

# INFLUENCE DE LA FERRITE

## DANS UNE BOBINE D'EMISSION

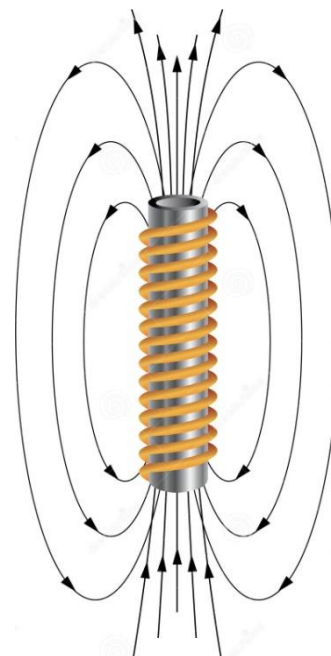
### DE BALISE DE POSITIONNEMENT SOUTERRAIN

Lorsqu'on utilise une bobine d'émission de faible diamètre, on peut penser avantageux d'insérer une ferrite dans la bobine pour canaliser les lignes de champ et ainsi augmenter le flux magnétique et donc la portée.

Cela vaut-il alors vraiment la peine de mettre en place des ferrites qui rajoutent du poids et de la fragilité à la balise ?

C'est pour lever cette indétermination que j'ai réalisé cet essai.

La conclusion est sans appel, pour les ferrites au MnZn utilisées.



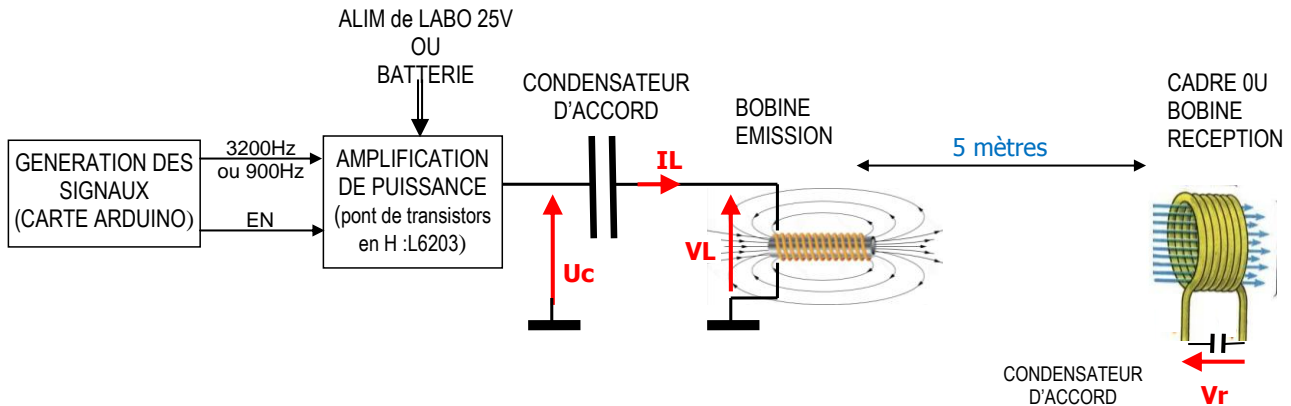
Sommaire interactif

<b>PRINCIPE DE L'ESSAI</b> .....	<b>2</b>
<b>EXPERIMENTATION</b> .....	<b>3</b>
Mesures à 900Hz : .....	4
Mesures à 3200Hz :.....	4
Quelle fréquence choisir ?.....	4
<b>ANALYSE DU COMPORTEMENT DE LA BOBINE</b> .....	<b>5</b>
Influence de la fréquence .....	6
bobine sans la ferrite .....	6
Bobine avec la ferrite.....	8
Spécificités d'un bobinage plus efficace.....	8
Pertes fers dans la ferrite.....	9
<b>CONCLUSION GENERALE</b> .....	<b>9</b>

