

LE SIGNAL DU CADRE DE TSF

Citation de Paul Berché dans sa préface de «Pratique et théorie de la TSF», à Garches, le 15 septembre 1927: certains «ouvrages didactiques de TSF... arrivent simplement à embrouiller à jamais les idées claires que tout amateur de TSF pourrait avoir...».

Aujourd'hui, avec internet, les choses se sont aggravées. Récemment, j'ai pu lire sur des sites de radio une bien étrange affirmation: «...un cadre de TSF n'est sensible qu'au champ magnétique H et non pas au champ électrique E» Ce qui signifierait:

1 que Maxwell aurait tort et que sa première équation $\text{rot} E = \frac{-(\partial B)}{(\partial t)} = -\mu \frac{(\partial H)}{(\partial t)}$

serait fausse. Je rassure nos amis de la Radio: cette terrifiante équation, vectoriellement cryptée, prend, dans l'air ou le vide, une forme **ultra-simple** lorsque l'émetteur est loin du récepteur, car les ondes sont planes (dans le plan perpendiculaire à l'axe de propagation, E et H conservent leur valeur dans tous les points du plan) :

$$E = \mu_0 \cdot c \cdot H$$

E en V/m, H en A/m, rappelons que l'induction B est reliée à H par : B = μ.H,

Dans l'air ou le vide: $\mu = \mu_0$

Perméabilité magnétique du vide: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ A/m}$, vitesse de la lumière: $c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

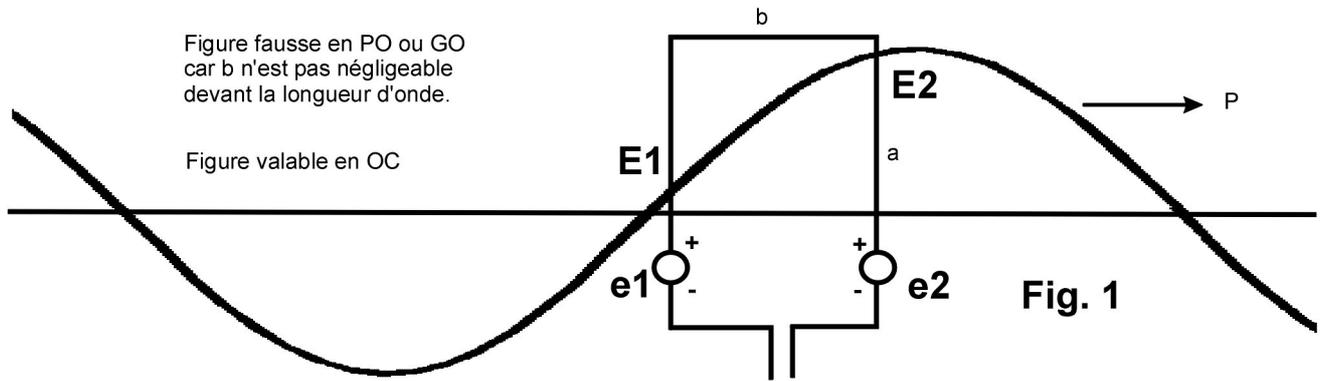
Cette formule exprime que si H est l'action, alors on peut calculer E. Inversement, si E est l'action, on en déduit la valeur de H. En d'autres termes, cela signifie que si H produit un effet, E produit nécessairement le même. On ne peut additionner les résultats produits par E et par H. Il faut donc choisir **l'un ou l'autre**, mais pas les deux en même temps, **ni dire que l'un peut agir et l'autre non**. Ce qui peut troubler les esprits, c'est que pour calculer l'action de E il faut utiliser une loi physique et que pour calculer le même résultat produit par H, il faut passer par une loi physique différente... Peut-être la source des confusions ?

Des valeurs numériques: si E = 1 μV/m, alors H = 2,65 nA/m, impédance du vide : $\frac{E}{H} = 377 \text{ Ohms}$

2 que le fil métallique du cadre serait de nature différente de celui d'une antenne. Existerait-il un métal spécial pour les cadres présentant l'incroyable propriété d'éliminer l'action du champ électrique sur les électrons libres du cuivre?

