

# Radartutorial

## Chapitre 3 : Antennes

(Éditeur: Christian Wolff, traduction en langue française et révision:  
Pierre Vaillant Version 22 novembre 2011)

### Sommaire

|  |           |
|--|-----------|
| <b>RADARTUTORIAL .....</b>                         | <b>1</b>  |
| <b>LES FONCTIONS DE L'ANTENNE .....</b>            | <b>2</b>  |
| <b>CARACTERISTIQUES DE L'ANTENNE.....</b>          | <b>2</b>  |
| <i>Gain d'antenne .....</i>                        | <i>2</i>  |
| <i>Diagramme d'émission.....</i>                   | <i>3</i>  |
| <i>Ouverture de l'antenne.....</i>                 | <i>4</i>  |
| <i>Polarisation .....</i>                          | <i>4</i>  |
| <b>TYPES .....</b>                                 | <b>5</b>  |
| <i>Antenne demi-onde .....</i>                     | <i>5</i>  |
| <i>Antenne Yagi-Uda .....</i>                      | <i>6</i>  |
| <i>Antenne log-périodique .....</i>                | <i>8</i>  |
| <i>Antenne parabolique .....</i>                   | <i>9</i>  |
| <i>Antenne Cassegrain.....</i>                     | <i>14</i> |
| <i>Antenne réseau à commande de phase.....</i>     | <i>16</i> |
| <b>STRATEGIES PARTICULIERES D'UTILISATION.....</b> | <b>21</b> |
| <i>Balayage conique .....</i>                      | <i>21</i> |
| <i>Antenne monopulse ou à mono-impulsion.....</i>  | <i>22</i> |
| <i>Faisceaux bas et haut .....</i>                 | <i>24</i> |
| <b>SOMMAIRE .....</b>                              | <b>24</b> |
| <b>QUESTIONNAIRE SUR LES ANTENNES.....</b>         | <b>25</b> |

### Objectifs d'apprentissage

Les objectifs de cette section sont de présenter les notions fondamentales régissant les antennes et d'introduire les caractéristiques de certaines antennes communément utilisées dans le domaine des radars. À la fin de ce module, l'étudiant devrait pouvoir:

- Décrire la directivité et le gain de puissance d'une antenne;
- Décrire comment différents types d'antennes focalisent le faisceau et leur diagramme d'émission, en particulier les antennes parabolique communément utilisées dans les radars;
- Décrire les caractéristiques fondamentales du cornet d'émission;
- Décrire ce qu'est une antenne monopulsée.

## Les fonctions de l'antenne

L'antenne est la partie visible d'un système radioélectrique qui sert à la transmission et la réception du signal dans l'espace libre. Elle sert à concentrer le signal produit par l'émetteur vers l'espace libre et/ou à percevoir les faibles signaux venant de l'extérieur pour les diriger vers le récepteur. Les modules de cette section traitent des antennes utilisées dans les radars.

L'antenne est une des parties les plus importantes d'un radar. Elle réalise les fonctions essentielles suivantes:

- Elle transfère la puissance de l'émetteur à des signaux dans l'espace avec l'efficacité voulue et la selon la répartition nécessaire. Le même processus est appliqué à la réception.
- Elle permet d'obtenir le diagramme de rayonnement souhaité. En général il sera suffisamment étroit dans le plan horizontal pour obtenir la précision et la résolution demandée en azimut.
- Elle doit assurer la mise à jour de la position de la cible à la fréquence voulue. Dans le cas d'une antenne à balayage mécanique, cette mise à jour se fera au rythme de la rotation de l'antenne. Une vitesse de rotation élevée peut poser des problèmes mécaniques importants, notamment pour les équipements qui émettent dans des bandes de fréquences nécessitant l'utilisation d'antennes imposantes et pouvant peser plusieurs tonnes.
- Elle doit mesurer sa direction de pointage avec une grande précision.

La structure de l'antenne doit assurer la constance des caractéristiques opérationnelles quelques soient les conditions environnementales. L'emploi de radômes est courant sur les sites exposés à des conditions relativement dures.

On peut démontrer que les performances de base d'un radar sont directement proportionnelles au produit de la surface ou de l'ouverture de l'antenne par la puissance moyenne émise. Les améliorations apportées à l'antenne ont donc des répercussions immédiates sur les performances du système.

En considérant les fonctions et l'efficacité que l'on attend d'une antenne, on choisira généralement l'une des deux options suivantes:

- l'antenne parabolique
- l'antenne réseau à commande de phase

## Caractéristiques de l'antenne

### Gain d'antenne

Le gain est le rapport entre l'énergie irradiée dans une direction particulière et l'énergie totale émise par l'antenne dans toutes les directions. Il s'agit donc du taux de concentration de l'énergie dans une direction donnée par rapport celui d'une antenne isotrope. Plus l'antenne est directionnelle, plus le gain est grand. Le gain s'applique également à la réception et a la même valeur.



Figure 1: Arrangement des cornets d'émission du P-40 («Long Track»)

## Diagramme d'émission

La plupart des systèmes radiants ont des directions privilégiées d'émission, ils sont **anisotropes**. Il est habituel de mesurer l'émission autour d'une antenne c'est ce qui s'appelle le diagramme d'émission. La position des maxima et des minima dépend du type d'antenne et de ses caractéristiques particulières.

Il s'agit donc d'un diagramme *énergie* versus l'angle d'*azimut* ou d'*élévation* qui peut être affiché sur différents type de graphiques. La façon la plus courante est d'utiliser un graphique en coordonnées polaires comme sur la Figure 2. L'antenne est le point central et l'intensité autour de ce point, selon l'angle de visée, est indiquée par les cercles concentriques. L'intensité est normalisée, c'est-à-dire que l'énergie pointée dans une direction donnée est le rapport de l'énergie dans cette direction à celle dans la direction d'émission maximale, appelée axe du lobe principal. Dans la Figure 2, ce lobe est dans l'angle zéro degré, habituellement utilisé pour indiquer le Nord. Il est important d'utiliser les termes exacts, voici donc quelques définitions:

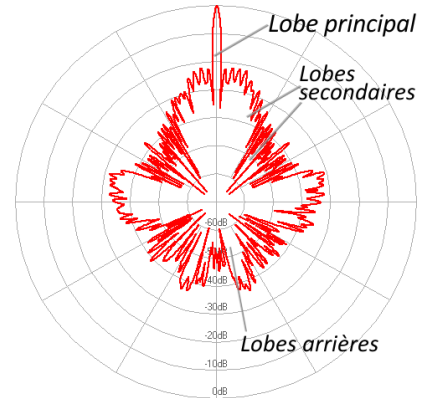


Figure 2: Diagramme d'émission d'une antenne en coordonnées polaires

### Lobe principal et lobes secondaires

Le diagramme montré sur les deux figures comporte plusieurs pics appelés lobes. L'énergie émise dans un de ces lobes est très supérieure à celle dans les autres directions. Il s'agit du **lobe principal**. Les autres sont appelés les **lobes secondaires** ou lobes mineurs. Certaines antennes ont plusieurs lobes principaux, par exemple les antennes pour la télévision qui sont conçues pour émettre vers les zones plus peuplées d'une région. D'autres antennes n'ont qu'un seul lobe principal, c'est le cas des antennes radar qui sont hautement directionnelles.

Les **lobes secondaires** sont des pics d'émission dans des directions différentes de l'axe du faisceau principal. Habituellement, ceux-ci sont indésirables puisqu'ils utilisent une partie de l'énergie émise en pure perte. Il est impossible de les éliminer complètement mais ils peuvent être minimisés. L'intensité de ces lobes secondaires est une des caractéristiques importantes d'une antenne et elle est exprimée en décibels. Le lobe arrière est particulièrement important car il indique l'énergie transmise ou reçue de la direction opposée à l'axe du faisceau principal.

### Largeur du faisceau

La largeur du faisceau est défini comme la région angulaire de chaque côté de l'axe du lobe principal où l'énergie radiée est supérieure à la moitié de l'intensité dans l'axe maximal, ou  $-3$  dB en terme relatif. Cet angle est aussi appelé l'angle d'ouverture. Dans les deux graphiques, il est se situe entre les lignes rouges. Comme on peut le voir, l'énergie émise n'est pas nulle quand on continue de chaque côté du lobe principal mais elle décroît rapidement.

La largeur du faisceau est mesuré tant selon l'azimut ( $\theta_{AZ}$  ou  $\phi_{AZ}$ ) que l'élévation ( $\theta_{éi}$ ). Elle peut ainsi être différente dans ces deux directions orthogonales.

### Rapport avant/arrière

Le rapport avant/arrière des lobes d'une antenne est le rapport entre l'énergie émise dans le lobe principal et la direction diamétralement opposée. Une grande valeur de ce rapport est désirable puisqu'elle indique qu'un minimum d'énergie est irradié vers l'arrière de l'antenne.

## Ouverture de l'antenne

La section efficace d'ouverture d'une antenne  $A_e$  est la surface en coupe que représente l'antenne en émission ou en réception. Il s'agit d'un paramètre crucial de la performance de l'antenne. Le gain ( $G$ ) est relié à l'ouverture par :

$$G = \frac{4\pi \cdot A_e}{\lambda^2} \quad ; \quad A_e = K_a A \quad \text{Où: } \lambda = \text{longueur d'onde} \quad (1)$$

$A_e$  = section efficace d'ouverture de l'antenne  
 $A$  = surface de l'antenne  
 $K_a$  = rapport d'efficacité d'ouverture

Le rapport d'efficacité dépend de la distribution d'énergie dans l'ouverture. Si la distribution est linéaire  $K_a = 1$  mais cela signifie un nombre important de lobes secondaires. En pratique, on veut limiter l'énergie émise dans ces lobes pour obtenir une plus grande directivité et donc  $K_a < 1$  ce qui donne  $A_e < A$ .

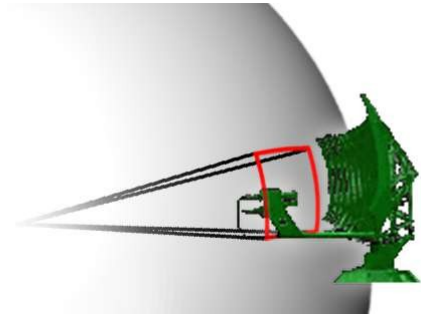


Figure 3: L'ouverture de l'antenne est la section utile de l'antenne par rapport à la sphère isotrope de réception

## Polarisation

L'onde électromagnétique émise par une antenne est composée d'une variation du champ électrique et du champ magnétique ayant des axes orthogonaux (à 90 degrés l'un de l'autre). Le champ électrique détermine le plan de polarisation de l'onde. Une antenne dipôle simple capte le signal maximum d'une onde électromagnétique si elle est orientée dans le même plan que le champ électrique.

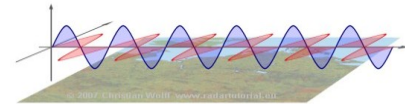


Figure 4: Champ électrique linéaire polarisé verticalement (bleu) ou horizontalement (rouge).

## Polarisation linéaire

Des antennes orientées verticalement ou horizontalement sont conçues pour recevoir des ondes polarisées respectivement dans ces deux directions. Le changement de polarisation de l'onde va donc altérer le niveau de réception du signal si l'antenne est orientée dans l'axe perpendiculaire.

