

PROPAGATION et ANTENNES

- **Propagation**
- **Les antennes (doublet, quart d'onde, Yagi,)**
- **Performance d'une antenne**

1/ Relation longueur d'onde/fréquence :

La longueur d'onde, d'une manière générale, se définit par les deux relations suivantes :

$$\lambda(m) = v (m/s) / F (Hz) = v (m/s) \times T(s).$$

La longueur d'onde, notée λ (lettre grecque lambda minuscule), est la distance (en mètres) entre deux points identiques d'une onde (une période dans le cas d'un signal sinusoïdal) dans son milieu de propagation; v est la vitesse de l'onde (en m/s), c'est-à-dire la vitesse de propagation de l'onde ; F est la fréquence (en Hz) et T est le temps que dure la période (en s). La longueur d'onde est directement fonction de la vitesse (vitesse) de l'onde dans son milieu de propagation.

Sachant que les ondes se propagent dans le vide et dans l'air à la vitesse de la lumière (299.792 km/s, toujours arrondi à 300.000 km/s), on a la relation : $\lambda(m) = 300.000.000/F(Hz)$ ou $\lambda(m) = 300.000.000 m/s$. Les formules ci-dessous sont le plus souvent utilisées avec le multiple MHz pour la fréquence et le mètre pour la longueur d'onde:

$$\lambda(m) = \frac{300}{F(MHz)}, \quad \text{ou} \quad F(MHz) = \frac{300}{\lambda(m)}$$

Exemple 1 : Quelle est la longueur d'onde d'une fréquence de 14,1 MHz?
Réponse : $L(m) = 300 / 14,1 = 21,27 \text{ m}$

Exemple 2 : Quelle est la fréquence dont la longueur d'onde est de 3 cm ?
Réponse : $F(MHz) = 300 / 0,03 = 10\,000 \text{ MHz} = 10 \text{ GHz}$

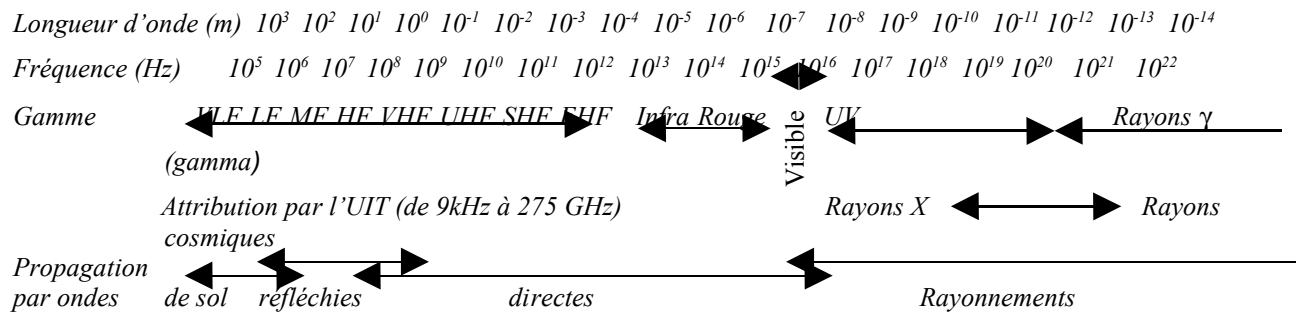
2/Propagation

2.1/ Introduction

Les ondes électromagnétiques se propagent dans l'air ou le vide de la même manière que l'onde formée par un caillou jeté au milieu d'une mare : des ronds concentriques se déplacent à partir du centre. Lorsque l'onde atteint un bord de la mare, l'onde se réfléchit et repart selon l'angle avec lequel elle a heurté le bord. Si on voit nettement l'onde se déplacer, l'eau, en revanche, ne se déplace pas. Pour s'en convaincre, il suffit d'observer une feuille flottant sur l'eau qui va être ballottée au passage de l'onde créée par le caillou jeté mais qui ne sera pas emportée par l'onde.

