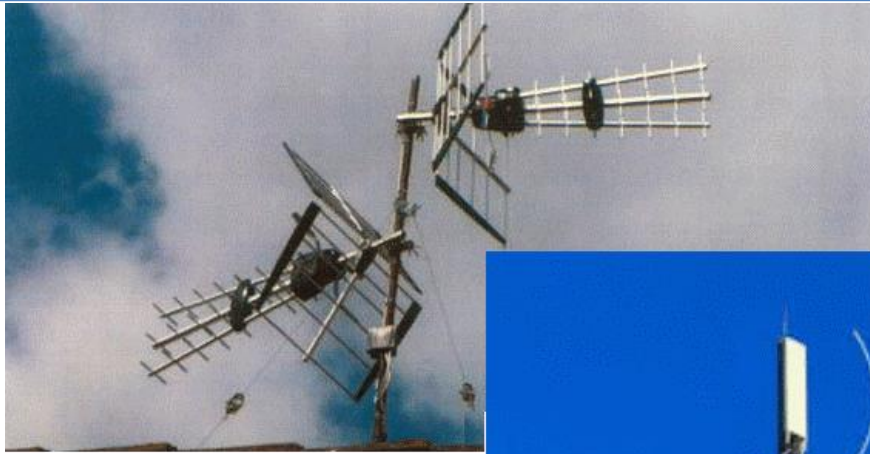


2016

Les Antennes



Pierre Marie GAYRAL

F5XG

04/02/2016

Table des matières

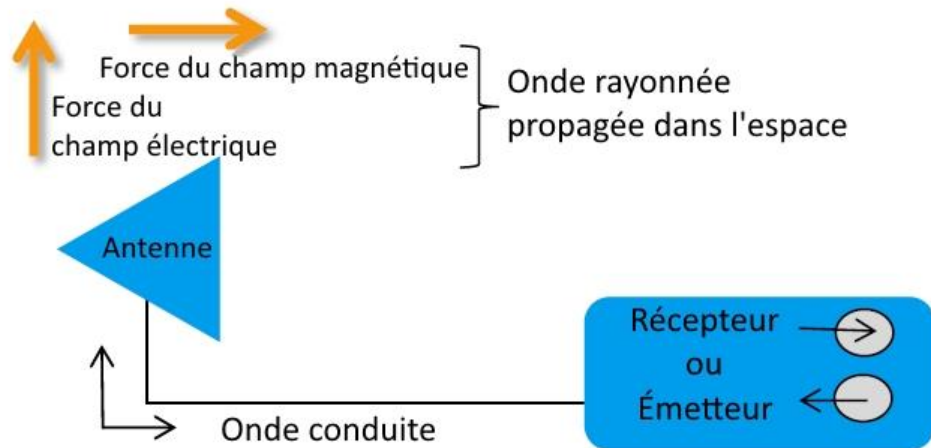
1.	Définition de l'antenne :.....	2
2.	Quelle image pourrions-nous donner de l'antenne ?	2
3.	Modélisation d'une antenne	3
4.	Le dipôle demi-onde ou doublet :	3
5.	Influence de la longueur du brin rayonnant sur l'impédance :	4
6.	Longueur physique d'une antenne demi-onde.....	4
7.	L'effet d'extrémité.....	6
8.	Explications pas à pas :	7
9.	Remarque importante :	7
10.	Pourquoi une antenne rayonne-t-elle ?	8
11.	Répartition tension courant dans une antenne demi-onde.....	9
12.	Influence de la longueur sur le diagramme de rayonnement.....	9
13.	Polarisation :	11
14.	Réversibilité ou réciprocité des caractéristiques de l'antenne :	11
15.	L'antenne directionnelle	11
16.	Les principaux paramètres d'une antenne :	12

1. Définition de l'antenne :

Qu'est-ce qu'une antenne.

Une antenne agit comme convertisseur entre des ondes conduites et les ondes électromagnétiques se propageant en espace libre (Figure 1 Rôle d'une antenne).

Le nom antenne vient de la zoologie, dans laquelle le nom latin *antennae* désigne les longs et fins palpeurs des insectes.



Fonctionnalité de base d'une antenne

Figure 1 Rôle d'une antenne [3]

D'une manière générale, une antenne est une structure conductrice qui véhicule un courant électrique haute fréquence variable

Cette structure rayonne ou reçoit une onde électromagnétique.

Quand on parle de rayonnement, il s'agit d'établir dans l'espace un champ magnétique et un champ électrique.

2. Quelle image pourrions-nous donner de l'antenne ?

Nous pourrions dire qu'une antenne est comparable à une ampoule électrique.

L'antenne comme l'ampoule est chargée de convertir un courant et une tension HF en rayonnement électromagnétique.

Pour l'ampoule ce rayonnement sera dans le spectre des ondes visibles ce qui n'est pas le cas de l'antenne HF.

Il n'y a qu'une différence de fréquence.

Une ampoule possède un piètre rendement, nous demanderons plus à notre antenne.

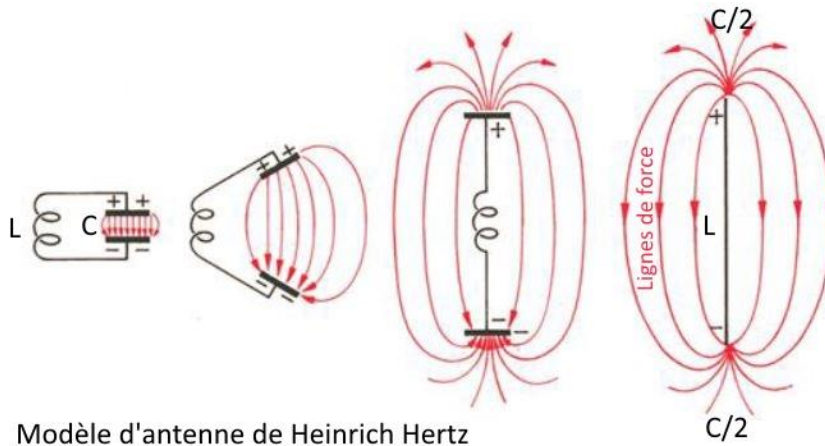


Figure 2 : l'ampoule électrique

3. Modélisation d'une antenne

Une antenne peut être dérivée à partir d'un circuit résonant parallèle constitué d'une inductance et d'un condensateur.