Alors? Farces ou attrapes? Plutôt l'oubli des phénomènes de base actuellement admis par les physiciens. Cela conduit à raisonner faux sur des figures justes, à l'inverse de ce que l'on dit pour la géométrie. Ajoutons que certains auteurs déclarent que pour expliquer le fonctionnement d'un cadre, on n'a pas besoin des équations de Maxwell. Cela est vrai au plan technique, mais laisse régner la confusion au niveau de l'explication du principe.

Pour nous consoler je dois signaler que nos pionniers ont aussi donné dans le passé d'étranges explications, mais eux sont excusables, car ils défrichaient des terrains vierges. Sans vouloir offenser leur mémoire, je citerai seulement un passage de R. Mesny dans «La TSF en 30 Leçons» (1924) au chapitre «Radiogoniométrie» qui tente de nous expliquer ce qui se passe dans un cadre (fig, 1). Il nous dit que dans le fil du cadre la f.é.m. résulte de la différence de celles qui sont créées en sens inverse dans chacun des côtés verticaux du cadre. C'est presque vrai. Mais il y faut apporter un gros «bémol»: l'amplitude du champ électrique au niveau des côtés est pratiquement le même, car la distance entre ces côtés est très faible devant la longueur d'onde (PO ou GO) et la distance de l'émetteur. Si la différence des f.é.m. est notable , **c'est à cause du retard** du champ électrique entre les deux côtés verticaux et **non pas de la seule valeur instantanée**. Ce retard, c'est le temps que met l'o.é.m. pour aller d'un côté à l'autre du cadre. Bref, il y a eu et il y a encore du «cafouillage» autour de l'antenne et du cadre.



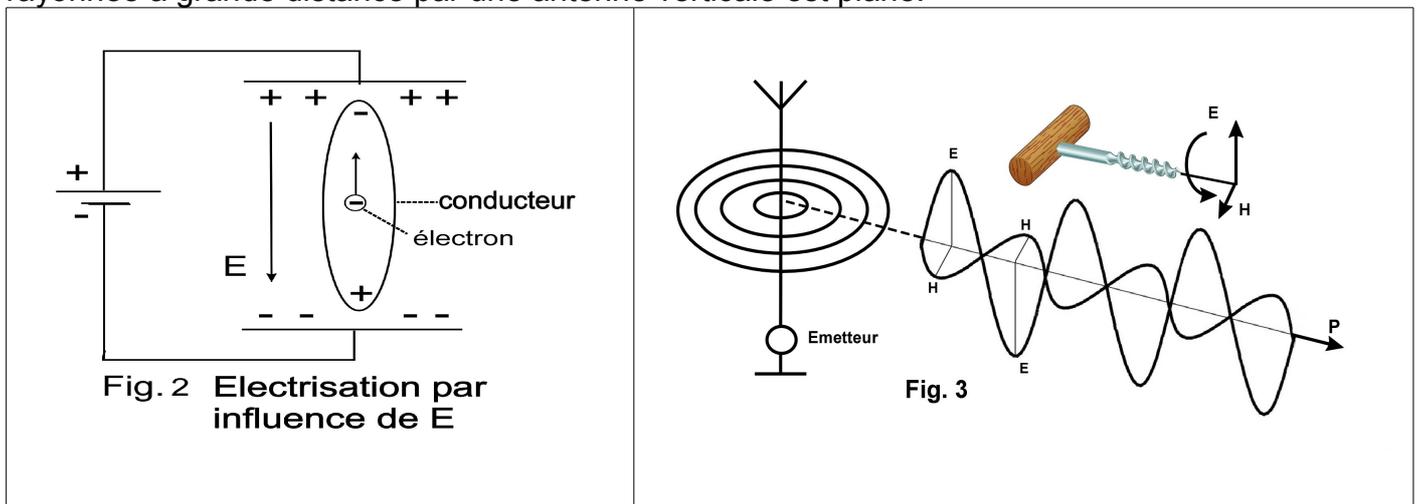
Un événement historique de taille témoigne cependant en faveur des pionniers: les lois de l'induction magnétique ont été établies au 19ème siècle **avant la découverte de l'électron**, porteur de charge négative dans le métal. Mais **on a continué** à s'en servir après et même actuellement. Leur application, bien qu'approximative, donne des résultats suffisamment précis pour que tout le monde soit content. Le cadre est une boucle ; il est sensible au champ électrique, mais on peut calculer approximativement la f.é.m. qu'il délivre en appliquant les lois de l'induction par B (ou H). La commodité et l'usage traditionnel des lois et règles de l'induction magnétique expliquent certainement cette dérive scientifiquement discutable. L'action du champ électrique E suffit à expliquer les phénomènes dans l'antenne et le cadre, et même dans tous les circuits conducteurs soumis à l'influence du champ électrique.