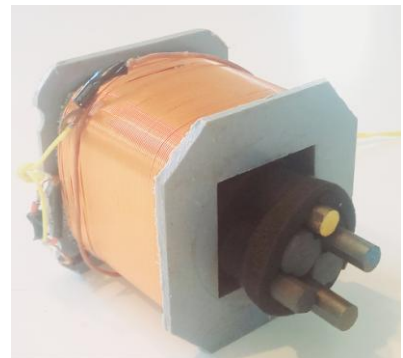
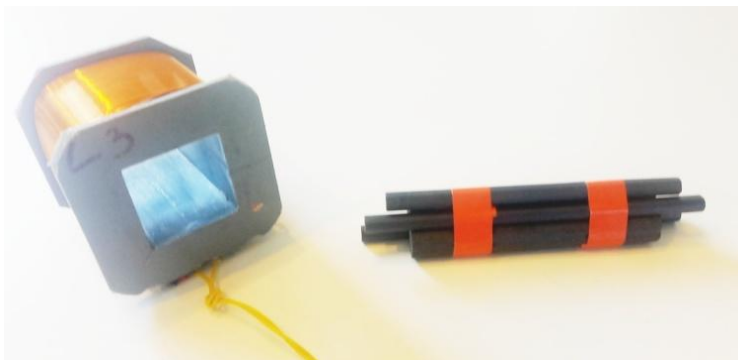
## PRINCIPE DE L'ESSAI

J'ai utilisé une bobine proche mais moins performance que celle mise en œuvre dans la balise existante BIPSE. Elle sera testée dans les mêmes conditions d'utilisation à savoir commandée par la carte électronique d'émission du DISTAM qui délivre des salves de sinusoïdes de 10V d'amplitude.

La bobine réceptrice est constituée du cadre bobiné du récepteur ARCAS. Placée à 5m de la bobine d'émission, elle donnera un signal fonction du champ magnétique émis.



Bobine d'émission : 1000 spires en 10 couches sur un carré moyen de 6,5cm de côté en fil de 0,8mm de diamètre. Les spires et les couches sont jointives.



Pour les ferrites, on a choisi des modèles en MnZn sous forme de 2 bâtons de 18mmx140mm et 4 bâtons de 10x200mm. Ce sont des modèles d'usage courant en électronique, utilisés par exemple comme antenne dans des récepteurs radios.

On n'a pas rempli complètement l'espace disponible, car au pont d'impédance, on a constaté que l'inductance de la bobine n'augmentait quasiment plus à partir d'une certaine quantité de ferrites.

