

Introduction aux amplificateurs de puissance

3.1 Définition

Les amplificateurs de puissance sont des amplificateurs pour signaux forts, ils sont utilisés dans les basses fréquences et les hautes fréquences. Ils sont utilisés dans les étages terminaux pour haut parleurs et antennes radiofréquences. Leurs puissances est supérieur au demi watt. Comme les amplificateurs à signaux faibles, pour leur conception, on les étudie dans le régime statique et le régime dynamique.

Il existe plusieurs classes d'amplificateur de puissance, les plus connus sont les amplificateurs de puissance classe A, classe B et classe C.

Ces classes diffèrent dans la position de leurs points de repos Q, les transistors de puissance utilisés sont conçus pour chaque gamme, basses fréquences ou hautes fréquences.

Avant d'entamer les amplificateurs de puissance nous donnons ci-après le schéma équivalent en alternatif d'un transistor bipolaire fonctionnant en signaux forts.

3.2 Le transistor bipolaire en régime de forts signaux

Pour bien comprendre le principe, considérons un transistor bipolaire de type NPN, *figure 3.1a*, son schéma équivalent en dynamique ou en alternatif est donnée à *la figure 3.1b*

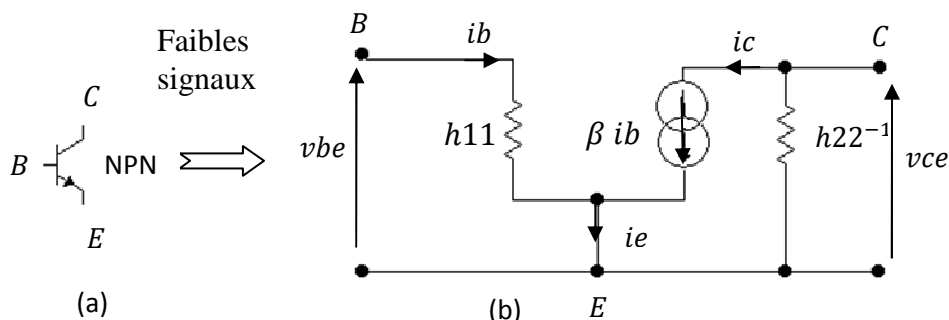


Figure 3.1

La loi des mailles à l'entrée nous permet d'écrire

$$v_{be} = h_{11} i_b \quad (3.1)$$

Avec $h_{11} = \frac{\beta u_T}{I_{CQ}}$; où $u_T = 25 \text{ mV}$ à la température ambiante et I_{CQ} est le courant collecteur de repos.

L'équation (3.1) est valable uniquement pour les signaux faibles et elle n'est plus valable pour les signaux forts, car dans ce cas les variations du courant i_b à l'entrée sont très fortes.

Pour travailler en signaux forts, on procède comme suit:

- Faire le schéma équivalent en alternatif normalement comme si c'était un transistor bipolaire pour signaux faibles et remplacer β par β_{cc} et h_{11} par $\beta_{cc} r_{e'}$, figure 3.2. $r_{e'}$ est la résistance d'entrée du transistor en régime de signaux forts. β_{cc} est le gain en courant pour signaux forts à la place de β qui est pour signaux faibles,

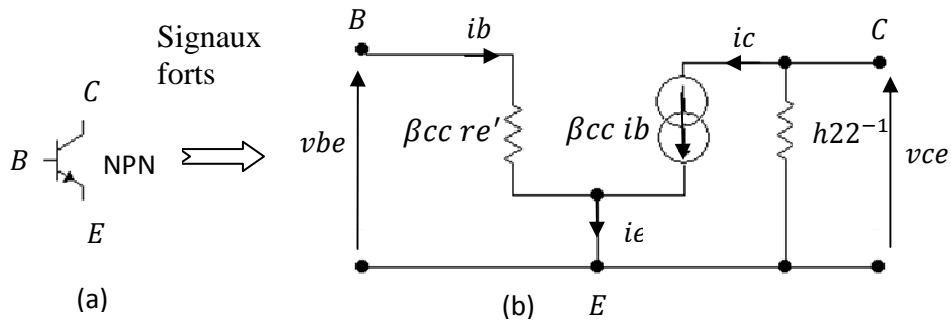


Figure 3.2

$r_{e'} = \frac{v_{be}}{i_e} = \frac{\Delta V_{BE}}{\Delta I_E} \cong \frac{\Delta V_{BE}}{\Delta I_C}$, on ne peut pas la calculer, elle est donnée sur la fiche signalétique du composant sous forme d'un graphe $I_C = f(V_{BE})$ car les variations ΔV_{BE} et ΔI_C sont grandes, figure 3.3. Dans ce cas l'équation (3.1) devient :

$$v_{be} = \beta_{cc} r_{e'} i_b \quad (3.2)$$

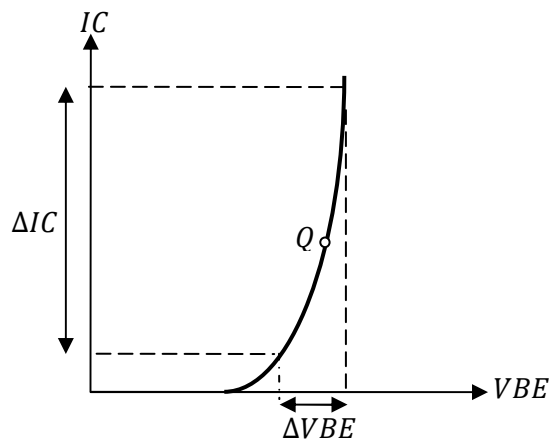


Figure 3.3

L'amplificateur de puissance classe A

4.1 Introduction

Le point de repos d'un amplificateur de puissance classe A est situé au milieu de la droite de charge dynamique. L'étude statique et dynamique sont les mêmes que pour ceux des amplificateurs pour faibles signaux. Ces amplificateurs sont utilisés en basses fréquences pour amplifier un signal sonore et la sortie est connectée à une charge RL (un haut parleur par exemple), *figure 4.1a*.

