



démarrer en électronique

...Les FET

Eric Bogers (Elektor)

Aujourd’hui, la plupart des électroniciens ont recourt à un microcontrôleur pour réaliser les tâches les plus complexes, et la plupart d’entre nous n’utilisent plus de transistors discrets. Dans le cas où cela est possible, nous utilisons des amplificateurs opérationnels (ampli-op), et ce pour de bonnes raisons : les ampli-op modernes offrent des caractéristiques inégalées. C’est pourquoi, dans cet article, nous vous proposons une brève introduction à ce nouveau composant électronique. Toutefois, nous jetons d’abord un dernier coup d’œil aux transistors FET, après un bref suivi de l’épisode précédent.

Commençons d’abord par un petit complément à l’article paru dans le numéro de septembre/octobre de cette année [1]. Nous écrivions sous le paragraphe “Montage émetteur” : “il est possible d’amplifier un signal avec ce montage encore plus, mais dans ce cas, il faut choisir une résistance d’émetteur moins élevée et/ou une tension d’alimentation plus élevée.”. C’est vrai, mais ce n’est pas tout à fait exact. Si vous connectez un condensateur en parallèle avec la résistance d’émetteur dans ce circuit, le gain en courant continu de l’étage à transistors ne varie pas, mais l’impédance du réseau parallèle diminue pour les signaux en courant alternatif. Cela signifie que le gain est plus élevé pour les signaux alternatifs. Nous vous laissons le soin d’effectuer les calculs nécessaires. Nous remercions Dogan Ibrahim, lecteur (et auteur) d’Elektor, de nous avoir signalé cette omission.

Transistor à effet de champ (FET)

Contrairement au transistor bipolaire, qui a occupé une place importante dans nos précédents articles, le transistor à effet de champ est commandé par une tension et non par un courant. L’impédance d’entrée d’un FET est particulièrement élevée, de sorte qu’il faut une faible tension pour le commander (du moins en tension continue). Cependant, lorsque la fréquence augmente, la capacité interne d’un FET devient de plus en plus élevée. Les FET ne sont pas couramment utilisés dans les circuits destinés aux théâtres et aux événements publics. En effet, les circuits utilisés dans ces applications sont caractérisés par une faible impédance pour avoir un meilleur facteur de bruit. Toutefois, les MOSFET de puissance sont souvent utilisés dans ces applications, mais uniquement dans les étages de sortie des amplificateurs de puissance. La **figure 1** montre le symbole d’un FET à canal dopé N. Si la flèche du symbole pointe dans l’autre sens, le composant associé est un FET à canal P, polarisé en inverse. Les trois bornes sont appelées la grille, la source et le drain. En termes de fonctions, elles correspondent presque à la base, à l’émetteur et au collecteur d’un transistor bipolaire.



Figure 1. Symbole d’un JFET à canal N.

Le suiveur de source est le montage à FET équivalent d’un suiveur-émetteur et a donc un gain de tension de 1.

Dans le montage présenté à la **figure 2**, la grille est simplement connectée à la masse par une résistance de grande valeur. Si on utilise un FET BF245, le courant de drain résultant est d’environ 4 mA, avec un point de fonctionnement correspondant d’environ 4 V. Comme la grille a une impédance particulièrement élevée, les courants à travers la source et le drain sont presque égaux, et l’impédance d’entrée est déterminée par la

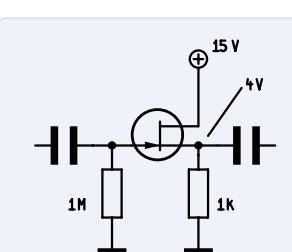


Figure 2. Suiveur de source.

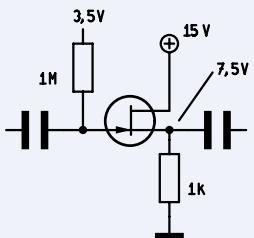


Figure 3. Montage pour un point de fonctionnement optimal.

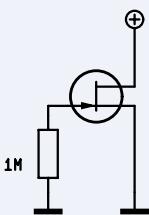


Figure 4. Source de courant constant à FET.

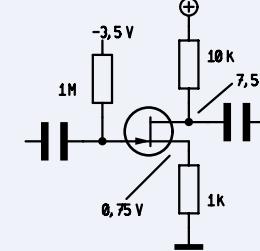


Figure 6. Montage à source commune.

valeur de la résistance entre la grille et la masse. Il est possible de calculer la valeur du condensateur de couplage d'entrée à partir de la basse fréquence de coude souhaitée. Elle peut être relativement faible par rapport au montage d'un suiveur-émetteur utilisant un transistor bipolaire.

