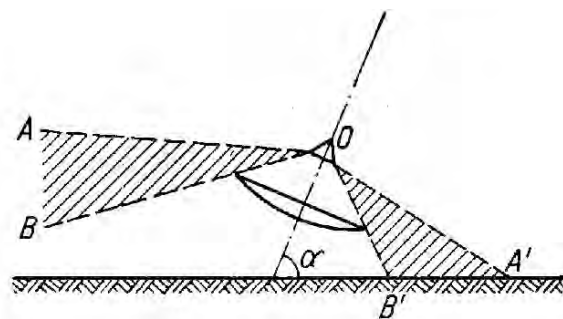
$$T_a = \frac{1}{4\pi} \iint_{4\pi} T(\theta, \varphi) G(\theta, \varphi) d\Omega$$

Avec $T(\theta, \varphi)$ température de brillance dans la direction (θ, φ)
(dépend de la température physique et de l'émissivité)

- T_a comprend le CMB + la Galaxie + l'atmosphère + le sol (terme générique pour l'environnement)
- T_a est également affectée par la configuration de l'antenne

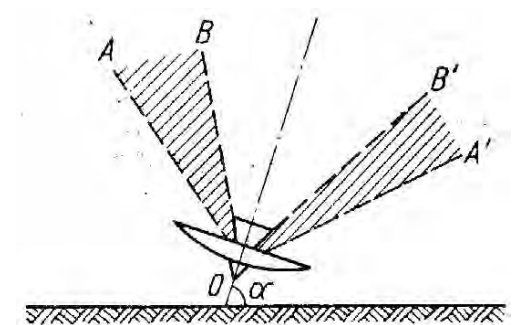
Prime focus :

- spillover voit le sol
- T_a élevée

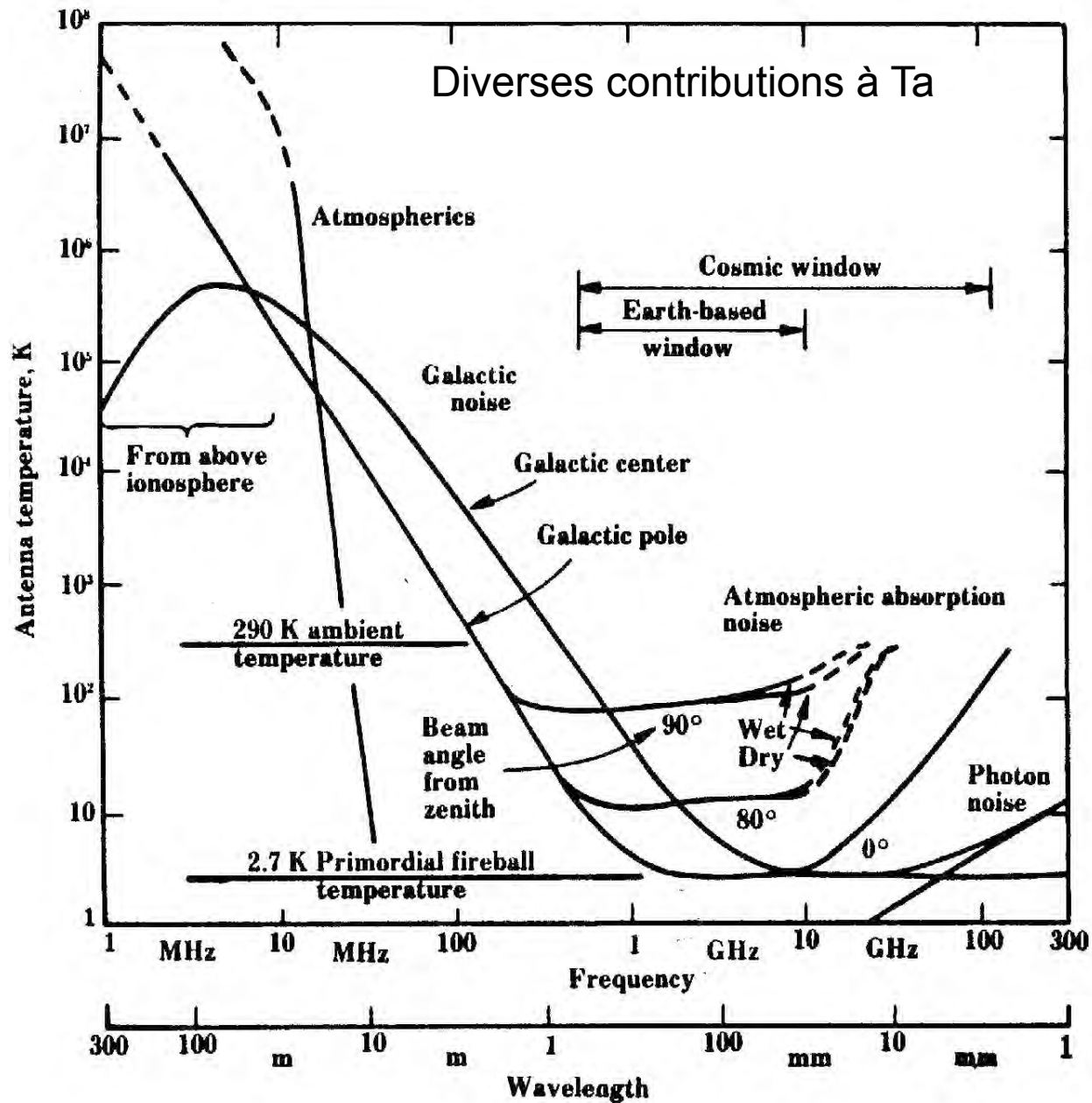


Cassegrain :

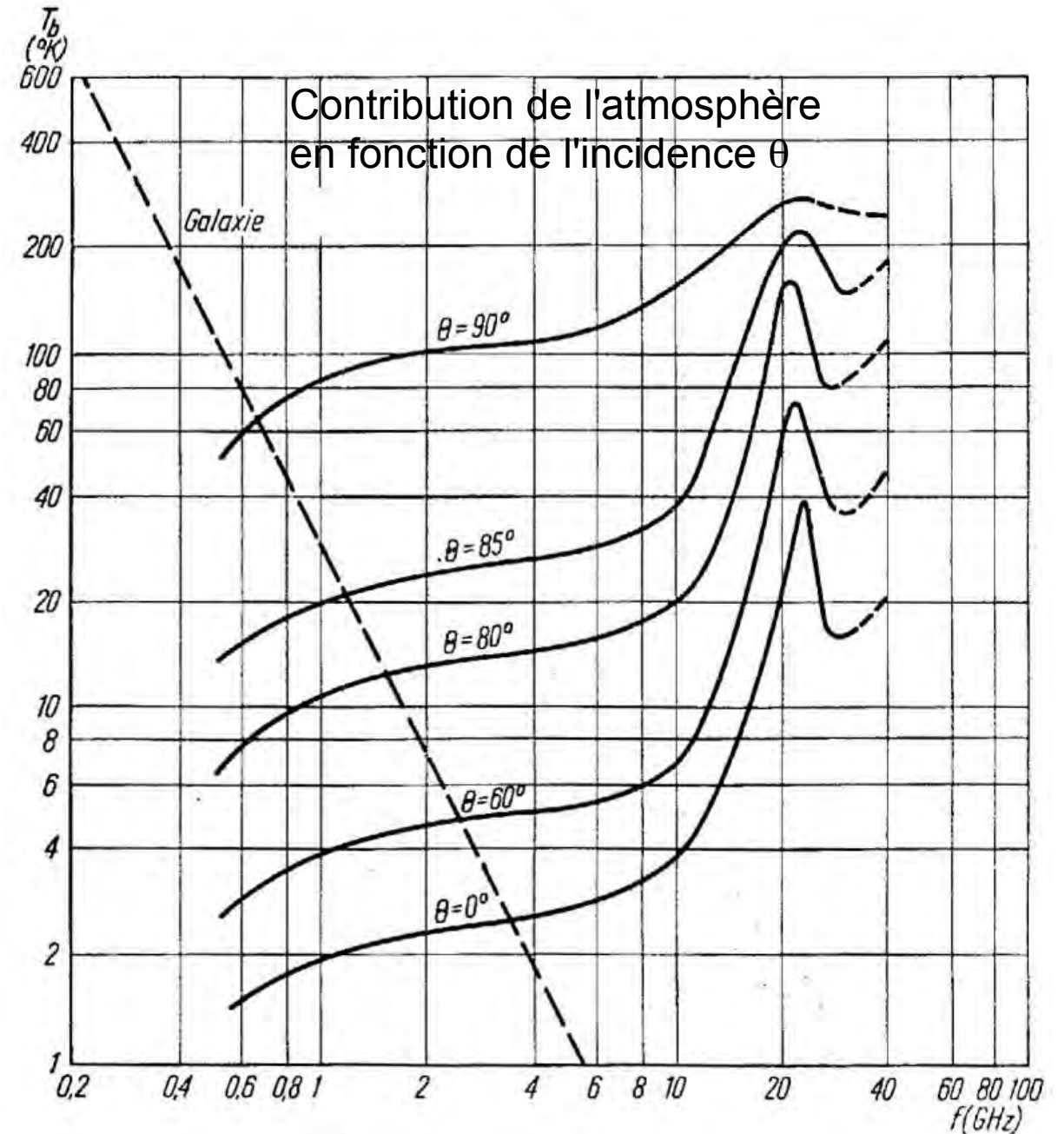
- spillover voit le ciel
- T_a plus faible



Température d'antenne (2)