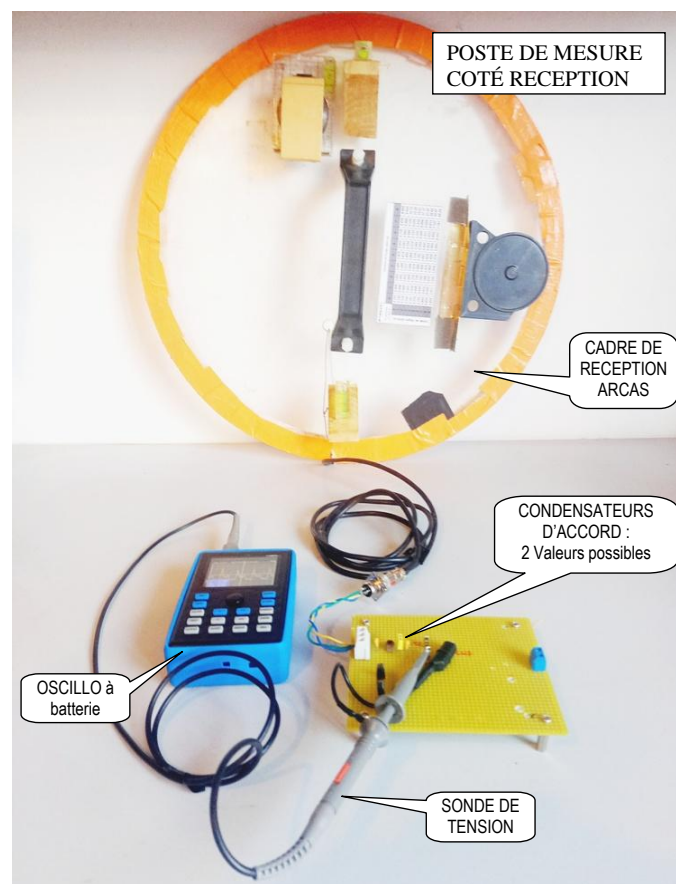
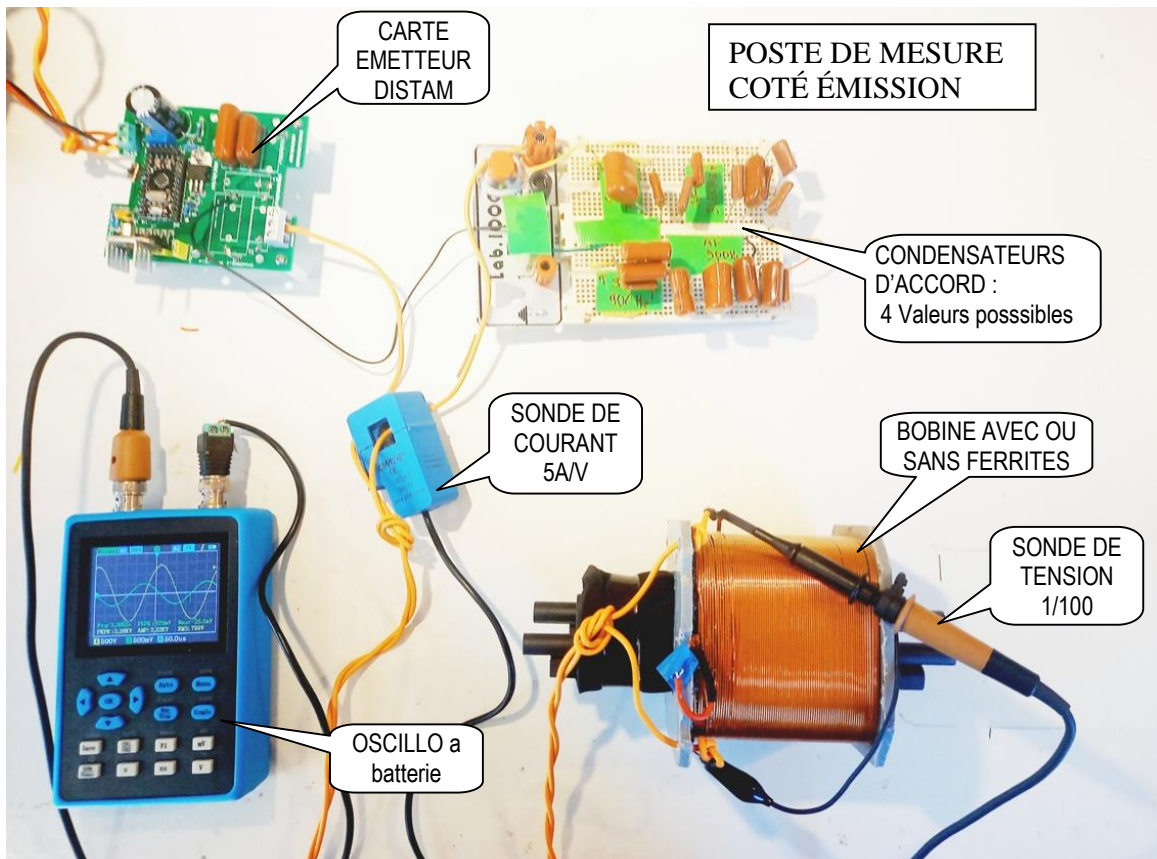
Je n'ai pas réussi à avoir la référence exacte du matériau utilisé pour la ferrite et donc ses caractéristiques précises.

La plupart des balises fonctionnent entre 900Hz et 3500Hz. Les essais se sont effectués à 900Hz (fréquence de l'ARCANA) et à 3200Hz (fréquence du BIPSE, de l'ARCAS et du DISTAM). Les bobines à l'émission comme à la réception seront à chaque fois accordées avec une capacité appropriée. Ce qui correspond aux conditions d'exploitation.

On mesure l'amplitude du signal aux bornes de la bobine réceptrice afin de pouvoir comparer les différentes situations (avec ou sans ferrite pour chacune des fréquences).

Pour analyser le fonctionnement de la bobine d'émission, on mesure aussi l'amplitude du courant dans la bobine  $I_L$  et l'amplitude de la tension  $V_L$  à ses bornes.

## EXPERIMENTATION



Pour chaque colonne la bobine d'émission et le cadre de réception sont accordés avec une capacité à la fréquence considérée.

