

# Comment ça marche ?

## LES ONDES HERTZIENNES

Par le radio-club F6KRR

*Dans le dernier "comment ça marche" nous avons vu qu'une propriété importante de l'électromagnétisme était de pouvoir se propager à grande distance. Nous parlons alors de "rayonnement électromagnétique", phénomène dans lequel s'insèrent les ondes hertziennes.*

### Rayonnement électromagnétique

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.

### Onde électromagnétique

Elle se propage à une vitesse ( $v$ ) qui dépend de l'indice de réfraction ( $n$ ) du milieu de propagation selon la loi :  $v = c/n$  ( $c = 3.10^8$  m/s). Dans le vide et dans l'air,  $v = c$  car  $n = 1$ . La longueur d'onde est la distance en mètres pour laquelle les vecteurs champs  $\mathbf{E}$  et  $\mathbf{H}$  retrouvent leurs mêmes amplitudes et mêmes directions. Elle est égale à  $v / F$ ,  $F$  étant la fréquence de l'onde en hertz et  $v$  la vitesse de propagation en m/s.

L'onde électromagnétique est relativiste. C'est-à-dire qu'elle obéit au postulat d'Einstein : la vitesse de la lumière (donc de l'onde E-M) dans le vide est la même pour tous les observateurs et est indépendante du mouvement de la source qui l'a émise. Une conséquence observable par tous les radioamateurs est l'effet Doppler-Fizeau :

Si la source et l'observateur (un satellite et une station au sol, par exemple), s'éloignent ou se rapprochent l'un de l'autre, l'onde électromagnétique subit une compression (rapprochement) ou une expansion (éloignement). En vertu d'un autre postulat de la physique relativiste qui dit que la description des phénomènes physique est indépendante du repère de coordonnées dans lequel on les observe, la longueur (longueur d'onde) et le temps (la fréquence) ne seront pas les mêmes pour la source et l'observateur. Ainsi, pour une liaison à 145 MHz entre la station ISS et une station au sol, l'écart entre  $F_{\text{(émission)}}$  et  $F_{\text{(réception)}}$  peut atteindre 2 kHz <sup>(1)</sup>.

### Spectre électromagnétique

Le spectre électromagnétique regroupe les ondes électromagnétiques en fonction de leur longueur d'onde  $\lambda$  qui peut aller de milliers de km (TBF) à des fractions de pico mètre (rayons gamma). Nous avons sur la figure 1 l'ensemble du spectre électromagnétique (dans le vide).

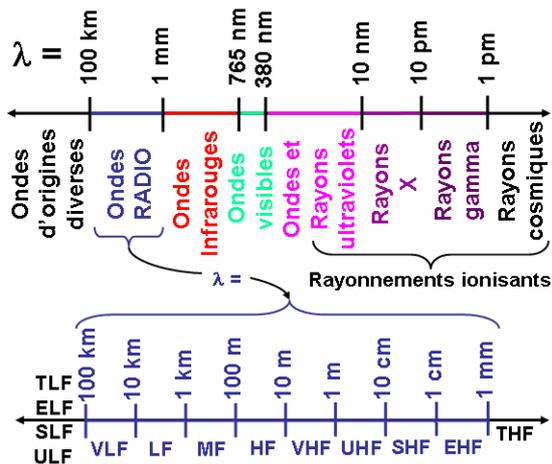


Figure 1

## Ondes hertziennes.

Ce sont les ondes radioélectriques. Elles sont le résultat de la génération d'un rayonnement électromagnétique par un déplacement alternatif de charges dans un milieu conducteur. Leur étude suppose la production d'un champ électromagnétique à partir d'un courant sinusoïdal stationnaire (CW) à la fréquence  $F$ .

Loin de la source, l'onde hertzienne est une onde plane, c'est-à-dire que l'énergie qu'elle transporte est contenue dans un plan perpendiculaire à la direction de propagation. Par ailleurs, ses propriétés électriques et magnétiques sont portées par deux vecteurs en quadrature dans le plan de l'onde. L'énergie par unité de surface est obtenue par le calcul du Vecteur de Poynting.