T_a minimum atteignable : 5 K @ 1,5 GHz
 60 K @ 300 MHz
 350 K @ 150 MHz
 21000 K @ 30 MHz



T_a minimum atteinte \approx 10 K (JPL Goldstone)
 T_a RT Nançay \approx 20 K

Facteur de qualité (quality factor)

➤ Appelé sensitivity ou A_e/T_{sys} dans les spécifications LOFAR et SKA

➤ Est une estimation du rapport signal à bruit que peut fournir l'antenne

$$F = \frac{G}{T}$$

➤ Peut être exprimé en fonction de

- A_e surface équivalente
- T_a température d'antenne
- T_r température de bruit du récepteur

$$F = \frac{A_e}{T_a + T_r}$$

Exemples :

• Pour le RT Nançay @ 21 cm $A_e \approx 4800 \text{ m}^2$ $T_a + T_r \approx 30 \text{ K}$ $F \approx 160 \text{ m}^2/\text{K}$

• Pour SKA $A_e = 10^6 \text{ m}^2$ $T_a + T_r \approx 50 \text{ K}$ $F = 20\,000 \text{ m}^2/\text{K}$

Groupements de sources

- Appelés réseaux
- Les sources sont généralement alimentées avec des amplitudes et des phases différentes
- Le diagramme de rayonnement dépend de la position des sources ainsi que des amplitudes et phases alimentant chacune d'elles
- Domaines d'espace particuliers
 - droite : alignements
 - plan : réseaux plans

Exemples de groupements d'antennes



Interféromètre
(interferometer)



Réseau phasé
(phased array)

Antenne unique
(single dish)



Théorème de multiplication des diagrammes

Si $F_1(\theta, \varphi)$ est l'expression du diagramme de rayonnement d'une source S ,

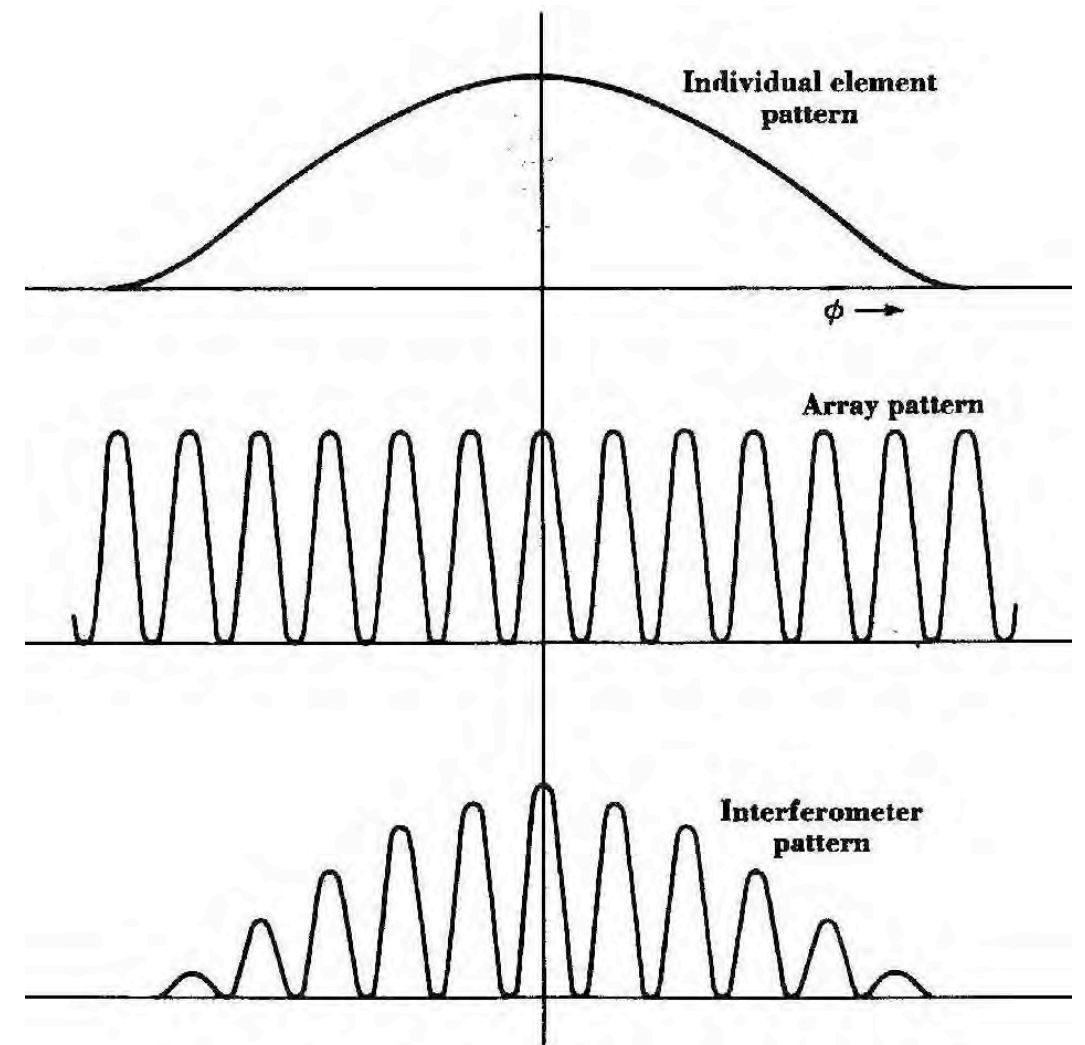
Si $F_2(\theta, \varphi)$ est le diagramme de rayonnement d'un réseau R de sources isotropes,

Alors le diagramme de rayonnement d'un réseau R constitué de ces sources S est :

$$F(\theta, \varphi) = F_1(\theta, \varphi) \times F_2(\theta, \varphi)$$

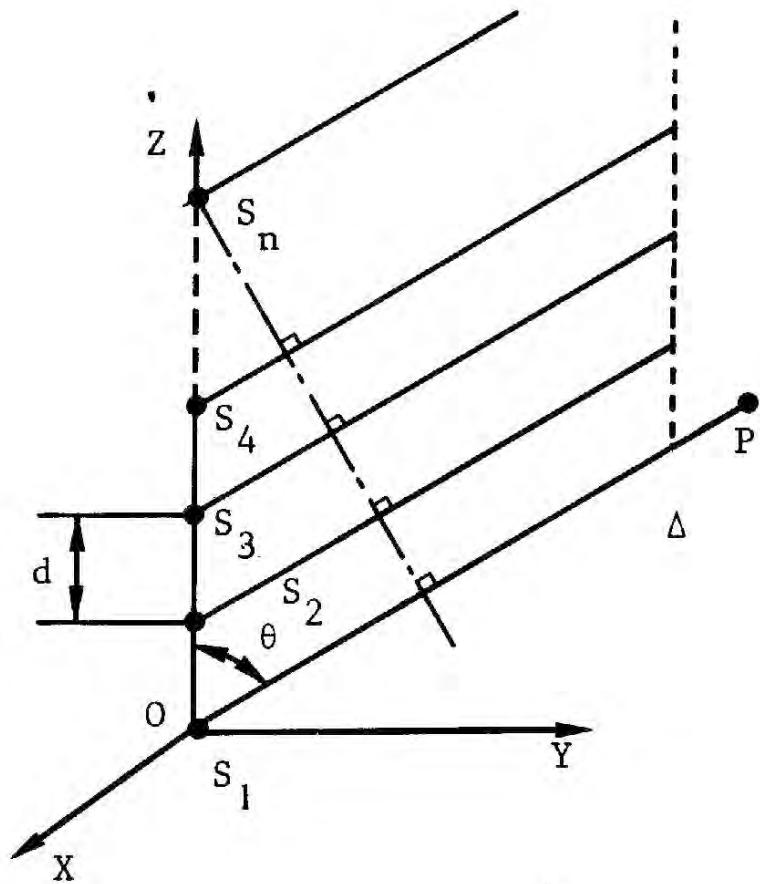
Limitations :

- valable en champ lointain uniquement
- doit tenir compte du couplage entre sources pour donner de bons résultats en dehors de la zone entourant le lobe principal



Alignement de n sources d'amplitude identique

On considère le cas où l'amplitude des sources est constante et où un déphasage fixe $\Delta\phi$ est appliqué d'une source à l'autre