EXTRAIT DU TABLEAU COMPLET DES MESURES						
			à 900Hz		à 3200Hz	
Grandeurs mesurées			Sans ferrite	Avec ferrite	Sans ferrite	Avec ferrite
Amplitude du signal aux bornes du cadre de réception accordée à la fréquence considéré et placé à 5m.	Vr	mV	145mV	302mV	502mV	640mV
Gain en signal apporté par la ferrite				+108%		+27%
Gain en portée apporté par la ferrite				+25%		+8,4%

### Mesures à 900Hz :

On constate qu'à 900Hz le cadre récepteur délivre 2 fois plus de signal quand la bobine d'émission est équipée de ferrites. Cela signifie que le champ magnétique émis est 2 fois plus intense. Dans l'air, le champ magnétique décroît proportionnelle au cube de la distance. A 900Hz La portée de la bobine avec ferrite sera multipliée par la racine cubique de 2 soit de 25%.

Pour doubler le champ magnétique sans utiliser la ferrite et en gardant la même longueur de fil de cuivre, on aurait pu, tout aussi bien, l'enrouler sur un diamètre 2 fois plus grand. Le poids du cuivre étant le même, on aurait une bobine un peu plus large, mais moins haute et surtout allégée du poids de la ferrite et de sa fragilité.

### Mesures à 3200Hz :

On constate que la présence de la ferrite n'augmente que de 27% l'intensité du champ magnétique !

### Quelle fréquence choisir ?

On voit que le signal délivré par le cadre récepteur est plus élevé quand on passe de 900Hz à 3200Hz. C'était prévisible car la bobine du cadre de réception fournit une force électromotrice induite régit par la loi de Lentz, qui dit que son amplitude augmente avec la vitesse de variation du flux donc avec sa fréquence. En conséquence pour une même amplitude du champ magnétique, l'amplitude du signal délivré par la bobine réceptrice sera plus élevée à 3200Hz qu'à 900Hz.

Par ailleurs, la plupart des récepteurs, envoient le signal du cadre récepteur à un casque d'écoute, après l'avoir amplifié et filtré. Il se trouve que l'oreille moyenne à son seuil d'audibilité le plus bas vers 3000Hz. Ainsi un signal au seuil de détection à 3000Hz sera inaudible à 900Hz.

C'est pour ces 2 raisons que la plupart des balises ont opté pour une fréquence voisine de 3kHz.

Certains rétorqueront que le 900Hz traversera avec moins d'atténuation le calcaire que le 3200Hz. Oui mais dans une moindre mesure. En effet grâce aux études théoriques et, en particulier celles de Ian DRUMMOND , on constate que dans un calcaire de résistivité moyenne (1000Ω.m) , l'atténuation du champ magnétique à travers 100m de roche n'est augmentée que de 1% quand on passe de 900Hz à 3200Hz.

### La bonne fréquence :

En cas de réception directe sur un casque d'écoute, le choix d'une fréquence voisine de 3kHz est le plus approprié.

## ANALYSE DU COMPORTEMENT DE LA BOBINE

Il s'agit ici de trouver une explication aux résultats obtenus

Pour cette analyse on va s'appuyer du tableau complet des mesures

- Pour chaque colonne de mesure ci-dessous, on a ajusté le condensateur d'accord (Cacc) pour avoir l'amplitude du courant IL dans la bobine maximal. Celui-ci est mesuré à l'oscilloscope avec une sonde à transformateur de courant.
- La valeur du condensateur d'accord a ensuite été mesurée au pont RLC.
- La valeur de la résistance équivalente série (ESR) de la bobine, a été calculée en faisant  $ESR = 10/IL$ , 10 étant l'amplitude de la tension de commande sinusoïdale  $U_c$  délivrée par l'émetteur à la bobine d'émission via le condensateur d'accord.
- La valeur de l'inductance de la bobine a été calculée à partir de celle du condensateur et de la fréquence à partir de la condition de résonnance :  $L = 1/(4\pi^2 C f^2)$ .
- On a ensuite mesuré la valeur de l'inductance de la bobine au pont RLC bas niveau, pour trouver sensiblement le même résultat, ce qui prouve la non saturation de la ferrite.
- La valeur de l'amplitude de la tension aux bornes de la bobine d'émission a été mesurée à l'aide l'oscilloscope à batterie via une sonde de rapport d'atténuation 100.



