

Quel matériau pour vos antennes ? (par ON5HQ)

Cet article à pour but de clarifier une notion trop souvent passée sous silence et qui est importante pour le bon rendement de nos antennes, il s'agit du comportement des matériaux les constituant. Des antennes, même commerciales paraît il, sont construites en fils d'acier, mais est ce un bon choix ?

Pour apporter les justifications nécessaire (car il ne suffit pas de "dire" !!) il était indispensable de faire appel à quelques formules et calculs (pas du tout inabordable, rassurez vous), et nécessaires comme exemple pour tous ceux qui désireraient faire des calculs d'estimation de pertes dans leur lignes ou leurs antennes.

Les différentes notions relatives aux antennes et au magnétisme pourrons être revues sur le site de ON6BS dans les rubrique "techniques" et "aide mémoire" des sites www.users.skynet.be/on5hq ou <http://bts.uba.be/>.

Il s'agit d'antennes, et nous savons tous que leur comportement du point de vue du rayonnement dépend beaucoup de leur environnement, mais qui n'influencent pas les caractéristiques, propriétés et comportements électriques des conducteurs qui les composent, et dont les conséquences peuvent donc parfaitement être évaluées par le calcul. C'est de l'une d'elle qu'il s'agit et qui ne dépend que des caractéristiques résistives et magnétiques du matériau utilisé ; c'est "**l'effet de peau**" ou "**effet pelliculaire**" dans un conducteur parcouru par un courant alternatif (skin effect en anglais).

Le cuivre est généralement utilisé comme conducteur électrique et en particulier pour la confection de nos antennes, et bien des matériaux conducteurs pourraient apparemment être utilisés, ne fut ce que pour des raisons de solidité, mais il y à un courant qui circule dans les brins rayonnant, et HF en plus, ce qui procure au conducteur une augmentation de résistance et par conséquent, une augmentation des pertes.

Quel est leur ordre de grandeur en fonction des matériaux utilisés et quel est le rendement qui en résulte ?

Il faut dire que tout les conducteurs ne sont pas égaux devant le courant électrique à cause de leur résistivité pouvant être très différente d'un matériaux à l'autre, et lorsqu'il s'agit de conduction du courant alternatif, il faut aussi tenir compte, pour les matériaux magnétiques, de leur perméabilité magnétique.

Sous forme de fils, on trouve du cuivre, plus difficilement le bronze utilisé jadis pour les lignes téléphoniques, et des matériaux ferreux, de l'acier puisque le fer (pur) n'est pas utilisé pour des fils métalliques.

L'acier à l'avantage de la solidité, et certaines antennes sont construites avec ce matériaux, mais est ce le bon choix ?

Voici une comparaison des deux matériaux, le cuivre et l'acier.

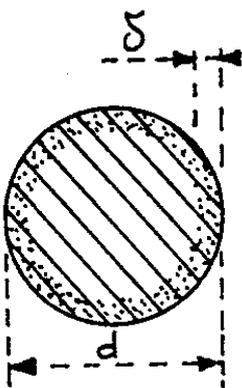


fig. 1

Le courant alternatif, à la différence du courant continu, n'est pas réparti uniformément suivant toute la section du conducteur, sa densité augmente de façon constante dans la direction allant de l'axe du fil vers sa surface. Ce phénomène est appelé **effet pelliculaire** (fig. 1).

Avec l'accroissement de la fréquence du courant alternatif, du diamètre du fil, de sa conductivité (l'inverse de la résistivité) et de la perméabilité magnétique, le rapport de la densité du courant près de la surface à la densité du courant à l'axe du fil augmente. Pour cette raison dans un fil d'acier dont la perméabilité est beaucoup supérieure à celle du fil de cuivre, tandis que sa conductivité est seulement 8 fois plus petite, l'effet pelliculaire est très important. Cependant, pour des hautes fréquences utilisées, par exemple en radiotechnique, cet effet a lieu également dans tous les matériaux conducteurs de l'électricité, tel que le fil de cuivre ou d'aluminium.

Pratiquement dans ce cas, le courant remplit seulement une couche superficielle relativement fine du fil. La densité de courant, en allant de la périphérie d'un conducteur cylindrique à son centre, décroît selon une loi exponentielle (fig. 2). L'épaisseur " δ " de cette couche appelée encore **profondeur de pénétration** du courant alternatif est adoptée conventionnellement de sorte que la densité du courant à sa surface intérieure soit de e fois ($e = 2,72$) plus petite qu'à la surface extérieure du fil (intensité en $B = 1/e$ fois la valeur à la surface).

