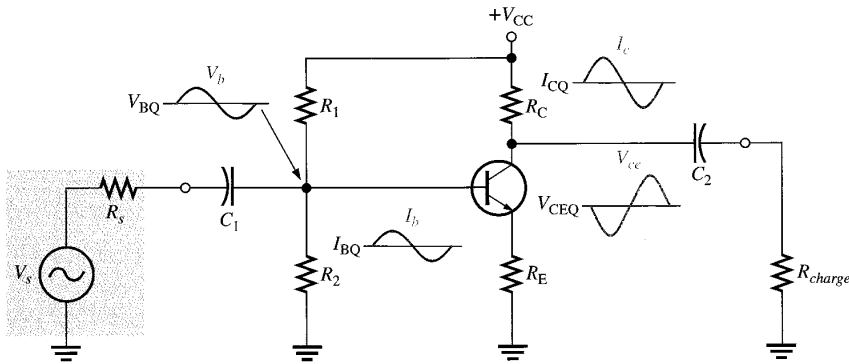
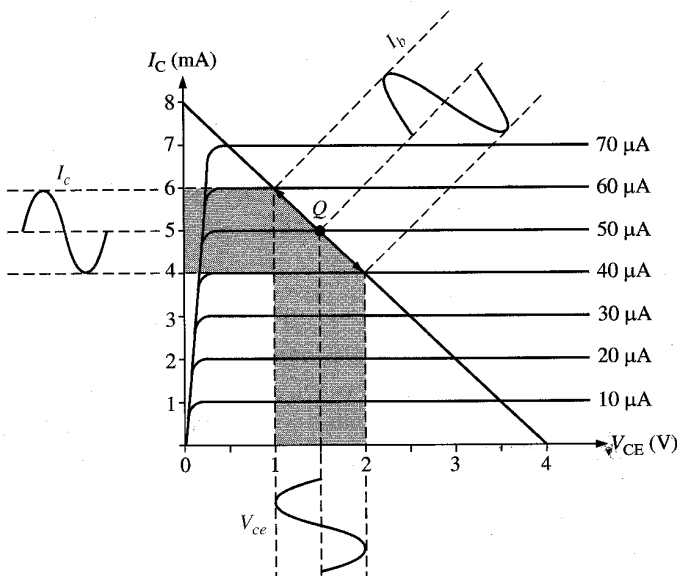


## Amplificateur à faibles signaux

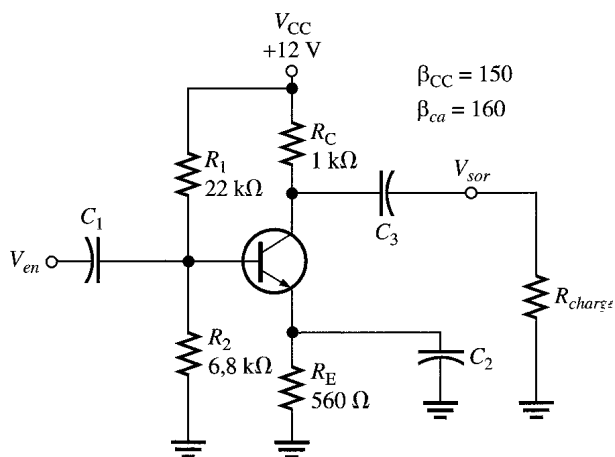


**Fig.1** – Amplificateur avec polarisation par diviseur de tension alimenté par une source de tension c.a. de résistance interne  $R_s$ .

comportent comme des courts-circuits pour la tension du signal alternatif. La tension de la source sinusoïdale fait osciller la tension à la base au-dessus et au-dessous de son niveau de polarisation courant continu. Par conséquent, la variation en courant à la base produit une variation plus grande en courant au collecteur à cause du gain en courant du transistor.



