

# Comment ça marche ?

## Le RAYONNEMENT d'une ANTENNE

Par le radio-club F6KRK

*Pas besoin de connaître le mécanisme du rayonnement si l'on se contente de connecter une antenne classique (performances connues) à son émetteur. Par contre si l'on veut construire soi-même son antenne, il vaut mieux savoir "comment ça marche" pour éviter de faire n'importe quoi.*

### Champ électromagnétique.

Dans un précédent "comment ça marche" consacré à l'électromagnétisme, nous avons abordé les propriétés d'un champ électrostatique et celles d'un champ électromagnétique. Nous avons vu qu'il suffisait pour produire ce dernier de faire traverser un dipôle conducteur (un fil) par un courant variable dans le temps <sup>(1)</sup>. La figure 1 récapitule les propriétés vectorielles des champs produits par un doublet de dimensions très petites devant la longueur d'onde <sup>(2)</sup>.

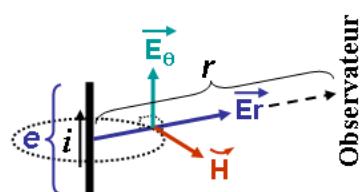


Figure 1

Le champ magnétique  $H$  qui existe autour du fil obéit au théorème d'Ampère. Nous noterons que son vecteur est perpendiculaire à la direction du fil, que son module est proportionnel au courant  $i$  traversant le fil et que sa direction dépend du sens du courant.

Un champ électrique  $E_0$  est créé par la variation dans le temps de l'induction  $B$  (et donc du champ  $H$ ) et obéit à la loi de Faraday. Le module de son vecteur est aussi proportionnel au courant de conduction et la direction de son vecteur est parallèle au vecteur courant, c'est-à-dire parallèle au fil. Ce champ électrique est la cause de l'apparition d'une différence de potentiel  $e$  aux bornes du fil, lui donnant ainsi une résistance apparente, la réactance. Cet effet est appelé "self induction" et est exprimé en henrys. Cette d.d.p. entraîne l'apparition autour du fil d'un champ électrique  $E_r$  obéissant aux lois de Coulomb et de Gauss. Son vecteur est dirigé vers l'observateur avec un module proportionnel à la différence de potentiel.

### Comportement des champs avec la distance.

Calculons les champs selon les formules classiques de l'électromagnétisme ci-dessus et voyons comment varient leurs grandeurs quand on s'éloigne du fil d'une distance  $r$  ? Noter que la direction des vecteurs ne change pas avec la propagation dans le vide et dans l'air.

- Le champ  $E_r$  diminue en  $1/r^3$
- Le champ  $H$  diminue en  $1/r^2$
- Le champ  $E_0$  diminue en  $1/r^2$

Nous voyons que les champs diminuent très vite dès que l'on s'éloigne du fil et rapidement il n'y a plus aucune énergie provenant du circuit. Noter que, tant que le système reste dans un

environnement statique (immuable), il a un comportement électrique purement réactif, ne consommant aucune énergie en régime établi (courant et tension en quadrature). Mais il y a en permanence échange d'énergie entre le fil et l'espace qui l'entoure.

### Du doublet élémentaire à l'antenne

Jusque là, notre doublet était théorique. En pratique, pour y faire circuler un courant nous utilisons une boucle. Si nous augmentons la taille de celle-ci jusqu'à ce que son périmètre ne devienne plus négligeable devant la longueur d'onde, nous constatons que son comportement électrique n'est plus totalement réactif et que le système consomme de l'énergie qui est perdue par rayonnement électromagnétique. Notre boucle est devenue une antenne. Les lois classiques de l'électromagnétisme que nous avons utilisées jusqu'ici ne prédisent pas ces pertes par rayonnement. Comment celui-ci se produit-il ?

### J. C. Maxwell et le courant de déplacement

Prenons un fil vertical placé au dessus d'un plan de sol horizontal parfaitement conducteur. Appliquons entre le fil et le plan de sol une f.é.m. et nous obtenons le système de la figure 2.

