

Comment ça marche ?

Formation du diagramme de rayonnement

Réflexion sur un sol réel (1)

Par le radio-club F6KRK

Dans les précédents "Comment ça marche", nous avons vu la réflexion des ondes électromagnétiques sur un plan de sol parfaitement conducteur et bâti des diagrammes de rayonnement en nous servant de la théorie des images. Qu'en est-il avec un sol réel ?

Milieux de propagation.

Un milieu est défini par ses propriétés électriques. Celles-ci se résument avec deux paramètres : la permittivité relative " ϵ " allant de 1 à l'infini, et la conductivité " γ " allant de 0 à l'infini ⁽¹⁾.

Un conducteur parfait a une conductivité infinie et une faible permittivité. Un isolant parfait à une conductivité nulle et une permittivité sans hystérésis.

Une onde électromagnétique traverse un milieu isolant parfait (vide et gaz non ionisés) sans atténuation et sans changer de direction. Elle ne pénètre pas dans un milieu conducteur parfait, elle le tangente ou elle est réfléchi.

Milieu semi conducteur (sol réel).

Il est caractérisé par le fait que sa conductivité est faible, voire très faible, comparée à celle d'un conducteur pur (métallique). Selon le rapport entre la permittivité et la conductivité, nous définissons une fréquence de coupure $F_c = \gamma / 2\pi\epsilon$. Au dessous de F_c , le milieu est considéré comme plutôt conducteur et au dessus, comme plutôt isolant. Nous avons un conducteur pur si $(\omega\epsilon / \gamma) \ll 1$ et un diélectrique pur si $(\omega\epsilon / \gamma) \gg 1$. Pour une conductivité donnée, un milieu se comporte d'autant mieux comme un isolant, et d'autant moins bien comme un conducteur, que la fréquence est plus élevée.

Nous avons sur la figure 1 les valeurs typiques de quelques sols courants.

Quelques milieux semi conducteurs

milieu	ϵ	γ	F_c (MHz)
Eau de mer	80	1 à 4	230 à 1000
Eau douce	80	10^{-3} à 10^{-2}	0,23 à 2,3
Terrains cultivés	10 à 30	10^{-2}	18 à 60
Sol très sec	4	10^{-4} à 10^{-3}	0,45 à 4,5
Cuivre pur (pour comparaison)	≈ 5 à 10	6.10^7	> 100000

Figure 1.

Propagation en milieu semi conducteur.

On définit une constante de temps de dissipation des charges : $\tau = \epsilon / \gamma$ ⁽²⁾.

Cas où l'effet conducteur domine nettement.

Dans ce cas, γ est très grand et τ très petit. On définit un indice k :

$$k \approx \sqrt{\frac{\epsilon\mu}{2}} \cdot \sqrt{\frac{1}{\omega\tau}} \quad (\mu \approx 1 \text{ pour les métaux})$$

On remarquera que k est très grand et diminue avec la fréquence.

Comme la conductivité n'est pas nulle, il y aura amortissement de l'onde (dissipation par effet Joule). On définit une profondeur de pénétration $\delta = c / k\omega$ ($c = 3.10^8$ m/s est la vitesse de la lumière dans le vide). C'est la distance pour laquelle l'amplitude des champs est divisée par e ($e = 2,718$ est la base des logarithmes naturels, $L_n(e) = 1$ "Neper") ⁽³⁾. La vitesse de propagation dans le milieu est égale à c / k . Nous avons sur la figure 2 les profondeurs de pénétration pour quelques milieux.

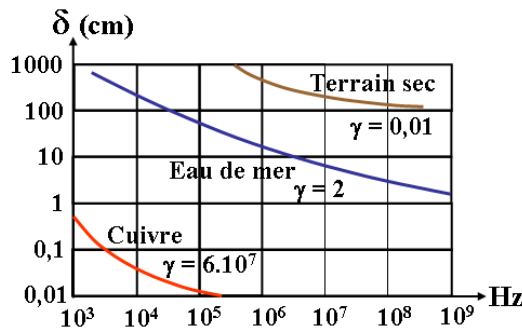


Figure 2.

Cas où l'effet diélectrique domine nettement.

Dans ce cas, γ est très petit et τ très grand. On définit un indice n :

$$n \approx \sqrt{\epsilon\mu} \quad (\mu \approx 1) \quad (k \text{ est presque nul})$$

L'indice n est pratiquement indépendant de la fréquence. Il se comporte comme un indice de réfraction et la vitesse de propagation dans le milieu est égal à c / n ⁽⁴⁾.

Noter que dans le cas d'un milieu nettement conducteur, $n = k$.

Coefficient de réflexion.

Il y a réflexion d'une onde électromagnétique sur une surface lorsque l'indice de réfraction n de son milieu est supérieur à l'indice du milieu de propagation. Si la conductivité de la surface n'est pas infinie, la réflexion s'accompagne d'une réfraction. Si l'indice n est inférieur, il y a seulement réfraction. Nous avons sur la figure 3 les graphes résultant des lois de la réfraction et de la réflexion.

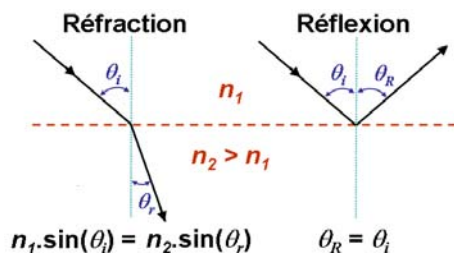


Figure 3.

