

TP: Montages à transistor bipolaire

Objectifs: Savoir polariser le transistor dans sa zone dite linéaire

Savoir caractériser un amplificateur de tension

- ⇒ Mesure de l'impédance d'entrée
- ⇒ Mesure de l'impédance de sortie
- ⇒ Réponse en fréquence (gain et fréquences de coupure à -3 dB)

Comprendre l'influence de paramètres ou composants sur les fréquences de coupure à -3 dB, sur la distorsion harmonique du signal de sortie

Comprendre le rôle du montage suiveur

Savoir dimensionner le montage suiveur à transistor

Durée: 2 séances de TP

Séance 1 = montage collecteur commun

Séance 2 = montage émetteur commun

Ressources sur Moodle: [Montages amplificateurs à transistors](#)

- ⇒ Datasheet du transistor BC238C
- ⇒ Supports de cours
- ⇒ Fiches méthodes de mesure des impédances d'entrée et sortie d'un quadripôle
- ⇒ Fiches montage émetteur commun – montage collecteur commun

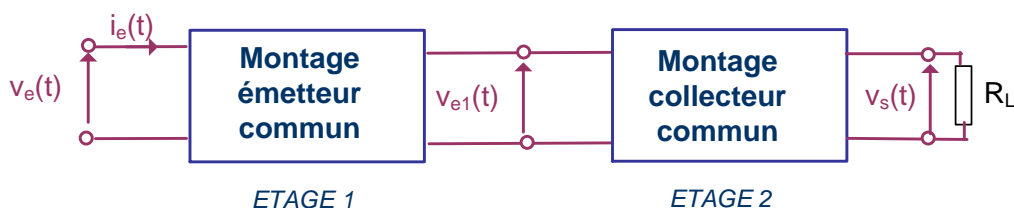


Préparation de la séance de TP: Les parties théoriques doivent être faites avant la séance de TP. Ce travail sera vérifié par les enseignants en début de séance.

Cahier des charges

→ Réalisation d'un amplificateur de tension de gain 26 dB sur une charge de $R_L = 4,7 \text{ k}\Omega$.

La structure utilisée est la suivante, structure qui sera à justifier au cours du TP:



Nous commencerons par étudier l'étage de sortie: le montage collecteur commun.

Partie 1: Mise en œuvre d'un montage collecteur commun

Cahier des charges

Dynamique de sortie de 3 V crête

Résistance d'entrée: $Z_{Ecc} = 100 \text{ k}\Omega \pm 10\%$

Fréquence de coupure basse: $f_{cb} = 70 \text{ Hz} \pm 10\%$

Taux de distorsion harmonique en sortie: $TDH \leq 1\%$

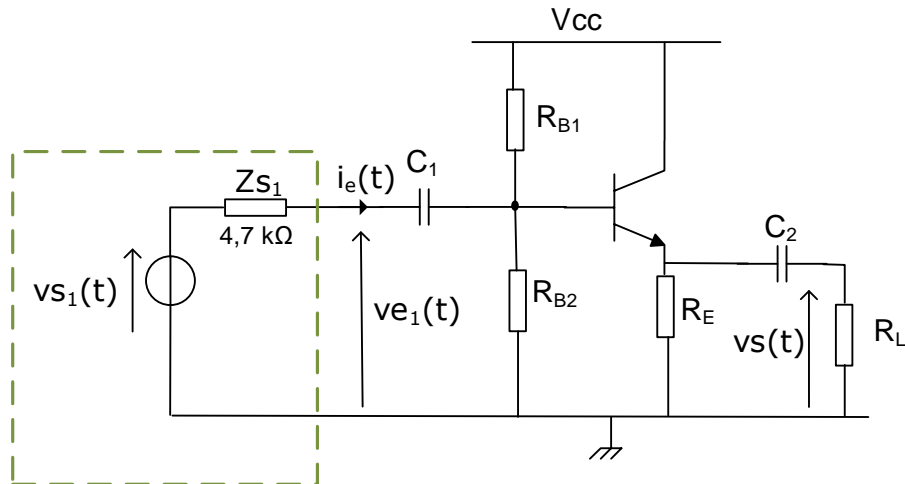
Alimentation de 12V

Transistor utilisé: BC238C (documentation technique disponible sur Moodle).

Bibliothèque ZETEX de PSpice

Pour procéder à l'étude du collecteur commun, on utilise comme générateur d'entrée de l'étage 2, le modèle de Thévenin (v_{s1} et Z_{s1}) de l'étage 1, **Z_{s1} étant la résistance de sortie de l'étage 1**. La charge du collecteur commun est une résistance R_L de 4,7 k Ω .

