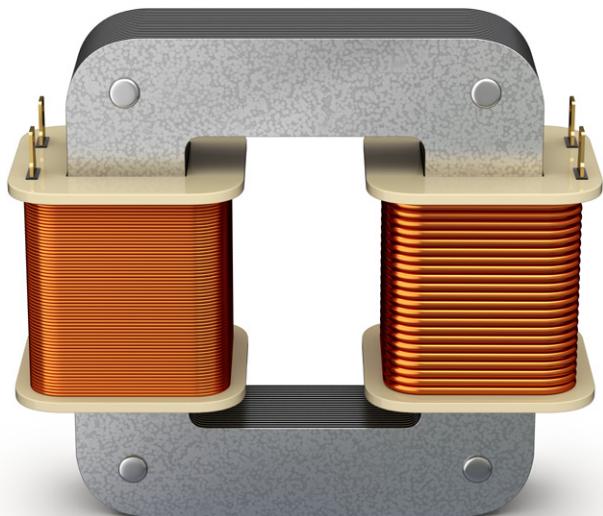


# démarrer en électronique... (12)

## Adaptation d'impédance et transformateurs

Eric Bogers (Elektor)

Avec cet épisode, nous arrivons au bout du sujet des « bobines ». Nous jetterons un dernier coup d'œil aux filtres de bande et aborderons les aspects les plus importants des transformateurs.



### Adaptation d'impédance

Revenons brièvement au filtre passe-bande utilisé dans la conclusion de l'article précédent [1] (**fig. 1**). Vous remarquerez que, comme charge, nous avons remplacé le haut-parleur par une résistance ; en effet, ce n'est qu'avec une résistance de terminaison

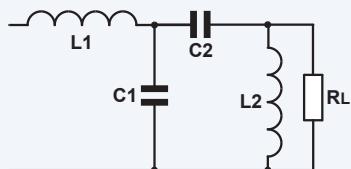


Figure 1. Filtre passe-bande.

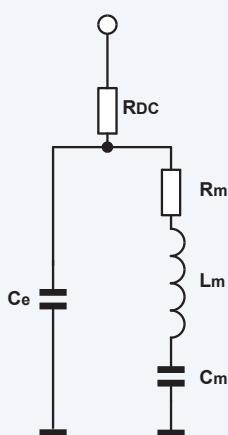


Figure 2. Compensation de l'impédance.

de valeur constante que le comportement du filtre est conforme à la théorie – or l'impédance d'un haut-parleur est tout sauf constante. Deux facteurs viennent compliquer les choses : premièrement, l'impédance atteint un pic à la fréquence de résonance et, deuxièmement, l'impédance augmente avec la fréquence (en raison de l'auto-inductance de la bobine mobile).

Lorsque ces perturbations se produisent à plus de deux octaves de la fréquence de coupure du filtre (ce qui correspond à la moitié ou au double de cette fréquence), on peut les négliger. Dans le cas contraire, les hypothèses initiales faites lors du calcul du filtre ne sont pas valables et le filtre ne fonctionnera pas comme prévu. Heureusement, il est possible de compenser ce problème. La **figure 2** montre un réseau de compensation réalisable.

Ce réseau se compose de deux parties : à gauche, le condensateur  $C_e$ , qui doit compenser l'auto-inductance de la bobine mobile, et à droite, un circuit résonant en série qui compense le pic de résonance. Lorsqu'un facteur de perturbation est suffisamment éloigné de la fréquence de coupure, il n'est pas nécessaire de le compenser et la partie correspondante du réseau peut être omise. Les valeurs des composants sont déterminées comme suit :

$R_{DC}$  = résistance en courant continu du haut-parleur

$$C_e = \frac{1000 \cdot L_e}{R_{DC}^2} \quad [\mu\text{F}, \text{mH}]$$

$$R_m = \frac{R_{DC} \cdot Q_e}{Q_m} - R_{loss}$$

$$L_m = \frac{159 \cdot R_{DC} \cdot Q_e}{f_s} \quad [\text{mH}]$$

$$C_m = \frac{159000}{f_s \cdot R_{DC} \cdot Q_e} \quad [\mu\text{F}]$$

Les valeurs des paramètres  $R_{DC}$ ,  $Q_m$ ,  $Q_e$  et  $f_s$  peuvent être évaluées à l'aide de logiciels de mesure spéciaux tels que Kirchner ATB PC Pro.  $R_{DC}$  est la résistance en courant continu du haut-parleur et  $f_s$  la fréquence centrale du pic de résonance.  $R_{loss}$  est la résistance équivalente de la bobine et  $L_e$  son auto-inductance.

