

# Comment ça marche ?

## L'ELECTROMAGNETISME

Par le radio-club F6KRK

*Vaste programme, aussi nous n'aurons ici qu'un résumé incomplet, minimum nécessaire pour comprendre la propagation des ondes hertziennes et le rayonnement des antennes, objets de prochains "comment ça marche".*

### Un peu d'histoire.

La découverte de l'électromagnétisme s'est faite progressivement d'une manière expérimentale, grâce à plusieurs savants parmi lesquels on peut citer : Coulomb et Gauss (force et champ électrostatique), Laplace et Ampère (force et champ magnétique), puis Faraday (induction électromagnétique). Ensuite les mathématiciens sont venus, Lorenz (Louis) puis Maxwell qui a fédéré les lois de ses prédécesseurs en les complétant. Les équations de Maxwell prédisaient, sous certaines conditions, la propagation d'une force électromagnétique, en contradiction avec la mécanique classique (Newtonienne). Cette prédiction ayant été démontrée par Hertz, conduisit à la formalisation par Einstein de la théorie de la relativité restreinte.

### Force électromagnétique.

La force électromagnétique est, avec la force de gravitation, l'interaction faible et l'interaction forte, l'une des quatre forces fondamentales de l'Univers.

D'une certaine manière, on peut dire qu'une charge électrique en mouvement (électron) qui change de vitesse (accélération ou décélération), le signale en exerçant une force électromagnétique sur son entourage. Mathématiquement on utilise la notion de champ électromagnétique pour décrire cette force, comme on utilise la notion de champ gravitationnel pour la force de gravitation.

### Champ électromagnétique (1).

Le champ électromagnétique produit par une source quantifie la perturbation par cette source des champs électriques et magnétiques ambiants.

Un champ électromagnétique a, à la fois, les propriétés d'un champ magnétique et celles d'un champ électrique. Ces deux champs ne sont pas des concepts distincts, mais des aspects différents du concept plus global qu'est le champ électromagnétique. Ils ne sont séparables que dans le cas statique (charge électrique immobile ou se déplaçant à vitesse constante). Mathématiquement, les champs sont des grandeurs vectorielles.

### Champ électrique électrostatique.

Prenons une charge électrique négative constituée d'un excès d'électrons dans un matériau. Si nous rapprochons une charge électrique positive constituée d'un manque d'électrons dans un autre matériau, il va se créer entre les matériaux une force d'attraction proportionnelle à la différence de potentiel entre les charges et inversement proportionnelle au carré de leur

distance (si les charges avaient été de même signe, elles se seraient repoussées). C'est la loi de Coulomb.

Considérons maintenant une seule charge électrique  $Q$  et un observateur au point  $M$  à une certaine distance de celle-ci. Le champ électrique  $E$  dû à  $Q$  au point  $M$ , est la force qui serait exercée par  $Q$  sur une charge unité placée en ce point. Son vecteur est porté par la droite qui relie l'observateur ( $M$ ) à la charge électrique. Ce champ électrique existe seul, que la charge soit immobile ou qu'elle soit en mouvement, accélérée ou non. Il est appelé "champ électrostatique". Les lignes de force attachées à ce champ divergent à partir de la charge électrique, ce qui se traduit par la formule de Gauss :  $\text{div}(\mathbf{D}) = \rho$ ,  $\mathbf{D}$  étant l'induction électrique, égale dans le vide à  $\epsilon_0 \cdot \mathbf{E}$ , et  $\rho$  la densité de charges <sup>(1)</sup>. Le champ électrostatique ne se propage pas, c'est-à-dire que la quantité totale du flux d'induction électrique  $\mathbf{D}$  qui traverse la surface d'une sphère centrée sur la source et passant par le point  $M$  diminue rapidement avec l'éloignement de  $M$  pour devenir insignifiante. La source ne subit aucune perte d'énergie. Si nous prenons deux charges électriques complémentaires, proches, ponctuelles, sans capacité entre elles, nous avons constitué un dipôle électrique élémentaire. Le champ électrique (électrostatique) est maximum dans la direction de l'axe du dipôle électrique et nul dans la direction perpendiculaire.

### Champ magnétique magnétostatique.

Alors qu'un champ électrostatique peut être produit par une charge électrique isolée, un champ magnétique ne peut être produit que par un dipôle. Si nous brisons en morceaux un aimant naturel, chaque morceau restera un dipôle magnétique avec un pôle Nord et un pôle Sud. Par ailleurs, les lignes de force magnétiques se referment par le dipôle et ne divergent pas, comme avec le champ électrostatique. Nous disons que l'induction magnétique est à flux conservatif, ce qui est traduit par la formule :  $\text{div}(\mathbf{B}) = 0$ ,  $\mathbf{B}$  étant l'induction magnétique, égale dans le vide à  $\mu_0 \cdot \mathbf{H}$ .