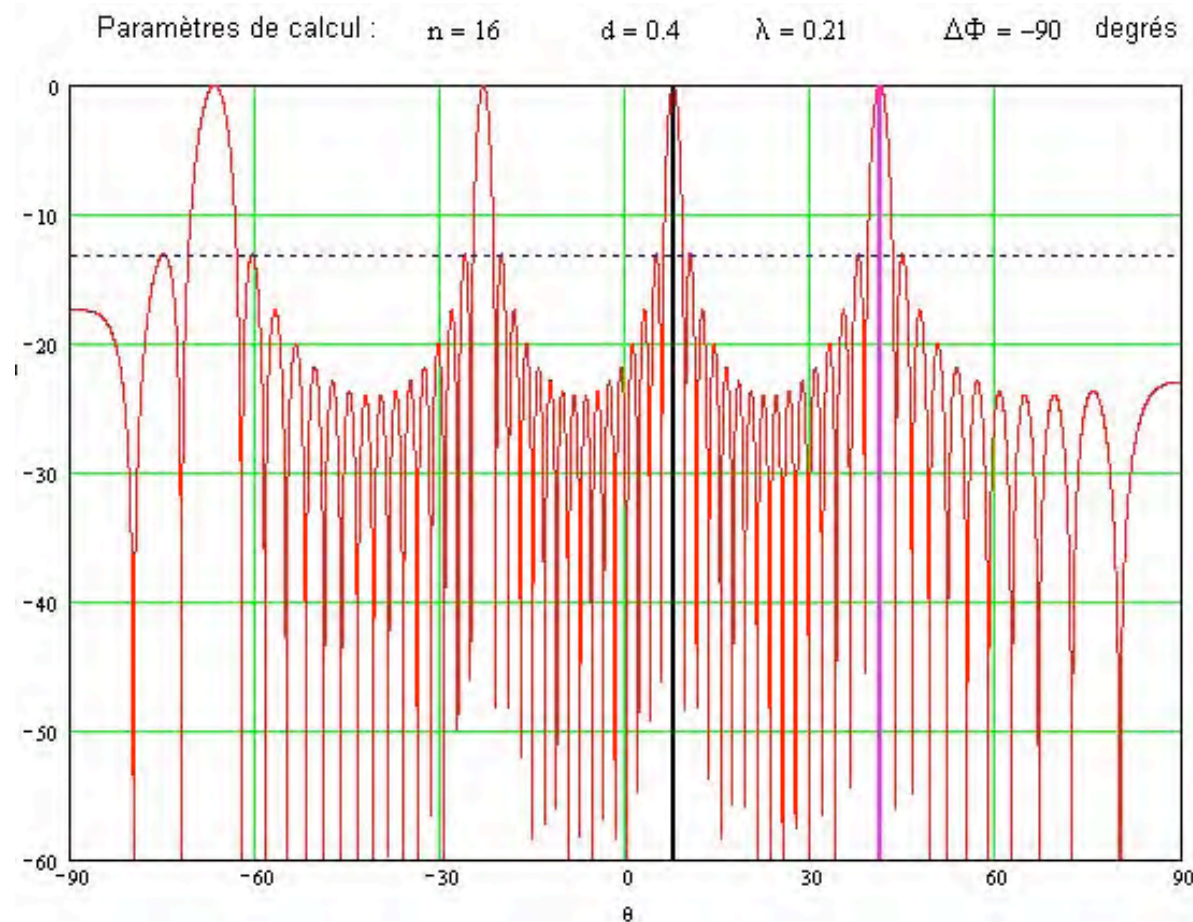


$$F(\theta) = \frac{\sin\left(\frac{n}{2}\left(\frac{2\pi d}{\lambda}\cos\theta + \Delta\phi\right)\right)}{n \sin\left(\frac{1}{2}\left(\frac{2\pi d}{\lambda}\cos\theta + \Delta\phi\right)\right)}$$

- Le maximum de rayonnement a lieu pour $\theta_0 = \text{Arc cos} \frac{-\Delta\phi\lambda}{2\pi d}$
- D'un point de vue général la partie linéaire de la phase sur l'alignement fixe la direction du lobe principal

Lobes de périodicité ou lobes de réseau (grating lobes)

- $F(\theta)$ est telle qu'il apparaît plusieurs lobes principaux appelés lobes de périodicité ou lobes de réseau



Réseau de 16 antennes
pointé à $\theta = 10^\circ$ avec $d/\lambda = 1,9$

- Pour qu'il n'apparaisse pas de lobes de réseau (cas $\Delta\phi$ constant)

$$d < \frac{\lambda}{1 + \cos(\theta_0)}$$

Suppression des lobes de périodicité

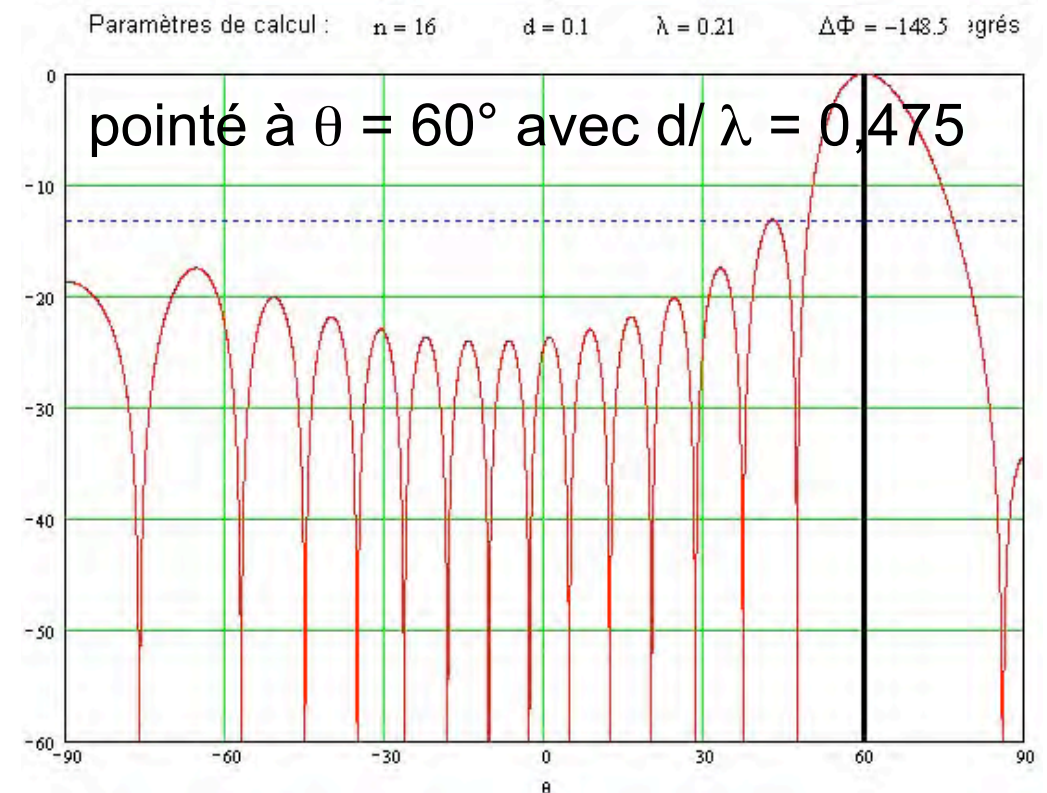
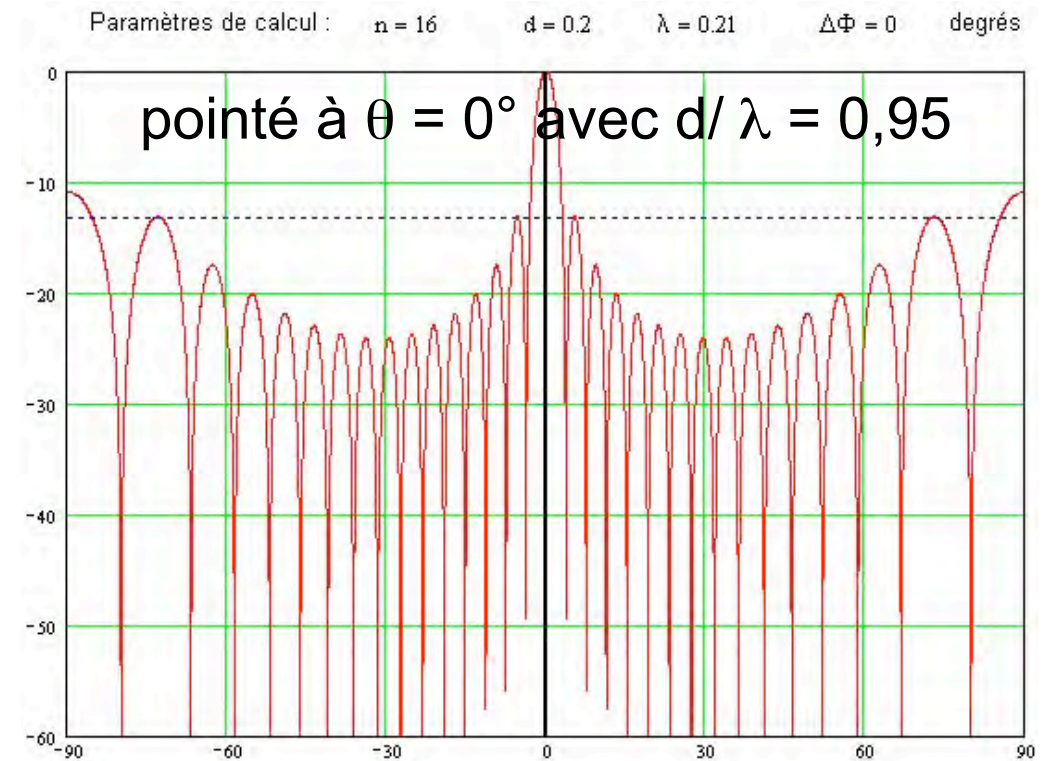
Pour qu'aucun lobe de périodicité ne puisse apparaître (cas $\Delta\phi$ constant) :

➤ si la direction du lobe principal est selon la normale au réseau (boresight), donc $\Delta\phi = 0$

