

MP22 : Amplification de signaux

Binôme 5 : **Vincent DENECHAUD**, Matthias LEBEAU

Correction : Jean-Baptiste Desmoulins

Introduction

- Amplification : processus actif visant à augmenter la puissance d'un signal.
- Technique de physique expérimentale qui connaît de nombreuses applications, notamment en électronique et en optique.
- **Manip de mise en contexte** : on branche un micro directement sur un haut-parleur. Aucun son ne sort du haut-parleur lorsqu'on parle dans le micro. Afin de comprendre ce qu'il se passe, on peut regarder à l'oscilloscope le signal de sortie du micro : lorsqu'on parle dans le micro, on observe un très faible signal d'une dizaine de mV d'amplitude. Il est donc nécessaire d'amplifier.
- Pour des signaux électriques, la puissance associée est $\mathcal{P} = UI$. L'amplification peut donc se faire aussi bien au niveau de la tension du signal U , que du courant I .

1 Amplification de tension

Dans notre exemple précédent, une première idée serait d'amplifier la tension en sortie de micro, à l'aide d'un montage à *amplificateur opérationnel* (AO).

1.1 Montage non-inverseur

- A l'aide d'une carte 2XAOP, on réalise un montage amplificateur non-inverseur, représenté en figure 1. Un tel montage réalise un gain statique G_0 entre tension d'entrée U_e et sortie U_s tel que :

$$G_0 = \left| \frac{U_s}{U_e} \right| = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (1)$$

- **Manip d'illustration** : on branche un GBF en entrée du montage (cf figure 1) tel que U_e soit une tension sinusoïdale de 300 Hz par exemple¹ (fréquence sonore typique). Afficher à l'oscilloscope simultanément U_e et U_s : on constate qu'il y a bien eu amplification en tension.

1. Attention, pour la clareté de la démonstration, à ne pas faire saturer l'AO en choisissant une amplitude $|U_e|$ trop grande.

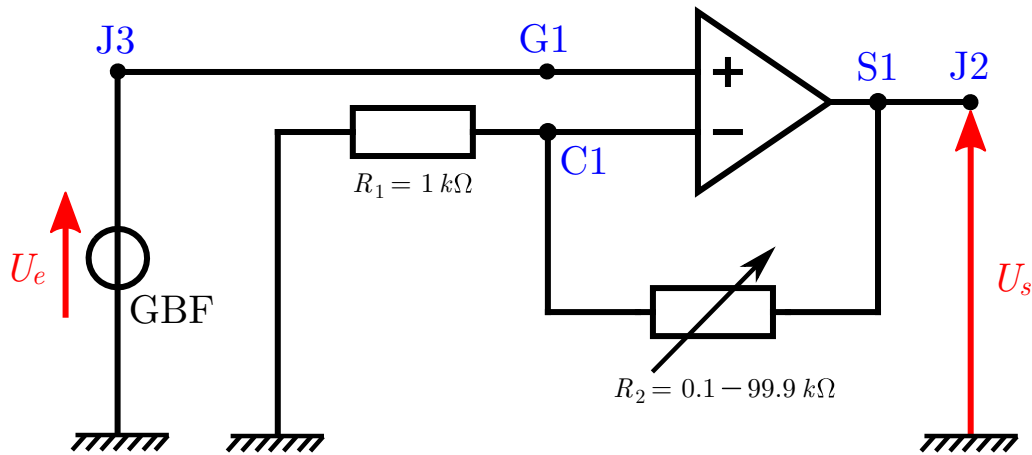


FIGURE 1 – Montage à AO non-inverseur.

Les branchements des composants sur les différentes bornes de la carte 2XAOP sont indiqués.

1.2 Produit Gain-Bande constant

- Bien sûr, cette amplification n'est pas sans limite : un tel montage n'est capable d'amplifier correctement que sur une bande passante donnée.
- On peut montrer que d'un point de vue de réponse fréquentielle, un tel montage non inverseur se comporte comme un filtre passe-bas du premier ordre possédant une fréquence de coupure $f_c = \omega_c/2\pi$ dont le *produit gain-bande* est constant, i.e. :

$$G_0 \omega_c = G_{AO} \omega_{AO} = c^{st} \quad (2)$$

où G_{AO} et ω_{AO} sont respectivement le gain et la fréquence de coupure du composant AO *seul*. Typiquement, on a $G_{AO} \sim 10^5$ (qui est considéré comme étant infini dans le modèle de l'AO idéal) et $\omega_{AO} \sim 10$ Hz.

