

Chapitre 3

Théorie de la propagation des ondes électromagnétiques

1. Principe de la transmission hertzienne

La transmission d'énergie par voie électromagnétique (transmission "hertzienne") est basée sur un principe d'induction, c'est à dire d'action à distance.

- a) Une description simpliste de cette transmission peut être faite grâce à une expérience très simple (assez semblable à l'expérience d'Hertz qui a mis en évidence ce type de transmission) décrite par le schéma ci-dessous :

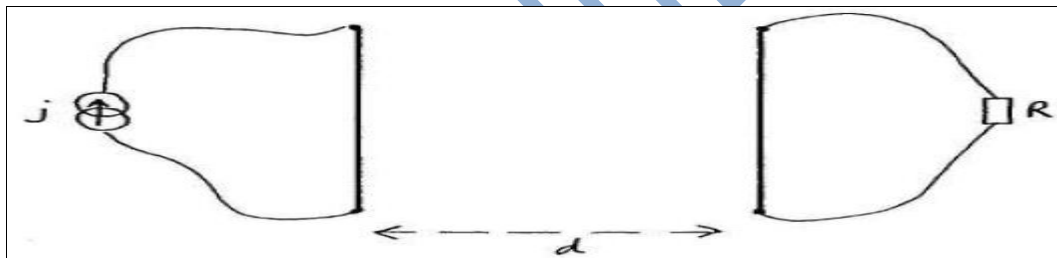


Figure 1 : Transmission hertzienne

A gauche, une source de courant J débite un courant dans un conducteur rectiligne. A droite, un conducteur rectiligne placé parallèlement au premier et situé à une distance d du premier est branché sur une résistance R .

Quelle que soit la distance d , et à condition que le courant ("inducteur") J soit variable dans le temps (sinusoïdal par exemple), un courant I proportionnel à J , de même nature, circulera dans l'autre conducteur ("induit"). Ce courant débitant dans une résistance R y dissipera une certaine puissance: il y a eu transfert d'énergie.

Ce principe dit de « transmission hertzienne » ne diffère en rien de celui du transformateur électrique à ceci près que le transfert d'énergie est quasi total dans le cas du transformateur, alors qu'au contraire, il est presque nul dans le cas de la transmission hertzienne (comme nous le verrons par la suite).

La transmission hertzienne peut alors être considérée comme étant un processus de type «transformateur électrique» pour lequel les circuits primaire et secondaire seraient très éloignés (donc très peu couplés).

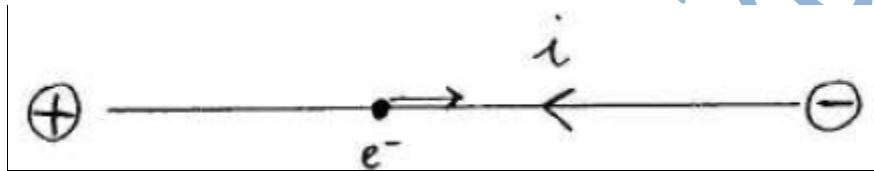
Néanmoins, même si elle est faible, l'énergie qui donne naissance au courant I est bien entendue prélevée sur l'énergie disponible de la source J et on trouve expérimentalement comme théoriquement qu'elle est **inversement proportionnelle au carré de la distance** si le dispositif est placé en "**espace libre**" (à savoir très loin de tout conducteur ou corps quelconque en général).

b) Une description plus précise fait intervenir la notion de "**champ**" et "**d'induction**" : le "champ" ("champ de forces") étant produit par l'inducteur, l' "induction" produisant l'effet sur l'induit.

Il est habituel de distinguer les deux formes d'action de l'électricité :

- forme "électrique" = déplacement de charges négatives (électrons)
- forme "magnétique" = passage d'un courant.