**Fig. 2** – Graphique de fonctionnement d'un amplificateur illustrant la variation du courant collecteur en fonction du courant base ( $I_B$  et  $I_C$  sont à des échelles différentes)



**Fig. 3** – Amplificateur à émetteur commun

La figure 1 illustre un transistor polarisé par diviseur de tension, avec une source de tension c.a. (courant alternatif) sinusoïdale couplée à la base par le condensateur  $C_1$  et dont la charge est couplée au collecteur par le condensateur  $C_2$ . Les condensateurs de couplage bloquent le c.c. (courant continu) et empêchent la résistance de la source  $R_s$  et la résistance de charge  $R_{charge}$  de changer les tensions en courant continu au collecteur et la polarisation de la base du transistor suivant.

Idéalement, les condensateurs se

comportent comme des courts-circuits pour la tension du signal alternatif. A mesure que le courant sinusoïdal au collecteur augmente, la tension au collecteur diminue. Le courant au collecteur varie au-dessus et au-dessous de sa valeur de point Q en phase avec le courant à la base. La tension sinusoïdale entre le collecteur et l'émetteur varie au-dessus et au-dessous de sa valeur de point Q avec un déphasage de  $180^\circ$  par rapport à la tension à la base, comme l'illustre la figure 1. Un transistor produit toujours une inversion de phase entre la tension à la base et la tension au collecteur.

**Illustration graphique :** Le phénomène que nous venons de décrire peut être illustré graphiquement avec les courbes caractéristiques de collecteur (figure 2). La tension sinusoïdale à la base produit un courant à la base qui varie au-dessus et au-dessous du point Q sur la droite de charge c.a., tel qu'indiqué par les flèches.

Les lignes droites projetées par les crêtes en courant à la base, traversant l'axe de  $I_C$  et l'axe de  $V_{CE}$ , indiquent les variations crête-à-crête en courant au collecteur et en tension  $V_{CE}$ . La droite de charge c.a. diffère de la droite de charge c.c. puisque la valeur réelle de la résistance c.a. au collecteur est  $R_{charge}$  en parallèle avec  $R_C$ . Cette valeur est donc inférieure à la résistance c.c. au collecteur  $R_C$  seule sans  $R_{charge}$  en parallèle. Cette différence entre les droites de charge c.c. et c.a. sera vue ultérieurement.

La figure 3 illustre un amplificateur à émetteur commun polarisé par diviseur de tension, avec les condensateurs de couplage  $C_1$  et  $C_3$  sur l'entrée et la sortie, ainsi que le condensateur de dérivation,  $C_2$ , entre l'émetteur et la masse. Le circuit combine un fonctionnement en c.c. et un fonctionnement en c.a.:

les deux doivent être pris en considération.

### Analyse c.c.

Pour analyser l'amplificateur (figure 3), les valeurs de polarisation c.c. doivent d'abord être déterminées. Pour ce faire, on développe un circuit équivalent c.c. en remplaçant les condensateurs de couplage et de dérivation par des circuits ouverts (on se souvient qu'un condensateur se présente comme un circuit ouvert en c.c.), comme l'illustre la figure 4.

La résistance c.c. d'entrée à la base est déterminée de la façon suivante:

$$R_{EN(\text{base})} = \beta_{CC} R_E = 150 \times 560 \Omega = 84 \text{ k}\Omega$$

Puisque dans le cas présent la valeur de  $R_{EN(\text{base})}$  est dix fois plus élevée que celle de  $R_2$ , elle peut être négligée dans le calcul de la tension c.c. à la base.

$$V_B \cong \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) V_{CC} = \left( \frac{6,8 \text{ k}\Omega}{28,8 \text{ k}\Omega} \right) \cdot 12 \text{ V} = 2,83 \text{ V}$$

$$V_E = V_B - V_{BE} = 2,83 \text{ V} - 0,7 \text{ V} = 2,13 \text{ V}$$

$$\text{Par conséquent : } I_E = \left( \frac{V_E}{R_E} \right) = \left( \frac{2,13 \text{ V}}{560 \Omega} \right) = 3,8 \text{ mA}$$

