

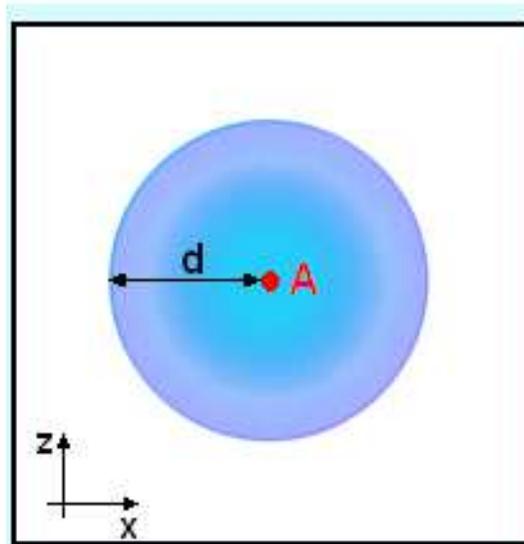
TD 8

LES ANTENNES

Pratiques et théories

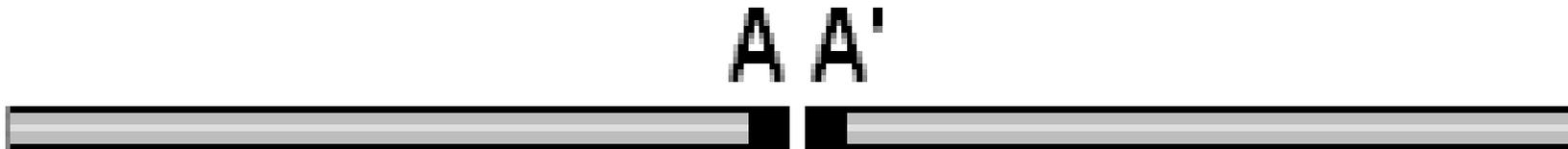
L'antenne isotrope

Cette antenne théorique n'est pas réalisable pratiquement mais son concept est utile pour exprimer le gain d'une antenne réelle. Il faut imaginer un point rayonnant, son champ radioélectrique est constant sur les trois axes. C'est une antenne virtuelle, utilisée comme référence. (ex: dBi= dB par rapport à l'antenne isotrope).



L'antenne dipôle demi-onde

Un conducteur alimenté en son milieu présente une impédance qui dépend surtout de sa longueur et de son diamètre mais aussi de la fréquence. Un cas particulier de l'utilisation d'un tel dipôle est l'antenne demi-onde ou doublet. On l'alimentera au points A et A' par une ligne parallèle ou coaxiale. A la **résonance**, son impédance au centre est de **72 ohms**.



Impédance d'un dipôle

Prenons un dipôle constitué d'un conducteur de 21 mètres de longueur déployé dans un espace libre pour ne pas subir l'influence du sol. C'est un fil de cuivre de diamètre 1,8mm tendu et formant un segment coupé en son milieu. Mesurons entre les bornes A et A' (voir figure ci-dessus) la composante résistive R et la composante réactive X de l'impédance.

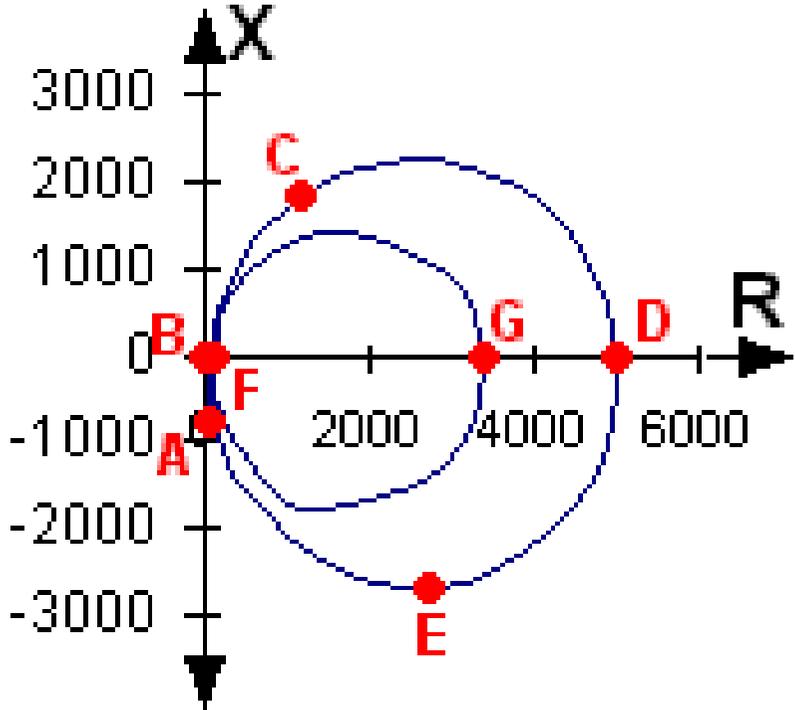
Les fréquences repérées par des lettres (**A**, **B**...) correspondent à des points particuliers des graphes étudiés plus bas.

Sur la figure à droite du tableau sont symbolisés pour chaque point le circuit équivalent au dipôle.

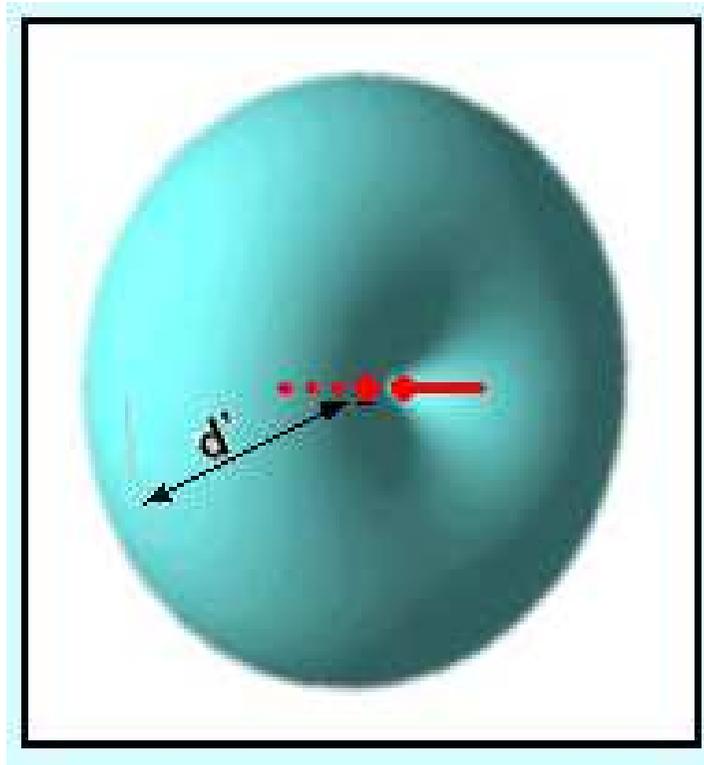
f (MHz)	R (ohm)	X (ohm)	f (MHz)	R (ohm)	X (ohm)
3 (A)	8	-1280	15	1182	-2200
5	29	-490	16	470	-1500
6.95 (B)	72	0	20	86	-250
9	189	+522	21.2 (F)	105	-0
11 (C)	624	+1335	24	360	+700
12	1450	+2000	27.45 (G)	3370	0
13.41 (D)	5027	0	29	1400	-1800
14	3600	-2400	32	200	-740
14.32 (E)	2551	-2693	35.44	122	0