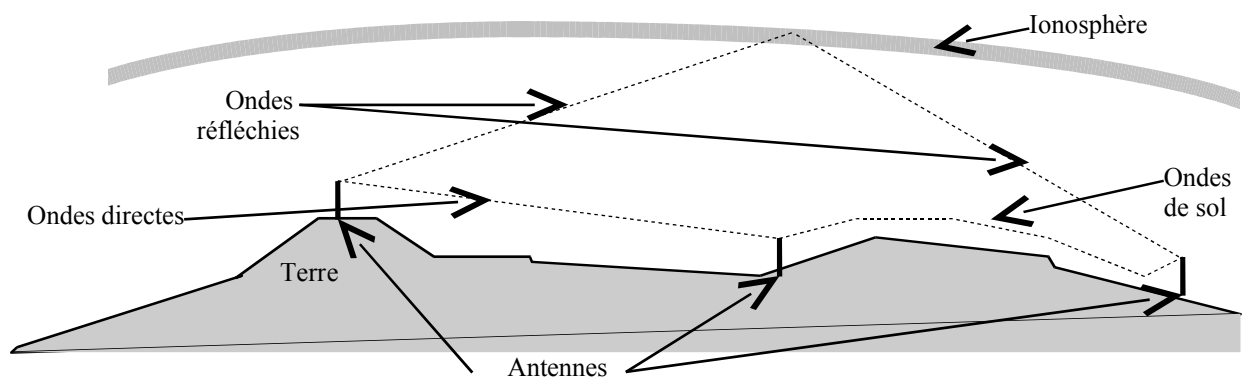
Les ondes peuvent se propager de différentes façons : en **ondes directes**, les antennes sont en vue l'une et l'autre; en **ondes de sol**, les ondes suivent le relief terrestre; en **ondes réfléchies**, les ondes rebondissent sur les hautes couches de l'atmosphère, fortement ionisées (ionosphère, couches E et F), redescendent sur la terre, d'où elles sont une nouvelle fois renvoyées dans l'espace. Un bond ne peut dépasser 4 000 km du fait de la courbure de la terre et de l'altitude de réflexion. Dans le tableau ci-dessous, le mode de propagation principal de la gamme de fréquence est souligné et les abrégés des gammes d'ondes sont données en français puis en anglais.

Fréquences	Longueurs d'onde	Ondes	Gamme	Mode de Propagation
en dessous de 30 kHz	> 10 km	Myriamétriques	TGO / VLF	<u>Sol</u>
30 kHz - 300 kHz	10 km - 1.000 m	Kilométriques	GO / LF	<u>Sol</u>
300 kHz - 3 MHz	1.000 m - 100 m	Hectométriques	PO / MF	Sol ; <u>Réfléchies</u>
3 MHz - 30 MHz	100 m - 10 m	Décamétriques	OC / HF	<u>Réfléchies</u>
30 MHz - 300 MHz	10 m - 1 m	Métriques	THF / VHF	Réfléchies ; <u>Directes</u>
300 MHz - 3 GHz	1 m - 10 cm	Décimétriques	UHF / UHF	<u>Directes</u>
3 GHz - 30 GHz	10 cm - 1 cm	Centimétriques	SHF / SHF	<u>Directes</u>
30 GHz - 300 GHz	1 cm - 1 mm	Millimétriques	EHF / EHF	<u>Directes</u>
au dessus de 300 GHz	< 1 mm	<i>non géré par l'UIT</i>	<i>voir ci-dessous</i>	



2.2/ La propagation en ondes réfléchies

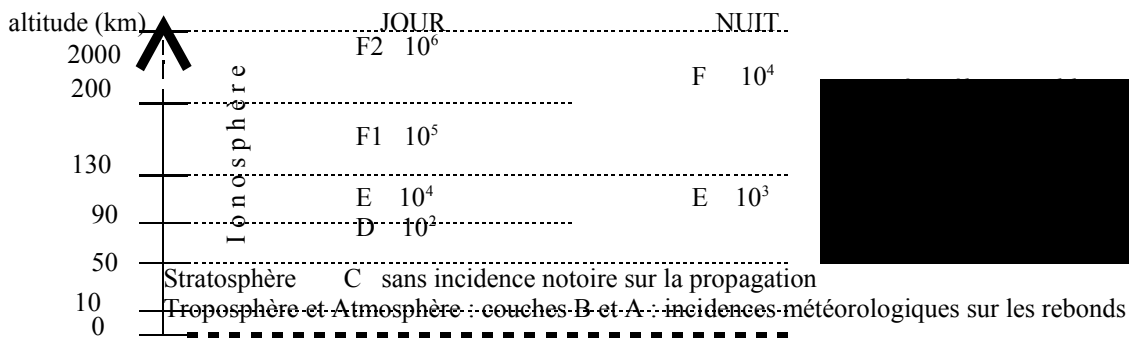
La ionosphère est la zone de l'atmosphère terrestre dans laquelle l'existence d'ions et d'électrons libres est suffisamment abondante pour influencer sur les caractéristiques de propagation des ondes électromagnétiques. La ionosphère s'étend entre 50 et 2 000 km d'altitude. Elle se divise en 3 régions : D (50 à 90 km), E (90 à 130 km) et F (130 à 2 000 km).



