

Généralités sur les antennes HF (amateur)

Robert BERRANGER, F5NB

Article publié dans Radio-REF de mai 2005

Il n'est pas question ici de faire un cours sur les antennes HF, il faudrait monopoliser les pages de Radio-REF pendant plusieurs années (et je ne suis pas spécialiste). Je me contenterai donc d'un rappel succinct de quelques notions fondamentales, qui semblent parfois oubliées. Merci aux "Jean-Pierre" de "Allô docteur ?", F6FQX et F6BPS, ainsi qu'à F6AEM, pour leur contribution sous forme de relecture "active".

Antenne ? Vous avez dit "antenne" ?

Tout conducteur dont la longueur n'est pas négligeable devant la longueur d'onde et qui est parcouru par un courant HF génère un champ électromagnétique complexe. Si ce champ n'est pas neutralisé par un champ inverse (comme dans une ligne), alors une partie de celui-ci se propage (champ actif) tandis que l'autre partie (champ réactif) reste comme attaché au conducteur. Dans cette situation, le conducteur est appelé « antenne ». Le champ actif rayonné constitue des pertes par rayonnement qui s'ajoutent aux autres pertes, par effet Joule, dans les conducteurs et les diélectriques (sol), etc... On définit une résistance de rayonnement (R_r) équivalente à celle qui, parcourue par le courant de l'antenne, dissiperait la même puissance que celle rayonnée. Cette résistance s'ajoute aux résistances de pertes (R_p) pour constituer la résistance d'antenne (R_a) et dissiper la puissance totale fournie au système antennaire. Un champ électromagnétique, comme son nom l'indique peut être décomposé en deux champs : un champ électrique et un champ magnétique en quadrature. Si pour les champs réactifs, la proportion entre les deux composantes dépend du producteur, bobine ou condensateur, pour le champ actif rayonné, la proportion entre les deux composantes ne dépend que du milieu de propagation, quel que soit le système qui l'a produit, boucle ou fouet.

Une antenne peut être involontaire (rayonnement parasite), ou "étudiée pour...". Dans ce dernier cas, on cherche à ce qu'elle rayonne le maximum de la puissance que peut fournir un émetteur. Celui-ci étant un générateur bipolaire (deux bornes en sortie), l'antenne devra être dipôle aussi, c'est à dire composée, soit de deux brins aériens, soit d'un brin aérien et d'un "contrepois" (voir plus loin), soit d'une boucle.

La liaison entre l'émetteur et l'antenne se fera avec une ligne adaptée. L'ensemble « antenne, ligne et émetteur » aura des caractéristiques électriques telles que le transfert d'énergie sera maximum entre l'émetteur et l'antenne (**adaptation** de l'antenne).

Ensuite on cherchera à ce que le maximum de la puissance consommée par l'antenne soit effectivement rayonné (**rendement électrique** de l'antenne).

Enfin, on installera l'antenne dans un environnement (géométrie, position, hauteur au dessus du sol, etc...) tel que le rayonnement soit maximum dans une direction privilégiée (**directivité (gain)** de l'antenne).

Polarisation de l'onde.

La polarisation de l'onde émise est déterminée par la direction du champ électrique comparée au sol. Elle est "horizontale" pour un fil horizontal (parallèle au sol), "verticale" pour un fil vertical (perpendiculaire au sol) et "inclinée" pour tous les cas mixtes (nous n'aborderons pas la polarisation circulaire, inutilisée en HF).

Une différence fondamentale entre les polarisations H et V résulte de la contribution du sol à la formation du diagramme de rayonnement. Pour un angle d'incidence donné, l'onde à grande distance est la combinaison d'une onde directe et d'une onde réfléchie par le sol. Lors de cette réflexion, deux phénomènes se produisent :

- une partie de l'énergie est absorbée par le sol
- l'onde qu'il réfléchit subit un déphasage.

Or les ondes polarisées horizontalement, contrairement aux ondes polarisées verticalement, et quels que soient le sol et l'incidence, se réfléchissent pratiquement sans pertes et en phase. Ainsi pour un sol moyen (jardin), le gain d'un doublet H sur celui d'un doublet V peut atteindre 5 dB.

Une autre différence concerne la contribution du sol à la formation du diagramme vertical. Pour toutes les antennes près du sol, le diagramme vertical est composé d'un nombre de lobes qui va en augmentant avec la hauteur de l'antenne au dessus du sol (plus un par demi-onde). Lorsque le fil fait un angle de 90° avec le sol, cas de la verticale, la combinaison de l'onde directe et de l'onde réfléchie par le sol est maximum dans une direction parallèle à celui-ci (0°), les diagrammes commencent donc par un demi lobe. Ceci est montré par la théorie des images largement invoquée dans la littérature. Mais, elle n'est applicable que pour un sol **parfaitement conducteur**, ce qui n'est jamais obtenu en pratique. Avec un sol ordinaire, le diagramme se "referme" à 0° comme montré plus loin dans le chapitre "L'antenne monopôle". Pour une antenne horizontale, les diagrammes débutent par un minimum et il lui faut une hauteur de $0,5 \lambda$ pour commencer à avoir un gain acceptable à 10° d'élévation. Par contre le diagramme est très peu influencé par la nature du sol.

En pratique, avec un sol moyen, si l'on considère le gain pour des angles entre 5 et 10° (long DX), le doublet H ne surpasse le doublet V que s'il est à une hauteur supérieure à $0,5\lambda$ (par ailleurs, hauteur souvent nécessaire pour avoir un bon dégagement).

L'antenne dipôle filaire.

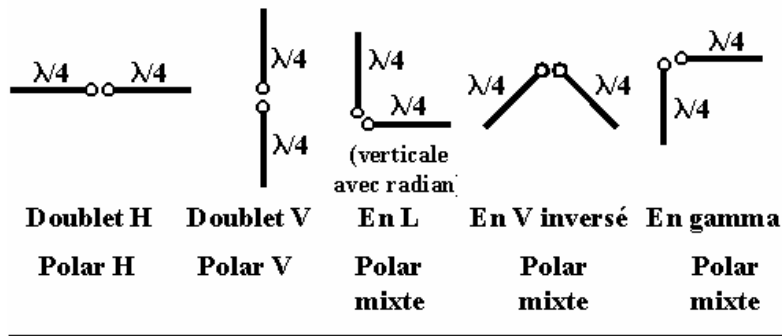
L'antenne dipôle est constituée de deux fils conducteurs reliés aux deux bornes de l'émetteur. Ces fils peuvent être en ligne, parallèles (partiellement), à angle droit ou angle quelconque, égaux ou inégaux, libres ou réunis (boucle). Ils peuvent être disposés horizontalement, verticalement, en oblique ou mixte. L'ensemble peut être électriquement résonant ou non.

Fonctionnement électrique du dipôle :

Les fils constituent des selfs en série avec la capacité qui existe entre les deux brins du dipôle. Nous avons donc un circuit résonant série dont l'amortissement est principalement dû à la résistance de rayonnement. Cela veut dire qu'il existe aux abords du dipôle un fort champ réactif. Mais celui-ci ne produit pas de rayonnement lointain. Ce modèle série est valable pour la fréquence de résonance et en dessous (antennes raccourcies). Pour les fréquences supérieures, cela se complique.

Sur la figure 1, nous avons quelques exemples d'antennes dipôles filaires.

