

MP22 : Amplification de signaux

Alexis Maloizel, Joseph Delpy

Novembre 2020

1 Objectifs pédagogiques

On cherche dans cette leçon à mettre en évidence la nécessité, dans certains cas, d'une amplification d'un signal d'entrée que l'on souhaite observer. Par exemple, pour un signal de tension fourni par un capteur et que l'on veut observer à l'oscilloscope, on peut dans un premier temps réaliser une **amplification en amplitude**. En revanche, si ce signal d'entrée a pour but d'être converti (par exemple, un signal de tension en signal sonore) alors il doit être adapté aux caractéristiques du dispositif qui se charge de la conversion. En particulier, suivant les impédances caractéristiques des différents quadripôles du montage électrique, il peut y avoir nécessité d'une **amplification de puissance**. Nous présentons cette notion sur un système de conversion sonore, mais elle est importante aussi bien en physique expérimentale (création de champs magnétiques via des bobinages par exemple) qu'en électrotechnique (amplification des signaux fournis par des capteurs utilisés dans des boucles d'asservissement).

2 Messages forts du montage

On souhaite mettre en évidence deux aspects complémentaires en deux temps. Premièrement : l'amplification de tension par un montage à Amplificateur Linéaire Intégré, avec mise en évidence des **avantages** qu'il procure (adaptation partielle d'impédance grâce à une impédance de sortie quasiment nulle), ses **caractéristiques** inhérentes (caractère passe-bas d'ordre 1, conservation du produit gain-bande passante pour un montage amplificateur simple), et ses **lacunes** (pas d'amplification en courant, et donc pas en puissance).

Deuxièmement : l'amplification en puissance grâce à l'utilisation de transistors, et notamment du montage Push-Pull de classe B (voir DM d'élec de puissance et les notes de la séance de correction associée). On montre l'amplification en **intensité**, et donc en puissance. On se charge également d'étudier le **rendement** de l'amplification, en mesurant quelle puissance est extraite de l'alimentation et quelle puissance est fournie au dipôle de charge.

3 Introduction

On branche un micro en entrée d'un oscilloscope et d'un haut-parleur. On remarque deux choses : aucun son n'est émis par le haut-parleur, mais on observe un signal de l'ordre de quelques dizaines de mV sur l'oscilloscope. En effet, le niveau de puissance fourni par le micro n'est pas suffisamment élevé pour alimenter le dispositif (bobinages du haut-parleur). Il faut expliquer cela par des ordres de grandeurs : le micro a une impédance de sortie d'environ 500Ω , tandis que le haut-parleur a une impédance d'entrée de 8Ω . On a un problème d'adaptation d'impédance : un pont diviseur de tension donne que la tension aux bornes du haut-parleur est bien plus faible que la tension fournie par le micro. La puissance fournie est également bien trop faible.

4 Amplification en tension

On présente ici un amplificateur non inverseur.

Contexte : on réalise ce montage avec un ampli sur plaquette avec deux résistances variables (on sera amené à faire varier le gain durant la présentation). On utilise une alim $\pm 15 \text{ V}$. On envoie en entrée un signal de sortie de GBF de fréquence audio (par exemple 1 kHz). On visualise sur l'oscillo le signal de sortie de GBF et le signal de sortie d'ALI.

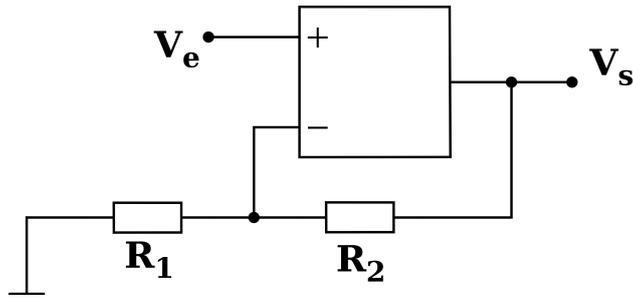


Figure 1: Amplificateur non-inverseur : schéma de principe. Le gain en amplification est de $G = 1 + R_2/R_1$.

4.1 Mesure de gain d'amplification

On fixe les résistances R_1 et R_2 , par exemple à $1\text{ k}\Omega$ et $25\text{ k}\Omega$ (gain de 26). En préparation, on choisit 5 valeurs de tension d'entrée (par exemple de 100 à 500 mV pic à pic) de signaux sinusoïdaux, et on mesure les 5 tensions de sortie associées. On observe que la tension de sortie est sinusoïdale, donc on fonctionne en régime linéaire. On trace l'évolution du rapport en fonction de l'amplitude d'entrée, on obtient une caractéristique linéaire. On fait une mesure complémentaire durant l'exposé. Incertitudes de mesure, incertitudes statistiques sur la régression linéaire.