La profondeur de pénétration " δ " est celle dans laquelle on pourrait faire passer tout le courant avec une densité constante et égale à celle qui existe à sa surface. La fig. 2 montre que la surface représentée par le rectangle de cotés OB et AB est égale à la surface comprise entre les axes et la courbe en gras. On peut donc considérer que le courant circule dans une couche d'épaisseur δ (fig. 2).

Tout se passe comme si le fil était un tube de même métal, de même diamètre extérieur et dont l'épaisseur des parois vaut δ .

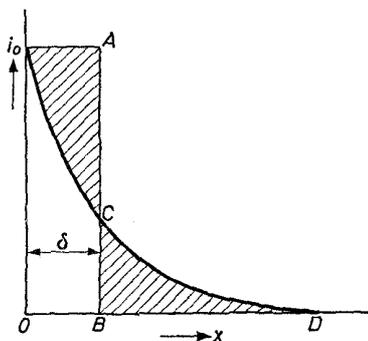
L'épaisseur de la couche périphérique dans laquelle circule le courant dépend de la résistivité du matériaux, de sa perméabilité magnétique et de la fréquence du courant qui parcourt le conducteur.

La formule donnant cette profondeur de pénétration " δ " est :

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu \cdot \omega \cdot \sigma}} = \sqrt{\frac{2 \cdot \rho}{\mu \cdot \omega}} \quad \text{qui peut aussi s'écrire :}$$

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot f \cdot \sigma}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{\pi \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot f}{\rho}}}$$

fig.2



ou : δ (delta) = épaisseur de peau en mètres (m)

ω (oméga) = pulsation du courant HF en radians par seconde (rad/sec) - $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$
avec f = fréquence du courant alternatif en Hz

μ (mu) = perméabilité absolue du matériau magnétique

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$$

μ_0 = perméabilité du vide = $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$

μ_r = perméabilité relative du matériaux (par rapport au vide)

- $\mu_r = 1$ pour le cuivre

- $\mu_r = 500$ à 1500 et plus pour les aciers (voir la littérature spécialisée)

σ (sigma) = conductivité électrique en Siemens par mètre ou en mho (S/m)

σ est l'inverse de la résistivité ρ (rho) en ohms par mètres (en Ω / m) : $\sigma = 1/\rho$

En regroupant les grandeurs constante μ_0 et π sous un seul terme, on trouve la formule pratique suivante :

$$\delta = \frac{503,3}{\sqrt{f \cdot \sigma \cdot \mu_r}} = \frac{503,3}{\sqrt{\frac{f \cdot \mu_r}{\rho}}} \quad \text{en mètres,} \quad \text{ou} \quad \delta = \frac{503300}{\sqrt{f \cdot \sigma \cdot \mu_r}} = \frac{503300}{\sqrt{\frac{f \cdot \mu_r}{\rho}}} \quad \text{en mm}$$

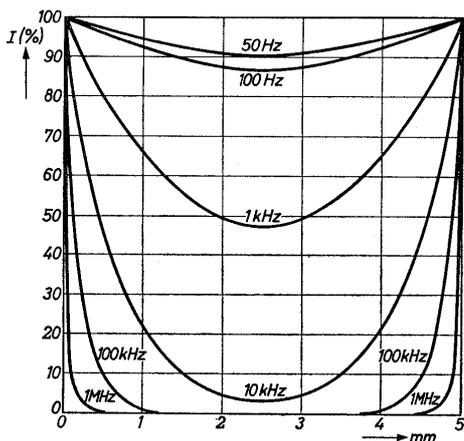


Fig. 3

A titre d'exemple, le figure 3 montre la répartition du courant dans un conducteur de cuivre de 5 mm de diamètre pour différentes fréquences situées entre 50 Hz et 1 MHz..

L'examen de la formule montre que le profondeur de pénétration diminue avec la fréquence et la perméabilité, et augmentent lorsque la résistivité diminue (la conductivité augmente).