Deux plans de polarisation sont surtout utilisés:

- Dans les ondes polarisées verticalement, le champ électrique varie dans l'axe vertical;
- Inversement, dans les ondes polarisées horizontalement, le champ électrique varie horizontalement
- Le maximum de réception se produira quand l'antenne de réception ( $R_x$ ) sera orientée dans le même plan que celle de transmission ( $T_x$ ).
- Il est évident que la polarisation linéaire peut être dans une infinité de directions mais les plus communes, outre celles verticales et horizontales, sont:
- Pente de + 45° avec l'horizontale ;
- Pente - 45°.

## Polarisation circulaire

Dans la polarisation circulaire, le champ électrique fait une rotation horaire ou antihoraire de 360 degrés à chaque cycle d'émission de l'onde radioélectrique. On utilise généralement les variations du champ électrique pour définir la polarisation circulaire car c'est la variation de son intensité (volts, millivolts ou microvolts par mètre) qui est mesurée par les appareils de détection.

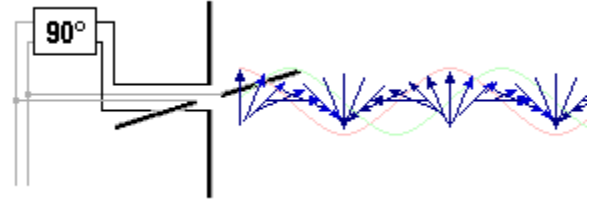


Figure 5: Évolution du champ électrique dans une onde de polarisation circulaire

Dans ce cas particulier, le déphasage entre les champs électriques et magnétiques est de 90° et les deux composantes ont la même amplitude. On distingue alors les cas de polarisation circulaire gauche et circulaire droite selon le sens de l'enroulement autour de l'axe de propagation du signal. Si le déphasage n'est pas de 90°, l'amplitude des deux champs varie avec le temps et la polarisation est dite elliptique.

Pour un maximum de détection, l'antenne réceptrice doit être orientée dans le même plan de polarisation que le retour de la cible. Une mauvaise orientation pourra occasionner des pertes de 20 à 30 dB. Une onde polarisée circulairement est rétrodiffusée dans le sens opposé de rotation par une goutte de pluie sphérique. À la réception, l'antenne rejette les ondes polarisées dans la mauvaise direction ce qui permet de filtrer les précipitations du signal radar. Par contre, la réflexion d'un avion aura une composante assez importante de la rotation originale pour être détectée puisque qu'un aéronef n'est pas sphérique.

Ainsi, lorsque de larges se précipitations risque de faire perdre au contrôleur aérien le signal des aéronefs, ce dernier passera à l'émission d'une onde circulairement polarisée pour servir de filtre.

## Dépolarisation

Quand une onde électromagnétique passe dans un volume d'air rempli de diffuseurs (comme de la pluie), l'orientation du plan de polarisation change. Un radar météorologique à polarisation double, qui émet et reçoit simultanément des ondes polarisés verticalement et horizontalement, peut comparer les retours dans les directions similaires ou croisées:

- HH - transmission et réception horizontales;
- VV - transmission et réception verticales;
- HV - transmission horizontale et réception verticale;
- VH - transmission verticale et réception horizontale.

## Types

### Antenne demi-onde

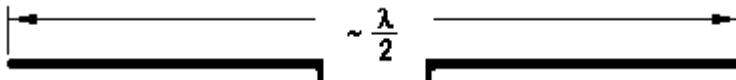


Figure 6: Schéma d'une antenne demi-onde

La plupart des antennes émettent dans une direction privilégiée, elles sont *anisotropes*. Le terme sert à les différencier d'un émetteur isotrope qui irradie également dans toutes les directions.

Une antenne demi-onde, ou dipôle demi-onde, est faite de deux tiges, brins conducteurs, ou tubes ayant chacune une longueur égale à  $\frac{1}{4}$  de la longueur d'onde de la fréquence émise. Il s'agit de l'unité fondamentale à la base de plusieurs antennes complexes. Pour une telle antenne, le courant électrique (en ampères) est maximal au centre et minimal aux extrémités. Inversement, la tension (en volts) est minimale au centre et maximale aux extrémités.

L'énergie peut être fournie à une antenne demi-onde en divisant celle-ci en son centre et en connectant la ligne de transmission du dernier étage du transmetteur aux deux bouts se faisant face au centre. Comme l'antenne est alimentée au centre, le point de basse tension et fort courant, ce type d'alimentation est connu comme alimentation centrale ou *alimentation en courant*.

Des ondes stationnaires s'obtiennent, en courant et tension, comme avec un circuit oscillant parallèle. Cependant, contrairement à une antenne isotrope qui a un gain de 1, une antenne demi-onde a un gain approximatif de 1,5. Le champ électromagnétique maximal prend la forme d'un «beignet» (ou tore) dont l'axe de rotation est parallèle à l'axe du dipôle.

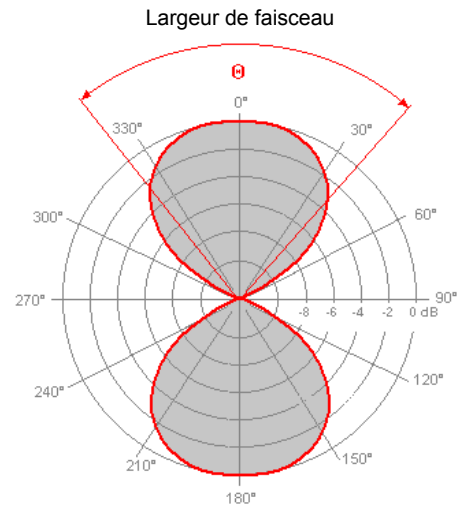


Figure 7: Diagramme d'émission d'un dipôle demi-onde

Le dipôle demi-onde peut être expliqué à partir d'un simple circuit résonant. Imaginons que les plaques du condensateur d'un circuit résonnant sont légèrement ouvertes. Cela diminue la capacité, mais le condensateur garde ses propriétés. En augmentant l'angle d'ouverture entre les plaques, les lignes de champ électrique couvrent une distance de plus en plus grande et deviennent courbées. Le condensateur devient de plus en plus méconnaissables et les lignes de champ ne sont plus limitées à la section entre les plaques mais s'étendent dans l'espace libre. Le résultat est un dipôle demi-onde qui est alimenté par le centre.

## Antenne Yagi-Uda

Une antenne très commune est celle de Yagi-Uda (du nom de ses inventeurs japonais), raccourcit le plus souvent comme d'antenne Yagi.

Elle a été développée pour les courtes longueurs d'onde allant jusqu'à la bande UHF. Elle est très répandue à cause de sa simplicité et de son fort gain directionnel. On les voit le plus souvent pour la réception radio et télévisuelle mais elles sont également utilisées dans certains radars.

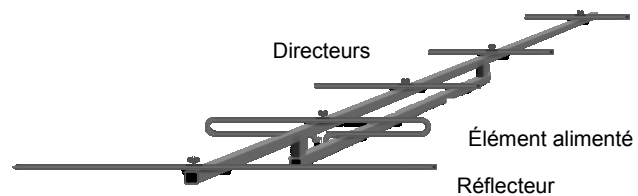


Figure 8: Une section d'antenne Yagi-Uda avec une section dipolaire repliée pour en augmenter l'impédance et donc la puissance émise, trois éléments parasites appelés «directeurs» dans la direction où on veut émettre et un autre élément parasites appelé «réflecteur» à l'arrière du dipôle.

Une section d'antenne Yagi consiste en une antenne dipolaire et une série d'éléments parasites, montés parallèlement par leur centre sur une tige conductrice. Les éléments parasites sont le plus souvent soudés à la tige mais l'antenne dipolaire, qui est alimentée en son centre, ne l'est pas. Le dipôle reçoit et transmet le signal ce qui induit un courant dans les éléments parasites, la tige qui les relie n'interférant pas dans le processus. Elle peut donc être assimilée à une antenne réseau dont les éléments seraient alimentés par induction mutuelle.

## Principe d'opération

Une antenne Yagi comporte minimalement trois éléments: le dipôle, un directeur et un réflecteur. La longueur des parasites doit différer de celle du dipôle pour ne pas avoir la même fréquence de résonance. L'espacement entre les éléments n'est pas uniforme non plus afin que les ondes transmises par le dipôle et par les éléments parasites soient en phase dans la direction désirée mais hors-phase dans la direction opposée.

Si le parasite est plus long que l'antenne dipôle, habituellement de 15 %, il aura une inductance et travaillera comme un réflecteur pour l'onde vers le dipôle. Les parasites plus courts, généralement de 5 % pour chaque brin successif, agiront comme une capacité dans un circuit et seront appelés «directeurs» car ils semblent diriger l'onde du dipôle vers la direction désirée tout en l'amplifiant. En général, plus le nombre d'éléments parasites utilisé est important, plus le gain et la capacité à focaliser sont grands. Cependant, en augmentant ce nombre, on diminue la bande passante.

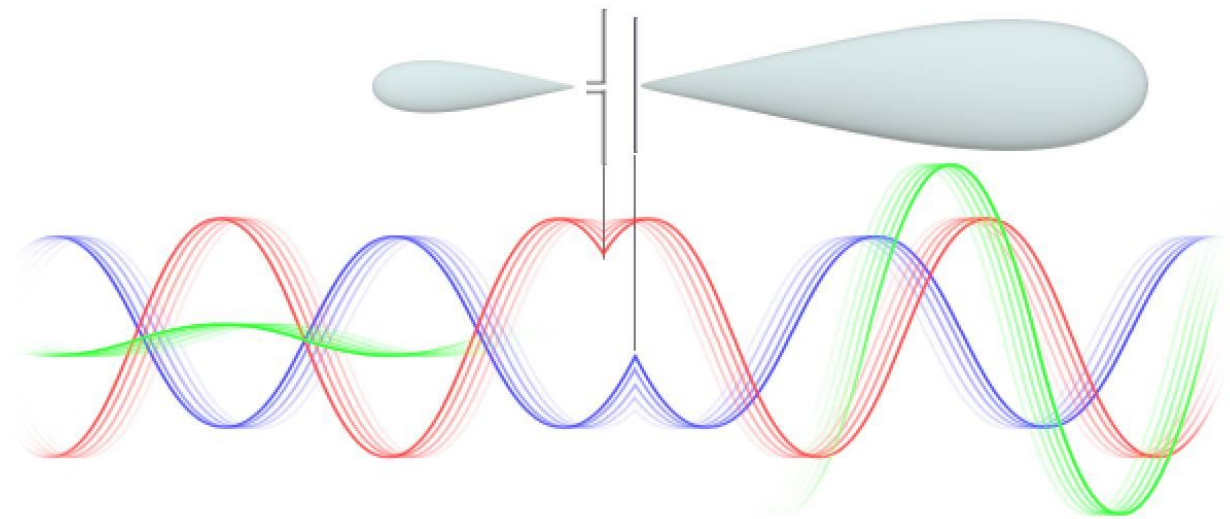


Figure 9: Une antenne à deux éléments, un dipôle demi-onde résonant comme source et une tige parasite plus courte. On peut voir l'interaction des ondes émises par ces éléments (en rouge et bleu) qui donne le résultat en vert.

