

Introduction à l'électromagnétisme

Deuxième partie - Le spectre électromagnétique

1. Fréquence et longueur d'onde

Comme on l'a vu au chapitre précédent, les champs électromagnétiques sont intimement liés à l'usage de l'électricité : tout appareil ou équipement produisant, transportant ou consommant de l'électricité, produit dans son voisinage des champs électriques et magnétiques dont les caractéristiques sont directement liées à la source de champ elle-même et à la manière dont elle utilise l'électricité.

Ainsi, un téléphone sans fil, une ligne électrique ou encore une lampe infrarouge utilisent tous les 3 de l'électricité et produisent donc – intentionnellement ou non - des champs électromagnétiques. Néanmoins ces champs diffèrent par une caractéristique inhérente à tous les phénomènes oscillants et ou vibratoires : la **fréquence** oscillatoire, c'est-à-dire le nombre d'oscillations par seconde. Celle-ci se mesure en Hertz (symbole Hz).

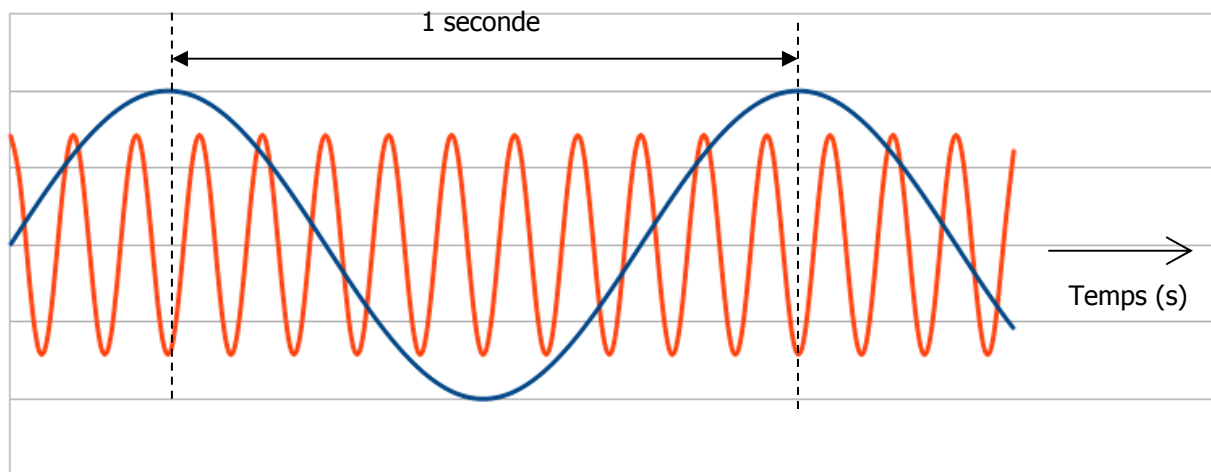


Figure 1 : représentation temporelle de deux oscillations.
La fréquence est de 1 Hz pour l'oscillation bleue et de 10 Hz (= 10 oscillations par seconde) pour l'oscillation rouge.

Une oscillation se propage dans le milieu ambiant à une certaine vitesse, qui dépend du phénomène vibratoire lui-même et du milieu. Par exemple les ondes sonores se propagent 4 fois plus vite dans l'eau (environ 1500 m/s) que dans l'air (environ 340 m/s). Au cours d'une seule oscillation, l'onde parcourt donc une certaine distance et cette distance est, comme la fréquence, un paramètre caractéristique de l'onde, que l'on appelle la **longueur d'onde** (symbole λ , mesurée en mètres).

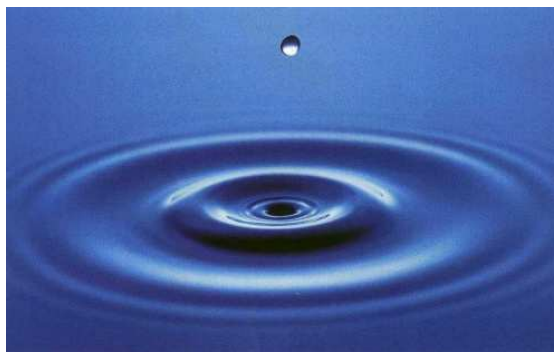


Figure 2 : propagation d'une onde de surface dans un bassin d'eau

Dans la Figure 1, on a représenté la variation de deux oscillations au cours du temps, mais on peut tout autant représenter cette variation en fonction de la distance parcourue lors de la propagation de l'oscillation dans le milieu ambiant, ce qui permet de visualiser la longueur d'onde sur une échelle de distance :