Pour un conducteur de section significativement plus grande que " δ ", on peut calculer la résistance effective à une fréquence donnée en considérant que seule la partie extérieure d'épaisseur " δ " contribue à la conduction. Par exemple pour un conducteur de rayon R , on aura une section utile S_u de :

$$S_u = \pi \cdot (R^2 - (R - \delta)^2)$$

Le résistance se calcule donc en prenant S_u comme section

de conducteur à l'aide de la formule classique $r = \frac{\rho \cdot l}{S_u}$.

l = longueur en mètres

ρ = résistivité en Ω / m ou $\Omega/m/mm^2$

S_u = section utile en m^2 si ρ en Ω / m et en mm^2 si ρ en $\Omega/m/mm^2$

Lorsque un fil est enroulé, il est le siège d'un effet pelliculaire supplémentaire ; non seulement le

courant se porte à la surface du fil, mais il ne se distribue pas régulièrement sur celle-ci. C'est ainsi que un fil de cuivre de 1 mm de diamètre d'une longueur telle que sa résistance égale 2Ω en courant continu; 9Ω à la fréquence de 10^6 Hz (1 MHz) en fil rectiligne, devient égale à 30Ω si ce fil est enroulé à spires jointives.

Même à la fréquence industrielle de **50 Hz**, l'effet pelliculaire se manifeste déjà, et le calcul donne comme valeur de δ : **0,95 cm** environ pour le cuivre et **1,2 cm** pour l'aluminium. Si l'on admet qu'au delà du diamètre $d = 4 \cdot \delta$, le conducteur est mal utilisé, on est conduit à ne pas dépasser des diamètres de **3,8 cm** pour le cuivre et **4,8 cm** pour l'aluminium.

Avec l'acier, par suite de sa perméabilité magnétique, ce diamètre maximum serait de environ **3 mm**, et il serait absurde, du point de vue de l'utilisation de métal composant le fil, d'essayer de conduire un courant même de basse fréquence, avec un fil d'acier de diamètre supérieure à **4 mm**, car la section serait très mal utilisée puisque la matière centrale ne participerait pas à la conduction (surprenant n'est ce pas ! et si souvent passé sous silence dans les manuels d'électricité !!), mais comme on utilise pas l'acier comme conducteur, on en parle pas trop ! (voir : électrotechnique à l'usage des ingénieurs de A.Fouillé).

Lorsque le rayon du conducteur est du même ordre de grandeur que l'épaisseur de peau δ , la différence de résistance entre la résistance en courant continu et en HF n'est pas très sensible, l'effet de peau est d'autant plus prononcé que la section du conducteur est grande par rapport à l'épaisseur de peau δ . Par exemple, un conducteur de 6,5/100 de millimètres de diamètre, la résistance pour une fréquence de 1 MHz est augmentée de environ 1%, mais nous verrons ce que cela donne avec le fil couramment utilisé pour nos antennes (2,5 mm² par exemple - $\varnothing \approx 1,784$ mm).

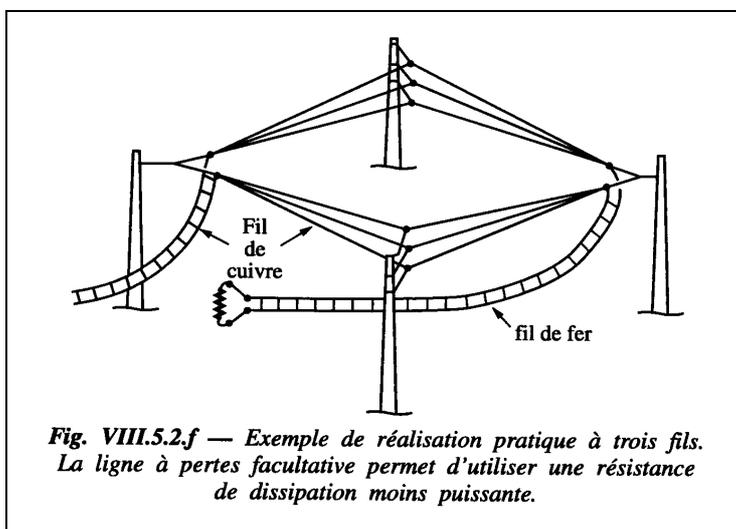
Et dans nos antennes ?

Dans son livre sur les antennes, André DUCROS – F5AD, écrit, au CHAPITRE IV – LES ANTENNES FILAIRES – paragraphe IV.1.2 – réalisation mécanique des antennes filaire, le texte suivant que je cite ci dessous :

« - La première question qui se pose est celle du fil à utiliser. Il faut un fil bon conducteur, solide et pas trop lourd. Le fil de fer est à éliminer d'office, car trop mauvais conducteur de la haute fréquence. Du fil à base de bronze (P.T.T.) présente l'avantage d'être relativement bon conducteur et, surtout, d'être très résistant à la traction. Malheureusement, sauf récupération, il est assez difficile de s'en procurer en petite quantité et l'on est obligé de se rabatte le plus souvent sur le fil de cuivre.