L'onde hertzienne est polarisée. L'angle de polarisation est l'angle entre la direction du vecteur  $E$  et un plan de référence choisi par convention (le sol au point d'observation pour un environnement terrestre). Si cet angle est constant en fonction de la propagation, nous avons une polarisation linéaire et s'il varie en synchronisme avec la longueur d'onde, nous avons une polarisation elliptique (dont la polar circulaire est un cas particulier). La polarisation sera traitée en détail dans un prochain "comment ça marche".

Voir un résumé graphique sur la figure 2.

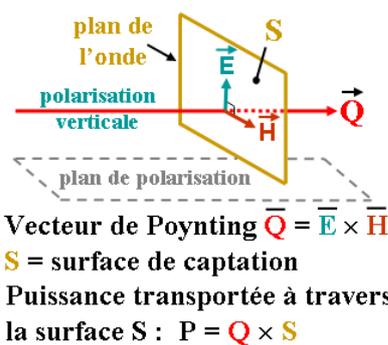


Figure 2.

## Propagation de l'onde hertzienne

Dans un milieu diélectrique parfait, l'onde se propage sans amortissement (sans perte d'énergie). Elle ne pénètre pas dans un milieu conducteur parfait. Dans un milieu semi conducteur comme le sol, l'onde pénètre à une profondeur dépendant de la conductivité du milieu, en s'amortissant selon une loi exponentielle <sup>(2)</sup>.

## Réflexion de l'onde hertzienne

Si l'onde arrive tangentiellement à un plan conducteur parfait, elle chemine le long du plan qui devient un guide d'onde (s'il se courbe ensuite, la direction de l'onde aussi).

Il y a réflexion de l'onde pour toutes les autres positions du plan conducteur. Lors de la réflexion, le vecteur **E** inverse sa direction et le vecteur **H** la garde (ainsi le vecteur de Poynting change de direction). La direction de réflexion est symétrique de la direction d'arrivée par rapport à un plan perpendiculaire au plan de réflexion. Si l'arrivée se fait dans ce plan (plan de l'onde parallèle au plan de réflexion), la direction de retour est l'inverse de celle de l'aller. La combinaison de l'onde aller avec l'onde retour forme alors des ondes stationnaires. Considérant que la densité surfacique du champ électromagnétique décroît comme le carré de la distance, les ondes stationnaires s'atténuent rapidement lorsque l'on remonte vers la source. Il n'y a que dans les cas d'ondes guidées (flux de densité constante) que les ondes stationnaires peuvent remonter jusqu'à l'antenne, occasionnant une modification de son impédance <sup>(3)</sup>.

Le cas où la réflexion se fait proche de l'antenne émission ou de celle de réception sera examiné dans des futurs "Comment ça marche".

## Les multi trajets

On parle de multi trajets lorsqu'au point de réception l'onde émise arrive par des trajets différents suite à des réflexions. Le multi trajet est à l'origine du fading à la réception. Nous étudierons les cas de deux trajets qui occasionnent un fading maximum.

### 1) Onde d'espace et onde réfléchi par le sol

Ce cas se rencontre en pratique pour les ondes VHF et supérieures. Le problème et ses conséquences sont montrés sur la figure 3.

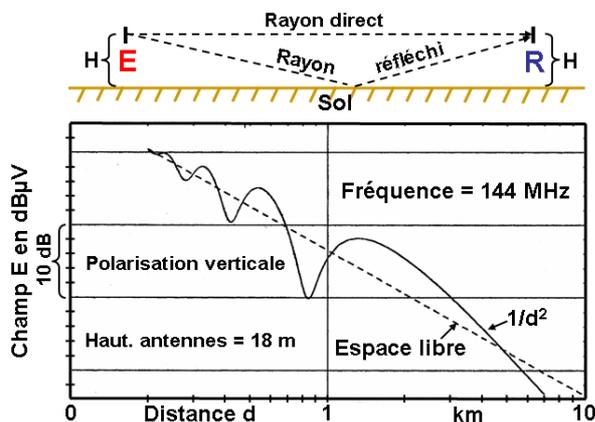


Figure 3

Pour éviter les évanouissements en fonction de la distance, il faut monter les antennes émission et réception de façon que le premier ellipsoïde de Fresnel soit dégagé du sol. La hauteur diminue quand la fréquence augmente. La diffusion de l'onde sur les obstacles au sol réduit l'amplitude du signal et la profondeur des évanouissements.