Si les plaques du condensateur sont complètement dépliées, et l'inductance est réduite à l'inductance du fil lui-même, on finit avec une antenne dipôle comme illustré à la représentation la plus à droite de la figure 3.



Modèle d'antenne de Heinrich Hertz

Figure 3 Modèle d'Heinrich Hertz [3]

La capacité $C/2$ est la capacité de l'espace libre.

4. Le dipôle demi-onde ou doublet :

L'exemple le plus connu est le dipôle (ou demi-onde) accordé.

L'antenne dipôle est la forme fondamentale pour construire une antenne.

C'est un conducteur électrique de longueur $\lambda/2$ (en fait légèrement moins de $\lambda/2$).

Il est isolé au centre, chacune des branches est alimentée d'un côté par l'âme du coaxial et de l'autre sa tresse.

(NB : c'est une liaison asymétrique)

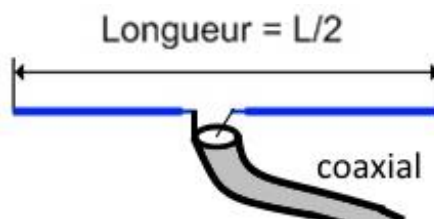


Figure 4 Le dipôle demi-onde

Les deux brins sont rigoureusement égaux, le point d'alimentation en énergie se trouve au centre de l'antenne. L'antenne peut être réalisée avec du fil ou du tube, par ex.

Augmenter le diamètre du ou des conducteurs conduit sur une antenne à augmenter sa bande passante.

Le dipôle demi-onde a une propriété extrêmement utile :

Taillé mécaniquement en demi-onde pour une fréquence donnée (à la bande passante près), son impédance est de 73Ω ($+j42\Omega$) et cette impédance est résistive et réactive ce qui permet son alimentation par un câble coaxial 75Ω (voir le Facteur K).

Pour mémoire les équipements de télécommunication ont une impédance caractéristique de 50Ω .

Formation Technique F4

On appelle ceci un dipôle résonant car à la "résonance" tout se passe comme si nous avions affaire à un circuit résonant série.

Il est fort probable que vous ne puissiez que très rarement atteindre les résultats édictés par la théorie car une antenne n'est jamais totalement isolée de son milieu et une multitude de couplages parasites apparaissent.

Citons le fait le plus classique : la hauteur par rapport au sol.

Celui-ci a une influence déterminante sur pratiquement toutes les caractéristiques de l'antenne. Pour s'approcher le plus possible de ce que dit la théorie, le dipôle devra être placé une hauteur bien précise au-dessus du sol et naturellement être éloigné de tout ce qui peut interférer avec lui (maisons, arbres, poteaux ou structures métalliques etc.)

On trouve une kyrielle de formules permettant de calculer la longueur effective d'un doublet.

Ne vous encombrez pas inutilement l'esprit et retenir la longueur électrique est :

$$\lambda_{(m)} = \frac{150}{F_{(MHz)}}$$

λ en mètres (longueur totale du dipôle)
F en MHz

5. Influence de la longueur du brin rayonnant sur l'impédance :

Nous voici au grand moment !

Les radioamateurs, grands bricoleurs et exigeants expérimentateurs souhaitent en général posséder une antenne œcuménique capable de fonctionner correctement sur toutes les bandes décamétriques, susceptible d'avoir du gain, une adaptation parfaite sur tout le spectre, pas chère, pas haute, si possible invisible.

Naturellement aucune de toutes ces conditions n'est réunie simultanément, car il faut vivre de compromis et les antennes ne dérogent pas à la règle.

Beaucoup d'inventeurs géniaux n'ont œuvré dans ce domaine que par artefact.

Mais ceci est une autre histoire.

Si nous utilisons un dipôle qui est "résonant" pour une fréquence (ou une largeur de bande de fréquences) et une seule, sur une fréquence pour laquelle il n'est pas taillé, son impédance ne se présentera plus sous la forme d'une résistance pure mais sous la forme d'une impédance série.

Cette impédance série sera composée d'une résistance et d'une réactance qui sera tantôt capacitive tantôt selfique.

Il s'agit en tout point du comportement des circuits résonants série et parallèle que nous avons étudié en électricité.

De ce fait l'antenne sera désadaptée, à une fréquence hors de sa bande passante naturelle (à $\pm n$ KHz, ou $\pm n$ MHz de la fréquence donnant un ROS optimum).

Le ROS n'est pas représentatif du bon ou mauvais fonctionnement d'une antenne

6. Longueur physique d'une antenne demi-onde

La longueur la plus courte d'un fil résonant à une fréquence donnée est celle où une charge électrique pourra se déplacer en sens aller-retour en une période radiofréquence.

