

## AMPLIFICATEUR AUDIO

*Ce mini-projet est prévu pour être traité en 3 séances de TP. Vous prendrez soin de bien identifier vos plaques d'essai sur lesquelles vous laisserez câblés vos montages d'une séance à l'autre. Certaines parties du sujet doivent être préparées avant de venir en TP. Pensez à archiver vos résultats de manipulation afin de rédiger le compte rendu final (un compte rendu par binôme). Il est fortement conseillé de rédiger ce document au fur et à mesure de l'avancement du projet. Il devra présenter la méthodologie expérimentale (dûment illustrée de schémas), ainsi qu'une synthèse des résultats systématiquement commentés (comparaison aux principaux résultats théoriques issus de la prédétermination, analyse comparative des caractéristiques des deux étages de pré-amplification...).*

Dans le but de vous démarquer des autres binômes, une liste de manipulations « bonus » vous est proposé. L'objectif est de réaliser une expérimentation et/ou une analyse un peu plus poussée d'un phénomène ou d'un comportement. Vous devrez élaborer puis mettre en pratique une démarche expérimentale dans le but d'illustrer :

- Deux intérêts d'utiliser une sonde de tension  $1/10^{\text{ème}}$  pour réaliser une mesure à l'oscilloscope
- La dépendance du THD à la puissance (amplitude) de sortie d'un étage d'amplification
- La dépendance du rendement de l'amplificateur de classe B (ou AB) à la puissance de sortie
- Les limites de l'analyse par superposition d'un circuit
- Le théorème de Miller (ou effet Miller)
- Le phénomène d'intermodulation

Vous pourrez choisir de traiter une manipulation « bonus » et la présenter dans votre compte rendu. Attention à ne pas y consacrer trop de temps ! (il faut en priorité réaliser les manipulations imposées par le sujet)

L'objectif de ce projet est de réaliser la synthèse, la mise en œuvre, et la caractérisation d'un amplificateur audio. C'est l'occasion également d'illustrer des résultats théoriques de cours, et de confronter ces résultats à la pratique.

### **I. Cahier des charges**

L'amplificateur devra pouvoir délivrer une puissance de l'ordre de 10W dans une charge de  $8\Omega$  (haut-parleur) sous un THD de l'ordre de 1% à 1kHz. Un rendement supérieur à 50% est souhaité. La bande passante de l'amplificateur ainsi que son impédance d'entrée devront être compatibles avec la source de signal à amplifier. Cette source pourra être au choix une guitare électrique, un microphone, la sortie audio d'un téléphone portable, ...

Le matériel à votre disposition pour réaliser cet amplificateur est constitué de transistors bipolaires de signal et de puissance (NPN et PNP), de transistors à effet de champ (MOSFET signal) et d'amplificateurs opérationnels.

L'architecture retenue pour ce projet, que vous devrez justifier, est constituée de deux étages (au moins) d'amplification, l'un fonctionnant en classe A (préamplificateur), l'autre en classe B/AB. Vous devrez au cours des trois séances caractériser parfaitement chaque étage, afin d'aboutir à l'association complète source/amplificateur/charge.

### **II. Liste (non exhaustive) des tâches à effectuer**

#### **II.1 Caractérisation de la source de signal**

Quelle est l'amplitude de la tension délivrée à vide, quelle est l'impédance de sortie de la source, quelle est la bande de fréquence occupée ?

#### **II.2 Réalisation du préamplificateur**

Deux approches sont à investiguer selon que l'élément actif est un transistor bipolaire ou à effet de champ. Une étude comparative des deux solutions est souhaitée.

## A – Préamplificateur émetteur commun : préparation

### A.1 Polarisation

Le montage de principe est donné sur la figure 1 :