Ces deux formes sont bien entendu le fait de la même cause, un déplacement de charges étant la définition du courant électrique :



A ces deux formes sont associées des vecteurs (intensité, direction et sens des actions) et des lignes de champ (lieu des points d'application à amplitude constante de ces vecteurs) :

- **Forme électrique**

champ électrique \vec{E} avec $|\vec{E}|$ exprimé en Volt/mètre (V/m)

induction électrique \vec{D} avec $|\vec{D}|$ exprimé en Coulomb/mètre (C/m)

- **Forme magnétique**

champ magnétique \vec{H} avec $|\vec{H}|$ exprimé en Ampère/mètre (A/m)

induction magnétique \vec{B} avec $|\vec{B}|$ exprimé en Tesla (T)

Si l'espace situé entre l'inducteur et l'induit est le vide (ou l'air sec non ionisé) on a :

$$|\vec{D}| = \epsilon_0 |\vec{E}| \quad \left(\epsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi} \text{ F/m} \right)$$

$$|\vec{B}| = \mu_0 |\vec{H}| \quad \left(\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ H/m} \right)$$

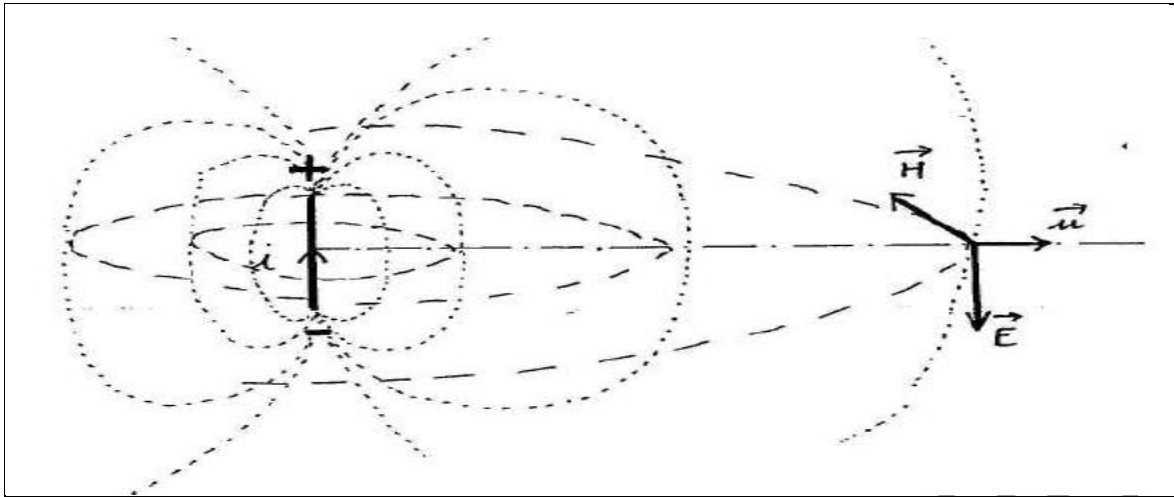


Figure 2 : Lignes de champs électrique et magnétique

Dans la figure précédente, les lignes de champs électrique (pointillés) et magnétique (tirets) sont dans les deux plans perpendiculaires. Les vecteurs $|\vec{E}|$, $|\vec{H}|$ et \vec{u} , ce dernier indiquant une direction de propagation arbitraire, sont perpendiculaires.

L'ensemble $(\vec{E} \rightarrow \vec{H} \rightarrow, \vec{u})$ qui se propage depuis le conducteur se nomme : **ONDE**

ELECTROMAGNETIQUE

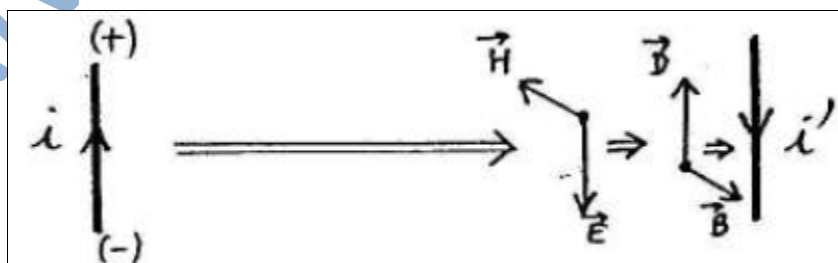
Cette onde se propage à la vitesse c ("vitesse de la lumière") égale à 3.10^8 m/s.