TABLEAU COMPLET DES MESURES						
			à 900Hz		à 3200Hz	
Grandeurs mesurées			Sans ferrite	Avec ferrite	Sans ferrite	Avec ferrite
Condensateur d'accord	Cacc	nF	666nF	166,4nF	52,66nF	12,96nF
Inductance calculée $L = 1/(4\pi^2 C f^2)$	L		47mH	190mH	47mH	190mH
Amplitude Courant bobine	IL	A	2,4A	1,20A	1,5A	0,47A
Résistance Equivalente Série calculée : $10/IL$	ESR	$\Omega$	4,16 $\Omega$	8,3 $\Omega$	6,7 $\Omega$	21,3 $\Omega$
Amplitude tension bobine	VL	V	1125V	2300V	1380V	2540V
Amplitude signal cadre réception à 5m	Vr	mV	145mV	302mV	510mV	640mV

## Influence de la fréquence

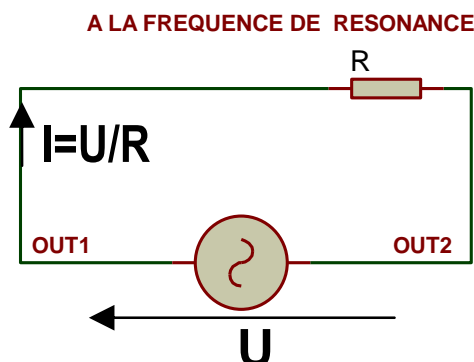
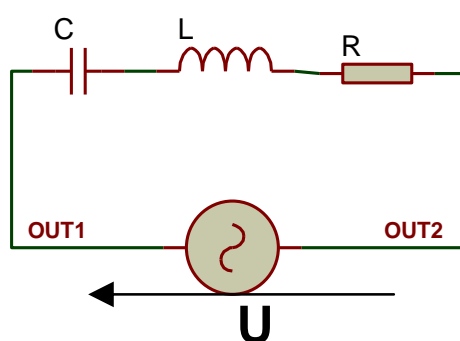
On a isolé dans ce tableau le courant mesuré et la résistance Equivalente Série calculée.

EXTRAIT DU TABLEAU DES MESURES						
Grandeurs mesurées			à 900Hz		à 3200Hz	
			Sans ferrite	Avec ferrite	Sans ferrite	Avec ferrite
Amplitude Courant bobine	IL	A	2,4A	1,20A	1,5A	0,47A
Résistance Equivalente Série calculée : 10/IL	ESR	Ω	4,16 Ω	8,3 Ω	6,7 Ω	21,3 Ω

### bobine sans la ferrite

En absence de ferrite on constate que le courant passe de 2,4A à 900Hz à 1,5A à 3200Hz, soit une diminution de 37%, alors qu'idéalement, il devrait être le même.

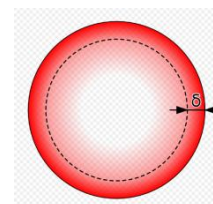
A l'accord, l'ensemble bobine-condensateur se comporte comme la résistance équivalente série  $R=ESR$  de la bobine



Comme l'amplitude de la tension de commande  $U$  est la même à 900Hz et à 3200Hz. Cela signifie que la résistante équivalente série a augmenté dans le rapport des courants qui vaut  $2,4/1,5=1,6$ , soit un accroissement de 60%.

### L'EFFET DE PEAU

On peut penser à l'effet de peau. En effet, il se traduit par le fait qu'en montant en fréquence, le courant a tendance à circuler sur la périphérie du conducteur en abandonnant le centre de celui-ci. La section utile du conducteur diminue et sa résistance augmente.