Il faut choisir un fil plein et non torsadé car les constituants de la torsade s'oxydent et, à la longue, ne font plus contact entre eux, ce qui rallonge électriquement l'antenne. »

L'auteur exploite d'ailleurs les pertes dans le fil de fer pour construire une « ligne à pertes » dans une antenne du type rhombic (chapitre VIII – antennes à large bandes et multibandes – paragraphe VIII.5.2 – L'antenne losange ou rhombic). Voici ci-dessous le passage (texte et image) nous concernant :



« L'impédance d'attaque dans l'exemple ci dessus est voisine de 600Ω , la résistance de charge doit être non selfique, de 600Ω elle aussi et capable de dissiper 1/3 de la puissance de l'émetteur. Cette résistance peut être placée directement en YY' ou n'importe où au sol, grâce à une ligne bifilaire 600Ω . Dans ce cas, cette ligne est réalisée en fil de fer galvanisé, la plus longue possible afin de présenter un maximum de pertes ohmiques, ceci permettant d'utiliser en charge une résistance de moindre puissance. »

Nous nous bornerons à faire une comparaison entre l'acier au carbone et le cuivre, et comme on l'aura compris, l'acier est à proscrire à cause des pertes, et il en est de même pour les autres matériaux ferreux, mais que représente t'elles par rapport au cuivre ?

Introduisons un rappel de la notion de rendement (η) d'une antenne (à ne pas confondre SVP avec le diagramme de rayonnement ou tout autre caractéristique de l'antenne !!). Le rendement d'un dispositif chargé de dissiper ou de produire de la puissance, quel qu'il soit, est égal à l'énergie réellement utile (dans notre cas, l'énergie rayonnée) divisé par cette énergie utile additionnée des pertes (dans notre cas, les pertes dans le fil d'antenne, le feeder, le sol, les masses métalliques environnantes). Il représente le pourcentage d'énergie utile libéré par le dispositif par rapport à l'énergie qui lui est fournie.

$$\text{rend.} = \eta = \frac{\text{Puissance utile}}{\text{Puissance utile} + \text{pertes}} \times 100 \text{ en \%}$$

Dans le cas d'une antenne, on démontre facilement que le rendement est égal à : $\eta = \frac{R_r}{R_r + r} \times 100 \text{ en \%}$

ou " R_r " représente la résistance de rayonnement d'une antenne et " r " représente une résistance équivalente à l'ensemble des pertes (dans les conducteurs de ligne et d'antenne, les masses environnantes, le sol, la végétation,)

Rappelons que la résistance de rayonnement d'une antenne, strictement à la résonance, est le rapport de la tension U_{eff} au courant I_{eff} , mesuré au niveau d'un ventre d'intensité. A ne pas confondre avec l'impédance au point d'alimentation qui peut varier très fort. Pour une antenne demis onde par exemple, lorsqu'elle est alimentée à l'extrémité, l'impédance en ce point est de plusieurs milliers d'ohms, et elle décroît jusqu'à un minimum de l'ordre de 73Ω au centre ou elle est alors égale à la résistance de rayonnement.

Pour l'exemple, considérons deux antennes doublet (environ $2 \times 5 \text{ m}$) fonctionnant dans la bande des 14 MHz, l'une en cuivre et l'autre en acier, et confectionnées chacune avec du fil de $2,5 \text{ mm}^2$ ($\emptyset = 1,784 \text{ mm}$ et donc, le rayon $R = 0,892 \text{ mm}$).

Note préliminaire aux calculs : si certain lecteurs seraient tentés de vérifier les calculs à la calculatrice, il constaterons que les résultats sont arrondis et le nombre de décimales limité; il est en effet stupide de travailler sur un trop grand nombre de décimales alors que les données de bases (résistivité et perméabilité) sont elles même déjà des valeurs données à quelques % près. En matière de technique, les calculs se font généralement avec une précision très suffisante de $\pm 2 \%$. Mais plus encore pour le sujet qui nous concerne, malgré les tolérances sur les valeur des caractéristiques des matériaux, les résultats sont très proches de la réalité et permettent ainsi de tirer les conclusions qui s'imposent.