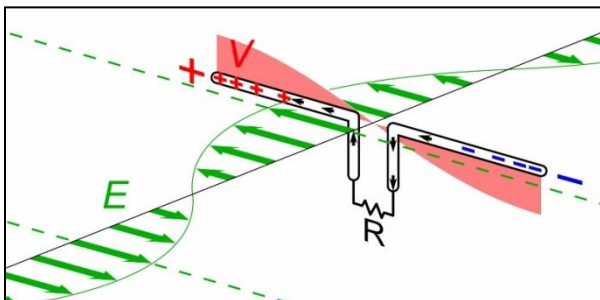


Figure 5 Déplacement aller ¼ onde

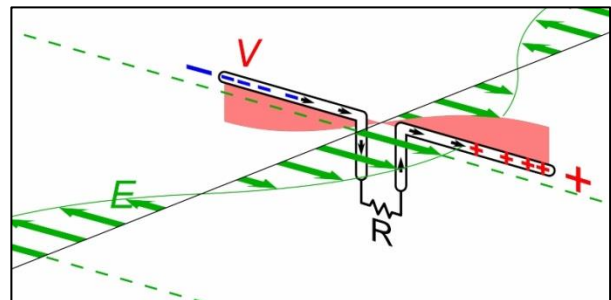


Figure 6 Déplacement retour ¼ onde

Formation Technique F4

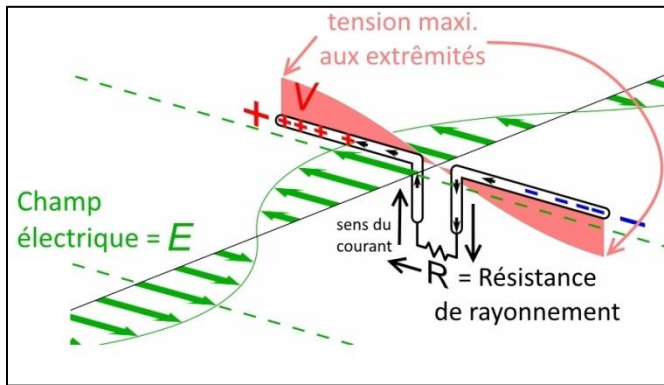


Figure 7 Sens du courant et tension dans un dipôle

La Figure 7 ci-contre montre le sens du courant dans le dipôle demi-onde et les charges. La tension est maximum aux extrémités du dipôle.

La résistance de rayonnement de l'antenne dipôle est de 73Ω .

Le signal radiofréquence (en émission) est appliqué au centre du dipôle demi-onde.

Le signal radiofréquence (en réception) sera recueilli au centre du dipôle demi-onde.

Même si une antenne demi onde construite en fil est tendue dans l'espace et parfaitement isolée via des isolateurs et des cordes en matériel neutre d'un point de vue RF, la longueur physique doit être réduite par rapport à la longueur électrique donnée ci-dessus.

Ceci pour deux raisons :

- Le rapport entre le diamètre du fil et la longueur de l'antenne « modifie » la longueur électrique de l'antenne
- L'effet d'extrémité également influence cette longueur

Le facteur K qui est un coefficient de raccourcissement est à appliquer à la formule ci-dessus qui devient :

$$\lambda_{(m)} = \frac{150 * K}{F_{(MHz)}}$$

λ en mètres (longueur totale du dipôle)

F en MHz

K = coefficient de raccourcissement

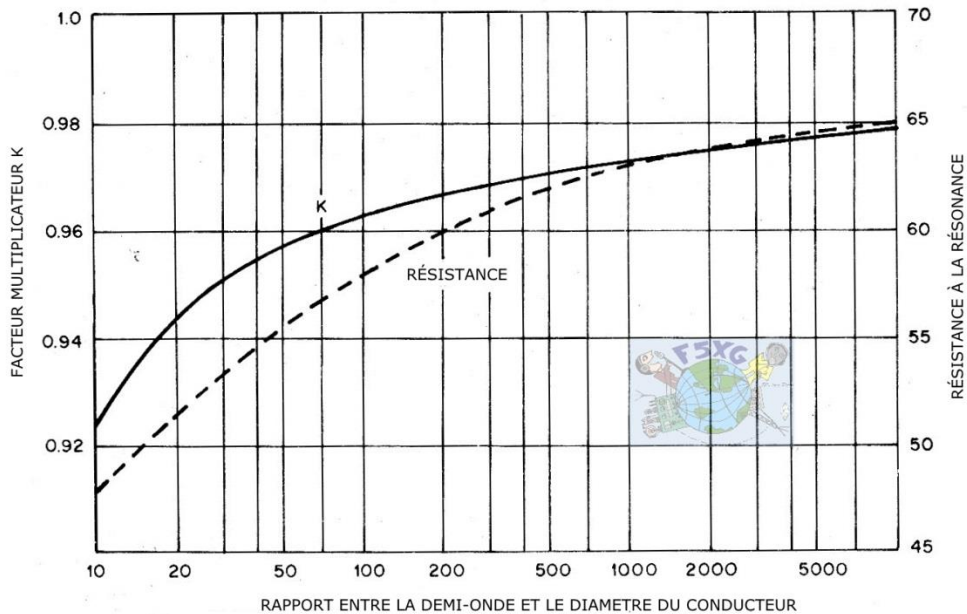


Figure 8 Facteur K de raccourcissement [1]

Formation Technique F4

7. L'effet d'extrémité

Cet effet est dû à un effet de charge aux extrémités de l'antenne apportés par les isolateurs et consorts. Ces éléments se comportent comme une capacité additionnelle qui empêche que le courant d'extrémité soit égal à zéro, ce qui rallonge artificiellement l'antenne.

Cet effet est l'effet d'extrémité.

Il est surtout notable pour les fréquences basses jusqu'à 50MHz, au-dessus de 50MHz il devient de plus en plus négligeable.

On a trouvé par expérience que la réduction à apporter à la longueur électrique est d'environ 5%.

