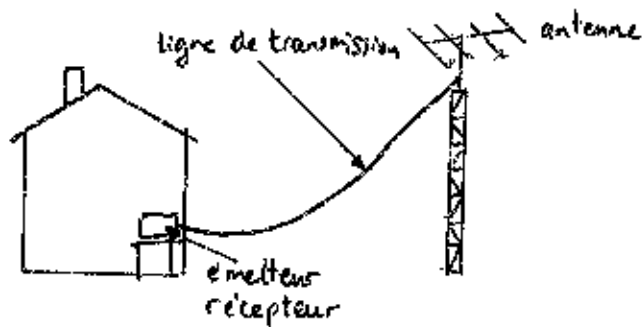
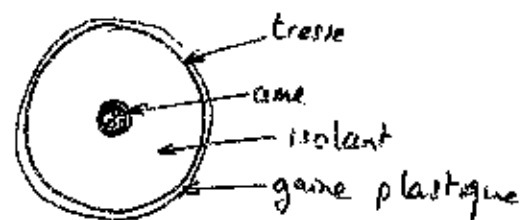
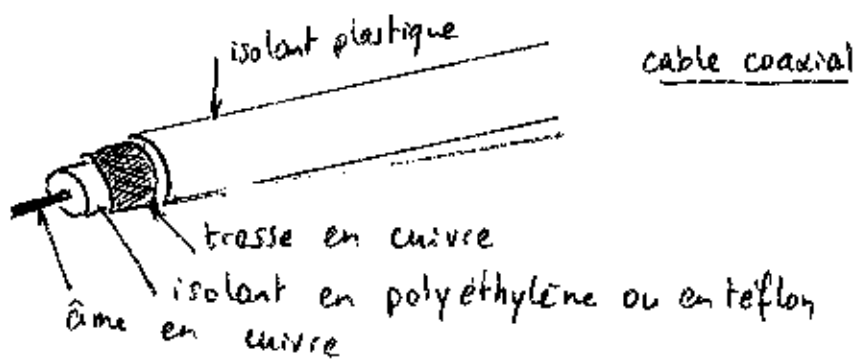


les lignes de transmission

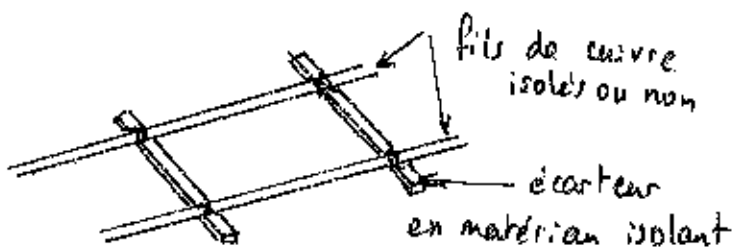
les lignes de transmission servent à véhiculer les courants haute-fréquence de l'émetteur à l'antenne ou de l'antenne au récepteur. Généralement lignes de transmission et antennes sont communes à l'émission et à la réception.



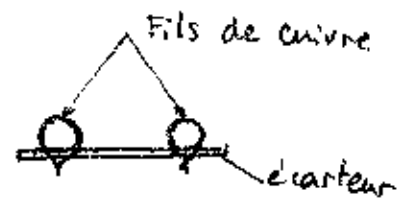
Les lignes de transmission utilisées le plus couramment par les radio-amateurs sont le câble coaxial (très semblable à du câble de télévision) et les lignes bifilaires (appelées aussi "échelles à grenouille") constituées de deux fils parallèles maintenus par des écarteurs.



les deux conducteurs sont l'âme et la tresse



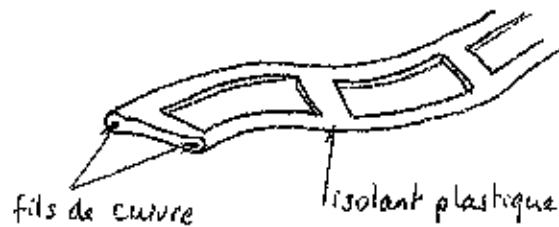
Echelle à grenouille



lignes symétriques bifilaires

Il existe dans le commerce des lignes bifilaires constituées de 2 fils enrobés d'un plastique pour maintenir

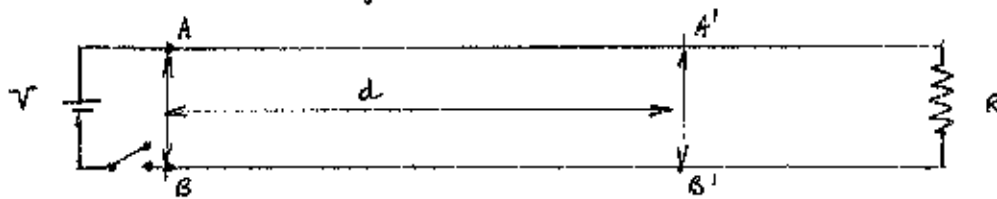
l'écartement et se présentant sous la forme de ruban plat appelé twin-lead.



twin-lead 450 Ω d'émission
ajouté pour diminuer la
prise au vent

Propagation des ondes dans une ligne

réalisons le montage suivant :