Par ailleurs, on a toujours :

$$\left| \frac{\vec{E}}{\vec{H}} \right| = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120 \pi = 337 \Omega \quad (\text{dite "impédance du vide" !})$$

Les conducteurs "inducteurs" et "induits" se nomment respectivement "antenne d'émission" et "antenne de réception".

Lorsque le champ électromagnétique rencontre l'antenne de réception (ou d'ailleurs, tout conducteur), il y a induction électrique provoquée par le champ électrique ce qui provoque un déplacement de charges dans ce conducteur (force : $\vec{f} = q \vec{E}$) ; il y a aussi, en même temps, induction magnétique provoquée par le champ magnétique ce qui provoque la création d'un courant (loi de Lenz). Il faut remarquer que \vec{E} et \vec{D} d'une part, \vec{H} et \vec{B} d'autre part sont opposés localement (loi d'action et de réaction: l'effet s'oppose à la cause).



Ainsi, si la vitesse de propagation était infinie, i' serait en opposition de phase avec i .

Il faut noter, enfin que ces valeurs des vecteurs \vec{E} et \vec{H} d'une part et \vec{B} et \vec{D} d'autre part sont régies par les célèbres équations de Maxwell.

2. Une manière simple de comprendre l'origine du rayonnement électromagnétique

Toute charge et tout mouvement de charge sont capables de créer des champs électriques et magnétiques autour d'eux et devraient être capables de produire un rayonnement électromagnétique (création d'une onde électromagnétique qui se propage librement dans l'espace). Cependant, dans la nature, quasiment tous les objets ne rayonnent pas. En effet, la plupart des objets contiennent des charges positives et négatives en équilibre, si bien que les champs électriques que chacune de ces charges génèrent s'annulent. Lorsqu'un courant circule le long d'une interconnexion, les charges véhiculées ne s'accumulent pas au bout de l'interconnexion, mais reviennent par un autre chemin, formant ainsi une boucle. Ainsi, le champ magnétique créé par chaque élément de cette boucle s'additionne avec la contribution des autres et annulent quasiment le champ magnétique total à grande distance.

Alors comment une antenne fait-elle pour rayonner ? Intuitivement, on sent qu'il faut qu'il y ait un déséquilibre dans la distribution de charges et les courants parcourant l'antenne, par exemple produit par toute variation temporelle du courant ou toute discontinuité dans l'antenne conduisant à une accumulation de charges. Ceci pour empêcher l'annulation de la contribution de chaque charge et de chaque élément de courant de l'antenne. Dans l'exemple suivant, un courant continu se met à parcourir une petite boucle carrée à $t = 0$. Bien que les contributions des 2 côtés de la boucle (notés éléments 1 et 2) soient identiques en amplitude et de signe inverse, la contribution de l'élément 1 de l'antenne arrive un peu avant celle de l'élément 2 (ou les contributions des 2 éléments sont déphasées), permettant la création d'un rayonnement électromagnétique pendant un temps très bref. Si maintenant un courant variable se met à parcourir la boucle, un rayonnement électromagnétique sera produit continuellement.

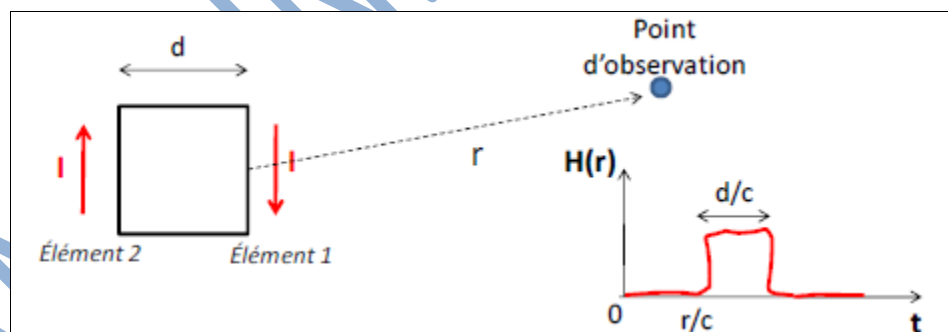


Figure 3 : Rayonnement électromagnétique créé par la variation d'un courant dans un circuit de petite taille

On peut donc voir le rayonnement électromagnétique comme la résultante des différences de phase des contributions de chaque élément de l'antenne.