La formule devient donc:

$$\lambda_{(m)} = \frac{150 * 0,95}{F_{(MHz)}}$$

λ en mètres (longueur totale du dipôle)

F en MHz

K = coefficient de raccourcissement

Source [1]

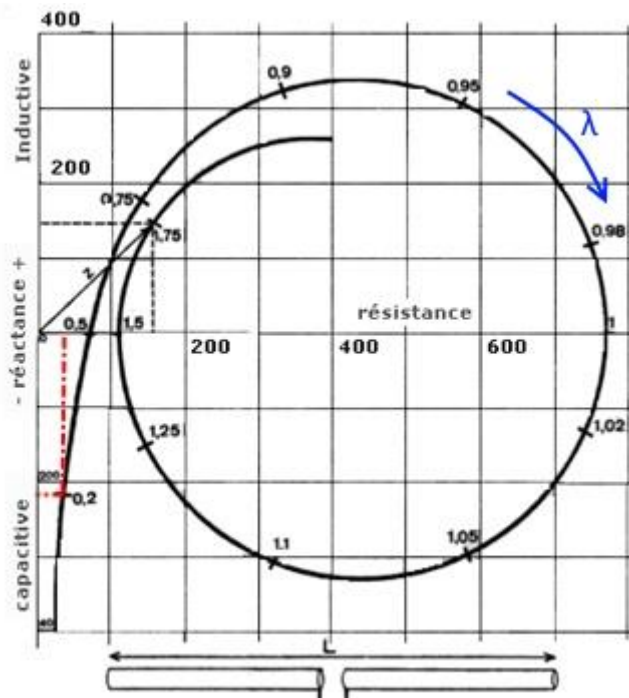


Figure 9 Variation de l'impédance d'un dipôle

Mémorisez bien ce que vous voyez ci-dessus car c'est la clef de voûte de tout système d'antenne.

Ce graphique laisse apparaître deux axes :

- L'axe horizontal marqué *résistance* représente la partie résistive de l'impédance de l'antenne.
- L'axe vertical marqué *-réactance+* représente la partie réactive de l'impédance de l'antenne.

Sur l'escargot qui trace l'impédance complexe ($Z = R \pm jX$) sont portées les différentes longueurs d'onde.

Formation Technique F4

8. Explications pas à pas :

- Prenons une antenne très courte de $0,2\lambda$ et relevons les valeurs de R et X(en pointillés rouge ci-dessus).

Approximativement il vient :

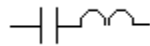
- $R = 30\Omega$ et $X = -220\Omega \rightarrow$ capacitif.
- Si nous connectons directement un câble coaxial à cette antenne le ROS sera important, et bien que n'étant pas obsédé par l'indication de l'aiguille du "ROS-mètre", nous souhaitons réaliser quand même une meilleure adaptation.
- Poursuivons, augmentons la dimension de notre aérien jusqu'à une demi-onde. Nous lisons sur notre diagramme $R= 73 \Omega$ et $X =0$. Bingo, nous pouvons alimenter comme cela.
- Nous sommes en verve et décidons d'allonger l'antenne à $0,9\lambda$ pour voir. Dans ce cas de figure nous relevons : $R= 320\Omega$ et $X = +320\Omega \rightarrow$ inductive.
- Dans ce cas aussi nous sommes loin des 73Ω résistifs. Nous constatons que maintenant que notre antenne est trop longue ($>0,5\lambda$), sa réactance est fortement selfique.
- Continuons pour arriver à 1λ . Point remarquable, l'antenne redevient résistive mais pour une valeur très élevée, supérieure à 750Ω .
- On ne s'en lasse pas, nous allongeons de nouveau. Cette fois le comportement de l'antenne s'apparente à ce que nous avons vu quand l'antenne ne mesurait que $0,2 \lambda$.

Bon inutile d'aller plus loin, nous avons fait un tour complet, les mêmes phénomènes vont se reproduire périodiquement. Nous allons en tirer les conclusions suivantes :

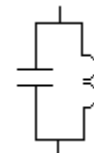
Pour tous les multiples exacts de $0,5\lambda$, on a une partie purement résistive et une réactance qui s'annule $X = 0$.

Pour toutes les autres longueurs différentes de $0,5\lambda$, et en fonction de sa longueur, une antenne va se comporter tantôt comme un circuit série, tantôt comme un circuit parallèle.

On trouvera pour chaque circuit un point de résonance auquel la réactance s'annulera tous les $0,5 \lambda$



Circuit série : impédance nulle



Circuit parallèle : impédance théoriquement infinie

9. Remarque importante :

Nous venons de voir quelles étaient les variations de l'impédance de l'antenne en fonction de sa longueur pour une fréquence considérée et seulement cela.

Ceci ne préfigure en rien de ce que sera son efficacité.

Une antenne présentant de telles impédances affichera dans certains des cas que nous avons étudiés des ROS hallucinants.

Si l'on devait juger de l'efficacité d'une antenne à son ROS, la charge résistive (non réactive !) adaptée exactement à $Z = 50\Omega$, serait alors la meilleure des antennes, car son ROS = 1,002, R.L. (ar) $\geq 60\text{dB}$!

(J'en ai une qui a un ROS de 1 à 1,2, R.L. $\geq 20,8\text{dB}$, jusqu'à 3 GHz, manque de chance elle ne rayonne absolument rien). Le ROS traduit l'adaptation, rien de plus. A méditer...

ROS	r	ar	Puissance réfléchie
1.002	0.001	60 dB	
1.01	0.005	46 dB	
1.1	0.05	26 dB	0.2 %
1.2	0.1	20 dB	0.8 %
1.5	0.2	14 dB	4 %
2.0	0.33	9.5 dB	11.1 %
3.0	0.5	6 dB	25 %
5.0	0.67	3.5 dB	44.4 %

10. Pourquoi une antenne rayonne-t-elle ?

La réponse à cette question n'est pas évidente.

Brièvement et très schématiquement:

Vous connaissez le principe d'émission d'un photon lumineux.

Il suffit de donner de l'énergie à un électron qui va changer d'orbite et s'éloigner du noyau.

Quand l'apport d'énergie cesse. Celui-ci revient à une position initiale en émettant un photon de lumière.

C'est le principe par exemple des diodes LED.

Il en va de même avec les antennes.

Nous produisons dans notre émetteur un champ électrique qui fait se mouvoir des électrons (le courant) à une fréquence F .

Assumons l'antenne comme étant une bobine seule pour le moment.

Tout changement d'état énergétique provoque un courant dans cette bobine qui crée un champ électromagnétique (voir Figure 3 Modèle d'Heinrich Hertz).