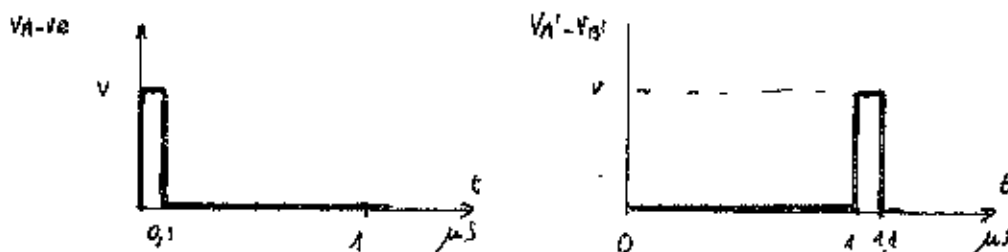
Un générateur de tension continue alimente une résistance R par une ligne bifilaire ou coaxiale.

Si on ferme l'interrupteur pendant un temps très court (quelques fractions de millièmes de seconde par exemple), la tension V apparaît immédiatement en A et B mais par contre cette tension (= pression électrique) ne parvient pas immédiatement en A' et B' , il lui faut un temps Δt égal à $\frac{d}{C}$ d distance de AB à $A'B'$

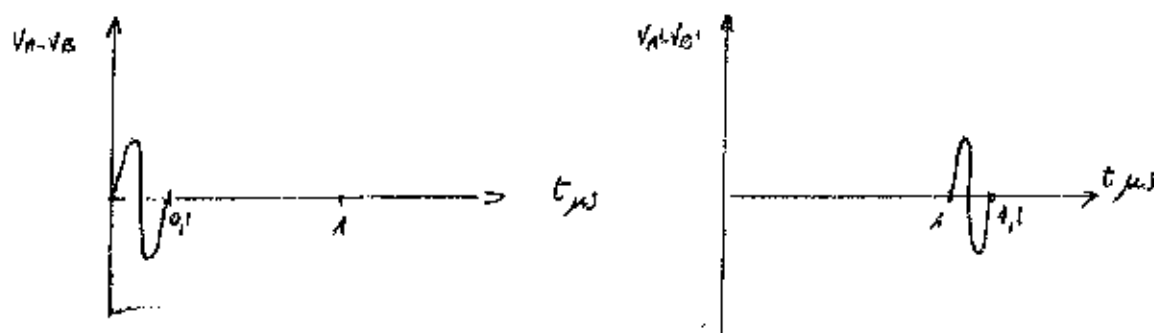
C vitesse du courant électrique = 300 000 km/s

Si par exemple $d = 300\text{m}$ $\Delta t = \frac{300}{300 \times 10^6} = 10^{-6}\text{s}$

Si on a fermé l'interrupteur à l'instant $t = 0$ et réouvert très rapidement 10^{-7}s plus tard par exemple les tensions entre A et B et A' et B' en fonction du temps auront l'allure suivante :



Si au lieu d'une source de tension continue on avait utilisé une source de tension alternative sinusoïdale haute fréquence de fréquence 10 MHz par exemple ($T = 0,1 \mu s$) les tensions entre A et B et A' et B' en fonction du temps auraient l'allure suivante



Si on laisse brancher en permanence la source de tension alternative de haute fréquence, entre A et B comme entre A' et B' on aura une tension alternative sinusoïdale de fréquence 10 MHz et de même amplitude mais par contre les phases seront différentes: le déphasage provient du temps $\frac{d}{c}$ que met l'onde pour aller de A-B jusqu'en A'-B'.

$$\text{si } V_A - V_B = V_m \cos \omega t \quad \text{alors } V_{A'} - V_{B'} = V_m \cos[\omega(t - \Delta t)]$$

$$\text{avec } \Delta t = \frac{d}{c} \quad \text{soit } V_{A'} - V_{B'} = V_m \cos\left[\omega\left(t - \frac{d}{c}\right)\right] = V_m \cos\left[\omega t - \frac{\omega d}{c}\right]$$

$$\text{le déphasage } \varphi \text{ vaut donc } \varphi = -\frac{\omega d}{c} = -2\pi f \frac{d}{c} = -2\pi \frac{d}{\lambda} \quad \lambda \text{ longueur d'onde}$$

$$\left(\lambda = \frac{c}{f}, \quad \frac{1}{\lambda} = \frac{f}{c} \right)$$

A 50 Hz la longueur d'onde est tellement grande que le déphasage est imperceptible, par contre à 10 MHz ($\lambda = 30 \text{ m}$) le déphasage est de $\frac{\pi}{2}$ (90°) pour $\frac{\lambda}{4} = 7,5 \text{ m}$, de π (180°) soit opposition de phase pour $d = \frac{\lambda}{2} = 15 \text{ m}$

Vitesse de propagation dans une ligne

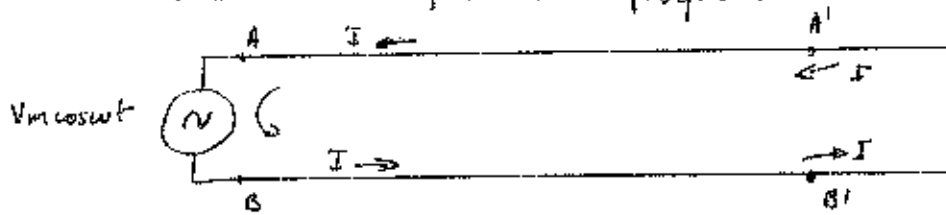
Jusqu'à maintenant on a supposé que la ligne était dans le vide donc $c = 300\,000 \text{ km/s}$, Dans l'air $c \approx 300\,000 \text{ km/s}$ aussi mais si l'isolant entre les conducteurs est du polyéthylène comme dans le câble coaxial de télévision alors $c = 0,66 \times 300\,000 \text{ km/s}$
0,66 est le coefficient de vélocité de la ligne.