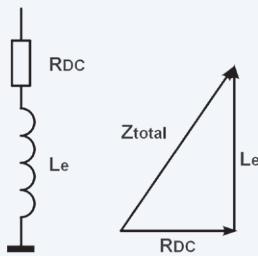


Figure 3. Auto-inductance et résistance en courant continu.

Mais comment déterminer  $L_e$ ? Aux fréquences élevées, le haut-parleur peut être considéré comme un circuit en série composé d'une auto-inductance et d'une résistance en courant continu, comme représenté sur la **figure 3**. À une fréquence suffisamment élevée, on peut lire la valeur de l'impédance totale  $Z_{total}$  sur le diagramme d'impédance. Pour l'auto-inductance  $L_e$ , on applique la formule :

$$L_e = \frac{\sqrt{Z_{tot}^2 - R_{DC}^2}}{2 \cdot \pi \cdot f}$$

Dans l'exemple de la figure 3, l'impédance totale à 10 kHz est de  $42 \Omega$ , tandis que  $R_{DC}$  est égale à  $7 \Omega$ . Le calcul indique qu'une auto-inductance de  $0,66 \text{ mH}$  doit être compensée par un condensateur d'environ  $10 \mu\text{F}$ .

## Transformateurs

Les transformateurs peuvent être utilisés pour éléver ou abaisser une tension alternative. Lorsque c'est la tension du secteur qui est abaissée, on parle habituellement d'un transformateur d'alimentation ; lorsqu'il s'agit du signal, on parle (vous l'avez déjà deviné) d'un transformateur de signal. Le fonctionnement de ces deux « espèces » de transformateurs est cependant exactement le même.

Les transformateurs de signal ne sont habituellement pas utilisés pour éléver ou abaisser la tension des signaux, mais plutôt pour séparer galvaniquement les (sous-)circuits les uns des autres, par exemple pour empêcher la création d'une boucle de masse. Dans ce cas, on parle d'un couplage par « transformateur symétriseur ».

La **figure 4** montre quelques représentants de l'espèce « transformateur ». À droite, on peut voir une partie d'un transformateur toroïdal : les enroulements sont bobinés autour d'un noyau de fer en forme d'anneau. Ce type de transformateur se distingue par un flux magnétique de fuite très faible, raison pour laquelle il est populaire dans les amplificateurs de puissance audio.

En haut à gauche, vous pouvez voir un transformateur qui peut être soudé directement sur un circuit imprimé. Pour l'isolement et une bonne tenue mécanique, ce transformateur est moulé dans un bloc en plastique.

Enfin, en bas à gauche, nous avons deux transformateurs de signal audio pour circuits imprimés. Les transformateurs audio sont souvent entourés d'un blindage en mu-métal pour éviter qu'ils ne captent des champs magnétiques parasites. Ce n'est toutefois pas le cas dans les exemples de la figure 4.

La **figure 5** présente le symbole schématique d'un transformateur. Si cela vous fait penser à deux bobines, vous avez raison : un transformateur est constitué de deux bobines (ou plus) enroulées sur un noyau commun. En principe, ce noyau pourrait être une pièce en fer massif, mais cela entraînerait des pertes inacceptables par courants de Foucault. C'est pourquoi, dans les transformateurs 50 Hz (c'est-à-dire les transformateurs d'alimentation), le noyau est constitué d'un empilement de fines tôles d'acier au silicium, isolées les unes des autres. Pour les fréquences plus élevées, de la poudre de fer est mélangée à un liant isolant et pressée dans la forme désirée. C'est ainsi que l'on obtient des noyaux de ferrite. À très haute fréquence, un noyau n'est plus nécessaire et vous pouvez utiliser deux bobines à air.

Un transformateur fonctionne de la manière suivante : une tension alternative est appliquée à l'enroulement primaire qui est alors parcouru par un courant alternatif produisant un champ magnétique variable qui induit une tension alternative dans l'enroulement secondaire. Il n'y a pas de liaison conductrice entre les enroulements primaire et secondaire : ils sont séparés galvaniquement.

Les désignations « primaire » et « secondaire » peuvent donner l'impression qu'un transformateur ne fonctionne que dans un seul sens, mais c'est faux : il est tout à fait possible d'appliquer une tension à l'enroulement secondaire et d'utiliser ensuite la tension disponible sur l'enroulement primaire. Toutefois, il faut veiller à ce que le noyau de fer ne soit pas amené à saturation magnétique par une tension trop élevée. Si, par exemple, un transformateur de 12 V (c'est-à-dire qui convertit la tension du secteur de 230 V en 12 V) est branché à l'envers, il y aura à coup sûr un fusible grillé (ou un enroulement de transformateur brûlé). En raison de la saturation magnétique du noyau, un courant beaucoup trop élevé circule. Toutefois il est possible d'appliquer une tension de 12 V sur l'enroulement secondaire afin de disposer de 230 V sur l'enroulement primaire. Les onduleurs fonctionnent selon ce principe.