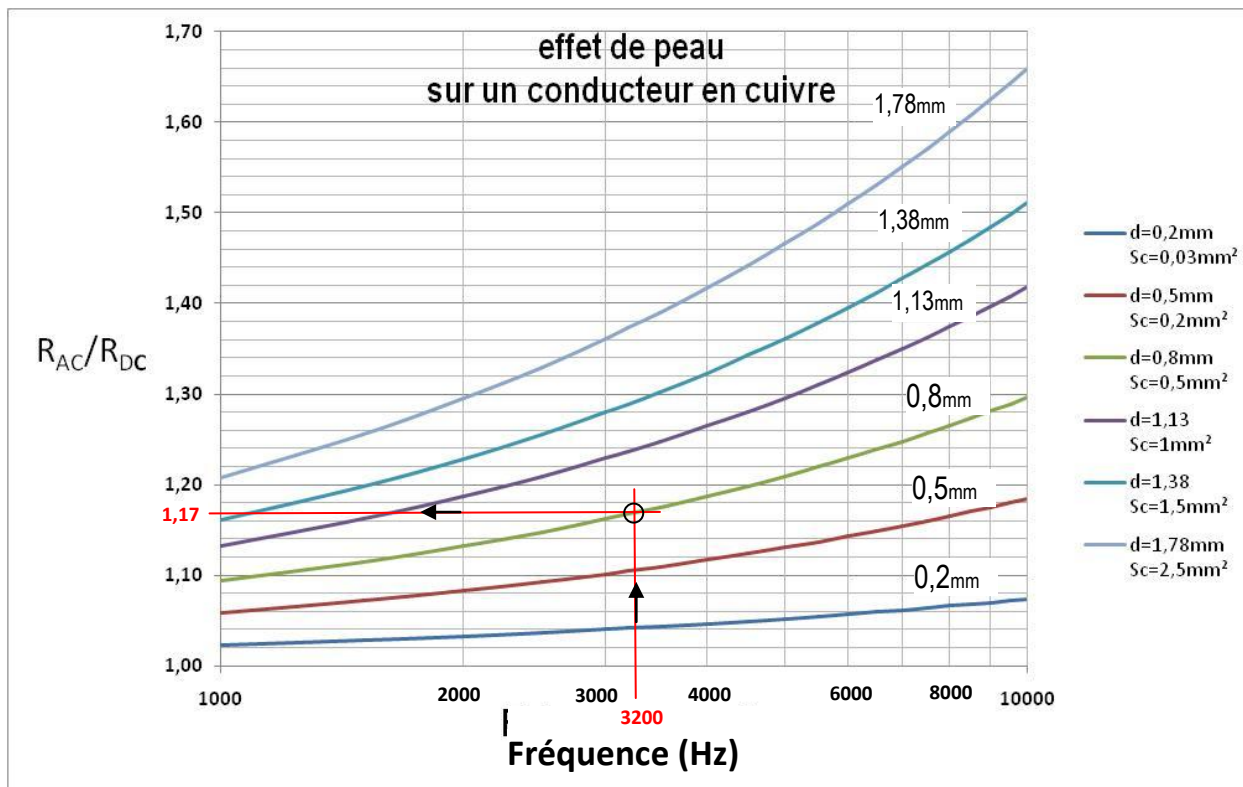
Un conducteur est caractérisé par son « épaisseur de peau »  $\delta$  ou « profondeur de pénétration ». Elle détermine, en première approximation, la largeur de la zone où se concentre le courant dans un conducteur. Pour un fil de cuivre à 20°C dont la résistivité est de  $1,8 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$ , on a

$$\delta_{mm} = \frac{67,5}{\sqrt{f}}, \text{ soit } 1,2\text{mm à } 3200\text{Hz et } 2,25 \text{ à } 900\text{Hz}.$$

Pour que l'effet de peau soit négligeable il faut que le diamètre du fil soit très inférieur à l'épaisseur de peau. Dans notre cas, le diamètre du fil (0,8mm) n'est pas très inférieur à l'épaisseur de peau (1,2mm).

L'abaque que j'ai établi ci-dessous, permet de déterminer exactement l'augmentation ( $R_{AC}/R_{DC}$ ) de la résistance en fonction de la fréquence et du diamètre du fil  $d$  en mm.

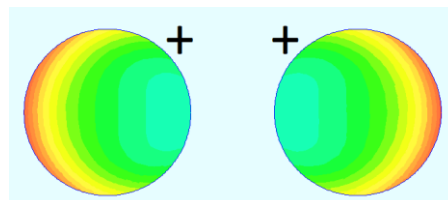




Sur cet abaque, on voit qu'à 3200Hz, avec un fil de diamètre 0,8mm (Section de 0,5mm<sup>2</sup>), la résistance augmente de 17%. A 900hz, arrondi à 1000Hz sur l'abaque, l'augmentation n'est que 10%. Il n'y a donc qu'un écart de 7% d'augmentation quand on passe de 900Hz à 3200Hz. L'effet de peau ne justifie pas donc à lui tout seul l'augmentation constatée de 37%, il manque donc 30% .