Il en résulte que pour $f = 10 \text{ MHz}$ ($\lambda = 30 \text{ m}$) la tension change de phase non pas tous les $\frac{\lambda}{2} = 15 \text{ m}$ mais tous les $0,66 \frac{\lambda}{2} \approx 10 \text{ m}$.

$0,66 \lambda$ est appelée la longueur d'onde électrique de la ligne.

Impédance caractéristique d'une ligne

Soit une ligne de très grande longueur branchée à une source de courant alternatif de haute fréquence.



Partout sur la ligne on trouve une tension $V_{A'} - V_{B'} = V_m \cos(\omega t + \phi)$

Quelles que soient les positions de $A'-B'$ $V_{A'} - V_{B'}$ est une tension sinusoïdale d'amplitude V_m et de pulsation ω , seul la phase diffère selon la position de $A'B'$. On peut montrer qu'en A' et B' les courants qui traversent les conducteurs valent $I = I_m \cos(\omega t + \phi)$ donc sont en phase avec la tension (à noter que les deux conducteurs sont traversés par des courants égaux mais de sens opposés).

Le rapport $\frac{V_{A'} - V_{B'}}{I} = \frac{V_m}{I_m}$ est constant sur toute la ligne.

On l'appelle impédance caractéristique de la ligne

et on la note $Z_c = \frac{V_m}{I_m}$ et elle s'exprime en Ω (ohm).

On peut montrer mathématiquement que $Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}}$ où

L est l'inductance de la ligne par unité de longueur et C la capacité de la ligne par unité de longueur.

Z_c ne dépend que des caractéristiques géométriques de la ligne et de la nature de l'isolant (appelé diélectrique).

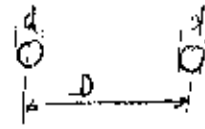
Pour une ligne coaxiale dans l'air :

$$Z_c = 138 \log \frac{D}{d}$$



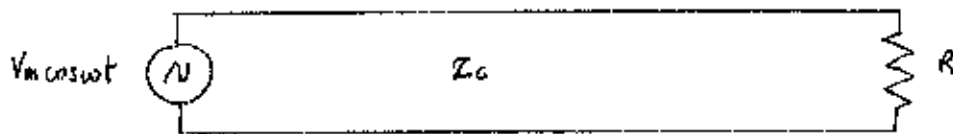
Pour une ligne bifilaire dans l'air :

$$Z = 276 \log \frac{2D}{d}$$



Réflexion dans une ligne

Jusqu'à maintenant on a toujours considéré une ligne branchée à une extrémité sans se préoccuper de ce qu'il advient des ondes (tension alternative qui se propage) à l'autre extrémité de la ligne. Connectons à cette extrémité une résistance pure de valeur R



la tension fournie par le générateur se propage jusqu'à la résistance R

Arrivé en R il se produit le phénomène suivant :

si $R = Z_c$ la résistance absorbe toute l'énergie électrique apportée par l'onde et il s'y dégage la puissance $P = \frac{V_{eff}^2}{R} = \frac{V_m^2}{2R}$

V_{eff} = tension efficace = $\frac{V_m}{\sqrt{2}}$

L'énergie du générateur est intégralement transmise par la ligne à la résistance on dit qu'il y a adaptation des impédances ($Z_c = R$)

Si $R \neq Z_c$ la résistance n'absorbe qu'une partie de l'énergie et renvoie ce qui n'a pas été absorbé dans la ligne si bien que dans la ligne il y a superposition de la tension issue du générateur v_d (onde directe) et la tension renvoyée par la résistance v_r (onde réfléchie) -

v_d et v_r sont des tensions sinusoïdales de même fréquence mais d'amplitudes et de phases différentes (la phase dépend de la position sur la ligne) -

Le rapport de l'amplitude de l'onde réfléchie V_r sur l'amplitude de l'onde directe V_d noté $\rho = \frac{V_r}{V_d}$ s'appelle le coefficient de réflexion

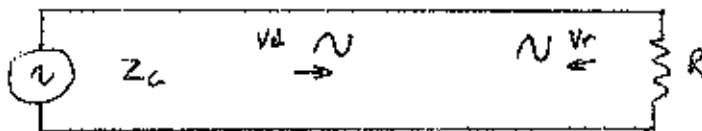
Comme la puissance est proportionnelle au carré de l'amplitude de la tension ($P = \frac{V_m^2}{Z_R}$) le rapport entre la puissance réfléchie et la puissance envoyée vaut : $\frac{V_r^2}{Z_R} / \frac{V_d^2}{Z_R} = \frac{V_r^2}{V_d^2} = \rho^2$

par exemple si le coefficient de réflexion vaut $60\% = 0,6$
la puissance réfléchie est de $(0,6)^2 = 0,36 = 36\%$.