Un inconvénient du montage de la figure 2 est que le point de fonctionnement ne correspond pas à la moitié de la tension d'alimentation, de sorte que l'amplitude du signal de sortie du circuit est limitée. Pour y remédier, il suffit de polariser la grille avec la tension appropriée, comme le montre la **figure 3**. Un simple diviseur de tension peut fournir cette tension de polarisation.

Il est également facile de concevoir une bonne source de courant constant avec un transistor à effet de champ (voir **figure 4**). Si vous examinez la courbe de la **figure 5**, vous remarquerez que dans ce cas, un FET est plus performant qu'un transistor bipolaire. Les sources de courant comme celle-ci sont souvent utilisées pour fournir des courants constants aux LED.

Montage à source commune

Si vous connectez un FET de la manière appropriée, vous pouvez bien sûr l'utiliser pour amplifier la tension. Le montage utilisé à cet effet est très similaire au montage à émetteur commun d'un transistor bipolaire. Dans le cas du circuit à FET, le gain est également déterminé par le rapport entre les résistances du drain et de la source.

Cependant, le suiveur de source présenté dans la **figure 6** présente un inconvénient : nous avons besoin d'une tension négative pour régler le point de fonctionnement à une valeur acceptable. Pour cette raison, on utilise rarement les FET pour l'amplification de la tension. Au lieu de cela, les amplificateurs à FET ne sont utilisés que dans l'étage d'entrée des amplificateurs à plusieurs étages, et les transistors bipolaires ordinaires sont utilisés pour l'amplification supplémentaire du signal.

Cette approche est également utilisée dans les doubles ampli-op TL072 (deux ampli-op dans le même boîtier) et les quad ampli-op TL074 couramment utilisés dans les applications audio. Un étage d'entrée FET fournit une impédance d'entrée très élevée ($10^{12} \Omega$), tandis que le bruit est limité par l'utilisation de transistors bipolaires pour le traitement ultérieur du signal.

Amplificateurs opérationnels

Le terme "opérationnel" n'a rien à voir avec les opérations chirurgicales, mais est étroitement lié aux opérations mathématiques. Dans un passé pas si lointain, lorsque la technologie numérique n'était pas encore suffisamment avancée pour permettre d'effectuer des calculs mathématiques complexes, on utilisait des ordinateurs analogiques pour effectuer des calculs d'intégral et de différentiel. Les ordinateurs analogiques sont basés sur des circuits analogiques ou, plus précisément, sur des amplificateurs opérationnels.

La dérive en température est l'un des problèmes les plus fréquents des circuits à transistors classiques : si le point de fonctionnement change constamment, la précision des circuits destinés à effectuer des opérations complexes n'est pas très bonne. À l'époque, pour cette raison, les concepteurs ont commencé à utiliser des amplificateurs différentiels : lorsque le point de fonctionnement d'une entrée (par exemple l'entrée non inverseuse) change, le point de fonctionnement de l'autre entrée change en conséquence, de sorte que les erreurs s'annulent.

La combinaison d'un amplificateur différentiel et d'un gain en boucle ouverte très élevé a permis d'obtenir un circuit très polyvalent nommé amplificateur opérationnel (ampli-op).

Au début, les ampli-op étaient construits avec des transistors discrets. Cependant, on s'est rapidement rendu compte que l'utilisation de circuits intégrés permettait d'économiser beaucoup de temps et d'efforts.

Comme les caractéristiques de bruit des anciens circuits intégrés n'étaient pas particulièrement optimales, les ampli-op discrets ont encore été utilisés dans les équipements audio pendant plusieurs années, mais cette époque est bien loin derrière nous. De nombreux ampli-op modernes offrent des caractéristiques exceptionnelles en audio et ont trouvé leur place dans le domaine de l'électronique à petits signaux.

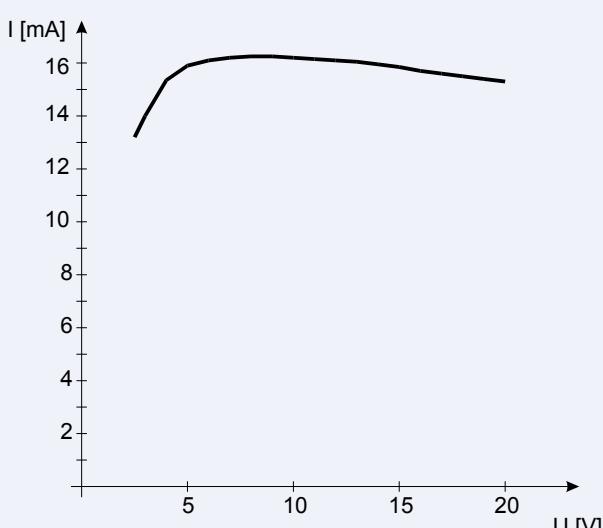


Figure 5. Courbe caractéristique d'une source de courant constant à FET.