Le montage étudié est donc le suivant:



On fixe: $R_{B1} = 180 \text{ k}\Omega$; $R_{B2} = 270 \text{ k}\Omega$; $C_1 = 100 \text{ nF}$; $C_2 = 100 \text{ nF}$;
Courant de polarisation: $I_C \approx 2 \text{ mA}$



Théorie (à faire avant la séance de TP)

1- Tracez le schéma du montage qui permet d'étudier la polarisation.

Tracez le schéma du montage qui permet d'étudier le montage en dynamique petits signaux aux moyennes fréquences.



Il est très important pour vous d'essayer de tracer seul le schéma dynamique petits signaux (sans la correction du TD).

Indiquez les valeurs minimale et maximale de $\beta = h_{FE}$ du transistor BC238 (Cf. datasheet page 1 "h_{FE} classification")

2- Etude statique: polarisation

Exprimez le courant I_C en fonction de $R_{TH} = R_{B1} // R_{B2}$, $E_{TH} = \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} V_{CC}$, V_{BE} et R_E . Quelle condition

faut-il vérifier pour que le courant I_C ne dépende pas des variations de β ?

Calculez la valeur de R_E (valeur normalisée) afin d'obtenir un courant de collecteur de $I_C \approx 2 \text{ mA}$. Vérifiez que la condition précédente est bien vérifiée.

Exprimez la tension V_{CE} en fonction de R_E , I_C et V_{CC} (droite de charge statique), puis calculez V_{CE} .

3- Droites de charge



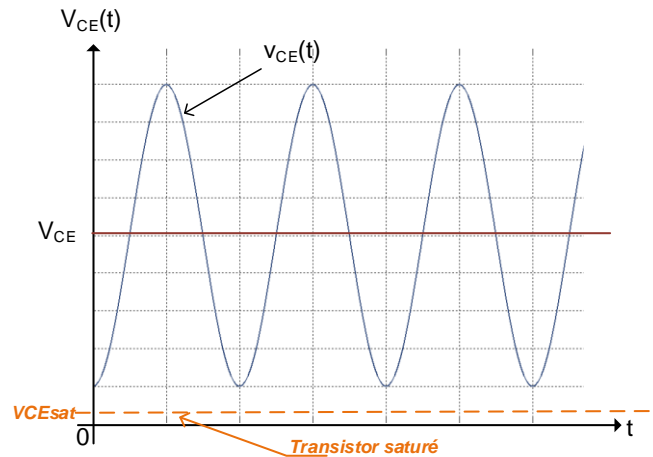
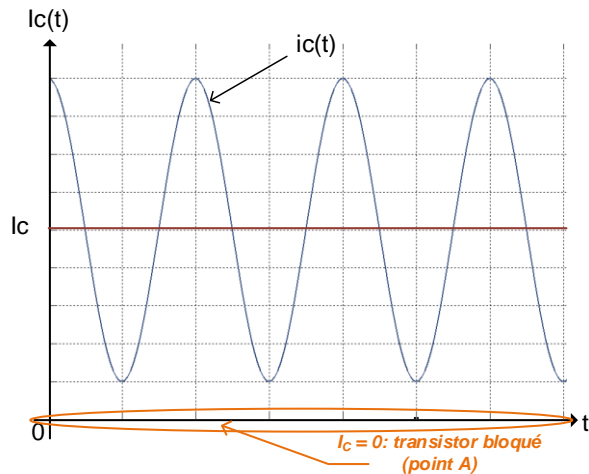
Quel que soit le montage à transistor utilisé (collecteur commun, émetteur commun,...), nous avons:

$$I_c(t) = I_C + i_c(t)$$

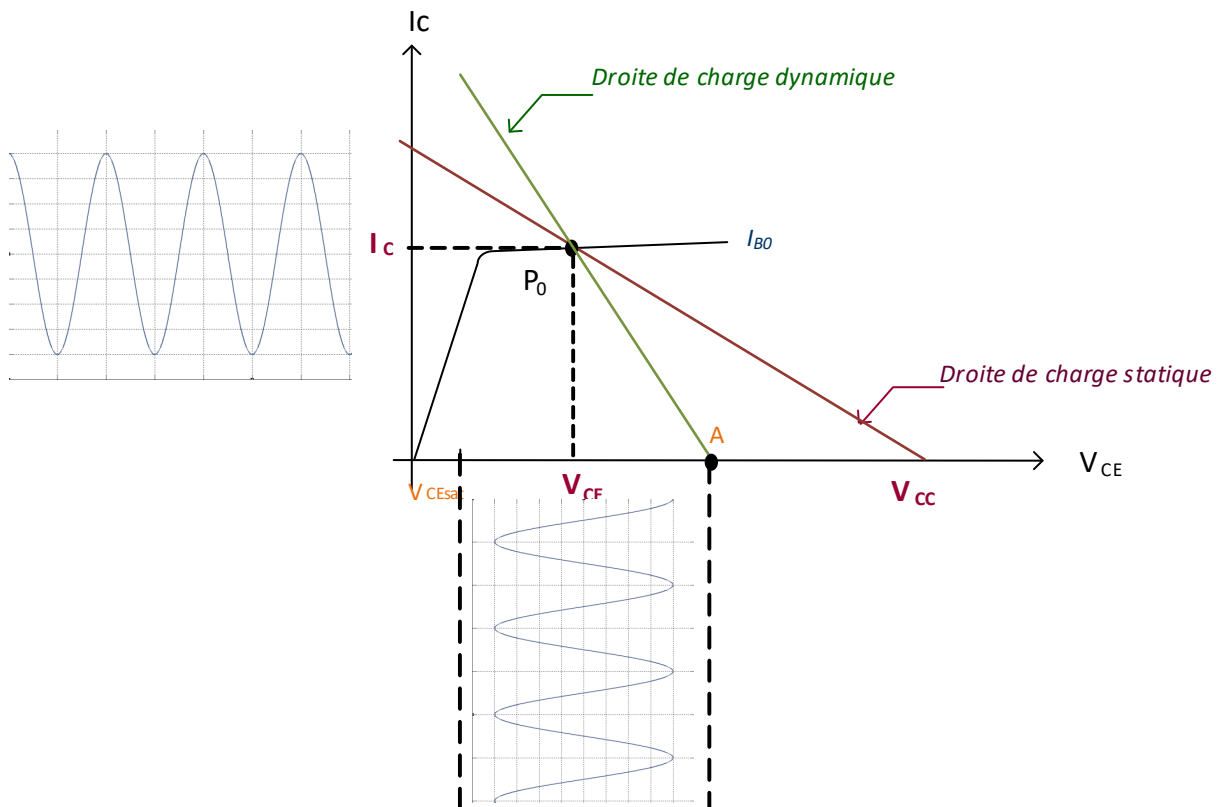
$$V_{CE}(t) = V_{CE} + v_{CE}(t)$$

Polarisation:
droite de charge statique
 V_{CE} en fonction de I_C

Dynamique petits signaux:
droite de charge dynamique
 $v_{ce}(t)$ en fonction de $i_c(t)$



Il faut choisir un point de polarisation (V_{CE} , I_C) de façon à ce que le transistor ne soit jamais saturé ou bloqué quand on lui applique en entrée une tension $e(t)$. On utilise alors les équations des droites de charge statique et dynamique pour déterminer les valeurs limites à ne pas dépasser afin de rester dans la zone de fonctionnement linéaire du transistor:



Pour le montage collecteur commun étudié, écrivez les équations des droites de charge statique et dynamique (expressions littérales!). Tracez ces droites dans le plan V_{CE} , I_C .
Rappelez la relation entre $v_s(t)$ et $v_{ce}(t)$.

Déterminez la variation maximale $v_{ce_{max}}$ de la tension $v_{ce}(t)$ avant blocage du transistor (point A dans le plan V_{CE} , I_C), expression littérale puis application numérique.

NB: On prendra 0.6 V comme valeur de $V_{CE_{sat}}$ (valeur maximale de la datasheet).

Est-ce que le point de polarisation et la résistance R_E choisis permettent d'obtenir la dynamique souhaitée (Dynamique de sortie de 3 V crête)? Justifiez votre réponse.

4- Caractéristiques du montage collecteur commun:

Rappelez (utilisez votre cours, vos TD) les expressions littérales de $\frac{V_s}{V_{e1}}$, $Z_{e_{cc}} = \frac{V_{e1}}{I_e}$ et $Z_{s_{cc}}$. Applications numériques.
Quel est le rôle d'un montage collecteur commun?



Simulation (pendant la séance de TP)

- 1- Simulez votre montage pour vérifiez la polarisation puis tracez la réponse en fréquence de votre amplificateur: mesurez le gain dans la bande passante et la fréquence de coupure basse à $-3dB$. Tracez l'impédance d'entrée $Z_{e_{cc}}$ en fonction de la fréquence. Mesurez sa valeur dans la bande passante et comparez avec votre calcul théorique.
Tracez l'impédance de sortie $Z_{s_{cc}}$ en fonction de la fréquence et mesurez sa valeur dans la bande passante. Comparez avec la théorie.