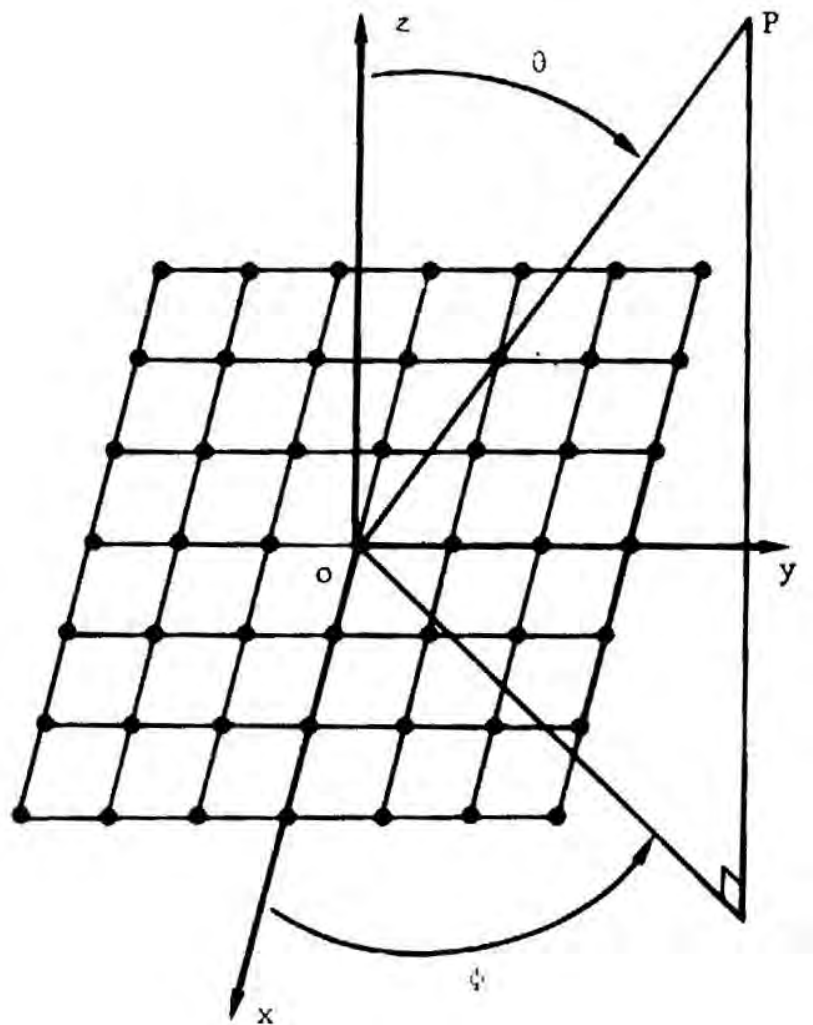
il faut $d < \lambda$

➤ quelle que soit la direction du maximum de rayonnement (pointage du réseau), donc $\forall \Delta\phi$

il faut $d < \frac{\lambda}{2}$



Réseau plan rectangulaire



➤ Cas de de n sources en x et m sources en y d'amplitude constante et d'un déphasage fixe $\Delta\phi_x$ selon x et $\Delta\phi_y$ selon y (la surface équiphasé en sortie du réseau est donc un plan)

➤ Le diagramme est séparable en x et y

$$F(\theta, \varphi) = \frac{\sin\left(\frac{n}{2}\left(\frac{2\pi d_x}{\lambda}\sin\theta\cos\varphi + \Delta\phi_x\right)\right)}{n\sin\left(\frac{1}{2}\left(\frac{2\pi d_x}{\lambda}\sin\theta\cos\varphi + \Delta\phi_x\right)\right)} \times \frac{\sin\left(\frac{m}{2}\left(\frac{2\pi d_y}{\lambda}\sin\theta\sin\varphi + \Delta\phi_y\right)\right)}{m\sin\left(\frac{1}{2}\left(\frac{2\pi d_y}{\lambda}\sin\theta\sin\varphi + \Delta\phi_y\right)\right)}$$

Réseau dense, "clairsemé", "à trous", apériodique

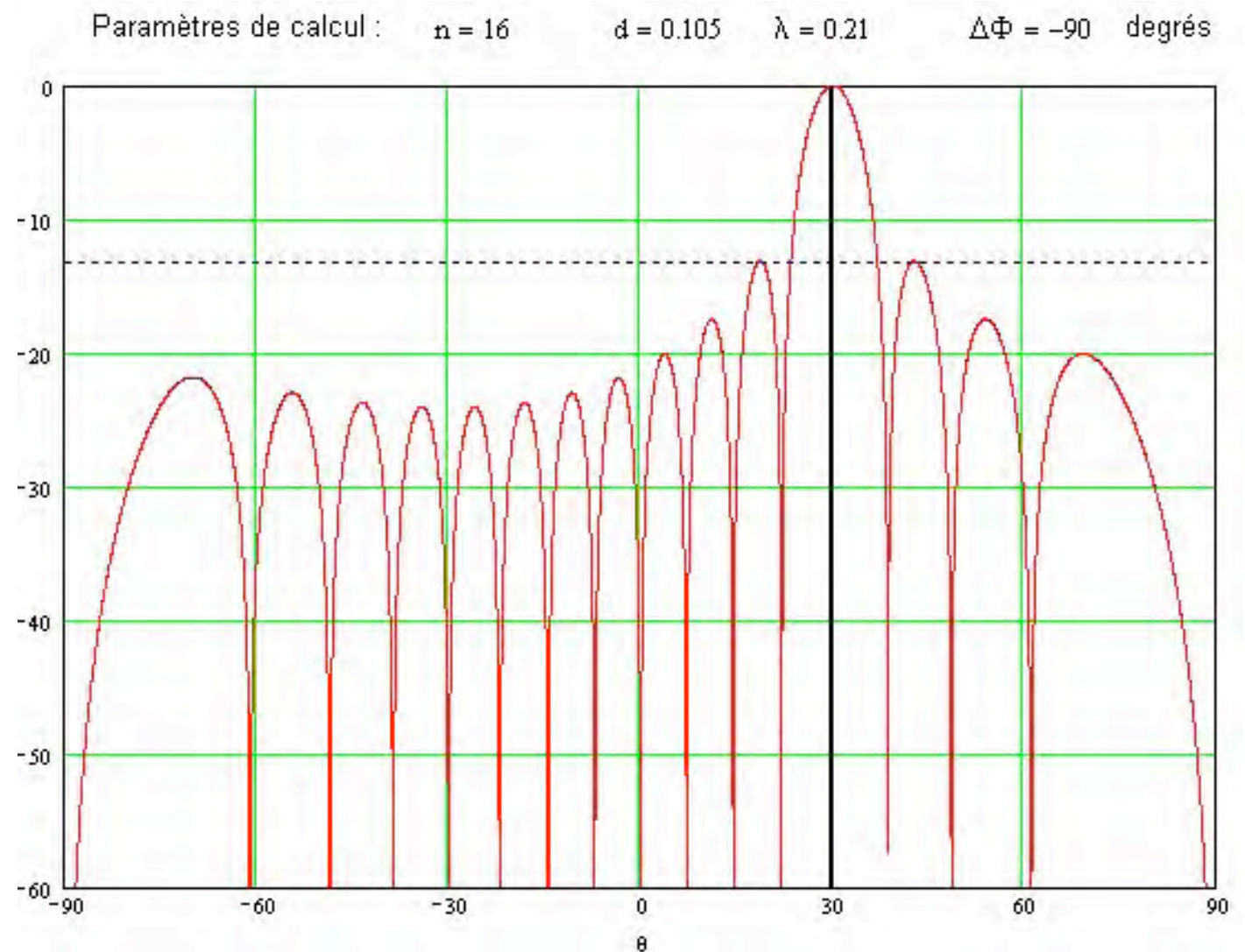
Il existe de nombreuses configurations de réseau :

- réseau dense (dense array) : éléments collés les uns aux autres, fort couplage, A_e de l'ordre de grandeur de A
- réseau "clairsemé" (sparse array) : éléments éloignés les uns des autres, faible couplage, $A_e \ll A$
- réseau "à trous" (thinned array) : certains éléments manquent (ou plutôt ne sont pas alimentés), pour obtenir un lobe étroit sans le très grand gain associé, $A_e < A$
- réseau apériodique (aperiodic array) : les éléments ne sont pas sur une grille régulière, suppression des lobes de réseau

Formation de faisceau (beamforming)

- Il s'agit de pointer le lobe principal du réseau dans une direction choisie. Pour cela on calcule les poids (en amplitude et phase) à appliquer sur le signal en provenance de chaque antenne.
- Il peut également s'agir de contrôler d'autres propriétés du diagramme : position des zéros, intensité des lobes secondaires, largeur du lobe principal.