Puisque :  $I_C \cong I_E$ , alors :  $V_C = V_{CC} - I_C R_C = 12 \text{ V} - (3,80 \text{ mA} \cdot 1 \text{ k}\Omega) = 12 \text{ V} - 3,80 \text{ V} = 8,20 \text{ V}$

Finalement :  $V_{CE} = V_C - V_E = 8,20 \text{ V} - 2,13 \text{ V} = 6,07 \text{ V}$

### Circuit équivalent c.a.

Pour analyser le fonctionnement c.a. d'un amplificateur, on développe un circuit équivalent c.a. de la façon suivante:

**Les condensateurs  $C_1$ ,  $C_2$  et  $C_3$  sont remplacés par des courts-circuits, puisque  $X_c \cong 0 \Omega$  à la fréquence du signal.**

**Masse virtuelle c.a.** La source c.c. est remplacée par une mise à la masse. En assumant que la source de tension possède une résistance interne d'environ  $0 \Omega$ , aucune tension c.a. n'est ainsi développée aux bornes de la source. Par conséquent, la borne  $V_{CC}$  tombe à un niveau de potentiel c.a. de zéro volt et est appelé la masse virtuelle c.a.

Le circuit équivalent c.a. pour l'amplificateur à émetteur commun de la figure 3 est illustré à la figure 5 a). Notez que  $R_C$  et  $R_1$  ont tous les deux une extrémité connectée à la masse au point de vue c.a. Dans le circuit réel, elles sont reliées à  $V_{CC}$ , qui est ici remplacé par la masse virtuelle c.a.

Dans l'analyse c.a., la masse virtuelle c.a. et la masse c.c. sont considérées comme un seul et unique point électrique. L'amplificateur de la figure 3 est de type à émetteur commun puisque le condensateur de dérivation  $C_2$  garde l'émetteur à la masse au point de vue c.a. (la masse étant le point commun dans un circuit).

**Tension (c.a.) du signal à la base.** La figure 5 b illustre une source de tension c.a. connectée à l'entrée. Si la résistance interne de la source c.a. est de  $0 \Omega$ , toute la tension de la source apparaît à la borne de la base.

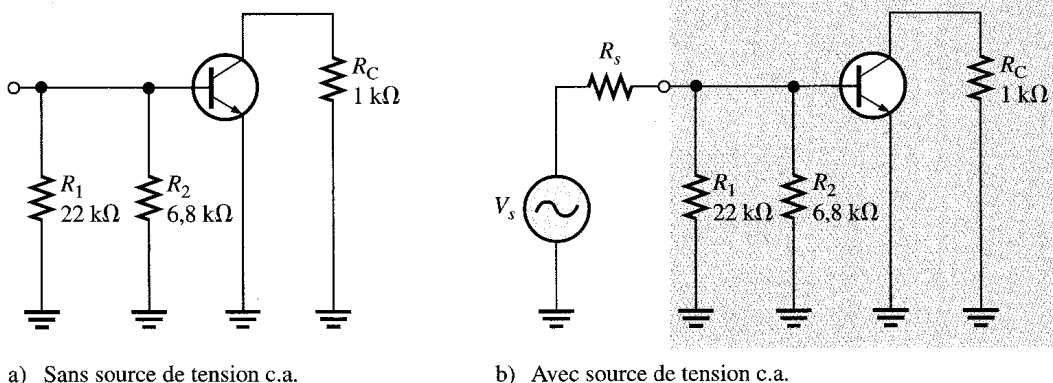


Fig. 5 – Circuit équivalent c.a. pour l'amplificateur de la fig. 3

Cependant, si la source c.a. possède une résistance interne différente de zéro, il faut alors prendre en considération trois facteurs pour déterminer la tension réelle du signal à la base. Ces facteurs sont la résistance de la source, la résistance de polarisation et la résistance d'entrée (ou l'impédance d'entrée) de la base. La figure 6a) illustre ce concept qui peut être simplifié en combinant  $R_1$ ,  $R_2$  et  $R_{en(base)}$  en parallèle afin d'obtenir la résistance d'entrée totale,  $R_{en(tot)}$  (figure 6b) Nous pouvons constater que la tension de la source  $V_s$  est divisée à la fois par  $R_s$ , (résistance de la source) et par  $R_{en(tot)}$ . On calcule donc la tension du signal à la base du transistor en utilisant la formule de diviseur de tension suivante:

$$V_B = \left( \frac{R_{en(tot)}}{R_s + R_{en(tot)}} \right) \cdot V_s$$

Si  $R_s \ll R_{en(tot)}$ , alors  $V_b \cong V_s$  où  $V_b$  est la tension d'entrée  $V_{en}$  vers l'amplificateur.

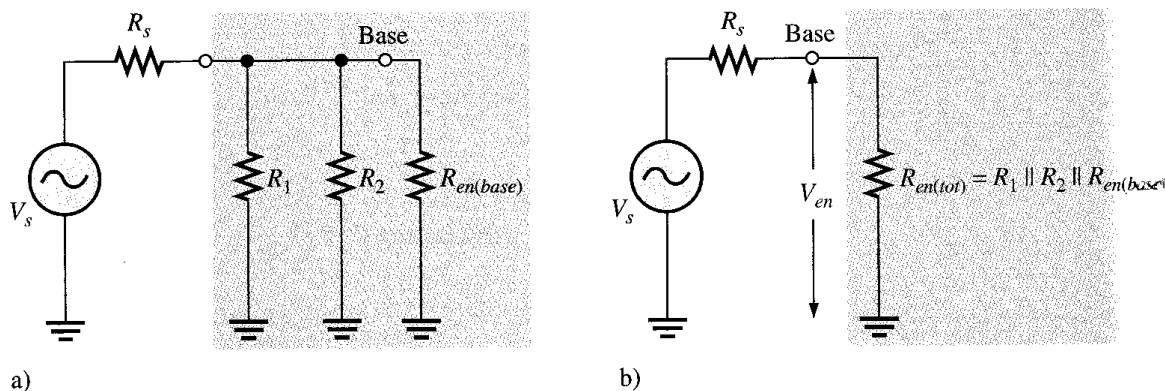


Fig. 6 – Schéma équivalent c.a. du circuit de base

**Résistance d'entrée** La résistance d'entrée totale vue par la source est la combinaison parallèle de  $R_1$ ,  $R_2$  et  $R_{en(base)}$

$$R_{en(tot)} = R_1 \parallel R_2 \parallel R_{en(base)}$$

**Résistance de sortie** La résistance de sortie de l'amplificateur à émetteur commun vue à partir du collecteur est approximativement égale à la résistance au collecteur.

$$R_{sor} \cong R_C$$

En réalité,  $R_{sor} = R_e \parallel r_c'$ , mais puisque la résistance c.a. au collecteur du transistor  $r_c'$  est typiquement beaucoup plus élevée que  $R_C$ , cette approximation est habituellement valable.

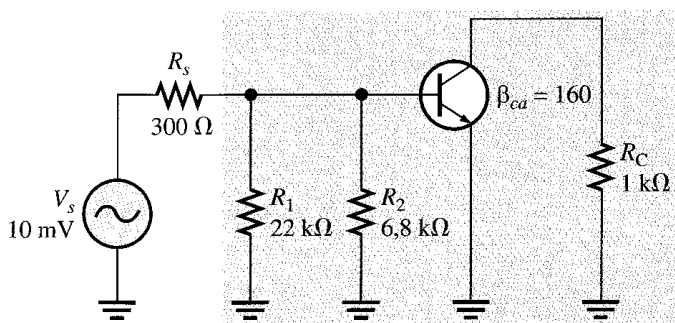


Fig 7

Pour illustrer le notion de signal à la base (voir n° précédant), voici un exemple où on se propose de déterminer la tension du signal à la base du transistor à la figure 7. Ce circuit est l'équivalent c.a. de l'amplificateur de la figure 3 avec une source fournissant un signal de 10 mV eff. et d'impédance interne de 300 Ohms. La valeur de  $I_E$  a déjà été calculée à 3,80 mA.