### L'EFFET DE PROXIMITÉ

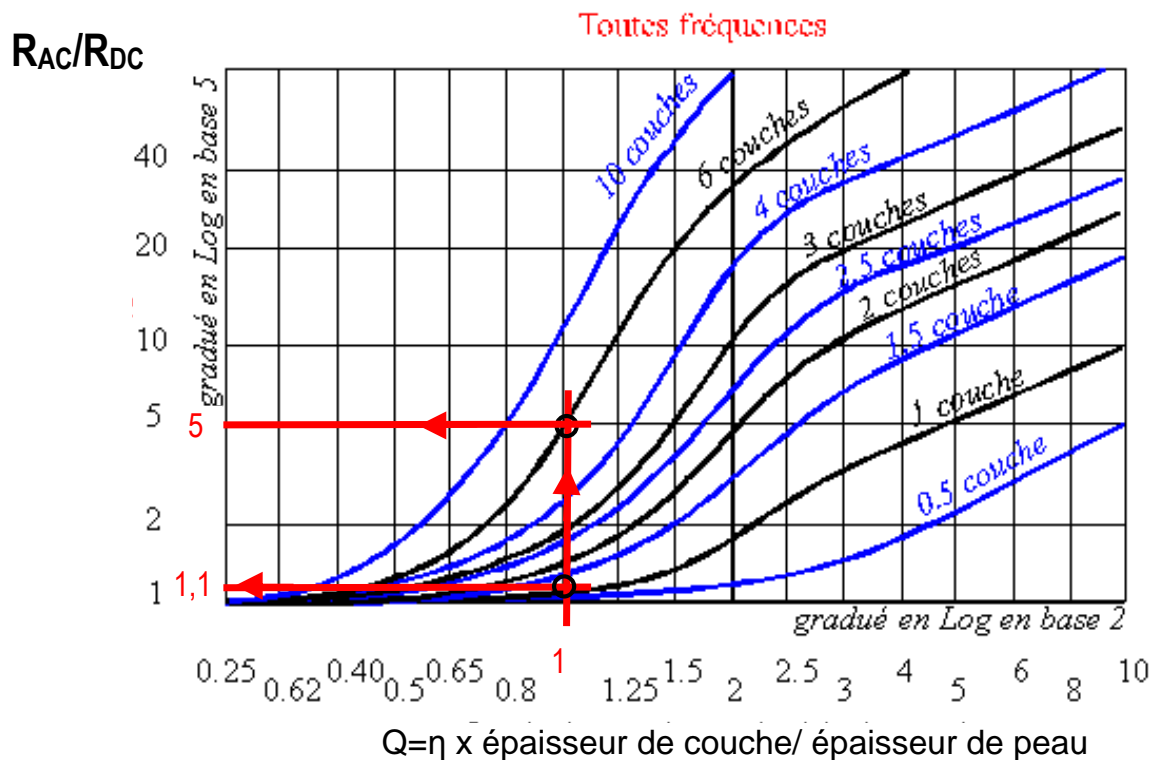
Dans un bobinage quand les spires et les couches sont jointives, chaque conducteur va être soumis au champ magnétique de son voisin. Lorsque les courants sont dans le même sens, cette promiscuité va conduire les charges à abandonner les zones périphériques de proximité avec les autres conducteurs. L'effet de proximité peut être bien supérieur à l'effet de peau et il croît de façon importante en fonction du nombre de couches.



L'abaque de DOWEL, permet de déterminer l'augmentation de la résistance en alternatif ( $R_{AC}$ ) par rapport à la résistance en continue ( $R_{DC}$ ) en fonction du nombre de couches et du rapport Q de l'épaisseur de la couche par rapport à l'épaisseur de peau affecté d'un coefficient  $\eta$

$\eta$  est appelé coefficient de porosité et est  $<1$ . Il dépend de la forme de la section des conducteurs et de leur espacement. Malheureusement dans la littérature on trouve des valeurs différentes de  $\eta$  pour des conducteurs de section circulaires émaillés.

Je donne malgré tout l'abaque pour montrer l'influence importante du nombre de couches, ainsi par exemple pour  $Q=1$ . Avec un enroulement en 1 couche, l'augmentation de la résistance sera inférieure à 10%, alors qu'avec 6 couches, elle sera de 500% !!!



Dans notre cas, l'enroulement fait 10 couches et l'augmentation est de 30%, ce qui signifierait que d'après l'abaque le coefficient de porosité à appliquer serait de 0,45.

