

## Amplificateurs



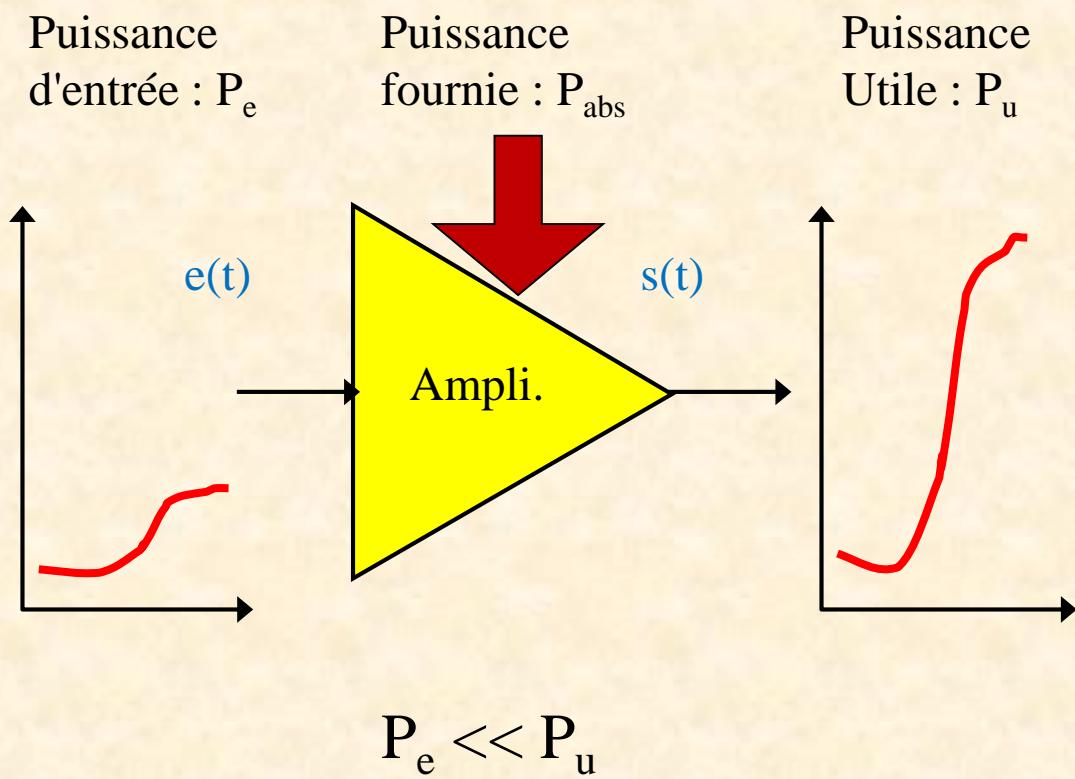
C'est quoi !

Classe A

Classe B

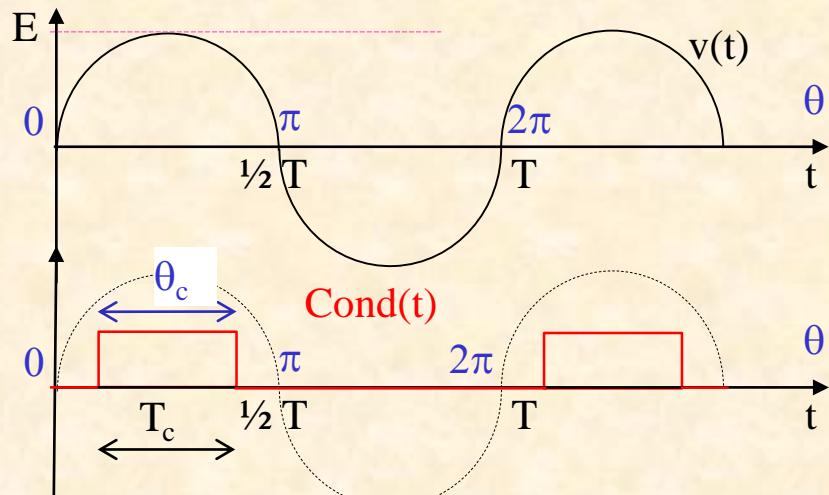


## Présentation



## Angle de conduction

- Entrée sinusoïdale
  - $e(t) = E \sin(\omega t)$
- Variable angulaire
  - $\theta = \omega t$  [rd]
  - $2\pi = \omega T$
- Angle de conduction
  - $\theta_c = \omega T_c$  [rd]