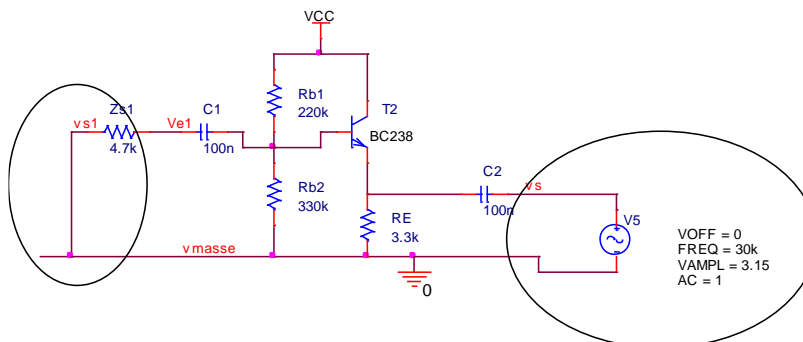


Mesure d'une impédance de sortie avec Pspice.

On rappelle que, par définition, $Z_s = \frac{V_s}{I_s}$ **lorsque le générateur $e_g(t)$ est éteint** (voir schéma du modèle d'un amplificateur).

En simulation, vous pouvez donc éteindre le générateur d'entrée et placer le générateur en sortie à la place de la charge R_L .

Pour le montage collecteur commun on a alors:



Après avoir effectué la simulation, il suffit de tracer v_s/i_{c2} pour obtenir Z_s en fonction de la fréquence.

2- Etude temporelle: dynamique et taux de distorsion harmonique

Appliquez votre signal sinusoïdal d'amplitude V_{emax} en entrée de façon à obtenir la dynamique de 3V crête en sortie. Visualisez la tension de sortie, la tension $V_{\text{CE}}(t)$ et le courant $I_{\text{C}}(t)$ et faite afficher la mesure du taux de distorsion harmonique de $v_s(t)$.

La charge a maintenant une valeur de $R_L = 2,2 \text{ k}\Omega$.

Tracez de nouveaux $v_s(t)$, $I_{\text{C}}(t)$ et $V_{\text{CE}}(t)$. Quel phénomène observe t-on et pourquoi? Justifiez très clairement votre explication en vous servant de la partie théorique, question 3 (droites de charge). Mesurez le nouveau taux de distorsion de la sortie.

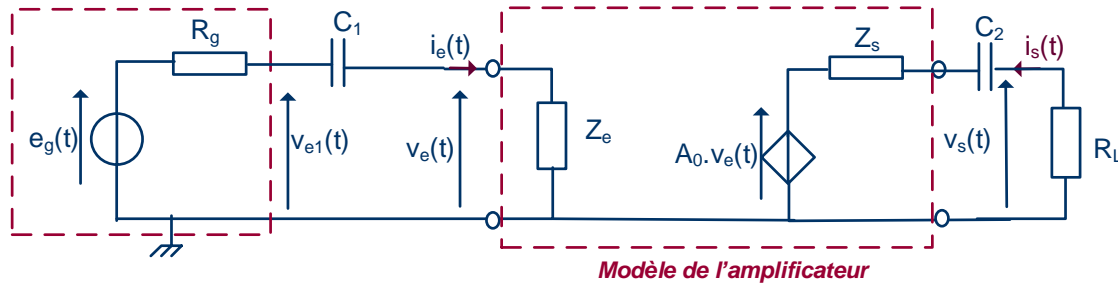


Câblez de nouveau la charge de $4,7 \text{ k}\Omega$.

3- Fréquences de coupure basses:



On rappelle que tout amplificateur de tension peut être modélisé par le quadripôle suivant:



Avec A_0 = gain en tension à vide

- Dans la bande passante: les condensateurs C_1 et C_2 ayant une faible impédance, ils sont modélisés par un court-circuit. On a alors

$$\frac{v_s}{v_{e1}} = \frac{R_L}{R_L + Z_s} \cdot A_0 = A$$

- Influence de C_1 et C_2 sur le gain en tension:

L'expression du gain en tension devient
$$\frac{v_s}{v_{e1}} = \frac{R_L}{R_L + Z_s} \cdot A_0 \cdot \frac{jC_1 Z_e \omega}{1 + jC_1 Z_e \omega} \cdot \frac{jC_2 (Z_s + R_L) \omega}{1 + jC_2 (Z_s + R_L) \omega}$$

Passe-haut

C_1 et C_2 introduisent deux fréquences de coupure basses:

$$f_{c1} = \frac{1}{2\pi Z_e C_1} \text{ et } f_{c2} = \frac{1}{2\pi (Z_s + R_L) C_2}$$

Pour le montage collecteur commun étudié, calculez f_{c1} et f_{c2} pour $C_1 = C_2 = 100 \text{ nF}$.

Conclure (ordre de grandeur de l'une par rapport à l'autre, ...).

Déterminez les valeurs de C_1 et C_2 pour que la fréquence de coupure basse du montage soit de $70 \text{ Hz} \pm 10\%$.