La région D doit être traversée par les ondes pour atteindre les couches E et F et disparaît dès la tombée de la nuit. La densité d'électrons libres (100 électrons par cm^3) dans cette zone n'est pas suffisante pour réfléchir les ondes vers la terre. Au contraire, elle atténue les signaux qui la traversent. Pour minimiser cette atténuation, en particulier sur les bandes basses, on utilise des antennes ayant un angle de radiation faible (on vise l'horizon).

A l'intérieur de la région E, peu active au milieu de la nuit, une zone particulière est le siège d'une ionisation anormale, c'est la couche E sporadique. Lorsque la ionisation est importante (jusqu'à 100.000 électrons libres par cm^3), la réflexion des ondes se fait dans cette couche de basse altitude, une seule réflexion est possible sauf lorsque cette ionisation est suffisamment répartie, ce qui est rare et impossible à prévoir.

La région la plus haute de la ionosphère, la couche F, possède la densité d'électrons la plus élevée et elle est prépondérante pour propager les ondes H.F. à longue distance. La partie basse de la région F (130 à 200 km) est appelée zone F1 tandis que le reste est appelé F2. La zone F2 est dense en électrons libres (1.000.000 électrons par cm^3) et est responsable des "bonnes conditions de propagation". Des réflexions multiples sur cette couche permettent de "faire le tour de la terre" en faisant plusieurs "bonds". Pendant la nuit, les couches F1 et F2 fusionnent en une seule couche F.



Un circuit est le parcours de l'onde d'un point à un autre. Les conditions de propagation varient tout au long de ce parcours. Le lieu de réflexion de l'onde sur la terre est primordial : l'atténuation est minimale sur la mer (0,3 dB) mais devient critique sur terre (7 dB sur un champ, plus de 10 dB en zone urbaine). Les conditions météorologiques du lieu de réflexion sur la Terre sont aussi importantes (orages, etc...)

Plus la fréquence croît, plus l'onde a de chances de traverser les couches sans être réfléchi, elle se perd alors dans l'espace. La fréquence maximum utilisable (FMU) est la fréquence pour laquelle une onde sera propagée d'un point à l'autre de la terre par réflexion sur les couches E ou F avec l'angle de départ le plus proche de l'horizon.

Les signaux se dirigeant vers la couche F2 doivent traverser la couche D, dont l'absorption augmente quand la fréquence diminue, puis la couche E qui est aussi capable de réfléchir les ondes H.F. Si la FMU de la couche E est trop haute, les signaux vers ou venant de la couche F2 seront stoppés. Cette limite plancher de la fréquence utilisable est appelée Fréquence Minimum Utilisable (LUF) pour la couche D et Fréquence de coupure de la couche E (ECOF).

On doit donc utiliser pour un circuit une fréquence comprise entre FMU (limite de la réfraction ionosphérique) et LUF ou ECOF (atténuation maximum tolérable). Mais il se peut, à certaines heures de la journée, que ECOF ou LUF soit supérieure à FMU. La liaison, dans ce cas, a peu de chances d'être réalisable. Les calculs de prévision de propagation (détermination de FMU, LUF et ECOF) tiennent compte de l'activité solaire et magnétique terrestre, sont donnés pour une date heure et une heure (éclairage de la Terre par le soleil) et sont basés sur une puissance de 100 W dans un dipôle. La fréquence optimum de travail (FOT) correspond à 80% de la FMU. L'activité solaire a un cycle d'une durée moyenne de 11 ans. Les cycles sont numérotés depuis la fin du XVIII^{ème} siècle et le cycle suivant commence à la fin d'un maximum d'activité. Le cycle en cours (cycle 23) a débuté en 2000. Le flux solaire, Φ (Phi) ou Fs (bruit solaire mesuré sur 2,8 GHz, valeur de 60 à 300), et le nombre relatif de taches solaires, IR (la valeur IR5 est la moyenne glissante sur cinq mois du nombre relatif de taches, valeur de 0 et 200), sont fortement corrélés et mesurent l'activité solaire. L'activité magnétique terrestre est évaluée par les indices K (intensité du champ magnétique, noté de 0 et 9) et A (activité géomagnétique : lorsque A>30, des aurores boréales peuvent se produire).