4.2 Mesure de pulsation de coupure

On met ensuite en évidence le caractère passe-bas de l'amplificateur. On fixe le gain à 100 ($R_1 = 0.5\text{ k}\Omega$, $R_2 = 50\text{ k}\Omega$), et on augmente progressivement la tension d'entrée. L'amplitude du signal diminue en sortie : on a un passe bas. On fait une mesure à la main de la fréquence de coupure à -3 dB . Pour prouver qu'on a un caractère passe bas, on trace deux diagrammes de Bode correspondant à des gains de 100 et 10 par FFT de la réponse impulsionnelle (macro Igor). On choisit $T_p = 0.5\ \mu\text{s}$, et une durée d'acquisition $T_d = 50\ \mu\text{s}$ (Bode jusqu'à 2 MHz, 100 points). On vérifie que les asymptotes se superposent proche du MHz : le produit gain/bande passante est conservé. On peut l'estimer grâce à la mesure à la main.

4.3 Limites de l'amplificateur

On finit par mettre en évidence les saturations de l'AO. Pour de trop fortes tensions, il ne fonctionne plus en régime linéaire, et la tension de sortie reste bloquée à $\pm 15\text{ V}$ (tension de l'alim).

Transition : si l'on envoie le même signal qu'en introduction dans le haut-parleur après passage à travers l'amplificateur, on a adapté l'impédance du micro en la rendant quasiment nulle. En revanche, la faible impédance du haut-parleur demande un courant en sortie de l'amplificateur qui est bien trop élevé. On ne produit toujours aucun son.

5 Amplificateur de puissance

On réalise ensuite un amplificateur push-pull de classe B, qui permet de se débarrasser des distorsions dues aux tensions de seuil des transistors. Pour l'alimentation à utiliser, discuter avec JBD : Il faut qu'elle puisse fournir au moins 1A et être réglable en tension. Le jour de la présentation, on a utilisé une alim stabilisée Française d'Instrumentation, et elle a saturé en courant.

5.1 Mesure du gain d'amplification en puissance, saturation de l'ampli

On alimente le push-pull avec un signal sinusoïdal d'amplitude environ $3 V_{RMS}$ fourni par le GBF, avec une fréquence de 1 kHz. On choisit de tout exprimer en tension efficace car on va mesurer des puissances (le calcul fait donc apparaître des valeurs efficaces). On observe les tensions d'entrée et de sortie à l'oscillo. On mesure l'intensité efficace fournie par le GBF (on prend un Keysight pour mesurer des courants relativement faibles avec précision). Pour mesurer l'intensité fournie à la résistance de charge, on mesure sa valeur à l'Ohmmètre et on applique $I_{out,RMS} = \frac{V_{out,RMS}}{R}$. On calcule de cette manière l'amplification en courant du circuit total, avec les incertitudes associées. En préparation, on réalise cette mesure à fréquence fixée mais pour plusieurs valeurs de tension efficace. On peut volontairement aller jusqu'à des tensions efficaces élevées de manière à mettre en évidence la saturation des transistors.

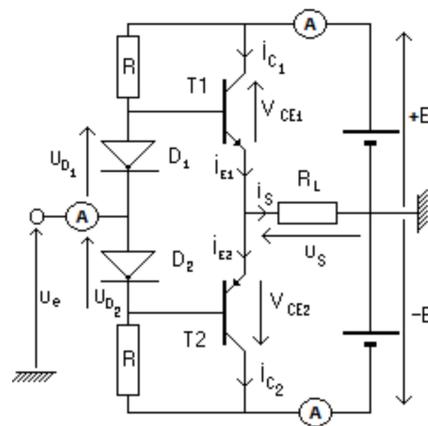


Figure 2: Schéma de l'amplificateur de puissance type push-pull. Les deux diodes sont polarisées en direct, donc en régime de conduction. Leur tension de seuil est proche de celle des transistors. Suivant le signe de U_e , un transistor est actif et l'autre bloqué, dans les deux cas la présence des diodes compense l'effet de seuil des transistors, et donc $U_s = U_e$ en fonctionnement linéaire. On a indiqué les placements des ampèremètres nécessaires pour les mesures suivantes.