Les valeurs des condensateurs doivent être strictement inférieures à $1 \mu\text{F}$.



Rassemblez l'ensemble des mesures dans un tableau dans lequel vous pourrez reporter les valeurs simulées et les valeurs théoriques de façon à pouvoir comparer ces résultats et conclure.

- ⇒ Câblez votre montage et vérifiez la polarisation avant d'appliquer un signal d'entrée $v_e(t)$.
- ⇒ Vérifiez que vous respectez bien le cahier des charges:
 - Mesure du gain dans la bande passante et des fréquences de coupure à -3 dB
 - Dynamique de sortie
- ⇒ Mesurez les impédances d'entrée et sortie de votre montage: on pensera à rappeler les procédés de mesure (Cf. Fiches sur Moodle).
- ⇒ Observez la sortie pour $R_L = 2.2 \text{ k}\Omega$ au lieu de $4.7 \text{ k}\Omega$. Est-ce que vous observez le même phénomène qu'en simulation?



Câblez de nouveau la charge de $4,7 \text{ k}\Omega$.

Vous avez terminé d'étudier le montage collecteur commun. Vous devez maintenant faire un bilan de votre étude, bilan qui devrait vous aider lorsque vous aurez à dimensionner un montage collecteur commun pour un cahier des charges spécifique. Ce bilan est très important !!!!



Comment allez-vous procéder pour dimensionner un montage collecteur commun?

- Quelles données faut-il connaître? (Est ce que vous allez étudier ce montage avec un générateur idéal en entrée, est ce que vous allez étudier ce montage à vide, quelle est l'influence de la charge sur la dynamique de sortie et conclusion,...)
- Quelles grandeurs du montage vont être à traiter en priorité (Cf. rôle d'un collecteur commun: pour un montage collecteur commun, quelles sont les caractéristiques intéressantes, Z_e , Z_s , le gain?)

....

Ne dé-câblez pas votre montage !!!!!!!

Le collecteur commun est attaqué par un montage émetteur commun que nous étudierons lors de la séance 2 de TP.

A l'issue de cette étude, il faudra savoir justifier pourquoi nous devons utiliser le montage collecteur commun (Cf. partie 3).

Partie 2: Mise en œuvre d'un montage émetteur commun

Cahier des charges

Amplification de 26 dB (± 1 dB)

Impédance d'entrée minimale: $Z_{\text{emin}} = 15 \text{ k}\Omega$

Fréquence de coupure basse: $f_{\text{cb}} = 500 \text{ Hz} \pm 20\%$

Fréquence de coupure haute: $f_{\text{ch}} = 500 \text{ kHz} \pm 20\%$

Dynamique de sortie de 3 V crête

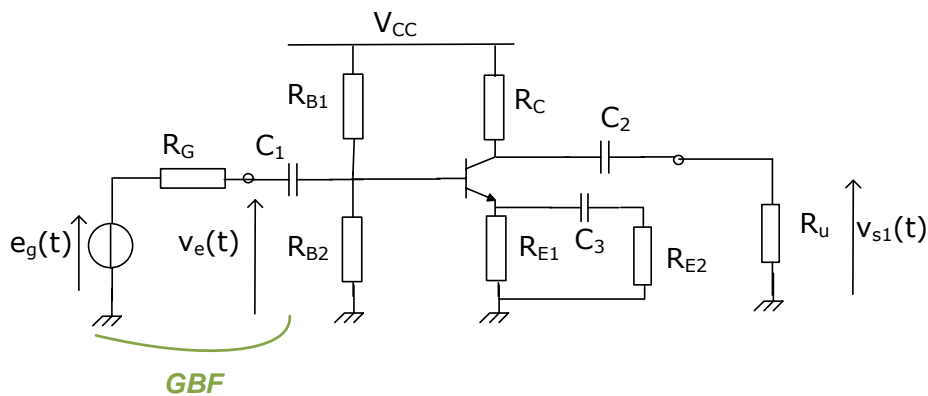
Taux de distorsion harmonique en sortie: $\text{TDH} \leq 1,5\%$

Structure utilisée: montage émetteur commun – alimentation de 12V

Transistor utilisé: BC238 (documentation technique disponible sur Moodle).

L'amplificateur est attaqué par un GBF de résistance interne $R_g = 50 \Omega$ et sera étudié **dans un premier temps** avec une charge de $R_u = 100 \text{ k}\Omega$.

Le montage est le suivant:



On fixe: $R_{E2} = 270 \Omega$; $R_{E1} = 1.2 \text{ k}\Omega$; $C_1 = 470 \text{ nF}$; $C_2 = 150 \text{ nF}$; $C_3 = 470 \text{ nF}$

Courant de polarisation: $I_{C0} \approx 1,2 \text{ mA}$



Théorie (à faire avant la séance de TP)

1- Tracez le schéma du montage qui permet d'étudier la polarisation.