Les ondes de sol, appelées aussi ondes de surface, se propagent en restant très près de la surface de la Terre. Elles y subissent très vite une forte absorption et ce, d'autant plus que leur fréquence est élevée. Bien entendu, le profil du relief entre l'antenne d'émission et celle de réception est déterminant. Dans les bandes LF et VLF (300 kHz et en dessous), les ondes se propagent à l'intérieur d'un guide d'ondes dont l'une des parois est la surface terrestre et l'autre paroi est la couche D de l'ionosphère. Les espérances de distances de propagation en fonction de la fréquence sont les suivantes : 300 kHz : 2.000 km - 4 MHz : 100 km - 10 MHz : 50 km. Mais la conductivité du sol a aussi une grande importance. Ainsi, pour un trajet maritime pour lequel la conductivité de la mer est très élevée, il est possible, à 2 MHz, d'obtenir une portée supérieure à 500 kilomètres. On voit le peu d'efficacité de l'onde de sol sur les fréquences décimétriques et au delà.

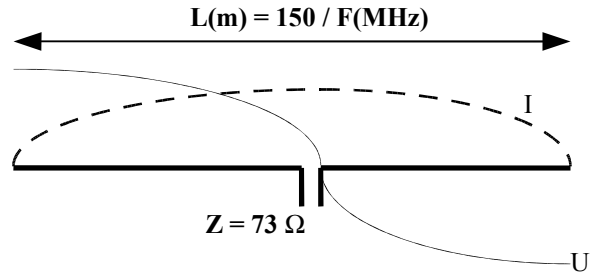
En onde directe, les antennes sont en vue l'une de l'autre. Toutefois, pour les fréquences les plus basses (ondes métriques et décimétriques), il se produit un phénomène de dispersion qui permet à l'onde de suivre le relief terrestre, comme le font les ondes de sol, mais à un moindre degré : l'obstacle que forme une montagne par exemple rendra un contact hasardeux.

D'autres modes de propagation existent mais sont peu utilisés par les radioamateurs car très peu fiables ou nécessitant des puissances élevées. Ce sont les diffusions troposphériques et les « Duct » (sorte de

guide d'ondes), les réflexions sur les traînées ionisées de météorites et les aurores boréales, sur la Lune (Moon Bounce) ou sur les nuages de pluie (rain scattering). Ces modes sont utilisés essentiellement en VHF et UHF.

3/ Les antennes

3.1/ L'antenne doublet demi-onde (appelée aussi **dipôle**) est constituée par **deux brins quart d'onde** généralement alignés nommé brin rayonnant. Dans un doublet demi-onde, à chaque extrémité du brin rayonnant, l'intensité est nulle alors que la tension est maximum. A l'inverse, au centre du doublet, l'intensité est maximum et la tension est nulle. L'impédance est donc faible au centre d'un doublet. La tension est déphasée de 90° par rapport à l'intensité.



Une antenne a les mêmes caractéristiques à l'émission et à la réception.

La longueur totale d'un doublet dépend du matériau utilisé et du rapport diamètre/longueur du brin rayonnant. Les capacités de l'antenne par rapport au sol ont aussi une influence sur la longueur totale du doublet. En pratique, on prendra une longueur 5% plus courte que la dimension théorique.

La longueur d'un brin est égale à la moitié de l'antenne. Pour le calcul de la longueur d'un doublet, la formule suivante sera utilisée:

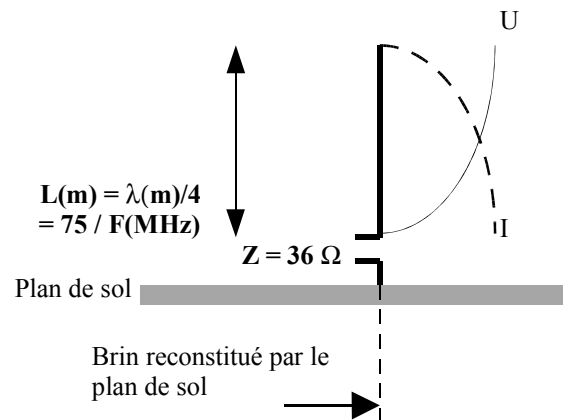
$$\text{Longueur théorique du doublet demi-onde : } L(m) = \lambda(m)/2 = \frac{300}{2 \cdot F(\text{MHz})} = \frac{150}{F(\text{MHz})}$$

Exemple : quelle est la longueur d'un doublet accordé sur 3,6 MHz ?

Réponse : $L(m) = 150 / 3,6 = 41,66 \text{ m}$

L'impédance au centre du doublet varie en fonction de l'angle que forment les brins : s'ils sont alignés (angle de 180°), l'impédance est de 73 Ω; s'ils forment un angle de 120°, l'impédance est de 52 Ω; s'ils forment un angle droit (90°), l'impédance devient 36 Ω. D'autres facteurs influent sur l'impédance, comme le sol (proximité et qualité) ou l'environnement immédiat de l'antenne (bâtiment, arbres,...)