Les champs dans la proximité très proche de l'antenne sont extrêmement complexes à analyser.

Les physiciens ont défini plusieurs zones autour de l'antenne pour prendre cela en compte.

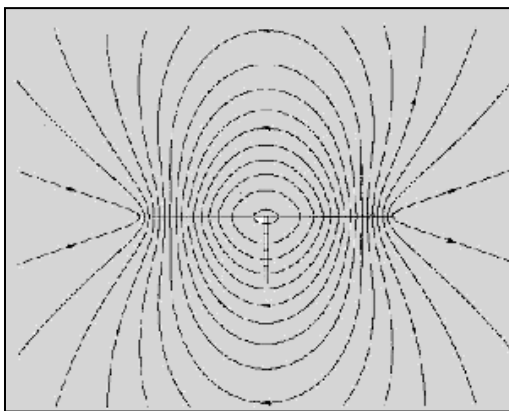


Figure 10 Champ magnétique d'une antenne

A gauche (Figure 10 Champ magnétique d'une antenne) vous pouvez observer les lignes de champs produites par une antenne demi-onde

Quand on alimente l'antenne en énergie haute fréquence, l'antenne consomme de la puissance comme si elle se présentait comme une résistance.

On appelle cette résistance : la résistance de rayonnement.

Ce rayonnement est constitué par le champ électromagnétique qui se propage dans l'espace par le biais de l'inductance et de la capacité de l'espace libre.

En supposant l'émission ponctuelle et l'antenne totalement omnidirectionnelle, on peut supposer que le rayonnement se propage de manière identique dans toutes les directions.

Pour donner une image cela ressemble à un beignet troué en son centre, le « donut » des américains (Figure 11 Diagramme en 3D Figure 11 Diagramme en 3D).

Comme la puissance émise est constante, que la surface occupée par le rayonnement ne fait que croître, la densité de puissance diminue au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la source d'émission.

C'est ce que l'on appelle l'atténuation en espace libre

Son affaiblissement en décibels (dB) est donné par la formule :

$$aff_{(dB)} = 20 * \log \left(\frac{4\pi D(m)}{\lambda(m)} \right)$$

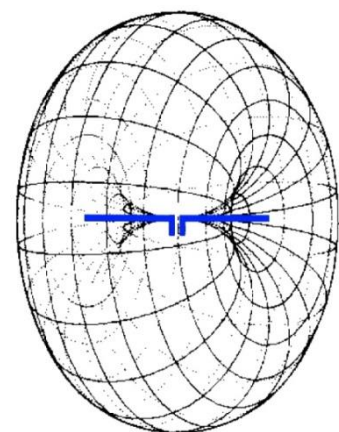


Figure 11 Diagramme en 3D [3]

11. Répartition tension courant dans une antenne demi-onde :

L'antenne étant alimentée par un émetteur fournissant de la puissance, il y a un courant et une tension dans une antenne. Ce courant et cette tension se répartissent comme le montre le schéma Figure 12.

L'antenne est alimentée au centre, si elle est résonante, l'impédance est purement résistive.

Quand nous approchons des extrémités, nous sommes en présence d'un circuit ouvert, si le circuit est ouvert, aucun courant ne peut plus circuler ce qui signifie que l'impédance est très élevée.

Réciproquement pour la tension, au centre, là où l'impédance est basse la tension est minimum puis au fur et à mesure que l'on s'approche des extrémités elle remonte jusqu'au moment où elle est si élevée que tout se passe comme si le circuit était ouvert. A cet endroit la tension est donc maximum.

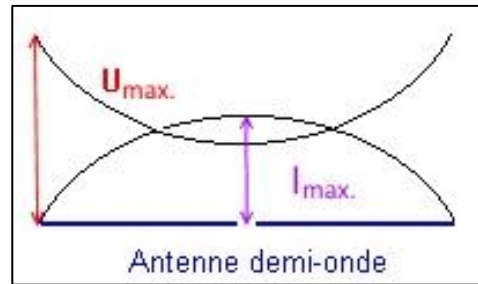


Figure 12

12. Influence de la longueur sur le diagramme de rayonnement.

Nous avons examiné en détail ce qui se passait au niveau de l'impédance de l'antenne quand sa longueur physique évoluait. Nous allons nous intéresser maintenant aux effets de la longueur sur le diagramme de rayonnement de l'antenne.

Voici à droite le diagramme de rayonnement d'une antenne demi-onde.

Le trait bleu représente l'orientation du dipôle en l'occurrence Nord-Sud.

On voit clairement que l'énergie est rayonnée préférentiellement en direction de l'ouest et de l'est et que les directions Nord (0°) et Sud (180°) sont extrêmement défavorisées.

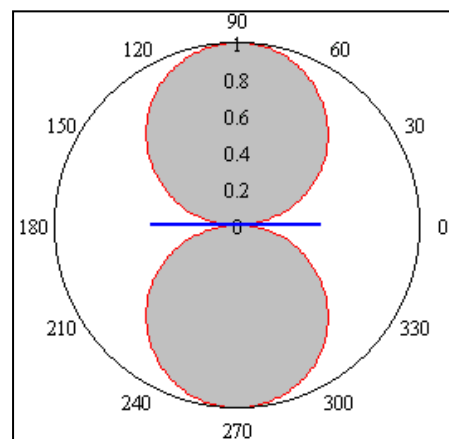


Figure 13 Rayonnement d'une antenne 1/2 onde

Ceci est la particularité de tout dipôle.

Formation Technique F4

Une antenne isotropique c.à.d. rayonnant uniformément dans toutes les directions est considérée comme ayant un gain unitaire soit 0 dBi (i = isotrope). (Figure 14 Isotrope et dipôle)

Le dipôle demi-onde a par rapport à cette antenne virtuelle un gain de 2,15 dB.