Dipôles filaires symétriques



Dipôles filaires asymétriques

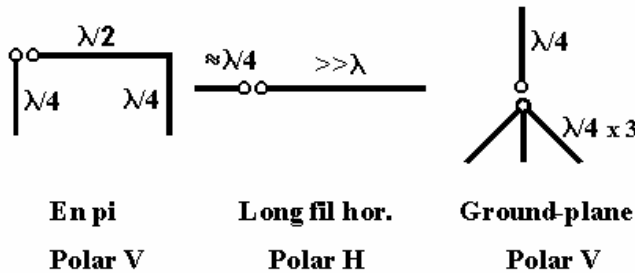


Figure 1

N-B : Ces exemples sont génériques. Il existe de nombreuses variantes, en particulier sur le mode d'alimentation. Alors, pour des antennes semblables, nous pouvons avoir des comportements très différents.

Sur la figure 2, nous avons quelques exemples d'antennes dipôles boucles.

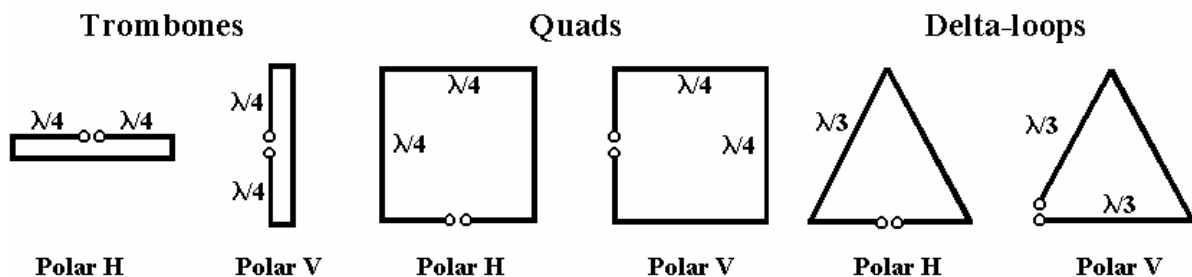


Figure 2

N-B : Les boucles décrites ici ont un périmètre égal à Lambda et sont résonantes. Les polarisations sont plus ou moins mixtes avec une prédominance pour l'une d'elle en fonction de la répartition des courants dans la boucle. A hauteur égale du boom, les versions à polarisation verticale ont un angle de départ plus faible.

L'antenne monopôle.

D'un point de vue rayonnement, rien ne force à avoir un dipôle, un seul suffit si l'on dispose d'un point de référence pour la tension qu'on lui applique. Par contre l'émetteur a absolument besoin de débiter dans un dipôle électrique. Il existe plusieurs systèmes antennaires

remplissant ces fonctions mixtes. Parmi ceux-ci, nous nous attarderons sur le monopôle vertical avec plan de sol.

Une partie du dipôle électrique est formée d'un fil (le monopôle) érigé perpendiculairement et au centre d'une surface conductrice qui constitue l'autre partie. Celle-ci ne rayonne pas si l'alimentation est connectée au point de symétrie des courants la parcourant. La surface conductrice, appelée "plan de sol", doit être en principe infiniment grande devant λ . Le plan de sol peut être naturel (eau, terre), ou artificiel (plaque métallique ou une grande quantité de fils disposés en étoile).

Ce système antennaire a les propriétés suivantes :

- Résistance de rayonnement divisée par deux par rapport au dipôle
- Rayonnement inexistant sous le plan de sol
- Angle de départ parallèle au plan de sol (zéro degré si sol parfait)
- Rayonnement omnidirectionnel dans la direction perpendiculaire au monopôle.

Mais tout ceci ne vaut que si le plan de sol est **infini, homogène et parfaitement conducteur** pour la fréquence d'émission, ce qui est difficile à obtenir pour les fréquences HF.

Parmi les plans de sol naturels, seule l'eau salée (mer calme) se rapproche de la perfection. Le sol type prairie ou jardin n'est acceptable que s'il est détrempé. L'eau douce n'est pas meilleure. Le sol urbain est moins bon encore et le sable du désert ou le sol gelé, pires. Voir sur la figure 3 l'effet de la qualité du sol sur le diagramme vertical de rayonnement d'un monopôle quart d'onde (d'après ON4UN).

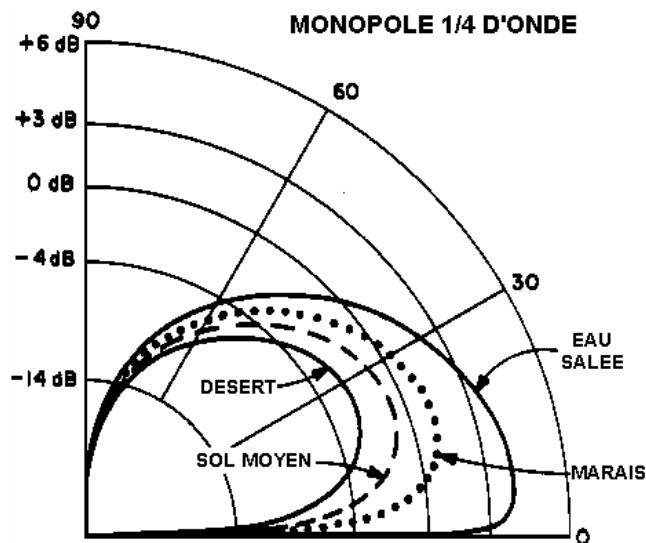


Figure 3

Nous voyons que non seulement le diagramme vertical "remonte", mais le rendement du système diminue. A noter qu'en dehors de l'eau salée, si la connexion au sol se fait par un piquet de terre, le rendement peut chuter de plusieurs décibels. Pour avoir des résultats conformes à ces diagrammes, il est nécessaire de rajouter au niveau du sol au minimum deux radians quart d'onde en opposition.

Pour améliorer le gain et abaisser l'angle de départ, la véritable solution passe par un plan de sol artificiel. Pour être efficace, celui-ci doit comporter au moins une cinquantaine de fils radiaux (en étoile) enterrés, et de longueur supérieure à $\lambda/4$.

Une solution pour éviter les radians consiste à utiliser un monopôle demi-onde. Un seul piquet de terre suffit alors. Le gain maxi ne s'en trouve pas modifié par rapport à un monopôle quart d'onde, et le diagramme vertical s'abaisse un peu (gain de 1 à 2 dB à 10°). Par contre l'adaptation à un câble coaxial est plus délicate du fait de sa haute impédance (surtout si l'antenne est multi bandes).

Autres monopôles.

Nous pouvons "hisser" un monopôle vertical à une certaine hauteur au dessus du sol en remplaçant le plan de sol par un ensemble de radians horizontaux de longueur finie, et ayant les mêmes propriétés **électriques** que lui. La plus connue des antennes de ce type est la "ground plane"⁽¹⁾, qui comporte trois ou quatre radians **horizontaux** de longueur $\lambda/4$. Elle est peu employée en HF en dessous de 28 MHz, car d'un encombrement important.

Si ses caractéristiques électriques sont bien celles d'un monopôle, l'impédance et le diagramme de rayonnement diffèrent d'un monopôle au sol du fait des dimensions finies du plan de sol artificiel formé par les radians (effets de diffraction).