3.2/ L'antenne quart d'onde verticale : L'antenne verticale nécessite un **plan de sol** ou **plan de masse** afin de reconstituer électriquement le deuxième brin de l'antenne. Le plan de sol est constitué de **radians** disposés à la base du brin rayonnant. Si le plan de sol (ou les radians) est perpendiculaire au brin rayonnant, formant ainsi un angle de 90°, l'impédance de l'antenne est de 36 Ω (voir ci-dessus l'impédance du doublet).



La longueur théorique du brin quart d'onde est ainsi calculée :

$$L(m) = \lambda(m)/4 = \frac{300}{4 \cdot F(\text{MHz})} = \frac{75}{F(\text{MHz})}$$

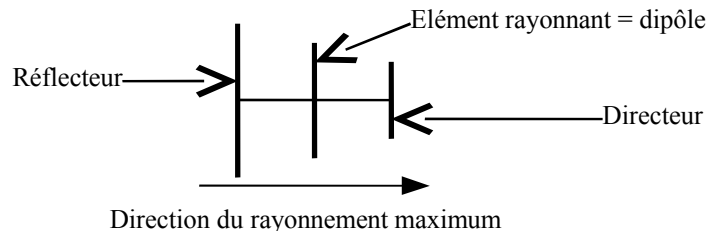
Exemple : quelle est la longueur d'un quart d'onde accordé sur 21,2 MHz?

Réponse : $L(m) = 75 / 21,2 = 3,534 \text{ m}$

En pratique, comme pour le doublet, on prendra une longueur 5% plus courte que la dimension théorique. Un brin beaucoup plus court que le quart d'onde peut être utilisé, il faut dans ce cas rallonger artificiellement l'antenne grâce à un bobinage positionnée habituellement à la base du brin ou au milieu de celui-ci. Un conducteur fixé au sommet (capacité terminale) peut aussi être utilisé. Le quart d'onde aura ainsi une impédance plus faible à sa résonance.

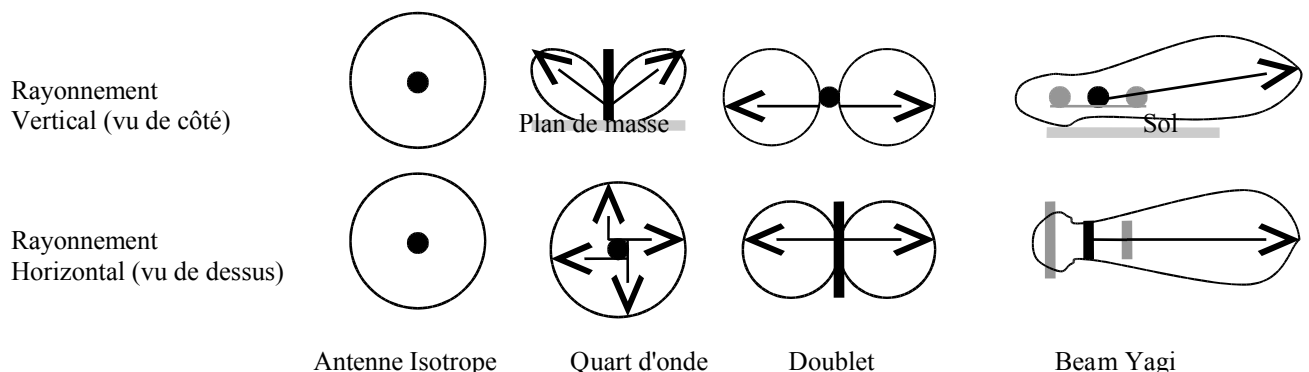
3.4/ Antenne Yagi ou Beam

: l'antenne doublet demi-onde (appelée aussi dipôle) est l'antenne de base. Son diagramme de rayonnement ressemble à un tore rond traversé par le brin de l'antenne. Le rayonnement est maximum perpendiculairement aux brins. Il est nul dans le prolongement des brins. Si les deux brins ne sont pas alignés ou si le sol est trop près de l'antenne, les diagrammes se déforment. En ajoutant des éléments près du brin, le lobe principal est déformé et concentre l'énergie dans une direction. Les **éléments directeurs** sont plus courts que le brin rayonnant, les **éléments réflecteurs** sont plus longs. Lorsqu'on augmente le nombre d'éléments sur ce type d'antenne, son impédance diminue et son gain (son effet directif) augmente. Le gain obtenu par ce système dépend à la fois du nombre d'éléments et de la longueur du support de ces éléments (boom).