On préfère utiliser le dBd (dB par rapport au dipôle) qui est proche de la réalité physique.

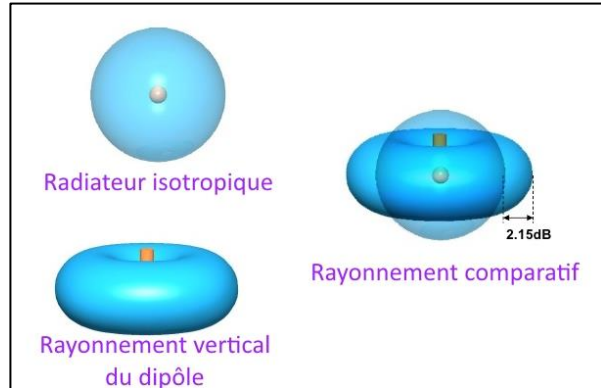


Figure 14 Isotrope et dipôle

Diagrammes de rayonnement d'un dipôle

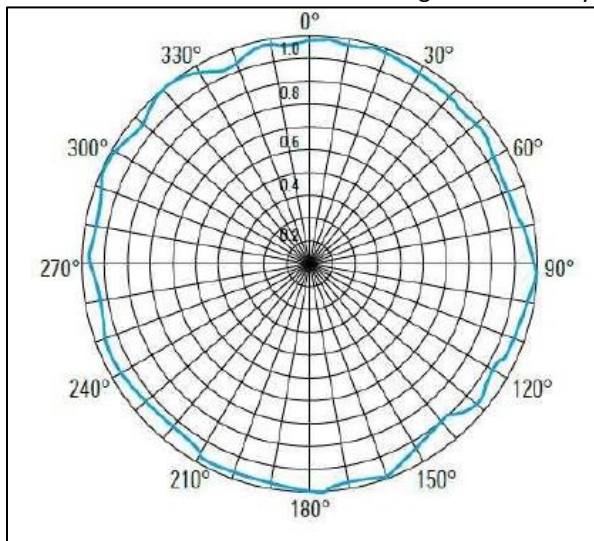


Figure 15 Diagramme horizontal

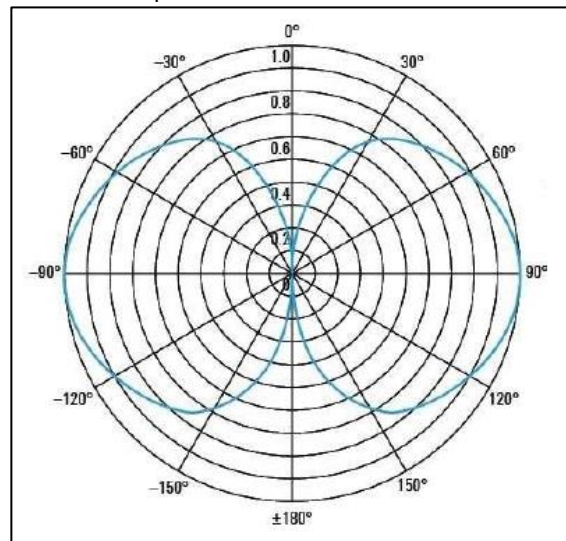


Figure 16 Diagramme vertical [5]

Le même dipôle dont la dimension précédente était de $0,5\lambda$ et que nous avons augmenté est maintenant de 10λ .

Vous remarquerez l'apparition d'une multitude de lobes secondaires ainsi que de "creux" très prononcés.

Ceci est dû au fait que la répartition du courant sur un dipôle aussi long n'est bien sûr plus la même que sur le dipôle $\lambda/2$, on pourra loger plusieurs cycles.

Donc faire croître exagérément la dimension d'une antenne modifie considérablement son diagramme de rayonnement.

De plus ces figures ne nous permettent pas d'appréhender la dimension verticale du rayonnement qui est au moins aussi importante.

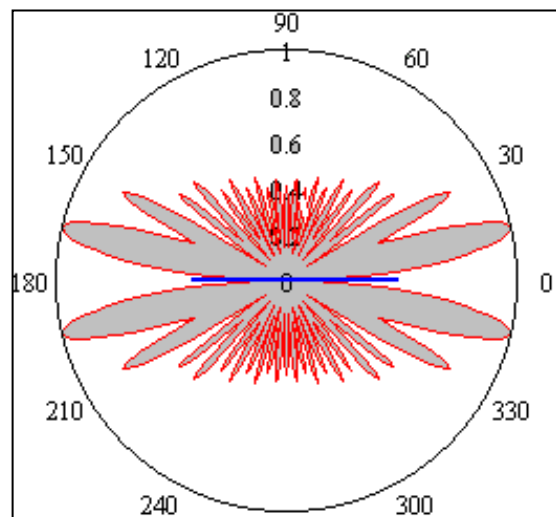


Figure 17 Dipôle 10λ .

13. Polarisation :

Un critère important est la polarisation de l'onde électromagnétique.

Il est souhaitable que les antennes des deux correspondants soient polarisées ou du moins polarisent les champs électrique et magnétique de même manière.

Quand on parle de polarisation, on parle de l'orientation du champ électrique de l'onde électromagnétique.

Les deux vecteurs représentatifs des champs sont orthogonaux (perpendiculaires entre eux).

(Figure 18 Champ E et H)

Le sens du déplacement est donné par la flèche rouge.

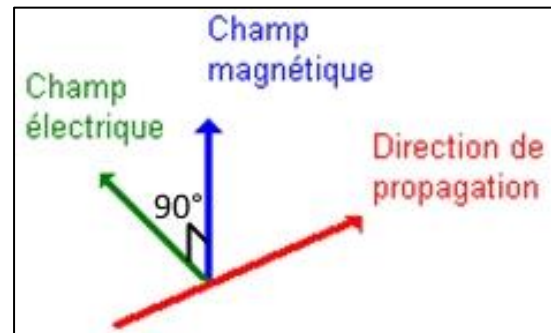


Figure 18 Champ E et H

On définira au moins trois polarisations :

- 1 - horizontale
- 2 - verticale
- 3 - circulaire

L'onde électromagnétique se déplace à la vitesse de la lumière ($\approx 3 \cdot 10^8$ m/s.)