On peut utiliser des radians raccourcis avec encore un rendement acceptable. Mais, plus les radians sont courts, et plus la nature du support de l'antenne et la hauteur au dessus du sol ont une influence sur l'impédance et le diagramme de rayonnement. Le phénomène est beaucoup moins sensible avec un monopôle demi-onde, comme pour le monopôle au sol.

Il existe des monopôles HF horizontaux. Leur fonctionnement est complexe suivant la qualité du sol et la hauteur du monopôle. Celui-ci est en général long de plusieurs lambdas. Lorsqu'il est disposé très près du sol, c'est la mauvaise qualité de ce dernier qui permet le rayonnement et le système a un rendement médiocre comme pour la "Beverage". S'il est disposé à une hauteur faible devant la longueur d'onde, c'est la "montée" qui rayonne le plus, la partie horizontale jouant surtout le rôle d'une capacité terminale (d'autant plus que le sol est bon conducteur). Nous sommes alors ramenés au cas d'un monopôle (court) vertical chargé. Ces antennes ne présentent qu'un intérêt particulier pour nous, radioamateurs.

Antennes à contrepoids.

Ce sont toutes les antennes qui n'ont pas été étudiées pour être dipôles. Alors, ce sont donc des monopôles ? Oui, mais selon la nature du contrepoids, elles fonctionneront en "vrais" monopôles, ou en "pseudos" dipôles.

Avec les monopôles verticaux vus précédemment, les contrepoids, sol ou radians, étaient sensés ne pas rayonner. Mais ce sont des cas particuliers. Dans la plupart des cas, le contrepoids a une forme "patatoïde", sans aucune symétrie, et il rayonne d'une façon ... patatoïde également. C'est pourquoi, j'appelle ces systèmes antennaires des "pseudos dipôles".

Le contrepoids est obligatoire pour le rayonnement du "monopôle". Il peut prendre parfois des aspects inattendus. Parmi les contrepoids courants, nous trouvons :

- Les pistes de masse du circuit imprimé (dans un boîtier en plastique d'un mini émetteur UHF).
- La tresse de masse du câble coaxial d'alimentation
- Le boîtier métallique de l'émetteur (postes portables avec fouets)

- La personne humaine qui tient les postes ci-dessus dans la main ou sur le dos. Nous sommes bons conducteurs, car composés à plus de 70% d'eau salée.
- Un véhicule métallique. Celui-ci peut être un plan de sol presque parfait pour les UHF, mais un piètre contreponds pour les bandes basses HF, même s'il présente une bonne capacité avec un sol généralement médiocre.
- Une structure **métallique**, grue, pylône, mât, haubans, charpente, toit, etc...
- Un bateau métallique, toujours bon contreponds quand il navigue sur la mer (cas du bateau de plaisance en maritime mobile).
- Un avion avec suffisamment de parties métalliques, cas typique du contreponds "patatoïde".
- Une combinaison de plusieurs types, par exemple, une personne agenouillée sur le sol et qui émet avec un poste HF sur son dos (bon pour soigner les rhumatismes).

Il est certain que lorsque nous installons un monopôle avec un contreponds de ce genre, nous n'avons qu'une vague idée du rendement et du diagramme de rayonnement. Nous pouvons essayer de le modéliser et simuler le système antennaire obtenu. Ceci demande en général une grosse puissance de calcul.

Du monopôle au dipôle.

1 - Les métamorphoses de la Ground-Plane.

La "Ground-Plane" est vaguement définie. Le terme englobe un ensemble d'antennes ayant des comportements très différents et que nous allons détailler ci-après dans la figure 4.

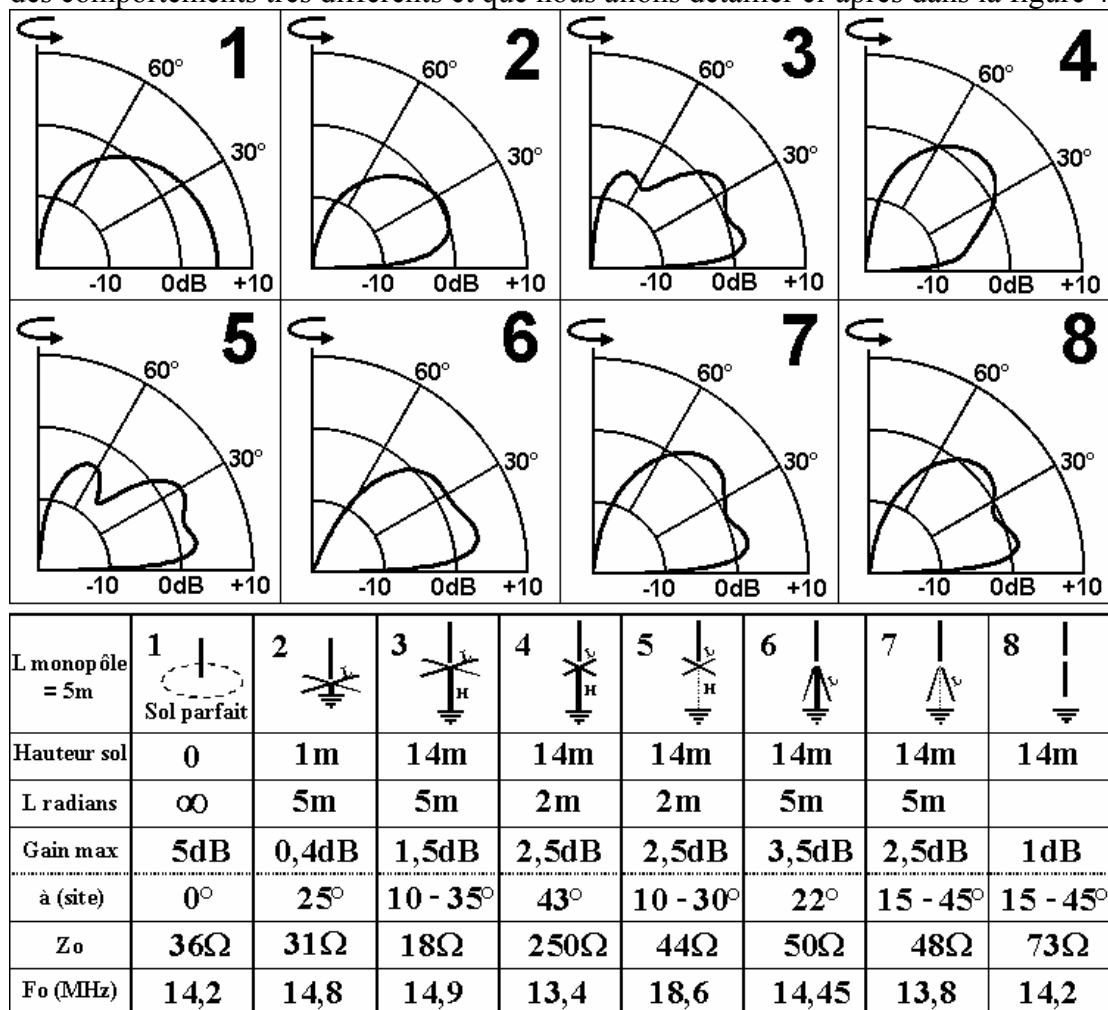


Figure 4

En (1), nous avons en référence un monopôle avec plan de sol parfait de dimensions infinies. Pour tous les autres cas, nous avons un sol réel moyen (jardin).