3.5/ Gain d'une antenne

: le gain se mesure dans la direction maximum de rayonnement. Le gain se calcule en dB par rapport à l'antenne doublet (dB_d) ou encore par rapport à l'**antenne isotrope** (dB_{iso}). Celle-ci est une antenne idéale : un point qui rayonne et dont le diagramme de rayonnement est une sphère. L'antenne doublet a un gain de 2,15 dB par rapport à l'antenne isotrope. Les lobes de rayonnement se dessinent dans le plan vertical (on fait une « coupe » du diagramme de rayonnement selon l'axe du rayonnement maximum) ou horizontal (on représente le diagramme de rayonnement comme si on était au-dessus de l'antenne). Les diagrammes de rayonnement se représentent aussi par des volumes. On notera que les surfaces de chacun des diagrammes de rayonnement représentés ci-dessous doivent être égales car la surface représente la puissance émise qui est répartie différemment selon le type d'antennes. Dans les diagrammes ci-après, le plan de masse, les éléments parasites et le sol sont représentés en gris.



3.6/ La puissance apparente rayonnée

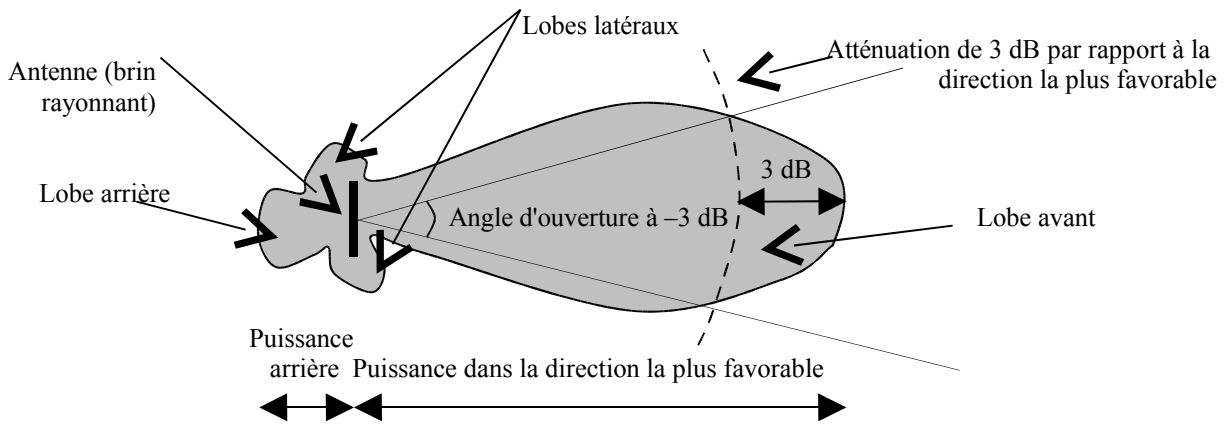
(P.A.R. ou ERP en anglais) est la puissance d'alimentation de l'antenne multipliée par le rapport arithmétique de celle-ci par rapport au doublet (pas en dBd). Cette puissance correspond à la puissance qu'il faudrait appliquer à un dipôle pour avoir la même puissance rayonnée dans la direction la plus favorable de l'antenne. La **puissance isotrope rayonnée équivalente** (PIRE ou EIRP en anglais) prend pour référence l'antenne isotrope.

Exemple : quelle est la P.A.R. d'un émetteur de 100 W utilisant une antenne de 13 dBd ?

Réponse : $13 \text{ dB} = \text{Rapport arithmétique de } 20 \text{ (voir § 4-1)} ; 100 \text{ W} \cdot 20 = 2000 \text{ W P.A.R.}, \text{ soit } 2 \text{ kW P.A.R. en supposant des pertes nulles dans le système d'alimentation de l'antenne (coaxial, prises, ...)}$

3.7/ L'angle d'ouverture

d'une antenne est l'angle de direction pour lequel la puissance rayonnée est la moitié (-3 dB) de la puissance rayonnée dans la direction la plus favorable.



Le rapport avant / arrière est le rapport (en dB) de la puissance rayonnée dans la direction la plus favorable par rapport à celle rayonnée dans la direction opposée à 180° .