Pour comprendre le fonctionnement de l'antenne, prenons le dipôle avec un seul parasite plus court (directeur) de la Figure 9. L'onde du dipôle crée une onde par induction sur le parasite. Celle-ci aura un délai par rapport à l'onde incidente à cause du temps de réaction de la capacité du parasite en tension et courant. Si la distance est bien choisie, soit une distance entre les éléments égale au délai, les deux ondes seront en phase et s'additionneront dans la direction du directeur et se soustrairont dans la direction inverse car elles y seront hors-phase.

Cet assemblage simple peut être amélioré en ajoutant un élément réflecteur dans la direction opposée au directeur. En choisissant bien la distance au dipôle et la longueur de cet élément, son onde sera additive avec celle du directeur dans la direction désirée et minimisera le signal dans la direction opposée. Si on raccourci légèrement la longueur du directeur et si on le place à une distance plus faible que la demi-longueur d'onde du signal, on peut augmenter le gain jusqu'à 6 dB en synchronisant la phase des trois ondes produites.

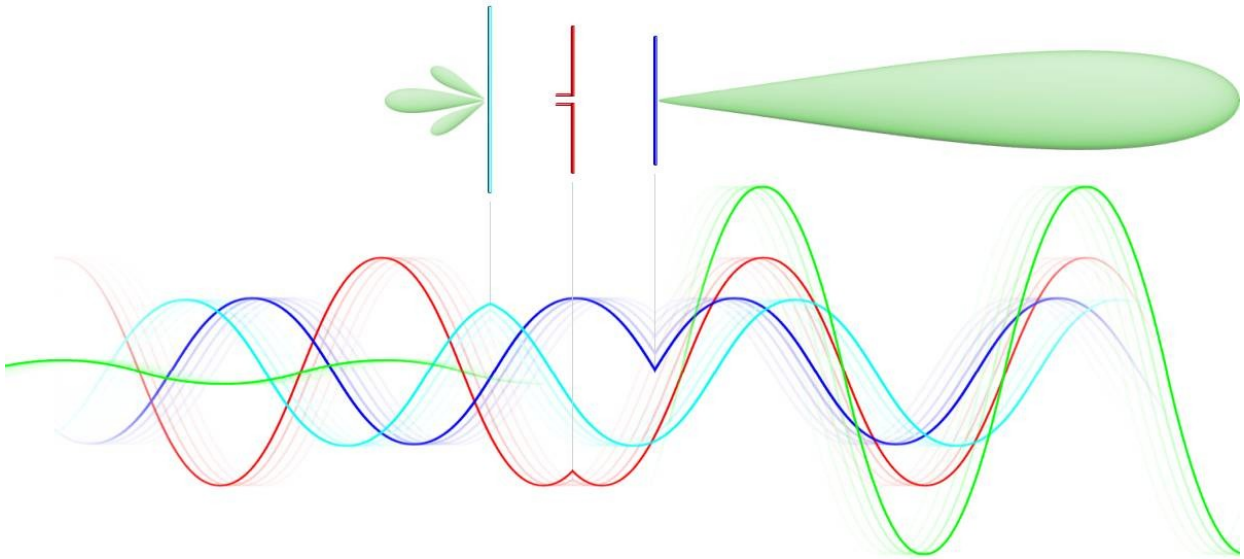


Figure 10 : Une antenne Yagi-Uda à trois éléments et le diagramme montrant la superposition des oscillations (vert) causées par le réflecteur (cyan), le dipôle (rouge) et le directeur (bleu foncé).

L'ajout d'éléments directeurs à l'antenne Yagi-Uda se fait en optimisant la distance de ceux-ci pour amplifier le signal sortant. Pour un nombre raisonnable d'éléments, le gain est plus ou moins proportionnel à celui-ci mais l'effet diminue en augmentant le nombre de brins. Par exemple, une antenne Yagi à trois éléments a un gain de 5 à 6 dB mais en ajoutant un brin, on augmente le gain de seulement 2dB. Électriquement, le prix à payer pour cette directivité est une diminution de la partie résistive de l'impédance de l'antenne. Pour un même courant d'alimentation, le champ rayonné est plus faible. On le compense en remplaçant le dipôle simple alimenté par un dipôle double dit «trombone».



Figure 11: Radar utilisant un groupe d'antennes Yagi-Uda, (P-18 «Spoon Rest D») avec gain  $G = 69$

L'antenne-réseau ainsi créée est une antenne à onde progressive, c'est-à-dire une antenne où l'onde se propage dans une seule direction d'un élément à l'autre et sans réflexion à son extrémité. L'onde initiée par le dipôle se propage vers les directeurs et le courant induit dans ceux-ci est à peu près le même de l'un à l'autre mais l'onde qu'ils réémettent à un délai temporel progressif. Cette propagation du signal dans l'antenne est d'environ 0,7 à 0,9 fois la vitesse de la lumière.

### Antenne log-périodique

Une antenne log-périodique est une antenne dont l'impédance et le diagramme de rayonnement sont répétitifs selon une loi logarithmique en fonction de la fréquence. Pour obtenir cette propriété, les dimensions des éléments doivent être homothétiques le long de la direction de rayonnement principal, c'est-à-dire dont les proportions respectives sont rigoureusement identiques. Ces antennes se rapprochent d'une structure fractale.



Le réseau de dipôles log-périodique est la plus courante, et appelée souvent simplement «log-périodique» en télécommunications. Il comporte des dipôles de longueur croissante alimentés par une ligne. Le croisement de la ligne entre chaque élément alimente deux éléments successifs en opposition dans le modèle le plus classique.

En transmission, l'onde se propage d'abord dans le réseau sans émission le long de la ligne, les éléments se comportant comme des capacités. Lorsque l'onde atteint les dipôles qui ont une longueur d'environ le tiers de la longueur d'onde du signal, l'émission débute et les dipôles suivants suivent le mouvement qu'à ce que le signal atteigne les dipôles dépassant la demi-longueur d'onde. La zone d'émission dans l'antenne est donc limitée à cette section.

Le gain peut atteindre jusqu'à 10 dB et le lobe arrière est minime à -35 dB. La résistance est généralement de 50 à 120 Ω. Les propriétés électriques de ce type d'antenne se répétant périodiquement selon une progression logarithmique de la fréquence, le gain et de l'impédance peuvent être considérées des constantes à chaque intervalle.

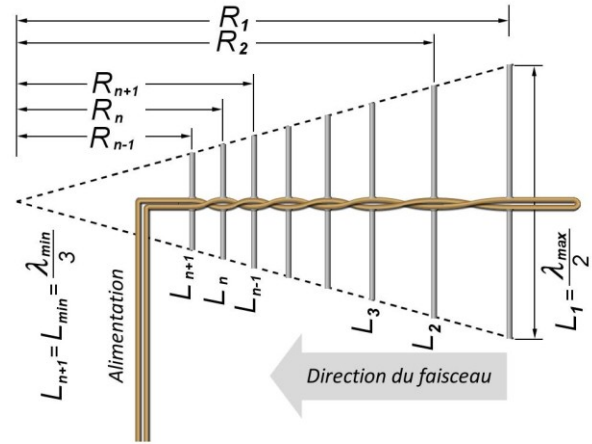


Figure 12: Schéma de construction d'une antenne log-périodique

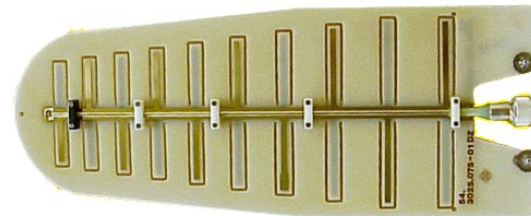


Figure 13: Photo d'une petite antenne log-périodique pour les fréquences de 1 030 et 1 060 MHz. Il s'agit d'une antenne IFF (Identification ami-ennemi)

$$T = \frac{L_2}{L_1} = \frac{L_3}{L_2} = \dots = \frac{L_{n+1}}{L_n}$$

$$T = \frac{R_2}{R_1} = \frac{R_3}{R_2} = \dots = \frac{R_{n+1}}{R_n}$$

$T$  = facteur d'échelle (2)

$L$  = Longueur de l'élément radiant

$R$  = Distance entre les éléments

(3)

### Antenne parabolique

L'antenne parabolique est l'émetteur le plus fréquemment utilisé en radar. La Figure 14 montre les composantes de celle-ci: un réflecteur circulaire ayant la forme d'une parabole, un cône d'émission situé au foyer de la parabole et un guide d'onde qui amène le signal à ce cône depuis le transmetteur.

Pour l'émettre dans l'espace libre, on pourrait juste laisser l'extrémité du guide d'onde ouverte mais la variation d'impédance à la frontière entre les deux milieux causerait une réflexion d'une partie de l'onde.

Pour éviter cela, il est essentiel rendre le changement graduel. Cela est généralement fait en utilisant une section de guide d'onde en forme de cornet évasé. Plus l'ouverture du cornet est grande (sa largeur) et son évasement est graduel (sa profondeur), plus le signal radar sera

focalisé dans la direction désirée. On peut démontrer que son gain est proportionnel à la largeur multipliée par sa profondeur.

Dans la plupart des radars, l'ouverture du cornet est fermée par une plaque de fibre de verre ou de polystyrène pour empêcher l'humidité et les saletés d'entrer dans le guide d'onde. Si le guide d'onde est à atmosphère contrôlée sèche, la plaque sera en céramique ou en quartz. Dans tous les cas, la plaque est transparente aux ondes radio et n'interfère donc pas avec la transmission.

Le réflecteur peut être en tôle emboutie (acier ou aluminium) ou formé d'un grillage dont l'espacement des lattes doit être inférieur à  $\lambda/10$  ( $\lambda$  = longueur d'onde d'émission).

Ce faisceau idéal est appelé «faisceau-crayon» dans le cas d'un réflecteur circulaire et «faisceau électromagnétique plat» si le réflecteur est elliptique. Les radars primaires de surveillance aérienne utilisent deux types différents de courbure dans les directions verticales et horizontales afin d'obtenir un faisceau-crayon en azimut et un faisceau de forme cosécante carrée en élévation.

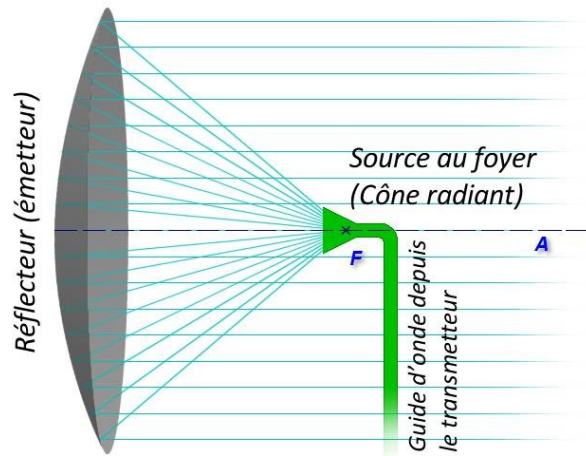


Figure 14: Antenne parabolique

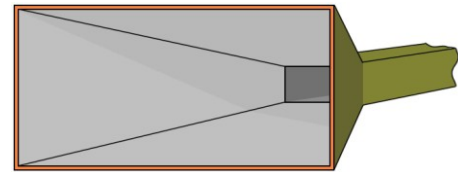


Figure 15: Schéma d'un cornet d'alimentation.