Tracez le schéma du montage qui permet d'étudier le montage en dynamique petits signaux aux moyennes fréquences et *rappelez* les expressions littérales:

- du gain en tension $A = v_s(t)/v_e(t)$
- de l'impédance d'entrée $v_e(t)/i_e(t)$
- de l'impédance de sortie Z_s .

2- Déterminez la valeur de R_C (valeur normalisée) qui permet d'obtenir un gain en tension à vide de $A_{0\text{db}} = 26 \text{ dB}$.

En déduire la valeur de la résistance de sortie du montage émetteur commun ainsi que l'ordre de grandeur de R_u pour qu'il y ait adaptation en tension. Expliquez clairement votre raisonnement.

3- Polarisation et impédance d'entrée

Rappelez la condition pour que le courant I_{C0} ne dépende pas des variations de β .

Rappelez l'expression de l'impédance d'entrée.

Déterminez alors les valeurs de R_{B1} et R_{B2} de façon à respecter le cahier des charges.

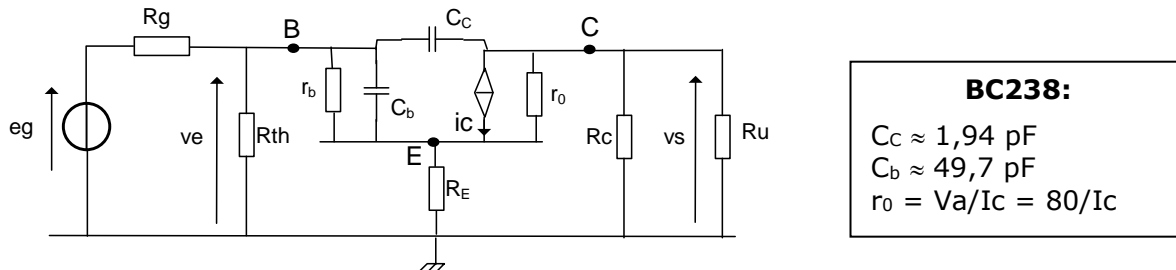
Calculez la valeur de la tension V_{CE0} obtenue.

4- Fréquences de coupure basses

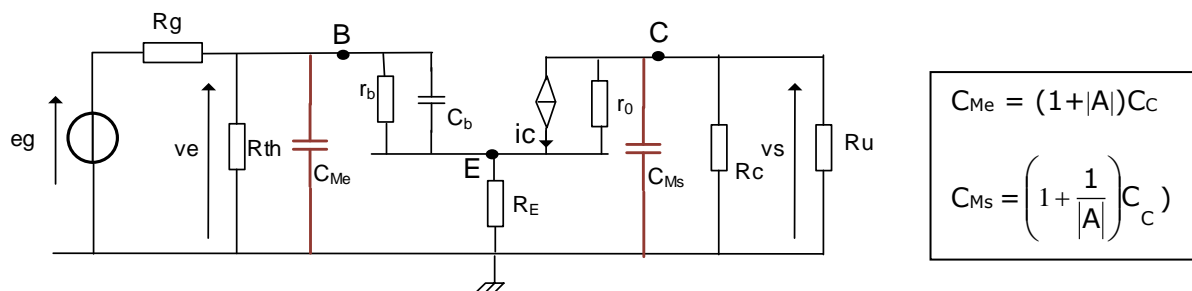
Tracez le schéma dynamique petits signaux et faites apparaître les condensateurs de liaison et de découplage. Rappelez les expressions littérales des fréquences de coupure dues à ces condensateurs (Cf. fiche résumé sur Moodle).

5- Fréquences de coupure hautes

En haute fréquence, on ne peut plus négliger l'influence des capacités C_b et C_c (capacités de diffusion et de jonction) du transistor. On utilise alors le modèle de Giacoleto pour modéliser le transistor. Le schéma dynamique petits signaux du montage est le suivant:



Avant de déterminer les fréquences de coupure hautes du gain, on utilise le théorème de Miller afin de simplifier le schéma: la capacité C_c est ramenée en entrée et en sortie. Le schéma devient:



Dans la suite on considère r_o comme un circuit ouvert (sa valeur étant grande devant les autres résistances du circuit).