- Du point de vue du montage, cela signifie qu'augmenter le gain d'amplification en tension G_0 implique une diminution de la fréquence de coupure f_c , i.e. de la bande passante sur laquelle il est possible d'amplifier des signaux. Expérimentalement, cela se manifeste par un "emboîtement" des diagrammes de Bode du montage non-inverseur lorsqu'on fait varier le gain, comme représenté en figure 2.
- **Manip d'illustration** : on utilise la macro Igor permettant de visualiser des diagrammes de Bode en live par réponse impulsionnelle². Lorsqu'on fait varier R_2 , on visualise "l'emboîtement" représenté en figure 2. Le message à faire transmettre ici est donc pour un montage à AO, *l'amplification se fait au détriment d'une restitution fidèle du signal d'entrée* à cause d'une bande passante limitée.

2. Sur cette manip, il faut être à l'aise avec la justification des paramètres de pulse, à savoir : pulse *sinc*, temps d'acquisition = 1/précision spectrale de la FFT, durée du pulse = 1/fréquence max explorée de la réponse impulsionnelle, amplitude de pulse pas trop forte pour éviter une saturation de l'AO, etc...

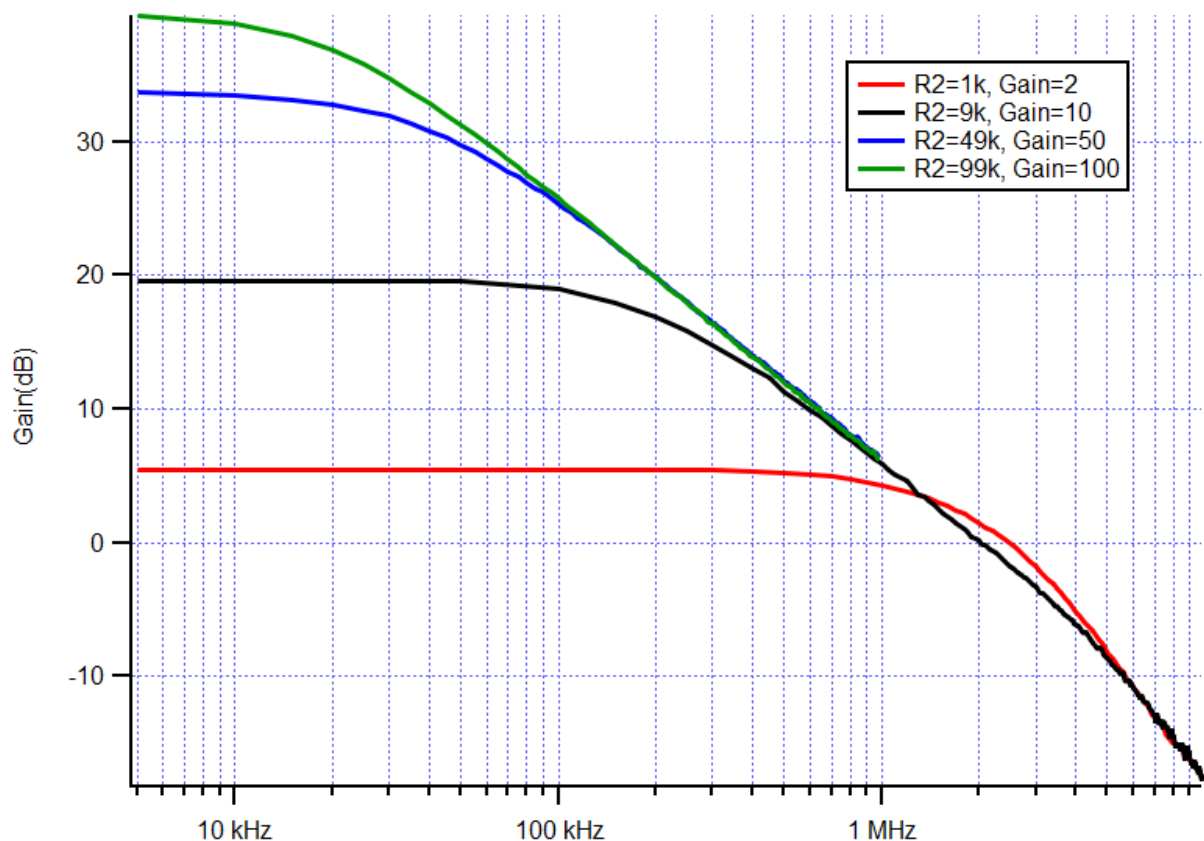


FIGURE 2 – **Produit Gain-Bande** passante constant d'un montage à AO non-inverseur.

