

# Comment ça marche ?

## Les circuits réactifs (23)

### L'adaptation (3)

### Transformateurs accordés

Par le radio-club F6KRK

*Après avoir vu les transformateurs inductifs large bande et leur conception pratique en passant par celle d'une bobine, nous allons continuer avec les transformateurs accordés.*

#### Retour sur l'autotransformateur

Nous avons sur la figure 1 les deux utilisations d'un autotransformateur : abaisseur d'impédance en (A) et élévateur d'impédance en (B).

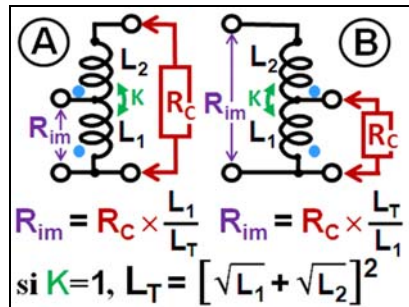


Figure 1 : Autotransformateurs

Tant que  $K=1$  et pour  $X_{L1} \gg R_c$ , si  $R_c$  est résistif pur,  $R_{im}$  est résistif pur. Voyons maintenant ce qui se passe quand  $K < 1$ . Prenons le pire cas avec  $K=0$  (aucun couplage entre  $L_1$  et  $L_2$ ). Nous obtenons les schémas de la figure 2.

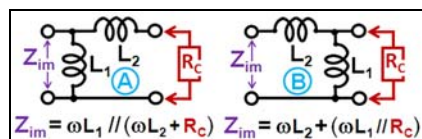


Figure 2 : Modèle pour  $K=0$  (à la limite)

Il est évident que l'impédance image est maintenant réactive même si  $R_c$  est résistive pure. Noter que cela apparaît avec des  $K$  qui restent relativement élevés. Il suffit de revoir la fig. 3 de l'avant dernier "Comment ça marche" pour constater la dégradation du transfo avec un  $K$  de 0,9. On voit alors qu'il est impossible de réaliser un transformateur "pseudo apériodique" dans un milieu comme l'air où il est difficile d'obtenir un  $K$  de quelques dixièmes. Une étude mathématique plus poussée montrerait qu'effectivement le rapport de transformation en magnitude devient variable avec la fréquence, par contre le rapport entre les

parties résistives respecte les lois d'un transformateur avec  $K=1$ . On en déduit qu'il suffit qu'à la fréquence  $F_0$  on neutralise la réactance inductive à l'aide d'un condensateur (côté Z élevée) pour que l'on retrouve notre transformateur qui fonctionne alors quel que soit le couplage entre les enroulements, dès que le Q en charge du circuit oscillant ainsi créé dépasse la dizaine. Tout ceci est résumé sur la figure 3 pour la configuration (A). Avec la configuration (B), il suffit d'inverser  $Z_{im}$  et  $R_c$ .

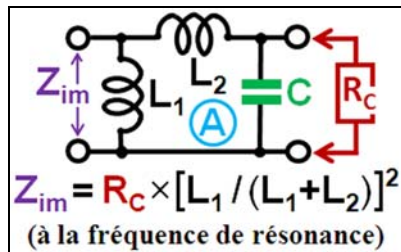


Figure 3 : Transformateur accordé

Cette méthode est universellement employée quand on veut effectuer à la fois un filtrage et une adaptation.

### Transfo (accordé) capacitif

En théorie, rien n'empêcherait d'obtenir un transfo capacitif large bande si l'on savait coupler complètement deux condensateurs <sup>(1)</sup>. Mais avec un transfo accordé, il fonctionne même avec un K de 0. Ainsi le circuit de la figure 4 a la même fonction de transfert (à la résonance) que celui de la fig. 3.

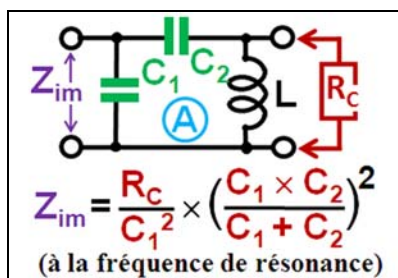


Figure 4 : Transformateur accordé capacitif

Naturellement le système est réversible en inter changeant  $Z_{im}$  et  $R_c$ ,  $C_1$  et  $C_2$  (ou  $L_1$  et  $L_2$  pour la fig. 3).  $Z_{im}$  n'est vraiment résistif et son calcul exact que si le Q en charge du circuit dépasse la vingtaine.