➤ Influence de C_{Ms} seule:

$$\text{En sortie nous avons } \frac{v_s}{v_e} = - \frac{g_m \cdot (R_c // R_u)}{1 + g_m R_E} \cdot \frac{1}{1 + j C_{Ms} (R_c // R_u) \omega} = \frac{A}{1 + j C_{Ms} (R_c // R_u) \omega}$$

Passe-bas

$$\text{Et donc } \frac{v_s}{e_g} = \frac{Z_e}{Z_e + R_g} \cdot \frac{A}{1 + j C_{Ms} (R_c // R_u) \omega} \text{ avec } Z_e = R_{th} // (r_b + \beta \cdot R_E)$$

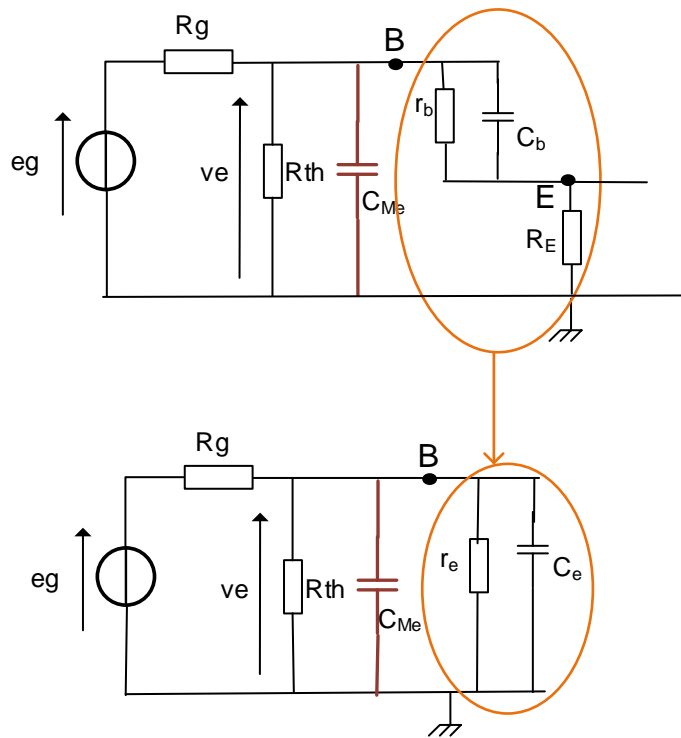
La fréquence de coupure a donc pour expression:

$$f_{ch2} = \frac{1}{2\pi (R_c // R_u) C_{Ms}} \text{ avec } C_{Ms} = \left(1 + \frac{1}{|A|}\right) C_C$$

➤ Influence de C_{Me} seule:

$$\text{Nous avons } \frac{v_s}{v_e} = - \frac{g_m \cdot (R_c // R_u)}{1 + g_m R_E} = A \text{ et donc } \frac{v_s}{e_g} = \frac{Z_e}{Z_e + R_g} \cdot A \text{ mais } Z_e \text{ dépend maintenant de } C_b \text{ et } C_{Me}.$$

Pour calculer Z_e on peut simplifier le schéma vu entre la base et la masse:



$$\text{Avec } C_e = \frac{C_b}{1 + g_m R_E} \text{ et } r_e = (r_b + \beta R_E)$$

$$\text{Ainsi } Z_e = R_{th} // r_e // \frac{1}{j(C_{Me} + C_e)\omega} = R_{th} // (r_b + \beta R_E) // \frac{1}{j(C_{Me} + C_e)\omega}$$

Le gain a donc pour expression:

$$\frac{v_s}{e_g} = \frac{R_{th} // (r_b + \beta R_E)}{R_{th} // (r_b + \beta R_E) + R_g} \cdot \frac{A}{1 + j(C_{Me} + C_e)(R_g // R_{th} // (r_b + \beta R_E))\omega}$$

Passe-bas

Et la fréquence de coupure a pour expression:

$$f_{ch1} = \frac{1}{2\pi(C_{Me} + C_e)(R_g // R_{th} // (r_b + \beta R_E))} \text{ avec } C_{Me} = (1 + |A|)C_C \text{ et } C_e = \frac{C_b}{1 + g_m R_E}$$

Dans le cas de notre montage émetteur commun, calculez les valeurs de C_{Me} , C_e , C_{Ms} .

$R_{th} // (r_b + \beta R_E)$ correspond à l'impédance d'entrée du montage aux moyennes fréquences. Rappelez sa valeur mesurée en simulation.

On souhaite voir l'influence des ces capacités **et** l'influence de R_g sur la fréquence de coupure haute de l'amplificateur étudié.

Pour cela, calculez les deux fréquences de coupure hautes pour:

- $R_g = 50 \Omega$
- $R_g = 2 \text{ k}\Omega$.

Conclure sur la valeur de la fréquence de coupure haute du montage.

6- Droites de charge

Tracez les droites de charge statique et dynamique (expressions littérales et applications numériques). Est-ce que la dynamique demandée est respectée? justifiez votre réponse.