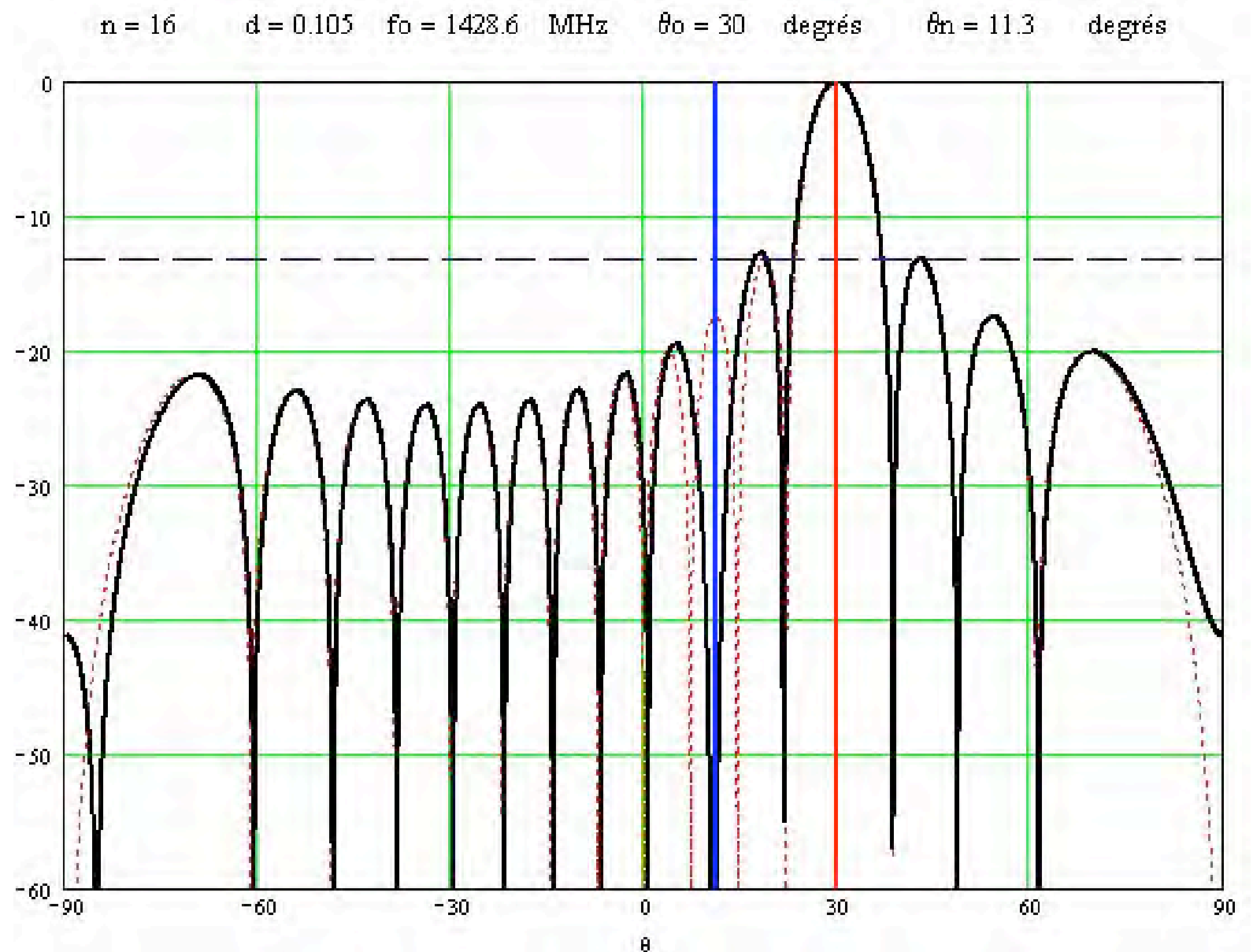
Faisceau formé à $\theta = 30^\circ$
avec 16 antennes isotropes
espacées de $\lambda/2$



Création de zéros dans le diagramme (beam nulling)

- Il s'agit de rendre le gain nul dans une ou plusieurs directions pour par exemple éliminer des interférences.
- Se fait comme le beamforming en ajustant les poids (amplitudes et phases) du signal provenant de chaque antenne.

Création d'un zéro dans le diagramme précédent pointé à $\theta_0 = 30^\circ$ (pointillés rouges) à la place du second lobe secondaire à $\theta_n = 11,3^\circ$



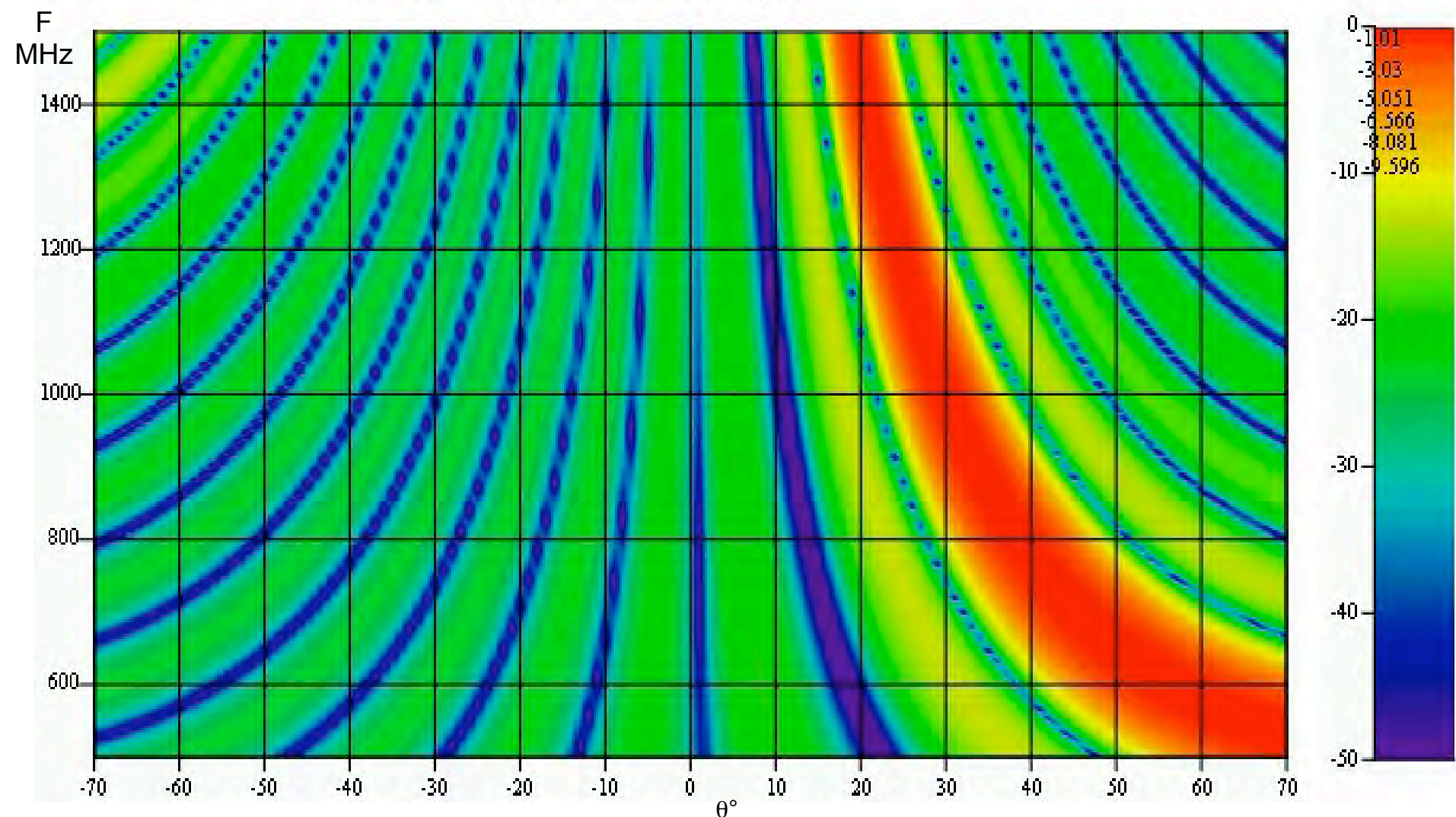
Réseau adaptatif (adaptive)

- Le beam nulling peut être déterministe ou adaptatif (adaptive)
- Le calcul déterministe forme le diagramme en fonction de données angulaires connues à l'avance
- Un réseau adaptatif effectue l'optimisation du diagramme par calcul en temps réel des coefficients à partir du signal reçu et peut ainsi s'adapter aux changements de l'environnement

Effet de la fréquence sur le beamforming

- Pour que le beamforming soit indépendant de la fréquence il faut que le déphasage soit fait par un délai vrai (time delay).
- Il est dans les faits souvent plus facile d'utiliser des déphaseurs ou une combinaison de déphaseurs et de délais vrais.

Paramètres calcul : $n = 16$ $d = 0.15$ $f_0 = 1000$ MHz $f_1 = 500$ MHz $f_2 = 1500$ MHz
 $\theta_0 = 30$ degrés $\theta_1 = 11.3$ degrés



Le faisceau formé
(pointage, zéro)
dépend alors de la
fréquence

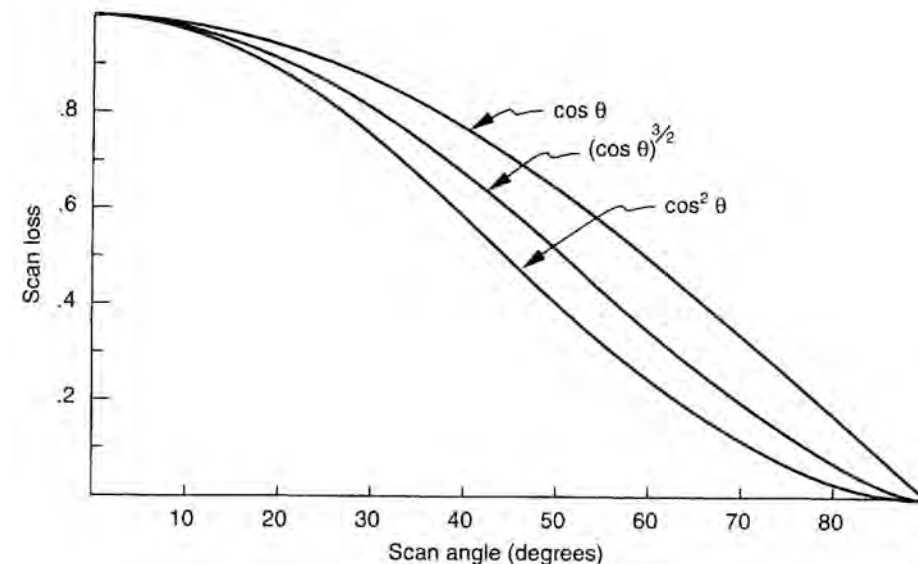
Perte de balayage et directions aveugles