Prenons une boucle de fil parfaitement conductrice parcourue par un courant continu. Un champ magnétique proportionnel au courant s'établit autour du conducteur, avec des lignes de forces fermées et concentriques au fil. Si l'on ne peut pas identifier les pôles magnétiques, on observe que la direction du flux magnétique (orientation des vecteurs  $\mathbf{B}$  et  $\mathbf{H}$ ) est perpendiculaire au fil et liée au sens du courant <sup>(2)</sup>. Ceci est exprimé par la loi d'Ampère :  $\text{rot}(\mathbf{H}) = \mathbf{j}$ ,  $\mathbf{j}$  étant la densité de courant <sup>(3)</sup>.

Le champ magnétique simple ne se propage pas, c'est-à-dire que l'énergie du flux d'induction magnétique  $\mathbf{B}$  à la surface d'une sphère centrée sur la source et passant par le point  $M$  diminue rapidement avec l'éloignement de  $M$  pour devenir insignifiante. La source ne subit aucune perte d'énergie.

### Champ électromagnétique (2).

Reprenons notre boucle de courant et, pour simplifier l'analyse, intéressons nous à une toute petite partie de la boucle et admettons qu'elle soit rectiligne. Nous obtenons un doublet élémentaire que l'on peut considérer comme étant deux charges  $Q$  et  $Q'$  qui s'échangent un courant. S'il existe entre les charges une différence de potentiel, notre dipôle est aussi un dipôle électrique.

Arrangeons nous pour y faire passer un courant sinusoïdal. Les électrons vont maintenant subir des accélérations aux passages à zéro et des décélérations aux maxima du courant, avec comme conséquence la production d'un champ électromagnétique. Celui-ci a les propriétés d'un champ magnétique mais la variation dans le temps de l'induction magnétique entraîne l'apparition d'un champ électrique. Attention, ce n'est pas un champ électrostatique. En

particulier, il n'est pas divergent, mais à flux conservatif, comme pour le champ magnétique, selon la loi de Faraday :  $\text{rot}(\mathbf{E}) = -\delta\mathbf{B}/\delta t$ . Son vecteur est parallèle à l'élément de courant (le dipôle). Il est donc en quadrature avec le champ électrostatique et en quadrature également avec le champ magnétique. Ce champ électrique a pour conséquence l'apparition d'une d.d.p. aux bornes de notre doublet, même si celui-ci est parfaitement conducteur. Ce phénomène est appelé "self-induction" et est mesuré en Henrys. Le doublet présente alors une résistance apparente appelée "réactance inductive". La d.d.p. étant liée à l'accélération est la dérivée de la vitesse angulaire d'un courant sinusoïdal et a ainsi une variation cosinusoidale. Il y a donc échange d'énergie entre le doublet et la source, mais sans perte. Noter que la d.d.p. aux bornes du doublet entraîne l'apparition d'un champ à propriété électrostatique <sup>(4)</sup> qui, dans le cas où un condensateur est inséré dans la boucle, s'ajoute à celui résultant de la d.d.p. aux bornes du condensateur <sup>(5)</sup>.

Voir en résumé dans le tableau annexé les principales équations de l'électromagnétisme <sup>(6)</sup>.

### **Rayonnement électromagnétique.**

La spécificité du rayonnement d'une source est la perte d'énergie de la source, sans qu'un travail ne soit effectué. Prenons un exemple :

Provoquons une accélération ordonnée d'électrons dans un conducteur parfait (courant sinusoïdal dans un fil) et enroulons ce fil (solénoïde) pour obtenir un champ électromagnétique maximum. Il existera à proximité du solénoïde un champ (force) électromagnétique sans qu'aucune énergie ne soit consommée par la bobine. Celle-ci aura un comportement réactif d'échange d'énergie avec la source, mais avec un bilan nul. Maintenant, approchons de notre bobine une autre bobine connectée à une résistance. Quand nous serons très près, nous constaterons que de l'énergie est dissipée dans la résistance (effet Joule) et qu'elle correspondra à une perte d'énergie de la source. C'est le phénomène bien connu d'induction dans les transformateurs.

Revenons à notre bobine seule, connectée à la source, et étirons le solénoïde pour qu'il devienne hélicoïdal. Au fur et à mesure de l'allongement, nous constaterons une perte progressive d'énergie de la source, sans qu'aucun travail ne soit effectué (pas d'autre système dans l'environnement). Ces pertes sont des pertes par rayonnement électromagnétique. En pratique elles s'ajoutent aux pertes par effet Joule. Nous verrons dans un prochain "comment ça marche" les conditions à remplir pour obtenir un rayonnement significatif.

Dans notre exemple, le champ électromagnétique rayonné n'est qu'une petite partie du champ électromagnétique total produit par le système. Il y a des cas où seul le rayonnement électromagnétique est produit, par exemple avec le rayonnement thermique.

Tout corps à une température supérieure à 0 Kelvin (-273°C) émet un rayonnement électromagnétique appelé rayonnement thermique ou rayonnement du corps noir. Ainsi, la lumière du jour est rayonnée par la photosphère qui est une couche gazeuse du soleil où la température moyenne est de 5800K.