Rapport d'ondes stationnaires

Dans le cas d'une ligne désadaptée ($R \neq Z_c$) l'onde directe et l'onde réfléchie ont pour valeur :

$v_d = V_d \cos(\omega t + \varphi_1)$ $v_r = V_r \cos(\omega t + \varphi_2)$ (φ_1 et φ_2 variant en sens contraire φ_1 augmente quand on s'éloigne de la source, φ_2 augmente quand on s'éloigne de la résistance donc diminue quand on s'éloigne de la source alternative)



Il y a donc des points sur la ligne où v_d et v_r sont en phase et d'autres points où elles sont en opposition de phase.

Quand v_d et v_r sont en phase l'amplitude résultante est maximum et vaut $V_d + V_r$, quand v_r et v_d sont en opposition de phase l'amplitude de la somme des tensions directe et réfléchie est minimum et vaut $V_d - V_r$.

Le rapport entre le maximum d'amplitude $V_d + V_r$ et le minimum d'amplitude $V_d - V_r$ est appelé rapport d'ondes stationnaires et est noté R.O.S.

$$R.O.S. = \frac{V_d + V_r}{V_d - V_r}$$

comme $\rho = \frac{V_r}{V_d}$ $V_r = \rho V_d$ $R.O.S. = \frac{V_d + \rho V_d}{V_d - \rho V_d} = \frac{V_d(1+\rho)}{V_d(1-\rho)}$

finalement
$$R.O.S. = \frac{1+\rho}{1-\rho}$$

le R.O.S. est compris entre 1 quand il y a adaptation parfaite ($R = Z_c$) et l'infini (∞) quand il y a complète désadaptation.

Attention vous entendrez souvent dire T.O.S. au lieu de R.O.S. le T.O.S. (Taux d'ondes stationnaires) c'est en fait ρ , le coefficient de réflexion, exprimé en %

Exemple si le ROS vaut 2 le coefficient de réflexion s'obtient par $ROS = \frac{1+p}{1-p}$ soit $2 = \frac{1+p}{1-p}$ $2(1-p) = 1+p$ $2 - 2p = 1+p$

$$2 - 1 = p + 2p \quad 3p = 1 \quad p = \frac{1}{3}$$

cela signifie que la puissance réfléchie est de $(\frac{1}{3})^2 \approx 10\%$ de la puissance envoyée par le générateur :

$ROS = 2 \quad \approx 10\%$ de puissance réfléchie

D'une manière générale on peut exprimer p en fonction du ROS

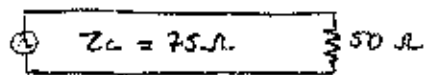
$$p = \frac{ROS - 1}{ROS + 1}$$

le ROS peut encore s'exprimer par d'autres formules on

peut montrer que $ROS = \frac{Z_c}{R}$ si $Z_c > R$

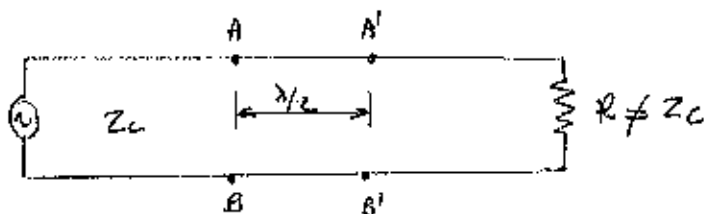
$ROS = \frac{R}{Z_c}$ si $R > Z_c$

Ex



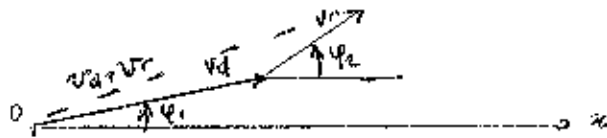
le ROS dans la ligne vaut :

$$ROS = \frac{75}{50} = 1,5$$



On a vu que sur une ligne non adaptée ($ROS \neq 1$) il y avait superposition de la tension directe $v_d = V_d \cos(\omega t + \varphi_1)$ et de la tension réfléchie $v_r = V_r \cos(\omega t + \varphi_2)$. L'amplitude de la tension sur la ligne varie continuellement en passant par des maximums $V_d + V_r$ et des minimums $V_d - V_r$.

Entre les points A et B la tension est égale à $v_d + v_r$ (somme de tensions sinusoïdales d'amplitudes V_d et V_r et de phase φ_1 et φ_2 et de même pulsation). Pour les ajouter on peut utiliser la méthode des vecteurs de Fresnel.



la somme des deux tensions sinusoïdales est une tension sinusoïdale de même fréquence et d'amplitude fonction de l'amplitude des différentes tensions qu'on ajoute et de leur différence de phase $\varphi_2 - \varphi_1$
 calculons la tension entre des points A' et B' distants de $\frac{\lambda}{2}$ de A et B

$$V_{A'} - V_{B'} = V_d + V_r = V_d \cos\left[\omega\left(t - \frac{\lambda}{2c}\right) + \varphi_1\right] + V_r \cos\left[\omega\left(t + \frac{\lambda}{2c}\right) + \varphi_2\right]$$

signe + car Vr se propage de R vers la source

$$= V_d \cos\left(\omega t + \varphi_1 + \frac{\omega\lambda}{2c}\right) + V_r \cos\left(\omega t + \varphi_2 + \frac{\omega\lambda}{2c}\right)$$