Par exemple :

Le point **C** matérialise sur le graphe l'impédance au centre du dipôle pour la fréquence de 11MHz. Cette impédance correspond à une résistance R de 624 ohms et une réactance inductive de 1335 ohms, réactance affectée d'un signe positif car inductive. Les réactances capacitives sont exprimées par des nombres négatifs.



Rayonnement de l'antenne dipôle demi-onde dans l'espace



Le rayonnement est très faible dans l'axe de l'antenne et maximum dans le plan perpendiculaire à l'antenne et passant par son milieu.

Diagramme de rayonnement dans le plan vertical

Le diagramme de rayonnement vertical ci-contre représente les deux lobes principaux de l'antenne dipôle demi-onde placée à une hauteur d'une demi-onde par rapport à un sol très bon conducteur. L'antenne est vue en bout, elle est au centre du demi-cercle.

Les deux lobes sont identiques et symétriques par rapport au plan vertical dans lequel s'inscrit le dipôle, il n'y a théoriquement aucun autre lobe parasite.

L'angle α est l'angle de départ (ici 30 degrés), plus il est bas sur l'horizon, meilleure sera l'antenne pour le trafic DX mais moins bonne pour le trafic à moyenne distance (500 à 1000 km)

Le cercle bleu représente le rayonnement du même dipôle en espace libre pour un champ de même niveau que celui de l'extrémité des lobes du dipôle à proximité du sol. Le gain de 6,2 dB est obtenu grâce à l'effet de réflecteur du sol. Le cercle vert symbolise le rayonnement de l'antenne isotrope. On retrouve la différence de niveau de 2,15 dB avec l'antenne demi-onde en espace libre évoqué dans le gain des antennes.

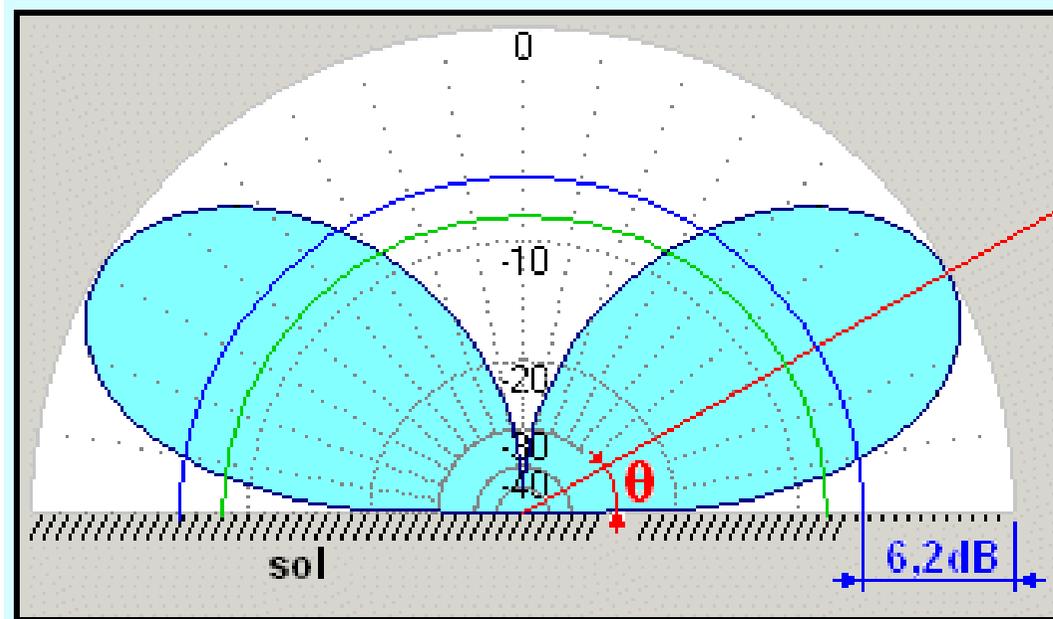


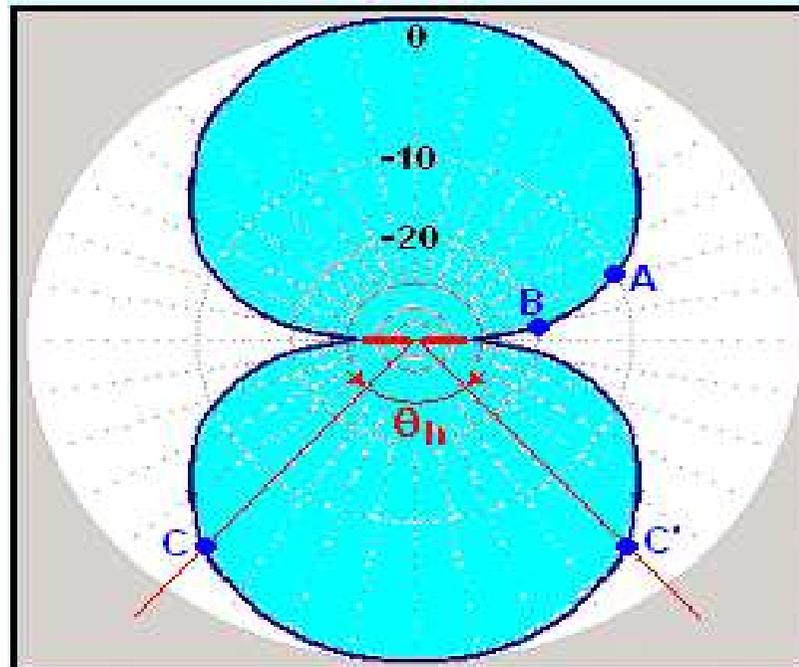
Diagramme de rayonnement du dipôle dans le plan horizontal

On remarque que le profil des lobes en vue de dessus ne diffère guère de celui en forme de tore de l'antenne dipôle demi-onde placée dans l'espace.