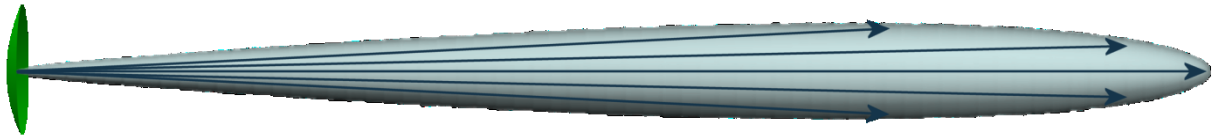


Figure 16: Diagramme d'émission parabolique idéal

Idéalement, ce faisceau n'aurait pas de lobes secondaires d'émission et resterait toujours de même largeur, même à l'infini. Cependant, la taille de la surface formant le réflecteur est souvent relativement petit devant la longueur d'onde du signal émis et le réflecteur comporte aussi des irrégularités. Il n'est alors pas possible de négliger les phénomènes de diffraction. Chaque point de la surface du réflecteur va rayonner comme une source ponctuelle. Le champ total émis en un point est la somme cohérente de tous les champs infinitésimaux. Tout se passe comme dans le cas de la diffraction d'une onde par une ouverture et produit un diagramme d'émission comportant des lobes secondaires, tout autour de la sphère centrée sur l'antenne, qu'on tente de minimiser.

Le lobe principal peut avoir une ouverture angulaire qui varie entre moins d'un degré et 15 ou 20 degrés selon les besoins. Il suit la direction de visée de l'antenne. Il y a ensuite des lobes secondaires tout autour du réflecteur. L'énergie de chacun de ces derniers est une fraction minime du lobe principal comme montré dans la Figure 2. Le faisceau principal y est de normalisé à 0 dB alors que les autres lobes sont plus faibles que - 20 dB, chaque tranche de - 3 dB signifiant que l'énergie radiée diminue de moitié ( $- 21 \text{ dB} = 1/(2^7)$ ). Cependant, la somme de leur énergie n'est pas négligeable.

La largeur du faisceau ( $\Theta$ ) est définie comme la largeur du lobe principal, soit l'ouverture angulaire où son signal émis diminue de moitié de chaque côté de l'axe de visée. Cette largeur dépend de la longueur d'onde utilisée ( $\lambda$ ) et du diamètre de l'antenne ( $D$ ) selon :

$$\theta \approx 70 \frac{\lambda}{D} \quad (4)$$

La largeur du faisceau peut être différente selon la direction azimutale ou celle verticale. Le gain d'antenne ( $G$ ) dans un réflecteur parabolique est donc :

$$G_{\text{Antenne parabolique}} \approx \frac{160^2}{\theta_{Az} \theta_{El}} \quad (5)$$

Où:  $\theta_{Az}$  = largeur de faisceau azimutal  
 $\theta_{El}$  = largeur de faisceau en élévation

Cette relation approximative donne une bonne estimation mais il faut se rappeler que le gain est modifié par la fonction d'illumination.

### Antenne à faisceau plat

Un faisceau plat, ou en éventail, est très mince selon un axe et très large dans l'autre, comme dans la Figure 17. Pour obtenir ce résultat, il faut utiliser une antenne parabolique ou circulaire tronquée, c'est-à-dire que le réflecteur n'occupe qu'une portion angulaire de ces formes. L'axe mince sera orienté dans la direction perpendiculaire à l'antenne. Donc pour obtenir ce faisceau mince, il faut que l'antenne soit une section de paraboloïde orienté horizontalement, comme dans la Figure 18.



Figure 17: Vue d'un faisceau plat (a) Vue latérale (b) Vue de face



Figure 19: Radar de site PRW-17

Ce genre d'antenne est surtout utilisé pour les radars de site qui servent à déterminer l'élévation au-dessus de l'horizon de la cible. Comme l'axe nécessaire pour la section mince du faisceau doit être à l'horizontale, l'axe du paraboloïde tronqué sera dans la verticale dans ce cas (tourné de 90° par rapport au cas précédent). La Figure 19 montre un tel radar qui a besoin d'être très précis dans la verticale mais beaucoup moins dans l'horizontale.

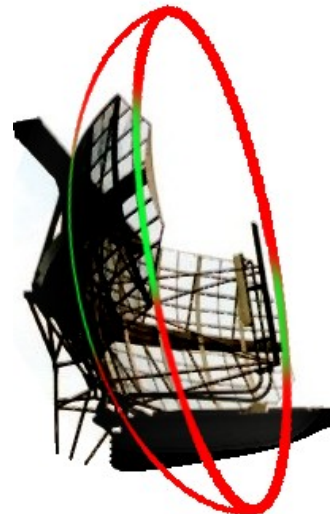


Figure 18: Une antenne paraboloïde tronquée

## Antenne à faisceau en cosécante carrée

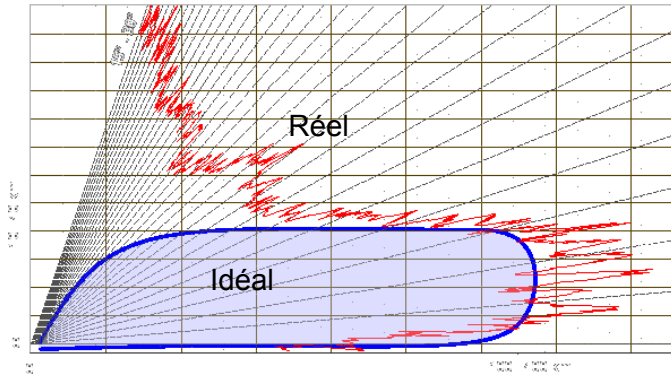


Figure 20: Diagramme d'émission dans la verticale d'une antenne à faisceau en cosécante carrée<sup>2</sup>

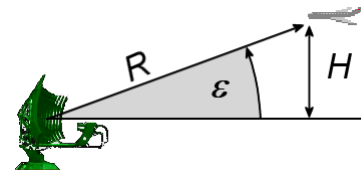
Une antenne à faisceau en cosécante carrée est spécialement prévue pour la surveillance aérienne. Elle permet de répartir dans la verticale l'énergie émise afin de sonder un maximum d'angles d'élévation sans avoir à faire des balayages angulaires multiples.

Ce diagramme d'émission permet d'obtenir une rétrodiffusion relativement constante de la cible si celle-ci demeure à la même altitude, et variable si elle en change, selon le diagramme d'émission connu de l'antenne.

Le terme cosécante provient de la formule trigonométrique du même nom (Cosec).

$$\operatorname{cosec} \alpha = \frac{1}{\sin \alpha}$$

La hauteur H et la distance de la cible R détermine son angle de site (ou d'élévation)  $\epsilon$ .



On sait d'abord que le sinus d'un angle est H/R, en remplaçant dans la formule de la cosécante, on obtient

$$R = \frac{h}{\sin \epsilon} = h \cdot \operatorname{cosec} \epsilon$$

On sait par l'équation radar que  $P_e$  est proportionnelle au gain au carré ( $G^2$ ) sur  $R^4$ :

En utilisant l'hypothèse que la puissance émise  $P_e$  est une constante, G devient proportionnel à  $R^2$ .

$$P_E \sim \frac{G^2}{R^4} \quad \left| \quad P_E = \text{const}$$

En remplaçant, R par la cosécante de  $\epsilon$  et en considérant H comme une constante, on obtient que le gain est proportionnel à la cosécante carrée  $\epsilon$  pour que la puissance soit constante.

$$G^2 \sim R^4$$

$$G \sim R^2$$

$$G \sim (h \cdot \operatorname{cosec} \epsilon)^2 \quad \left| \quad h = \text{const}$$

$$G \sim \operatorname{cosec}^2 \epsilon$$

Cela correspond à ce qui avait été mentionné en début de page «Ce diagramme d'émission permet d'obtenir une rétrodiffusion relativement constante de la cible si celle-ci demeure à la même altitude.»

Il existe deux variantes de ce type d'antenne avec un réflecteur parabolique: antenne parabolique déformée; un empilement de cornet d'alimentation autour du point focal d'une parabole. Le diagramme en cosécante carrée peut également être réalisé avec d'autres réflecteurs que parabolique. Le faisceau direct d'une antenne réseau formée de plusieurs antennes Yagi peut être mélangé au signal venant de la réflexion au sol pour obtenir le même résultat (voir l'ellipsoïde de Fresnel).

### Déformation de la parabole

La première méthode consiste à déformer d'utiliser une antenne parabolique dont on change la courbure dans sa partie supérieure. Le cornet émetteur est placé au point focal de la parabole et le faisceau provenant de la partie parabolicoïde est formé d'ondes parallèles concentrées. Il est appelé le «lobe principal».

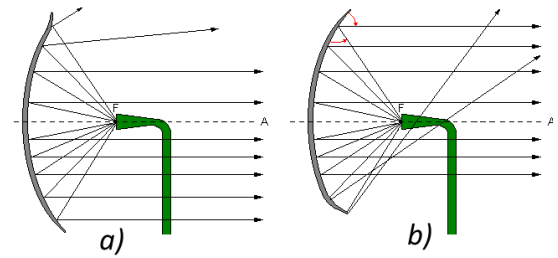


Figure 21: Les deux types d'antennes à faisceau en cosécante carrée

La partie du haut a une courbure moins grande et dirige les ondes à un certain angle par rapport à l'horizontale comme dans la Figure 21a. On peut aussi augmenter la courbure du bord inférieure du réflecteur, comme en b, cela a le même effet.

Avec ces deux méthodes, l'énergie émise par les bords déformés est diffuse et donc la puissance émise vers les cibles est plus faible qu'avec le lobe principal, ce sont des «lobes secondaires». L'énergie retournée à de forts angles de site (ou d'élévation) est donc plus faible ce qui en limite la portée.

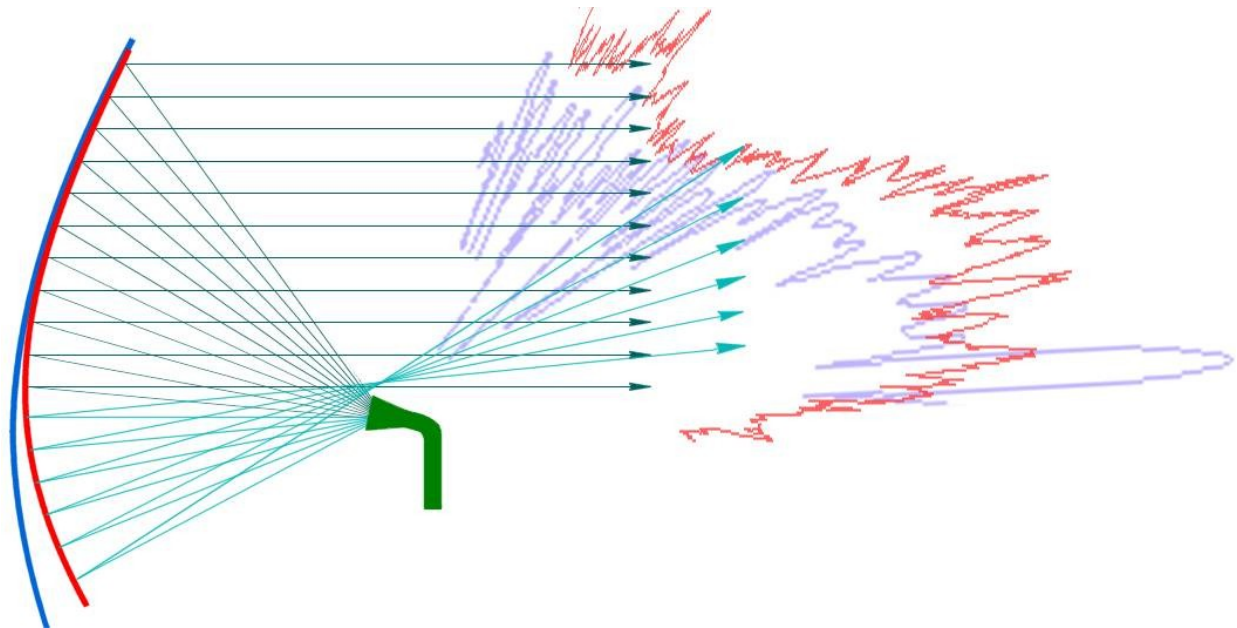


Figure 22: Diagramme d'émission en cosécante carrée en augmentant la courbure du bord inférieur de la parabole.