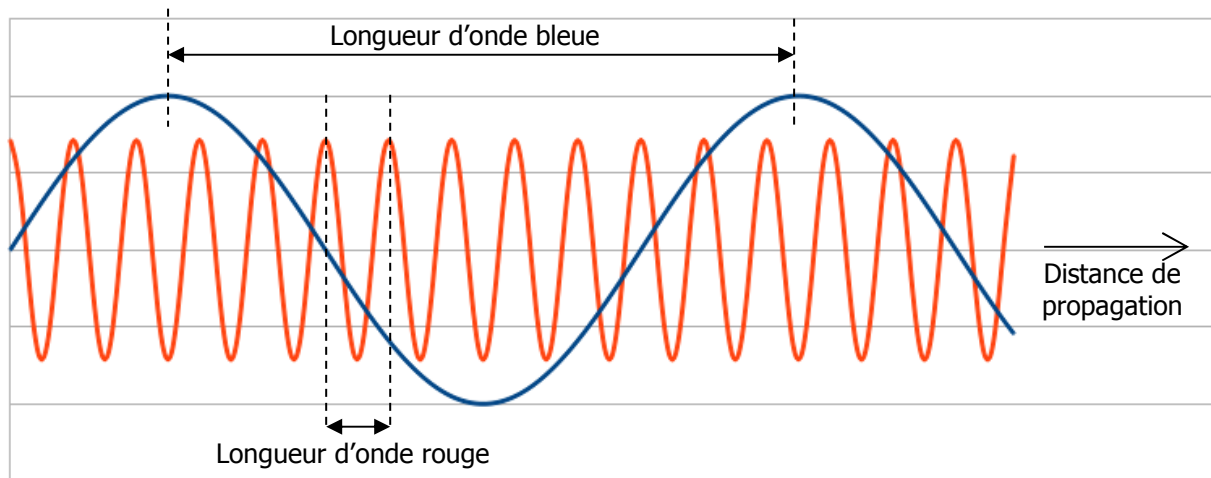


Figure 3 : représentation d'une onde se propageant dans l'espace

On voit qu'une oscillation lente (oscillation bleue de basse fréquence) a une grande longueur d'onde tandis qu'une oscillation rapide (oscillation rouge) a une petite longueur d'onde. De fait, fréquence (f) et longueur d'onde (λ) sont liées entre elles par la vitesse de propagation de l'oscillation dans le milieu selon la formule suivante, dans laquelle V est la vitesse en m/s :

$$\lambda = \frac{V}{f}$$

La longueur d'onde est donc également liée à la vitesse de propagation : par exemple une onde sonore de 50 Hz (son très grave) se propageant dans l'air à la vitesse du son (soit 340 m/s) a une longueur d'onde de $340/50 = 6,8$ m. Dans l'eau, la même onde sonore se propage à 1500 m/s et sa longueur d'onde est donc de $1500/50 = 30$ m.

Les champs électriques, magnétiques et électromagnétiques se propagent à la vitesse de la lumière (environ 300 000 km par seconde ¹) dans la plupart des milieux. Un champ de 50 Hz, fréquence de fonctionnement des réseaux électriques européens, a donc une longueur d'onde de $300000/50 = 6000$ km. Une onde radio de 100 MHz (bande FM) a une longueur d'onde de 3 m.

A noter que c'est par référence à la longueur d'onde que l'on identifie certaines gammes de fréquences radio (« ondes courtes », « ondes moyennes », « grandes ondes »), tandis que dans d'autres cas, c'est par la fréquence (ELF : *extremely low frequency* ; VHF : *very high frequency* ; UHF : *ultra high frequency* ; etc.).

2. Le spectre électromagnétique

La fréquence d'un champ électromagnétique peut varier de zéro (champ statique, ne variant pas au cours du temps) à des valeurs extrêmement élevées (il n'y a en fait pas de limite supérieure). La fréquence la plus répandue est évidemment le 50 Hz, fréquence de fonctionnement des réseaux électriques ², et d'un grand nombre d'appareils électriques directement alimentés sur le réseau. Cependant un grand nombre d'appareils électriques et d'installations industrielles transforment l'électricité consommée à 50 Hz, soit en courant continu, soit en fréquences plus élevées, telles que les nombreuses bandes de fréquences utilisées pour les applications de télécommunication.