4.1.1 La droite de charge statique

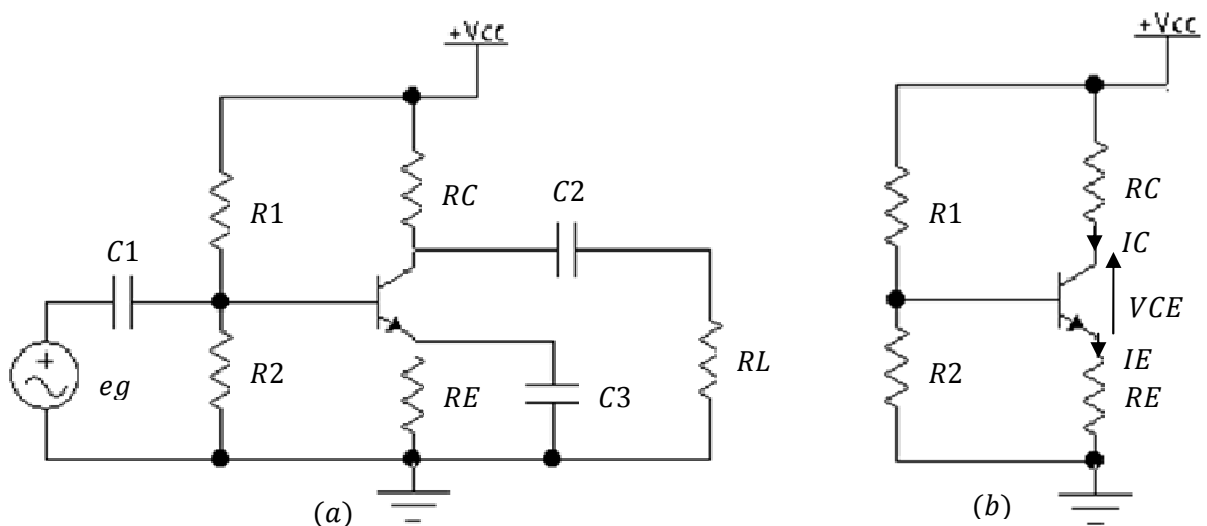


Figure 4.1

En statique la tension e_g est enlevée, il ne reste que la tension continue V_{CC} , les condensateurs se comportent comme des circuits ouverts donc comme si ils n'existaient pas, *figure 4.1b*.

Pour le tracé de la droite de charge statique, la loi des mailles nous permet d'écrire :

$$VCC = RC IC + VCE + RE IE \quad (4.1)$$

Or $IC \cong IE$

$$VCC = (RC + RE) IC + VCE \quad (4.2)$$

On trouve la même équation que celle des signaux faibles $IC = f(VCE)$:

$$IC = -\frac{VCE}{RE + RC} + \frac{VCC}{RE + RC} \quad (4.3)$$

Pour le tracé de la droite de charge statique on a besoin de 2 points, donc :

Pour $IC = 0$ on a

$$VCE = VCE \text{ blocage} = VCC \quad (4.4)$$

Pour $VCE = 0$ on a

$$IC = IC_{sat} = \frac{VCC}{RE + RC} \quad (4.5)$$

Si on veut que le point de repos soit au milieu de la droite de charge statique *figure 4.2* il faut avoir

$$VCEQ = \frac{VCC}{2} \quad (4.6)$$

et donc

$$ICQ = \frac{VCC}{2(RE + RC)} \quad (4.7)$$

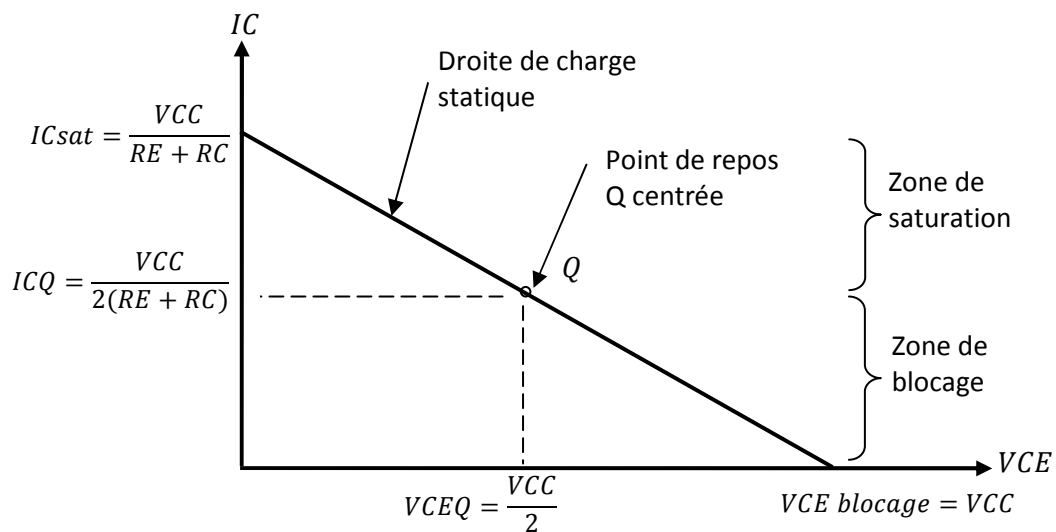


Figure 4.2

4.1.2 Droite de charge dynamique

La *figure 4.3a* représente un amplificateur de puissance classe A sans transformateurs et la *figure 4.3c* représente un amplificateur de puissance classe A avec transformateur. On utilise le transformateur pour adapter la résistance de sortie R_s de l'amplificateur à la charge R_L donc pour avoir un maximum de puissance transmise dans le cas par exemple où la charge R_L est très loin de l'amplificateur.