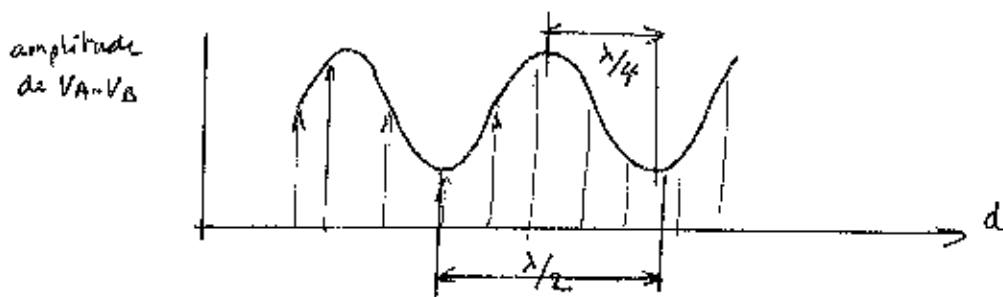
On a à faire la somme de tension sinusoïdales. L'amplitude de la somme ne dépend que de V_d , V_r et la différence de phases

$$\varphi_2 + \frac{\omega\lambda}{2c} - \left(\varphi_1 + \frac{\omega\lambda}{2c}\right) = \varphi_2 - \varphi_1 + \frac{\omega\lambda}{c} = \varphi_2 - \varphi_1 + 2\pi \left(\frac{\omega\lambda}{c} = 2\pi \frac{f\lambda}{c}\right)$$

$\varphi_2 - \varphi_1 + 2\pi$ c'est la même phase que $\varphi_2 - \varphi_1$ ($2\pi = 360^\circ$) cela veut dire que $V_{A'} - V_{B'}$ a la même amplitude que $V_A - V_B$.

Toute les demi-ondes on retrouve la même amplitude de la tension sur la ligne

En représentant graphiquement l'amplitude de $V_d + V_r$ en fonction de la distance à la source on obtient la courbe :

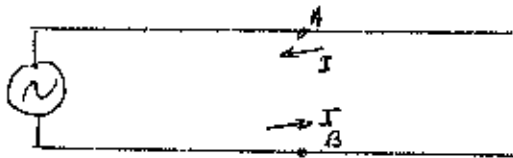


De plus on constate qu'il y a $\frac{1}{4}$ d'onde entre les minimums et les maximums

L'antenne

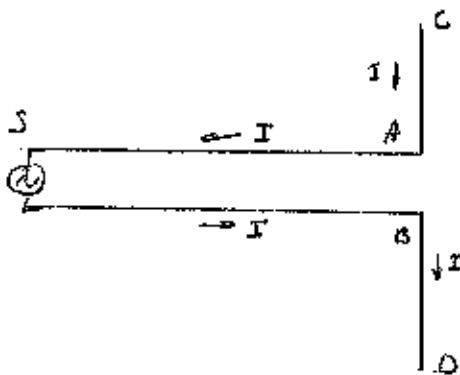
Principe de fonctionnement

On a vu que dans une ligne bifilaire à laquelle on a branché une source de tension HF il circulait des courants électriques de même amplitude mais de sens opposés dans chaque conducteur à la même distance de la source



Ces courants opposés créent des champs magnétiques et électriques qui se débrassent mutuellement (dans la mesure où l'écartement des fils est petit par rapport à la longueur d'onde) si bien que la ligne ne rayonne pas de champ électromagnétique

Supposons que l'on écarte les conducteurs de la ligne à une extrémité comme indiqué sur le schéma suivant



les parties SA-SB de la ligne sont parcourues par des courants opposés donc ne rayonnent pas

les parties CA et BD de la ligne déployée sont parcourues par

des courants de même sens, les champs créés par ces courants s'ajoutent (ne s'annulent pas) et il y a rayonnement d'un champ électromagnétique.

L'antenne demi-onde

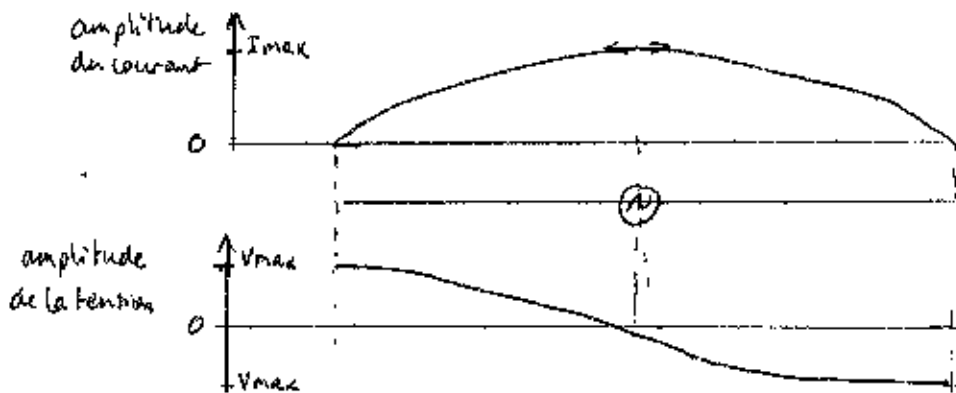
Soit deux fils de longueur $\frac{\lambda}{2}$ dans le prolongement l'un de l'autre et branchés à un générateur comme indiqué dans le schéma suivant



la longueur $\frac{\lambda}{4}$ dépend bien sûr de la fréquence du générateur
 ex si $f = 10 \text{ MHz}$ $\frac{\lambda}{4} = 7,50 \text{ m}$