Remarque : zones de champ proche et de champ lointain

Dans le raisonnement précédent, on considère que la taille de l'antenne est petite devant la distance R la séparant du point d'observation. La contribution de chaque partie de l'antenne a alors à peu près la même amplitude. Supposons maintenant que le point d'observation soit placé près de l'antenne, de telle manière à ce que la partie de l'antenne la plus proche fournisse la plus grande contribution aux champs électriques et magnétiques. Ceux-ci résultent de la différence de distance entre chaque partie de l'antenne. Le point d'observation est placé en zone dite de champ proche. Lorsqu'on parle de rayonnement, le point d'observation est placé en **champ lointain**, le rayonnement est dû à la différence de phase des champs électriques et magnétiques produits par chaque partie de l'antenne.

La figure 4 présente de manière générale le champ électromagnétique produit par une antenne parcourue par un courant sinusoïdal. Celui-ci se propage à la vitesse de la lumière, son amplitude décroît avec la distance et sa phase varie avec la distance en fonction d'une constante de phase ou d'onde β .

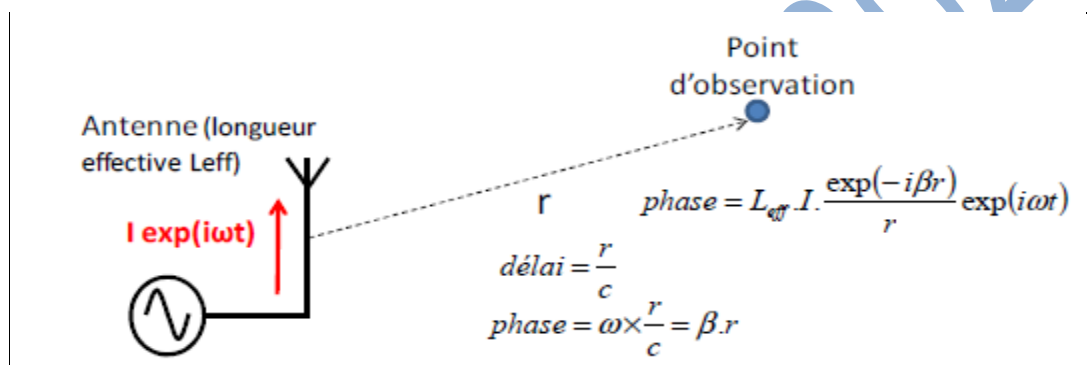


Figure 4 : Rayonnement électromagnétique produit par une antenne de longueur effective L_{eff} et parcouru par un courant sinusoïdal

Interprétation des équations de Maxwell

Que se passe-t-il lorsqu'un courant de conduction variable traverse un fil ?

D'après l'équation de **Maxwell-Ampère**, un champ magnétique variable est produit au voisinage de ce fil. Localement autour de ce point, il y a une variation du flux du champ magnétique qui, d'après l'équation de **Maxwell-Faraday**, va donner naissance à un champ électrique variable. Localement, cette variation de champ électrique donne naissance à un champ magnétique et ce processus continue de proche en proche. Les champs électriques et magnétiques se propagent conjointement à l'image d'une vague.

La résolution des équations de Maxwell montre que la vitesse de déplacement des champs est une constante c égale à la vitesse de la lumière.

3. Propagation en espace libre

Lors de la définition d'un système de communications, il est nécessaire de déterminer le type et la taille des antennes d'émission et de réception, la puissance d'émission, l'ensemble des pertes et affaiblissements que va subir l'onde émise et enfin le rapport signal à bruit nécessaire pour pouvoir effectuer la transmission avec la qualité requise. Effectuer cet ensemble de déterminations constitue l'établissement du **Bilan de Liaison**.

Pour construire notre premier bilan de liaison, il nous faut disposer de modèles de propagation des ondes électromagnétiques. Cette problématique dépasse le cadre de ce cours, nous ne verrons que le modèle de propagation en **espace libre** (milieu homogène, isotrope, libre de tout obstacle).

Connaissant P_E (puissance émise), on veut déterminer P_R (puissance reçue) connaissant la fréquence f , la distance d , et les caractéristiques G_E S_E et G_R S_R des antennes (S_E et S_R étant les surfaces équivalentes).