En (2), la Ground-Plane avec radians horizontaux, est montée très proche du sol. Le résultat ne change pas, que le point commun des radians soit relié au sol ou non. Nous voyons que le gain a chuté et le lobe est remonté, conformément à la figure 3.

En (3), la même G-P est montée à $0,7\lambda$. Le gain s'est un peu amélioré. Là non plus, le résultat ne change pas que le point commun des radians soit relié ou non au mât et à la terre. Noter que la gaine de l'alimentation coaxiale remplit le rôle d'un mât métallique.

En (4) et (5), nous avons la G-P à la même hauteur, mais avec des radians raccourcis. Nous voyons maintenant que nous sommes très dépendants du mât support, et par conséquent de l'alimentation coaxiale. La solution consiste à "rallonger" électriquement les radians par des bobines pour les faire résonner en quart d'onde.

En (6) et (7), nous avons la ground plane 50Ω avec les radians $\lambda/4$ écartés de 60° . Elle est peu dépendante du mât. C'est celle la plus utilisée.

En (8), nous avons un dipôle vertical. Son diagramme est identique à celui de la ground-plane 50Ω , mais nous avons un sérieux problème pour éviter le couplage de l'alimentation.

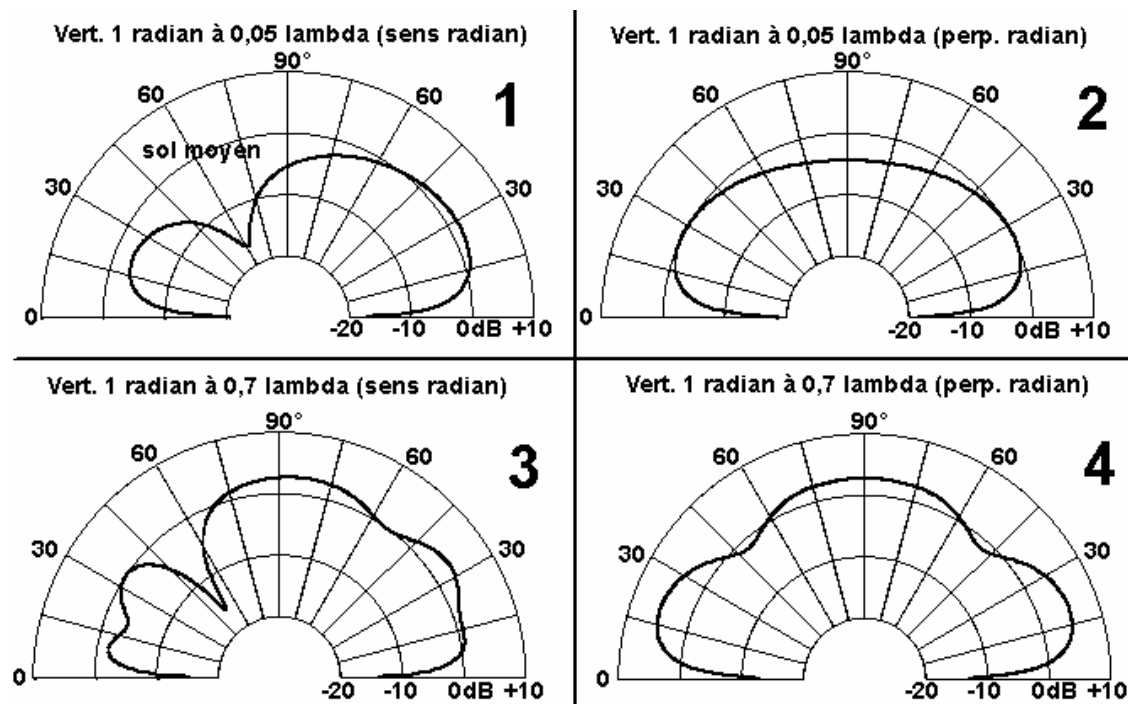
Du monopôle au dipôle (suite).

2 - Cas de l'antenne verticale.

Une antenne verticale avec un radian accordé, peut être un "vrai" dipôle si le radian est horizontal et **non relié** au support métallique vertical. Sinon, c'est un "pseudo" dipôle au comportement différent selon la longueur du mât et l'inclinaison du radian (cas usuel). Il faut avoir au moins deux radians identiques, opposés et horizontaux, pour avoir un comportement du type "monopôle". Elle peut être aussi utilisée en "vrai monopôle" si elle est disposée sur un plan de sol de qualité suffisante (difficile à obtenir).

N-B : Tant que le radian de $\lambda/4$ reste proche de l'horizontale, le mât métallique vertical, relié ou non au radian a peu d'influence, ce qui n'est plus vrai dès qu'on l'incline.

Nous avons sur la figure 5 toute une série de diagrammes de rayonnement verticaux correspondant aux situations décrites ci-dessus.



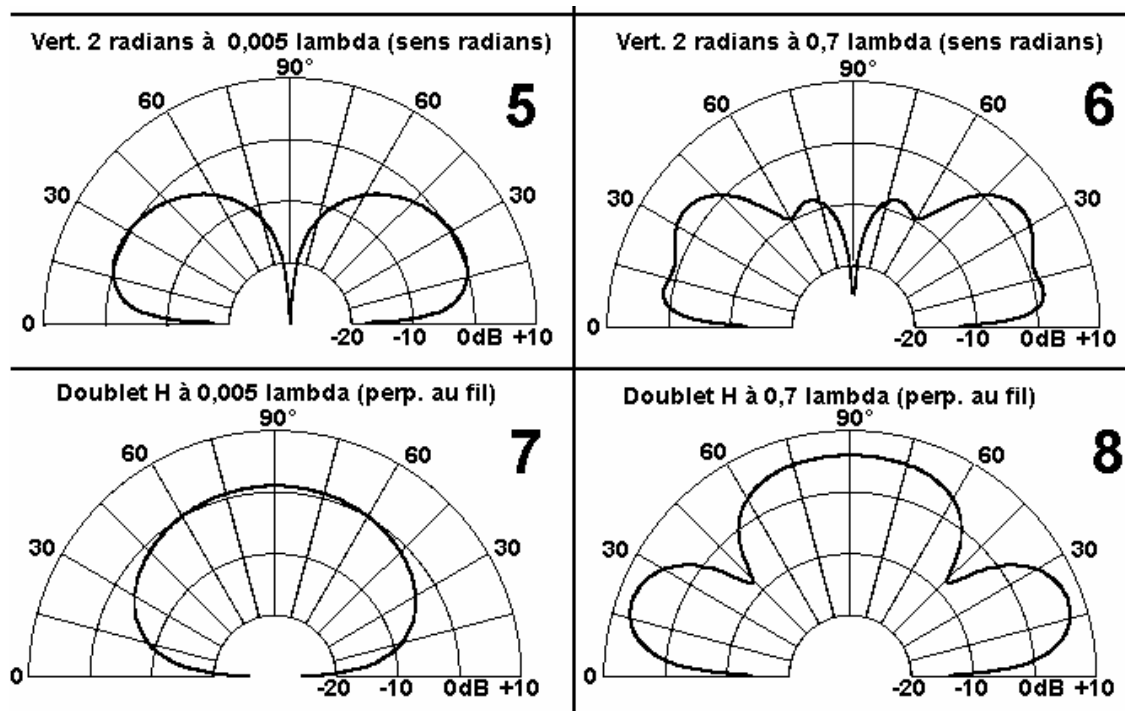


Figure 5

La hauteur de $0,7\lambda$ correspond à une antenne montée sur un immeuble à toit non métallique, par exemple. Le sol considéré est un sol moyen (jardin). Cela se dégrade un peu pour les polarisations verticales avec un sol urbain.