Le générateur HF en service envoie des ondes vers les extrémités ; aux extrémités des fils $\frac{\lambda}{4}$ l'onde est réfléchie et revient vers le générateur. Il y a donc des ondes stationnaires sur les fils qui rayonnent

On peut montrer facilement que l'amplitude de la tension et du courant dans une antenne demi-onde ($2 \times \frac{\lambda}{4}$) est la suivante



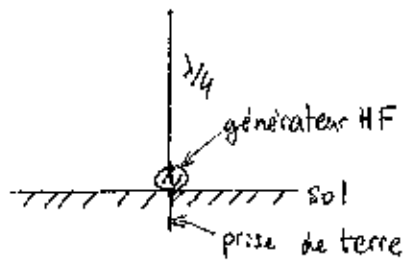
Au extrémités de l'antenne l'amplitude du courant sinusoïdal est nulle alors que l'amplitude de la tension est maximale. On dit qu'il y a des ventres de tension et des nœuds de courant. À noter que les signes des tensions aux extrémités sont toujours l'opposé l'un de l'autre.

Au centre de l'antenne l'amplitude du courant est maximum et l'amplitude de la tension est nulle. Il y a un ventre de courant et un nœud de tension.

Le type d'antenne est appelé doublet demi-onde ou dipôle.

L'antenne verticale quart d'onde

Cette antenne appelée aussi antenne Marconi, est constituée d'un brin (fil) vertical de longueur $\lambda/4$ et alimentée comme suit:

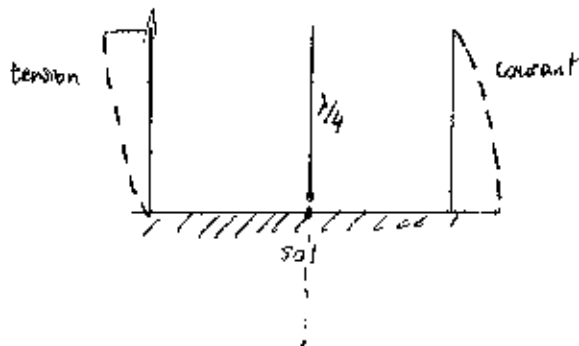


Le générateur HF ou la ligne d'alimentation est branché entre la base du brin vertical et le sol.

Pour comprendre son fonctionnement il faut admettre que la terre supposée bon conducteur

se comporte comme un miroir pour les ondes électromagnétiques si bien que c'est un peu comme un dipôle vertical dont un brin serait enfoui dans le sol.

La répartition des ondes stationnaires sur l'antenne est la suivante:



Il y a un ventre de courant et un nœud de tension à la base (près de la terre) et un ventre de tension et un nœud de courant à son extrémité supérieure.

Le bon rendement de l'antenne suppose une terre très conductrice (sol humide).

Impédance d'une antenne

Une antenne taillée à la bonne longueur ($\lambda/2$ pour un dipôle et $\lambda/4$ pour une verticale) est telle qu'au point d'alimentation la tension et le courant sont en phase. L'antenne se présente donc comme une résistance pure (pas de composante réactive dans l'impédance qu'on pourrait mesurer au point d'alimentation), la valeur de cette résistance vaut $Z = \frac{V}{I}$.

Pour un dipôle $Z \approx 73 \Omega$ pour une verticale $Z \approx 36 \Omega$.

Alimentation d'une antenne

Sauf cas particulier comme l'antenne Lévy (très répandue chez les radio-amateurs) où l'alimentation est réalisée avec une ligne symétrique fonctionnant avec des ondes stationnaires ($ROS > 1$), les antennes sont presque toujours alimentées

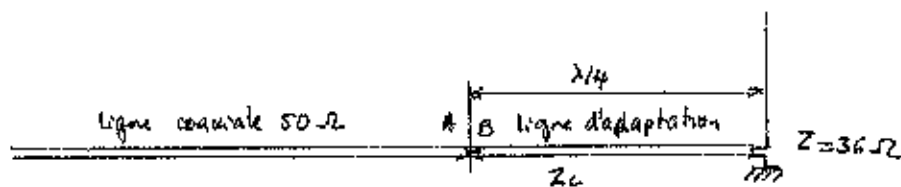
en "ondes progressives" c'est à dire sans ondes stationnaires dans la ligne d'alimentation ($ROS=1$). Cela impose d'avoir une parfaite adaptation des impédances : impédance caractéristique de la ligne égale à l'impédance de l'antenne.