Augmenter la valeur de R_2 , i.e. le gain G_0 se traduit par une diminution de la fréquence de coupure, i.e. de la bande-passante du montage non-inverseur. D'où un "emboîtement" des diagrammes les uns dans les autres.

- **Retour sur la manip avec le micro** : on branche le micro en entrée de montage non-inverseur et on branche le haut-parleur en sortie. Lorsqu'on parle dans le micro, il sort un son extrêmement faible du haut-parleur. Il n'y a donc toujours pas la puissance nécessaire pour produire un son : il faut amplifier le courant passant dans le haut-parleur.

2 Amplification de courant : le transistor bipolaire

Pour amplifier en courant, il faut pouvoir ajouter des électrons circulant dans le circuit. Pour cela, on peut utiliser un transistor bipolaire NPN, qui fonctionne comme un réservoir à électrons commandé.

- **Manip quantitative** : Afin de mettre en avant cette amplification en courant, on réalise le montage présenté en figure 3. On fait varier la tension U_e entre 0 et 10 V par exemple, en mesurant les courants I_B et I_C circulant respectivement dans la base et le collecteur du transistor à l'aide d'ampèremètres.

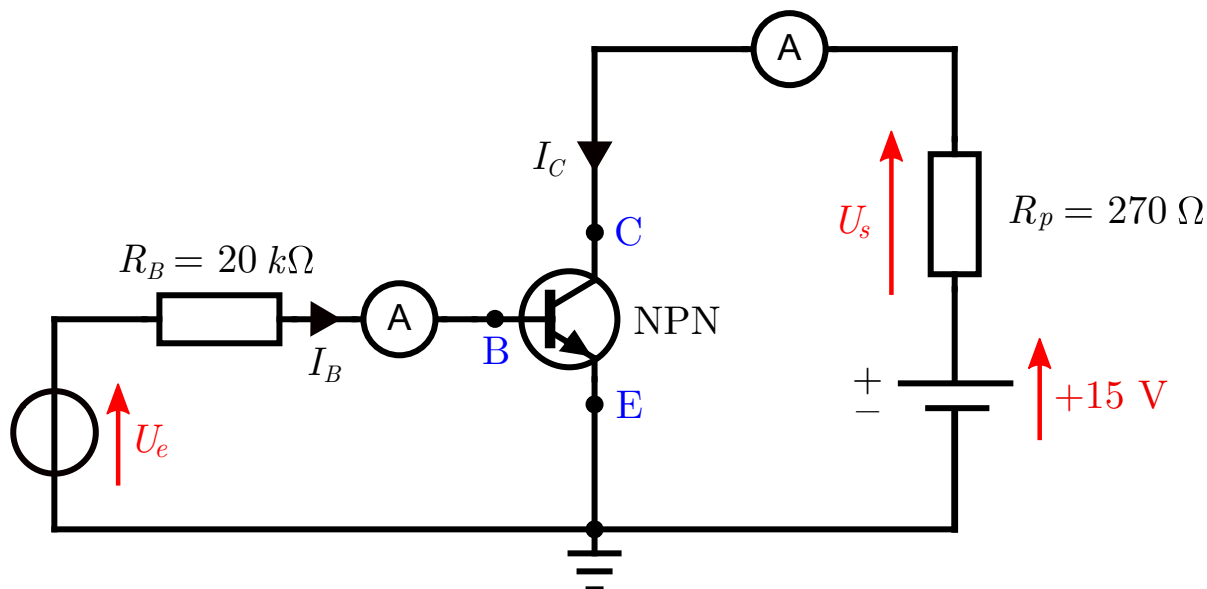


FIGURE 3 – **Etude d'un transistor bipolaire.**

Un transistor bipolaire est un composant à trois pattes : B = base, C = collecteur, E = émetteur.

