

# démarrer en électronique

...amplifier les différences

Eric Bogers (Elektor)

À la fin de l'épisode précédent, nous avons brièvement décrit la source de courant constant et abordé les raisons pour lesquelles vous avez besoin d'un circuit qui fournit un courant constant à une charge variable. Nous avons également répondu à cette question : sans source de courant constant, serait-il impossible de construire un amplificateur différentiel ?

## Amplificateur différentiel

Un amplificateur différentiel est au cœur de chaque amplificateur opérationnel (ampli-op). Un amplificateur différentiel possède deux entrées : une entrée inverseuse (IN-) et une entrée non inverseuse (IN+). Il amplifie la différence entre les deux signaux d'entrée. La **figure 1** montre le schéma d'un amplificateur différentiel.

Le diviseur de tension composé de R8 et R9 fournit une tension supérieure d'environ 2,7 V à la tension d'alimentation négative, de sorte que la tension aux bornes de R7 est d'environ 2 V. Il en résulte un courant de 2 mA - le transistor T3 agit comme une source de courant constant.

Si les tensions appliquées aux deux entrées de l'amplificateur différentiel sont égales, ce courant de 2 mA est divisé à parts égales entre les deux transistors situés en amont de la source de courant constant (1 mA chacun). Il en résulte une tension de 7,5 V aux bornes des résistances R1 et R2.

Nous appliquons maintenant une tension de quelques millivolts à l'entrée non inverseuse (IN+), ce qui fait augmenter le courant à travers T1 à 1,5 mA. La source de courant constant maintient le courant total à 2 mA étant donné qu'elle est conçue pour cela, le courant à travers T2 doit donc chuter à 0,5 mA. Cela signifie que la

tension sur R2 tombe à seulement 3,75 V, donc la tension de sortie de l'amplificateur différentiel augmente de 3,75 V.

Si nous avons appliqué la tension à l'entrée inverseuse au lieu de l'entrée non inverseuse, le courant à travers T2 aurait augmenté au lieu de diminuer, et la tension de sortie aurait diminué.

Mais que se passe-t-il lorsque nous appliquons la même tension aux deux entrées ? La réponse est que la tension de sortie ne change pas, car le même courant traverse les deux transistors lorsque la même tension est appliquée aux deux entrées. En d'autres termes, un amplificateur différentiel amplifie la différence entre les tensions des deux entrées, plutôt que la somme des tensions.

L'un des principaux avantages d'un amplificateur différentiel est sa grande stabilité en température, à condition que l'augmentation de température dans les deux transistors soit la même. En effet, l'augmentation de la tension base-émetteur due à l'augmentation de la température est la même dans les deux transistors, qui se compensent donc mutuellement.

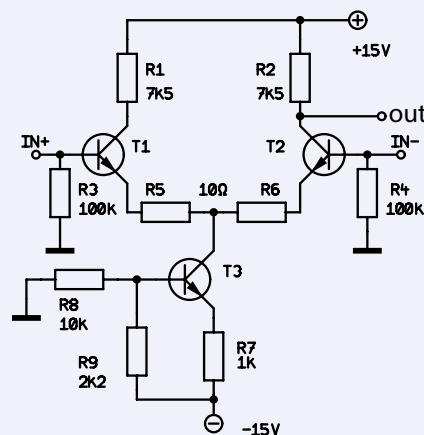


Figure 1. Amplificateur différentiel.

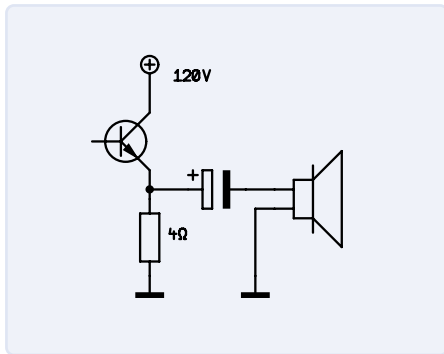


Figure 2. Étage de sortie de classe A.

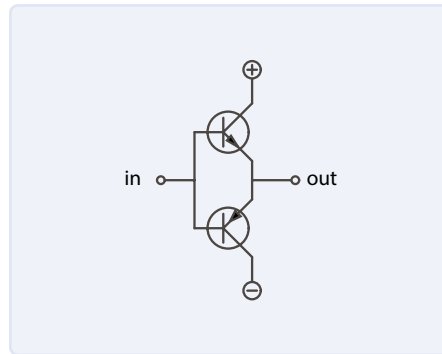


Figure 3. Étage de sortie push-pull.