L'antenne est symbolisée par deux traits rouges au centre du cercle.

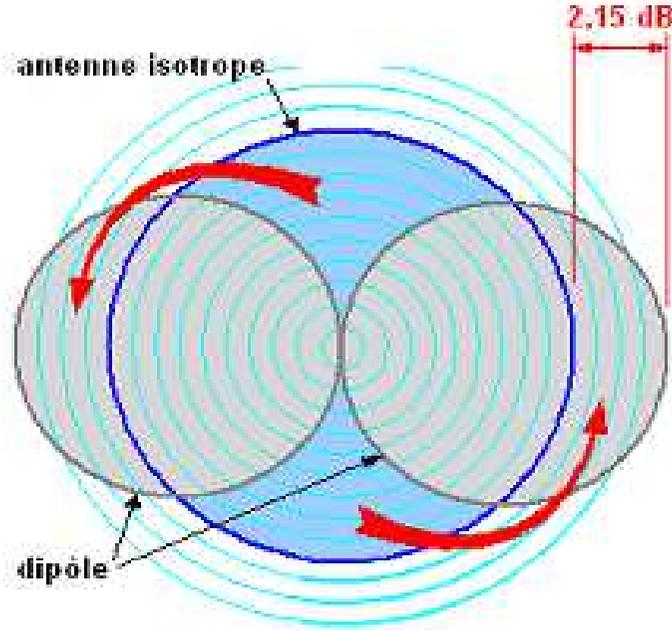
Le rayonnement est théoriquement nul dans l'axe des brins. Le niveau 0 dB de référence est celui que l'on attribue à l'extrémité des lobes. Au point **A** le niveau est de -10 dB et il est de -20 dB au point **B**.

Les points **C** et **C'** sont particuliers et correspondent à un affaiblissement de -3 dB. Ils servent à déterminer l'angle θ_H qui est l'angle d'ouverture de l'antenne dans le plan horizontal. (voir directivité des antennes)



Le gain des antennes: d'où vient le gain des antennes.

Prenons le cas du doublet demi-onde dans l'espace (voir Diagramme de rayonnement du dipôle demi-onde). Si l'on coupe le tore par un plan contenant son axe (et le dipôle par la même occasion) on obtient le diagramme ci-contre avec le profil du tore représenté en gris. En fond bleu est représenté le rayonnement de l'antenne isotrope dans l'espace avec la même puissance d'émission. Tout se passe comme si l'énergie que l'antenne isotrope rayonne suivant les directions proches de l'axe du tore était utilisée pour renforcer le rayonnement dans le plan perpendiculaire à son axe (flèches rouges). En fait le gain d'une antenne n'est qu'une autre façon de répartir le rayonnement en favorisant certaines directions au détriment des autres.



Le gain en dB d'une antenne:

On exprime généralement le gain d'une antenne en décibels, soit par rapport au dipôle, soit par rapport à l'antenne isotrope.

L'unité utilisée dans le premier cas est le dBd (décibel par rapport au dipôle) et dans le second cas le dBi (décibel par rapport à l'antenne isotrope). Le dBd est une unité pratique car elle permet de se faire une idée de l'amélioration apportée par l'antenne à gain mais le dBi est une meilleure référence car elle est universelle. La différence entre le dBi et le dBd est 2,15 décibels, autrement dit un dipôle demi-onde a un gain de 2,15 dBi.

Dans les catalogues et publicités des fabricants, il est fréquent que les gains des antennes soient exprimés simplement en dB sans autre précision. Par précaution on considérera qu'il s'agit de dBi plutôt que de dBd. D'autant plus que les gains annoncés sont parfois délibérément exagérés et quand ils sont exacts, ils sont alors souvent exprimés par rapport à l'antenne isotrope.

Réversibilité de l'antenne:

L'antenne est un dispositif réversible, on bénéficie de ses performances à la fois en émission et en réception. Le fait d'utiliser une antenne présentant un gain de 6 dBd a un double avantage :

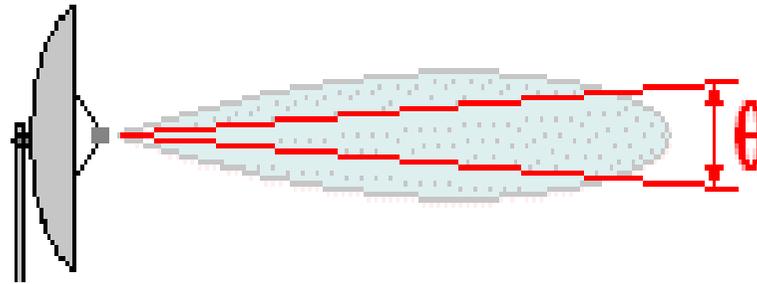
- en émission : effet équivalent à quadrupler la puissance de l'émission (voir PER et PIRE)
- en réception : tous les signaux provenant de la direction du lobe principal de l'antenne seront amplifiés de 6dB.

Relation entre dimensions du lobe principal et gain de l'antenne

Comme le gain est d'autant plus grand que l'énergie est rayonnée en un faisceau étroit, il est possible d'estimer grossièrement le gain d'une antenne en mesurant les deux angles d'ouverture à -3dB (α_E verticalement et α_A horizontalement).

La formule suivante permet cette estimation pour des angles inférieurs à 90 degrés et pour des antennes dont le lobe principal se distingue nettement des lobes secondaires.

$$G = 10 \cdot \log \left(\frac{41000}{\theta_A \cdot \theta_E} \right)$$



Avec :

G : gain en dBi de l'antenne

qE : angle d'ouverture en élévation (verticalement) (voir Diagramme de rayonnement)

qA : angle d'ouverture en azimut (horizontalement)

Les angles sont exprimés en degrés.

Exercice: Une antenne yagi de 9 éléments à un gain de 13,5 dBi. Quel est son gain par rapport à un dipôle?