## Distorsion harmonique

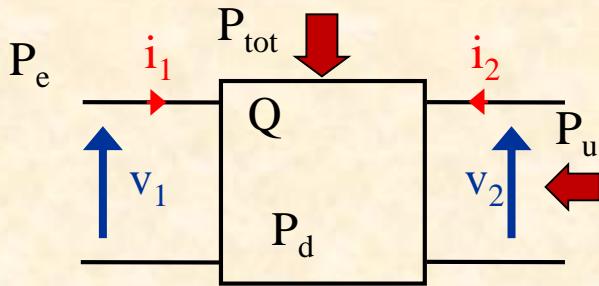
- Harmoniques de  $s(t)$ 
  - $s(t) = \sum_{k=1}^{\infty} S_k \sin(k\omega t)$
- Théorème de Parseval
  - $P_s \sim \frac{1}{T} \int_T e(t)^2 dt$
  - $P_s \sim \sum_{k=1}^{\infty} S_k^2$

- Distorsion harmonique
  - $H = \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} H_k^2}$  avec  $H_k = \frac{S_k}{S_1}$
  - % Puissance des harmoniques
- Ampli réel  $\rightarrow$  ampli parfait
  - $H \rightarrow 1^+$



## Bilan des puissances

- **Structure amplificateur**



- **P instantanée d'entrée**

- $p_e(t) = v_1(t).i_1(t) \sim 0$  [W]

- **P instantanée de sortie (utile)**

- $p_u(t) = v_2(t).i_2(t)$  [W]

- **P active (moyenne) utile**

- $P_u = \langle p_u \rangle$  [W]

- **Bilan**

- $P_{\text{tot}} = P_u + P_d$  [W]

## Rendement

- **Définition**

- $\eta = \frac{P_u}{P_{\text{abs}}}$

- **Observation**

- $\eta = \frac{P_u}{P_{\text{tot}}} = \frac{P_{\text{tot}} - P_d}{P_{\text{tot}}} = 1 - \frac{P_d}{P_{\text{tot}}}$



## Classe d'amplificateurs

### • Classe A

- $\theta_c = 2\pi$
- $\eta$  : très mauvais
- H : très bon
- Gde linéarité
- Faible puissance (<50 W)
- Étages initiaux HI FI

### • Classe C

- $\theta_c \ll \pi$
- $\eta \nearrow \nearrow$  & H  $\searrow \searrow$
- Fréquence centrale, circuit résonnant
- HF de forte puissance (qKW)
- Émetteurs radio et TV

### • Classe B et AB

- $\theta_c = \pi - \varepsilon$
- Compromis entre  $\eta$  et H
  - $\eta \nearrow$  & H  $\searrow$
- Linéarité
- P moyenne < 500 W
- Étage de sortie AOP, HI FI

### • Classe D

- $\theta_c \approx 0$  (commutation)
- $\eta$  : très bon
- H : très mauvais
- Commande des machines tournantes.
- Autoradio, téléphone portable
- Asservissement  $\nearrow$  H