¹ Valeur exacte de la vitesse de la lumière : 299 792 458 m/s = 299 792 km/s

² 50 Hz en Europe mais d'autres réseaux fonctionnent à 60 Hz (ex : Amérique du Nord)

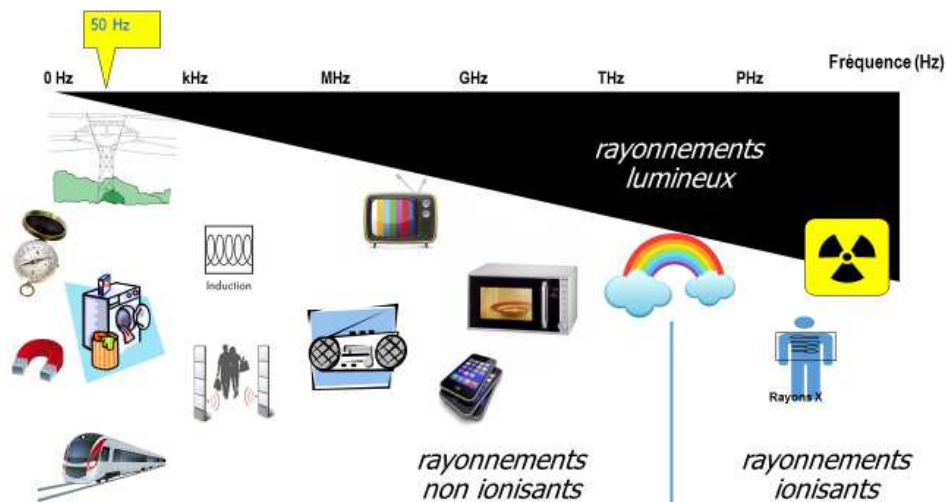


Figure 4 : le spectre électromagnétique

La partie haute du spectre électromagnétique (comprendre : les fréquences très élevées) est celle des rayonnements très énergétiques de type Rayons X ou gamma. Ces rayonnements sont dits **ionisants** car suffisamment énergétiques pour pouvoir arracher des électrons aux atomes et/ou casser des molécules (et créer ainsi des ions). C'est ce mécanisme d'altération moléculaire qui explique le caractère cancérogène de ces rayonnements.

La partie basse du spectre électromagnétique est celle des **rayonnements non ionisants** : cette dénomination indique qu'ils ne sont pas suffisamment énergétiques pour créer des ions. Ils peuvent néanmoins apporter de l'énergie : c'est le cas par exemple des micro-ondes utilisées pour la cuisson. Bien évidemment, plus on descend en fréquence et plus l'énergie est faible. Celle des champs 50 Hz est ainsi 10^{12} fois (mille milliards de fois) plus faible que l'énergie minimale pour arracher un électron à un atome.

La frontière entre ces deux domaines est constituée par la gamme des **rayonnements lumineux** dont les frontières illustrent bien ce qui vient d'être dit : en partie haute du spectre lumineux, on trouve en effet les rayonnements ultraviolets dont les effets biologiques délétères ne sont plus à démontrer, et en partie basse, les rayonnements infrarouges qui sont des rayonnements thermiques.

Exemples d'applications courantes de l'électricité, fonctionnant à des fréquences autres que 50 Hz :

- Courant continu (fréquence zéro) : on peut citer par exemple des jouets (trains électriques), et plus généralement tous les appareils fonctionnant sur piles ou batteries ou alimentés en courant continu (par exemple les ordinateurs portables). On peut également citer les transports électriques urbains (métro et RER d'Ile-de-France notamment) et certains réseaux électriques.
- Dans la gamme des fréquences intermédiaires (20 kHz à 50 kHz) on trouve la cuisson par induction et les portiques antivol.
- La gamme des fréquences utilisées en télécommunication est extrêmement vaste. On peut citer parmi les fréquences couramment utilisées par le public la bande radio des Grandes Ondes (ex : France Inter GO à 162 kHz - kiloHertz), la bande FM (ex : France Info à 105,5 MHz - MégaHertz), les bandes de télévision VHF et UHF (200 à 800 MHz), les bandes de téléphonie mobile (915 et 1800 MHz pour la téléphonie mobile de première génération), etc. L'usage des fréquences radio est extrêmement réglementé et se fait sous l'égide de l'ANFR, Agence Nationale des Fréquences Radio.
- Les fours micro-ondes domestiques fonctionnent à 2450 MHz. A noter que comme pour les plaques de cuisson par induction ou les ordinateurs portables, les fours micro-ondes sont alimentés par le réseau basse tension 230 V et consomment donc de l'énergie électrique à 50 Hz. De ce fait, tous ces appareils (ou du moins leur alimentation) vont également générer des champs à 50 Hz. L'énergie consommée est ensuite transformée en une fréquence différente selon l'appareil et le cas échéant, il y a aura émission de champ électromagnétique à une fréquence différente. Cette fréquence différente peut ne pas être détectable à l'extérieur de l'appareil, comme c'est le cas pour les fours à micro-ondes, dont l'émission à 2450 MHz est envoyée vers la cavité du four qui est étanche aux ondes et ne les laisse donc pas fuir vers l'extérieur.