14. Réversibilité ou réciprocité des caractéristiques de l'antenne :

Tout au long de ce chapitre, nous avons considéré l'antenne comme étant "active" c'est à dire alimentée par un courant haute fréquence et nous en avons déduit certaines caractéristiques.

L'antenne réciproquement fournit une tension HF quand elle baigne dans un champ électromagnétique.

Cette propriété est extrêmement importante puisque c'est grâce à elle que nous pouvons utiliser une antenne unique et commune à l'émission et à la réception (vrai pour une antenne d'émission).

Note :

Une antenne prévue uniquement en réception ne sera pas forcément apte à émettre... surtout avec des puissances élevées **ATTENTION !**

15. L'antenne directionnelle

La plus connue est l'antenne Yagi (on devrait dire Yagi-Uda) du nom de ses inventeurs, Hidetsugu Yagi et Shintaro Uda.

Voir à droite Figure 19 Principe de l'antenne Yagi-Uda [4] le principe de cette antenne objet du brevet déposé par ses inventeurs.

Un dipôle est « entouré » des deux éléments additionnels :

- un réflecteur à $\lambda/10$ et de longueur $0,55\lambda$
- un directeur à $\lambda/10$ et de longueur $0,45\lambda$

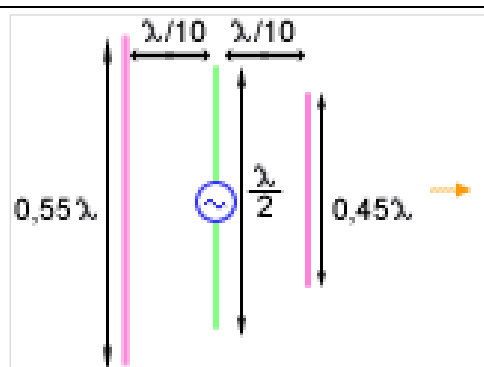


Figure 19 Principe de l'antenne Yagi-Uda [4]

Formation Technique F4

Ensuite on a amélioré ce concept en ajoutant des éléments directionnels supplémentaires, ceci pour améliorer la directivité et le gain.



Figure 20 Antenne Yagi UHF avec réflecteur multiple [5]

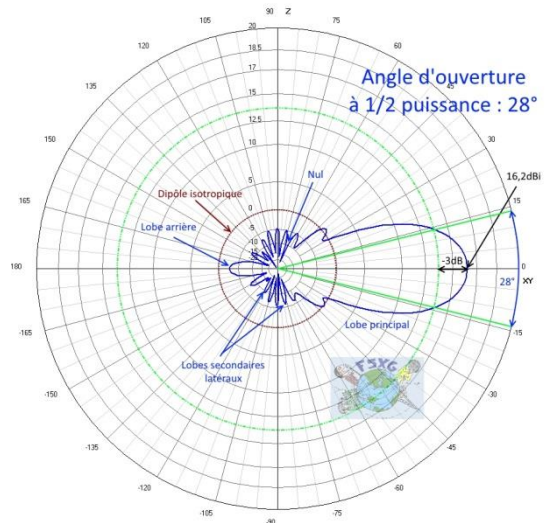


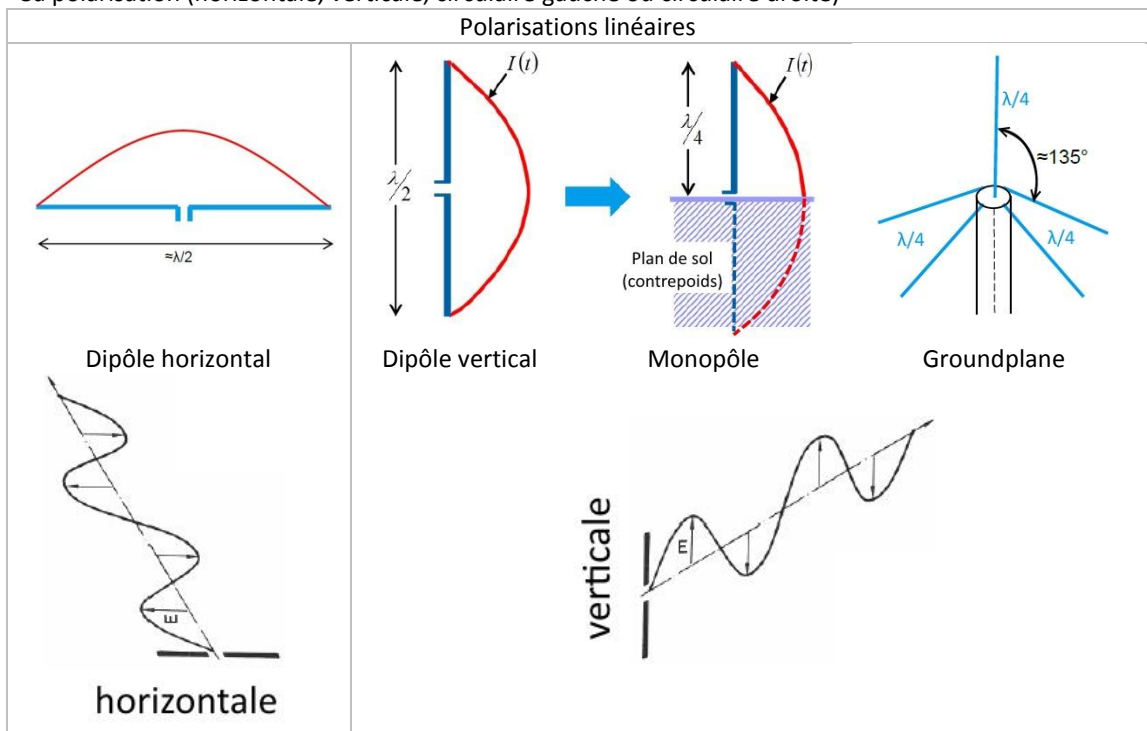
Figure 21 Diagramme de rayonnement [6]