Sur d'autres documents, j'ai pu lire aussi:

«dans le rayonnement de sources électromagnétiques locales, c'est le champ électrique qui domine»; et aussi: «on peut comparer le champ électrique et le champ magnétique d'une onde pour voir quel est le plus grand ! »;etc...

Autant d'affirmations qui arrangent leurs auteurs et tout le monde , puisque de toute façon on arrive à faire marcher tous ces appareils. Ici, donc, la **«science des affirmations»** domine et semble avoir le dernier mot, comme on le voit aussi à propos de la réaction et de la contre-réaction, du changement de fréquence et encore de la détection grille... Les jeunes et futurs lecteurs, dont le niveau de culture n'a cessé **d'augmenter** ces dernières années, pourraient sourire à la lecture de telles explications sur les radios anciennes. Je propose ici une modeste contribution au rétablissement de la vérité scientifique (enfin, peut-être...) .

Quelques rappels fondamentaux. Dans un conducteur métallique il y a beaucoup d'électrons libres qui ne demandent qu'à se déplacer sous l'influence d'un champ électrique E (fig, 2). La solution sinusoïdale des équations de Maxwell dans le vide ou l'air nous indique que l'o.é.m. rayonnée à grande distance par une antenne verticale est plane.



Elle se compose d'un champ électrique E et d'un champ magnétique H orientés selon Poynting (fig, 3) $P=E \times H$ et la règle du tire-bouchon. Le champ électrique à la **distance r** de l'antenne vaut (formule du doublet de Hertz):

$$E = \omega \mu_0 \left(\frac{1}{r} \right) \left(\frac{M}{4\pi} \right) \sin \left(\omega t - kr + \frac{\pi}{2} \right) \quad k = 2 \frac{\pi}{\lambda}$$

$\omega = 2\pi F$, F fréquence de l'o.é.m. $M = I.h$, M moment de l'antenne où I est le courant dans le fil vertical de longueur h mètres, $h \ll \lambda$, la longueur d'onde; t, le temps.

Application au cadre de TSF.

Sur la figure 4 on représente une boucle d'un cadre rectangulaire dans le plan de propagation de l'o.é.m. Le côté vertical $a = 60$ cm, le côté horizontal $b = 30$ cm. On choisit $F = 1$ MHz, dans la gamme PO. Donc $\lambda = 300$ m et a et $b \ll \lambda$ ($60 \text{ cm} \ll 300 \text{ m}$). L'électricité nous enseigne que **la f.é.m. induite dans le fil de longueur a** par le champ électrique E vaut : $e = E.a$ volt, où E est donné en V/m et a en mètres. Du côté 1 on a: $e_1 = E_1.a \sin(\omega t)$. Du côté 2 : $e_2 = E_2.a \sin(\omega(t-\tau))$, où $\tau = b/c$, retard de l'onde entre les côtés 1 et 2, c est la vitesse de la lumière. Avec $M = 10$ A-m, $I = 2$ Ampères, $h = 5$ mètres, $S = a.b$, on a fait le calcul de la f.é.m. induite dans le fil du cadre par l'o.é.m.