Les diagrammes 1 et 2 montrent le rayonnement pour une antenne verticale classique avec un seul radian au niveau du sol. Nous voyons bien la dissymétrie dans le plan H, et le faible gain. Par contre il reste encore acceptable à 5° d'élévation.

Les diagrammes 3 et 4 montrent le rayonnement pour la même antenne à une hauteur de $0,7\lambda$. Dans la direction du radian, le gain a un peu augmenté à 5° , mais pratiquement pas au dessus. Par contre dans la direction perpendiculaire, nous gagnons 5 dB à 20° d'élévation.

Tous ces diagrammes montrent bien un comportement de dipôle mixte.

Le diagramme 5 montre le rayonnement de la même antenne près du sol, avec deux radians accordés et opposés. Nous avons maintenant un comportement de monopôle avec un nul au zénith. Le rayonnement devient quasiment omni dans le plan H, mais le gain n'a pas augmenté par rapport à un seul radian.

Le diagramme 6 montre la même antenne à $0,7\lambda$. Là, s'il devient plus omni, le gain a plutôt tendance à baisser. Ceci s'explique par la différence de polarisation qui n'est plus mixte, mais quasiment verticale, et l'on sait que le sol est mauvais réflecteur pour la polar V.

Pour comparaison, le diagramme 7 montre la directivité d'un doublet H placé très près du sol. Il tire au zénith, et le gain à 5° est beaucoup plus faible que pour les verticales. Celles-ci ont un net avantage quand elles sont placées au niveau du sol, mais généralement le faible dégagement dans nos zones urbaines fait que ce n'est pas la panacée.

Le diagramme 8 montre le même dipôle H à $0,7\lambda$. Là, il fait jeu égal avec les verticales pour les faibles angles et pour les angles plus élevés, qui correspondent au DX "régional", le gain est meilleur de 2 à 3 dB. En contrepartie, le rayonnement n'est pas aussi omni qu'avec la verticale et il existe des creux de 10 à 20 dB (en pratique) dans la direction des fils du dipôle.

Antennes raccourcies (non résonantes)

Toutes les antennes peuvent être raccourcies. Mais avec le raccourcissement, leur aptitude à rayonner diminue. Il faut donc qu'elles soient parcourues par un plus fort courant pour la même puissance rayonnée. Cela se traduit par une diminution (au carré) de leur résistance de rayonnement. Le rapport de celle-ci avec la résistance de pertes diminue, ce qui par conséquence, diminue le rendement. Par ailleurs, l'impédance devenant très faible et fortement réactive, nécessite un système d'adaptation qui est aussi cause de pertes.

Un raccourcissement de 50% a peu d'influence sur le rendement électrique, d'autant moins que le conducteur a une forte section. Avec les antennes multi-bandes à trappes, il faut tenir compte des pertes supplémentaires dans les trappes. Pour une antenne de qualité, l'avantage du multi-bande compense largement la (faible) diminution du rendement.

Les antennes fermées (boucles) peuvent aussi être raccourcies. La problématique est la même que pour les antennes ouvertes.

Avec des antennes fortement raccourcies, non seulement le rendement peut tomber à quelques % avec son système d'accord, mais le rayonnement tend à devenir isotrope, entraînant la diminution du gain amené par la directivité.

Malgré tout, les antennes raccourcies ont des adeptes. Et l'on arrive à ce paradoxe amusant : Tandis qu'en circuits hyper, certains se creusent les méninges pour fabriquer des condensateurs variables qui ne rayonnent pas, d'autres, en HF, se démènent pour essayer de faire rayonner un condensateur (antenne dite E-H).

Les réseaux

Nous pouvons associer plusieurs antennes entre elles pour constituer un réseau. On peut indifféremment alimenter toutes les antennes ou seulement une partie d'entre elles, voire une seule. Dans ce cas, les autres antennes rayonnent l'énergie qu'elles récupèrent par couplage, grâce au champ réactif (comme des circuits accordés en radio) et alors elles doivent être résonantes (ou accordées) et relativement proches les unes des autres.

Les réseaux sont généralement étudiés pour obtenir une **directivité** de l'ensemble, ce qui se traduit par un accroissement de la puissance rayonnée (**gain**) dans cette direction par rapport à une antenne unique.

N-B : Quand le réseau est monté mécaniquement sur un même support, c'est l'ensemble qui prend usuellement le nom d'antenne (beam en anglais, sans équivalent en français).

En HF, le réseau le plus utilisé par les radioamateurs est la célèbre antenne YAGI composée de dipôles horizontaux. Dans le même esprit, nous pouvons coupler des boucles (quads à plusieurs éléments).

Nous pouvons aussi coupler ou associer des monopôles. En général, tous les monopôles sont alimentés. En combinant les espacements entre monopôles et les déphasages dans les alimentations, nous pouvons obtenir des diagrammes de rayonnement ajustables. Les réseaux radioamateurs dépassent rarement quatre monopôles, tandis que certains réseaux professionnels peuvent en avoir plus d'une centaine, notamment pour un radar transhorizon ou une station d'écoutes radio.

Antennes large bande

Si l'on se place d'un point de vue rayonnement, la largeur de bande d'une antenne en espace libre est théoriquement infinie, tant qu'elle présente une résistance de rayonnement telle que l'on sache l'alimenter. Donc en pratique, pour les fréquences inférieures à sa fréquence de résonance, son rendement diminue comme expliqué ci-dessus dans "antennes raccourcies".

Pour les fréquences très élevées, les pertes ohmiques augmentent beaucoup plus vite que la résistance de rayonnement qui change peu. Par ailleurs, le diagramme de rayonnement se modifie avec l'apparition de lobes multiples.

En fait, lorsque l'on parle de la bande passante d'une antenne, il s'agit de sa bande passante électrique au niveau de son alimentation. C'est une notion assez confuse qui ne caractérise pas les qualités de rayonnement d'une antenne, mais son aptitude à pouvoir être alimentée simplement dans la bande passante définie. Celle-ci l'est en général pour un ROS de 1,5, 2 ou 3, suivant l'intérêt du constructeur. La référence ROS 1 correspond à une impédance nominale, choisie parmi les impédances courantes des lignes (50Ω , 75Ω , 300Ω , 600Ω)⁽²⁾. Ceci dit, il peut être intéressant d'utiliser une antenne unique pour un grand nombre de fréquences d'émission, sans avoir sans cesse à réadapter son impédance à celles de la ligne et de l'émetteur (impédance nominale de charge).

La largeur de bande électrique d'une antenne est fonction du rapport entre son épaisseur (diamètre des brins) et sa longueur. Plus l'antenne est épaisse, et plus la bande est large.

En HF, il n'est pas question d'employer de gros tubes pour des problèmes de poids. Ceux-ci sont remplacés par plusieurs fils disposés sur le périmètre d'un tube virtuel. Sur la figure 6 nous avons les exemples d'un doublet et d'un monopôle larges bandes.