Réponse: $13,5 - 2,15 = 11,35$ dBd

Dipôle symétrisé

Le dipôle ayant une structure symétrique, on préférera pour l'alimenter avec une ligne coaxiale utiliser une adaptation en gamma (voir figure ci-dessous)

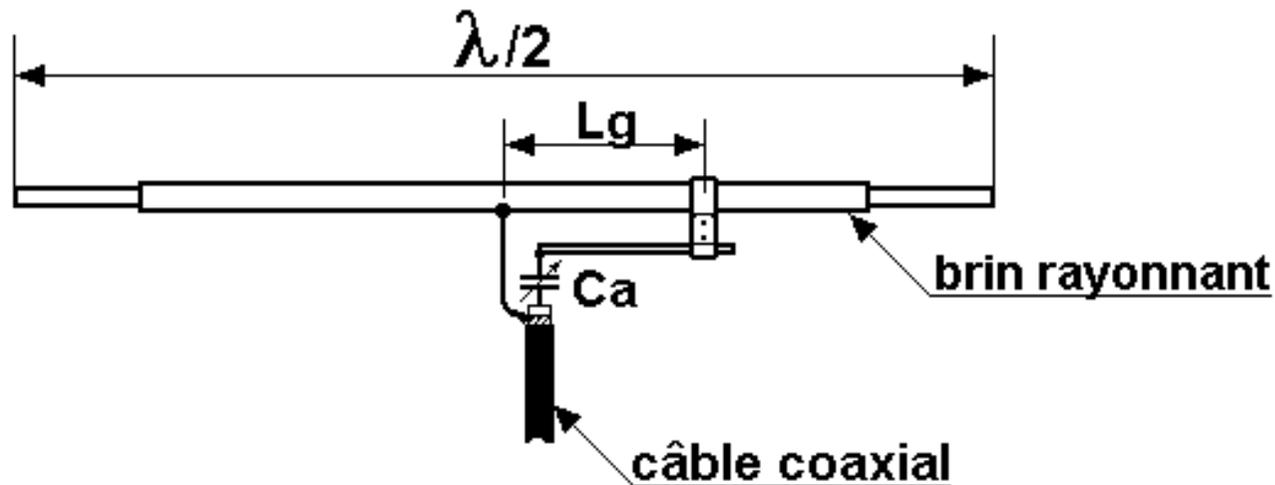
On calculera sommairement la longueur physique du brin rayonnant à l'aide de la formule suivante: **$L_{\text{phys}} = 142/f$** avec **f en MHz.**

Réglages

L'adaptation de l'antenne peut être effectuée parfaitement en ajustant :

- la longueur du brin rayonnant
- la longueur L_g du gamma
- la capacité du condensateur (C_a annule l'inductance L_g)

Un pont de bruit (ou à défaut un impédancemètre d'antenne) sera très utile.



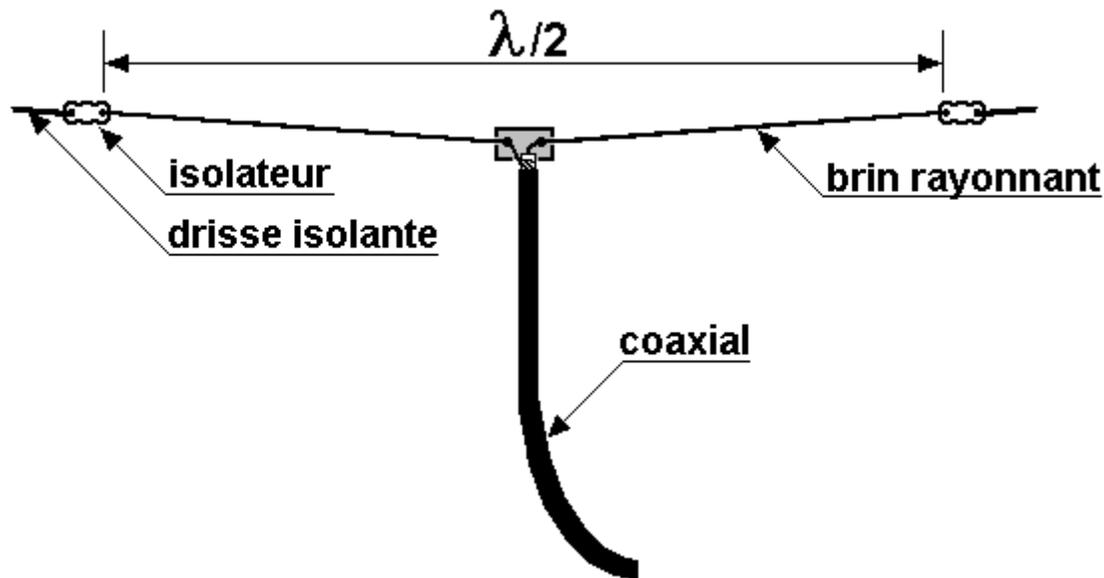
Doublet demi-onde

Le dipôle demi-onde, communément appelé "doublet", est un doublet de Hertz dont la longueur est théoriquement égale à la moitié de la longueur d'onde du signal à émettre ou à recevoir. En pratique, pour tenir compte de l'effet d'extrémité, on adopte une longueur physique de quelques pour-cents inférieure à la longueur théorique.

L'antenne est alimentée en son centre, là où l'impédance est proche de 75 ohms, par une ligne symétrique ou un câble coaxial

Réalisation

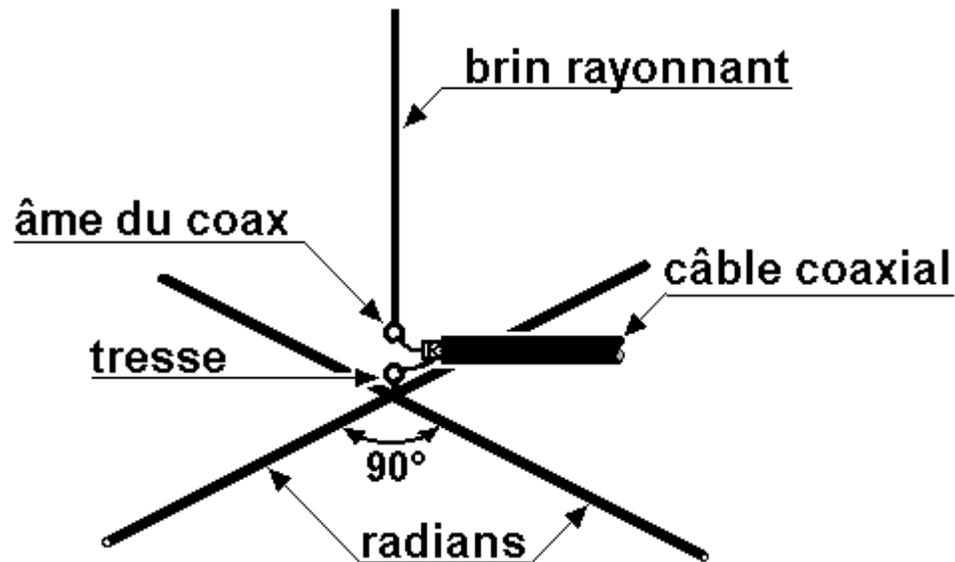
La longueur physique du conducteur (fil ou tube) est plus courte que la demi-longueur d'onde ; pour une antenne filaire décimétrique on pourra la calculer en mètres à l'aide de la formule simplifiée : **$L_{\text{phys}} = 145/f$** avec **f** en **MHz**.