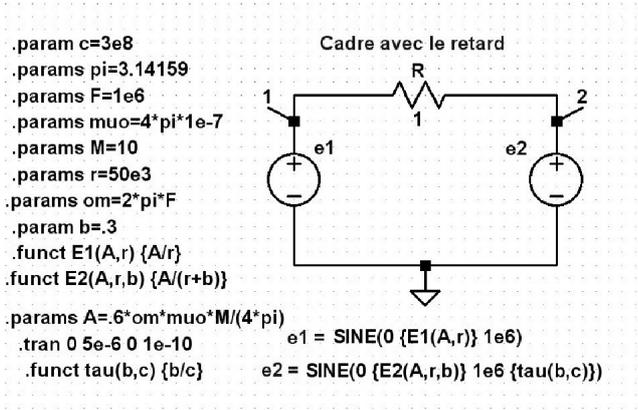
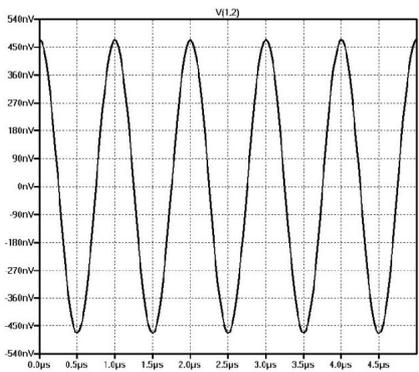


Fig. 4



Calcul de la f.é.m. dans l'enroulement du cadre :

<p>A partir du champ électrique E :</p> <p>$e = e_2 - e_1 = (-E_1 \sin \omega t + E_2 \sin \omega(t-\tau)).a$</p> <p>Approximations : si $b \ll \lambda$, $\sin \omega t \approx \omega t$ et $E_1 \approx E_2 = E$ $\cos \omega t \sim 1$</p> <p>l'onde est plane, donc : $E = \mu_0 . c . H$</p> <p>D'où la formule simplifiée : $e = - S . \mu_0 . H . \omega . \cos \omega t$</p>	<p>A partir de la loi de l'induction :</p> <p>$e = \frac{-d\phi}{dt} = -S \left(\frac{dB}{dt} \right)$</p> <p>$e = - S . \mu_0 . H . \omega . \cos \omega t$</p>
---	---

Les deux formules sont identiques : le calcul par E ou par B donne le même résultat. La formule simplifiée peut aussi s'écrire : $e = E.a.\omega.\tau.\cos \omega t$. L'antenne émettrice est à 50 km.

Le tableau ci-dessous résume les calculs des amplitudes:

E1	E2	E1-E2	(e1-e2) sans retard (E1sin $\omega t - E2sin\omega t$).a	(e1-e2) avec retard τ (E1sin $\omega t - E2sin\omega(t-\tau)$).a
125,6636 $\mu\text{V/m}$	125,6628 $\mu\text{V/m}$	75,67 nV/m	0,458 nV	473 nV

Les champs E1 et E2 sont égaux à 0,6/1000 près. L'effet du retard τ est éloquent :

(e1-e2) avec retard = **1032 fois plus grand** que (e1-e2) sans le retard.

C'est phénoménal, car pour le cadre de largeur horizontale 30cm, ce retard vaut seulement **1 nanoseconde**.

On voit aussi que le calcul par la loi de l'induction est une approximation du calcul fait par le champ électrique, car dans sa formulation simple **il impose que H soit le même** dans toute la section de la boucle. Si H n'est pas uniforme dans cette section, le calcul devient compliqué, alors qu'il reste valable avec E qui lui **est localisé au niveau du fil du cadre**.

Voilà pour quelques aspects théoriques sur le fonctionnement du cadre de TSF.

Considérations pratiques sur le cadre. Les calculs qui précèdent concernent un cadre à une seule spire. Un cadre est une sorte de bobine géante possédant un coefficient de self-induction L, une résistance R et une capacité propre (ou capacité parasite) Cp en parallèle selon la fig. 5 . Le circuit fonctionne en général à la résonance . La self L est obtenue en enroulant N spires autour du support de surface S. La f.é.m. est donc N.e . La tension aux bornes A et B vaut, du fait de la résonance : $V = V_A - V_B = N.e.Q$ avec :

$$R = \left(\frac{1}{Q} \right) \left(\sqrt{\frac{L}{C}} \right)$$

Q est le coefficient de qualité : $Q = L\omega/R = F_0/(F_2-F_1)$ où F_0 est la fréquence de résonance, F_1 et F_2 les fréquences limites de la bande passante à -3dB. On voit que la sensibilité du cadre augmente avec Q, N étant fixé par la valeur de L.