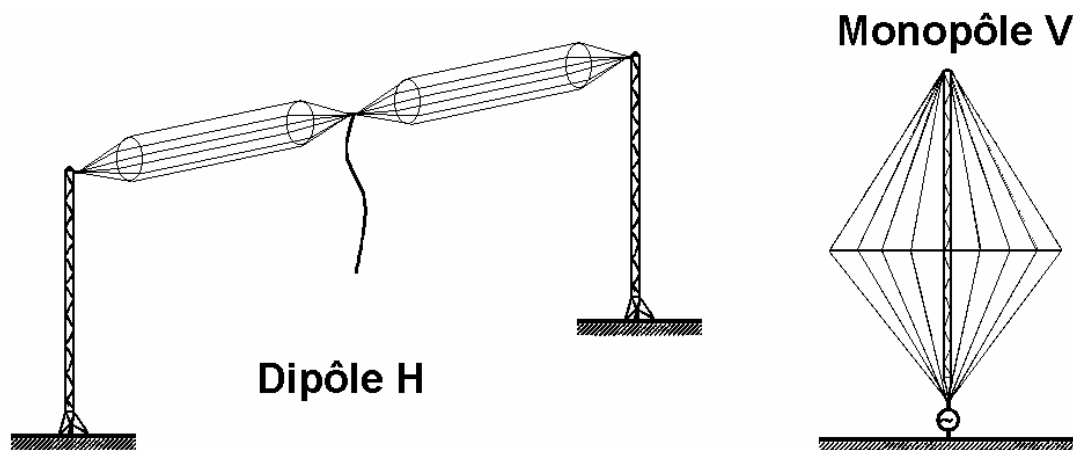


Figure 6

Le procédé atteint vite ses limites, et un monopôle large bande 6–12 MHz est un monstre de plusieurs dizaines de mètres cubes.

Si nous prenons une antenne ground-plane 50Ω , le brin inférieur est déjà épais. Nous pouvons alors remplacer le brin supérieur par des "radians" inversés pour constituer un dipôle épais (antenne bicône). En remplaçant le brin filaire par quatre "radians" horizontaux, nous obtenons l'antenne discône. Si celle-ci est encombrante en HF, elle est très employée professionnellement en VHF large bande.

Une autre solution consiste à amortir électriquement la résonance de l'antenne avec une résistance, ce qui revient à augmenter ses pertes. Dans ce cas, à la limite, une bande passante infinie correspond à un rendement nul. Donc, nous serons amenés à faire un compromis. L'un des plus judicieux se retrouve dans un dipôle trombone horizontal, amorti par une résistance au milieu de la boucle⁽³⁾. Pour nous, qui n'avons que des portions de bandes, en choisissant la bonne longueur du trombone, son espacement, la valeur de la résistance et le rapport du transfo d'adaptation, nous pouvons obtenir un compromis tout à fait acceptable. Nous pouvons conserver un ROS inférieur à 3 dans une bande de plusieurs octaves tout en ayant un rendement supérieur à 65% (pertes maxi de 2 dB, soit 1/3 de point S). Pour ces antennes, en dessous de leur fréquence de résonance basse, leur rendement diminue beaucoup plus

rapidement que celles qui sont non chargées. Naturellement, elle se comporte avec son environnement comme n'importe quel autre doublet. Aussi lorsque sa longueur dépasse la longueur d'onde, le diagramme dans le plan, se met à "feuilleter" avec des minima prononcés. Ceci est également valable pour des antennes non accordées comme le "long fil". Une parade (partielle) consiste à incliner les antennes, mais le gain baisse car la polarisation devient mixte.

On peut aussi adjoindre à l'antenne un système d'adaptation large bande. Si nous connaissons la fonction de transfert électrique de celle-ci, nous pouvons insérer en série dans l'alimentation un système ayant la fonction de transfert inverse. Concernant les monopôles HF, leur impédance varie beaucoup en fonction de leur environnement, et finalement les systèmes d'adaptations "universels" large bande pour monopôles fonctionnent avec des pertes importantes⁽⁴⁾. Nous avons sur la figure 7 le cas limite où l'adaptation est faite uniquement par les pertes. Nous voyons qu'avec des pertes "raisonnables" de 3 dB (équivalentes à un rendement de 50%), le résultat est déjà significatif. Noter que ces pertes peuvent comprendre celles de la ligne.

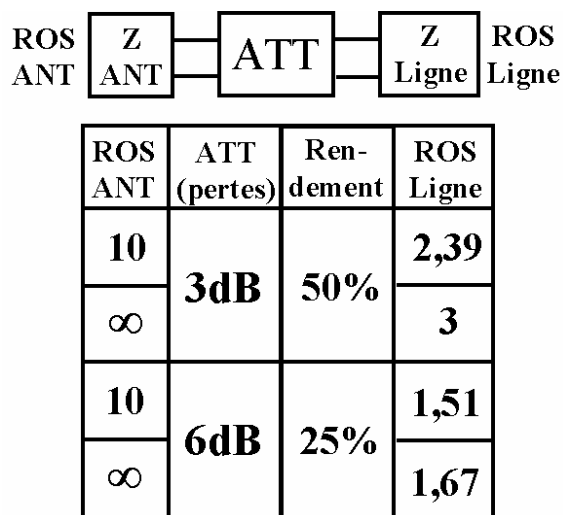


Figure 7

N-B : Il existe d'autres antennes "chargées" par des résistances, dont le but premier n'est pas d'élargir leur bande passante, mais de forcer des circulations de courants pour obtenir un diagramme de rayonnement particulier (antennes à ondes progressives). Les pertes dans la résistance ne changent pas le gain maxi, elles correspondent à la suppression de la moitié du diagramme de rayonnement (antenne monodirectionnelle). Ces antennes, généralement de grande taille, sont réservées pour des liaisons point à point et ne conviennent pas pour les radioamateurs qui cherchent en principe à contacter le monde entier.

Pour les antennes en réseau, nous pouvons obtenir une large bande en couplant et alimentant judicieusement plusieurs dipôles de longueurs différentes, en général selon une loi Log-périodique, d'où le nom de ces antennes. En HF, le procédé n'est guère applicable au dessous de 10 MHz pour des raisons d'encombrement. Pour nous radioamateurs, qui n'avons que des portions de bandes particulières, le procédé est cher payé. En effet, une Log-périodique 10-30 MHz de 10 éléments n'a pas plus de gain moyen qu'une YAGI 3 éléments à trappes.

L'antenne HF en émission et en réception.

Pour une liaison par onde directe, les antennes émission et réception doivent être de même polarisation. Des polarisations orthogonales peuvent entraîner une atténuation de plus de 20 dB (facilement observable en liaisons locales VHF).

Pour une liaison par réflexion ionosphérique, l'onde réfléchie par l'ionosphère étant de polarisation plus ou moins elliptique selon les paramètres de la liaison, la polarisation de l'antenne de réception importe peu pour nous radioamateurs qui réalisons une multiplicité de liaisons différentes. Ceci est particulièrement vrai pour le DX, où il y a alors intérêt à prendre une polarisation orthogonale à celle des principaux parasites. Les bruits industriels étant surtout à polar V, une antenne à polar H sera préférée en zone urbaine. Mais rien n'empêche d'avoir en réception deux systèmes antennaires de polarisations différentes et d'utiliser celui qui convient le mieux sur l'instant (diversité de polarisation).