### Empilement de cornets

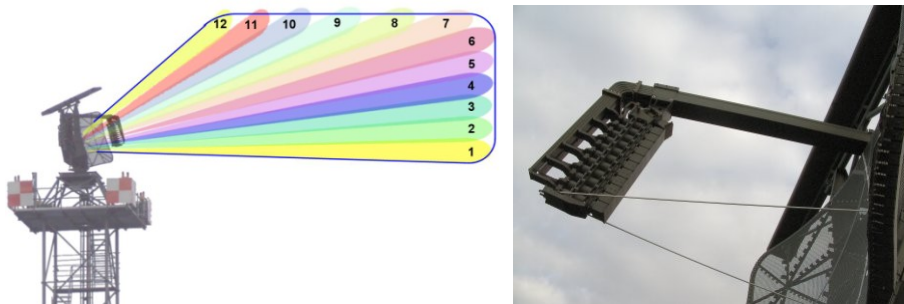


Figure 23: Empilement de cornet d'alimentation qui donne une cosécante carrée. À gauche diagramme de l'orientation des faisceaux individuels et à droite exemple à douze cornets d'un radar ASR 910 pour obtenir un diagramme en cosécante carré.

Le second type est celui qui est obtenu en empilant une série de cornet d'émission autour du point focal de l'antenne parabolique. Chaque cornet donne un faisceau parallèle mais avec un angle par rapport à l'horizontal qui dépend de sa position. Si l'énergie est distribuée inégalement entre les cornets, on peut obtenir un diagramme d'émission proche d'une cosécante carrée. Dans ce cas, chacun des cornets peut utiliser une fréquence différente ou une phase différente ce qui permet de reconnaître à la réception la provenance du signal de retour et donc l'élévation de la cible. Cela est similaire à faire plusieurs balayages en élévation en une seule fois.

## Antenne Cassegrain

Sieur Guillaume Cassegrain était un sculpteur français qui inventa le type de télescope qui porte son nom. C'est un système à deux miroirs concave/convexe. Il est composé d'un miroir primaire concave parabolique et d'un miroir secondaire convexe hyperbolique dont le point focal se trouve au point focal de la parabole. Dans le montage Cassegrain, la lumière qui arrive de l'infini est réfléchi sur le miroir primaire vers le réflecteur secondaire. Celui-ci la retourne vers le centre du miroir primaire qui percé et où l'observateur se place pour observer le ciel.

Le Cassegrain présente à ouverture identique à un miroir parabolique ordinaire. Cependant, comme le point focal d'une hyperbole se trouve du côté concave de celle-ci, au-delà du réflecteur secondaire lui-même, le montage Cassegrain permet de construire une antenne radar plus compacte pour une même focale.

En télécommunication et radar, une antenne Cassegrain est de façon similaire une parabole concave où la source, ainsi que le récepteur, sont près de son centre et pointés vers un sous-réflecteur convexe situé entre le point focal la parabole. En transmission, le sous-réflecteur reflète le faisceau venant de la source vers la parabole qui forme alors le faisceau radar parallèle vers l'espace libre. Le chemin inverse est suivi en réception. Il s'agit donc d'un déplacement de la source, en général un cornet d'alimentation, par rapport à l'antenne parabolique simple mais le rayonnement final reste le même.



Figure 24: Antenne Cassegrain d'un radar de contrôle de tir.

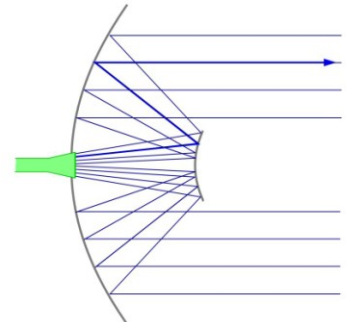


Figure 25: Tracé des ondes.

### Avantages

Le cornet d'alimentation fait corps avec l'antenne ce qui rend son montage plus simple et compacte.

Les pertes au récepteur sont minimisées car il peut être monté juste à côté du cornet.

### Désavantage

Le sous-réflecteur convexe est maintenu en position par des tiges. Le réflecteur et les tiges constituent des obstructions au faisceau et engendrent de plus des échos de retour directement dans l'axe du faisceau.

## Réflecteur secondaire à plaque

Pour remédier à ce désavantage, des radars utilisent une plaque à rotation optique, qui change la polarisation de l'onde électromagnétique qui la frappe, au lieu d'un sous-réflecteur convexe. Elle est constituée de deux couches, la première est une lame à retard quart d'onde (dite aussi lame  $\lambda/4$ ) et la seconde est une grille métallique montée à l'horizontale.

Une lame à retard est faite d'un matériau qui présente un axe privilégié appelé axe optique. La polarisation de la lumière peut être décomposée en deux composantes: chaque composante ne se propage pas à la même vitesse selon qu'elle est parallèle ou perpendiculaire à l'axe optique. Ceci permet de définir deux axes particuliers de la lame: l'axe lent et l'axe rapide. Cela permet donc de retarder une de ces deux composantes par rapport à l'autre et de provoquer un déphasage entre les deux. Une lame quart d'onde crée un déphasage de  $90^\circ$ . Elle permet de passer d'une polarisation rectiligne à une polarisation circulaire, et vice versa.

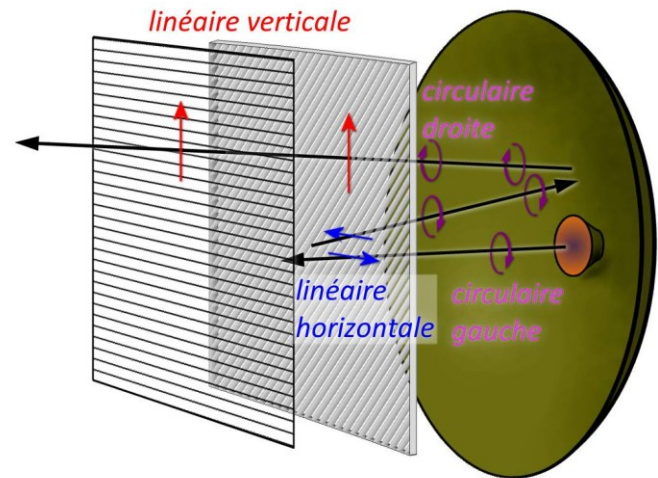


Figure 26: Principe de la plaque à changement de polarisation.

La grille métallique est un polarisateur. Les ondes électromagnétiques dont la polarisation, l'axe du champ électrique, est perpendiculaire à l'axe des grilles peuvent passer. Pour les ondes polarisées différemment, le champ électrique présente une orientation différente et les électrons du métal sont susceptibles d'osciller et les ondes sont réfléchies.

Le faisceau émis est à polarisation circulaire et la lame quart d'onde le transforme en polarisation linéaire dans le même sens que les fils de la grille. Le faisceau frappe ensuite la grille de la plaque qui la réfléchit avec une phase inverse. Il passe ensuite à travers la lame quart d'onde qui en fait une onde polarisée circulairement mais avec une rotation inverse du faisceau par rapport à la plaque. Cependant, il s'agit là de la même rotation par rapport à l'antenne parabolique, son point de vue de la rotation étant opposé de 180 degrés.

Le faisceau atteint ensuite la surface métallique du réflecteur parabolique qui reflète toutes les ondes électromagnétiques vers la plaque en changeant le sens de rotation. Ce second passage dans la plaque transforme la polarisation circulaire en polarisation perpendiculaire à l'axe des fils de la grille qui peut alors traverser celle-ci polarisée verticalement pour se diriger vers les cibles.

Le processus de réception est inverse de celui d'émission. Le tout permet d'éliminer les échos parasites de retour de la plaque et de son support, en plus de ne pas créer de zone d'ombre.

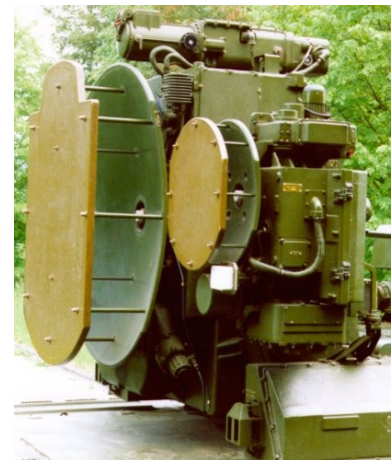


Figure 27: Antennes Cassegrain à plaque du système radar de poursuite et de téléguidage SA-8 «Gecko».

## Source décalée

Un problème soulevé par le cornet d'alimentation situé au point focal d'une antenne parabolique est qu'elle bloque une partie du rayonnement renvoyé par l'antenne ou retournée des cibles. La source crée donc un cône d'ombre. Une solution à ce problème est de n'utiliser qu'une partie de la parabole, la partie supérieure par exemple, de telle façon que le cornet ne se trouve plus dans les rayons parallèles réfléchis par l'antenne.

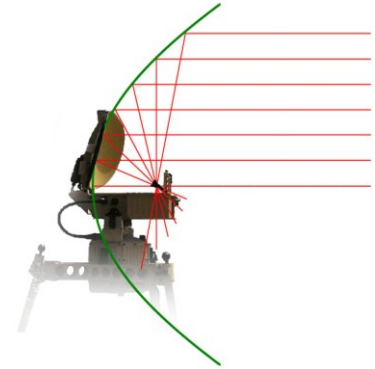


Figure 28: Une antenne parabolique avec cornet émetteur décalé.

La Figure 28 montre un tel positionnement décalé de la source. Le cornet est orienté vers le haut et le faisceau d'ondes frappent l'antenne en demi-parabole. Cette dernière est plus petite et a un foyer plus éloigné, ce qui place le cornet plus loin que dans le cas classique. Il doit être très bien orienté pour que le faisceau soit bien orienté et éviter les pertes d'énergie. Cette configuration demande un cornet plus gros, est plus difficile à obtenir et en général plus coûteuse.