- La courbe $I_C = f(I_B)$, représentée figure 4, a été prise entièrement en préparation. En live, on ne prendra qu'un seul point, par soucis de temps. On distingue deux régimes : un régime linéaire où I_B et I_C sont proportionnels selon une loi que l'on peut ajuster à partir des mesures :

$$I_C = \beta I_B \quad \text{avec} \quad \beta = 124 \pm 2, \quad (3)$$

et un régime saturé où I_C reste constant même lorsque I_B augmente. On a donc bien amplification du courant d'un facteur ~ 100 en régime linéaire.

- **Manip d'illustration** : on remplace l'alimentation variable fournissant $U_e = c^{st}$ par un GBF, de sorte à fournir à l'entrée du circuit un courant I_B sinusoïdal de 300 Hz. On visualise à l'oscilloscope la tension U_s aux bornes de la résistance R_p à l'aide d'une sonde différentielle³, qui est directement proportionnelle à I_C . On constate qu'un transistor NPN n'amplifie que les courants positifs, comme indiqué figure 5. En effet, la jonction base-collecteur d'un transistor NPN n'est rien d'autre qu'une jonction PN, c'est à dire qu'une diode qui ne laisse passer que dans un seul sens le courant.

3 Montage push-pull

Afin d'obtenir un courant amplifié I_e qui reproduit le plus fidèlement possible le courant non-amplifié I_B , on peut combiner sur un montage dit "push-pull" un transistor NPN amplifiant les courants positifs, avec un transistor PNP amplifiant les courants négatifs, comme indiqué en figure 6.

3. Il ne faut surtout pas brancher directement l'oscillo aux bornes de R_p , sans quoi on court-circuite l'alimentation +15 V du collecteur.

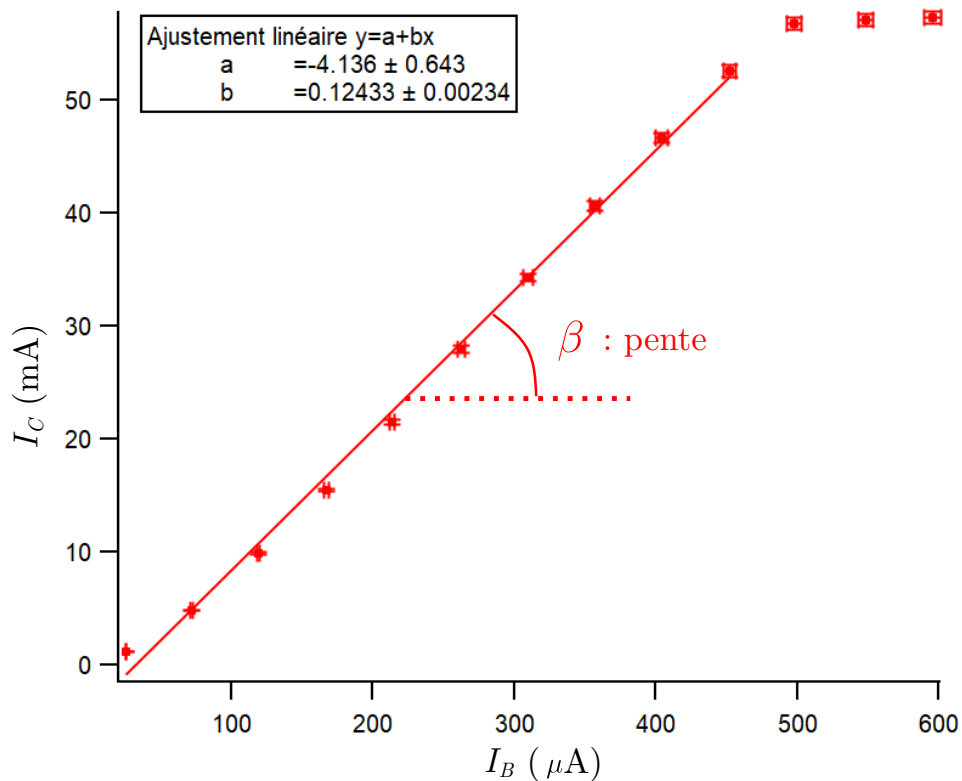


FIGURE 4 – Mesure du coefficient d'amplification β d'un transistor NPN.