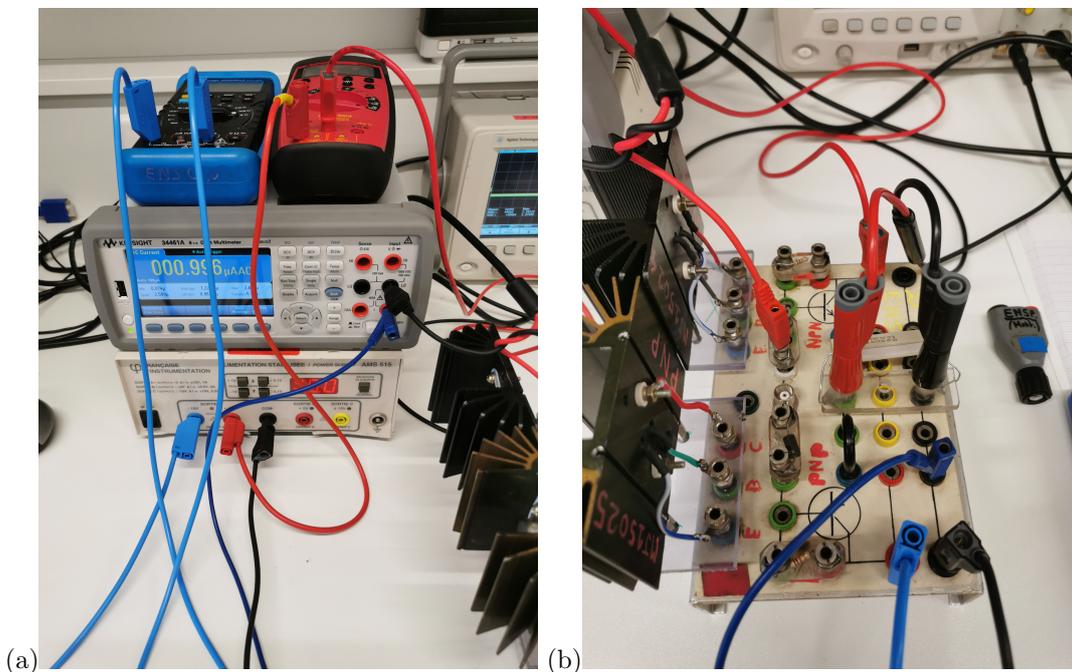


Figure 3: (a) Appareils de mesure d'intensité utilisés : un ampèremètre pour chaque transistor, un ampèremètre Keysight en série en sortie du GBF. (b) Branchements du push-pull dans la configuration où l'on mesure l'intensité fournie par le GBF en plaçant l'ampèremètre en série en sortie du GBF.

5.2 Mesure de rendement

Selon le même protocole (mêmes tensions efficaces d'entrée, même fréquence) on s'occupe de mesurer l'évolution du rendement du montage, c'est à dire le rapport de la puissance fournie à la résistance sur la puissance débitée par l'alim. On va négliger, pour cette mesure, la puissance fournie par le GBF et considérer que seule l'alim fournit la puissance aux transistors. On pourra justifier à posteriori l'hypothèse.

Pour les mesures : La puissance fournie par l'alim est la somme des deux puissances moyennes mesurées sur les ampèremètres multipliées par la tension de l'alim (continue) : $P_{in} = 15V \times (I_{moy,1} + I_{moy,2})$. La puissance fournie à la charge est elle évaluée grâce à $P_{in} = \frac{V_{out,RMS}^2}{R}$. On trace l'évolution du rendement en fonction de la tension efficace d'entrée, selon la même gamme qu'établie pour l'amplification en courant.

On met en évidence que le rendement augmente rapidement avec la tension efficace d'entrée. Or, on a également montré que le signal était écrêté lorsque la tension efficace était trop grande (signal distordu), donc il s'agit de trouver un **bon compromis entre rendement et saturation**.

6 Conclusion

Après avoir montré tout cela, on branche la sortie du montage à AO dans le montage push-pull et la sortie du push-pull dans un haut-parleur. On peut envoyer un signal de 50 mV dans l'ampli à AO et écouter le son du haut-parleur, ou bien brancher directement le micro et entendre sa propre voix. Il faut bien jouer avec les résistances de la plaquette de l'AO pour adapter le gain. (Le jour de la présentation, cela n'a pas été fait pendant l'exposé par manque de temps, mais pendant le temps de discussion.)