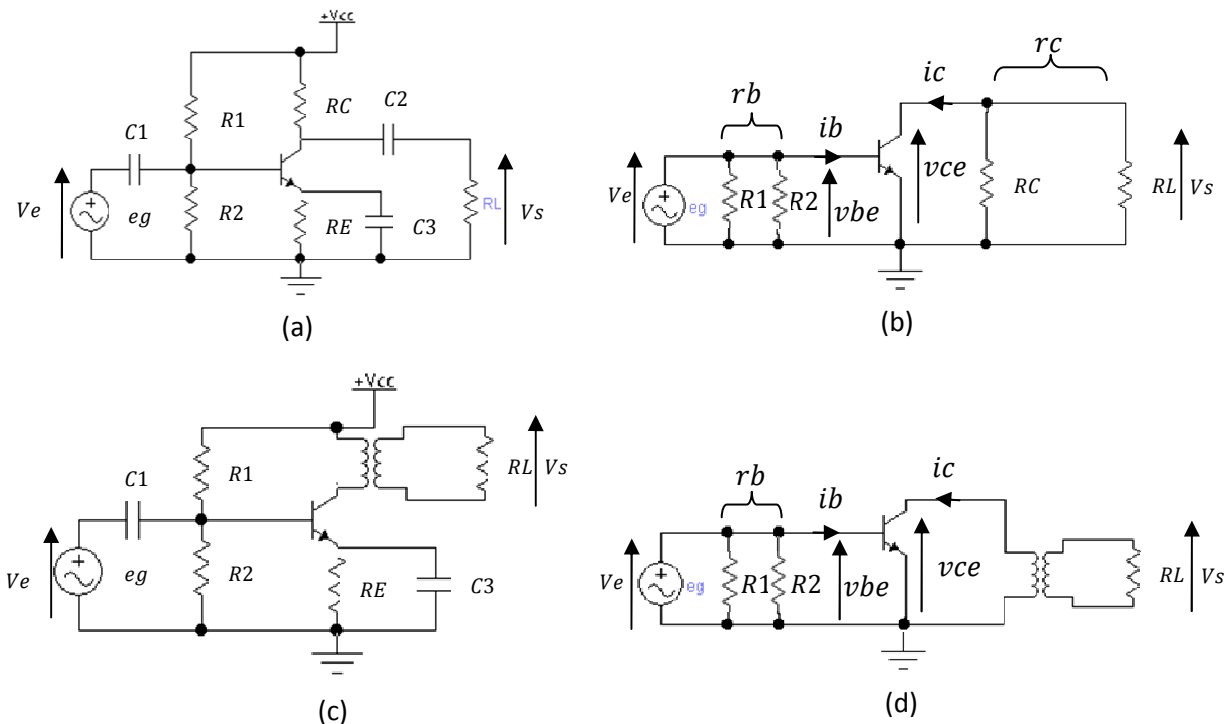


Figure 4.3

On rappelle qu'en alternatif la tension continue V_{CC} et les condensateurs se comportent comme des courts-circuits dans la bande de fréquences de travail considérée, dans notre cas ce sont les basses fréquences.

Les *figures 4.3b* et *4.3d* représentent les schémas équivalents en alternatif respectivement des *figures 4.3a* et *4.3c*.

Pour le tracé de la droite de charge dynamique on va commencer par la *figure 4.3b* et le résultat obtenu va être utilisé à la *figure 4.3d*.

On a pas représenté R_g sur les figures car le générateur e_g est supposé idéal donc présente une résistance interne R_g de valeur nulle.

On pose :

$$r_c = RC // RL$$

$$r_b = R1 // R2$$

Sur le schéma de la *figure 4.3b*, on a :

$$v_{ce} = -r_c i_c \tag{4.8}$$

Avec v_{ce} la tension alternative entre le collecteur et l'émetteur
 i_c est le courant alternatif du collecteur.

Considérons la droite de charge statique *figure 4.2*

Supposons que le courant instantané IC varie autour du point de repos ICQ d'une certaine valeur ΔIC et que la tension instantanée VCE varie autour du point de repos $VCEQ$ d'une certaine valeur ΔVCE , *figure 4.3*. Ces variations de ΔIC et de ΔVCE ne sont autres que le courant alternatif i_c et la tension alternative v_{ce} , d'où on peut écrire :