Structure interne d'un ampli-op

Le nombre exact de transistors dans un circuit intégré n'affecte pas significativement le coût de fabrication, de sorte que les circuits d'ampli-op constitués de 40 à 50 transistors sont maintenant très répandus. Le circuit interne d'un ampli-op typique est cependant trop compliqué, c'est pourquoi nous examinons ici un circuit d'ampli-op très simplifié (**figure 7**). Bien entendu, ce circuit ne se trouve réellement dans aucun ampli-op, mais vous pouvez le construire vous-même (bien que le coût des composants nécessaires soit probablement plus élevé que celui d'un circuit intégré correspondant).

Ici, les transistors T1 et T2 forment un amplificateur différentiel, comme décrit dans l'un des épisodes précédents. Dans ce cas, nous avons omis les résistances d'émetteur, car elles ne sont en fait pas importantes pour le fonctionnement du circuit. Le transistor T3 et les composants associés forment une source de courant constant. Les transistors T5 et T6 servent d'étage de sortie push-pull de classe B. La sortie est à l'abri des courts-circuits, grâce aux valeurs relativement élevées de la résistance d'émetteur. Ceci est possible parce que la rétroaction négative - lorsque le circuit est utilisé comme un ampli-op - réduit fortement l'impédance de sortie, de sorte que les valeurs des résistances d'émetteur ne sont pas grandes. La rétroaction négative minimise également la distorsion de croisement typique d'un amplificateur de classe B, de sorte que nous n'avons pas à nous préoccuper du courant de repos.

Le transistor T4, en tant qu'amplificateur à émetteur commun, sert d'étage de commande pour les transistors de sortie. Malgré tous nos avertissements précédents, il n'y a pas de résistance d'émetteur ici, car les ampli-op sont stabilisés grâce à une rétroaction négative globale (de la sortie vers l'entrée). Cela signifie que la maximisation du gain en boucle ouverte est plus importante que l'emplacement exact du point de fonctionnement d'un étage d'amplification interne.

C'en est assez pour cet épisode - nous avons eu un premier aperçu des ampli-op et, la prochaine fois, nous les utiliserons pour réaliser des circuits d'amplification.

Translated by Kenneth Cox — 230608-01

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

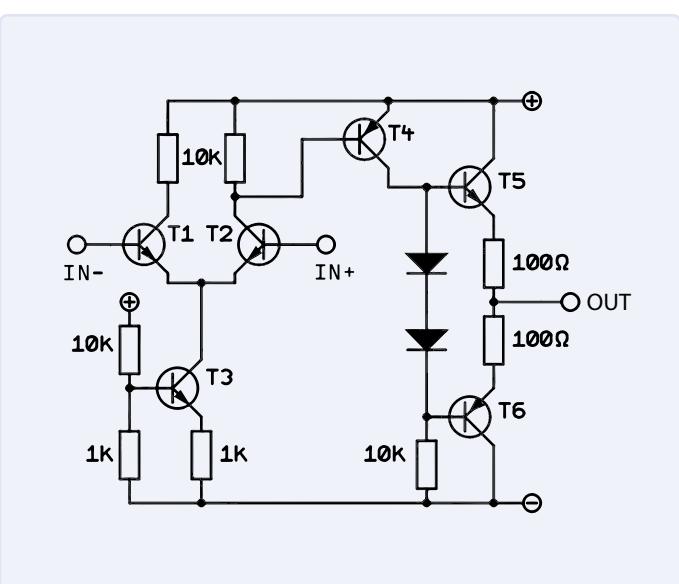


Figure 7. Version très simplifiée de la structure interne d'un amplificateur opérationnel.

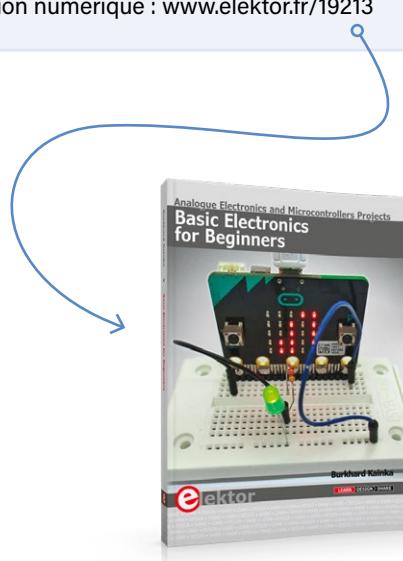
Questions ou commentaires ?

Contactez Elektor (redaction@elektor.fr).



Produit

► **B. Kainka, Basic Electronics for Beginners (Elektor, 2020)**
version papier : www.elektor.fr/19212
version numérique : www.elektor.fr/19213



LIEN

[1] " démarrer en électronique ...amplificateur de tension ", Elektor 9-10/2023 :
<https://www.elektormagazine.fr/magazine/elektor-315/62219>