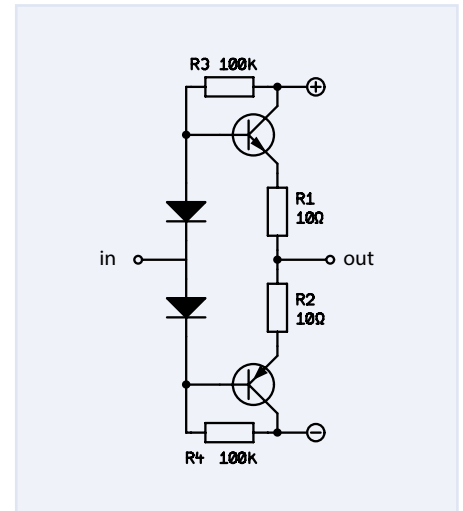


Figure 4. Amplificateur de classe B.

## Amplificateur de classe A

Supposons que vous vouliez construire un amplificateur de puissance capable de fournir 400 W à une charge de 4 Ω. Comme vous l'avez probablement déjà deviné, vous pouvez utiliser un émetteur-suiveur pour cela (voir **figure 2**).

L'inconvénient d'un émetteur-suiveur est qu'il peut charger le condensateur de sortie mais ne peut pas le décharger – ce qui est essentiel pour le traitement des demi-périodes négatives du signal CA, dont on a besoin. Dans la pratique, le condensateur est déchargé par la résistance de l'émetteur. Cela signifie que sa résistance ne doit pas être supérieure à l'impédance de sortie, qui est également de 4 Ω dans ce cas.

(Pour nos lecteurs pointilleux, nous ignorons complètement le fait qu'un haut-parleur ne constitue pas une charge résistive, mais un appareil assez complexe dont l'impédance l'est tout autant. Pour qu'un haut-parleur fonctionne correctement, l'amplificateur doit avoir une impédance de sortie aussi faible que possible, pour que la membrane du haut-parleur soit convenablement amortie. Le rapport entre l'impédance de charge et l'impédance de sortie est appelé facteur d'amortissement et doit être aussi élevé que possible. Cependant, il n'est pas possible d'obtenir un bon facteur d'amortissement avec une résistance d'émetteur de 4 Ω. Pour cela, la résistance doit être beaucoup plus faible. Mais nous n'avons pas besoin d'entrer dans ces détails ici.)

Vous pouvez utiliser la formule suivante pour calculer la tension de sortie :

$$U_{\text{eff}} = \sqrt{P \cdot R} = \sqrt{400 \text{ W} \cdot 4 \Omega} = 40 \text{ V}$$

Il s'agit de la valeur efficace. La tension de crête est donc plus élevée et, comme vous devez alimenter les deux demi-périodes du signal à partir d'une seule tension d'alimentation (dans cet exemple), vous devez également doubler la valeur :

$$U_{\text{tt}} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot U_{\text{eff}} = 113.14 \text{ V}$$

Cette valeur est certainement un peu réduite. Vous avez besoin d'un peu de marge, car il y a une petite chute de tension sur le transistor, et la tension sur le condensateur de filtrage va également chuter légèrement dans les demi-périodes du signal de sortie. En général, il faut ajouter quelques volts, ce qui donne une tension d'alimentation de 120 V. (Pour être clair, nous ne traitons ici que d'un montage théorique, et nous n'avons pas à nous préoccuper de savoir s'il serait réellement possible de trouver un transistor convenant à cet exemple).

Vous devez fixer le point de fonctionnement pour que la tension aux bornes de la résistance d'émetteur soit égale à la moitié de la tension d'alimentation. Pour dissiper la puissance dans la résistance d'émetteur et le transistor, cela signifie :

$$P = \frac{U^2}{R} = \frac{(60 \text{ V})^2}{4 \Omega} = 900 \text{ W}$$

En d'autres termes, même lorsque l'amplificateur ne fournit aucune puissance au haut-parleur, la dissipation totale de puissance est de 1800 W. C'est bien sûr totalement inacceptable.

## Étage de sortie push-pull : amplificateur de classe C

La dissipation de puissance peut être considérablement réduite en utilisant deux transistors, chacun traitant à son tour les demi-périodes alternées du signal d'entrée.

Dans le montage de la **figure 3**, le transistor NPN amplifie les demi-périodes positives du signal et le transistor PNP amplifie les demi-périodes négatives. Ce circuit est appelé amplificateur de classe C et, malheureusement, il présente un inconvénient majeur : les deux transistors sont bloqués lorsque le niveau du signal d'entrée est inférieur à la tension directe de 0,7 V des jonctions base-émetteur. Cela entraîne une forte distorsion du signal de sortie de l'amplificateur.

## Amplificateur de classe B

Il est facile de contourner ce problème de l'amplificateur de classe C en appliquant une tension de polarisation à la base de chaque transistor. Dans le montage illustré à la **figure 4**, deux diodes sont utilisées à cet effet. La tension aux bornes de chacune de ces diodes est égale à la tension directe base-émetteur du transistor correspondant. Un véritable amplificateur de classe B a un courant de repos nul, de sorte que chaque transistor ne conduit que pendant sa demi-période correspondante du signal sinusoïdal.