Pour cela, on va supposer que les antennes sont "bien" orientées, c'est-à-dire que les maxima des diagrammes de directivités sont alignés (antennes « face à face »).

Si l'antenne d'émission était isotrope ($G_E = 1$), elle rayonnerait dans tout l'espace une densité de puissance:

$$P_{iso} = \frac{P_E}{4\pi d^2}$$

Si à présent, elle possède un gain G_E , par définition de celui-ci, la densité de puissance rayonnée dans la direction du maximum du diagramme de directivité vaut donc :

$$P_{max} = P_{iso} \cdot G_E$$

$$P_{max} = \frac{P_E G_E}{4\pi d^2}$$

→ Le terme " $P_E G_E$ " se nomme **PIRE : puissance isotrope rayonnée équivalente** (en anglais EIRP)

C'est en effet la puissance que devrait avoir l'émetteur si son antenne était isotrope et pour obtenir le même résultat à la même distance. La puissance reçue est à présent :

$$P_R = p \cdot S_R$$

Bien sûr car p est une densité surfacique et que nous sommes à une distance suffisamment grande pour que la densité de puissance puisse être considérée comme étant uniforme vis-à-vis de S_R .

$$\text{Ainsi : } P_R = \frac{P_E G_E S_R}{4\pi d^2}$$

Cette formule s'écrit en général soit avec les gains ou soit avec les surfaces, d'où les deux formes équivalentes :

$$P_R = P_E G_E G_R \frac{C^2}{16\pi^2 d^2 f^2} \text{ avec les gains.}$$

$$P_R = P_E S_E S_R \frac{f^2}{d^2 c^2} \text{ avec les surfaces.}$$

Ou encore :

$$P_r = \frac{P_e G_e G_r}{\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2}$$

Remarquer que "f" est au dénominateur dans la première forme, on a donc intérêt à ce que f soit "faible", alors que "f" est au numérateur dans la deuxième forme, on a donc ici intérêt à ce que f soit "élevée". On arrive apparemment à une contradiction. En fait, cela conduit à un choix technologique d'antennes selon la fréquence.

En effet pour des fréquences "faibles", typiquement inférieures à 1 GHz, les longueurs d'ondes sont supérieures à 30 cm et donc, il sera difficile d'obtenir des gains importants en se basant sur

une surface de captation appropriée : $G = 4 \pi \frac{S}{\lambda^2}$ entraîne qu'il faudrait S grand devant λ^2 (soit donc plusieurs m² même à 1 GHz, et donc bien plus si on descend en fréquence !), ce qui va rapidement être irréalisable.

Ainsi pour $f < 1$ GHz, on va réaliser des antennes "**filaires**" où la directivité sera obtenue par d'autres principes en particulier les principes des interférences et de la réflexion.

Par contre, pour des fréquences "élevées", typiquement supérieures à 1GHz, on a tout intérêt au contraire à utiliser une surface de captation (technique des antennes "**paraboliques**").

Formule pratique d'affaiblissement en espace libre :

La puissance reçue P_r par une antenne de gain G_r est donnée par la formule suivante appelée Formule de **Friis**:

$$P_r = \frac{P_e G_e G_r}{\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2}$$

Que l'on écrit :

$$P_R = \frac{P_E G_E G_R}{A_0}$$

Le terme A_0 se nomme "affaiblissement en espace libre", qui est la perte en espace libre (free-space path loss en anglais et noté aussi L_s).

$$L_s = \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2$$

A_0 ou L_s est couramment exprimé en décibels

$$A_0 \text{ (dB)} = 32,5 + 20 \log d_{(K \cdot m)} + 20 \log f_{(MHz)}$$

Et ainsi :

$$P_{R(dB)} = P_{E(dB)} + G_{E(dB)} + G_{R(dB)} - A_{0(dB)}$$

Nota : Les ordres de grandeurs de P_E et P_R sont très différents, ceci explique l'emploi de l'échelle logarithmique.