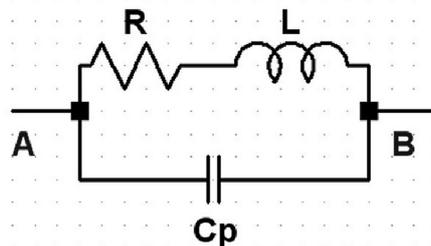


Fig. 5 Schéma équivalent du cadre

Exemple numérique. Un premier cadre a été construit avec $a = 60$ cm, $b = 30$ cm, $N = 10$ tours de fil à brins multiples non isolés (disponible chez Alfonso Mignoli, de Milan, en général présent à Riquewihr), les spires sont espacées de 0,4 cm pour diminuer Cp. Le deuxième cadre réalisé a les mêmes dimensions, mais avec $N = 12$ tours de 5 fils isolés par tour (5 bobines en parallèle), afin de diminuer sa résistance en HF et augmenter Q.

Circuit de mesure de L et de Cp (fig. 6). Le générateur HF rayonne sur le cadre par une petite antenne. Le couplage avec le cadre est donc insignifiant. La résonance est repérée par une petite bobine faiblement couplée également. Un CV est relié aux bornes du cadre. On fait deux résonances successives à deux fréquences différentes, F_1 et F_2 . Pour chacune on mesure la valeur du CV, C_1 et C_2 . On a donc : $L(C_p + C_1)\omega_1^2 = L(C_p + C_2)\omega_2^2 = 1$ formules de la résonance,

et :

$$C_p = \frac{(C_2 F_2^2 - C_1 F_1^2)}{(F_1^2 - F_2^2)}$$

$$L = \frac{1}{((C_p + C_1)\omega_1^2)}$$

Circuit de mesure de Q (fig. 6). Ici encore le générateur rayonne par l'antenne. On mesure La tension V aux bornes du cadre amené à la résonance par le CV à la fréquence $F = 1$ Mhz. On fait

varier la fréquence, sans toucher au CV, jusqu'à ce que la tension soit égale à 0,707.V. On doit trouver deux fréquences, F1 et F2, F1<F et F2>F. La valeur de F2-F1 s'appelle la bande passante à -3dB. On calcule alors Q : $Q = \frac{F}{(F_2 - F_1)}$ et R : $R = \frac{(L\omega)}{Q}$

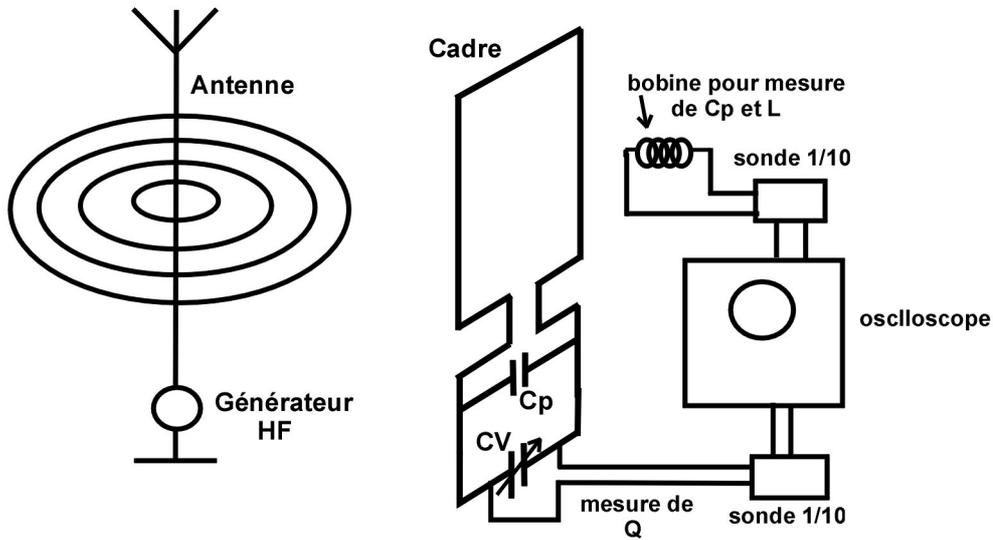
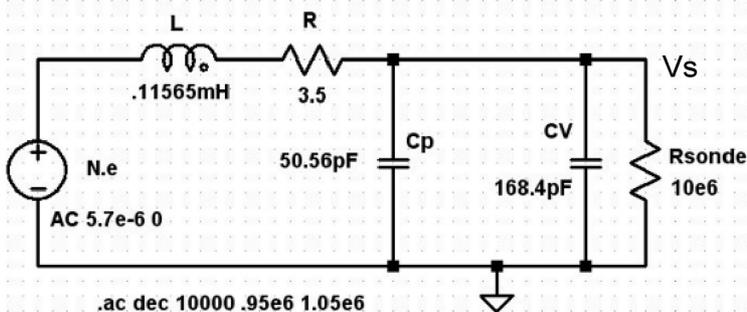