L' Antenne quart d'onde ou ground-plane

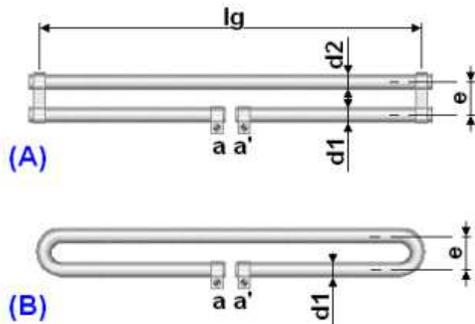
Principe:

L'antenne ground-plane (GPA : ground plane antenna) est une application de l'antenne Marconi dont l'élément rayonnant, vertical, a une longueur électrique égale au quart de la longueur d'onde de travail. Le plan de sol, artificiel est constitué de quatre radians horizontaux de longueur $\lambda/4$ également. La bande couverte dépend entre autre du diamètre du tube rayonnant. L'impédance au point d'alimentation est d'environ 36 ohms, c'est à dire la moitié de l'impédance au centre du doublet demi-onde. Le rayonnement est pratiquement omnidirectionnel. L'angle de départ est faible et favorise le trafic à longue distance



Les antennes cadre, loop et boucles

Dipole replié ou trombone:

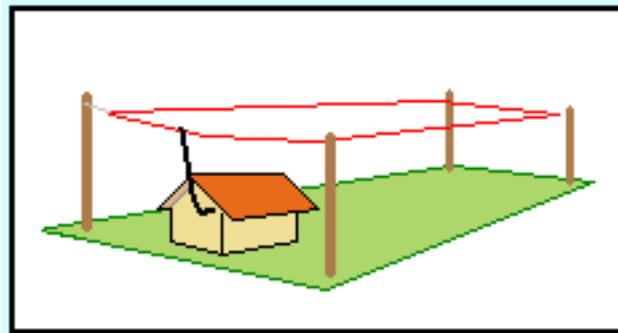


A la résonance, l'impédance est égale à 4 fois l'impédance du dipôle ouvert, soit 300 ohms. $l_g = 143/f$ avec f en MHz et l_g en m et $e=750/f$ avec f en Mhz et e en cm.

Boucle ou loop:

Sur les bandes basses (1,8Mhz et 3,5Mhz) on déploie la boucle dans un plan horizontal. Les problèmes liés à l'envergure du doublet demi-onde sont ainsi contournés en utilisant le périmètre du terrain disponible au lieu d'un seul des côtés de ce dernier. Une boucle horizontale peut être installée sur un petit terrain, l'émetteur se trouvant à la périphérie.

Sur les bandes hautes, le cadre peut être tendu verticalement entre deux supports ou sur un croisillon isolant fixe ou rotatif.



L' Antenne YAGI-UDA

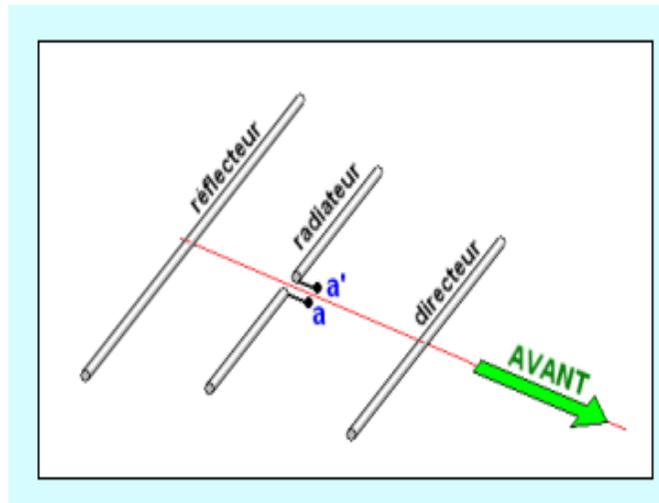
L'antenne yagi est une antenne directive dont le gain est supérieur à celui du dipôle dans la direction avant et inférieur dans la direction arrière.

Elle se compose de :

- un dipôle demi-onde, alimenté comme il se doit en son milieu, c'est l'élément **radiateur**
- un (ou plusieurs) élément **réflecteur**, non alimenté
- un (ou plusieurs) élément **directeur**, non alimenté

Les éléments non alimentés sont qualifiés de "parasites"

La configuration minimum pour une antenne yagi correspond à un dipôle accompagné d'un seul élément parasite, un réflecteur (le plus souvent) ou un directeur.



Principe de fonctionnement

Si on place un conducteur de longueur égale à une demi-onde à proximité d'un dipôle, le champ électromagnétique rayonné par ce dernier induit un courant HF de même fréquence mais d'amplitude bien moindre dans le conducteur. On peut comparer ce phénomène à celui qui se produit dans un transformateur, le dipôle jouant le rôle d'enroulement primaire. On peut aller plus loin en imaginant deux circuits oscillants accordés sur la même fréquence et couplés l'un à l'autre. Le dipôle, élément rayonnant, est appelé "radiateur" dans une antenne yagi, tandis que les autres éléments qui lui sont subordonnés, sont les éléments parasites. L'élément parasite qui est le siège d'un courant HF va rayonner, comme le dipôle. Si les deux éléments sont placés parallèlement l'un à l'autre et à une distance qui est de l'ordre de $l/10$ les champs électromagnétiques vont se perturber mutuellement. Le diagramme de rayonnement du dipôle va être déformé et deux cas peuvent se produire :

- l'élément parasite est plus court que le radiateur : le lobe principal de rayonnement du dipôle sera renforcé dans la direction radiateur->élément parasite. L'élément parasite est *directeur*.