D'abord quelques valeurs relatives à chacun des matériaux :

- Pour le cuivre écroui :

Perméabilité magnétique $\mu_r = 1$

Résistivité : $\rho = 1,75 \cdot 10^{-8} \Omega/\text{m}$ (valeur moyenne)

- Pour l'acier :

Perméabilité magnétique μ_r : on peut prendre une valeur moyenne de **1000** (valeur minimale car des valeurs bien supérieures sont atteintes, voir la littérature spécialisée à ce sujet)

Résistivité : $\rho = 13 \cdot 10^{-8}$ à $50 \cdot 10^{-8} \Omega/\text{m}$ (et plus) en fonction des matériaux constituant l'alliage.

Calcul de l'épaisseur de peau :

a) pour le fil de cuivre :
$$\delta = \frac{503300}{\sqrt{\frac{14 \cdot 10^6 \times 1}{1,75 \cdot 10^{-8}}}} = 0,0178 \text{ mm}$$

la section utile est : $S_u = \pi (R^2 - (R - \delta)^2) = \pi \cdot (0,892^2 - (0,892 - 0,0178)^2) = 0,099 \text{ mm}^2$

Résistance des 10 m de fils de l'antenne à la fréquence de 14 MHz, en prenant $\rho = 0,0175 \Omega/\text{m}/\text{mm}^2$:

$$r = \frac{\rho \cdot l}{S_u} = \frac{0,0175 \times 10}{0,099} = 1,77 \Omega$$

Pour le calcul du rendement, nous ne considérerons comme résistance équivalente des pertes, pour simplifier et pour avoir une base de comparaison entre les brins rayonnants, que la résistance du fil d'antenne, les autres sources de pertes seront négligées.

Si la résistance de rayonnement $R_r = 73 \Omega$, le rendement est égal à :

$$\eta = \frac{R_r}{R_r + r} \times 100 = \frac{73}{74,77} \times 100 = 97,6 \% \text{ c'est à dire excellent.}$$

b) pour le fil d'acier :

$$\delta = \frac{503300}{\sqrt{\frac{14 \cdot 10^6 \times 1000}{13 \cdot 10^{-8}}}} = 0,00153 \text{ mm}$$

la section utile est : $S_u = \pi (R^2 - (R - \delta)^2) = \pi \cdot (0,892^2 - (0,892 - 0,00153)^2) = 0,00857 \text{ mm}^2$

Résistance des 10 m de fils de l'antenne à la fréquence de 14 MHz, en prenant la valeur minimale de $\rho = 0,13 \Omega/\text{m}/\text{mm}^2$:

$$r = \frac{\rho \cdot l}{S_u} = \frac{0,13 \times 10}{0,00857} = 151 \Omega$$

Si la résistance de rayonnement $R_r = 73 \Omega$, le rendement est égal à :

$$\eta = \frac{R_r}{R_r + r} \times 100 = \frac{73}{73 + 151} \times 100 = 32,6 \% ; \text{ c'est à dire que plus de } \underline{60 \%} \text{ de la puissance arrivant à}$$

l'antenne est dissipée en chaleur dans le fil d'antenne ; ça fait beaucoup, et en tenant compte des autres pertes, le trafic devient un trafic en QRP sans que l'on s'en rende compte.

Les résultats montrent que l'acier est un matériau à exclure pour la confection des antennes, d'autant plus qu'il n'a pas été tenu compte, dans ce matériaux magnétique, des pertes par hystérésis et qui s'ajoutent aux pertes dont il est fait référence dans cet article.

Le calcul a été fait en prenant la résistivité la moins élevée pour les aciers (acier doux au carbone), et de nombreux autre type d'aciers peuvent êtres utilisés, qui présentent une perméabilité du même ordre de grandeur que celle de l'acier au carbone et une résistivité " ρ " généralement beaucoup plus grande, ce qui aggrave la situation.