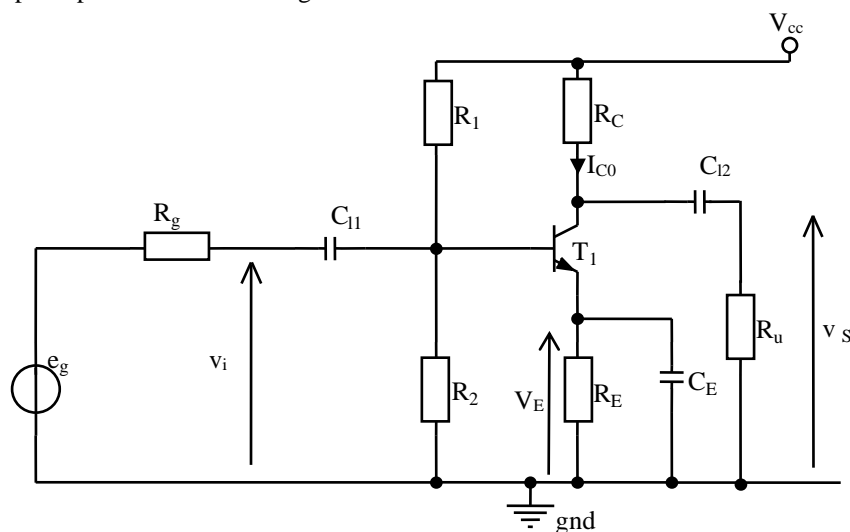


Figure 1 : Montage émetteur commun

Le transistor utilisé possède la référence 2N2219. On supposera pour l'étude de la polarisation que  $V_{BE0} = V_\delta = 0,6 \text{ V}$  et  $\beta = 100$ .

On donne  $R_g = 10 \text{ k}\Omega$  et  $V_{cc} = 15 \text{ V}$ . Calculer  $R_1$ ,  $R_2$  et  $R_E$  de façon à ce que  $V_E = 5 \text{ V}$ ,  $I_{C0} = 5 \text{ mA}$ . On souhaite respecter la relation :  $R_1 // R_2 = \beta R_E / 20$

Montrer que ces choix sont satisfaisants vis-à-vis des variations en température et des dispersions des caractéristiques des transistors. On supposera que  $V_{BE}$  varie de  $0,5 \text{ V}$  à  $0,7 \text{ V}$  et que  $\beta$  varie de  $100$  à  $200$ .

On donne  $R_C = 1 \text{ k}\Omega$  et  $R_u = 3,3 \text{ k}\Omega$ . En déduire la tension  $V_{CE0}$ .

Calculer alors la dynamique crête à crête lorsque le montage est à vide puis en charge.

Conclure sur le choix du point de polarisation en proposant d'éventuelles améliorations.

### A.2 Etude en petits signaux dans la bande passante

Dessiner le schéma équivalent petits signaux du montage. Calculer le gain en tension à vide et en charge de l'amplificateur, son impédance d'entrée et son impédance de sortie.

### A.3 Etude en petits signaux basses fréquences

Dans le domaine des basses fréquences, les capacités  $C_{11}$ ,  $C_{12}$  et  $C_E$  interviennent a priori. Dessiner le schéma "petits signaux" équivalent. On souhaite calculer les capacités  $C_{11}$ ,  $C_{12}$  et  $C_E$  permettant d'obtenir une fréquence de coupure basse d'au plus  $100 \text{ Hz}$ . Pour mener le calcul à bien, on suppose que la capacité  $C_E$  impose la fréquence de coupure basse ( $100 \text{ Hz}$ ) : cette hypothèse revient à dire que  $C_{11}$  et  $C_{12}$  imposent la fréquence la plus basse (de l'ordre de  $10 \text{ Hz}$  par exemple), la capacité  $C_E$  se comporte alors comme un circuit ouvert. On montre alors que le gain en tension s'écrit :

$$\frac{v_s}{e_g} = - \frac{g_m R_u R_C C_{12} p}{1 + (R_C + R_u) C_{12} p} \frac{r_{be}}{r_{be} + (\beta + 1) R_E} \frac{R_E C_{11} p}{1 + (R_g + R_E) C_{11} p}.$$

Ensuite, la fréquence de coupure basse (de l'ordre de  $100 \text{ Hz}$ ) est imposée par  $C_E$ ,  $C_{11}$  et  $C_{12}$  se comportant alors comme des court-circuits. Le gain en tension s'écrit alors :

$$\frac{v_s}{e_g} = -g_m R_c // R_u \frac{(R_1 // R_2) r_{be}}{R_g (R_1 // R_2) + (R_g + R_1 // R_2) (r_{be} + (\beta + 1) R_E)} \frac{1 + R_E C_E p}{1 + p / \omega_0}$$

$$\text{avec } \omega_0 = \frac{R_g (R_1 // R_2) + (R_g + R_1 // R_2) (r_{be} + (\beta + 1) R_E)}{(R_g (R_1 // R_2) + (R_g + R_1 // R_2) r_{be}) R_E C_E}$$

