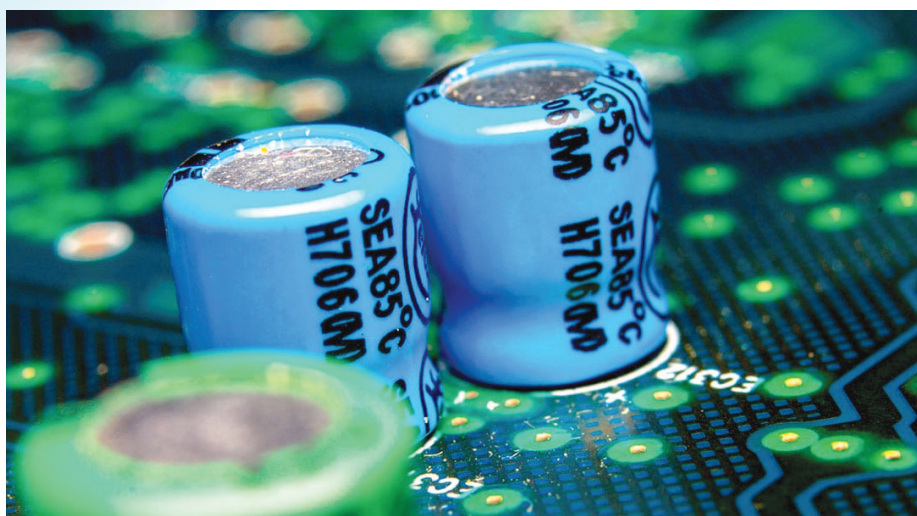


démarrer en électronique... (8)

...est moins difficile qu'on ne l'imagine !
Les condensateurs : suite et fin

Eric Bogers (Elektor)

Dans l'article précédent [1], nous avons vu comment les condensateurs bloquent le courant continu, mais laissent passer le courant alternatif. Mais ce n'est pas tout : la tension et le courant sont également déphasés l'un par rapport à l'autre, ce qui peut rendre les calculs un peu plus difficiles. Mais il n'y a pas là de quoi s'effrayer !



Angle de phase

La phase ? Qu'est-ce que c'est ? Pour comprendre, revenons brièvement à notre humble résistance. Lorsque nous appliquons une tension à ses bornes, un courant circule immédiatement. À tout instant, le courant est proportionnel à la tension : la tension et le courant sont *en phase*.

Il en va autrement avec un condensateur, ce que nous pouvons expliquer comme suit. À l'instant précis où nous connectons une source aux bornes d'un condensateur déchargé, celui-ci se comporte comme un court-circuit : le courant de charge maximal circule, mais la tension à ses bornes est nulle. Au fur et à mesure que le condensateur se charge, la tension à ses bornes augmente tandis que le courant diminue. Lorsque le condensateur est complètement chargé, la tension à ses bornes a atteint sa valeur maximale tandis que le courant est tombé à zéro. Ainsi, on peut dire : il y a d'abord le courant, puis vient la tension. En jargon

technique : le courant *précède* la tension. Lorsqu'une tension sinusoïdale pure est appliquée aux bornes d'un condensateur, il existe une *différence de phase* d'exactly 90° entre la tension et le courant.

Lorsque nous appliquons une tension alternative aux bornes d'un condensateur, un courant alternatif circule dans ce condensateur – c'est ce que nous avons vu précédemment. Et cela signifie que nous pouvons calculer une résistance en courant alternatif pour ce condensateur. On l'appelle *impédance*, et on la désigne par le symbole X . L'unité d'impédance est à nouveau l'ohm. La formule suivante s'applique :

$$X_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}$$

Plus la capacité du condensateur est grande, plus il peut stocker de charge et plus l'intensité du courant qui circule pendant sa charge est élevée – et plus son impédance est faible. Il en

est de même pour la fréquence du courant : plus elle est élevée, plus les cycles de charge et de décharge sont fréquents par unité de temps et plus le courant qui circule est élevé et donc plus l'impédance est faible.

Ce qu'il faut retenir, c'est que l'impédance d'un condensateur n'est pas une valeur fixe, mais dépend de la fréquence.

Vous pouvez, bien sûr, hausser les épaules en vous disant : « D'accord, c'est bien joli, cette histoire de différence de phase, mais il n'y a pas de quoi en perdre le sommeil ». Si seulement c'était aussi simple... Dans les applications pratiques de l'électronique, les résistances et les condensateurs sont rarement utilisés seuls ; le plus souvent, ils se retrouvent en série ou en parallèle avec d'autres composants. Et c'est à cause de ce déphasage que, par exemple, dans un circuit en série composé d'un condensateur et d'une résistance, on ne peut pas simplement additionner l'impédance et la résistance ; celles-ci doivent être additionnées *de manière vectorielle*.