## Quadripôle Amplificateur

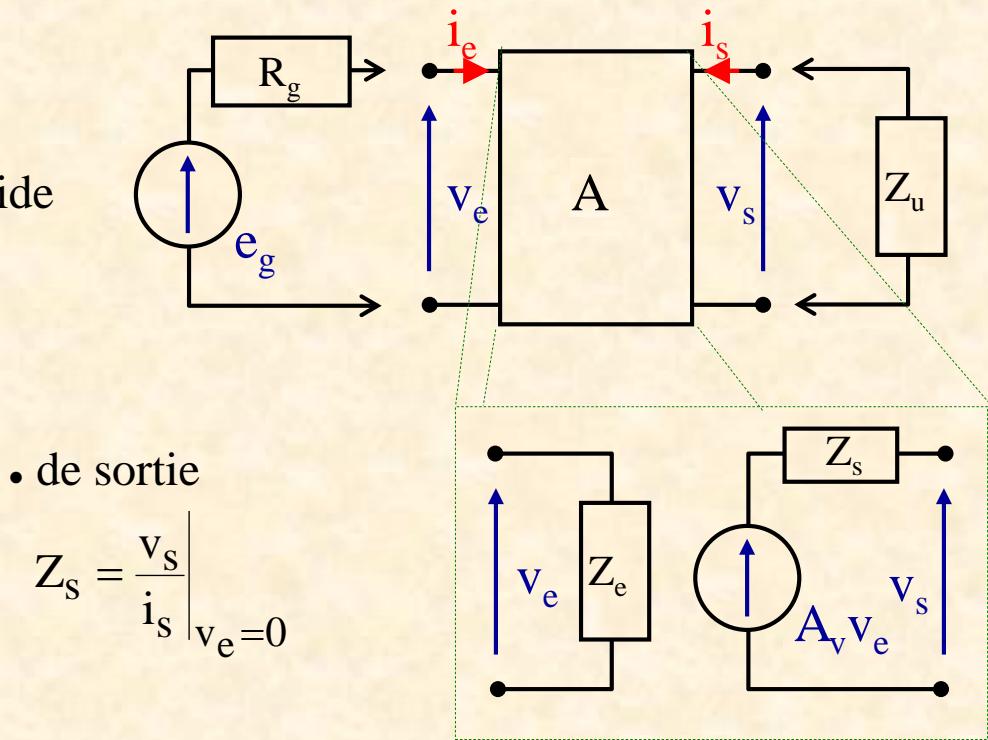
- Schéma équivalent

- Amplification en tension à vide

$$A_v = \frac{v_s}{v_e} \Big|_{i_s=0}$$

- Impédance d'entrée

$$Z_e = \frac{v_e}{i_e} \Big|_{i_s=0}$$



- de sortie

$$Z_s = \frac{v_s}{i_s} \Big|_{v_e=0}$$

- Nota Bene

- Gain en charge

$$A_{vc} = \frac{v_s}{v_e} \Big|_{Z_u \exists} = \frac{Z_u}{Z_u + Z_s} A_v$$

- Gain composite

$$A_{vc} = \frac{v_s}{e_g} \Big|_{i_s=0} = \frac{Z_e}{Z_e + R_g} A_v$$



Transistors ...

Bipolaire - Effet de champ - MosFet

AOP réel

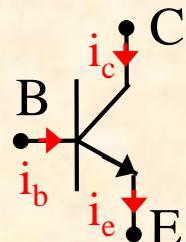
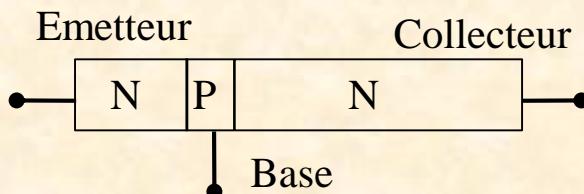
...