Le rapport entre le nombre de spires au primaire et le nombre de spires au secondaire est appelé le rapport de transformation. La formule suivante s'applique :

$$T = \frac{W_1}{W_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

Le rapport entre les tensions d'entrée et de sortie est égal au rapport du nombre de spires, le rapport entre les courants d'entrée et de sortie est exactement l'inverse. Cela découle de l'égalité théorique des puissances apparentes au primaire et au secondaire :

$$P_1 = P_2$$

Un transformateur n'étant pas un composant idéal, il y a toujours des pertes, et ces puissances présentent une différence, mais en général assez faible pour qu'on puisse la négliger dans la plupart des calculs.

Pour les transformateurs d'alimentation, plutôt que le rapport de transformation, on indique la tension disponible au secondaire pour une tension du secteur de 230 V.

De nombreux transformateurs d'alimentation ont plusieurs enroulements secondaires, fournissant parfois des tensions différentes. Il est possible de connecter des enroulements secondaires en série, mais il faut tenir compte de leur phase et de leur courant maximal. Pour connecter plusieurs enroulements en parallèle, ils doivent fournir la même tension et avoir une capacité de puissance (presque) identique. De plus, ils doivent être connectés en phase.

En outre, les transformateurs d'alimentation ont souvent plusieurs enroulements primaires pour pouvoir adapter les appareils qui les utilisent aux différentes tensions du secteur dans les différents pays. Il n'est cependant jamais possible d'appliquer une tension de 400 V à un transformateur d'alimentation de 230 V, car, comme on l'a vu, le transformateur entrera en saturation magnétique, ce qui fera sauter un fusible ou détruira son enroulement primaire. C'est pourquoi, sur les sites alimentés en triphasé, on craint les erreurs de câblage des prises délivrant alors du 400 V au lieu du 230 V attendu. L'inverse ne présente pas de danger : un appareil équipé d'un transformateur 400 V et branché sur le 230 V ne fonctionnera sans doute pas parce que sous-alimenté, mais ne risquera pas de flamber.

Voilà qui conclut le sujet des « bobines ». La prochaine fois, nous commencerons (enfin !) à nous intéresser aux semi-conducteurs. ↵

210626-04

La série d'articles « démarrer en électronique » est basée sur le livre « Basic Electronics Course » de Michael Ebner, publié par Elektor.

## Des questions, des commentaires ?

Contactez Elektor ([redaction@elektor.fr](mailto:redaction@elektor.fr)).

## LIEN

[1] « Démarrer en électronique... », Elektor, 01-02/2022 : [www.elektormagazine.fr/210564-04](http://www.elektormagazine.fr/210564-04)

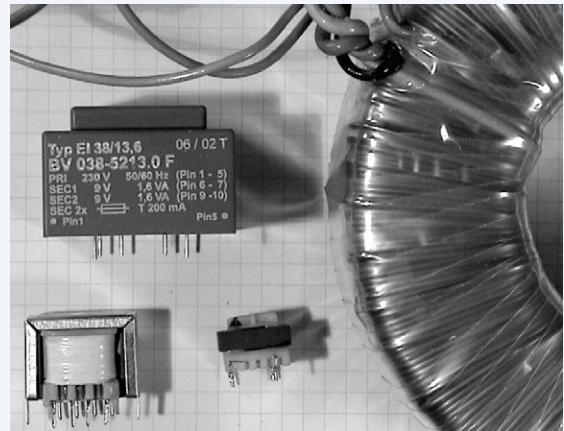


Figure 4. Divers transformateurs d'alimentation et de signaux.

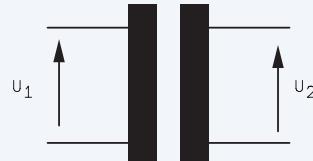


Figure 5. Symbole schématique d'un transformateur.

## Contributeurs

Idée et illustrations : Michel Ebner

Texte et rédaction : Eric Bogers

Traduction : Helmut Müller

Mise en page : Giel Dols



## PRODUITS

➤ **B. Kainka, Initiation à l'électronique et programmation de montages pour débutants**  
[www.elektor.fr/19339](http://www.elektor.fr/19339)

➤ **R. Mallard, L'électronique pour les débutants**  
[www.elektor.fr/15662](http://www.elektor.fr/15662)