**Solution :** Pour ce faire, il faudra calculer d'abord la résistance présentée par la jonction « base-émetteur », appelée résistance c.a. à l'émetteur  $r_e'$ , par la formule simplifiée, mais suffisante :

$$r_e' \cong \frac{0,025 \text{ mV}}{I_E}$$

$$r_e' = \frac{0,025}{I_E} \cong \frac{0,025}{0,00380} = 6,58 \Omega$$

Cette résistance, vue de la base est égale à :  $R_{en(base)} = \beta_{ca} \cdot r_e'$

Donc,  $R_{en(base)} = \beta_{ca} \cdot r_e' = 160 \times 6,58 \cong 1050 \Omega$  soit  $1,05 \text{ k} \Omega$  ou  $1,05 \cdot 10^3 \Omega$

Déterminons ensuite la résistance d'entrée totale vue par la source.

$$R_{en(tot)} = R_1 // R_2 // R_{en(base)} = \frac{1}{\frac{1}{22 \cdot 10^3} + \frac{1}{6,8 \cdot 10^3} + \frac{1}{1,05 \cdot 10^3}} = 873 \Omega$$

La tension de la source est divisée à la fois par  $R_s$  et par  $R_{en(tot)}$ . La tension du signal à la base est donc la tension aux bornes de  $R_{en(tot)}$ .

$$V_s = \left( \frac{R_{en(tot)}}{R_s + R_{en(tot)}} \right) V_s = \left( \frac{873}{1173} \right) \times 10 \cdot 10^3 \text{ V} = 7,44 \text{ mV}$$

Nous pouvons constater un effet d'atténuation (réduction) de la tension de la source causée par sa résistance interne et par la résistance d'entrée de l'amplificateur, agissant comme un diviseur de tension.

### Gain en tension de l'amplificateur à émetteur commun

L'expression du gain en tension c.a. est développée en utilisant le circuit équivalent de la figure 8. Le gain est le rapport entre la tension c.a. de sortie au collecteur ( $V_c$ ) et la tension c.a. d'entrée à la base ( $V_b$ ).

$$A = \frac{V_{sor}}{V_{en}} = \frac{V_c}{V_b}$$

Notez que  $V_c = \alpha_{ca} \cdot I_e \cdot R_c \cong I_e \cdot R_c$  et que  $V_b = I_e \cdot r_e'$ . Par conséquent,

$$A_v = \frac{I_e \cdot R_c}{I_e \cdot r_e'}$$

Les termes  $I_e$  s'annulent pour donner  $A_v = \frac{R_c}{r_e'}$ , avec :  $r_e' \cong \frac{0,025}{I_E}$

Cette équation donne le gain en tension entre la base et le collecteur.

Pour obtenir le gain total de l'amplificateur entre la tension de la source et le collecteur, on doit tenir compte de l'atténuation du circuit d'entrée. L'atténuation est la diminution de la tension d'un signal lorsqu'il traverse un circuit.

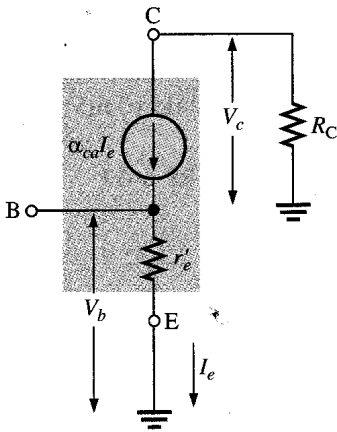


Fig. 8 – Circuit équivalent pour obtenir le gain en tension c.a.