$$IC = ICQ + \Delta IC = ICQ + i_c \quad (4.9)$$

Et

$$VCE = VCEQ + \Delta VCE = VCEQ + v_{ce} \quad (4.10)$$

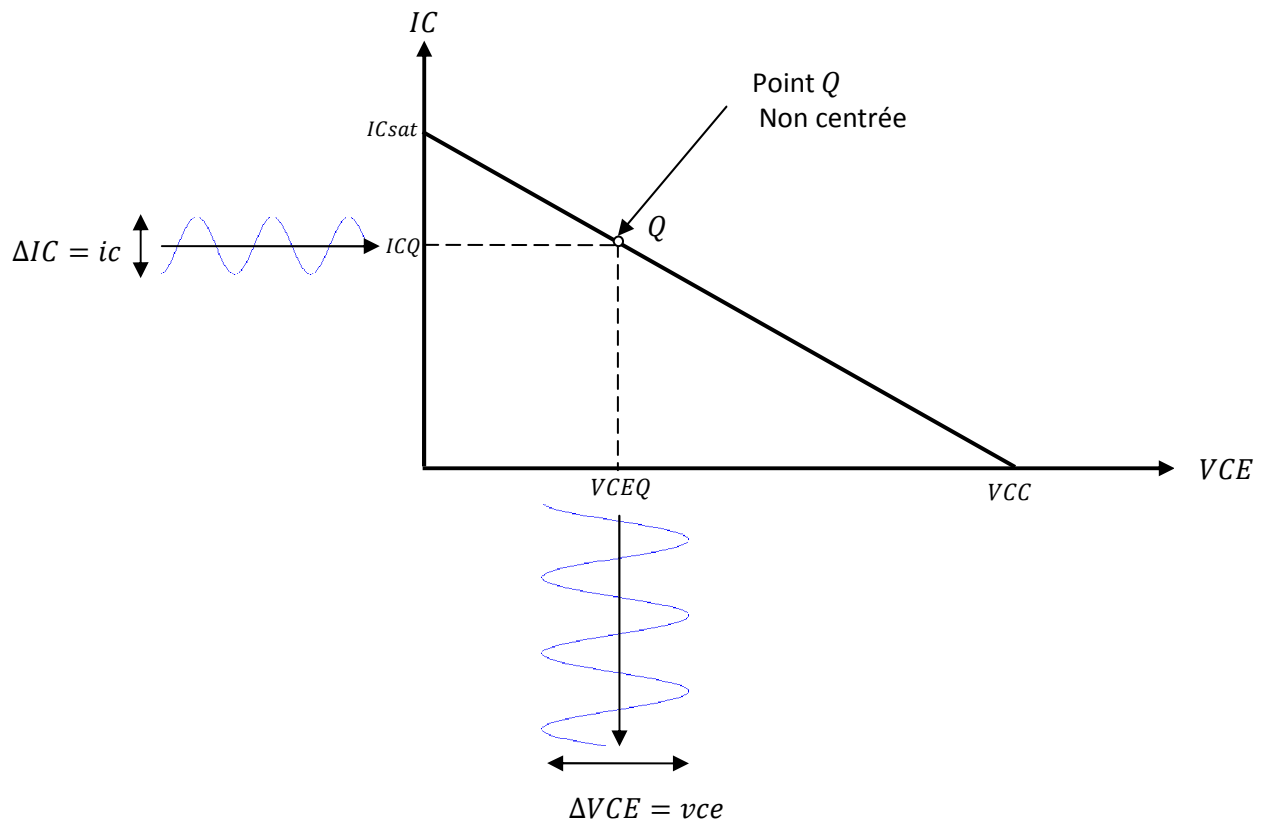


Figure 4.3

Des équations (4.9) et (4.10) on a donc :

$$i_c = IC - ICQ \quad (4.11)$$

Et

$$v_{ce} = VCE - VCEQ \quad (4.12)$$

En remplaçant les équations (4.11) et (4.12) dans l'équation (4.8), on obtient :

$$VCE - VCEQ = -rc (IC - ICQ) \quad (4.13)$$

Le courant instantané devient alors :

$$IC = ICQ + \frac{VCE - VCEQ}{rc}$$

Ou

$$IC = -\frac{VCE}{rc} + \frac{VCEQ}{rc} + ICQ \quad (4.14)$$

Donc c'est l'équation d'une droite $IC = f(VCE)$ de la forme $y = ax + b$, avec :

$$a = -\frac{1}{rc}$$

Et

$$b = \frac{VCEQ}{rc} + ICQ$$

L'équation (4.14) est appelée équation de la droite de charge dynamique ou en alternatif.

Traçons cette droite sur le la même *figure 4.3*, on obtient la *figure 4.4*.

Comme précédemment pour tracer cette droite on a besoin de 2 points :

Pour $IC = 0$, on a $VCE = VCE_{\text{blocage}} = VCEQ + rc ICQ$

Et pour $VCE = 0$, on a $IC = IC_{\text{sat}} = ICQ + \frac{VCEQ}{rc}$

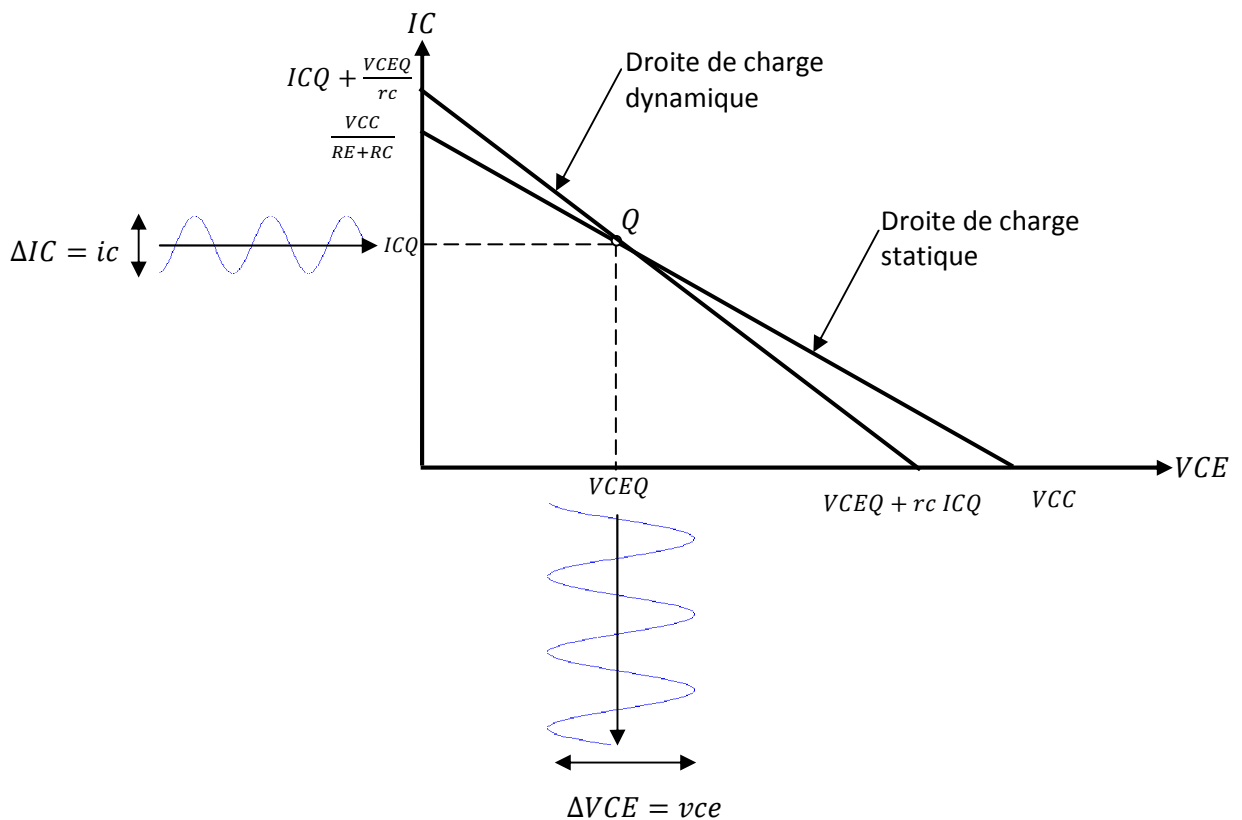


Figure 4.4

4.1.3 Position optimale du point de repos Q en alternatif

On constate sur la *figure 4.4* que la position optimale du point Q doit être au centre de la droite de charge dynamique d'où son ordonnée ICQ est à la moitié du courant de saturation en alternatif et son abscisse $VCEQ$ est à la moitié de la tension de blocage en alternatif, *figure 4.5*. ce qui donne :