Le rayonnement électromagnétique est transporté par le photon, particule dépourvue de masse. Le photon est le boson associé à la force électromagnétique. En mécanique ondulatoire, il est décrit sous la forme d'une onde électromagnétique correspondant à la propagation d'un champ électromagnétique décomposable mathématiquement en un champ magnétique et un champ électrique. Leurs vecteurs sont en phase et perpendiculaires entre eux, caractéristiques d'une onde plane.

Nous verrons la propagation de l'onde électromagnétique (onde hertziennne) dans le prochain "comment ça marche".

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

### Annexe :

**Force électrostatique**      **Champ électrostatique (Loi de Coulomb)**

$$\underbrace{q \xrightarrow{\vec{F}} q'}_r \quad \vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{qq'}{r^2} \quad \underbrace{q \xrightarrow{\vec{E}} M}_r \text{ Charge unité (fictive)} \quad \begin{cases} q, q' = \text{charges électriques} \\ \epsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi} \text{ (permittivité du vide)} \end{cases}$$

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} = \frac{dV}{dr} = -\text{grad}(V) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \sum \frac{q}{r} \quad V = \text{potentiel électrique à la distance } r$$

$$\text{Loi de Gauss : } \text{div } \vec{D} = \rho \quad \begin{cases} \vec{D} = \text{induction électrique} = \epsilon_0 \vec{E} \\ \rho = \text{densité de charges} \end{cases}$$

**Champ électromagnétique d'un doublet**

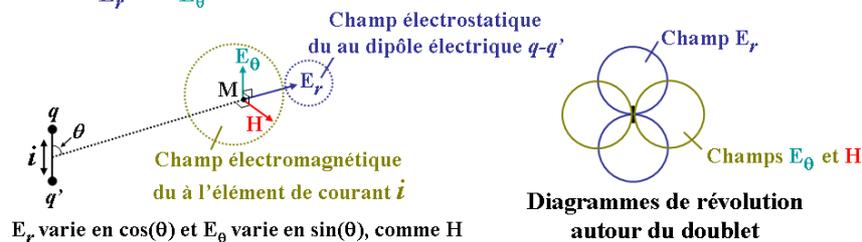
$$\text{Loi de Faraday : } \vec{e} = \frac{d\Phi}{dt} \Rightarrow \text{rot } \vec{E} = -\frac{\delta \vec{B}}{\delta t} \quad \begin{cases} \vec{B} = \text{induction magnétique} = \mu_0 \vec{H} \\ \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ (perméabilité du vide)} \end{cases}$$

$\text{div } \vec{B} = 0$  (inexistence de pôles magnétiques isolés)

$$\vec{B} = \text{rot } \vec{A} \quad \vec{A} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_c \frac{I \cdot d\ell}{r} \quad \begin{cases} \ell = \text{longueur de l'élément de courant} \\ I = \text{Intensité crête du courant} \end{cases}$$

$\vec{A}$  = Potentiel vecteur de l'induction magnétique à la distance  $r$

$$\vec{E} = -\text{grad } V - \frac{\delta \vec{A}}{\delta t} = \underbrace{\vec{E}_r}_{\text{champ à propriété électrostatique}} + \underbrace{\vec{E}_\theta}_{\text{champ électromagnétique}}$$



### Notes.

- 1) Cette formule veut dire que la variation (dans toutes les directions) de la force portée par le vecteur induction électrique est égale à la densité de charge. Ou encore, que ce sont les charges électriques et elles seules qui font diverger le champ  $\vec{D}$ .
- 2) Si nous approchons une boussole perpendiculairement à un fil parcouru par un courant continu, l'aiguille déviara d'un côté ou de l'autre selon le sens du courant.
- 3) Cette loi veut dire qu'au voisinage d'un fil parcouru par un courant, il y a un champ magnétique qui s'enroule autour du fil comme les vagues provoquées par la chute d'un caillou dans l'eau et que l'amplitude du champ (des vagues) est proportionnelle à l'intensité du courant.
- 4) Ce champ a les propriétés d'un champ électrostatique, mais c'est une sorte d'effet secondaire lié au système de production du champ électromagnétique par circulation d'un courant alternatif dans un doublet (il n'apparaît pas dans la génération du rayonnement thermique, par exemple).

- 5) *Dans le cas d'un fouet court perpendiculaire à un plan de sol idéal, nous retrouvons ces quatre champs : champ électrostatique dû à la tension entre le fouet et le plan de sol, champ électromagnétique dû au courant (champ magnétique + champ électrique), et champ électrostatique correspondant à la tension aux bornes du fouet.*
- 6) *Un lecteur averti aura remarqué que nous n'avons pas parlé du courant de déplacement de Maxwell. C'est volontaire, car nous n'en aurons pas besoin pour expliquer le rayonnement d'une antenne (ce qui ne nous empêchera pas d'en dire un mot à ce moment là).*