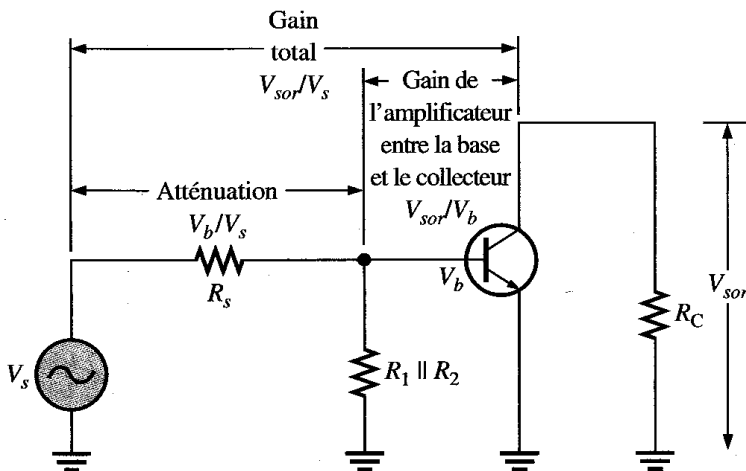


Fig. 9 – Atténuation et gain total pour un circuit de base.

Le produit de l'atténuation entre la source et la base par le gain entre la base et le collecteur donne le gain total de l'amplificateur. Supposons qu'une source produit 10 mV et que la valeur de la résistance de la source et celle d'entrée donnent une tension résultante de 5 mV à la base. L'atténuation est donc  $5 \text{ mV} / 10 \text{ mV} = 0,5$ . Maintenant, supposons que l'amplificateur possède un gain en tension entre la base et le collecteur de 20.

La tension de sortie est  $5 \text{ mV} \times 20 = 100 \text{ mV}$ . Par conséquent, le gain total est  $100 \text{ mV} / 10 \text{ mV} = 10$  et est égal au produit de l'atténuation et du gain ( $0,5 \times 20 = 10$ ). Le gain total est illustré à la figure 9.

La formule exprimant l'atténuation dans un circuit de base où  $R_s$  et  $R_{en(tot)}$  agissent comme un diviseur

de tension est :

$$\text{Atténuation} = \frac{V_b}{V_s} = \frac{R_{en(tot)}}{R_s + R_{en(tot)}}$$

Le gain total,  $A_v'$ , est le produit de l'atténuation et du gain entre le base et le collecteur,  $A_v$ .

$$A_v' = \left(\frac{V_b}{V_s}\right) A_v$$

### Effet du condensateur de dérivation de l'émetteur sur le gain en tension

Le condensateur de dérivation de l'émetteur  $C_2$  à la figure 10, fournit un court-circuit réel au point de vue du signal c.a. autour de la résistance de l'émetteur, en le maintenant à la masse au point de vue c.a. Avec un condensateur de dérivation, le gain d'un amplificateur donné est maximal et de valeur égale à :  $R_c / r_e'$ .

La valeur du condensateur de dérivation doit être suffisamment élevée pour que sa réactance soit très faible (idéalement de  $0 \Omega$ ) comparativement à  $R_E$ . Une règle simple stipule que la valeur de  $X_c$  du condensateur de dérivation doit être au moins 10 fois plus petite que  $R_E$ , à la fréquence minimale pour laquelle l'amplificateur doit opérer. D'où :  $10 \cdot X_c \leq R_E$

Exemple de calcul de  $C_2$  (Fig. 10), pour un amplificateur devant opérer, si l'amplificateur doit opérer sur une échelle de fréquences comprise entre 2 kHz et 10kHz ( $2 \cdot 10^3$  Hz et  $10 \cdot 10^3$  Hz).

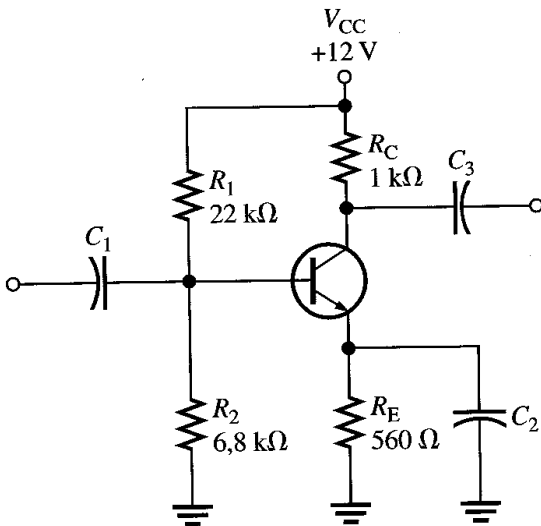


Fig. 10

#### Solution :

Puisque  $R_E = 560 \Omega$ , la valeur de  $X_c$  du condensateur de dérivation  $C_2$  ne doit pas dépasser :  $10X_c = R_E$