Pour la manipulation on pourra utiliser les valeurs suivantes :  $C_{11} = C_{12} = 1 \mu\text{F}$  et  $C_E = 100 \mu\text{F}$

#### A.4 Etude en petits signaux hautes fréquences

En hautes fréquences les capacités de liaison et de découplage se comportent comme des court-circuits. Par contre il faut prendre en compte les capacités intrinsèques des transistors et la résistance d'accès à la base. Le modèle du transistor (schéma de Giacoletto) est alors le suivant :

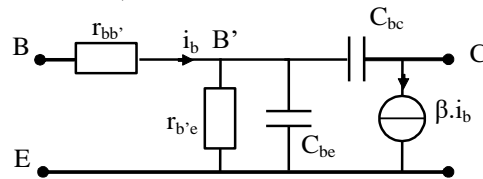


Figure 3 : Modèle de Giacoletto simplifié haute fréquence

Pour le montage à vide, établir le schéma équivalent petits signaux. Appliquer le théorème de Miller à la capacité  $C_{bc}$  puis montrer que le schéma équivalent petits signaux peut se mettre sous la forme suivante :

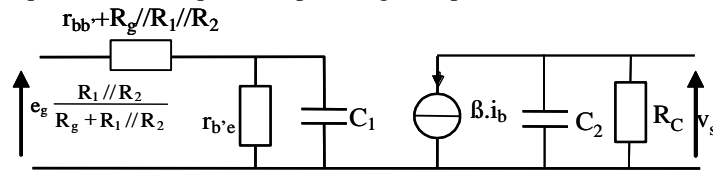


Figure 4 : Schéma équivalent petits signaux hautes fréquences

$C_1$  et  $C_2$  étant définis comme suit :  $C_1 = C_{be} + C_{bc}(1 + g_m R_C)$  et  $C_2 = C_{bc}(1 + \frac{1}{g_m R_C})$ .

La fréquence de coupure haute la moins élevée du montage est  $f_1 = \frac{R_g // R_1 // R_2 + r_{bb'} + r_{b'e}}{2\pi(R_g // R_1 // R_2 + r_{bb'})r_{b'e}C_1}$ . Calculer cette fréquence dans le cas où  $r_{bb'} = 100 \Omega$ ,  $C_{be} = 10\text{pF}$  et  $C_{bc} = 1\text{pF}$ . Conclure.

## B - Préamplificateur émetteur commun : manipulations

### B.1 Etude du transistor 2N2219

- Tracer la caractéristique statique de sortie  $I_C = f(V_{CE})$  à  $I_B$  constant puis la caractéristique d'entrée  $I_C = f(I_B)$  à  $V_{CE}$  constant d'un transistor bipolaire 2N2219 à l'aide du double multimètre (Keitley 2602).
- Etudier la caractéristique statique de sortie : zone de saturation, zone linéaire.
- Déterminer les valeurs du modèle statique 'petits signaux' valable dans la zone 'linéaire' pour une valeur convenable de  $V_{CE}$ . Calculer en particulier le gain en courant  $\beta$ .

### B.2 Etude du montage amplificateur

- Câbler le montage émetteur commun.
- Vérifier le point de polarisation et sa stabilité en température.
- Sur les caractéristiques mesurées précédemment de l'exemplaire de transistor que vous utilisez tracer les droites de charge statique et dynamique théoriques. Placer le point de polarisation mesuré. (Aucune manipulation supplémentaire n'est nécessaire, vous pourrez traiter cette question chez vous après le TP).
- Mesurer la dynamique de sortie du montage.
- Proposer et réaliser une manipulation permettant de trouver le domaine de validité de l'hypothèse de fonctionnement en régime de petits signaux du circuit.
- Mesurer les impédances d'entrée et de sortie.
- Tracer le diagramme de Bode dans une large gamme de fréquence. Mesurer les fréquences de coupure (à  $-3\text{ dB}$ ) basses et hautes du montage. Vérifier la valeur de la fréquence de coupure haute par rapport à votre calcul. En déduire le maximum d'éléments du schéma équivalent.