A l'aide des ampèremètres représentés en figure 3, on mesure le courant de base I_B en fonction du courant de collecteur I_C . Les incertitudes de mesures sont fixées par la précision des multimètres, qui est de l'ordre de $\pm 1\%$.

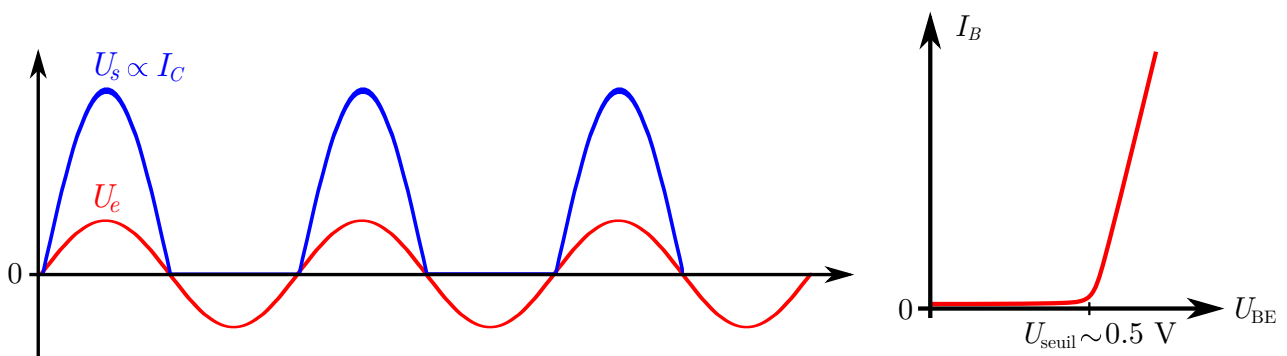


FIGURE 5 – Courant amplifié par un transistor NPN.

La jonction base-émetteur possède une caractéristique $I_B = f(U_{BE})$ de diode. Les courants négatifs ne peuvent donc pas circuler dans le transistor.

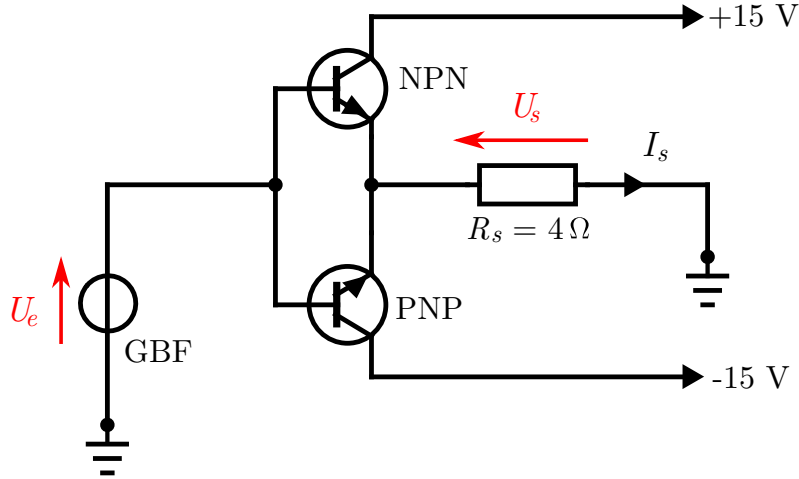


FIGURE 6 – Montage amplificateur push-pull.

La résistance de charge $R_s = 4 \Omega$ joue le rôle du haut-parleur, qui a une résistance d'entrée de 8Ω .