**Outils**

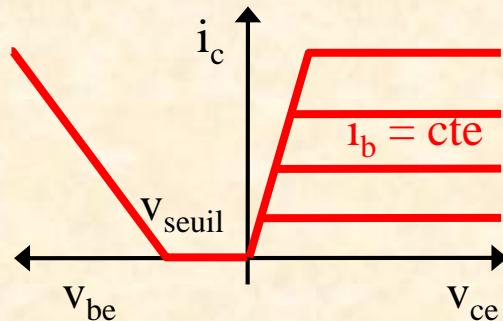


## Transistor Bipolaire

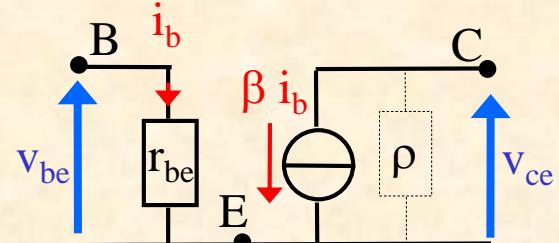
- **Structure**
- **Symbole**



- **Fonctionnement linéaire**
  - Jonction BE en directe
  - Jonction BC en inverse
  - $i_e = i_b + i_c$
  - $i_c = \beta i_b$
- **Schéma petits signaux**

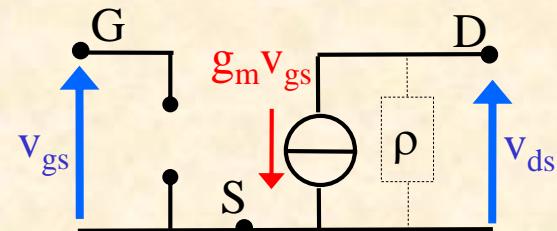
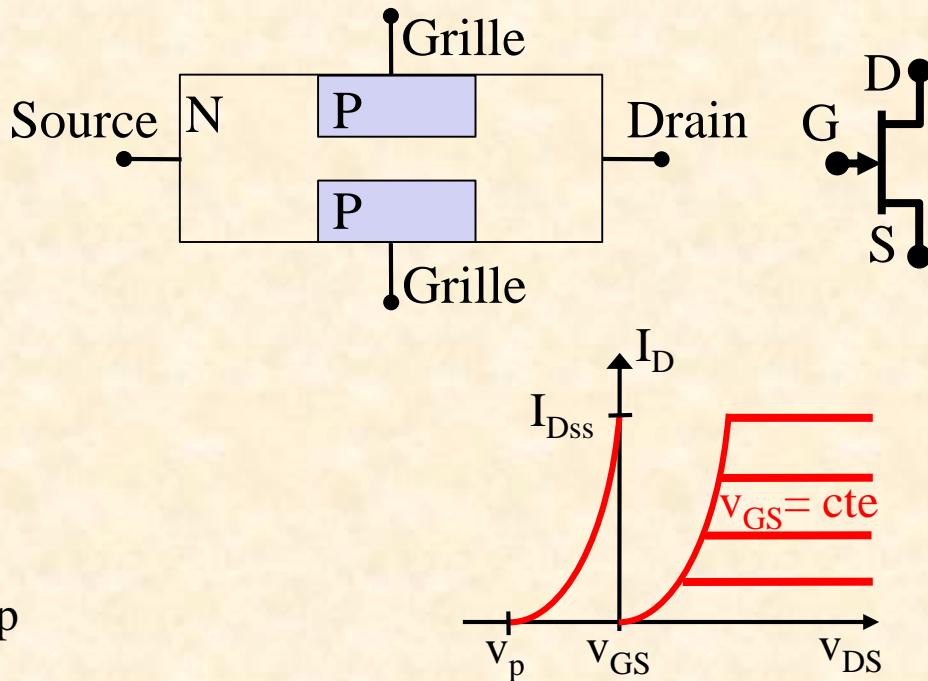


- **Valeurs typiques**
  - $V_{seuil} = V_{be} = 0,7 \text{ V}$
  - $r_{be} = 1 \text{ k}\Omega$
  - $100 < \beta < 300$
  - $\rho > 500\text{k}\Omega \rightarrow \infty$