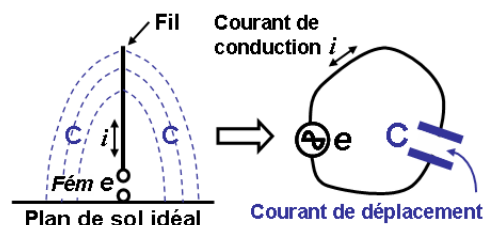


Figure 2

Nous constatons que le fil est parcouru par un courant de conduction alors qu'il est "ouvert". Tout se passe comme si le courant se refermait à travers la capacité existant entre le fil et le plan de sol, bien qu'il n'y ait aucune charge en mouvement. Maxwell a nommé ce courant qui semble passer dans les condensateurs "courant de déplacement". On calcule facilement que son expression mathématique est égale à  $\delta \mathbf{D} / \delta t$ ,  $\mathbf{D}$  étant l'induction électrique à l'intérieur du condensateur <sup>(3)</sup>. Maxwell a alors modifié la loi d'Ampère  $\{\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{j}\}$  ( $\mathbf{j}$  étant le courant de conduction) en y ajoutant le courant de déplacement, soit  $\{\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{j} + (\delta \mathbf{D} / \delta t)\}$ . Avec celle de Faraday  $\{\text{rot } \mathbf{E} = -\delta \mathbf{B} / \delta t\}$ , celle de Gauss  $\{\text{div } \mathbf{D} = \rho\}$  et l'inexistence de pôles magnétiques  $\{\text{div } \mathbf{B} = 0\}$ , nous obtenons les quatre "équations" de Maxwell <sup>(3)</sup>.

La résolution des équations de Maxwell est très complexe et montre que sous certaines conditions, une partie du champ électromagnétique généré par le système est rayonné <sup>(4)</sup>. Aussi pour expliquer et calculer le rayonnement des antennes, on se réfère à un autre mathématicien génial : Ludwig Lorenz.

### L. Lorenz et les potentiels retardés

Dans le précédent "comment ça marche" sur l'électromagnétisme nous avons vu que le champ  $\mathbf{E}$  était dû à la réaction du circuit sur lui-même (loi de Faraday) et qu'il était proportionnel à la variation du potentiel vecteur de l'induction magnétique, ajoutée au gradient du potentiel scalaire lié à la force contre électromotrice apparaissant aux bornes du circuit. Ces potentiels sont supposés apparaître instantanément en fonction du courant. Cette hypothèse a été gardée par Maxwell qui a été obligé d'ajouter le courant de déplacement pour avoir un système cohérent mathématiquement.

Une année avant Maxwell, Louis Lorenz, mathématicien Danois, avait imaginé un autre procédé mathématique qui consiste à considérer que le champ électromagnétique au point **P** à la distance  $r$  de l'élément de courant était le résultat de la propagation des potentiels au dit point **P** avec une vitesse finie (dans le vide, celle de la lumière). Voir la figure 3.

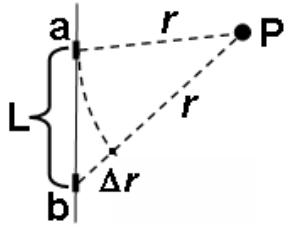


Figure 3.

On suppose le segment **L** parcouru par un courant de même amplitude <sup>(5)</sup>. La différence de trajet  $\Delta r$  entre les parties **a** et **b** est prise en compte dans les calculs en prenant pour **b** le courant de **a** ( $t$ ) à l'instant  $t - (\Delta r/v)$  ( $v$  = vitesse de propagation des potentiels). L'introduction du retard des potentiels, sans tenir compte du courant de déplacement, conduit également à l'obtention d'un rayonnement. Pour cela, il suffit que  $\Delta r$  soit significatif, c'est-à-dire que **L** ne soit pas négligeable devant la longueur d'onde. On démontre par ailleurs que la méthode de Lorenz est une solution aux équations de Maxwell <sup>(6)</sup>.

### Le Rayonnement de l'antenne.

Reprenons l'étude du champ électromagnétique de notre doublet en tenant compte de ce nouveau paramètre, en particulier la variation des champs en fonction de la distance  $r$  (revoir fig.1), et nous obtenons :

- Le champ **E<sub>r</sub>** diminue pour une grosse part en  $1/r^3$  et pour une faible part en  $1/r^2$
- Le champ **H** diminue pour une grosse part en  $1/r^2$  et pour une faible part en  $1/r$ .
- Le champ **E<sub>θ</sub>** diminue pour une grosse part en  $1/r^3$  et  $1/r^2$  et pour une faible part en  $1/r$ .

On notera que les parties qui diminuent en  $1/r$  sont proportionnelles au carré du rapport  $\{L / \lambda\}$  (**L** = longueur du doublet).