- **Manip d'illustration** : le GBF fournit une tension d'entrée U_e , i.e. un courant d'entrée I_e sinusoïdal de 300 Hz, on visualise à l'oscilloscope avec la tension U_s proportionnelle au courant de sortie I_s circulant dans la résistance R_s . Pour des courants d'entrée pas trop forts ($|U_e| \leq 10 \text{ V}$), le courant I_s est bien amplifié en valeurs positives et négatives. Néanmoins, on constate qu'il y a une déformation du signal autour de zéro : c'est ce que l'on appelle la *distorsion de croisement*. Cette distorsion provient de la réponse en tension du montage push-pull, qui n'est autre que la combinaison de la réponse en tension du NPN combinée avec celle du PNP, comme représenté en figure 7.
- **Manip semi-quantitative** : cette distorsion se matérialise concrètement d'un point de vue spectral par l'introduction de nouvelles fréquences dans le spectre de I_s par rapport à I_e . A l'aide de l'oscillo, on peut afficher les FFT de U_e et U_s et constater que la distorsion introduit tout un tas de nouvelles harmoniques. Pour savoir à quel point le signal est distordu, on peut estimer son taux de distorsion τ_d tel que :

$$\tau_d = \frac{1}{U_1} \sqrt{\sum_{i \geq 2} U_i^2} \quad (4)$$

c'est à dire le poids spectral des harmoniques $\{U_i\}_{i \geq 2}$ par rapport au fondamental U_1 dans la puissance totale du signal.

On peut l'estimer en mesurant à l'aide de l'oscillo les amplitudes $\{U_i\}_i$ des pics observés⁴. On pourra estimer que les pics ayant une amplitude inférieure à -40 dBV ne participent pas de manière significative à la puissance du signal. En live, on ne fera l'estimation que pour un seul point, en préparation on peut tracer la courbe $\tau_d = f(U_e)$, représentée en figure 8.

4. Pour une meilleure fidélité sur l'amplitude estimée, on pourra choisir un fenêtrage *flat-top* pour la FFT.

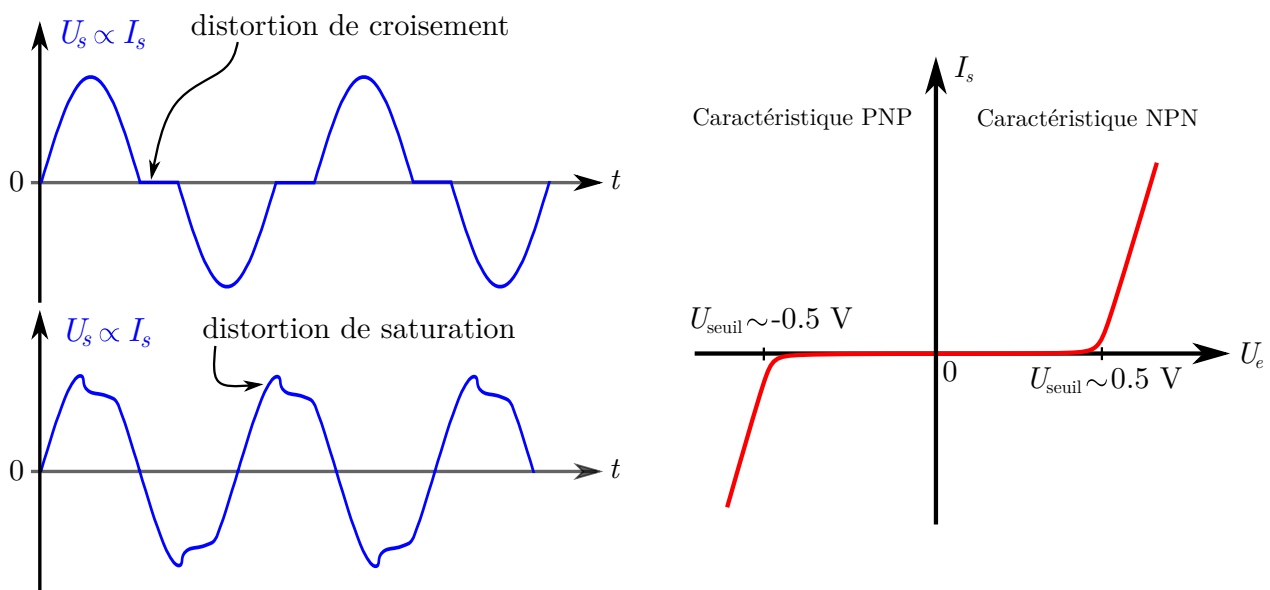


FIGURE 7 – **Distortions induites par un montage push-pull.**

La non-linéarité des transistors bipolaires caractérisée par leur tension seuil U_{seuil} de jonction entraîne l'apparition d'une distortion de croisement où le courant I_s délivré en sortie reste nul même pour $|U_e| \neq 0$. Pour des tensions d'entrée $|U_e| \sim 15 \text{ V}$ tension d'alimentation, il apparaît un autre type de distortion : une distortion de saturation uniquement due au fait que les alimentations ne peuvent pas fournir au circuit un courant demandant une tension supérieure à $\pm 15 \text{ V}$.