En émission, le champ magnétique terrestre a pour effet d'introduire deux modes de propagation distincts. C'est à dire que l'onde se dédouble en deux ondes appelées par convention « onde ordinaire » et « onde extraordinaire ». Seule l'onde ordinaire se propage à longue distance, l'autre étant très atténuée. La répartition de la puissance rayonnée entre onde ordinaire et onde extraordinaire dépend de l'angle que fait le champ magnétique terrestre avec la direction de propagation⁽⁵⁾, mais aussi de la polarisation de l'onde de départ. Aux latitudes moyennes, en principe la polarisation verticale produirait « plus d'onde ordinaire » et donc serait plus favorable au DX. Mais la possibilité d'avoir plus facilement une antenne à gain avec polar H, fait que celle-ci est généralement préférée.

Mesure du rayonnement.

Elle se fait par la mesure de l'un des champs, soit électrique, soit magnétique. Une seule mesure suffit car le rapport entre les champs lointains est une constante dans l'air.

a) Mesure indirecte.

En HF, c'est souvent la seule méthode pour déterminer le champ lointain rayonné. Elle consiste à mesurer la puissance absorbée par l'antenne, puis à estimer le rendement pour obtenir la puissance totale rayonnée. Pour un dipôle, les pertes peuvent être calculées en fonction des matériaux et des diamètres de fils utilisés. Pour un monopôle, on peut mesurer la résistance d'antenne et la comparer avec la résistance théorique. Il reste à déterminer le gain apporté par la directivité, gain calculé en fonction de la géométrie de l'antenne et de son environnement. Nous pouvons alors calculer les champs en fonction de la P.I.R.E. (Puissance Isotrope Rayonnée Equivalente) qui est égale à {Puissance absorbée x Rendement x Directivité}.

b) Mesure directe.

Rappel : *Dans un système antennaire, les dimensions sont relatives à la fréquence de travail.* Nous pouvons toujours mesurer le champ proche à l'aide d'une antenne étalon et d'un mesureur de champ, mais cela a peu d'intérêt. Il faut faire une mesure de champ lointain si l'on veut pouvoir calculer un affaiblissement de propagation. Le champ lointain ne peut être mesuré qu'au delà de la zone de Fresnel qui se situe à l'intérieur d'un cercle d'une dizaine de longueurs d'ondes.

Cela reste relativement facile pour les fréquences élevées, où l'antenne peut être disposée à l'intérieur d'une chambre anéchoïde, c'est à dire aux parois non réfléchissantes. On peut ainsi mesurer le gain et la directivité d'une antenne hyper en "espace libre".

Pour les VHF, par exemple 144 MHz, on peut disposer les antennes (celle à tester et celle de mesure) à une distance d'une centaine de mètres sur terrain dégagé, sur deux pylônes de 30 m, de préférence en bois. L'antenne à tester sera rotative. Nous ferons deux séries de mesures, l'une en polar H et l'autre en polar V.

Pour les fréquences MF et inférieures, avec propagation par onde de sol, les mesures se feront directement au sol, au delà de la zone de Fresnel, après mise en place définitive de l'antenne. Pour les fréquences HF, avec propagation ionosphérique, la mesure directe est quasiment impossible. Prenons par exemple un doublet H pour la bande des 40 m, disposé à 30 m de hauteur au dessus du sol. Pour mesurer le champ lointain rayonné dans un angle vertical de 10° (DX), nous devons faire la mesure de champ à 800 m de distance et à 150 m de hauteur. Donc pour nous radioamateurs, si nous voulons "mesurer" la qualité de notre système antennaire HF, nous sommes condamnés à faire des statistiques avec une **infinité** de mesures ponctuelles en réception. Et encore, pas en absolu, mais par comparaison entre deux aériens, dont l'un a des performances connues. L'imprécision de l'appareil de mesure que nous utilisons, c'est à dire le S-mètre, ne facilite pas les choses. Nous voyons que c'est un travail de plus ou moins longue haleine, suivant l'activité de l'OM.

Antennes et environnement.

La connaissance des caractéristiques d'une antenne HF est insuffisante pour déterminer les conditions de rayonnement lointain, il faut aussi connaître son environnement. C'est pourquoi je préfère l'expression "système antennaire" qui montre que l'antenne (au sens commun), n'en est qu'une partie.

En HF, le principal environnement est le sol et nous avons déjà disserté sur ses effets. Ensuite, nous avons la proximité ($<\lambda$) de masses métalliques de dimensions significatives ($>\lambda/8$). Celles-ci peuvent provoquer des pertes par absorption (grande quantité d'éléments), et généralement déformer le diagramme de rayonnement en comblant partiellement les "creux". Une forêt de feuillus sous la pluie constitue un bon écran absorbant (doublement s'il est proche, car il empêche la réflexion sur le sol).

Donc, nous avons toujours intérêt à dégager nos antennes de tout obstacle conducteur, et comme ceux-ci sont généralement proches du sol, à rehausser les antennes. Un dipôle H dans un grenier (maison à étages et toit non conducteur) peut être plus dégagé et plus efficace pour le DX qu'un monopôle au ras du sol dans le jardin.

Choix d'une antenne.

Alors, quelle antenne choisir ? Je dirais qu'à chaque cas son antenne. Mais pour nous, comme il y a presque autant de cas que de radioamateurs, cela se complique⁽⁶⁾. Donc, je ne vais pas vous donner de recette miracle à l'instar des vendeurs d'antennes, mais quelques éléments pour les cas extrêmes.

D'abord, le "must" :

Si vous avez les moyens en argent, et de la place, installez un pylône télescopique motorisé d'une hauteur réglable entre 10 et 35 m, avec une YAGI 6 él. pour les bandes hautes, une Yagi 2 él. pour le 40 m et un dipôle raccourci (capacités terminales) pour le 80 m. Pour le 160 m, vous ferez rayonner le pylône, et donc il vous faudra enterrer des centaines de mètres de tresse de cuivre tout autour. Non, ne souriez pas, certains radioamateurs ont des installations de ce genre...

Et pour le jeune OM qui n'a que son argent de poche :

Il faut qu'il ait un minimum de place, de l'imagination et de la persévérance. Il pourra fabriquer avec des bouts de fils électriques des antennes dipôles et les placer le plus haut

possible. S'il habite une maison individuelle, la cheminée est parfaite pour y mettre un dipôle en V inversé au bout d'un mât TV. La plupart de nos bandes HF ont l'avantage d'avoir des rapports de fréquences doubles ou triples, et cela facilite les multi-résonances. Il pourra relire cinquante années de Radio-REF au radio club et passer au crible de la raison (qu'il aura acquise, entre autre, en lisant cet article) les multiples descriptions d'antennes, pour en trouver quelques unes qui conviennent à son cas. Il commencera par des antennes simples avec le souci de sa sécurité. Il ne se rabattra sur les antennes fortement raccourcies qu'en désespoir de cause.

Plutôt que d'essayer de construire des antennes avec une impédance s'adaptant à un câble coaxial, par ailleurs fort cher, il pourra construire une antenne à alimentation par ligne parallèle avec une boîte d'accord "home made" faite avec des composants de récupération (au même radio club).