L'introduction du retard des potentiels va avoir des conséquences importantes sur le comportement du circuit, que l'on peut résumer comme suit :

- Si l'on se place loin de la source ( $r \gg \lambda$ ), seule une partie des champs **E<sub>θ</sub>** et **H** subsiste. Le champ électrostatique **E<sub>r</sub>** a complètement disparu.
- En conséquence, le rayonnement lointain n'est dû qu'à la circulation du courant, et est donc indépendant de la tension d'alimentation.
- les champs **E<sub>θ</sub>** et **H** sont en quadrature dans un plan perpendiculaire à la direction de propagation. Au loin, ils forment localement une onde plane dont on peut mesurer l'énergie transportée en calculant le flux du vecteur de Poynting à travers la surface de réception (surface de captation). Appliqué à une onde plane, le module du vecteur de Poynting se calcule comme **E<sub>θ</sub> × H**.
- Comme les champs **E<sub>θ</sub>** et **H** lointains diminuent en  $1/r$ , le flux du vecteur de Poynting à travers la même surface de captation diminue en  $1/r^2$  (diminution de 6 dB à chaque doublement de la distance).
- Lorsque l'on intègre le flux du vecteur de Poynting sur la totalité de la surface sphérique passant par le point de réception (rayon  $r$  = distance E-R), la puissance obtenue est constante, quelle que soit la distance. En effet, la surface d'une sphère augmente comme le carré de son rayon (**S**= $4\pi.r^2$ ).

- Cette énergie, qui se propage vers les confins de l'Univers, est perdue par l'émetteur. C'est la puissance rayonnée.
- La partie de la tension d'alimentation de l'antenne qui correspond à cette puissance est en phase avec le courant alors que l'autre partie, correspondant au champ réactif, est en quadrature. Noter que la résonance électrique de l'antenne permet de supprimer "électriquement" la partie réactive : les champs réactifs s'échangeant entre le fil et son environnement ont été soustraits de la puissance émise à la mise en route et seront restitués à l'arrêt (phénomène conduisant à la notion de "largeur de bande" de l'antenne).
- Le rapport entre la tension et le courant en phase constitue la résistance de rayonnement. Plus cette résistance est faible, plus il faudra fournir de courant pour rayonner la même puissance, et plus le système sera sensible aux pertes par effet Joule.
- La résistance de rayonnement augmente comme le carré de l'augmentation de la longueur de l'antenne doublet, ce qui veut dire aussi qu'elle diminue comme le carré de la diminution de la longueur de l'antenne (longueur exprimée en longueur d'onde). Pour un dipôle demi onde,  $R_r$  est égale à  $73\Omega$ . Pour un dipôle égal à  $\lambda/40$ ,  $R_r$  tombe à  $0,25\Omega$ .

On peut ajouter qu'avec une antenne courte, non seulement sa résistance de rayonnement est très faible, mais son impédance est fortement réactive, ce qui pose un problème d'adaptation aux lignes et aux émetteurs. En pratique, les pertes dans les systèmes d'adaptation sont beaucoup plus importantes que les pertes dans l'antenne elle-même et sont à l'origine des très mauvais rendements des antennes très courtes.

**La Rubrique "Comment ça marche" est une activité collective du radio-club F6KRK (<http://www.f6krk.org>). Pour une correspondance technique concernant cette rubrique : "f5nb@ref-union.org".**

#### **Bibliographie.**

*Ceux qui voudraient approfondir liront avec intérêt les écrits de Jean-Pierre F6FQX, sur son site : <http://f6fqx.chez-alice.fr/>*

#### **Notes.**

- 1) *Pour l'étude de l'électromagnétisme, nous prenons un courant sinusoïdal.*
- 2) *Revoir le précédent "comment ça marche" sur l'onde hertzienne.*
- 3) *Revoir le précédent "Comment ça marche" sur l'électromagnétisme, en particulier la figure annexée.*
- 4) *Nous évoluons dans un univers à quatre dimensions (X,Y,Z et temps) et il faut faire appel à des objets mathématiques particuliers : les tenseurs.*
- 5) *Dans une antenne, ce n'est pas toujours vrai et on est conduit à intégrer le rayonnement de n segments ayant un courant constant (même amplitude, et même phase).*
- 6) *Les équations de Maxwell ont un caractère plus universel, mais dans le cas des antennes filaires la méthode du retard des potentiels est parfaitement adaptée et confirmée par l'expérimentation. Noter que les deux méthodes utilisent des artifices mathématiques. Ceux-ci disparaissent quand on étudie l'électromagnétisme dans le cadre de la relativité (inconnue du temps de Lorenz et Maxwell).*