- Idéalement la largeur du lobe est en $1/\cos\theta$, la directivité varie donc comme $\cos\theta$ (quand il n'y a pas de lobes de réseau)
- A cause de la dépendance du coefficient de réflexion Γ avec l'angle de scan due au couplage entre éléments, le gain ne suit pas cette loi
- La combinaison des 2 constitue la perte de balayage (scan loss)
- Avec un design soigneux $\cos\theta$ peut être approché dans un plan seulement et uniquement jusque vers $\theta = 60^\circ$

Dans les 2 plans la courbe

$$(\cos\theta)^{3/2}$$

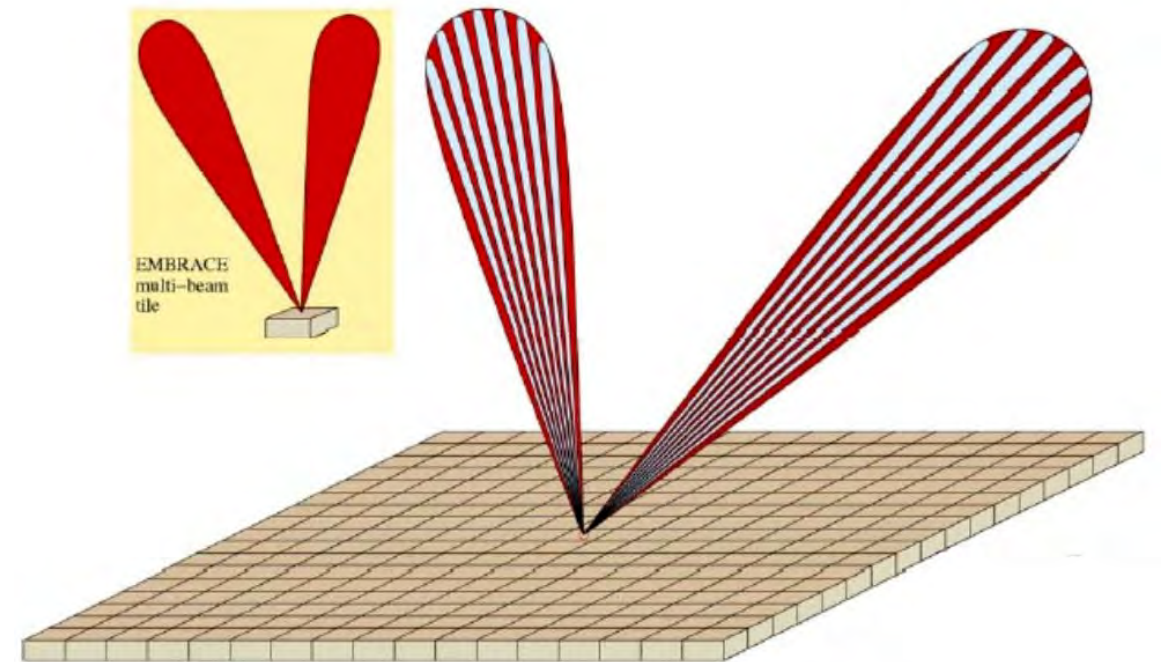
est une bonne hypothèse



- Certains réseaux peuvent avoir des directions où le gain chute fortement donnant des directions aveugles (scan blindness)

Largeur de champ (field of view, FOV) (1)

- Du théorème de multiplication des diagrammes, il résulte que le lobe principal étroit formé par le réseau a pour enveloppe le lobe de chaque élément constitutif du réseau



Pour EMBRACE cet élément est une tuile de 1 m de côté

Pour ATA il s'agit d'une parabole de 6 m de diamètre

- Le field of view est l'angle solide correspondant au lobe à - 3 dB (valeur habituelle) d'un élément.
- Il varie en λ^2 en général, mais peut être sensiblement indépendant de la fréquence si l'élément est intrinsèquement à bande large.

Largeur de champ (2)

Si la demi ouverture du lobe à - 3 dB est θ_m , le field of view est

$$FOV = 2\pi (1 - \cos\theta_m) \quad \text{en stéradians}$$

$$FOV = \left(\frac{180}{\pi}\right)^2 \times 2\pi (1 - \cos\theta_m) \quad \text{en degrés}^2 \text{ (sq deg)}$$

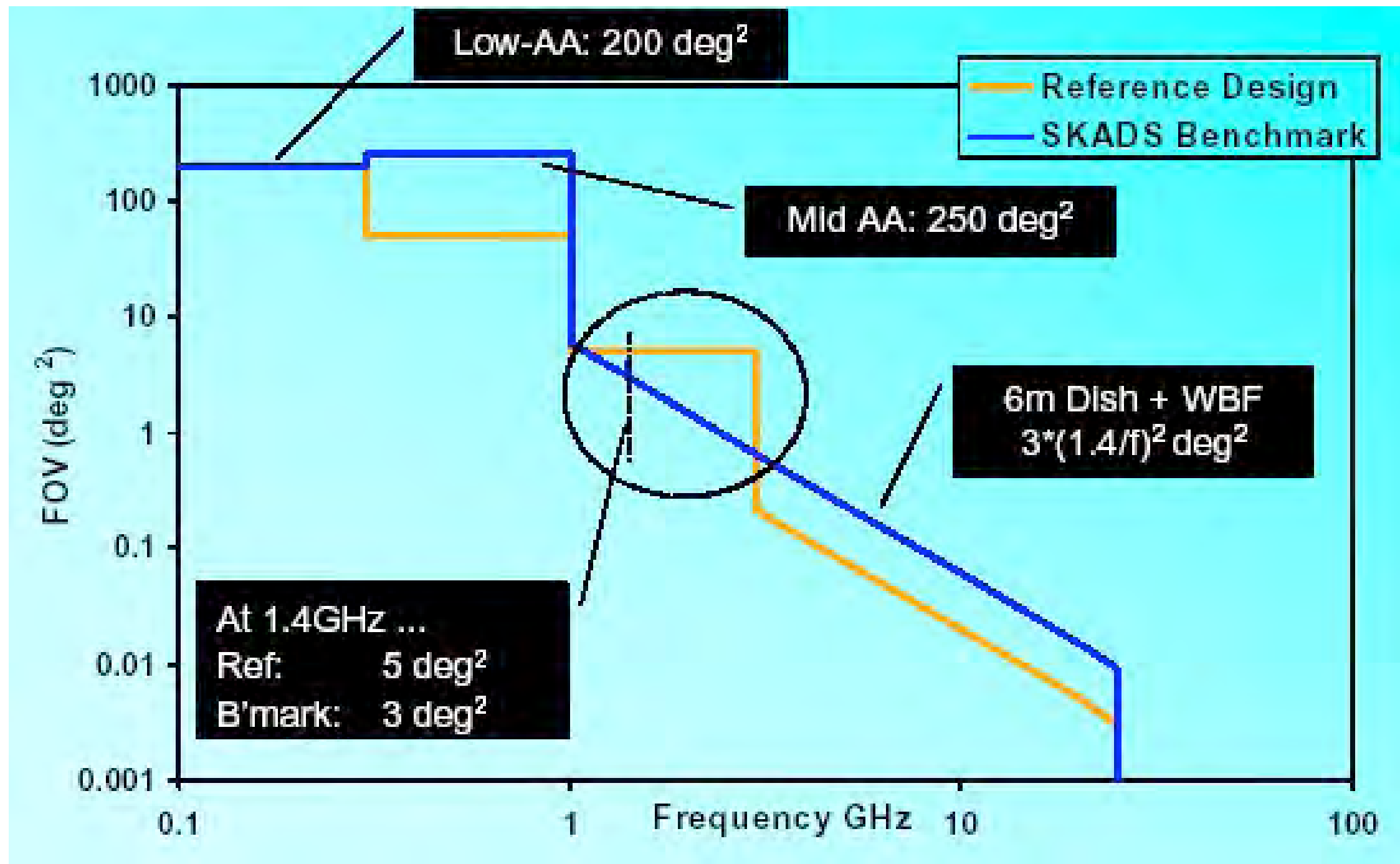
Si θ_m est petit on a

$$FOV \approx \pi\theta_m^2 \quad \text{en degrés}^2 \quad \text{avec } \theta_m \text{ en degrés}$$

Exemples :

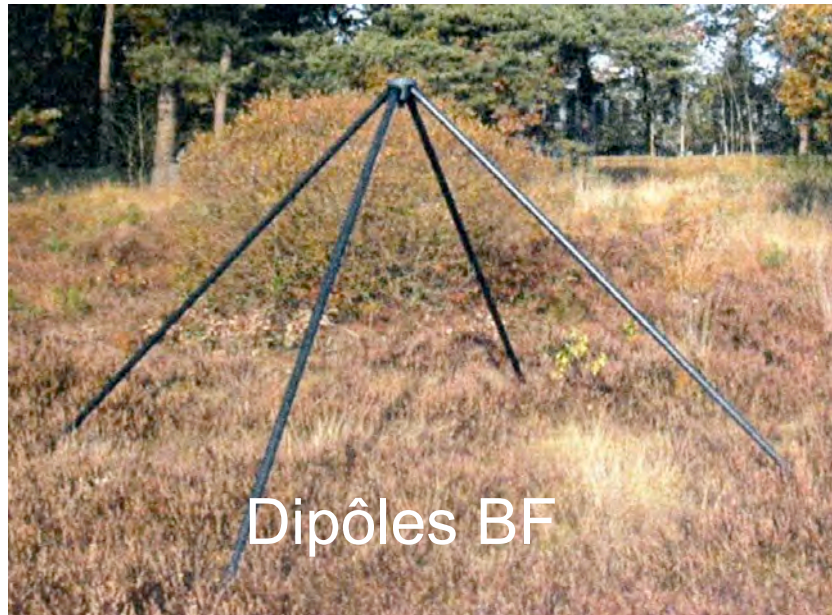
- Pour une parabole diamètre = 6 m @ 1 GHz : FOV \approx 9 sq deg
- Pour une tuile côté = 1 m @ 1 GHz : FOV \approx 350 sq deg