3.8/ Compléments sur les antennes :

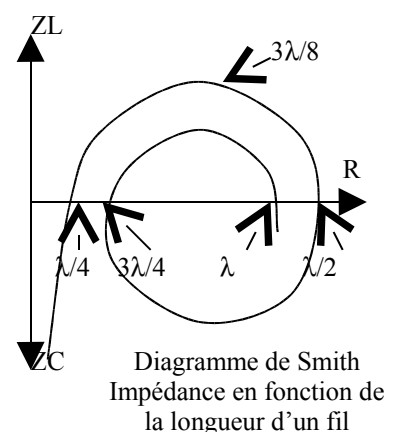
Position des ventres de tension et d'intensité: un ventre est l'endroit de l'antenne où la mesure (tension ou intensité) est maximum ; un nœud est l'endroit de l'antenne où la mesure est nulle. A chaque extrémité d'une antenne ouverte (dipôle par exemple), il y a un nœud d'intensité ($I=0$) car il ne peut y avoir de courant dans un fil qui se termine par un isolant (air ou vide).

Plus exactement, à l'extrémité du brin, le courant fait demi-tour ; ainsi, il y a autant d'intensité dans un sens que dans l'autre, on a donc l'illusion qu'il n'y a pas de courant. Par contre la tension est maximum en ce point (ventre de tension) car en faisant demi-tour, la valeur de la tension ne change pas, les tensions s'additionnent donc.

Du fait de la vitesse de propagation des ondes, tous les quarts d'onde, les valeurs changent. Ainsi en mesurant un quart d'onde électrique (en prenant en compte le coefficient de raccourcissement évoqué aux § 9.4 et 9.5), à partir de l'extrémité du brin, il y a un ventre d'intensité et un nœud de tension. Les tensions et les intensités reprennent les valeurs constatées à l'extrémité du brin toutes les demi-onde.

Ventre d'intensité et lobes de rayonnement : à chaque nœud d'intensité correspond un lobe de rayonnement car un lobe est un champ électromagnétique qui est composé d'un champ électrique, lui-même issu d'un courant électrique. Un maximum de courant correspond à un maximum de champ électromagnétique rayonné. Selon la forme de l'antenne, les lobes de rayonnement se superposent ou s'annulent, donnant de la directivité à l'antenne.

Impédance : les valeurs de l'impédance du doublet demi-onde et du quart d'onde ont été vues plus haut. Dans tous les cas, l'impédance de l'élément rayonnant dépend de sa forme et de son environnement. L'impédance d'un fil de n'importe quelle longueur peut être estimée grâce au diagramme de Smith (voir ci-contre). La valeur que donne ce diagramme ne tient pas compte de l'environnement : le brin rayonnant est éloigné de tout élément perturbateur. Ce diagramme montre qu'un brin d'une longueur d'une demi-onde aura une impédance de l'ordre de 600Ω (et 500Ω pour une onde entière). Pour une longueur d'un quart d'onde, l'impédance est de l'ordre de 50Ω et un peu plus élevée pour $3\lambda/4$. Pour d'autres longueurs, le brin rayonnant pourra avoir une forte réactance inductive ou capacitive. Pour une longueur infinie, le fil aura l'impédance du vide, soit 377Ω (voir §10-4).



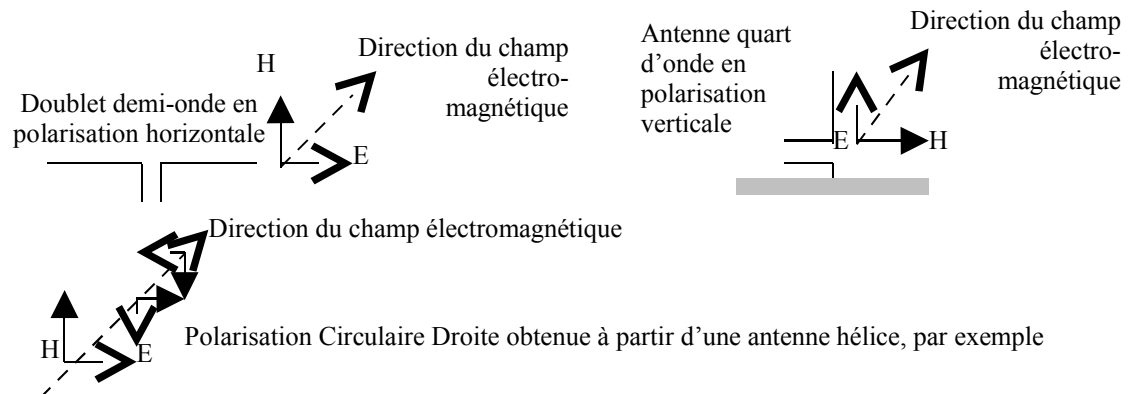
La valeur moyenne pour un trombone demi-onde (antenne fermée, voir plus loin) est de 300Ω et de 200Ω pour une boucle (loop) en onde entière.