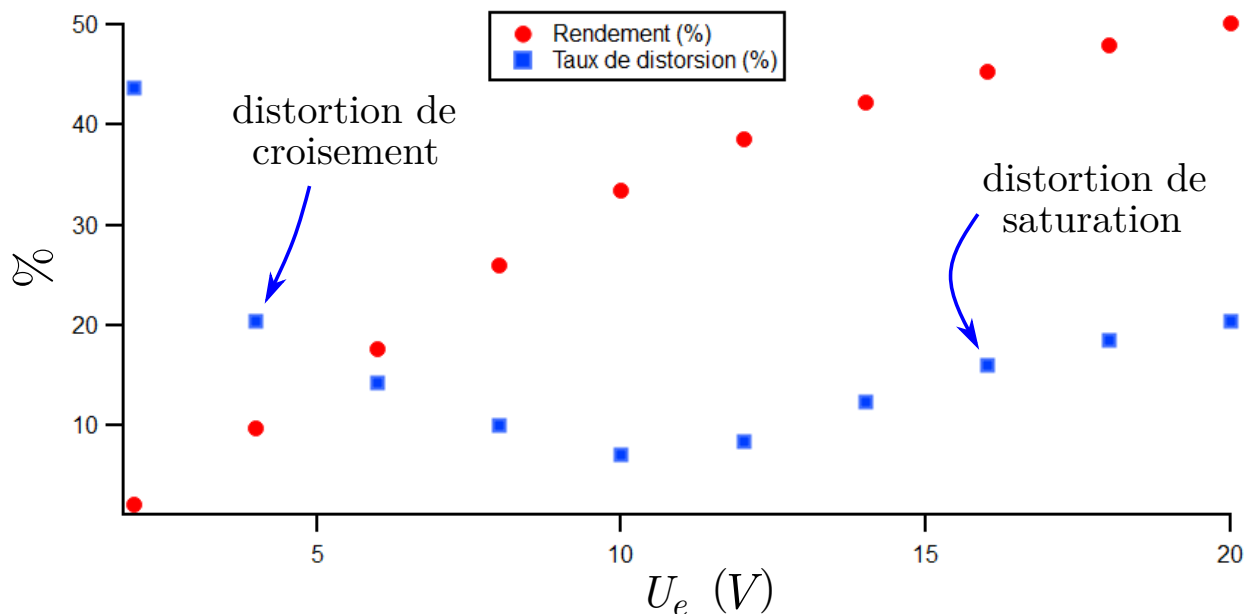


FIGURE 8 – **Estimation du taux de distortion τ_d du courant de sortie d'un montage push-pull.** Pour réaliser cette prise de mesure rapidement, on peut utiliser la macro Igor permettant d'intégrer la puissance d'un signal entre deux points choisis d'une FFT.

- **Manip de conclusion** : on branche le micro en entrée de montage non-inverseur (mettre le gain G_0 à fond), dont on branche la sortie sur le montage push-pull. La résistance de charge R_s du push-pull est alors remplacée par le haut-parleur : lorsqu'on parle au micro, on sort du son au haut-parleur, CQFA (Ce Qu'il Fallait Amplifier).

Conclusion et message principal du montage : la qualité d'une amplification d'un signal est toujours limitée par la bande-passante de l'amplificateur, ou bien par des non-linéarités inhérentes à l'amplificateur. D'ailleurs, ici, cela s'entend au micro : le son émis par le haut-parleur grésille.