Dans ce qui précède on a utilisé différents termes (**champs**, **ondes** ou encore **rayonnement**) pour évoquer les champs électromagnétiques, ce qui est source de confusion. Il n'y a qu'un seul domaine scientifique, qui répond au même ensemble de lois physiques (les équations de Maxwell) et de fait si « champ électromagnétique » est le terme générique, c'est l'usage qui fait qu'on utilise tel ou tel terme dans tel ou tel cas.

Ainsi, le terme « *rayonnement* » s'applique essentiellement aux très hautes fréquences, celles de la lumière et au-delà, c'est-à-dire le domaine des rayonnements ionisants. Réciproquement la classification « rayonnements non ionisants », très large puisqu'elle va de 0 à 300 GHz (GigaHertz), n'est guère utilisée que par les spécialistes du domaine.

Le terme « *ondes électromagnétiques* » est utilisé dès lors que la notion de propagation est pertinente. En pratique, c'est le développement de la radio et des problèmes de propagation/réflexion des ondes radio dans l'atmosphère qui ont conduit à généraliser l'usage du terme « onde » dans le monde des télécommunications.

Dans le domaine des extrêmement basses fréquences (0 à 300 Hz), c'est le terme « *champs* » qui est utilisé. Néanmoins on a vu lors de la première séquence du MOOC que même l'usage du terme « *champs électromagnétiques* » était un peu abusif au sens où les champs électriques et magnétiques étaient largement indépendants l'un de l'autre. Qu'en est-il exactement ?

3. Champ électrique, champ magnétique, champ électromagnétique

En fait, les principes physiques de l'électromagnétisme (les équations de Maxwell) montrent que les champs électriques et magnétiques échangent de l'énergie au cours du temps, autrement dit en se propageant dans l'espace. A partir d'une certaine distance à la source de champ, l'équilibre entre champ électrique et magnétique est atteint. On dit que le champ électromagnétique est « formé ». Par exemple un émetteur radio émettra le plus souvent un champ purement électrique, et qui deviendra progressivement (électro)magnétique en s'éloignant de l'émetteur :