On peut enfin exprimer le module du champ électrique reçu :

$$p = \frac{1}{2} \frac{|E|^2}{120\pi} = \frac{P_E G_E}{4\pi d^2}$$

$$|E| = \frac{1}{d} \sqrt{30 P_E G_E}$$

Remarques :

- 1- Le gain d'antenne est souvent exprimé en décibel par le calcul de $10 \log(G_E)$. Ce gain est alors exprimé en dBi (dB par rapport à une antenne isotrope de gain égal à 1).
- 2- Il faut bien différencier : **P** qui est la puissance exprimée en **W** (**P majuscule**) et **p** qui est la densité de puissance, exprimée en **W/m²** (**p minuscule**)

4. Radar

À la fin du XIXe siècle, Heinrich Hertz découvre les ondes électromagnétiques et montre qu'elles possèdent les mêmes propriétés que la lumière. Les premières applications de la radio-électricité sont les télécommunications puis la radio-navigation, mais dès le début du XXe siècle, des précurseurs envisagent la possibilité de détecter la présence d'objets métalliques par l'utilisation d'ondes électromagnétiques. Si le principe du radar est énoncé dans les années 1910, les premières applications n'apparaissent que dans les années 1930 : elles concernent la détection d'avions et d'icebergs. Puis le développement des systèmes radars s'accélère avec la seconde guerre mondiale. Après la guerre, le développement de systèmes militaires et civils se poursuit et les premiers radars imageurs aéroportés voient le jour. Au début des années 1950, le principe de la synthèse d'ouverture permet d'améliorer considérablement la résolution azimutale. Les applications aéroportées dans le domaine militaire suivent immédiatement. Depuis, les systèmes radars ne cessent de se perfectionner, tant au plan technologique, que par la variété des techniques mises en jeu pour exploiter les signaux reçus.

4.1. Définition

Le mot « RADAR » provient de l'acronyme anglais "**RA**dio **D**etection **A**nd **R**anging", que l'on peut traduire par "détection et télémétrie radio". Le radar est donc un système électromagnétique qui utilise les ondes radio pour détecter et déterminer la distance et/ou la vitesse d'objets mobiles dans l'espace de surveillance. La position de la cible est estimée grâce au temps de retour du signal, et la vitesse est mesurée à partir du changement de fréquence du signal par effet Doppler.

Un radar est un dispositif permettant de détecter la présence d'objets sur terre ou dans le ciel, déterminer leur direction et leur distance et de mesurer leur vitesse. La station d'émission du radar, comprenant un générateur d'ondes et une antenne, émet des ondes radio. Lorsqu'elles rencontrent un obstacle, les ondes sont réfléchies et recueillies par l'antenne de la station de réception du radar. D'une puissance infime, les ondes réfléchies traversent un système d'amplification à très haut gain avant les dispositifs de visualisation.

Les composants d'un radar sont :

Emetteur

C'est un circuit oscillateur qui produit des impulsions électromagnétiques à très hautes fréquences. Il comprend un oscillateur permanent, un amplificateur et un modulateur. Les radars en service sont majoritairement à hyperfréquence qui génèrent des impulsions courtes et très énergétiques, en utilisant une technologie qui est différente de celle utilisée pour un émetteur radio dans les télécommunications.

Antenne

C'est l'élément le plus visible du radar, et également le plus connu. Son rôle est de concentrer l'énergie émise par le radar dans un angle solide déterminé. Celui-ci est défini par la nature de l'antenne utilisée. La direction vers laquelle il est dirigé est également liée à l'antenne. Une action (mécanique ou électronique) sur cette antenne permettra de modifier cette direction et, donc, de provoquer une exploration du domaine entourant le radar.

Duplexeur

C'est un commutateur électronique qui définit la période d'émission en dirigeant l'onde vers l'antenne et la période de réception en dirigeant le signal depuis l'antenne vers le récepteur (quand on utilise un radar monstatique). Il permet donc d'utiliser la même antenne pour les deux fonctions, avec une perte minimale.

Récepteur

C'est un préamplificateur généralement installé près de l'antenne pour amplifier les signaux reçus et réduire ainsi la perte du signal sur le câble menant au récepteur. C'est dans cette partie que toutes les opérations de traitement du signal sont effectuées. Le signal y est alors démodulé et traité puis le signal obtenu est envoyé vers l'écran du radar.