On a montré qu'une simple amplification de tension n'était pas suffisante pour écouter le son d'un micro, bien qu'elle permette de s'affranchir de la haute impédance du micro. Pour cela, il faut amplifier en puissance, puisque la faible impédance du haut-parleur le rend très demandeur en intensité. Les deux amplificateurs répondent à nos attentes, sur une plage de tension dont il convient d'être conscient.

7 Debriefing

7.1 Questions

- Dans quelle mesure l'écart-type donné par les stats de l'oscillo évalue-t-il correctement les erreurs sur la mesure de tensions efficaces ? **Réponse** : Durant une mesure de RMS, les bruits de tension constituent une erreur systématique et pas répartie statistiquement autour de la valeur moyenne car ils ne peuvent que s'ajouter à celle-ci. Il faut moyenner sur un grand nombre de traces pour que les bruits se compensent et que la valeur moyenne mesurée par l'oscillo soit précise.
- Quels sont les constituants principaux d'un AO réel ? **Réponse** : Un étage d'amplification push-pull s'occupe d'amplifier en puissance le signal ε existant entre les bornes V_+ et V_- . Théoriquement, on peut tout à fait acheter un AO capable d'alimenter le haut-parleur directement.
- Qu'est-ce qu'on a voulu tester en traçant le gain en tension de l'ampli non-inverseur en fonction de la tension d'entrée ? **Réponse** : la linéarité de l'amplificateur.
- Lors du tracé des Bodes par FFT de la réponse impulsionnelle, quels sont les paramètres qui dictent le choix de l'amplitude de l'impulsion ? **Réponse** : Deux choses : d'abord la saturation en tension, facilement évitable en vérifiant que la tension de sortie sera inférieure à $\pm 15V$; puis le slew-rate : si l'amplitude est trop importante, la variation temporelle de la tension d'entrée peut être trop rapide pour que l'AO fonctionne linéairement. Il faut jouer avec les paramètres pour s'assurer que ça n'arrive pas.
- Démontrer le lien entre le nombre de points de la FFT et les durées du pulse et d'acquisition temporelle. **Réponse** : passer par δf , l'écart spectral entre deux points du Bode.
- Pour le montage push-pull présenté, quelle est l'utilité des résistances et des diodes par rapport au push-pull de base ? **Réponse** : Les résistances permettent de fournir le courant de base de chaque transistor, les diodes en régime de conduction servent à s'affranchir de la tension de seuil des transistors (voir **saturation de croisement**, limite du montage de base).

7.2 Commentaires

- L'exposé s'est déroulé difficilement car certaines mesures ne coïncidaient pas avec celles réalisées en préparation. Les courants en entrée de push-pull étaient de l'ordre du μA , et très peu stables : les fils utilisés pour les branchements étaient probablement fatigués. La maquette a été retestée par JBD après coup, elle fonctionne correctement et avec des courants d'entrée plus grands. Il faut faire attention aux contacts en jeu.
- Si une mesure ne donne pas le résultat attendu, deux cas sont à considérer : soit une raison de l'erreur obtenue vient directement à l'esprit, dans ce cas on reprend une mesure directement; soit la raison de l'erreur est complètement inconnue, et dans ce cas il faut passer vite à la suite si l'on veut avoir le temps de tout faire. Le tout est de montrer au jury des traces propres et optimisées pour la mesure à l'oscillo, par exemple.
- Pour l'amplificateur non-inverseur, l'étude de la linéarité du gain n'est pas absolument nécessaire. On peut tout à fait faire une mesure unique et se concentrer plus sur le caractère passe-bas. **Une mesure possible** : Tracer $G(1/f_c)$ soit le gain de l'amplificateur en fonction de l'inverse de la fréquence de coupure correspondante, pour plusieurs points. On peut en déduire le produit Gain/Bande Passante de l'AO, et conclure sur le gain max que l'on peut appliquer à un système audio sans perdre en information sonore.
- Le montage push-pull avancé est intéressant car il permet de s'affranchir de la saturation de croisement, mais en revanche ce que l'on appelle l'amplification en courant ici ne correspond pas au gain $\beta = i_c/i_b$ qui apparaît sur les caractéristiques des transistors, car le courant de base i_b est également fourni par l'alimentation stabilisée par l'intermédiaire des résistances. C'est un choix à considérer, suivant ce que l'on veut montrer.