Cela est facilement réalisé avec un dipôle $Z=73\Omega$ en utilisant du câble coaxial du commerce d'impédance 75Ω $ROS = \frac{75}{73} \approx 1$

Transformation d'impédance avec une ligne quart d'onde

Si à une extrémité d'une ligne de longueur $\lambda/4$ et d'impédance caractéristique Z_0 , on connecte une impédance Z_1 la ligne $\lambda/4$ aura pour effet de transformer cette impédance Z_1 en une impédance Z_2 telle que $Z_1 Z_2 = Z_0^2$ et on retrouvera cette impédance Z_2 à l'autre extrémité de la ligne.

Ex : soit à alimenter une antenne Marconi $\lambda/4$ ($Z=36\Omega$) avec du câble coaxial 50Ω . Si on intercale entre l'antenne et le câble coaxial 50Ω une ligne de longueur $\lambda/4$ et d'impédance Z_0 bien choisie, on pourra faire en sorte que l'impédance de l'antenne transformée par la ligne devienne 50Ω .



$$Z_0^2 = 50 \times 36 \quad Z_0 = \sqrt{50 \times 36} = 42\Omega$$

L'extrémité A de la ligne 50Ω sera branchée à l'extrémité B de la ligne $\lambda/4$ 42Ω et cette extrémité B présentera une impédance de 50Ω bien que l'impédance caractéristique de la ligne soit de 42Ω .

Le ROS dans la ligne 50Ω sera de 1 car connectée à une impédance de 50Ω , le ROS dans la ligne $\lambda/4$ sera $ROS = \frac{42}{36} \approx 1.2$ ou $ROS = \frac{50}{42} \approx 1.2$

L'intérêt d'adapter les impédances est de diminuer le ROS dans les lignes (les ondes stationnaires) qui sont sources de pertes importantes en particulier avec les câbles coaxiaux avec diélectrique en polyéthylène.

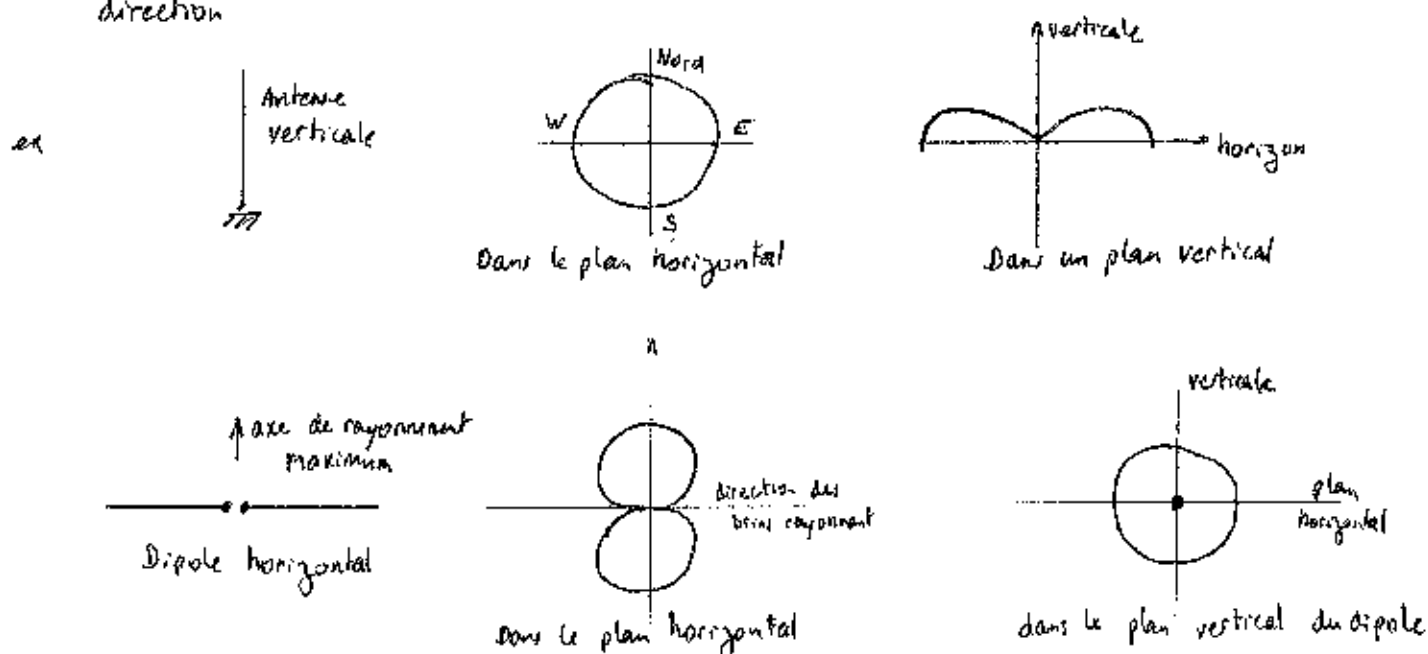
Par contre les lignes bifilaires dans l'air (échelles à grignolles) supportent des ROS élevés (>10) sans beaucoup de pertes et on les utilise pour les antennes Lévy accordables en continu de 3,5 à 30 MHz par exemple.

Diagramme de rayonnement d'une antenne

Selon la forme d'une antenne toute l'énergie n'est pas rayonnée uniformément dans toutes les directions :

une antenne verticale vu sa forme, rayonne de la même manière dans toutes les directions d'un plan horizontal (même énergie quel que soit l'azimut), par contre dans le plan vertical de l'antenne le rayonnement n'est pas uniforme : il est maximum à l'horizontal et nul à la verticale de l'antenne.