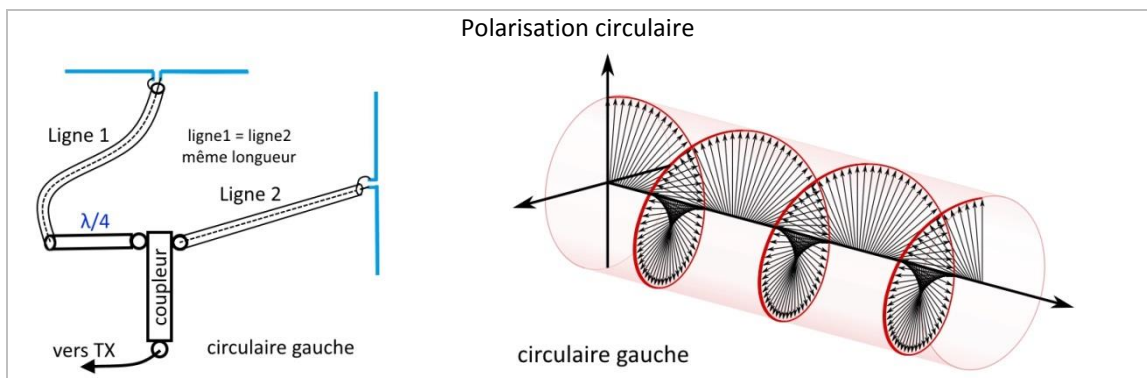
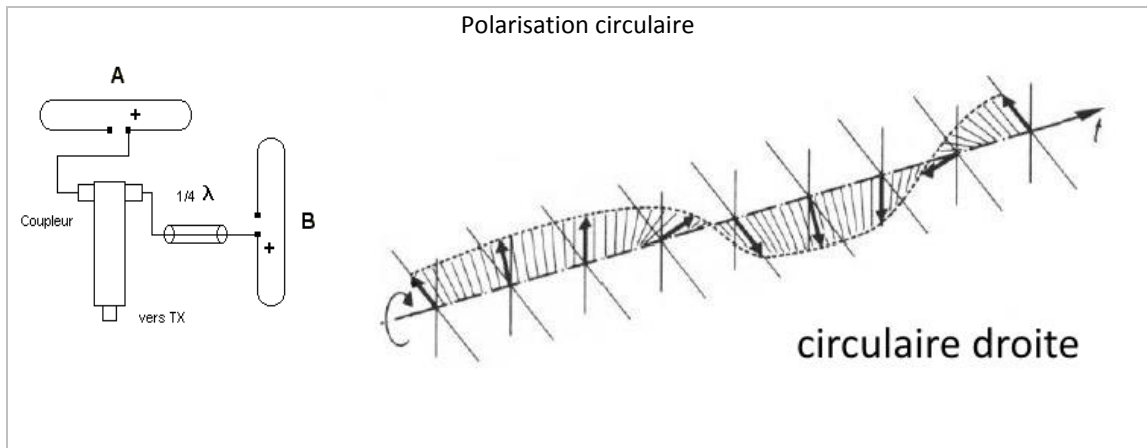
16. Les principaux paramètres d'une antenne :

- Ses caractéristiques mécaniques (longueur, diamètre des matériaux, hauteur/sol etc.)
- Son impédance à une fréquence considérée (50Ω en télécommunications et 75Ω en télévision domestique)

Voir Figure 21 Diagramme de rayonnement :

- Son diagramme de rayonnement (omnidirectionnel ou directionnel)
- Son gain en dBd ou dBi
- Son angle d'ouverture exprimé à -3dB
- Ses pertes (éventuelles = gain négatif... !)
- Sa polarisation (horizontale, verticale, circulaire gauche ou circulaire droite)





L'antenne hélice axiale doit son nom au fait qu'elle rayonne principalement dans son axe de bobinage.

Elle a été décrite pour la première fois en 1947 par John Daniel Kraus, un radioamateur américain.

On parle aussi d'antenne hélicoïdale. Les dimensions d'une hélice axiale lui donnent le comportement d'un guide d'onde produisant une polarisation circulaire. [Wikipédia].

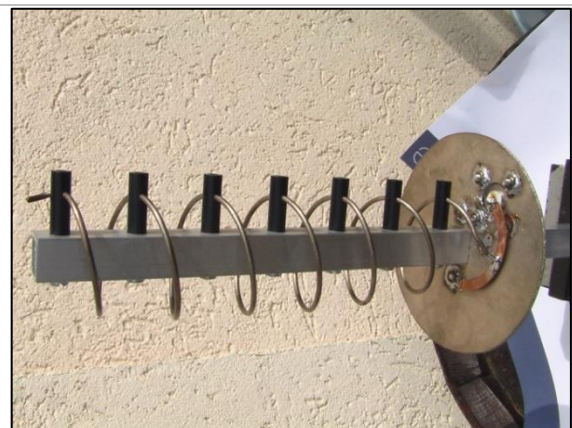


Figure 22 Hélice 2,35GHz CD

Le sens du bobinage de l'hélice détermine sa polarisation, à droite une antenne 2,35GHz réalisée par F5XG, circulaire droite.

(Comme le pas d'une vis, l'observateur étant situé à l'arrière de l'antenne)

Bibliographie

- [1] arrl antenna book 14th edition
- [2] <http://pagesperso-orange.fr/f6crp/elec/>
- [3] Antenna Basis White Paper Maik Reckeweg 11.2014-8GEP_WP01
- [4] Wikipedia
- [5] Web pages – images
- [6] F5XG