Sur le même modèle, pour l'amplificateur à transistor à effet de champ:

## C – Préamplificateur source commune : préparation

### C.1 Polarisation d'un transistor MOSFET à canal N

On considère le montage de la figure 5 dans lequel  $R_d = 1\text{ k}\Omega$ ,  $I_d = 5\text{ mA}$ ,  $I_p = 35\text{ }\mu\text{A}$  et  $V_{DS} = 5\text{ V}$ . Le transistor utilisé est un transistor MOSFET à canal N dont les caractéristiques constructeur sont les suivantes :  $K = 25\text{ mA}\cdot\text{V}^{-2}$  et  $V_T = 1,2\text{ V}$  (on rappelle l'équation de la courbe  $I_d = f(V_{GS})$  :  $I_d = K(V_{GS} - V_T)^2$  pour  $V_{GS} > V_T$ ).

- Comment se comportent les capacités  $C_i$  (capacité de liaison) et  $C_s$  (capacité de découplage) en statique ?
- Déterminer les valeurs de  $R_s$ ,  $R_1$  et  $R_2$ .
- Calculer la valeur de  $g_m$  au point de polarisation.

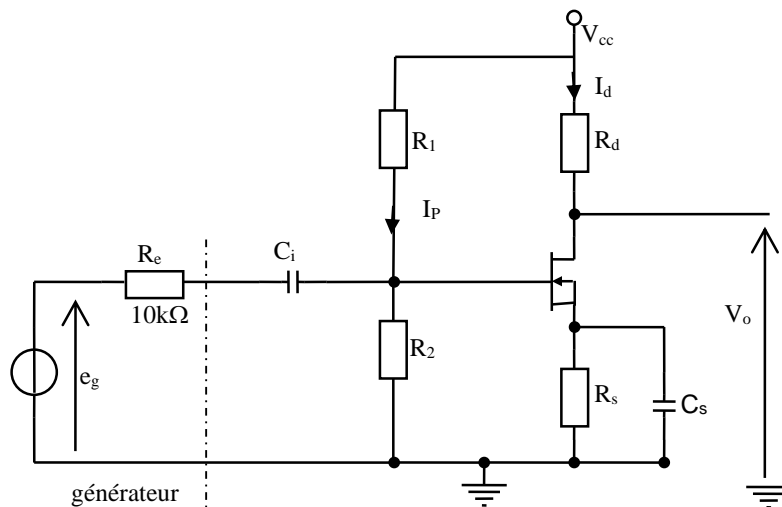


Figure 5 : Montage source commune

### C.2 Etude en basses fréquences et dans la bande passante

En considérant le modèle "petits signaux" du MOSFET :

- déterminer le schéma équivalent du montage.
- montrer (sans faire aucune approximation) que :

$$\frac{v_o}{e_g} = - \frac{g_m R_D}{1 + g_m R_S} \frac{1 + R_S C_S p}{1 + (R_S C_S / (1 + g_m R_S)) p} \frac{(R_1 // R_2) C_i p}{1 + (R_1 // R_2 + R_e) C_i p}.$$

- Tracer le diagramme de Bode correspondant (on supposera  $C_S \gg C_i$ ).
- Sachant que la capacité de découplage détermine la borne inférieure de la bande passante de l'amplificateur de tension, calculer les valeurs de  $C_i$  et  $C_S$  pour avoir une fréquence de coupure basse d'au plus 100Hz.
- Que se passe-t-il si la résistance  $R_S$  est parfaitement découplée ? Conclusion ?
- Préciser la dynamique de sortie crête à crête lorsque la résistance  $R_S$  est parfaitement découplée et que le montage est à vide.
- Calculer les impédances d'entrée et de sortie du montage dans la bande passante.

### C.3 Etude en hautes fréquences

On suppose la résistance  $R_S$  parfaitement découplée. Dans la pratique, il apparaît une deuxième fréquence de coupure située dans les hautes fréquences.

- Comment modifier le modèle "petits signaux" du transistor pour expliquer cette coupure ?

Le constructeur donne les paramètres suivants :  $C_{iss} = 50$  pF,  $C_{rss} = 10$  pF,  $C_{oss} = 44$  pF.