On représente le rayonnement des antennes par des diagrammes indiquant dans un plan l'énergie relative rayonnée dans telle ou telle direction

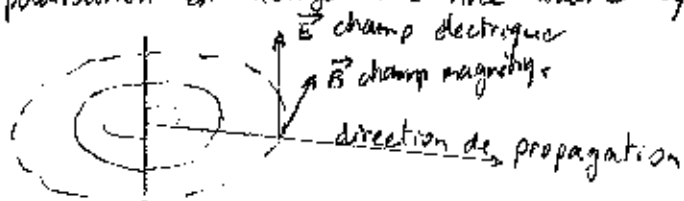


Plan de polarisation

L'onde électromagnétique émise par une antenne est une grandeur vectorielle : champ électrique + champ magnétique perpendiculaires entre eux et perpendiculaires à la direction de propagation.

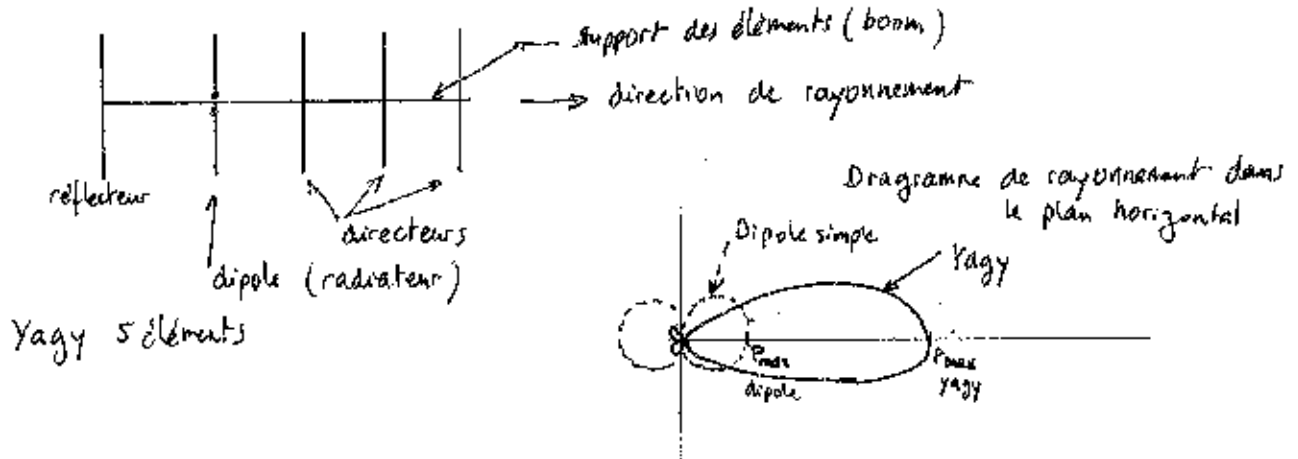
le plan de polarisation de l'onde c'est la direction du champ électrique

Pour une antenne verticale la polarisation est verticale, pour un dipole horizontal la polarisation est horizontale. Avec d'autres types d'antennes ce n'est pas toujours évident



Gain d'une antenne

Par adjonction d'éléments parasites comme des réflecteurs ou des directeurs dans le cas d'une antenne Yagi ("rateau" de TV), on peut arriver à concentrer l'énergie émise ou captée par une antenne dans une seule direction et finalement avoir plus d'énergie dans cette direction qu'avec un simple dipôle.



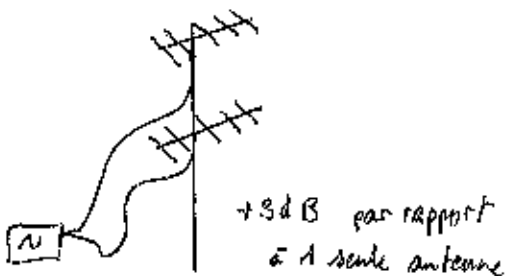
Le rapport entre l'énergie maximum rayonnée par l'antenne Yagi (dans cet exemple) et l'énergie maximum rayonnée par un dipôle simple (antenne de référence) est appelé gain de l'antenne. On l'exprime en dB en même en dB dipôle pour préciser qu'on compare l'antenne à un dipôle.

$$\text{Gain} = 10 \log \frac{P_{\text{Yagi}}}{P_{\text{dipôle}}}$$

Ex une Yagi 5 éléments F9FT sur 144MHz a un gain d'environ 10dB donc rayonne $10^{\log 10} = 10$ fois plus qu'un dipôle dans son axe. Par contre dans les autres directions elle rayonne moins qu'un dipôle notamment vers l'arrière (-20dB).

Couplage d'antenne

En alimentant deux antennes identiques en phase c-à-d avec la même longueur de ligne pour que les champs rayonnés soient en phase on montre que l'énergie rayonnée est doublée donc un gain de 3dB.



Bien entendu ce gain s'obtient par un pincement du lobe de rayonnement donc une directivité plus marquée du groupement d'antennes.

Chaque fois qu'on double le nombre d'antennes on gagne 3dB.