(Pendant la séance de TP)

- 1- Simulez votre montage. Vérifiez la polarisation. Tracez la réponse en fréquence de votre amplificateur: mesurez le gain dans la bande passante et les fréquences de coupure à -3dB .
A partir de la mesure de votre gain, calculez l'amplitude V_{emax} du signal d'entrée à appliquer pour obtenir une dynamique de sortie de $V_{\text{smax}} = 3\text{V}$.
- 2- Impédance d'entrée/Impédance de sortie
Tracez Z_e (simulation) en fonction de la fréquence. Mesurez Z_e aux moyennes fréquences. Comparez avec votre théorie. Est-ce qu'il y a adaptation en tension en entrée?
Tracez Z_s en fonction de la fréquence et mesurez Z_s aux moyennes fréquences.
- 3- Etude temporelle: dynamique, distorsion harmonique
Appliquez votre signal sinusoïdal d'amplitude V_{emax} en entrée et visualisez la tension de sortie, la tension $V_{\text{ce}}(t)$ et le courant $I_c(t)$.
Mesurez la distorsion harmonique et vérifiez que le cahier des charges est respecté.
- 4- Fréquence de coupure basse
Calculez les fréquences de coupure introduite par les condensateurs C_1 , C_2 et C_3 (Cf. question 6 partie théorique). Comment allez-vous régler la fréquence de coupure basse à $f_{\text{cb}} = 500\text{ Hz}$ (à 20% près)?
Déterminez la ou les nouvelles valeurs de composant et mesurez la fréquence de coupure basse correspondante.



On conservera dans la suite ces nouvelles valeurs de composant

- 5- Complément sur la distorsion harmonique
Lorsque le point de fonctionnement est correctement choisi (pas de saturation ni de blocage du transistor), on peut quand même observer une distorsion non négligeable du signal de sortie. Cette distorsion est due à la loi de transfert qui lie le courant de sortie à la tension d'entrée de l'amplificateur:

$$I_c(t) \equiv I_s \cdot e^{\frac{V_{BE}(t)}{U_T}}$$

L'expression du taux de distorsion harmonique (TDH), à l'ordre 2, est rappelée ci-dessous:

Dans le cas du non dégénéré:	Dans le cas du dégénéré:
$TDH = \frac{v_{em}}{4 \cdot U_T}$	$TDH = \frac{v_{em}}{4 \cdot U_T} \cdot \frac{1}{(1 + g_m \cdot R_E)^2}$
Avec v_{em} l'amplitude du signal d'entrée et $R_E = R_{E1} // R_{E2}$	

En déduire l'intérêt ici d'utiliser un montage émetteur commun dégénéré ($v_{em} = v_{\text{max}}$).
Vérifiez que la résistance R_E a, ici, une valeur correcte.

On modifie maintenant R_{E2} pour augmenter le gain (on remarquera que la polarisation n'est pas modifiée!): $R_{E2} = 180\ \Omega$. On souhaite voir si ce changement aura des conséquences sur le TDH.
Mesurez le nouveau gain et adaptez la valeur maximale de la tension d'entrée pour obtenir une amplitude de 3V en sortie. Mesurez le nouveau taux de distorsion et expliquez ce résultat.



Modifiez la valeur de la résistance R_{E2} : $R_{E2} = 270\ \Omega$.

6- Fréquence de coupure haute

On souhaite fixer la fréquence de coupure haute à $f_{ch} = 500 \text{ kHz} \pm 20\%$.

Dans le cas où $R_g = 50 \Omega$, proposez une solution pour obtenir $f_{ch} = 500 \text{ kHz}$. Vérifiez par la simulation votre résultat.



- ⇒ Câblez votre montage et vérifiez la polarisation avant d'appliquer un signal d'entrée $v_e(t)$.
- ⇒ Vérifiez que vous respectez bien le cahier des charges:
 - Mesure du gain dans la bande passante et des fréquences de coupure à -3 dB
 - Mesure des impédances d'entrée et sortie
 - Dynamique de sortie et taux de distorsion harmonique
- ⇒ Relevez la réponse en fréquence de l'amplificateur émetteur commun (utilisez keysight benchvue). Faire apparaître sur votre relevé les fréquences de coupure à -3 dB et tracez les asymptotes.
- ⇒ Mesurez les impédances d'entrée et sortie de votre montage.

Pour conclure: mise en cascade des deux montages

On rappelle que l'amplification 26 dB doit être appliqué à une charge de $R_u = 4,7 \text{ k}\Omega$.

Connectez cette charge directement à votre montage à émetteur commun. Que constatez-vous?

Que faut-il faire pour résoudre ce problème (justifiez votre réponse).

Câblez votre solution et faites les mesures nécessaires pour vérifier rapidement que le cahier des charges est respecté.