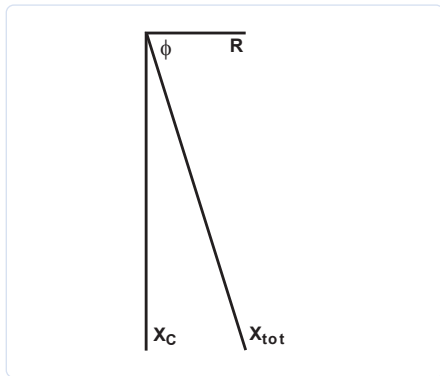


Figure 1. Circuit d'une résistance et d'un condensateur en série.

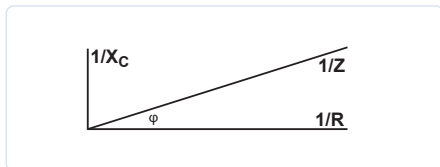


Figure 2. Circuit d'une résistance et d'un condensateur en parallèle.

Nous allons le démontrer avec l'exemple d'un circuit en série composé d'un condensateur d'une valeur de 0,1 μF et d'une résistance d'une valeur de 10 $k\Omega$. Nous voulons connaître l'impédance totale à une fréquence de 50 Hz. Tout d'abord, nous calculons l'impédance du condensateur :

$$X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 0,1 \mu F} = 31,830 \text{ k}\Omega$$

Pour l'impédance totale du circuit en série, la règle suivante s'applique (souvenez-vous du théorème de Pythagore) :

$$X_{tot} = \sqrt{X_C^2 + R^2} = \sqrt{(31,830 \text{ k}\Omega)^2 + (10 \text{ k}\Omega)^2} = 33,364 \text{ k}\Omega$$

L'impédance totale qui est calculée de cette façon est souvent désignée par la lettre Z (au lieu de X_{tot}).

L'impédance Z a également un certain angle de phase (qui est logiquement quelque part entre le -90° du condensateur et le 0° de la résistance), donné par la formule :

$$\tan \varphi = \frac{X_C}{R}$$

L'angle de phase est alors (désolé, vous aurez probablement besoin d'une calculatrice de poche « scientifique » pour cela) :

$$\varphi = \arctan \frac{X_C}{R} = \arctan \frac{-31,830 \text{ k}\Omega}{10 \text{ k}\Omega} = -72,56^\circ$$

Dans un circuit en série, le même courant circule dans tous les composants ; comme dans un condensateur, la tension est en retard sur le courant, l'angle de phase est négatif. On peut aussi résoudre ce problème graphiquement (**fig. 1**). Le sens de rotation (au sens mathématique) étant le sens inverse des aiguilles d'une montre, l'angle de phase négatif doit être dessiné vers le bas (si vecteur horizontal pour la résistance).

Naturellement, une résistance et un condensateur peuvent également être connectés en parallèle ; l'impédance totale Z est alors (nous utilisons les mêmes composants et la même fréquence que pour le circuit en série) :

$$Z = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{X_C^2} + \frac{1}{R^2}}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{(31,830 \text{ k}\Omega)^2} + \frac{1}{(10 \text{ k}\Omega)^2}}} = 9,54 \text{ k}\Omega$$

Pour l'angle de phase, nous avons alors :

$$\varphi = \arctan \frac{R}{X_C} = \arctan \frac{10 \text{ k}\Omega}{31,830 \text{ k}\Omega} = 17,44^\circ$$

Ici aussi, une solution graphique est possible (**fig. 2**). Dans un circuit parallèle, la même tension est appliquée à tous les composants concernés, mais le courant qui traverse le condensateur précède la tension : l'angle de phase est positif et dessiné vers le haut. Une dernière remarque : la différence entre les angles de phase dans un circuit série et un circuit parallèle (avec les mêmes composants) est exactement de 90° .

Filtres passe-haut et passe-bas

Dans les numéros d'*Elektor* de septembre/octobre 2020, novembre/décembre 2020 et janvier/février 2021, nous avons traité en détail la conception des circuits de filtrage. Mais

ces trois articles allaient peut-être un peu au-delà du niveau de l'électronicien débutant. Ces circuits étant néanmoins d'importance essentielle en électronique, nous allons les aborder brièvement ici, sans trop de théorie. La formule de l'impédance d'un condensateur montre qu'elle est infinie à une fréquence de 0 Hz (c'est-à-dire pour une tension continue) et diminue à mesure que la fréquence augmente. C'est pourquoi un condensateur est utilisé pour éliminer (bloquer) la partie continue d'un « mélange » de tensions continues et alternatives.

Nous avons besoin d'un tel circuit, par exemple, à l'étage d'entrée d'un amplificateur de microphone : la tension alternative (l'équivalent électrique du signal acoustique) produite par le microphone est superposée à la tension continue de son alimentation (on parle d'une alimentation fantôme ; elle a l'avantage de ne nécessiter aucun fil supplémentaire pour l'alimentation). Nous ne voulons évidemment pas amplifier la tension d'alimentation, mais uniquement la tension du signal.

