

Comment ça marche ?

La SURFACE de CAPTATION d'une antenne

Par le radio-club F6KRK

La surface de captation est l'un des paramètres les plus mystérieux de l'électromagnétisme. Nous espérons qu'il le sera moins après la lecture de cet article.

Puissance délivrable par l'antenne au point de réception (1).

Elle est égale à la mesure du flux du vecteur de Poynting à travers la surface de captation. Le flux du vecteur de Poynting par unité de surface est égal au champ E multiplié par le champ H. Reste à déterminer la surface de captation et nous aurons la puissance délivrable par l'antenne au point de réception. Le problème est exposé sur la figure 1.

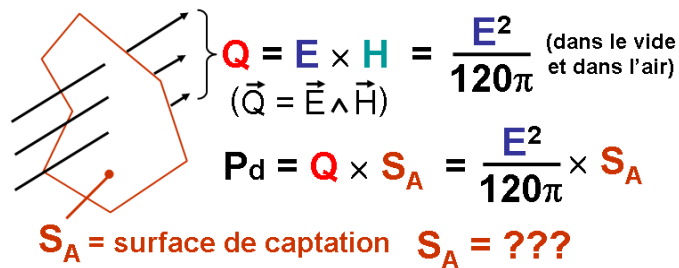


Figure 1.

Puissance délivrable par l'antenne au point de réception (2).

Nous avons vu dans un "Comment ça marche" consacré à la hauteur effective que la puissance disponible était égale au champ E multiplié par la hauteur effective H_{EFF} , le tout élevé au carré et divisé par 4 fois la résistance de rayonnement R_R (hypothèse : aucune perte, et adaptation parfaite). Ceci est rappelé dans la figure 2 où nous avons normalisé H_{EFF} à 1m.

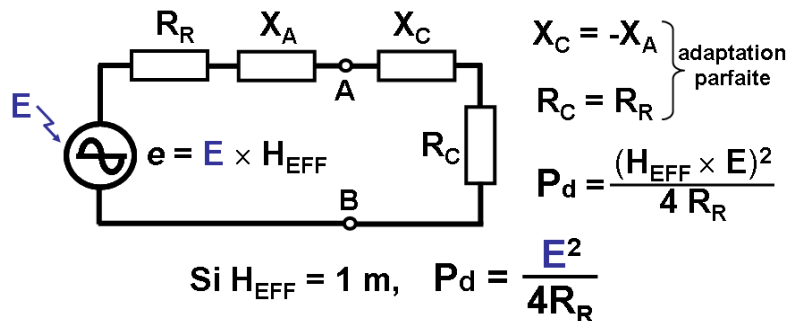


Figure 2.

Nous avons maintenant deux équations donnant la puissance disponible, dont l'une avec la surface de captation, ce qui va nous permettre d'obtenir son expression mathématique.

Expression de la résistance de rayonnement.

Elle dérive directement de la mesure totale du flux du vecteur de Poynting à travers la surface d'une sphère centrée sur l'émetteur (puissance totale rayonnée). Nous avons :

$$P_W = I_{\text{eff}}^2 \times \underbrace{\frac{1}{D} \times 120\pi^2 \times \frac{H_{\text{EFF}}^2}{\lambda^2}}_{R_R} \quad \begin{array}{l} D = \text{directivité} \\ H_{\text{EFF}} = \text{Hauteur effective} \end{array}$$

Applications :

$$\text{Doublet élémentaire (} \frac{H_{\text{EFF}} = L}{D = 1,5} \text{) : } R_R = 80\pi^2 \times \frac{L^2}{\lambda^2}$$

$$\text{Doublet demi onde (} \frac{H_{\text{EFF}} = \lambda\pi}{D = 1,64} \text{) : } R_R = \frac{120}{1,64} = 73,2 \Omega$$

Pour une antenne isotrope ($D=1$) et une H_{EFF} de 1 m :

$$P_W = I_{\text{eff}}^2 \times \left. \frac{120\pi^2}{\lambda^2} \right\} = R_R$$

Figure 3.

Expression de la surface de captation.

La résistance de rayonnement théorique d'une antenne avec une H_{EFF} de 1m (courant uniforme) ayant une directivité de 1 (rayonnement isotrope) est donc égale à $120\pi^2 / \lambda^2$. Remplaçons R_R par cette valeur dans l'expression de la fig. 2 et combinons là avec celle de la fig. 1, nous obtiendrons l'expression de la surface de captation, comme montré sur la figure 4.

Surface de captation isotrope S_i :

$$P_d = \frac{E^2}{120\pi} \times S_i = \frac{E^2}{4R_R} \quad (H_{\text{EFF}} = 1 \text{ m})$$

$$S_i = \frac{\frac{E^2}{4R_R}}{\frac{E^2}{120\pi}} = \frac{120\pi}{4R_R} = \frac{120\pi}{4 \times \frac{120\pi^2}{\lambda^2}} = \frac{\lambda^2}{4\pi}$$

Surface de captation d'une antenne :

$$S_A = S_i \times D \quad (D = \text{directivité de l'antenne})$$

Figure 4.