En effet, l'augmentation de " ρ " provoque bien une augmentation de l'épaisseur de peau, mais cette grandeur est sous le radical, ce qui donne par exemple, pour une valeur double de la résistivité (il s'agit toujours d'une valeur courante pour les aciers), une épaisseur de peau " δ " seulement $\sqrt{2}$ fois plus grande, et donc une section de passage du courant $\sqrt{2}$ fois plus grande (puisque, à cause de la très faible épaisseur de peau vis à vis du diamètre, $S_u \approx (\text{épaisseur de peau } \delta \cdot \text{circonférence } (\pi \cdot d)) = \delta \cdot \pi \cdot d$), mais la résistance $r = \frac{\rho \cdot l}{S_u}$ devient :

$$r = \frac{2 \cdot \rho \cdot l}{S_u \cdot \sqrt{2}} = \frac{\sqrt{2} \cdot \rho \cdot l}{S_u} ; \text{ la résistance totale est donc multipliée par } \sqrt{2}.$$

Dans cet exemple, le rendement deviendrait : $\eta = \frac{73}{73 + (151 \times \sqrt{2})} \times 100 = 25,5 \%$

soit plus de 70 % de la puissance dissipée en chaleur !!!!

Pratiquement, pour une même perméabilité et avec les diamètres des conducteurs utilisés couramment pour nos antennes possédant un grand diamètre par rapport à l'épaisseur de peau, la résistance en HF du

conducteur augmente avec la racine carrée du rapport des résistivités ρ en courant continu : $\frac{r_2}{r_1} = \sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_1}}$.

Donc, malgré l'augmentation de l'épaisseur de peau δ l'augmentation de ρ est un facteur d'augmentation de la résistance aux courant HF

Pour un matériaux identique, la section de passage, pour une même fréquence, est proportionnelle au diamètre (même épaisseur de peau δ et circonférence proportionnelle au \emptyset puisque la circonférence = $\pi \cdot d$) et donc, la résistance est inversement proportionnelle au \emptyset (diminue lorsque \emptyset augmente).

Notez qu'il n'a pas été tenu compte, dans ce matériaux magnétique, des pertes par hystérésis et qui s'ajoutent aux pertes dont il est fait référence dans cet article!!.

Que penser des antennes boudinées en fil d'acier qui utilisent plus de fils qu'il n'en faudrait à cause de leur construction en spirale ? Le lecteur peut facilement refaire le calcul en considérant la longueur totale de fils utilisé.

La meilleur façon de construire une antenne filaire est l'utilisation, autant que possible, de fils rectilignes de longueurs les plus courtes possibles, et certainement d'éviter d'allonger inutilement la longueur du fil d'antenne. La bonne méthode pour augmenter la longueur électrique d'une antenne est d'y incorporer des réactances localisées (bobines insérées dans le brin rayonnant ou capacités terminales, ou les deux à la foi !!).

Bien entendu, aux pertes dans le fil d'antenne s'ajoutent celles dans la ligne d'alimentation et dans le coupleur (bien moins grandes qu'on ne le prétend en général !!!). En cas de stationnaires et d'une antenne alimentée par une ligne coaxiale, les pertes supplémentaires peuvent devenir sensibles, surtout dans le haut de la bande HF, et dans le cas d'une antenne ayant déjà un mauvais rendement, voyez ce que cela peut donner comme résultat final.

Le matériau à utiliser sera donc le cuivre. Un fil de 2,5 à 4 mm² (jusque 6 mm² pour les cas difficiles) est suffisamment résistant pour supporter les contraintes mécaniques qui lui seront imposées, dans la plupart des cas, pour une antenne filaire classique. L'augmentation de la section, avec de la matière mal utilisée puisque non parcourue par le courant HF, fait apparaître un autre phénomène gênant et cause de pertes, ce sont les **courants de Foucault** dans la matière. C'est la raison pour laquelle, au delà de ces sections, on diminue la quantité de matière dans les conducteurs des bobines pour fortes puissance en utilisant du tube de cuivre de façon à augmenter la section de passage (augmentation de la circonférence du conducteur).

L'acier ne convient bien que comme support mécanique, il doit être accompagné d'un conducteur digne de ce nom pour assurer la conduction du courant HF, ou bien occuper le centre du conducteur (fil d'acier enrobé).

On m'a rapporté l'existence d'antenne commerciale réalisées en fils d'acier, il est vrais que dans le domaine des antennes, et surtout dans celui des antennes filaires, on vous vend du fil au prix d'or, mais aussi parfois du fil totalement inadéquat pour le rôle qu'il aura à jouer.

J'ai peut être bousculé quelques idées préconçues et même entretenue sur certains site radioamateurs !!!, ou bien tout simplement rappelé une notion qui ne vient pas naturellement à l'esprit ? mais le seul but de cet article est de tenter d'être utile, et en espérant y être arrivé.

ON5HQ - on5hq@skynet.be