Les antennes avec source décalée sont utilisées commercialement, entres autres dans les récepteurs satellite où le réflecteur n'est pas rond mais une section ovale de parabole. Cette forme permet une densité de radiation égale partout sur le réflecteur. Pour comprendre cela, on n'a qu'à penser à la zone éclairée par une lampe de poche. Si elle est dirigée perpendiculairement à la surface, on obtient un cercle mais si on pointe avec un léger angle, la zone éclairée devient une ellipse. Par conséquent, pour une antenne avec une source décalée qui a 1,25 m de large, elle doit avoir une hauteur de 1,35 m.

## Antenne réseau à commande de phase

Une antenne réseau à commande de phase est composée d'une ensemble d'éléments radiants ayant chacun un déphaseur. L'onde émise par chacun des éléments entre en interférence avec celle des autres. Le faisceau est produit par la somme des interférences constructives et peut être orienté vers une direction spécifique en variant la phase entre les éléments.

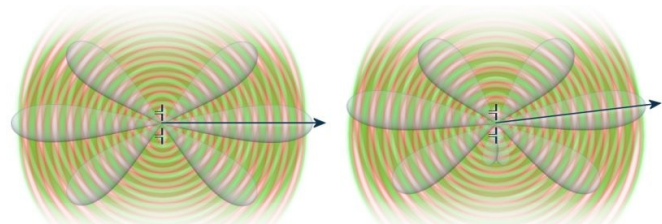


Figure 29: Gauche: deux éléments de l'antenne ayant la même phase. Droite: ils ont une phase différente.

La Figure 29 montre deux éléments qui sont alimentés par un émetteur. À gauche, l'onde émise par les éléments a la même phase et cause des interférences constructives qui amplifie le signal certaines directions. Par contre, les zones où les ondes interfèrent de façon destructive, le signal est nul. L'ensemble donne un faisceau principal orienté dans la direction perpendiculaire à la ligne qui unie les deux éléments, ainsi que des lobes secondaires d'émission.

Dans la même figure à droite, l'onde émise par l'élément du bas est déphasé de 10 degrés plus tôt par rapport à celle du haut. Les zones d'interférence constructives seront dans ce cas déplacées vers le haut. À noter que dans les deux exemples, il n'y a pas de réflecteur dans l'image et que le lobe arrière est aussi important que le lobe principal avant.



Le lobe principal pointe toujours dans la direction du déphasage positif. Si ce sont des déphaseurs électroniques qui contrôlent ce déphasage, l'opérateur peut changer à volonté la direction d'émission. Cependant, elle ne peut dépasser certaines limites. La plus grande déviation que l'on peut obtenir du «cône d'analyse» d'une antenne à commande de réseau est de 120° (60° de chaque côté du centre de l'antenne). Si on considère une onde sinusoïdale, le déphasage peut être aisément calculé.

La Figure 30 montre une matrice d'éléments radiants. Une architecture arbitraire donne une antenne donnant un faisceau similaire à un projecteur. Dans le cas d'une antenne qui balaie électroniquement, il est important que le changement de phase soit coordonné et régulier pour obtenir un balayage angulaire.

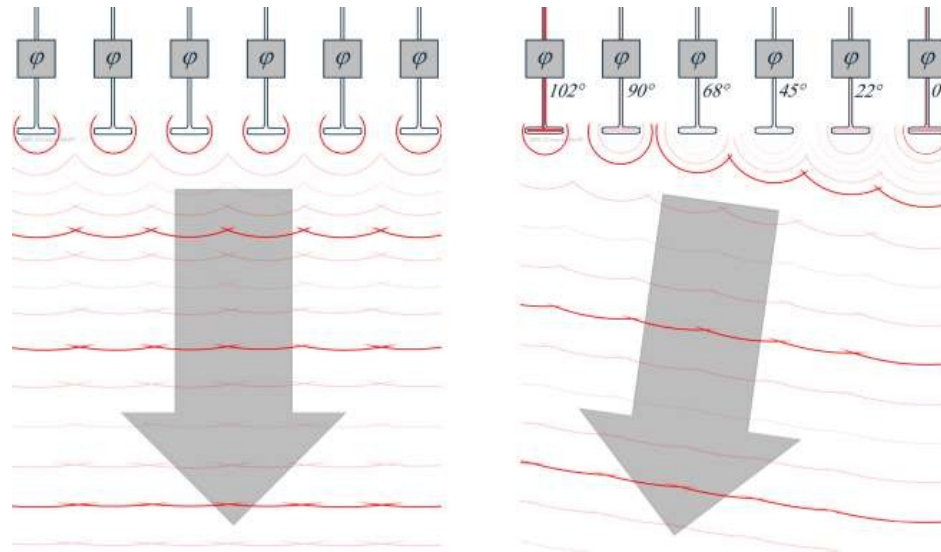


Figure 30: Déviation du faisceau, gauche: ligne de visée, droite: déviation

Par exemple, l'antenne RRP 117 est formée de 1584 éléments radiants qui sont montées de façon à donner un faisceau passif, c'est-à-dire que le signal à émettre est distribué à un ensemble de modules comportant déphaseur et élément rayonnant. Les dispositifs d'amplification des signaux émis ou reçus sont réalisés à l'extérieur de l'antenne. Des antennes plus avancées utilisent des architectures permettant de donner un faisceau actif, c'est-à-dire que les dispositifs d'amplification des signaux émis sont inclus dans l'antenne.

| Avantages  | Désavantages   |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Fort gain</li> <li>• Changement de direction du faisceau en quelques microsecondes;</li> <li>• Contrôlable par ordinateur;</li> <li>• Modes de surveillance et de poursuite interchangeables;</li> <li>• Temps d'éclairement modifiable;</li> <li>• Permet d'émettre des faisceaux multiples en utilisant des fréquences différentes;</li> <li>• La perte d'un élément réduit sa résolution mais pas sa disponibilité.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Couverture limitée à 60 degrés de chaque côté de l'axe perpendiculaire au radar en azimut et en élévation;</li> <li>• Déformation du faisceau par la déviation;</li> <li>• Peu agile à basse fréquence;</li> <li>• Architecture très complexe (contrôleur, déphaseurs, etc.)</li> <li>• Coût encore important.</li> </ul> |

## Architecture possibles

### Réseau linéaire

Ces antennes sont formées de lignes parallèles d'éléments radiants dont chaque ligne est alimentée par un déphaseur commun.

*Avantage:* simplicité

*Désavantage:* Déviation du faisceau disponible dans une seule direction

Ce type d'antenne réseau à commande de phase est très commun pour le balayage dans un seul axe car le balayage dans l'autre direction est fait mécaniquement (ex. RRP-117).

### Antenne réseau plan

Dans l'antenne réseau plan, tous les éléments radiants ont leur propre déphaseur. Ils sont positionnés selon une grille matricielle, formant une plaque.

*Avantages:* Le faisceau est orientable dans deux axes et peut être actif ou passif.

*Désavantage:* Architecture et électronique compliquées.

### Antenne utilisant un changement de fréquence

Un cas spécial d'antenne réseau à commande de phase est appelée fréquentielle. La direction du faisceau est réalisée par un changement de fréquence de l'émetteur en utilisant une propriété de la propagation des ondes dans un guide d'onde. Généralement, chaque élément radiant est alimenté par un guide d'onde replié en accordéon. La phase entre deux éléments est de  $n \cdot 360^\circ$  la fréquence de base.

En changeant la fréquence, l'angle  $\theta_s$  entre l'axe principal du faisceau et la normale à l'antenne change. Ce changement se fait ainsi :

Si la fréquence transmise augmente, le faisceau est dévié vers le haut de l'antenne;

Si la fréquence diminue, le faisceau dévie vers le bas.

Un changement de fréquence va donc donner un balayage en élévation. L'ordinateur de contrôle du radar garde en mémoire les fréquences utilisées et leur ordre ce qui permet au récepteur d'afficher les retours en trois dimensions. Il est à noter que l'utilisation de cette méthode se fait aux dépens d'autres utilisations de la variation de fréquences comme celle de la compressions des impulsions.

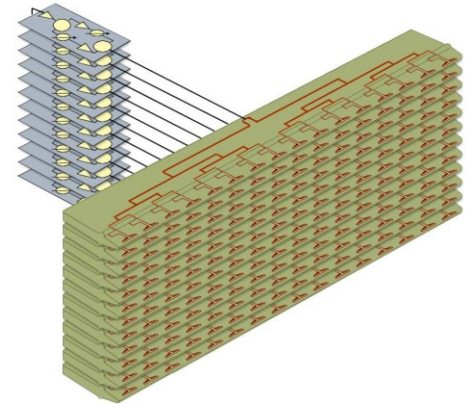


Figure 31: Réseau linéaire d'une antenne réseau à commande de phase.

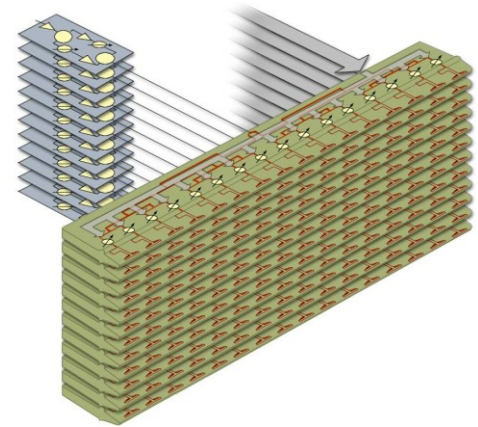


Figure 32: Antenne réseau plan.

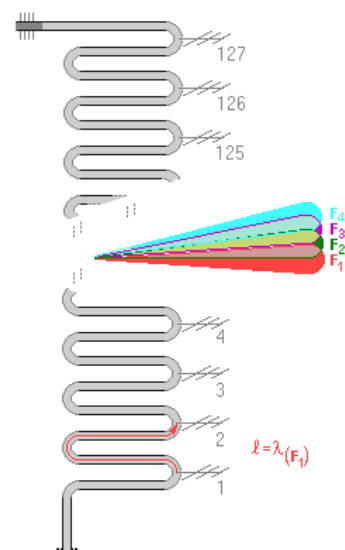


Figure 33: Antenne fréquentielle.

### Calcul du déphasage

Le déphasage  $\Delta\varphi$  entre deux éléments est constant. Quel doit être sa valeur pour obtenir la direction voulue? Utilisons un alignement d'éléments émettant de manière isentropique comme dans la Figure 34.

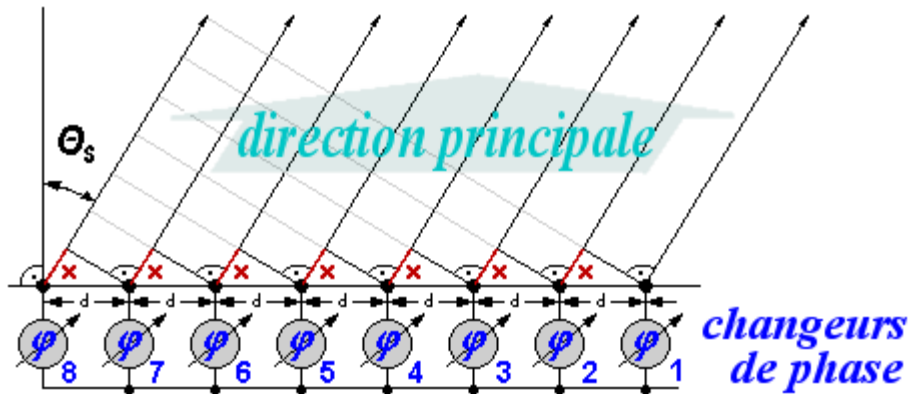


Figure 34 : Dérivation graphique du déphasage.

$$x = d \cdot \sin \theta_s \quad d = \text{distance entre les éléments} \quad (6)$$

Et

$$\frac{360^\circ}{\Delta\varphi} = \frac{\lambda}{x} \quad \Delta\varphi = \text{déphasage entre les éléments successifs} \quad (7)$$

$\lambda = \text{Longueur d'onde utilisée}$

Donnent

$$\Delta\varphi = \frac{360^\circ \cdot d \cdot \sin \theta_s}{\lambda} \quad (8)$$

Exemple: Longueur d'onde du radar  $\lambda=10 \text{ cm}$ .