Noter que la référence au champ électrique a disparu. En faisant intervenir la directivité dans le calcul de R_R , nous trouvons alors que la surface de captation S_A d'une antenne est égale à la surface de captation isotrope S_i (théorique) multipliée par sa directivité D ⁽¹⁾. Ceci est très important, car on voit que la surface de captation d'une antenne n'est liée qu'à la longueur d'onde et à sa directivité et aucunement à ses particularités mécaniques (surface occupée, longueur et diamètre des conducteurs).

Expression du champ électrique.

La puissance totale rayonnée par une antenne s'obtient en intégrant le flux du vecteur de Poynting à travers la surface totale de la sphère passant par le point de réception, donc avec un rayon r égal à la distance émetteur-récepteur. Pour avoir la puissance rayonnée par unité de

surface à la distance r , il suffit de diviser la puissance totale rayonnée par $4\pi.r^2$ (formule utilisée pour avoir la surface d'une sphère de rayon r). Connaissant l'impédance du milieu de propagation qui est de 120π pour le vide et l'air, nous pouvons obtenir le champ électrique à une distance r à partir de la puissance rayonnée en appliquant la loi d'Ohm. Si notre antenne a une directivité, il faudra utiliser la PIRE qui est égale à la puissance totale rayonnée multipliée par la directivité maximale. Tout ceci est résumé sur la figure 5.

$$Q = \frac{W \times D}{4\pi.r^2} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} Q = \text{vecteur de Poynting en W/m}^2 \text{ à la distance } r \\ W = \text{puissance totale rayonnée en watts} \\ D = \text{directivité de l'antenne émission} \end{cases}$$

$$Q = \frac{E^2}{120\pi} \Rightarrow E = \sqrt{Q \times 120\pi} = \sqrt{\frac{W \times D \times 120\pi}{4\pi \times r^2}}$$

$$E = \frac{1}{r} \sqrt{W \times D \times 30} \quad \begin{cases} E = \frac{5,48}{r} \times \sqrt{W} \text{ (antenne isotrope, } D=1) \\ E = \frac{7,01}{r} \times \sqrt{W} \text{ (doublet } \lambda/2, D=1,64) \end{cases}$$

Figure 5.

Nous voyons que la valeur du champ électrique ne dépend pas de la longueur d'onde. Or la puissance disponible diminue comme le carré de la diminution de la longueur d'onde. Il semble y avoir un paradoxe, mais en apparence seulement. Il faut se souvenir que pour une hauteur effective donnée, la résistance de rayonnement augmente comme le carré de la diminution de la longueur d'onde. Comme $P_d = E^2 / R_R$, pour E constant, P_d diminue proportionnellement à l'augmentation de R_R .

Affaiblissement de propagation.

Nous avons maintenant tous les éléments en main pour déterminer l'affaiblissement de propagation en espace libre et calculer la puissance reçue en fonction de la puissance émise et de la distance. Tout ceci est résumé sur la figure 6.

Puissance reçue (adaptation parfaite)

$$P_R = \frac{W \times D_E}{4\pi.r^2} \times \frac{\lambda^2}{4\pi} \times D_R = W \times D_E \times \left(\frac{\lambda}{4\pi.r}\right)^2 \times D_R$$

$$P_R = Q \times S_A$$

↓
Affaiblissement de propagation

D_E = directivité de l'antenne émission (G_E)
 D_R = directivité de l'antenne réception (G_R)
 r = distance émetteur-récepteur (r et λ dans la même unité).

$$P_R = W + G_E + 10 \text{ Log} \left(\frac{\lambda}{4\pi.r}\right)^2 + G_R$$

dBm dBm dB_i dB_i

Figure 6.

Nous concluons en rappelant que la puissance disponible aux bornes d'une antenne, à une certaine distance de l'émetteur, et pour une fréquence donnée, ne dépend que de sa directivité. Ainsi, la petitesse d'une antenne ne pose pas de problème théorique, car sa directivité est au moins aussi bonne que celle de l'antenne isotrope. Le problème réside dans sa faible hauteur effective, et donc sa très faible résistance de rayonnement. Comme elle est également fortement réactive, il en résulte un mauvais rendement du système d'adaptation avec l'émetteur ou le récepteur. Dans un prochain "Comment ça marche" nous verrons l'optimisation des systèmes antennaires très raccourcis.

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 directivité d'une antenne dans la direction (θ, φ) est le quotient entre le champ rayonné par l'antenne et celui rayonné par une antenne isotrope dans la direction (θ, φ) pour une même puissance totale rayonnée. Les champs sont mesurés avec le flux du vecteur de Poynting par unité de surface. Avec un rendement de 100%, le gain iso est égal à la directivité maximum de l'antenne.