Questions

1. **Qu'est-ce qu'un AO ?** C'est un circuit complexe contenant des transistors. Plus précisément un étage d'entrée avec un push-pull, un étage amplificateur différentiel entre les bornes + et -, et un push pull en étage de sortie. D'un point de vue fréquentiel, sa réponse est limitée par une fréquence de coupure déterminée par des effets capacitifs internes.
2. **Qu'est-ce qu'un AO idéal ? Des limitations ?** Un AO idéal a un gain G_{AO} et une bande passante ω_{AO} infinis, des courants d'entrée nuls, et une impédance de sortie nulle. Les premières limitations de ce modèle que l'on rencontre en pratique seront : une bande passante finie et une vitesse de balayage (*slew-rate*) finie.
3. **Pourquoi avoir choisi un pulse *sinc* pour tracer le diagramme de Bode du montage non-inverseur ?** Le sinus cardinal est une fonction aux variations "douces", ce qui permet pour limiter les éventuels effets de *slew-rate* de l'AO (contrairement au pulse carré qui, lui, induit de brusques variations de tension). De plus, la plage de fréquence explorée pour tracer le diagramme de Bode (délimitée par la TF du pulse) est carré avec un *sinc*.
4. **Qu'est-ce qu'un transistor NPN ?** C'est une jonction de trois couches semi-conductrices, une couche dopée P étant sandwichée entre deux couches dopées N.
5. **Quel est le rôle de la résistance de protection dans le montage push-pull ?** Lorsqu'un transistor amplifie, il dissipe une partie de l'énergie qui le traverse sous forme de chaleur par effet Joule : le transistor chauffe. Or, en chauffant les matériaux semi-conducteurs, on augmente les densités de porteurs de charge pouvant conduire du courant, on augmente ainsi l'amplification β qui chauffe de nouveau par effet Joule le transistor. Si rien n'est fait, il peut donc se produire un effet d'emballement thermique menant à la destruction des jonctions du transistor. La résistance R_p permet de limiter le courant traversant le transistor, et donc de se prémunir de cet effet.
6. **Comment fonctionne un ampèremètre ?** Le courant traverse une très faible résistance de valeur connue, associé à une tension très faible. Cette tension est ensuite amplifiée et calibrée en tant qu'image du courant à mesurer.

7. **Pourquoi la courbe $I_C = f(I_B)$ sature ?** Dans le circuit on a $V_{CE} = 15\text{ V} - R_p I_C$. Donc si I_B augmente, I_C augmente et donc V_{CE} diminue. Lorsque $V_{CE} < 0.4\text{ V}$, la jonction n'est plus assez polarisée et le courant I_B sature.

Commentaires

1. Sur la partie AO, on pourrait rendre la manip plus quantitative : on peut mesurer une fréquence et un gain et comparer le produit avec une information constructeur. Ou alors, on peut faire quand même le diagramme de Bode en live mais en expliquant qu'on cherche certaines fréquences, à certains gains, selon les informations constructeurs. On peut ainsi proprement dimensionner et justifier les paramètres du pulse.
2. Attention, si on fait varier le gain sur une grande plage, il faut prendre une amplitude de tension du pulse d'entrée faible. Nous avons un signal de sortie de 2V d'amplitude, pour un gain variant de 1 à 10. On pourrait diminuer l'amplitude du pulse.
3. Monter le push-pull en live permet de montrer de bonnes compétences de manipulation, sinon il y a une deuxième carte sur laquelle on peut préparer le montage.
4. On pourrait ne pas parler du taux de distorsion, et se concentrer sur tracer le rendement du push-pull. On commenterait uniquement à l'oral la distorsion sur l'oscilloscope.
5. Pour calculer le rendement du push-pull, il faut mesurer les courant d'alimentation i_{\pm} du NPN et du PNP. On prendra leurs valeurs moyennes et non efficaces. En effet, la puissance fournie par les deux alims $\pm 15\text{ V}$ s'écrit

$$P_{\text{alim}} = \langle u_+ i_+ \rangle + \langle u_- i_- \rangle = E (\langle i_+ \rangle - \langle i_- \rangle) \quad (5)$$

où $E = 15\text{ V}$. Pour mesurer une valeur moyenne, on peut utiliser le calibre DC du multimètre, ce calibre est un passe-bas qui conserve seulement la composante continue.

Bibliographie

- *Electronique expérimentale*, M. Krob, Ellipses.
- *Expériences d'électronique, agrégation de sciences physiques*, R. Duffait, Bréal.