Les caractéristiques de l'onde réfléchie sont obtenues en appliquant un coefficient de réflexion à l'onde incidente. Celui-ci est composé de deux valeurs : son module ρ et sa phase ψ . Le module est le rapport absolu entre l'énergie de l'onde réfléchie et l'énergie de l'onde incidente. La différence représente l'énergie réfractée qui est dans le cas du sol, dissipée par effet Joule. La phase représente l'angle de déphasage entre l'onde réfléchie et l'onde incidente. Le module du coefficient de réflexion est d'autant plus proche de 1 que le rapport entre n_2 et n_1 est élevé ⁽⁵⁾. Dans le cas d'une antenne dans l'atmosphère, n_1 est égal à 1. Alors les paramètres du coefficient de réflexion sont entièrement dépendants du sol. Nous avons sur la figure 4 des valeurs typiques pour des qualités "extrêmes" de sol (polarisation horizontale).

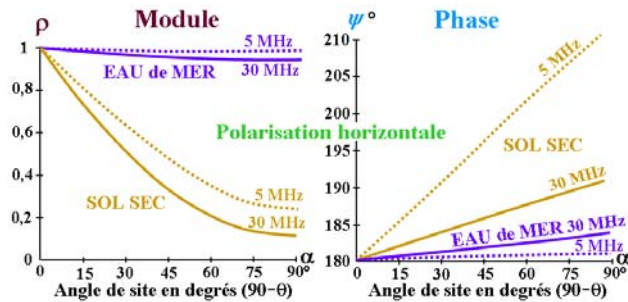


Figure 4.

Un module inférieur à 1 a pour effet de diminuer l'amplitude aux maxima des lobes et de combler les minima. Un déphasage supérieur à 180° a pour effet de décaler les angles des lobes. Nous avons sur la figure 5 les diagrammes verticaux comparés entre un sol parfait, l'eau de mer, une prairie et un sol urbain, et cela pour différentes hauteurs d'un doublet en polarisation horizontale (bande des 20m).

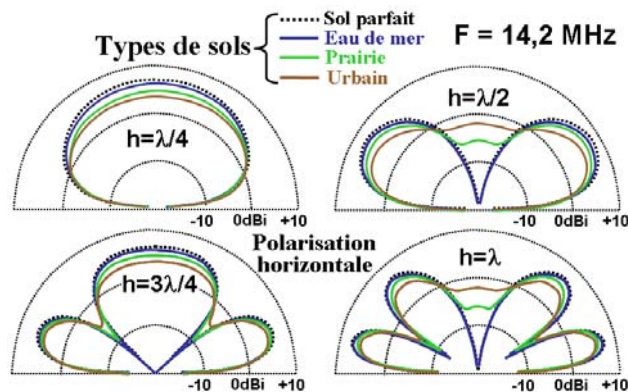


Figure 5.

Comme prévu, les différences se font surtout sentir pour les angles de site élevés. Pour le grand DX, la hauteur au dessus du sol est beaucoup plus influente que le type du sol lui-même.

Cas de l'antenne Quad en polar H.

Quand la Quad est montée verticalement, nous avons un système rayonnant composé de deux doublets $\lambda/4$ horizontaux espacés en hauteur de $\lambda/4$ (les parties verticales ne rayonnent pas, étant parcourues par des courants antagonistes). En présence du sol, les diagrammes des deux doublets vont se combiner. Conséquences : le diagramme est élargi dans le plan V et le gain moins élevé qu'espéré ⁽⁶⁾. Nous avons sur la figure 6 les diagrammes verticaux pour des hauteurs du point d'alimentation de $\lambda/4$ et $\lambda/2$. En pointillés, nous avons pour comparaison les

diagrammes d'un seul dipôle $\lambda/2$ avec $h=0,375\lambda$ et $0,625\lambda$ (hauteur moyenne de la Quad).
 Tout ceci à 14,2 MHz avec un sol standard.

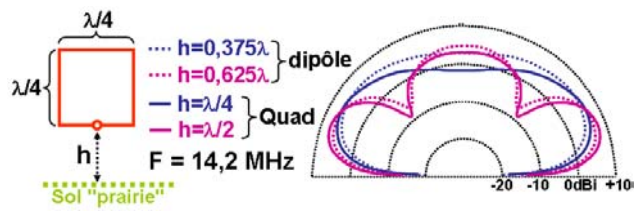


Figure 6.

La Quad n'est pratiquement utilisée qu'en réseau de deux éléments (cubical-quad). Alors pour une même hauteur de pylône et comparée à une Yagi 2él mono bande, on peut espérer un gain de 2 dB pour les angles DX. L'intérêt de la cubical-quad est surtout de pouvoir construire une multi bande optimisée pour toutes les bandes.

Pour conclure, nous dirons qu'avec la polarisation horizontale, la qualité du sol influence peu le diagramme de rayonnement. Dans le prochain "Comment ça marche", nous verrons qu'avec la polarisation verticale, le sol joue un rôle beaucoup plus important.

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) La permittivité s'exprime en Farad par mètre. La conductivité est l'inverse de la résistivité. Elle s'exprime en Siemens ($1/\Omega$ par mètre).
- 2) Analogue à $\{T = RC\}$.
- 3) De même pour les logarithmes décimaux, $\text{Log}(10) = 1$ "Bel".
- 4) Exemple : coefficient de vélocité dans un câble coaxial avec un autre diélectrique que l'air.
- 5) Quand le réflecteur est un conducteur pur, le rapport n_2/n_1 est proche de l'infini et le module du coefficient de réflexion est quasiment égal à 1.
- 6) Il est seulement de 0,5 dBd alors qu'en espace libre, il serait de 1,1 dBd. Mais pour un angle de départ de 10° , on retrouve un écart de 1,1 dBd.