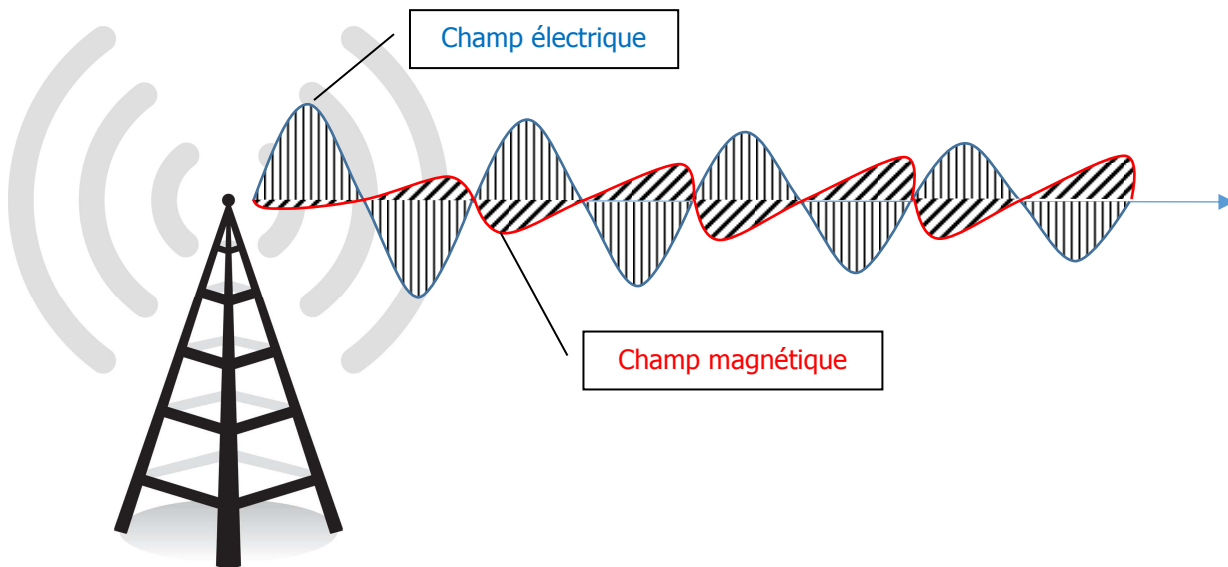


Figure 5 : onde électromagnétique se propageant à partir d'un émetteur. A l'émission, le champ est purement électrique, puis les composantes électrique et magnétique s'équilibrent (la composante magnétique augmente) au fur et à mesure que l'onde se propage

L'équilibre entre champ électrique et champ magnétique est atteint rapidement : on considère que le champ électromagnétique est « formé » à une distance de l'émetteur de l'ordre de la longueur d'onde. Quand le champ est formé, les composantes électriques (E) et magnétiques (H) du champ sont liés par une relation très simple :

$$E = Z_c \cdot H$$

dans laquelle Z_c vaut $377 \, \Omega$ (valeur de l'impédance du vide)

En pratique, il faut également tenir compte du fait que les champs s'atténuent en s'éloignant de la source de champ. Or à 50 Hz, la longueur d'onde vaut environ 6000 km. De manière évidente, à cette distance, le champ

(électrique ou magnétique) n'est absolument plus perceptible : comme on le verra dans la suite, les champs émis par les plus grosses lignes à haute tension ne sont plus guère mesurables au-delà de 100 m (et plus du tout au-delà de 200 m même avec les appareils les plus sensibles).

En d'autres termes, en basse fréquence l'échange d'énergie entre composante électrique et magnétique n'a pas le temps de se faire avant que les champs ne soient complètement atténués. Tout se passe donc comme si ils n'échangeaient pas d'énergie du tout et donc comme s'ils étaient indépendants.

Le coin des matheux :

Une autre manière de présenter les choses est de partir des équations de Maxwell, et de considérer que pour les basses fréquences, les fonctions dérivées par rapport au temps ($\partial./\partial t$) peuvent être négligées et donc prises égales à 0. Le système de 4 équations se ramène alors à 2 systèmes de 2 équations mettant en œuvre d'un côté le champ électrique (E) et les charges électriques (ρ) et de l'autre le champ magnétique (H et B) et les courants (J) : il n'y a donc plus de relation directe entre les champs électriques et magnétiques, ils sont indépendants.

$\begin{aligned} \text{rot } \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} & \text{rot } \vec{H} &= \epsilon \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \vec{J} \\ \epsilon \cdot \text{div } \vec{E} &= \rho & \text{div } \vec{B} &= 0 \end{aligned}$	$\frac{\partial B}{\partial t} = 0$ et $\frac{\partial E}{\partial t} = 0$		<table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td style="padding: 5px;">$\text{rot } \vec{E} = 0$</td> <td style="padding: 5px;">$\text{rot } \vec{H} = \vec{J}$</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">$\epsilon \text{div } \vec{E} = \rho$</td> <td style="padding: 5px;">$\text{div } \vec{B} = 0$</td> </tr> </table>	$\text{rot } \vec{E} = 0$	$\text{rot } \vec{H} = \vec{J}$	$\epsilon \text{div } \vec{E} = \rho$	$\text{div } \vec{B} = 0$
$\text{rot } \vec{E} = 0$	$\text{rot } \vec{H} = \vec{J}$						
$\epsilon \text{div } \vec{E} = \rho$	$\text{div } \vec{B} = 0$						

La situation est tout autre pour les hautes fréquences : pour une onde radio à 100 MHz (bande FM), la longueur d'onde est seulement de 3 mètres, et le champ électromagnétique est donc « formé » dès qu'on est à plus de 3 m de l'antenne émettrice. En pratique, on peut donc capter indifféremment la composante électrique ou magnétique de l'onde radio, ce qui se fait en fonction de l'antenne que l'on utilise. Pour la bande FM notamment, tout le monde connaît les antennes de type « fouet » (les simples tiges métalliques des voitures, ou les tiges télescopiques des postes de radio) qui captent le champ électrique tandis que les antennes de type « cadre » captent le champ magnétique.



Figure 6 : antenne fouet de voiture et antenne cadre de chaine hifi