Fig. 6 Circuit de mesures sur le cadre de TSF

Résultats numériques. Premier cadre, N = 10, (1 brin)
 F1 = 1 MHz, C1 = 162,5 pF, F2 = 1494,0 kHz, C2 = 64,9 pF
 F = 1,0017 MHz, à -3dB : F2-F1 = 9,47 kHz
 Deuxième cadre, N = 12, (5 brins)
 F1 = 999,94 kHz, C1 = 168,5 pF, F2 = 1405,6 kHz, C2 = 60,3 pF
 F = 1,0025 MHz, à -3dB : F2-F1 = 4,8 kHz

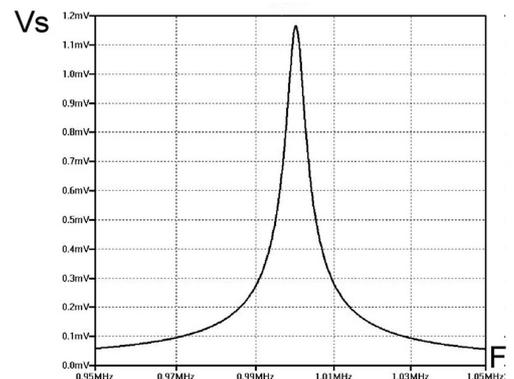
CADRE	N	L μH	Cp pF	F2 - F1 KHz	Q	R Ohms	Amplitude signal mV
1 (1 brin)	10	143,3	14,3	9,47	104	8,7	0,49
2 (5 brins)	12	115,6	50,6	4,8	209	3,5	1,19

Ces mesures confirment l'intérêt du cadre à 5 brins isolés : diminution de la résistance HF et augmentation de Q, donc de la sensibilité. La figure 7 montre la réponse en fréquence du cadre accordé pour résonner à 1 MHz. Photos des cadres fig. 8 et 9.



Réponse en fréquence du cadre

Fig. 7



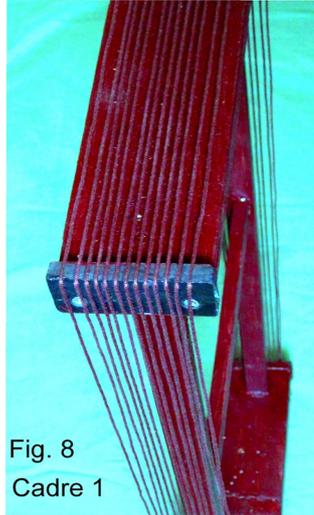


Fig. 8
Cadre 1

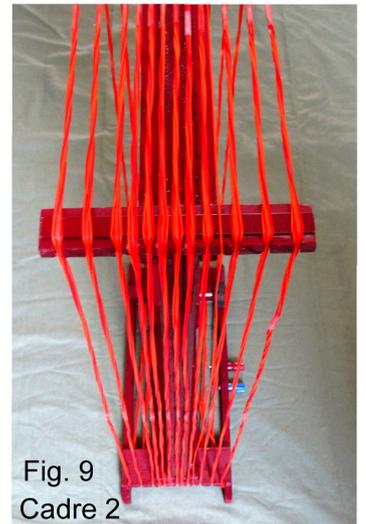


Fig. 9
Cadre 2

En résumé, j'espère avoir précisé quelques points concernant la théorie des cadres de la Radio et rappelé les paramètres qui font leur qualité : Q élevé, R et C_p faibles. Notons que cette étude est relative aux cadres fonctionnant en PO et GO. Le cadre à une seule spire utilisé en OC fait l'objet d'une étude différente : cadre monospire ou antenne loop magnétique.

Calculs effectués avec LT Spice IV et QB45,

G, Salvini