$$VCEQ = \frac{VCEQ + r_c ICQ}{2} \quad (4.15)$$

et

$$ICQ = \frac{ICQ + \frac{VCEQ}{r_c}}{2} \quad (4.16)$$

D'où

$$\frac{VCEQ}{ICQ} = r_c \quad (4.17)$$

Cette dernière équation nous indique que si le rapport entre la tension de repos $VCEQ$ et le courant de repos ICQ est égal à la résistance de charge en alternatif r_c alors le point de repos Q est centré en alternatif. Donc lors de la conception d'un étage amplificateur de puissance classe A il faut en tenir compte si on veut avoir le point de repos Q centré.

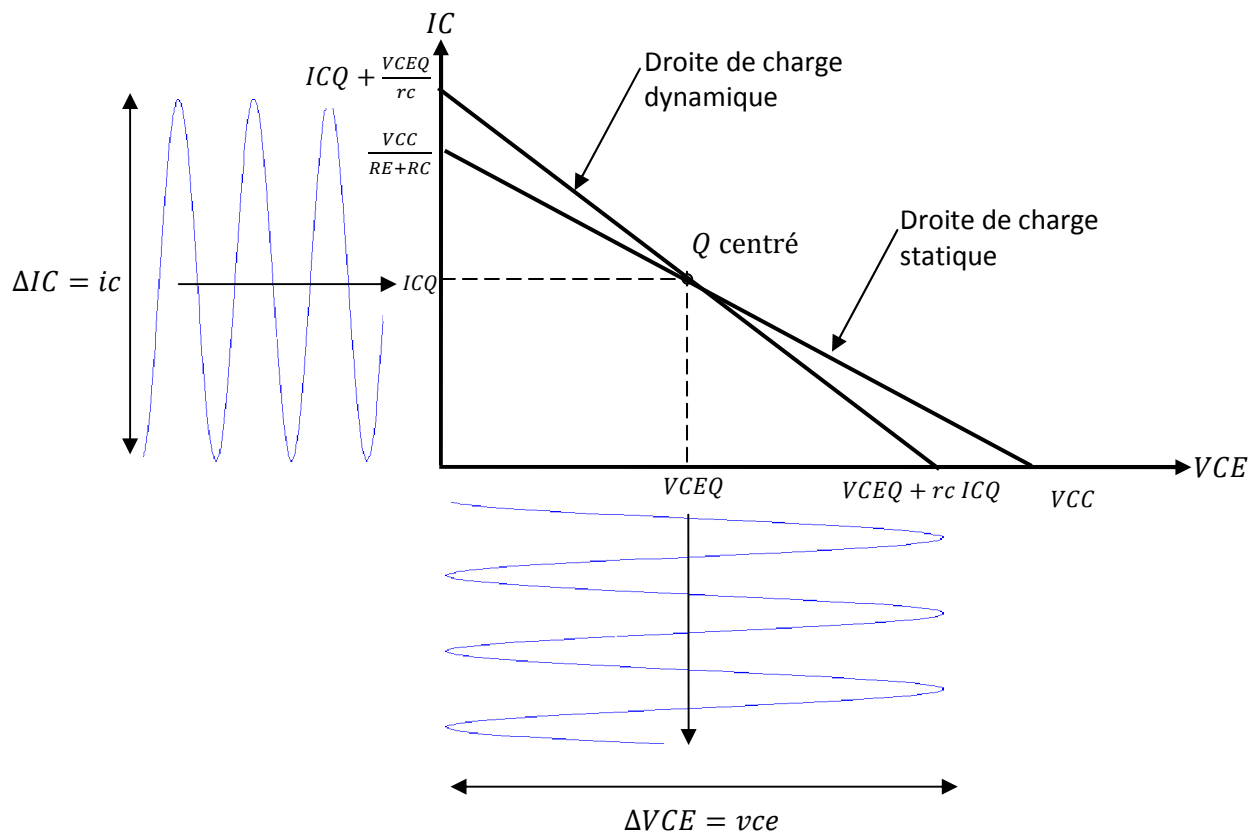


Figure 4.5

Les *figures 4.5, 4.7c et 4.7d* représentent l'excursion maximale qu'un amplificateur de puissance classe A peut avoir, si cette excursion dépasse les seuils autorisés qui sont ICQ pour le courant IC et $VCEQ$ pour la tension VCE on aura saturation du transistor et par conséquent on aura déformation du signal de sortie.

Si le point de repos Q n'est pas centré, on aura un écrêtage du courant IC vers le haut s'il se déplace vers le haut *figure 4.6*, ou un écrêtage vers le bas s'il se déplace vers le bas.

Par contre si l'excursion est inférieure aux seuils autorisés *figures 4.4, 4.7a et 4.7b*, l'amplificateur fonctionne normalement mais sous sa limite. Dans ce cas la position du point de repos Q importe peu.

