

Comment ça marche ?

Les lignes HF

2 - Lignes et champs

Par le radio-club F6KRR

Nous avons vu dans le précédent "comment ça marche" les différences de potentiels, les courants et les champs associés. Nous avons vu ensuite la génération et la capture d'un champ électromagnétique par un conducteur cylindrique. Nous allons voir maintenant ce qui se passe dans une ligne (deux conducteurs cylindriques en parallèle).

Propagation de l'énergie dans une ligne.

Pour comprendre la propagation dans une ligne, on peut faire appel au métro de Paris, six heures le soir, station "Châtelet les Halles". Imaginons un hall de correspondance duquel part un couloir vers un quai de ligne. Ce couloir uniforme est plein de gens qui se pressent à touche-touche.

Le couloir, c'est la ligne. Le hall, c'est la source et le quai c'est la charge.

Dans le hall, la motivation des gens à prendre ce couloir, c'est la f.é.m.

Dans le couloir, le débit par seconde des gens qui traversent un endroit donné, c'est l'intensité (du courant de gens).

La motivation des gens (la f.é.m.) les entraîne à pousser ceux qui sont devant eux. Ainsi, plus la motivation est grande et plus grand est le débit (plus le courant de gens va vite). On peut définir l'énergie mise en jeu comme une multiplication de la motivation (pression) par le débit (courant).

Examinons un premier cas où le système est invariable dans le temps. Alors la vitesse de déplacement du courant est constante et relativement faible, environ un mètre par seconde pour une personne. Ainsi celle-ci va mettre 30 secondes pour parcourir un couloir de 30 mètres.

Maintenant imaginons une augmentation brusque de la motivation des gens dans le hall. Alors ils vont accentuer très rapidement leur pression sur leur voisin de devant et ainsi de suite.

Supposons que leur temps de réaction soit de 0,1 seconde et qu'il y ait 3 personnes au mètre.

Alors, la modification de la motivation mettra $30 \times 3 \times 0,1 = 9$ secondes pour arriver sur le quai.

En conclusion, si le débit de l'énergie se fait à une certaine vitesse, la propagation d'une variation de ce débit se fait à une autre vitesse qui n'a aucune corrélation avec la première.

Mathématiquement on peut exprimer cela sous la forme d'une propagation d'un champ de pression (celle qu'exerce les gens l'un sur l'autre). Et l'on voit que la propagation de l'énergie se fait par l'intermédiaire de ce champ (l'augmentation d'énergie est demandée à des gens qui sont partis bien plus tôt).

Applications à une ligne électrique avec f.é.m. et courant sinusoïdaux.

Nous avons vu qu'avec un courant sinusoïdal, le déplacement des électrons est alternatif et qu'ils font quasiment du sur-place. Le débit prend alors une autre signification, ce ne sont plus

des électrons qui transitent, mais des électrons qui s'agitent. Nous avons vu également que l'agitation des électrons produit un champ électromagnétique qui a la propriété de se propager à la vitesse de la lumière. Et inversement, des électrons qui "baignent" dans un champ électromagnétique s'agitent. La propagation de l'énergie se fait donc par l'intermédiaire de ce champ électromagnétique comme elle se faisait dans le couloir par un champ de pression. On peut risquer une analogie avec la propagation d'une chute de dominos : Une f.é.m. crée des courants (dans un segment de la ligne) qui créent un champ E-M, qui crée des courants (dans le segment suivant de la ligne), qui créent un champ E-M, etc. jusqu'à la charge.

Lignes et champ électromagnétique.

En prélude, un mot sur la notion d'onde, très employée avec les lignes HF.

Dans le domaine de la radio, une onde est un **objet mathématique** décrivant un comportement ondulatoire (en fonction du temps et de l'espace), d'une grandeur électrique sinusoïdale. Ainsi une onde électromagnétique décrit le comportement d'un champ électromagnétique propagé ⁽¹⁾. Dans une ligne on aura aussi une onde de tension (d.d.p.) et une onde d'intensité (courant). Et pour compliquer les choses, on aura des ondes purement mathématiques : ondes complexes, ondes planes, ondes progressives, ondes stationnaires... L'étude des ondes et des champs électromagnétiques et leurs relations avec la tension et l'intensité se fait à partir des équations de Maxwell. La résolution de ces équations est très ardue en général (univers à quatre dimensions), mais elle se simplifie dans le cas des ondes planes. Ces ondes se rencontrent dans la propagation électromagnétique en espace libre et dans les lignes (ondes progressives).

N-B : Pour l'étude des rapports entre lignes et champs, nous supposerons une ligne sans pertes et parcourue par une onde progressive ⁽²⁾. Nous verrons le cas des pertes et des ondes stationnaires plus tard.

Une ligne est composée de deux conducteurs parallèles, côte à côte, ou l'un dans l'autre. Ces deux conducteurs relient les deux pôles de la source aux deux pôles de la charge. Les champs attachés à la ligne résultent de la combinaison des champs de chaque conducteur. Ceux-ci sont à des potentiels opposés depuis la source, entraînant des courants opposés également. A partir des relations que nous avons vues entre le champ électromagnétique et un conducteur, nous avons sur la figure 1 les champs E-M à différents endroits à l'intérieur, et autour de la ligne.