Ce qu'il ne devra pas faire, surtout s'il habite en collectif (j'en parle, car cela s'est déjà vu) : Il ne devra pas brancher un long fil unique à la sortie d'une boîte d'antenne, laissant le soin au fil de terre du secteur de refermer le circuit, (quelquefois sans le savoir)⁽⁷⁾. Il arrivera à charger son émetteur, à avoir même un bon rendement et réaliser d'excellents DX, mais il se fâchera sans doute avec sa famille et tous ses voisins en leur injectant directement sa HF dans leurs appareils électroniques.

Enfin pour terminer, avoir une puissance "pas terrible" et une antenne "faute de mieux", n'empêche pas un OM d'obtenir le DXCC. Cela est simplement un peu plus long et exige de compenser ces handicaps par un art de DXeur sans failles. Mais l'OM n'en a que plus de mérite.

Rappels généraux sur les antennes.

- Les dimensions d'une antenne sont relatives à la longueur d'onde électrique (λ) de la fréquence de travail.
- Plus une antenne est petite ($< \lambda/4$), plus son rendement tend à diminuer et plus son rayonnement tend à être isotrope (dans toutes les directions).
- Une antenne a le même gain en émission et en réception. Si une liaison est dissymétrique, cela provient de l'(in)adaptation des antennes aux conditions de propagation⁽⁸⁾.
- Le rendement d'une antenne est indépendant de sa résonance. Seule la partie "réelle" de son impédance crée un rayonnement lointain. Une partie réactive importante n'a pour effets qu'amener un ROS élevé dans la ligne de transmission (pertes), et empêcher un émetteur large bande de fournir toute sa puissance à cause de sa sécurité (sauf à incorporer une boîte d'accord).
- La "largeur de bande" d'une antenne est définie pour un ROS maximum donné autour de sa fréquence d'accord. Pour une antenne élémentaire, elle est d'autant plus grande que le rapport diamètre/longueur est élevé, sinon, cela signifie un accroissement des pertes.
- Plus une antenne est petite (devant λ) et plus sa bande passante sera étroite après l'avoir accordée, ou alors, elle a des pertes excessives.
- Tout système antenne est un dipôle électrique. Ceci est une obligation entraînée par l'émetteur. Si nous voulons obtenir le rayonnement d'un seul pôle (vrai monopôle) il faut "empêcher" le rayonnement de l'autre pôle, ce qui, en pratique, est très difficile à obtenir.
- Pour un dipôle, l'angle vertical du maximum du premier lobe dépend principalement de la hauteur électrique moyenne⁽⁹⁾ du dipôle au dessus du sol s'il est horizontal, **et** de la nature de celui-ci s'il est vertical ou mixte.
- Pour un monopôle, l'angle vertical du lobe principal ne dépend que de la qualité électrique du plan de sol horizontal (naturel ou artificiel).

- Le rendement électrique d'un dipôle est généralement acceptable dès que sa longueur dépasse $\lambda/4$.
- Le rendement d'un monopôle peut être faible si le plan de sol (ou le contreponds) est médiocre.
- Un bon ROS signifie que le système antenne est adapté, mais ne présage aucunement du bon fonctionnement de celui-ci en rendement et directivité⁽¹⁰⁾.
- L'alimentation d'un dipôle (vrai ou pseudo) à l'aide d'un câble coaxial doit se faire au travers d'un symétriseur (balun) sinon, sauf rares exceptions, le câble coaxial participe au rayonnement (d'autant plus vrai que le dipôle est dissymétrique).
- L'alimentation d'un monopôle à l'aide d'un câble coaxial ne rayonne pas à condition, soit qu'il passe sous le plan de sol d'un vrai monopôle, soit dans un plan neutre d'un pseudo dipôle. Si nous insérons un symétriseur, et que l'antenne se désaccorde, c'est la preuve que le câble coaxial était intégré au système antenne. Il faut alors, soit revoir le système en modifiant le contreponds pour que le coaxial passe dans un plan neutre, soit éloigner le symétriseur de l'antenne jusqu'à ce qu'il ne modifie plus l'accord. Alors, la partie du coax entre le symétriseur et le monopôle continuera à faire partie de l'antenne.
- Lorsque l'on nous vend un monopôle. Nous n'avons qu'une moitié d'antenne. L'autre moitié dépendra de son installation.
- La physique est "têtue", les mathématiques peuvent être "trompeuses", et le rayonnement sembler un phénomène "ésotérique". Alors, méfions nous des antennes "miracle"⁽¹¹⁾.

Conclusions.

Cet article est loin d'être exhaustif, mais s'il vous permet de vous poser les bonnes questions, il aura rempli son rôle. A vous ensuite de partir à la pêche pour avoir les bonnes réponses. Attention aux descriptions de réalisations "exotiques" qui peuvent être remarquables, bien souvent elles ne fonctionnent que chez leurs auteurs. Rappelez-vous, en HF, ce qui rayonne, ce n'est pas votre antenne, mais votre **système antenne**.

F5NB.

Bibliographie

- En dehors des supports de cours et autres "Initiation à l'étude des antennes", indisponibles dans le commerce, je recommande vivement la lecture de l'excellent ouvrage "Low-Band DXing" de John Devoldere, ON4UN, ainsi que "La propagation des ondes" du regretté Serge Cannivenc, F8SH.

Notes :

- (1) La "ground-plane" est un cas spécial. Avec quatre radiaux horizontaux et égaux à $\lambda/4$, elle fonctionne comme un monopôle. Plus les radiaux sont inclinés, et plus elle fonctionne comme un dipôle vertical. Lorsque les radiaux sont complètement verticaux, nous avons une antenne "à jupe".
- (2) Ces impédances ne sont pas le fruit du hasard, mais correspondent à celles des antennes HF les plus courantes.
- (3) Ce système est applicable aux autres boucles.
- (4) Ainsi, pour un fouet de 1m50 pour la bande VHF 30-88 MHz, utilisé avec un poste portable, le système d'adaptation (non réglable) apporte jusqu'à 3 dB de pertes pour garantir un ROS maxi de 1,5.

- (5) Ceci peut être à l'origine de la non réciprocité d'une liaison (pertes de transmission différentes pour les deux sens), mais rarement de plus d'un point S.
- (6) Les professionnels étudient une antenne et **adaptent** son environnement, alors que généralement, les radioamateurs choisissent leur antenne **en fonction** de son environnement.
- (7) Mais rien n'empêche de réaliser ce système antennaire en **réception uniquement**.
- (8) Pour des antennes résonantes. Avec une antenne courte, si l'on peut encore arriver à obtenir un bon rendement à l'émission, en réception, le signal diminuera aussi proportionnellement à sa hauteur efficace. Nous voyons ainsi qu'un "bon report" est plus lié à son antenne de réception qu'à celle d'émission du correspondant.
- (9) On peut définir un "centre de gravité électrique" du courant dans le dipôle.
- (10) Cela vaut surtout pour une antenne "home made" et les monopôles, car pour une antenne dipôle du commerce d'un constructeur **sérieux**, un bon ROS signifie généralement que l'antenne a été installée correctement, et donc que l'on peut espérer obtenir les performances annoncées.
- (11) Le lecteur incrédule (rapport à ce texte), ou trop crédule (rapport à la pub), pourra relire "Histoires d'antennes" paru dans R-REF de mars 2003.