## Transistor à effet de champ canal N

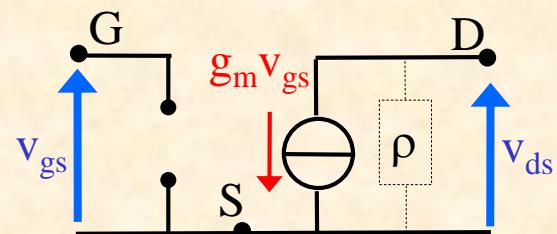
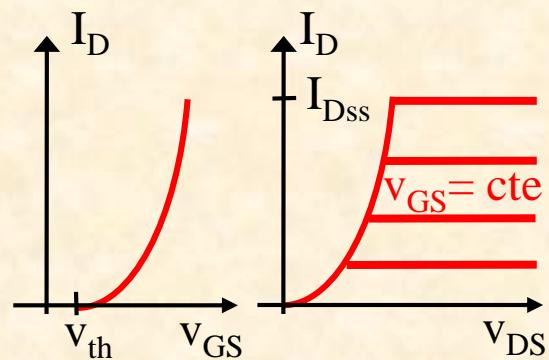
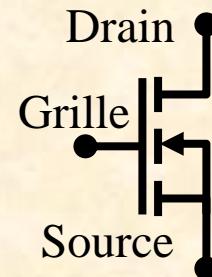
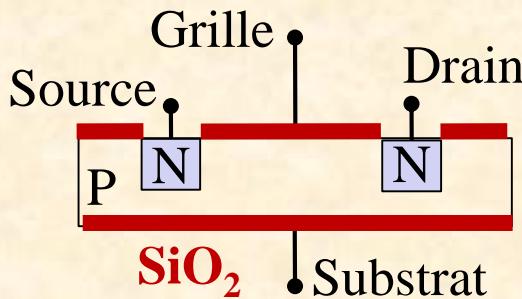
- **Structure / Symbole**
- **Fonctionnement linéaire**
  - Jonction GS en inverse
  - $I_D = I_{DSS} (V_p + V_{GS})^2$
- **Schéma petits signaux**
  - Transconductance :  $g_m$
  - Tension de pincement :  $V_p$
- **Valeurs typiques**
  - $V_p = 0.5 \text{ V}$
  - $I_{dss} = 10 \text{ mA}$
  - $g_m = 10 \text{ mA/V}$





## Transistor Mosfet

- **Structure / Symbole**
- **Fonctionnement linéaire**
  - Appauvrissement
    - Conducteur pour  $v_{GS}=0$
  - Enrichissement
    - Bloqué pour  $v_{GS}=0$
- **Schéma petits signaux**
  - $V_{th}$  = Tension de seuil
- **Valeurs typiques**
  - $-qV < V_{th} < +qV$
  - $I_{dss} = 10 \text{ mA}$
  - $g_m = 10 \text{ mA/V}$