FOV pour SKA

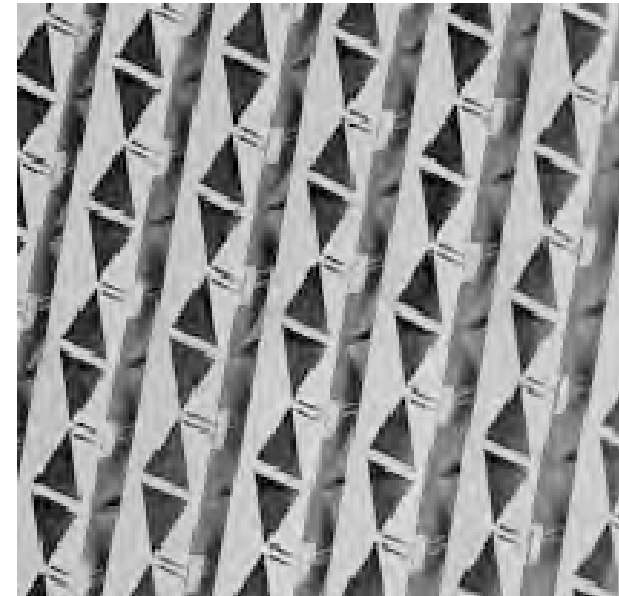


Antennes élémentaires pour réseaux phasés

LOFAR

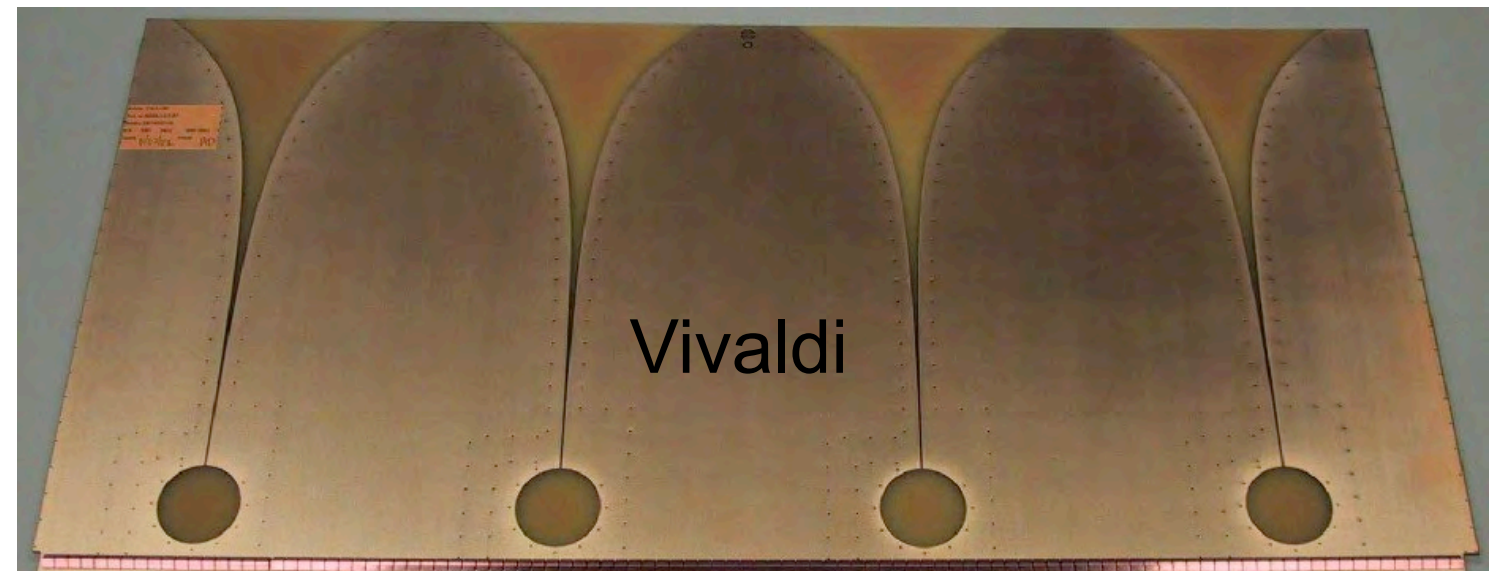
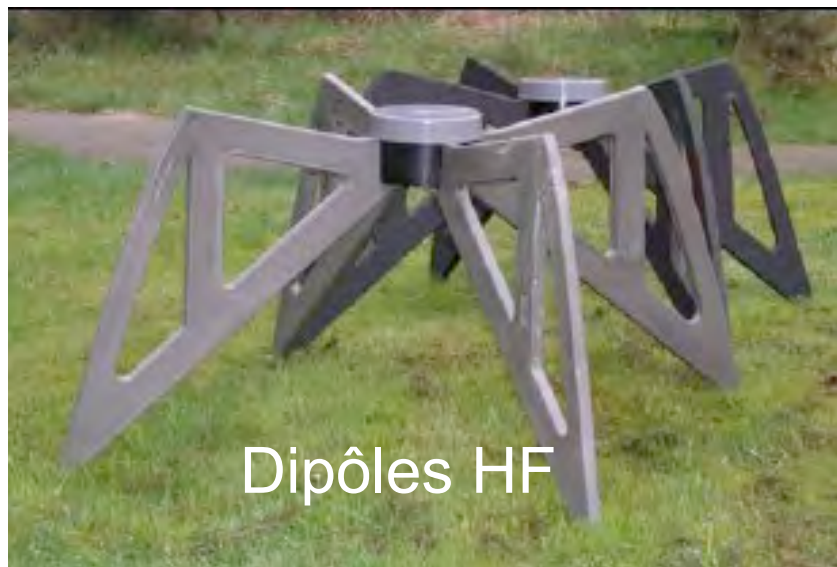


OSMA



Bowtie

SKA Aperture Array



Systemes multi faisceaux (multi beam)

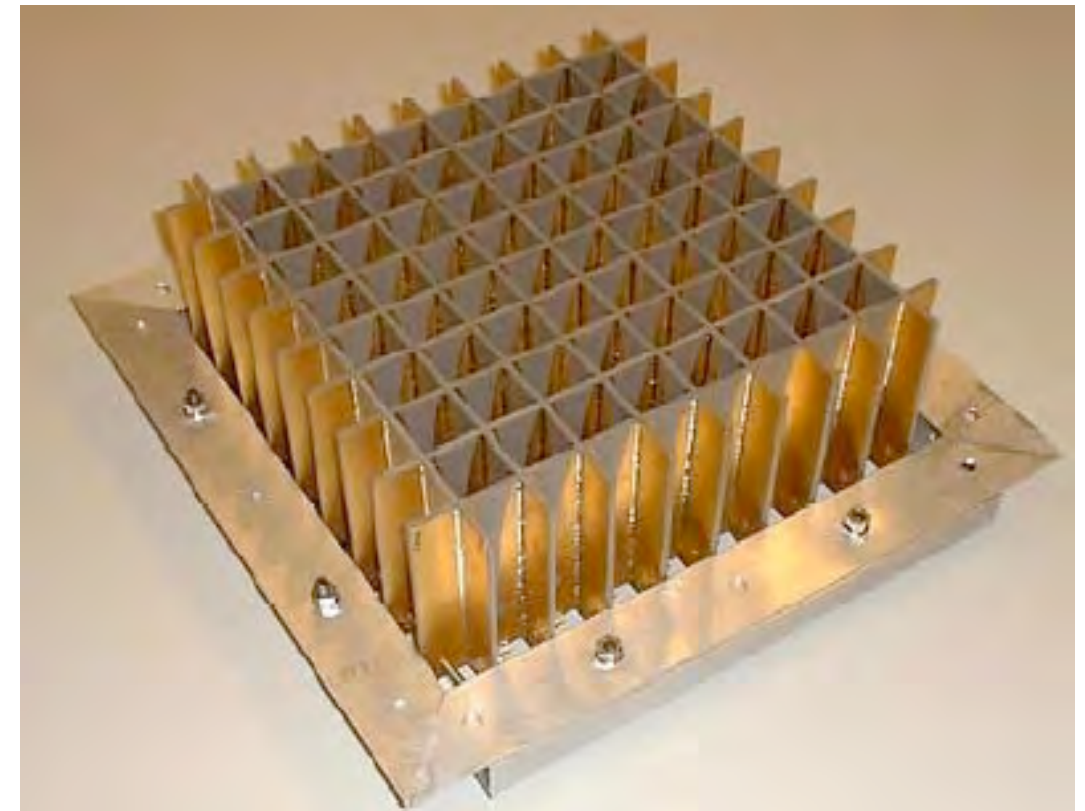
- Il existe plusieurs possibilités de créer plusieurs faisceaux avec la même antenne.
- On peut utiliser un système multi-pixels au foyer d'un réflecteur :
 - il s'agit de réseaux focaux (FPA : focal plane array)
 - il y a 2 catégories de réseaux focaux :
 - les réseaux de cornets (multi feed cluster : MFC)
 - les réseaux phasés au foyer (phased array feed : PAF)
- On peut également directement échantillonner le front d'onde incident :
 - il s'agit alors d'un aperture array (AA)
- Dans un réseau de cornets, chaque cornet correspond à un faisceau.
- Dans un réseau phasé au foyer et un aperture array, tous les éléments contribuent à tous les faisceaux.