Pour éliminer cette tension continue, nous utilisons un filtre passe-haut (**fig. 3**). Il est appelé ainsi, car il laisse passer les hautes fréquences et bloque les basses fréquences.

La **figure 4** montre les réponses en fréquence et en phase d'un filtre passe-haut ; la précision du système de mesure utilisé pour réaliser ces graphiques laisse malheureusement à désirer aux extrémités de la gamme de fréquences. Néanmoins, nous pouvons clairement distinguer trois régions :


- > La région de la bande passante commence (sur ce graphique) à environ 1 kHz. Dans cette région, le signal passe pratiquement sans entrave et il n'y a pratiquement pas de déphasage.
- > La zone d'arrêt ou de blocage se situe en dessous de 100 Hz environ. Ici, le signal diminue avec la fréquence – pour être exact de 6 dB par octave ou 20 dB par décade ; la phase s'approche asymptotiquement de 90° .
- > Entre ces deux régions se trouve la fréquence de coupure. Elle est définie comme la fréquence à laquelle le niveau du signal est réduit de 3 dB par rapport à la bande passante. À la coupure, l'impédance capacitive et la résistance sont égales en valeur absolue et nous pouvons écrire :

$$f_{\text{fréquence de coupure}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C}$$

Le comportement d'un filtre simple comme celui-ci ne dépend que de sa fréquence de coupure ; pour une réponse en fréquence plus complexe, on utilise des filtres à étages multiples (« filtres d'ordre supérieur »). Cette question a été traitée en détail dans la série d'articles déjà mentionnée d'*Elektor* [2].

Là où il existe des filtres passe-haut, il existe aussi des filtres passe-bas. Ils se ressemblent, la résistance et le condensateur ont seulement été permutés (**fig. 5**). Plus la fréquence est élevée, plus le signal est court-circuité à la masse par le condensateur. Ce type de filtre est utilisé (entre autres) pour éliminer le bruit à haute fréquence d'un signal.

La **figure 6** montre les réponses en fréquence et en phase d'un filtre passe-bas (dans ce cas précis, les valeurs des composants utilisés sont différentes de celles de l'exemple de la figure 4). Ici aussi, nous pouvons distinguer trois régions : la région de la bande passante en dessous de la fréquence de coupure, la région de la bande d'arrêt ou de blocage au-dessus de la fréquence de coupure et la fréquence de coupure elle-même, où l'impédance capacitive et la résistance sont égales en valeur absolue.

Nous concluons ainsi notre description des condensateurs. La prochaine fois, nous nous intéresserons aux inductances – des composants qui sont (injustement) détestés par de nombreux amateurs d'électronique... 

(210183-04)

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).

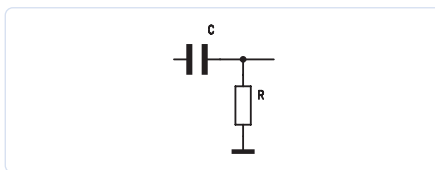


Figure 3. Filtre passe-haut.

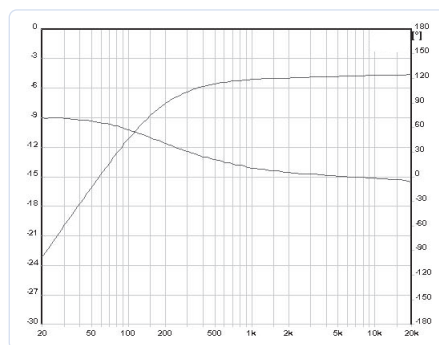


Figure 4. Réponses en amplitude et en phase d'un filtre passe-haut.

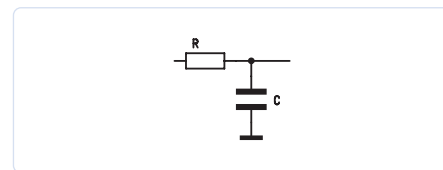


Figure 5. Filtre passe-bas.

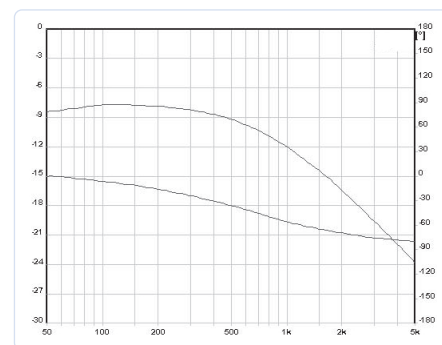


Figure 6. Réponses en amplitude et en phase d'un filtre passe-bas.



Contributeurs

Idée et illustrations : **Michael 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
- **R. Mallard, L'électronique pour les débutants**
www.elektor.fr/15662



LIENS

- [1] E. Bogers, « démarrer en électronique (3) », *Elektor*, 05-06/2020 : www.elektormagazine.fr/200106-03
- [2] A. Rosenkränzer, « conception de filtres analogiques », *Elektor*, trois articles à partir de 09-10/2020 : www.elektormagazine.fr/200318-03