$$X_c = \frac{R_E}{10} = \frac{560}{10} = 56 \Omega$$

La valeur de capacité est déterminée à la fréquence minimale de 2 kHz comme suit:

$$C_2 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot X_c} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 2 \cdot 10^3 \cdot 56} = 1,42 \mu F$$

Ce résultat représente la valeur minimale pour le condensateur de dérivation de ce circuit. Nous pourrions utiliser une valeur plus élevée, bien que le coût de la composante et ses dimensions imposent habituellement certaines limites.

### Gain en tension sans condensateur de dérivation.

Pour comprendre comment le condensateur de dérivation affecte le gain en tension c.a., débranchons-le du circuit (figure 10) et comparons les gains en tension.

Sans le condensateur de dérivation, l'émetteur n'est plus connecté à la masse au point de vue c.a.  $R_E$  est alors vue par le signal c.a. entre l'émetteur et la masse et sa valeur s'ajoute à celle de  $r_e'$ ; dans la formule du gain en tension.

$$A_v = \frac{R_c}{r_e' + R_E}$$

L'effet de  $R_E$  cause une diminution du gain en tension c.a.

Nous pouvons comparer les gains en tension pour l'amplificateur illustré à la figure 9, d'abord sans utiliser et ensuite en utilisant le condensateur de dérivation, lorsque aucune résistance de charge n'est connectée.

**Solution :** Reprenons les valeurs des exemples précédents,  $r_e' = 6,58 \Omega$  pour ce même amplificateur. Sans  $C_2$ , le gain est :

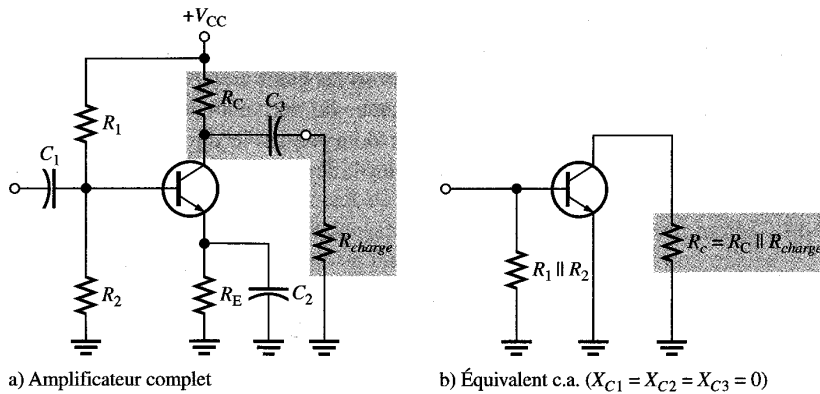
$$A_v = \frac{R_C}{r_e' + R_E} = \frac{1000}{566,58} = 1,76$$

Avec  $C_2$ , le gain est :

$$A_v = \frac{R_C}{r_e'} = \frac{1000}{6,58} = 152$$

Constatez toute la différence lorsqu'on utilise un condensateur de dérivation!

### Effet de la charge sur le gain en tension



Lorsqu'une charge,  $R_{charge}$ , est connectée à la sortie par le biais du condensateur de couplage  $C_3$ , comme l'illustre la figure 11a), la résistance au collecteur à la fréquence du signal est en fait  $R_e$  en parallèle avec  $R_{charge}$ .