- l'élément parasite est plus long que le radiateur : le lobe principal de rayonnement du dipôle sera renforcé dans la direction élément parasite->radiateur. L'élément parasite est *réflecteur*.

Les performances de l'antenne dépendent de la longueur et du diamètre de chacun des éléments et de l'espacement entre éléments. Un directeur, plus court que le radiateur, se comporte comme un dipôle alimenté en son centre et dont l'impédance serait capacitive. Dans le même ordre d'idée l'élément réflecteur, plus long que le radiateur, a une impédance selfique ou inductive.

Le déphasage entre le courant traversant le radiateur et celui induit dans l'élément parasite dépend de l'espacement entre éléments et de la réactance de celui-ci. C'est le déphasage entre les champs électromagnétiques produits par les deux éléments qui détermine le diagramme de rayonnement de l'ensemble.

Influence du nombre d'éléments:

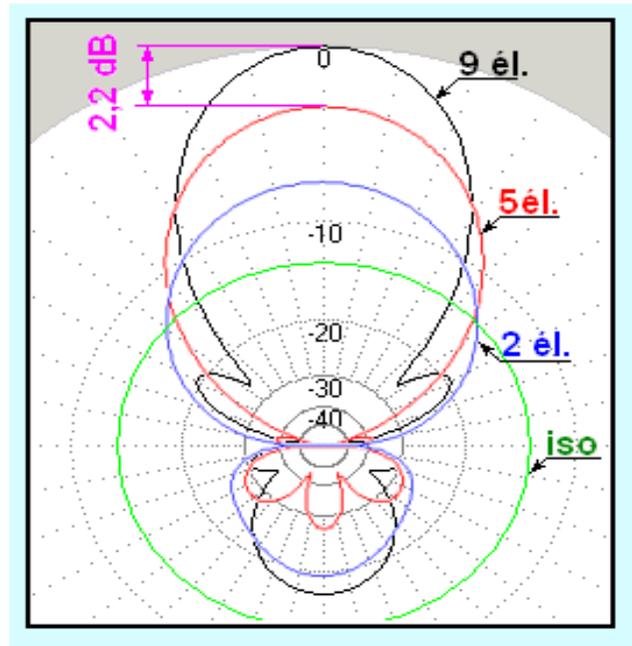
Le gain de l'antenne yagi dépend beaucoup du nombre d'éléments directeurs, donc de la longueur du boom de l'antenne. Quand on augmente le nombre d'éléments, le lobe principal s'allonge en même temps qu'il devient plus étroit. L'antenne devient plus directive, ce qui signifie que la valeur de son angle d'ouverture diminue avec le nombre d'éléments de l'antenne.

Quatre antennes placées dans l'espace sont comparées sur la figure ci-contre :

- antenne isotrope en **vert**, référence 0 pour le calcul du gain
- yagi 2 éléments en **bleu**,
- yagi 5 éléments en **rouge**,
- yagi 9 éléments en **noir**, antenne de référence ici.

On peut déterminer graphiquement la différence de gain avant entre l'antenne 9 éléments et l'antenne 5 éléments. Elle est de 2,2 décibels dans cet exemple.

On peut voir que le gain de l'antenne isotrope par rapport à la 9 éléments est compris entre -10 et -20 décibels ou, plus exactement -13,5 dB. Réciproquement, le gain de l'antenne 9 éléments est de +13,5 dBi.



Influence de la hauteur par rapport au sol:

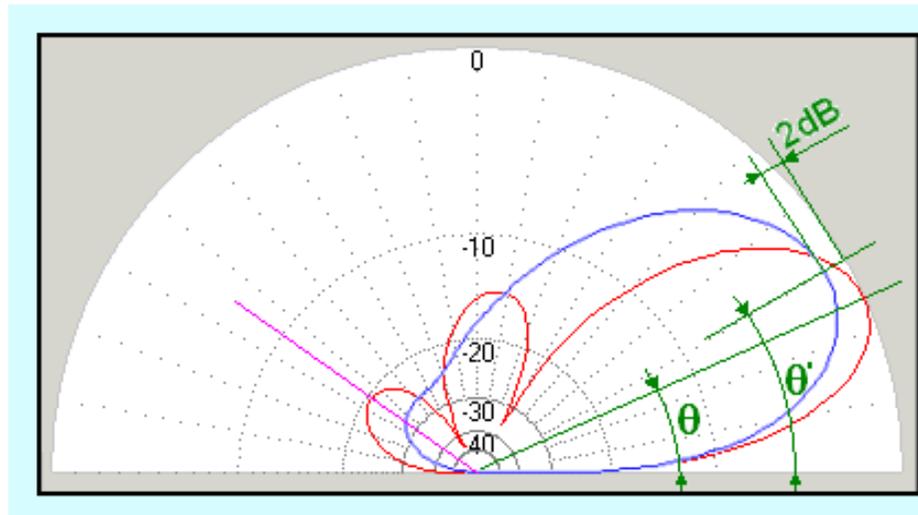
L'antenne yagi est un peu moins tributaire de la nature et de la proximité du sol que d'autres antennes. Pourtant, la hauteur de l'antenne par rapport au sol détermine fortement le diagramme de rayonnement de l'antenne, donc les caractéristiques de son lobe principal.

Le diagramme ci-contre correspond à une antenne 3 éléments 14MHz placée à 8 mètres de haut (en bleu) puis à 12 m de hauteur (en rouge) par rapport à un sol moyen.

Avec l'antenne à 12 m, on constate plusieurs différences :

- angle de départ α plus bas sur l'horizon
- gain avant meilleur de 2 dB
- rapport avant/arrière détérioré par un lobe secondaire (à -21 dB) tirant à 35 degrés d'élévation.

Cette antenne placée à 12 mètres de hauteur a de fortes chances d'être plus favorable au trafic DX (longue distance) que si elle était à 8 mètres de haut.



Dimensions d'une beam 3 éléments:

Voici à titre indicatif les dimensions d'une beam 3 éléments *entière* (c'est à dire non raccourcie). Ce sont des valeurs qui ont été dégrossies à partir des formules suivantes puis optimisées avec MMANA, ce qui signifie qu'il faudra peut-être procéder à des retouches sur les longueurs des éléments lorsque l'antenne sera en place, à sa hauteur définitive.