- Le paramètre  $C_{iss}$  correspond à la mesure de capacité entre grille et source lorsque drain et source sont court-circuités.  $C_{oss}$  est la capacité mesurée entre drain et source en court-circuitant grille et source. Enfin  $C_{rss}$  correspond à la capacité entre drain et grille, la source étant non connectée. Montrer qu'on a les relations suivantes :  $C_{iss} = C_{gs} + C_{gd}$ ,  $C_{oss} = C_{ds} + C_{gd}$ ,  $C_{rss} = C_{gd}$ . En déduire la valeur des paramètres utilisés pour définir le modèle "petits signaux" hautes fréquences ?

- Déterminer le schéma équivalent complet du montage et montrer que :

$$\frac{v_o}{e_g} = -g_m R_D \frac{R_1 // R_2}{R_1 // R_2 + R_e} \frac{1}{1 + R_D C_2 p} \frac{1}{1 + (R_1 // R_2 // R_e) C_1 p}$$

avec  $C_1 = C_{gs} + C_{gd}(1 + g_m R_D)$  et  $C_2 = C_{ds} + C_{gd}(1 + (g_m R_D)^{-1})$ .

- Calculer la fréquence de coupure haute.

## D - Préamplificateur source commune : manipulations

Les manipulations sont réalisées avec un transistor MOSFET à canal N de référence VN2222LL en boîtier TO-92. Les conventions sont rappelées ci-dessous.

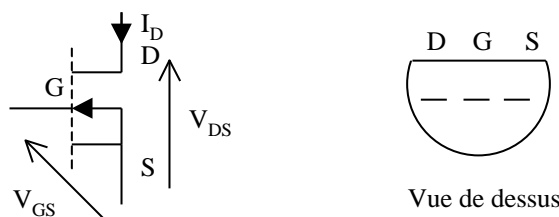


Figure 6 : Transistor MOSFET Canal N

### D.1 Etude du transistor VN2222LL

On souhaite relever les caractéristiques statiques  $I_d = f(V_{DS})$  à  $V_{GS}$  constant et  $I_d = f(V_{GS})$  à  $V_{DS}$  constant à l'aide du double multimètre (Keitley 2602). La puissance dissipée par le transistor sera limitée à 0,5 W.

- Relever la caractéristique de sortie  $I_d = f(V_{DS})$  pour  $V_{GS}$  variant de 1V à 4V puis la caractéristique d'entrée  $I_d = f(V_{GS})$  à  $V_{DS}$  constant. Déterminer la tension de seuil  $V_T$  et le gain K.
- Déterminer un modèle "petits signaux" valable dans la zone source de courant. Préciser la valeur de la transconductance pour un point de fonctionnement donné ( $I_d = 5$  mA et  $V_{DS} = 5$  V).

**D.2 Etude en régime linéaire : amplificateur de tension**

- Réaliser le montage de la figure 5.
- Relever le point de polarisation. Vérifier la stabilité de ce point vis-à-vis de la température et vis-à-vis du remplacement de l'exemplaire utilisé. Conclusion.
- Tracer la droite de charge statique théorique sur les caractéristiques relevées du transistor que vous utilisez. Placer le point de polarisation mesuré. (Aucune manipulation supplémentaire n'est nécessaire, vous pourrez traiter cette question chez vous après le TP).
- Proposer et réaliser une manipulation permettant de trouver le domaine de validité de l'hypothèse de fonctionnement en régime de petits signaux du circuit.
- Tracer le diagramme de Bode de la fonction de transfert  $V_o/e_g$  (phase et gain) dans une large bande de fréquences. Quel est le gain du montage dans la bande passante ?
- Mesurer les fréquences de coupure basse et de coupure haute. Comparer à vos calculs. Conclusions.
- Mesurer les impédances d'entrée et de sortie du montage dans la bande passante.
- Visualiser la courbe de réponse en fréquence ( $V_o/e_g$ ) à l'oscilloscope en utilisant les possibilités de wobulation des générateurs disponibles.
- Tracer sur les caractéristiques du transistor la droite de charge dynamique théorique. Evaluer la dynamique de sortie de l'amplificateur. Réaliser la mesure et comparer. Quel phénomène limite cette dynamique ?

**II.3 Réalisation de l'amplificateur de puissance**

Proposer une structure d'amplification à transistor bipolaire polarisé en classe B. Câbler cet étage, illustrer la problématique de distorsion, proposer et mettre en œuvre une solution.

**II.4 Synthèse**

Assembler les différents étages (source, préamplificateur, amplificateur de puissance et charge) et caractériser l'amplificateur synthétisé (THD, rendement, ...).