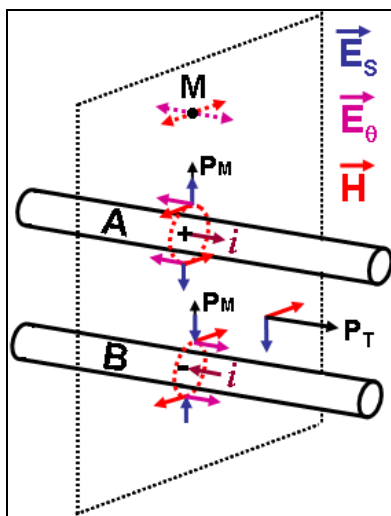


Figure 1 : Les champs dans une ligne bifilaire

Les deux P_M sont les vecteurs de Poynting dirigés vers le point M. Nous voyons qu'en ce point, les champs E_θ et H générés par les deux fils sont en opposition de phase, tant que

l'écartement reste très faible par rapport à la longueur d'onde. Pour une rotation de 90° du point M dans le plan, la symétrie devient parfaite et les champs se compensent parfaitement. On considère qu'une ligne parallèle 600Ω ne rayonne pas dans la bande HF et jusqu'à la bande VHF pour une ligne de 300Ω ⁽³⁾.

A l'intérieur de la ligne (au centre), les champs E_θ sont en opposition de phase et s'annulent. Par contre les champs H sont en phase et s'additionnent, de même que les champs E_S . En un point donné de la ligne, le champ E_S est lié à la d.d.p. entre les fils et le champ H résultant est lié au courant dans les fils ⁽⁴⁾. Comme tension et courant sont en phase, les champs aussi. Donc dans la ligne nous avons affaire à une onde plane et le vecteur de Poynting P_T est dirigé dans le sens de la propagation de l'énergie (vers la charge).

On peut se demander ce qu'est devenu le champ E_S conjoint au champ E_θ dans le champ E-M. Ce champ devrait avoir son vecteur colinéaire avec le vecteur E_S associé à la d.d.p. De fait, comme les composantes E_θ , ces composantes E_S sont en opposition de phase à l'intérieur de la ligne et s'annulent également. Par ailleurs, d'un point de vue temporel, les composantes E_θ et E_S sont en quadrature de phase avec le courant. Elles sont issues de la réaction du circuit sur lui-même, réaction appelée "self-induction" ⁽⁵⁾. Le champ lié à ces vecteurs est dit "réactif" et ne se propage pas. Mais au point M, les vecteurs E_θ correspondent à des composantes en phase des champs E_θ qui apparaissent avec l'allongement d'un fil (induction mutuelle du segment d'un fil sur un autre segment) ⁽⁶⁾. Ces composantes n'existent pas en un point à l'intérieur de la ligne. Mais si les vecteurs champs dans la ligne sont tous en phase, et donc qu'il n'y a pas d'énergie réactive, c'est parce que nous avons affaire à la propagation d'une onde progressive. Nous verrons que lorsque la ligne est le siège d'ondes stationnaires, des composantes déphasées apparaissent, conséquences de la présence d'une énergie réactive à l'intérieur de la ligne.

Même si nous avons simplifié le problème des champs dans une ligne, il reste complexe et obligera sans doute le lecteur à faire des allers-retours entre les "Comment ça marche" sur l'électromagnétisme, le rayonnement d'une antenne et le précédent sur les lignes ^[1].

Maintenant que nous avons une idée des relations qui existent entre champs, courants et tension dans une ligne ⁽⁷⁾, celles-ci vont nous permettre d'étudier les lignes à partir du comportement du courant et de la tension (et donc de l'impédance), en introduisant les notions de constantes linéiques et d'impédance caractéristique que nous verrons 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@orange.fr".

Bibliographie.

[1] Précédents Radio-REF ou sur "www.blog.f6krk.org", catégorie "Bulletins et Gazettes", "Comment ça marche ?".

Notes :

- 1) *Nous avons ici un comportement ondulatoire du rayonnement électromagnétique (physique classique). On peut aussi envisager un comportement corpusculaire avec les photons (physique quantique). Si le comportement ondulatoire est bien adapté pour l'étude des lignes et des antennes, le comportement corpusculaire est plus approprié pour l'étude photoélectrique (LEDs, cellules photovoltaïques, photomultiplicateurs).*
- 2) *C'est déjà bien assez compliqué comme cela.*

- 3) *On conçoit qu'une ligne coaxiale ne rayonne pas, quelle que soit la fréquence.*
- 4) *Chaque champ transporte la moitié de l'énergie qui transite dans la ligne.*
- 5) *La compensation de la self induction est due à l'induction mutuelle entre les deux fils.*
- 6) *Conséquence du retard des potentiels, retard dû à la vitesse finie de la propagation d'un champ E-M. Revoir le "Comment ça marche" sur le rayonnement d'une antenne.*
- 7) *Relations exactes calculées par les mathématiciens à partir des équations de Maxwell.*