Distance entre les éléments de **15 cm**.

Nous négligeons le retard de propagation de l'onde entre les éléments;

Nous voulons que la direction soit de  $\theta_s=40^\circ$ .

Tâche: Quel doit être le déphasage à l'élément numéro 8 de gauche pour obtenir cette direction?

Nous débutons par le calcul du déphasage entre les éléments ainsi:

$$\Delta\varphi = (360^\circ \cdot 15 \text{ cm} / 10 \text{ cm}) \cdot \sin(40^\circ) = 347.1^\circ.$$

L'élément numéro 8 a donc un déphasage de  $\varphi_8 = 7 \cdot 347.1 = 2429.7^\circ$ .

Comme le sinus est périodique, sa valeur avec  $n \cdot 360^\circ$  a la même valeur que pour  $0^\circ$ . Comme la direction du faisceau sera entre  $0^\circ$  et  $360^\circ$ , il suffit de trouver le reste de  $2429.7^\circ$  et de  $n \cdot 360^\circ$  pour en déduire que le déphasage du huitième élément par rapport au premier doit être de  $\varphi_8 = \underline{269.7^\circ}$ .

Dans la réalité, une partie du délai dans la phase est produit par le retard d'alimentation de l'élément 8 par rapport au premier.

## Antenne à grande ouverture verticale (GOV)

Une antenne à grande ouverture verticale est typiquement utilisée par les radars secondaires. Il s'agit d'une antenne réseau qui comporte une série de dipôles placés verticalement à une certaine distance l'un de l'autre.

Le diagramme d'émission est mince dans la direction horizontale mais prend toute la verticale comme vu dans la Figure 36. Il peut être ajusté en répartissant la distribution d'énergie et de phase de l'onde émise aux différents dipôles.

Une antenne GOV sera inclinée de telle sorte que le pic d'émission soit à un angle d'élévation (ou de site) positif. Le gain typique à l'horizontale sera de 4 à 10 dB plus bas que celui du pic pour minimiser la puissance émise sous l'horizontale qui peut être réfléchi par le sol vers la cible. Le taux de diminution d'intensité sous l'horizon est ensuite généralement de 1,5 à 2 dB par degré d'élévation.

Parce que le gain est réduit aux angles négatifs, l'antenne GOV inclinée a les avantages suivants:

- La réduction des lobes secondaires négatifs permet d'augmenter la portée utile du radar;
- La puissance transmise et retournée par réflexions multiples au sol est minimisée ce qui augmente la certitude que le retour provient de l'angle de visée dans le cas d'un radar mono-impulsion;
- L'énergie provenant de réflexion sur des édifices et autres surface réfléchissantes sous l'horizon est minimisée ce qui réduit l'erreur de position des aéronefs lors de l'interrogation du radar secondaire.



Figure 35 : Antenne GOV standard du MSSR.

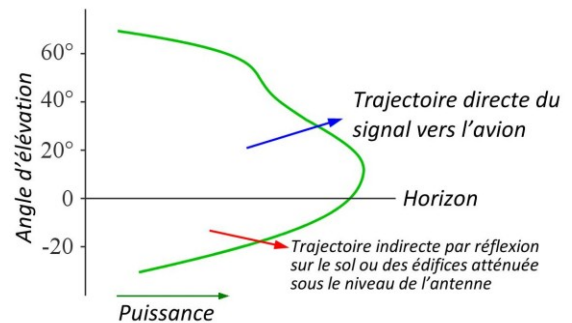


Figure 36: Diagramme d'émission en coordonnées cartésiennes tourné vers la droite de 90 degrés.

## Antenne de nid-de-pie

Une antenne de nid-de-pie est une antenne réseau à commande de phase qui peut émettre dans toutes les directions car ses éléments radiants sont placés sur une sphère. Il s'agit d'une antenne sous brevet de la *Fraunhofer-Institut für Hochfrequenzphysik und Radartechnik (FHR)*, conçue pour être utilisée en bande X. Le nom de cette antenne fait référence au nid-de-pie que l'on retrouvait sur les navires à voile, en haut du grand mât. Cette antenne permet de faire le guet sur 360 degrés comme le moussaillon d'antan.

Elle fait 6 pieds de diamètre et comporte environ 2 000 éléments radiants disposés aléatoirement pour éviter les lobes de périodicité, c'est-à-dire un diagramme d'émission qui présenterait une répétition périodique d'un lobe principal tout autour de l'antenne. La distribution des éléments autour de la

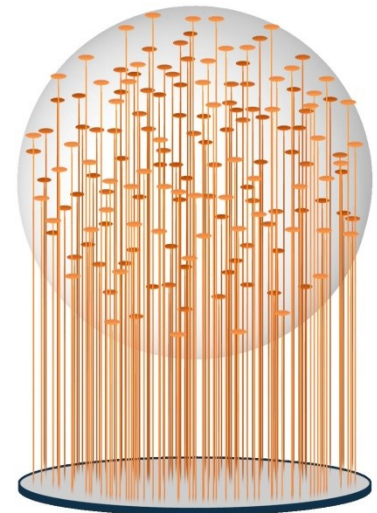


Figure 37: Modèle d'une antenne de nid-de-pie.

sphère a toujours la même densité et permet de produire un faisceau-crayon uniforme pour tous les azimuts et élévations lorsque le déphasage des éléments est bien coordonné par un logiciel de contrôle.

Le programme utilise une mise en forme numérique du faisceau et peut orienter quasi simultanément ce dernier sur 360 degrés autour de l'antenne et 180 degrés dans la verticale. Les lignes d'alimentation du signal radar sont attachées à une plaque de mise à la terre et stabilisées par un diélectrique de permittivité de  $\epsilon_r \approx 1$  pour éviter une perte de vitesse de propagation de l'onde électromagnétique dans l'antenne.

## Stratégies particulières d'utilisation

### Balayage conique

Les radars plus anciens utilisent un balayage conique pour préciser la position des cibles. La Figure 38 montre une telle antenne où le cornet d'alimentation effectue une rotation décentrée autour du point focal ce qui donne un faisceau qui balaie un cône autour de l'axe de visée et dont l'apex est l'antenne. La rotation du cornet est commandée par un moteur situé derrière l'antenne et le système note toujours à quel point il est rendu dans sa rotation.

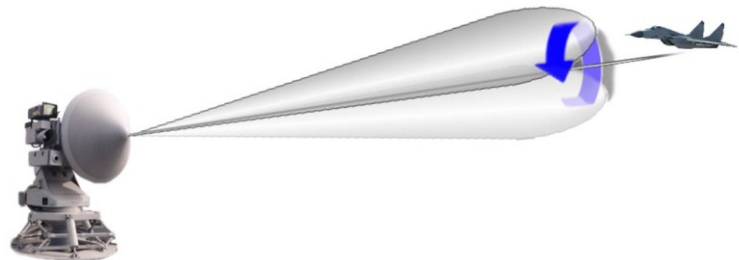


Figure 38: Le faisceau d'une antenne à balayage conique effectue une rotation décentrée autour de son axe de visée. Il balaie donc un cône autour de cet axe en élévation et azimut.

Pour une distance donnée de l'antenne, la trajectoire du lobe principal du faisceau effectue donc un cercle. À l'intérieur de la portée utile du radar, le bord interne du faisceau doit toujours recouper l'axe de visée. Si une cible est directement le long de cet axe, l'intensité de l'écho de retour sera constante durant toute la rotation. Par contre, si la cible se trouve légèrement hors de l'axe, le signal sera plus fort de ce côté. Ainsi, il est possible de connaître l'erreur en azimut et élévation entre l'angle de visée et la position réelle de la cible.

Par exemple dans la Figure 39, la cible se trouve à gauche de l'axe de visée. L'animation montre que le signal varie en intensité selon l'angle auquel le lobe est rendu dans sa rotation. Zéro degré est par convention la position directement en haut de l'axe de visée et la rotation s'effectue vers la droite. L'intensité minimale de l'écho de retour sera quand le faisceau sera à 90 degrés, à droite de l'axe de visée, et le signal maximal sera à 270 degrés, soit directement à gauche de l'axe. En autant que la cible est à l'intérieur du cône de balayage, on peut la repérer.

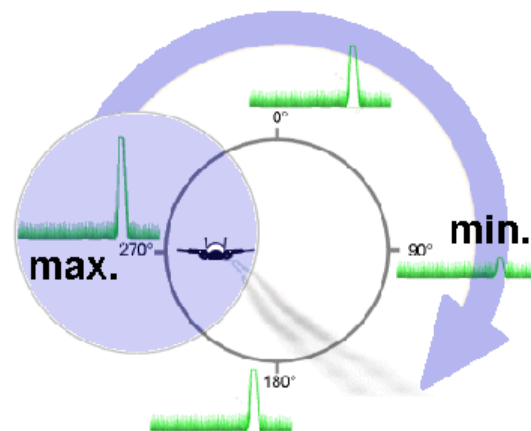


Figure 39: Sens de rotation d'un balayage conique.

L'information sur l'angle de l'intensité maximale et celle de l'axe de visée sont entrées dans l'ordinateur d'analyse des données radar, appelé le plus souvent ordinateur de pointage automatique ou servo-pointeur. Si ces données montrent que la cible est hors de l'axe de

visée, l'ordinateur commande une correction à la position de l'antenne par servomécanismes afin de suivre la cible au plus près. Cette correction est calculée grâce aux données recueillies.

L'émission et la réception du radar peuvent être à balayage conique mais un système courant est d'utiliser ce type de balayage en réception seulement, une méthode appelée en anglais **Conical Scan on Receive Only (COSRO)**.

Le défaut du balayage conique est que la force du signal reçu varie souvent pour des raisons autres que la rotation du lobe. Par exemple, sur une période de quelques dizaines de secondes, le signal peut être considérablement affecté par des changements de direction de la cible, par la pluie, par des nuages, etc. Étant donné que le principe même est basé sur les variations d'amplitude du signal reçu, de telles sources d'erreur affectent considérablement la précision du système.

### Antenne monopulse ou à mono-impulsion

Une antenne monopulse n'est pas un type particulier d'antennes mais en est plutôt une utilisation particulière. Le radar à mono-impulsion date du développement des radars de poursuite et depuis les années 1970, ce principe a été adapté tant aux radars primaire que secondaires.