### Le variomètre

Nous avons vu le couplage de deux circuits accordés avec un indice de couplage égal à  $K \times Q$ , ce qui permet de fonctionner avec des K faibles. Puis nous avons vu le transformateur apériodique qui ne fonctionne bien que si  $K=1$ . Puis le transformateur accordé qui fonctionne quel que soit K ( $Q > 20$ ). Maintenant imaginons un transformateur à deux enroulements séparés dont l'un est accordé et l'autre non. Ce montage est appelé "variomètre". Son rapport de transformation dépend de K. Une façon de faire varier ce dernier est de changer l'angle entre les plans des enroulements (d'où le nom de variomètre). K sera maximum quand les enroulements seront dans le même plan et minimum quand ils seront en quadrature. On ne peut espérer un K proche de 1 que si les enroulements ont la même surface et sont très proches l'un de l'autre ( $I \ll D$ ) et bobinés avec un fil très fin. Dans ce cas, une méthode consiste à calculer la self induction d'une spire puis la multiplier par 4 pour avoir celle de 2

spires avec un K de 1. Après on calcule la self induction réelle des deux spires en tenant compte de la géométrie (voir les formules dans le dernier "Comment ça marche"). La différence entre les deux représente la self de fuite et alors K est égal au rapport entre self réelle et self théorique. Mais en général, on cherche à avoir un rapport de transformation différent de 1 en ayant des bobines de diamètres différents (ne serait-ce que parce que l'une doit entrer dans l'autre). Le calcul est très complexe et on ne le trouve pas dans la littérature classique. Cela n'a pas d'importance car en général on utilise le variomètre pour réaliser un accord avec un certain rapport de transformation. Le réglage du variomètre agit sur ce rapport (partie réelle) et le réglage de l'accord permet d'obtenir une partie imaginaire nulle à Fo <sup>(2)</sup>.

**Application : Adaptation d'une antenne boucle "magnétique"**

Vouloir faire rayonner une boucle magnétique relève du paradoxe. En effet, une boucle magnétique est sensée ne pas produire ou n'être pas sensible au champ électrostatique. Ceci ne peut être le cas que si le périmètre de la boucle est très petit devant la longueur d'onde pour considérer qu'elle est parcourue par un courant constant, sans être interrompu par un condensateur (pour réaliser l'accord). Le problème, c'est qu'une telle boucle ne rayonne pas. C'est d'ailleurs l'hypothèse que nous avons prise jusqu'ici. Si l'on veut obtenir une résistance de perte par rayonnement suffisante pour avoir un bon rendement, en augmentant le diamètre de la boucle, le courant n'est plus vraiment constant et les formules utilisées jusqu'ici s'avèrent fausses. Par ailleurs, dire qu'une antenne petite boucle n'est pas sensible au champ E rayonné ou ne rayonne pas de champ E est une absurdité. Cela ne serait vrai qu'avec un courant continu. Avec un courant alternatif, la bobine produit, comme le doublet, un champ **électromagnétique** qui a à la fois les propriétés d'un champ E et celles d'un champ H <sup>(3)</sup>. Voir sur la figure 5 la problématique de l'adaptation.