### 2) Onde d'espace et onde réfléchi par l'ionosphère

Ce cas se rencontre pour la bande MF en propagation nocturne, lorsque la réflexion de l'onde est possible dans la couche **E** car la couche **D** a disparu. Voir la figure 4.

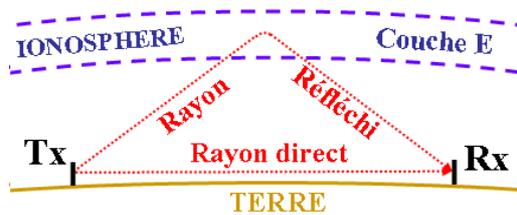


Figure 4

La combinaison des deux ondes entraîne un fading lié à l'évolution de la couche **E**. La parade consiste à utiliser une antenne émission directive dans le plan V (antenne dite "anti-fading").

### 3) Deux réflexions dans l'ionosphère

Ce cas se rencontre quand la réflexion est faite dans la couche **F** (10-30 MHz). Les propriétés de la couche F font qu'il y a deux hauteurs de réflexion possibles pour une même distance. La réflexion du bas est dite "rayon bas" et c'est elle qui subit en général le moins d'atténuation. Celle du haut est dite "rayon de Pedersen" et peut dans certains cas (fréquence, géographie, polarisation des antennes) avoir une atténuation comparable à celle du bas. Voir la figure 5.

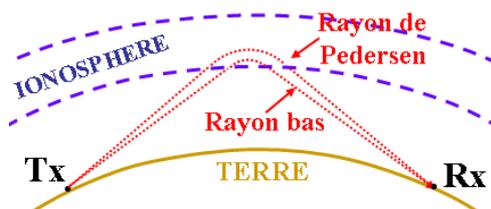


Figure 5

L'interférence entre les deux rayons entraîne un fading lié à l'évolution de la couche F.

### 4) Deux réflexions de l'onde d'espace

Ce cas se rencontre en VHF et UHF, lorsque l'émetteur et/ou le récepteur sont mobiles. Il est montré sur la figure 6.

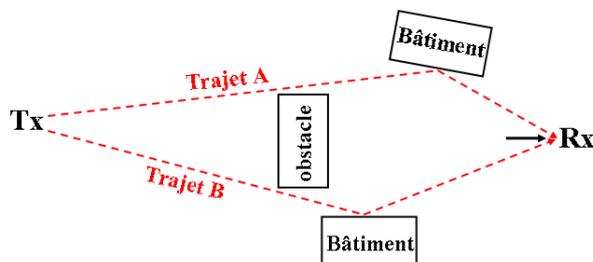


Figure 6

L'interférence entre les deux arrivées entraîne un fading dont la rapidité est liée à la vitesse relative entre l'émetteur et le récepteur.

### Fading de Rayleigh

Pour les VHF et au dessus, dans un environnement urbain où l'on rencontre beaucoup de surfaces réfléchissantes de dimensions grandes devant la longueur d'onde, et pour un mobile,

il se produit des évanouissements (fading) liés aux ondes stationnaires et aux multi trajets de types 1) et 4). La combinaison de toutes ces causes amène des fluctuations du signal reçu qui dépendent de la fréquence et de l'environnement de propagation (urbain, suburbain, campagne). C'est le fading de Rayleigh. Il oblige à prendre une marge de puissance dans les calculs des bilans de liaison. Par exemple, elle est de 30 dB pour le GSM en ville.

**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".**

### **Notes.**

- 1) *Une autre conséquence plus subtile de la relativité est que la différence entre le champ E et le champ H d'une onde électromagnétique ne provient que de la manière dont on observe le champ électromagnétique.*
- 2) *L'amortissement est dû à une dissipation thermique dans le conducteur. Revoir le "comment ça marche" sur l'effet de peau.*
- 3) *L'antenne présente un ROS > 1, même si elle était parfaitement adaptée sans la réflexion.*