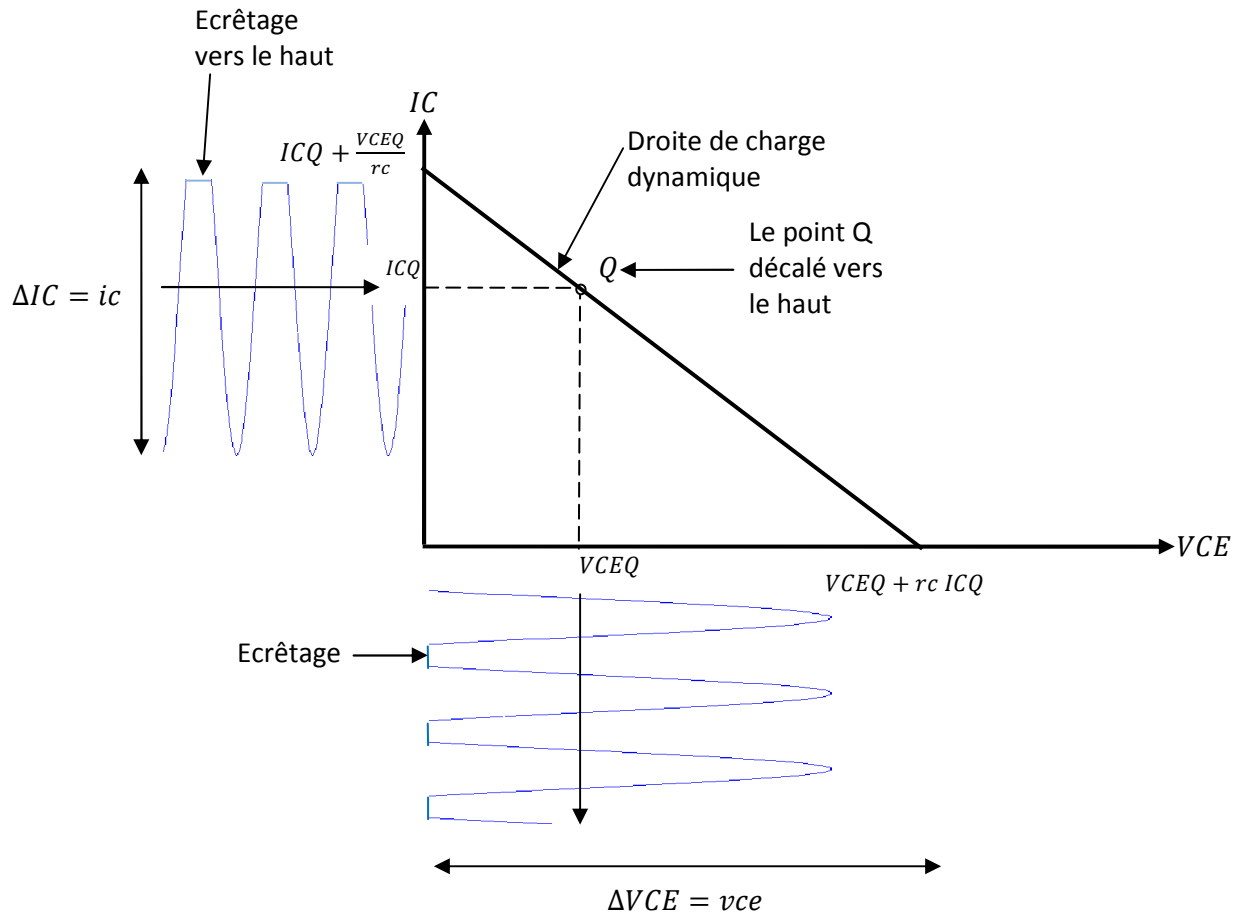


Figure 4.6

On voit sur la *figure 4.7* que le courant alternatif ic et la tension alternatif vce oscillent autour des points de repos ICQ et $VCEQ$ respectivement.

On voit sur cette figure qu'on a intérêt à augmenter l'amplitude du courant ic si on veut avoir une tension vce maximale en sortie.

On constate aussi que le courant et la tension sont en opposition de phase, c'est normal puisque il y'a un signe moins dans l'équation de vce (4.8)

Pour l'amplificateur en puissance classe A avec transformateur, le même raisonnement que pour celui sans transformateur se fait mais il faut remplacer ce dernier par sa résistance équivalente R_p vu du primaire.