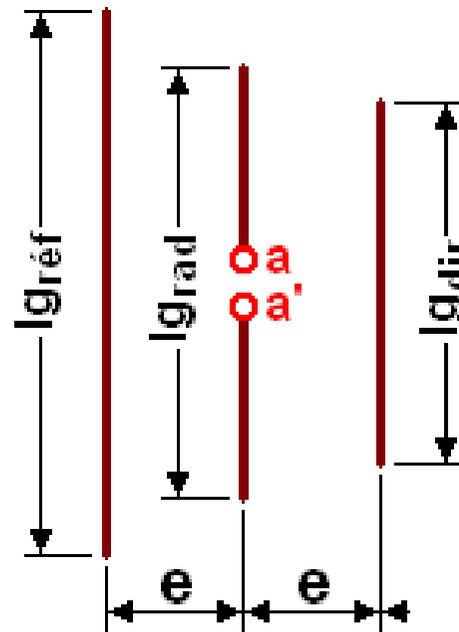
$$\lambda = \frac{300}{f}$$

$$lg_{dir} = 0,468 \cdot \lambda$$

$$lg_{Ref} = 0,51 \cdot \lambda$$

$$lg_{Rad} = 0,498 \cdot \lambda$$

$$e = 0,122 \cdot \lambda$$



Antenne parabolique : le gain

Le gain isotrope de l'antenne parabolique dépend principalement de son diamètre et de la fréquence d'utilisation (en fait la longueur d'onde) mais aussi, dans une moindre mesure, de l'efficacité du système d'illumination de la parabole par la source (coefficient **k**) et de la précision de réalisation du réflecteur.

On peut utiliser la formule :

$$\mathbf{G} = \mathbf{10} \cdot \mathbf{log} \left(\mathbf{k} \cdot \left(\frac{\pi \cdot \mathbf{D}}{\lambda} \right)^2 \right)$$

où :

k = rendement du système d'illumination (source), en moyenne 0,55

D : diamètre du réflecteur parabolique

lambda : longueur d'onde d'utilisation

D et **lambda** sont exprimés dans la même unité

Exemple:

Gain théorique en dBi en fonction du diamètre (en ligne) et de la fréquence (en colonne)

ex : un parabole de 1 m a un gain théorique de 26 dBi sur 2,4 GHz

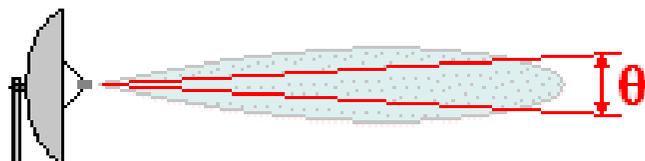
	0,435	1,25	2,4	3,4	5,7	10,25	24,1	47,1
0,5	5	14	20	23	27	32	40	46
1	11	20	26	29	33	38	46	52
2	17	26	32	35	39	44	52	58
4	23	32	38	41	45	50	58	64
8	29	38	44	47	51	56	64	70

La directivité:

L'angle d'ouverture du lobe principal d'une antenne parabolique est d'autant plus étroit que le gain de l'antenne est grand. Il est exprimé en degrés. L'affaiblissement considéré pour la mesure de l'angle est -3dB. On peut le calculer avec la formule:

$$\theta = \frac{70 \cdot \lambda}{D}$$

D et λ doivent être exprimés dans la même unité.



Antenne parabolique : la source

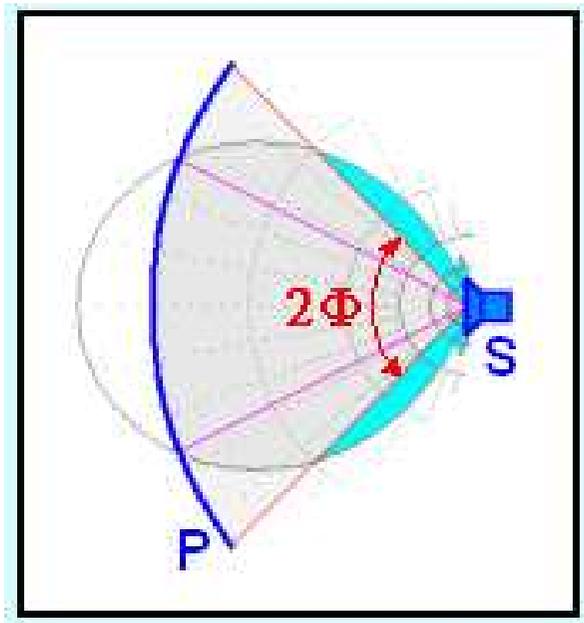
La source est une antenne de dimension réduite placée au foyer du réflecteur parabolique. Son rôle est d'éclairer le réflecteur de façon optimum.

La source est une antenne dont le lobe de rayonnement est choisi de façon à éclairer complètement la parabole sans déborder.

Optimisation de l'éclairage, le rapport f/D :

L'élément rayonnant de la source doit être placé au foyer de la parabole, là où toute l'énergie est concentrée. Pour éclairer totalement le réflecteur, il faut que le diamètre de celui-ci corresponde au lobe de rayonnement de l'antenne-source. Le rapport distance focale/Diamètre (f/D) est un paramètre essentiel du réflecteur parabolique. On le choisit entre 0,4 et 0,8. Un rapport f/D trop faible donne une antenne très compacte et nécessitant une source avec un angle d'ouverture très grand. A l'opposé un rapport f/d élevé donne une antenne plus encombrante utilisant une source plus directive.

Sur la figure, la source **S** a un angle d'ouverture à -10dB (trait rouge) qui correspond à l'angle $2F$ sous lequel le réflecteur parabolique **P** est vu depuis le foyer. En magenta est représenté l'angle d'ouverture à -3dB. La partie du lobe de rayonnement coloré en bleu-cyan passe à côté du réflecteur.



Exemples :

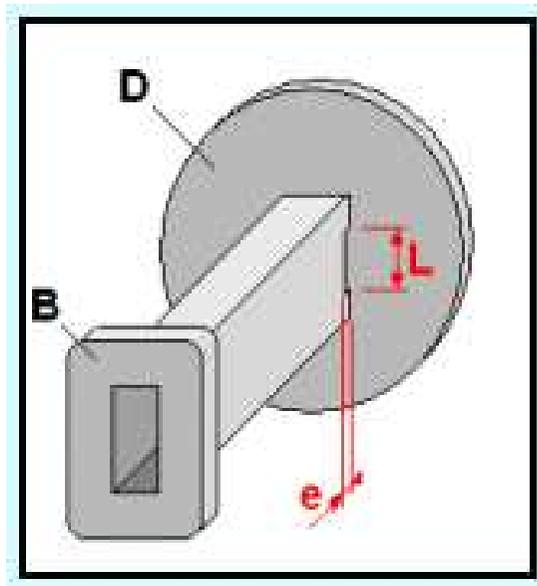
Soient deux paraboles de 60 et 100 cm de diamètre. Compte tenu de leur rapport f/D , il faudra à l'une une source dont l'angle d'ouverture sera de 50 degrés tandis que l'autre nécessitera 80 degrés. Des cornets circulaires bien taillés peuvent convenir.