Systemes multi faisceaux : FPA



Réseau de plusieurs cornets
Chaque cornet correspond à un beam

Réseau phasé au foyer
Le champ dans la zone focale est échantillonné par tous les éléments du PAF, et tous les éléments contribuent à chacun des faisceaux



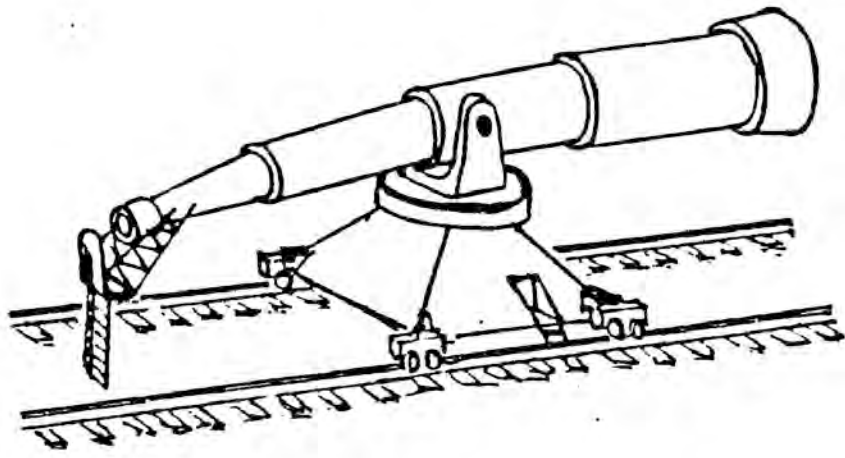
Systemes multi faisceaux : AA

Aperture array : tous les éléments participent à chaque faisceau

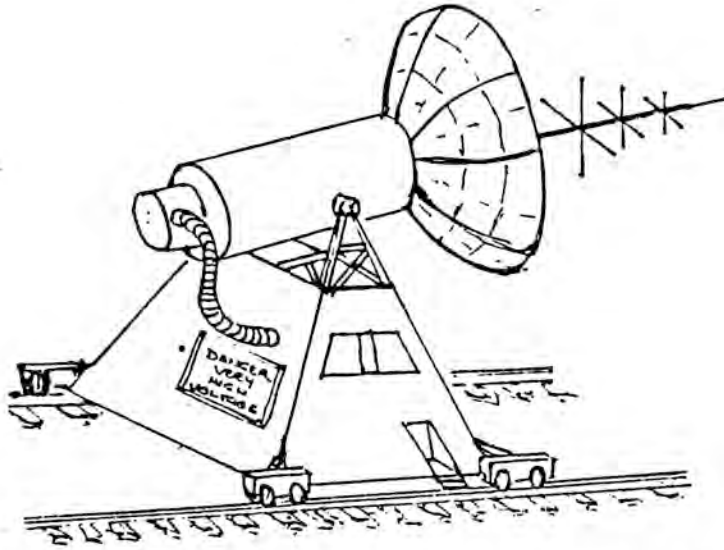


- L'aperture array est le plus puissant des systèmes multifaisceaux.
- On peut en effet créer plusieurs FOV, car chaque tuile est elle-même constituée d'éléments plus petits encore.
- En 2007 il est en revanche le concept jugé le plus risqué.

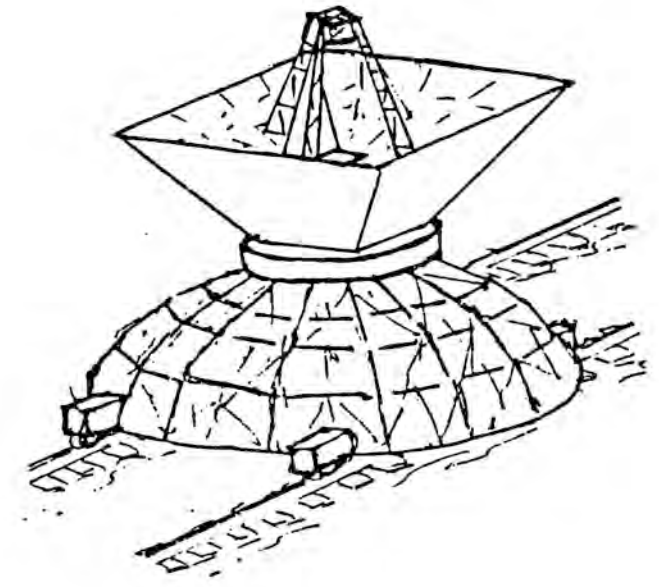
Les étapes de la construction d'une antenne



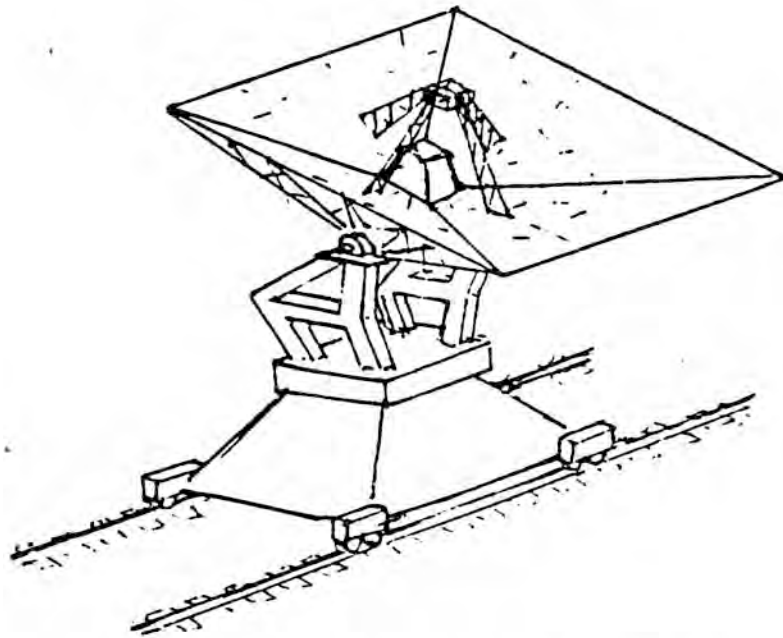
WHAT THE CLIENT HAD ENVISAGED



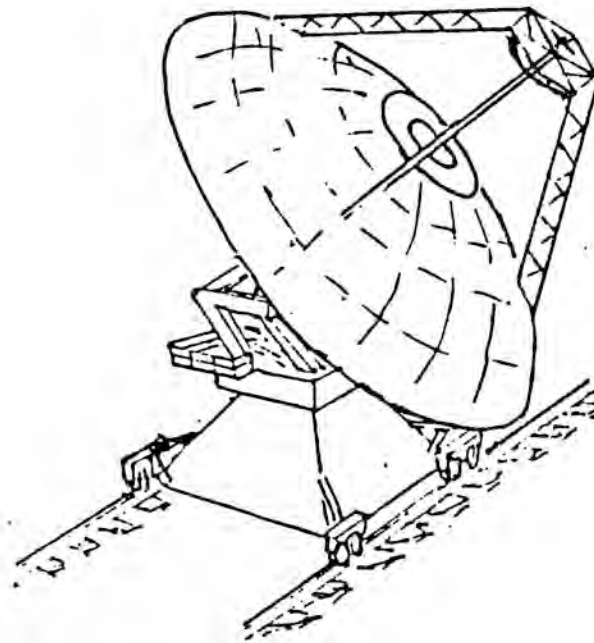
WHAT THE GOVERNMENT THOUGHT THEY WERE FUNDING



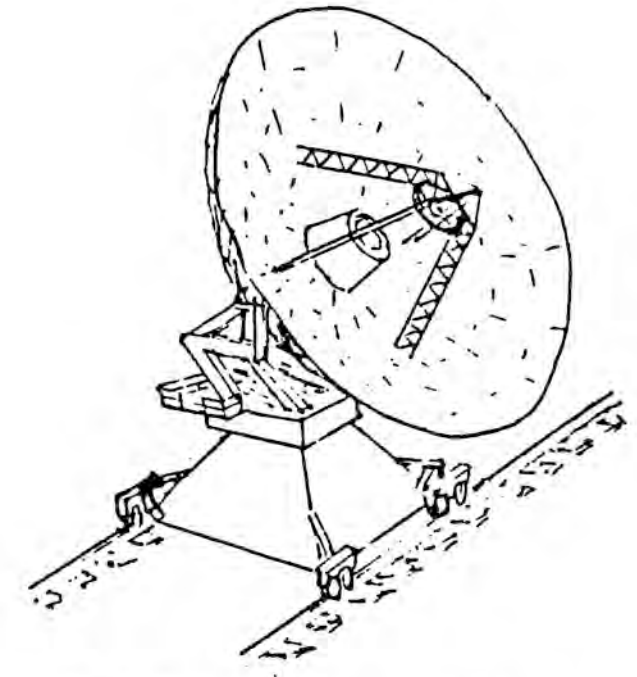
HOW THE CONSULTANT CONCEIVED IT



HOW THE SITE CONSULTANT MODIFIED IT



WHAT THE CONTRACTOR FABRICATED



HOW THE CONTRACTOR BUILT IT

Reproduced from an ATNF cartoon

C'est fini !!