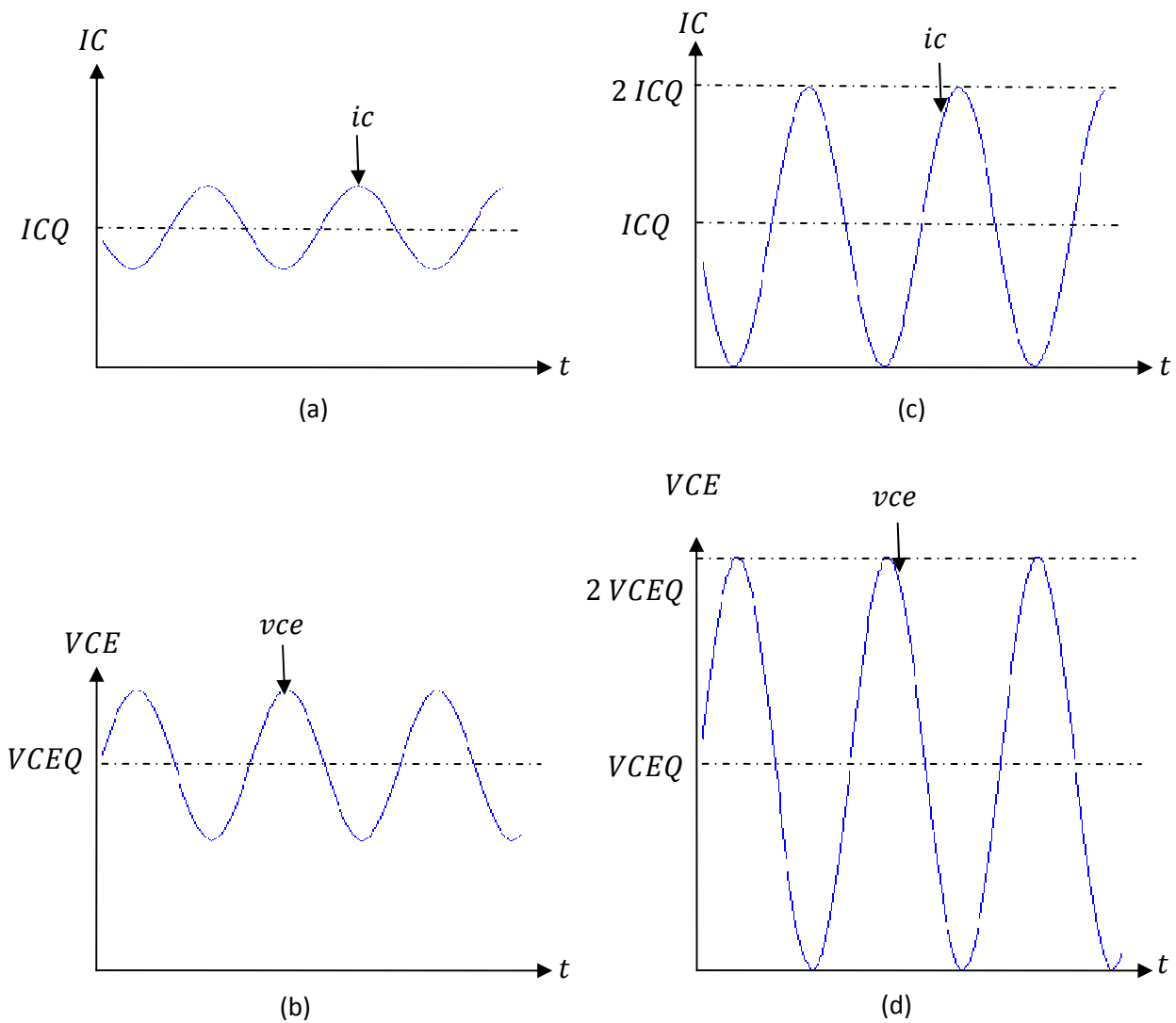


Figure 4.7

Pour faire l'étude dynamique d'un étage amplificateur avec transformateur de sortie, on a intérêt à faire un rappel sur ce dernier.

4.2 Le transformateur

Le schéma équivalent d'un transformateur réel est représenté à la *figure 4.8a*

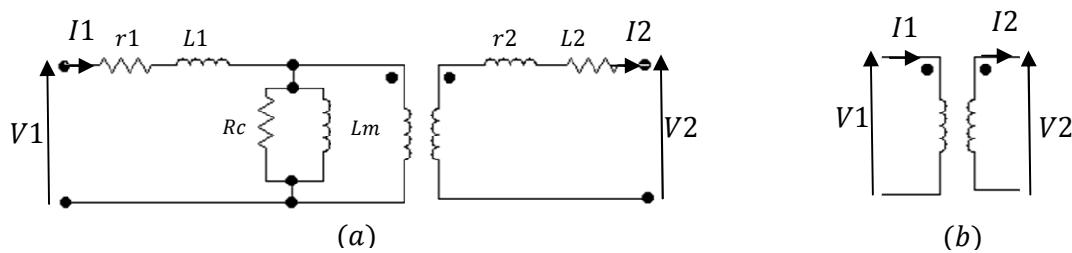


Figure 4.8

r_1 et r_2 résistances des fils du cuivre pour le primaire et le secondaire,
 L_1 et L_2 inductances de fuites ou pertes pour le primaire et le secondaire
 L_m inductance magnétisante car la perméabilité du noyau est finie
 R_c résistance qui représente les pertes dans le noyau.

Pour simplifier l'étude, on considère toujours un transformateur idéal dont les pertes précédentes sont négligées *figure 4.8b*.

Si on raccorde au secondaire du transformateur idéal précédant une charge RL on aura donc

$$V_2 = RL I_2 \quad (4.18)$$

Un transformateur idéal veut dire que toute la puissance d'entrée P_1 au primaire est transmise à la charge RL du secondaire. D'où

$$P_1 = P_2 \quad (4.19)$$

Avec $P_1 = V_1 I_1$ et $P_2 = V_2 I_2 \Rightarrow V_1 I_1 = V_2 I_2 \Rightarrow$

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} = n \quad (4.20)$$

N_1 et N_2 sont les nombres de spires des bobinages du primaire et du secondaire respectivement; n est appelé rapport de transformation.

De l'équation (4.18), on a : $RL = \frac{V_2}{I_2} = \frac{V_2 V_1 I_1}{V_1 I_1 I_2} = \frac{1}{n} R_p \frac{1}{n} = \frac{R_p}{n^2} \Rightarrow$

$$R_p = RL n^2 \quad (4.21)$$

R_p est appelée résistance d'entrée du transformateur vu du primaire.

La relation (4.21) entre la résistance R_p et la charge RL est très utile dans le calcul des étages amplificateurs.

Dans le cas de la *figure 4.3c* on retrouve les mêmes résultats que la *figure 4.3a* mais il faut remplacer $r_c = RC // RL$ par R_p dans la *figure 4.3b* et dans toutes les équations.

4.3 Puissances et rendement dans un amplificateurs de puissance classe A

Puissance d'alimentation

$$P_a = V_{CC} I_{DC}$$

Puissance de sortie maximale

$$P_s = V_s i_s$$

Avec

I_{DC} courant moyen

V_{CC} tension d'alimentation

V_s tension de sortie en valeur efficace aux bornes de la charge RL

$i_s = \frac{V_s}{RL}$ courant de sortie en valeur efficace parcourant la charge RL

Le courant moyen $IDC = ICQ$, on effet si on regarde par exemple la *figure 4.7* et on calcule

$$IDC = \frac{1}{T} \int_0^T IC(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T (ICQ + ic(t)) dt = \frac{1}{T} \int_0^T (ICQ + \sin(2\pi ft)) dt = ICQ$$

$$\Rightarrow Pa = VCC ICQ \quad (4.22)$$

De même en regardant la *figure 4.7*, la tension maximale délivrée à la charge RL est $VCEQ$ et le courant maximal que peut parcourir la charge RL est ICQ .

$$Vs = \frac{Vsmax}{\sqrt{2}} = \frac{VCEQ}{\sqrt{2}}$$

Et

$$is = \frac{ismax}{\sqrt{2}} = \frac{ICQ}{\sqrt{2}}$$

Donc

$$Ps = Vs is = \frac{VCEQ ICQ}{2} \quad (4.23)$$

Or $VCEQ ICQ = PDQ$ est la puissance que doit dissipée le transistor au repos, donc il faut munir le transistor d'un radiateur pour le refroidissement.