Rendement d'une antenne : comme toute charge, une antenne a un rendement. Celui-ci est le rapport de la puissance émise par l'antenne par rapport à la puissance appliquée à celle-ci. C'est aussi le rapport de l'impédance de rayonnement (ce qui est émis) par rapport à l'impédance totale de l'antenne (ce qui est vu par l'émetteur).

Si une antenne a des pertes importantes (mauvaise qualité du sol, par exemple), elle aura un mauvais rendement même si son impédance totale fait qu'elle ne génère pas d'ondes stationnaires (voir §10-3). Si un quart d'onde dont le plan de sol est perpendiculaire au brin rayonnant a une impédance de 50Ω purs (sans réactance), on pourra supposer que l'impédance de rayonnement est de 36Ω sans réactance (impédance du quart d'onde à la résonance), car mesurer cette impédance est complexe, et que, par différence, les pertes sont de 14Ω purs, d'où un rendement de $36/50 = 72\%$ puisque la puissance rayonnée et la puissance perdue dans les pertes sont proportionnelles aux impédances (supposées pures, sans réactances). En supprimant ces pertes (en supposant qu'on les ait identifiées et qu'on puisse y remédier), le ROS sera de $1,4/1$, ce qui ne devrait pas perturber l'émetteur et qui correspond à une puissance réfléchie d'environ 4% , d'où une puissance émise de 96% . Conclusion : une mauvaise adaptation vaut souvent mieux qu'un mauvais rendement.

Polarisations : selon la position du brin rayonnant, l'onde peut avoir une polarisation **verticale ou horizontale**. Certaines configurations d'antennes permettent des polarisations **circulaires** (rotation Droite ou Gauche). La polarisation des antennes joue un rôle important dans la faisabilité d'une liaison. La réception en une autre polarisation que l'onde à recevoir peut conduire à des atténuations de 20 dB.

Les ondes radio sont des champs électromagnétiques : le champ électrique (noté E) est issu du brin rayonnant de l'antenne, le champ magnétique (noté H) lui est perpendiculaire. Ces deux champs sont perpendiculaires à l'axe de direction du champ électromagnétique. A la réception, le brin de l'antenne reçoit la composante électrique du champ électromagnétique de l'onde. En polarisation circulaire, lorsqu'on émet en rotation Droite (rotation sens horaire, la plus utilisée), on reçoit en rotation Droite.



Couplages d'antennes : le gain d'une antenne peut être augmentée en la couplant à une autre. Ainsi deux antennes identiques couplées auront un gain supplémentaire de 3 dB au maximum par rapport à une seule antenne. Quatre antennes auront un gain de 6 dB au maximum et 8 antennes auront un gain de 9 dB au maximum. On voit qu'en doublant le nombre d'antennes couplées, le gain total n'est augmenté que de 3 dB au maximum. Encore faut-il respecter certaines distances entre les antennes et alimenter celles-ci correctement (en impédance et en phase).

Multi-doublet et Doublet avec trappes : une antenne doublet (ou dipôle) ne peut fonctionner que sur certaines fréquences ; en reliant plusieurs dipôles par leur centre, on obtient un multi-doublet est obtenu. Il fonctionne sur autant de fréquences qu'il y a de doublets accordés. Pour éviter de multiplier le nombre de doublets, ce qui nécessite une mise au point délicate, on utilise des trappes sont utilisées. Elles bloquent les ondes les plus courtes et raccourcissent ou rallongent artificiellement les brins. Ces deux techniques peuvent évidemment être combinée comme ci-dessous.



Antennes ouvertes et antennes fermées : une antenne est **ouverte** lorsque son brin rayonnant est libre aux deux extrémités. (Exemple : quart d'onde, long-fil, sloper, dipôle, Yagi, Levy, hélice, log-périodiques). Une antenne est **fermée** lorsque le brin rayonnant forme une boucle. (Exemples : trombone, loop, quad). Dans ces cas, la longueur de l'antenne est souvent proche d'un multiple de la longueur d'onde. Quelques configurations d'antennes, que l'on pense fermées mais qui sont plus courtes qu'une longueur d'onde, sont des antennes **magnétiques** (exemple : bobine, cadre) : l'antenne émet (et reçoit) non pas la composante électrique de l'onde mais sa composante magnétique.

Réflecteurs paraboliques : certaines antennes, utilisées dans les hautes fréquences emploient des réflecteurs paraboliques qui réfléchissent les ondes et concentrent les rayonnements sur un **foyer**, où est placé l'antenne (généralement un doublet). La distance entre le foyer et la parabole est appelée la focale (F). D étant le diamètre du réflecteur, le rapport F/D détermine l'angle d'illumination de l'antenne située dans le foyer.