D	f	f/D	θ
60	40	0,66	50°
100	40	0,4	80°

Différentes sortes de sources:

Il existe de nombreuses formes de sources déterminées par la fréquence et la forme du lobe souhaité. Un des types de source les plus courants est l'antenne cornet de forme cylindrique ou pyramidale. Selon la fréquence, le radiateur peut être un dipôle ou un monopôle (quart d'onde).

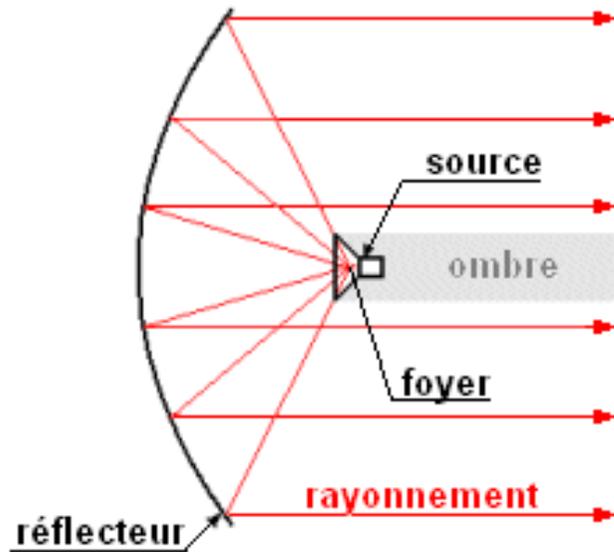
Sur 10 GHz et au-dessus, on trouve aussi le "penny-feed" (figure ci-contre) constitué d'un morceau de guide d'onde à l'extrémité duquel deux étroites échancrures (de largeur e et de longueur L) ont été pratiquées avant de fermer avec un disque métallique D faisant office de réflecteur. Son angle d'ouverture très large permet d'utiliser des réflecteur dont le rapport f/D est inférieur à 0,4



Position de la source:

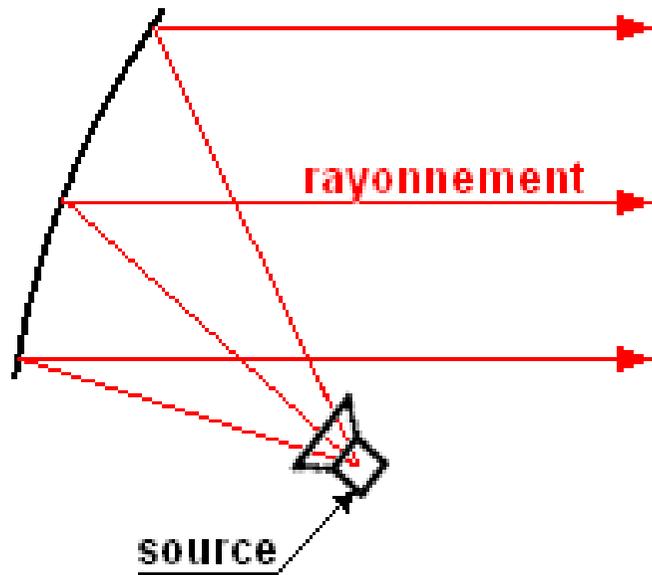
Plusieurs montages sont utilisés en fonction de différents critères:

A. PRIME FOCUS:



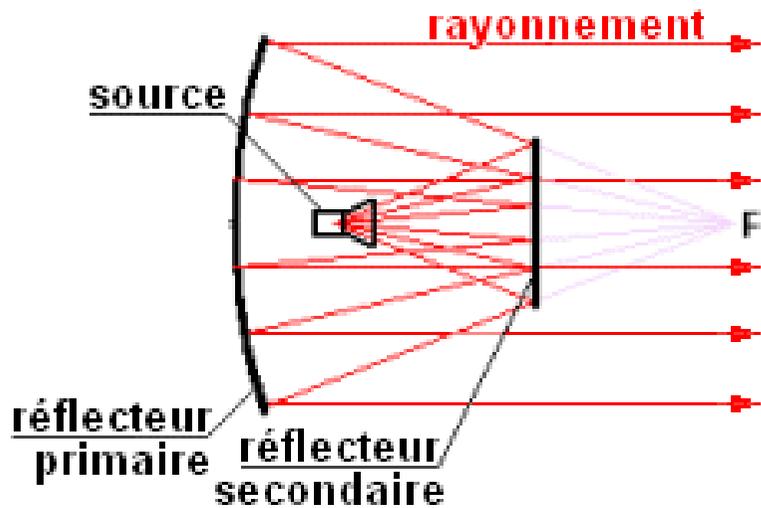
"Prime focus" : la source est placée au foyer primaire du réflecteur. Mais la source et son support font de l'ombre au signal reçu ou émis. Le rendement est moins bon.

B. OFFSET:



"offset" : la source est encore placée au foyer d'une portion de parabole mais elle ne fait plus d'ombre

C. CASSEGRAIN:



"Cassegrain" Pour diminuer la longueur de l'antenne un réflecteur plan la longueur de ou hyperbolique renvoie le rayonnement capté.

Le montage "prime focus" (ou "foyer primaire") est préféré pour les antennes de relativement grandes dimensions, quand l'ombre de la source ne présente qu'une faible surface.

La plupart des antennes pour la réception de la télévision par satellite sont de type "offset" qui présente en outre l'avantage de pouvoir viser assez haut au-dessus de l'horizon avec un réflecteur pratiquement vertical.

Dans le montage "Cassegrain", qui est assez commun dans les télescopes, un miroir plan ou convexe hyperbolique renvoie l'énergie reçue vers un foyer F' plus proche du réflecteur que le foyer réel de la parabole. La longueur des antennes à longue distance focale est ainsi diminuée. Le miroir hyperbolique est préféré car il permet un raccourcissement de l'antenne plus important.

Il existe encore un autre montage dit "grégorienne" qui est un système Cassegrain dont le réflecteur secondaire et la source sont montés en "offset".

FIN