Le rendement est définie par :

$$\eta = \frac{Ps}{Pa} = \frac{\frac{VCEQ ICQ}{2}}{VCC ICQ} = \frac{VCEQ}{2 VCC} \quad (4.24)$$

$$\text{si } VCEQ = \frac{VCC}{2} \quad \eta = \frac{1}{4} = 25\% \quad (4.25)$$

Le rendement est maximal seulement si le point Q est centré sur la droite de charge statique.

4.4 Exercice d'application

Soit la *figure 4.9a*, on donne $VCC = 30V$, $R1 = 2.4 K\Omega$, $R2 = 1.2 K\Omega$, $RC = 680\Omega$, $RE = 1K\Omega$ et $RL = 470\Omega$.

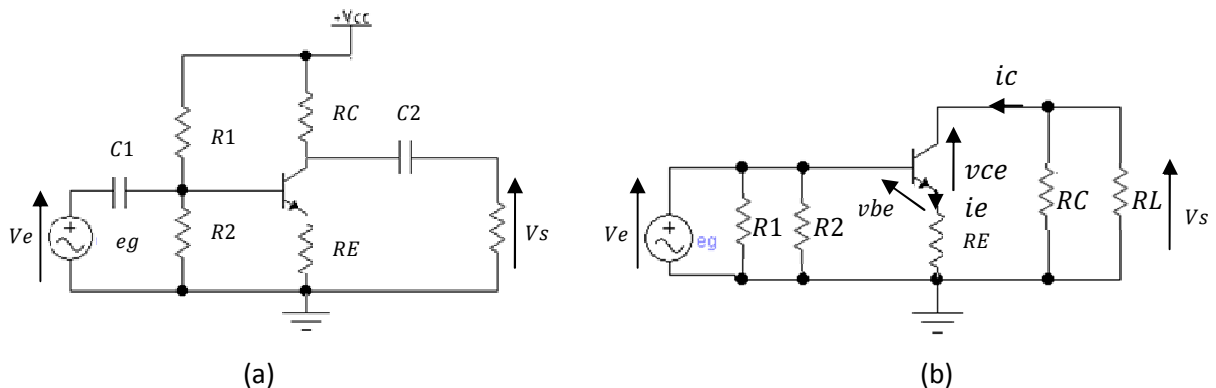


Figure 4.9

- 1) Tracer les droites de charges statique et dynamique.
- 2) Calculer $AV = \frac{V_s}{V_e}$
- 3) Quelle est la tension maximale e_g qui produit l'excursion maximale sans distorsion ?
- 4) Calculer le rendement de l'étage.

Solution

- 1) Etude statique

Les condensateurs se comportent comme des circuits ouverts, on reprend donc la même *figure 4.1a*.

On aura après quelques passages l'équation (4.3) et la *figure 4.2* qui représente la droite de charge statique.

Etude dynamique

On pose :

$$rc = RC // RL$$

$$rb = R1 // R2$$

$$re = RE$$

La loi des mailles nous permet d'écrire .

$$vce + rc ic + re ie = 0$$

Or $ic \cong ie$ donc

$$vce + rc ic + re ie = 0 \Rightarrow vce = -(rc + re)ic$$

On pose $rc' = (rc + re)$

D'où

$$vce = -rc' ic$$

Donc dans l'équation 4.8 on écrit rc' à la place de rc et on refais le même calcul qu'en 4.1.2 et on obtient l'équation de la droite de charge dynamique.

$$IC = -\frac{VCE}{rc'} + \frac{VCEQ}{rc'} + ICQ$$

Pour le tracer des droites de charges statique et dynamique c'est la même *figure 4.4* avec rc' à la place de rc .

- 2) Calcul de $AV = \frac{V_s}{V_e}$

D'après le schéma de la *figure 4.9b*, on a :

$$V_s = -(RC // RL)ic = -rc \cdot \beta cc ib$$

$$V_e = (\beta cc + 1)re'ib + re (\beta cc + 1)ib$$

On a posé $RE = re$

$$AV = \frac{Vs}{Ve} = \frac{-rc \cdot \beta_{cc} ib}{(re' + re)(\beta_{cc} + 1)ib} = -\frac{rc}{(re' + re)}$$

3) la tension maximale eg qui produit l'excursion maximale sans distorsion.

L'excursion maximale de $Vs = VCEQ$

Dans la figure 4.9b

$$eg = Ve = \frac{Vs}{Av} \Rightarrow eg = \frac{VCEQ}{Av}$$

4) Calcul du rendement

De l'équation (4.24), on a $\eta = \frac{Ps}{Pa} = \frac{VCEQ}{2VCC}$, donc connaissant $VCEQ$ et VCC on peut déterminer η .

4.5 Exercice

Soient les deux figures ci-dessous :

On donne $R1 = 220\Omega$, $R2 = 120\Omega$, $RC = 100\Omega$, $RE1 = 56\Omega$, $RL1 = 100\Omega$, $R3 = 8.2\Omega$, $R4 = 1.8\Omega$, $RE2 = 0.82\Omega$, $RL2 = 4\Omega$, $n1 = 0.1$, $n2 = 10$, $VCC = 20V$

- 1) Quel est le type de montage et expliquer le fonctionnement de chaque figure.
- 2) Faire l'étude statique et dynamique pour les deux figures.
- 3) Calculer le gain en tension, la puissance de sortie, la puissance d'alimentation et le rendement. Pour les deux transistors, on prend $\beta_{cc} = 80$ et $re' = 0.5\Omega$.
- 4) Donner l'avantage ou l'inconvénient entre les deux montages.
- 5) Refaire 2 et 3 sans CE .