### Bobine avec la ferrite

Quand on bascule de 900Hz à 3200Hz, on constate une diminution beaucoup plus grande du courant que sans la ferrite, puisqu'elle passe de 1,2A à 0,47A soit une diminution de 61%, contre 37% sans la ferrite.

Les effets de peau et de proximité des conducteurs jouent tout autant quand on place une ferrite, mais il se rajoute des autres causes pour passer de 37% de diminution à 61%.

Les causes possibles sont les pertes fers dans la ferrite. Les pertes fers regroupent les pertes par courants de Foucault et les pertes par hystérésis. Même si les ferrites sont conçues pour minimiser ces pertes, elles n'en sont pas moins existantes.

### Spécificités d'un bobinage plus efficace

**Pour limiter l'augmentation de la résistance de la bobine liée à la fréquence, on séparera les couches du bobinage avec une épaisseur d'isolant pour limiter l'effet de proximité. On pourra aussi, augmenter la longueur du bobinage pour diminuer le nombre de couches.**

**Dans le cas de notre bobine, cela devrait augmenter de près de 30% le courant et donc le champ magnétique émis.**



## Pertes fers dans la ferrite

EXTRAIT DU TABLEAU DES MESURES						
Grandeurs mesurées			à 900Hz		à 3200Hz	
			Sans ferrite	Avec ferrite	Sans ferrite	Avec ferrite
Inductance calculée $L=1/(4\pi^2 C f^2)$	L	H	47mH	190mH	47mH	190mH
Amplitude Courant bobine	IL	A	2,4A	1,20A	1,5A	0,47A
Amplitude signal cadre réception à 5m	Vr	mV	145mV	302mV	510mV	640mV

Dans le tableau ci-dessus, l'inductance L calculée en charge correspond à la mesure bas niveau au pont RLC, on peut en déduire que la ferrite ne sature pas.

Dans ce cas le flux propre  $\Phi$  de la bobine d'inductance L parcouru par un courant I s'exprime par l'expression  $\Phi = L.I_L$ . On fait l'hypothèse que cette relation reste vérifiée en présence de la ferrite.

Quand on place la ferrite, l'inductance passe de 47mH à 190mH avec. **A même courant** le flux magnétique est multiplié ici par  $190/47=4$ .

Il est normal que cette augmentation ne soit pas très grande car la canalisation des lignes de champ ne s'effectue pas sur toute la longueur des lignes de champ, mais uniquement au niveau de la bobine.

Quelque soit la ferrite, on reste en général dans ces ordres de grandeurs. On peut citer Brian Pease qui a remplacé des bâtons de ferrites par des tores de ferrites en NiZn mis bout à bout. Ce qui lui a permis une multiplication par environ 7 de l'inductance.

Sur notre bobine la multiplication par 4 de l'inductance de ne se traduit pas par une multiplication par 4 du flux émis.

Sachant que la tension délivrée par le cadre de réception est proportionnelle au flux émis par la bobine.

### A 900Hz :

On note un gain de  $302/145=2$  au lieu de 4 du signal aux bornes du cadre de réception. On mesure une atténuation du courant par  $2=2,4A/1,2A$ , elle ramène le gain du flux à  $4/2=2$ .

### A 3200Hz :

C'est pire, car on ne mesure qu'un gain en flux de  $640/502=1,25$  au lieu de 4. On relève une atténuation du courant de  $3,2=1,5A/0,47A$ , elle ramène le gain du flux à  $4/3,2=1,25$

Comme  $\Phi = L.I_L$ , ces écarts montrent que si la présence de la ferrite augmente l'inductance L, par contre elle diminue le courant  $I_L$  de façon croissante avec la fréquence. Cette chute du courant pouvant être incriminée aux pertes fer dans la ferrite. Celles-ci croissent elles aussi avec la fréquence.

## CONCLUSION GENERALE

**La multiplication du flux magnétique liée à l'usage des ferrites déjà limitée à quelques unités est, dans le cas d'une alimentation à résonance série, affaiblie par une diminution du courant probablement due aux pertes fers. Plutôt que de placer des ferrites, il est préférable d'augmenter le diamètre de la bobine d'émission, en gardant la même longueur de fil. Ainsi, pour un même flux, on gagnera en poids et en solidité. Dans ce contexte, l'utilisation de ferrites ne présente que des inconvénients.**