Rappelons que l'extrémité supérieure de  $R_C$  est effectivement branchée à la masse au point de vue c.a. Le circuit équivalent c.a. est illustré à la figure 11b). La résistance c.a. totale au collecteur est :

$$R_c = \frac{R_C \cdot R_{charge}}{R_C + R_{charge}}$$

En remplaçant  $R_C$  par  $R_c$  dans la

formule du gain en tension, on obtient :  $A_v = \frac{R_c}{r_e'}$

Lorsque  $R_c < R_C$ , le gain en tension est réduit. Si  $R_{charge} \gg R_C$ , alors  $R_c = R_C$  et la charge n'a alors que très peu d'effet sur le gain.

Proposons nous de calculez le gain en tension entre la base et le collecteur pour l'amplificateur illustré à la figure 9 lorsqu'une résistance de charge de  $5\text{ k}\Omega$  est connectée à la sortie. Une dérivation est appliquée autour de l'émetteur et  $r_e' = 6,58\ \Omega$ .

**Solution** : La résistance c.a. au collecteur est :

$$R_c = \frac{R_C R_{charge}}{R_C + R_{charge}} = \frac{1000 \times 5000}{6000} = 833\ \Omega$$

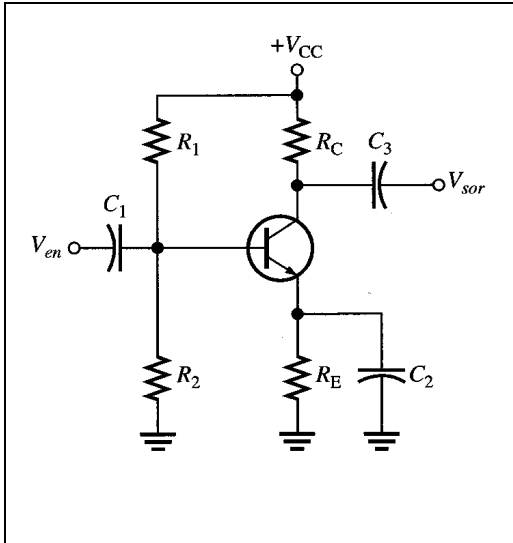
donc :

$$A_v = \frac{R_c}{r_e'} = \frac{833}{6,58} = 127$$

Le calcul précédant donnait un gain sans charge de : 152.

## Résumé de l'amplificateur à émetteur commun.

Circuit avec polarisation par diviseur de tension.



- L'entrée est à la base et la sortie au collecteur
- Il existe une inversion de phase entre l'entrée et la source
- C1 et C3 sont les condensateurs de couplage pour les signaux de l'entrée et de la sortie
- C2 est le condensateur de dérivation de l'émetteur pour le signal alternatif.
- Le réactance de tous les condensateur doit être négligeable à la fréquence de travail.
- L'émetteur est connecté à la masse au point de vue du c.a. par le biais du condensateur de dérivation

Circuits équivalents et formules.

<p>Équivalent c.c.</p>	<p><b>Formules c.c.</b></p> $V_B = \left( \frac{R_2 // \beta_{CC} \cdot R_E}{R_1 + (R_2 // \beta_{CC} \cdot R_E)} \right) \cdot V_{CC} \quad (V)$ $V_E = V_B - V_{BE} \quad (V)$ $I_E = \frac{V_E}{R_E} \quad (A)$ $V_C = V_{CC} - I_C \cdot R_C$
<p>Équivalent c.a.</p>	<p><b>Formules c.a.</b></p> $r_e' = \frac{0,025}{I_E} \quad (\Omega)$ $R_{en(base)} = \beta_{ca} \cdot r_e' \quad (\Omega)$ $R_{sor} \equiv R_C \quad (\Omega)$ $A_v = \frac{R_C}{r_e'} \quad (\text{entre base et collecteur})$ $A_v' = \left( \frac{V_b}{V_s} \right) \cdot A_v \quad (\text{total})$ $A_i = \frac{I_C}{I_{en}}$ $A_p = A_v' \cdot A_i$