Cependant, les caractéristiques des transistors sont clairement non linéaires à des tensions légèrement supérieures à la tension directe entre la base et l'émetteur, ce qui entraîne une distorsion importante dans la pratique. On peut éviter cela en appliquant une tension de polarisation légèrement plus élevée à la base de chaque transistor, ce qui résulte en un courant de repos correspondant. Une valeur typique est d'environ 1 % du courant de sortie maximal. Dans le présent exemple, nous avons supposé que le courant de sortie de 10 A, le courant de repos serait donc d'environ 100 mA. Le courant de repos est généralement obtenu en connectant un trimpot en série avec les deux diodes et en le réglant pour obtenir la valeur souhaitée. Les résistances d'émetteur sont essentielles pour la stabilité thermique du circuit. Lorsque les transistors chauffent, le courant de base (et donc le courant de collecteur) augmente fortement, en supposant une tension base-émetteur constante, ce qui fait que les transistors chauffent encore plus et que le courant augmente encore, et ainsi de suite jusqu'à ce que les transistors tombent en panne. C'est pourquoi il est nécessaire de monter les transistors de sortie et les diodes sur le même dissipateur thermique, de sorte que la tension directe des diodes diminue au fur et à mesure que la température augmente. Les résistances d'émetteur servent à réduire la tension base-émetteur.

Les résistances d'émetteur sont également indispensables lorsque plusieurs transistors de sortie sont connectés en parallèle, afin de garantir que la puissance dissipée est répartie uniformément entre les transistors, de manière à obtenir une puissance maximale plus élevée.

La dissipation de puissance à l'état de repos (sans aucun signal) est déterminée par la valeur du courant de repos. La formule pour un seul transistor est la suivante :

$$P = U \cdot I = 60 \text{ V} \cdot 0.1 \text{ A} = 6 \text{ W}$$

C'est vraiment négligeable par rapport à la dissipation de puissance d'un amplificateur de classe A, même si la dissipation doit être doublée en raison de la présence de deux transistors dans le circuit. Il est facile de calculer la puissance totale dissipée en soustrayant la puissance de sortie de la puissance injectée dans l'amplificateur :

$$P_{in} = U \cdot I = 60 \text{ V} \cdot 10 \text{ A} = 600 \text{ W}$$

$$P_{loss} = P_{in} - P_{out} + P_{quiescent} = 600 \text{ W} - 400 \text{ W} + 12 \text{ W} = 212 \text{ W}$$

(Notez que la valeur de 60 V utilisée pour calculer la puissance d'entrée [au lieu de 120 V] est en fait correcte car chacun des deux transistors ne conduit que pendant la moitié du temps).

Malheureusement, l'exemple de calcul ci-dessus ne reflète pas exactement la pratique, car ici, nous avons choisi une valeur très basse pour la tension d'alimentation. Dans ce cas, la différence entre la tension d'alimentation et la tension de sortie maximale est inférieure à environ 3,6 V. Le double de cette valeur serait plus réaliste, du moins si l'on veut éviter de rendre les condensateurs de filtrage de l'alimentation ridiculement grands. Si l'on tient compte de ces éléments, la puissance dissipée maximale passe à 248 W. Notez que lorsque nous parlons ici de la dissipation maximale de puissance, nous nous référons à des signaux sinusoïdaux. La dissipation de puissance maximale absolue se produit avec un signal de sortie carré dont l'amplitude est égale à la moitié de la tension d'alimentation. Dans cette condition, la puissance dissipée peut atteindre 264 W, soit 6 % de plus. ◀

230533-04

*Note de la rédaction : la série d'articles « démarrer en électronique » est basée sur le livre « Basiskurs Elektronik » de Michael Ebner, publié par Elektor.*

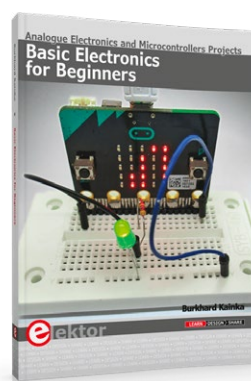
### Questions ou commentaires ?

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



### Produits

- **B. Kainka**, *Basic Electronics for Beginners* (Elektor, 2020)  
Livre : [www.elektor.com/19212](http://www.elektor.com/19212)  
E-Book : [www.elektor.com/19213](http://www.elektor.com/19213)



# wheel.me Genius 2

wheel.me a inventé la première roue autonome au monde qui transforme n'importe quel objet en robot autonome sans effort



## Flexibilité maximale

Cas d'utilisation infinis, aucun changement d'infrastructure n'est nécessaire



## Service de robotique

Offre tout-en-un, pas de coût initial important, conditions flexibles



## Prix révolutionnaire

Faible risque, prix avantageux et retour sur investissement immédiat



## Navigation facile

Détection dynamique des obstacles, mouvement omnidirectionnel et priorité à la sécurité



[www.wheel.me](http://www.wheel.me)

wheel\_me