Dans la Figure 40, on peut voir que la cible sera détectée par un radar à balayage conventionnel sur toute la largeur du faisceau. Le maximum d'intensité se trouve à l'angle dans l'axe direct du centre du faisceau. Si plusieurs impulsions sont émises durant ce temps de passage, cela cause une erreur de positionnement car chacune des impulsions aura un angle légèrement différent et la cible sera notée à chacun de ces angles. Cette erreur est donc de l'ordre de la largeur du faisceau.

Une méthode rudimentaire de déterminer le véritable azimuth est de noter la direction où l'on retrouve l'intensité maximale de l'écho de retour au radar. Malheureusement, la mesure de ce maximum sera affectée par le bruit thermique et par la variation de réflectivité intrinsèque de la cible (scintillation). Cette dernière est due à la variation de la section efficace radar de la cible durant le balayage, celle-ci causant une distorsion de l'enveloppe du train d'échos réfléchis.

L'antenne mono impulsion est définie comme une antenne réseau dont la surface est divisée en quatre quadrants d'émission indépendants. Les éléments de chaque quadrant peuvent émettre dans une phase différente de ceux des autres quadrants et donc couvrir un angle différent. Les retours provenant des quatre secteurs sondés peuvent être additionnés ou soustraits pour déterminer la position exacte de la cible.

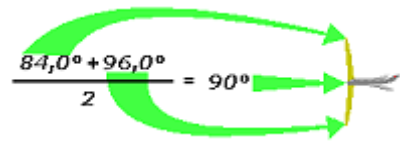


Figure 44: Estimation de la position angulaire de la cible.

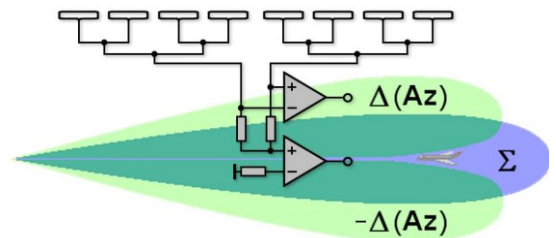


Figure 41 : Diagramme d'une antenne monopulse.

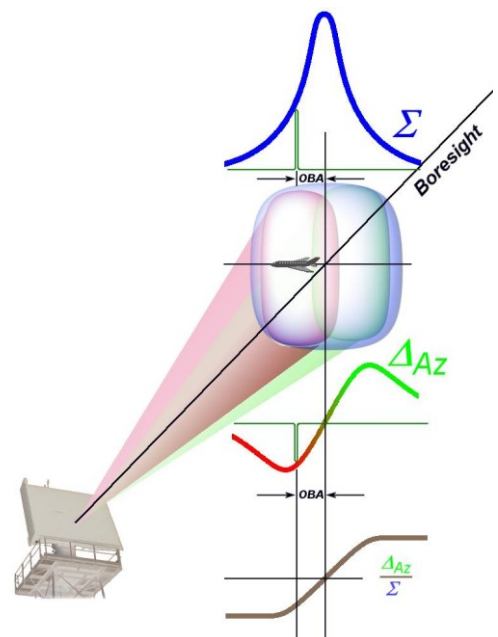


Figure 42: Principe du système monopulse.

Le principe du radar monopulse permet de solutionner ce problème tout en demandant un moins haut taux d'impulsions pour chaque cible. Ce système permet également un traitement plus sophistiqué qui donne une meilleure qualité de données sur la cible. Une seule impulsion est nécessaire pour déterminer l'azimut de cette dernière, d'où le nom de mono-impulsion ou monopulse.

Les éléments d'une antenne réseau linéaire sont divisés en deux groupes égaux. Ces derniers émettent comme des antennes séparées dans le plan focal, de chaque côté de l'angle de visée central. En transmission ( $T_x$ ), chaque groupe est synchronisé en phase pour donner sa moitié du diagramme d'émission total, ou diagramme Somme ( $\Sigma$ ) en bleu de la Figure 42. Dans la même figure, le graphique du haut montre  $\Sigma$ , le diagramme d'émission de l'antenne.

En réception ( $R_x$ ), l'écho de retour est reçu par les deux moitiés de l'antenne. Il est alors possible de faire la somme ( $\Sigma$ ), comme en émission, ou la différence ( $\Delta_{Az}$ ) de leur intensité. Cette dernière est appelé différence en azimut ou diagramme Delta-azimut. Dans la Figure 43, le graphique  $\Delta_{Az}$  montre la différence de réception azimutale pour une cible qui se trouverait à droite de l'axe du faisceau. En faisant le rapport  $\Delta_{Az}$  sur  $\Sigma$ , comme dans le graphique du bas, on obtient l'azimut réel de la cible. La différence d'angle avec l'angle de visée du radar est appelé angle hors-azimut, indiqué ici par **OBA**.

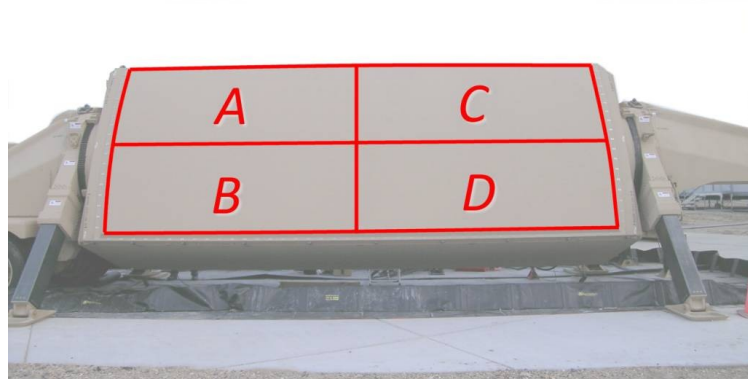


Figure 43: Les quatre quadrants d'une antenne monopulse en 3D.

L'angle de site est également mesuré dans un radar 3D. La procédure pour trouver la variation par rapport à l'angle de site de l'antenne est identique, soit de diviser le réseau **d'éléments** en deux groupes verticaux. La différence dans ce cas s'appellera Delta élévation ou  $\Delta_{El}$ . En combinant la recherche en azimut et en élévation, on doit donc diviser l'antenne réseau en quatre quadrants égaux: deux en haut et deux en bas.

On peut donc trouver les sommes et différences provenant des quatre quadrants ainsi :

- Somme  $\Sigma = (A + B + C + D)$
- Différence en azimut  $\Delta_{Az} = (A + B) - (C + D)$
- Différence en élévation  $\Delta_{El} = (A + C) - (B + D)$
- Signal auxiliaire  $\Omega$

Pour compléter les données, il faut parler du signal auxiliaire  $\Omega$ . Ce dernier ne fait pas partie à proprement parler de l'antenne mono-impulsion. Il est émis par une petite antenne indépendante ayant un large diagramme d'émission et sert à compenser pour les effets des lobes secondaires de l'antenne monopulse. Il sert également à reconnaître le brouillage actif dans le secteur sondé.

Au total, il faut donc quatre récepteurs distincts pour faire fonctionner une telle antenne et tout radar 3D moderne a au moins ce nombre disponible.

## Faisceaux bas et haut

La Figure 44 montre comment le signal est envoyé aux deux cornets d'alimentation vers l'antenne. Un séparateur divise le signal en deux et la plus grande partie de l'énergie alimente le faisceau bas pour obtenir une meilleure performance en portée. L'écho de la cible est reçu par les deux cornets, reliés à des récepteurs différents, ce qui permet d'obtenir un signal même si celui-ci ne tombe que dans la couverture d'un seul cornet.



Figure 45 : STAR-2000 avec cornets pour faisceau bas et haut.

Il est également possible d'alimenter uniquement un des cornets émetteurs. Ainsi, à basse altitude le faisceau élevé sera éteint en émission mais les deux récepteurs seront actifs en réception. Cela est possible parce que le diagramme montre qu'il y a un recoupement des lobes principaux des deux faisceaux de l'antenne.

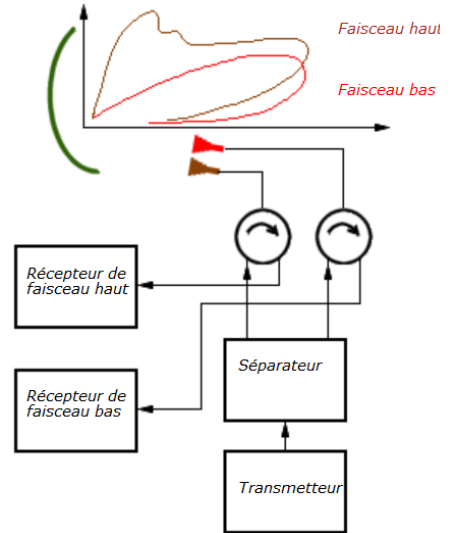


Figure 44: Diagramme de radiation d'une antenne radar avec faisceau bas et haut.

## Sommaire

- Une antenne radar est la composante chargée de diffuser le signal micro-onde dans l'espace libre et de capter le retour des cibles.
- Les antennes ont les mêmes propriétés en émission qu'en réception. Cette réciprocité permet de connaître le comportement dans ces deux modes en ne procédant qu'à sa mesure dans un seul mode.
- Les antennes paraboliques et à réseau de commande de phase sont les deux types les plus répandus dans les systèmes radar.
- Les antennes se divisent en deux groupes, quel que soit leur type:
  - Les antennes omnidirectionnelles émettent de manière égale dans toutes les directions;
  - Les antennes directionnelles concentrent l'énergie du signal de radiofréquence en un faisceau orienté dans une direction bien précise. Ce dernier dépend des caractéristiques de l'antenne et de son orientation dans l'espace.
- Le diagramme d'émission d'une antenne peut être tracé sur un graphique aux coordonnées cartésiennes ou polaires ayant l'angle d'azimut et l'intensité relative du signal comme coordonnées. Un tel diagramme montre que:
  - Une antenne isotrope émet la même énergie dans toutes les directions;
  - L'énergie est plus importante dans une direction avec une antenne directionnelle;
  - Le lobe principal définit la direction du faisceau;
  - Une partie plus ou moins importante de l'énergie émise se retrouve dans les lobes secondaires et le lobe arrière. Il est donc important de les minimiser.



## Questionnaire sur les antennes

1. Si les émetteurs du haut sont défectueux dans une antenne à émission en cosécante carrée, qu'elle sera la conséquence
  - les cibles en latitude seront moins bien repérées
  - les cibles volant à basse altitude seront moins bien perçues
  
2. Une antenne réseau linéaire se compose de 44 lignes chacune ayant 36 éléments rayonnants. Combien de déphaseurs sont nécessaires pour contrôler cette antenne:
  - 36
  - 44
  - 1584
  
3. Dans le canal somme d'une antenne monopulse, on obtient une valeur importante pour une cible. Cependant, le canal différence donne une valeur nulle. Cela peut signifier:
  - L'angle par rapport à l'axe de visée est de zéro degré,
  - La cible est exactement au milieu du diagramme d'antenne,
  - Le canal somme est défectueux ou surchargé.
  
4. Lors d'un entretien d'une antenne monopulse, les lignes d'alimentation pour le circuit faisant les différences  $\Delta Az$  (delta azimuth) et  $\Delta El$  (élévation delta) ont été accidentellement inversées. Quel effet cela a-t-il sur le radar?
  - La portée du radar diminue parce que la puissance de transmission est mal distribuée (en opposition de phase)
  - Cette erreur ne concerne que la réception parce que ces signaux sont formés uniquement après les duplexeurs vers les récepteurs