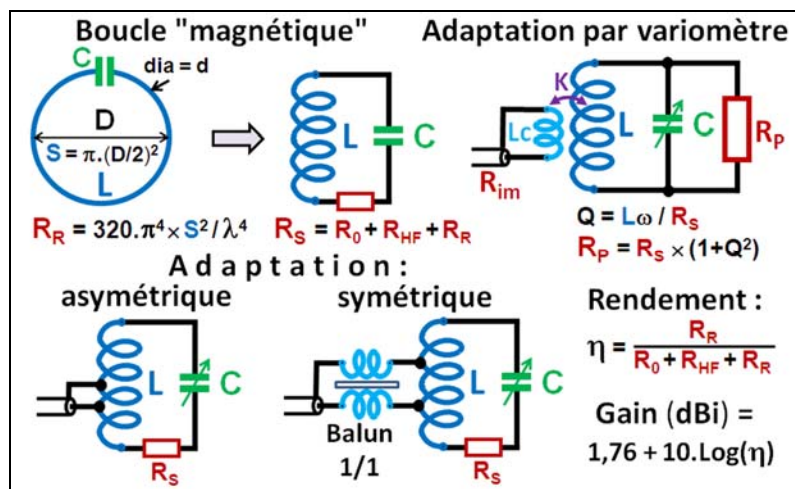


Figure 5 : Adaptation à une petite boucle

Nous y avons également des formules pour obtenir le rendement et le gain de la boucle. Les 1,76 dB correspondent à la directivité de la boucle élémentaire qui est de 1,5 <sup>(4)</sup>. Noter la résistance de rayonnement qui a la longueur d'onde en puissance 4 au dénominateur alors qu'elle est à la puissance 2 pour un doublet. L'adaptation par variomètre se fait en couplant au maximum une spire L\_C plus petite (dans le même plan) et en ajustant la self induction (relative) de cette spire <sup>(5)</sup>.

Nous terminerons en prenant un exemple : Soit une boucle de 1m de diamètre en tube de cuivre de 32 mm (ép. 2mm) avec Fo=3,5 MHz. Nous obtenons en nous aidant des formules du dernier "Comment ça marche" :

$R_0 = 0,28 \text{ m}\Omega$ ,  $R_{\text{HF}} = 13 \text{ m}\Omega$ .

$R_R = 0,36 \text{ m}\Omega$ ,  $R_S = 13,64 \text{ m}\Omega$ .

$\eta = 0,0264$ , Gain = -17,5 dBi.

La PIRE sera 56 fois plus faible que la puissance fournie à la boucle. Si ceci est déplorable à l'émission, ce faible gain est un avantage pour une réception à 3,5 MHz car on n'a pas intérêt à recevoir le bruit de bande à plus de 10 dB au dessus du bruit thermique du récepteur <sup>(6)</sup>.

$L = 2,37 \text{ }\mu\text{H}$ ,  $L\omega = 8,3 \text{ }\Omega$ .

$Q = 608$ ,  $B_{3\text{dB}} = 5,75 \text{ kHz}$  (On ne passerait pas un canal AM).

Tout cela n'est pas très encourageant. Et encore, nous avons pris un tube de 32 mm de diamètre ! Avec un tube de 20, le gain chuterait d'environ 4 dB, mais nous passerions le canal AM <sup>(7)</sup>. La seule solution est d'augmenter le diamètre de la boucle. Raisonnablement, car si nous l'augmentons trop, par exemple à 3 m de diamètre, cela nous fait un périmètre de 9,4 m, soit  $0,11\lambda$  (presque  $\lambda/8$ ). On ne peut plus parler de boucle "magnétique" et nos formules deviennent fausses.

Nous arrêterons là. Dans le prochain "Comment ça marche" nous discuterons sur un transfo capacitif accordé particulier : le circuit en pi.

**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@orange.fr".**

## Notes.

- 1) *Sauf peut-être la taille énorme de l'engin par rapport à un transfo inductif de même puissance.*
- 2) *Ces réglages ne sont pas complètement indépendants, ce qui oblige à faire quelques itérations.*
- 3) *Et c'est heureux car ainsi la propagation du champ électromagnétique ne dépend pas de la manière utilisée pour le produire et pour le récupérer (en infime partie). Par ailleurs, la génération d'un champ E-M produit également un champ électrostatique. Mais celui-ci diminuant comme le cube de la distance, et du fait de la géométrie de la boucle, il reste "collé" à cette dernière. Revoir à ce sujet le "Comment ça marche" sur la boucle dite "magnétique" (R-REF, octobre 2013).*
- 4)  *$10 \text{ Log}(1,5) = 1,76 \text{ dBi}$ . Un dipôle demi-onde a une directivité de 1,64 (2,15 dBi).*
- 5) *On utilise en général un câble coaxial, ce qui permet de pouvoir ajuster facilement la longueur de la boucle de couplage. Mais une fois le bon diamètre trouvé, il ne vaut que pour ce type de coaxial et ce type de boucle rayonnante, en particulier le diamètre de son conducteur. Ceci fait qu'en général une réalisation amateur est rarement reproductible sans réajuster le système.*
- 6) *Revoir à ce sujet le "Comment ça marche" sur la hauteur efficace (R-REF juin 2011), en particulier la hauteur efficace optimale. Si notre antenne avait un gain de 0dBi, à la réception, il faudrait insérer un atténuateur de 20 dB dans la liaison.*
- 7) *Pour deux boucles de même diamètre et même fréquence, celle qui a la bande passante la plus large a le plus de pertes (pratiquement dans le rapport des bandes).*