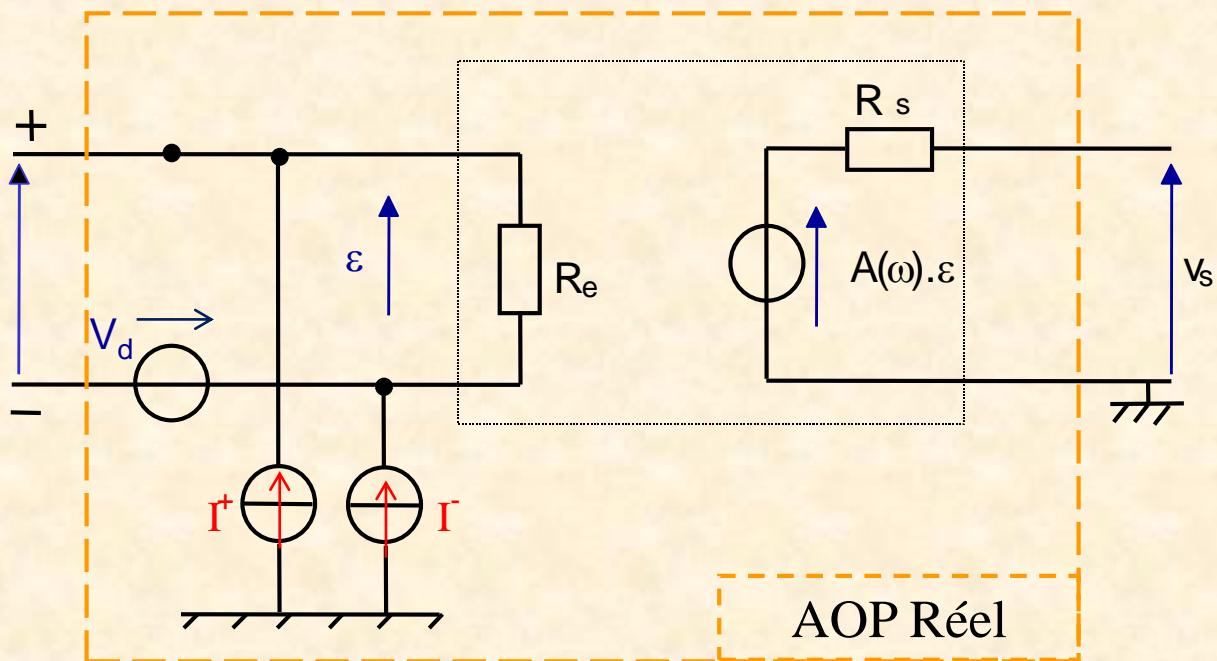




## AOP réel : Schéma équivalent

- Gain en BO :

$$A(j\omega) = \frac{A_o}{1 + j \frac{\omega}{\omega_o}}$$





# Objectifs pour Toutes les Classes d'Amplificateur

**Analyser le fonctionnement  
Elément du Modèle Quadripôle  
Calculer le rendement**



Amplificateur

# CLASSE A



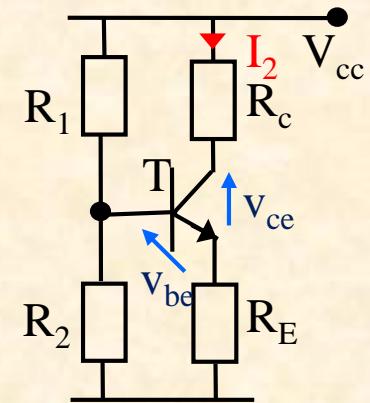
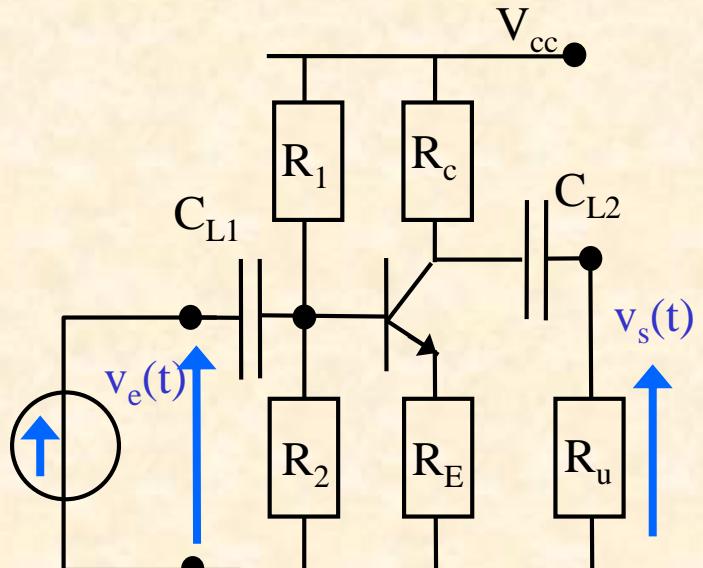
## Classe A : Montage

### • Plan de l'étude

- Etude Statique
  - Vérification de la polarisation
- Etude dynamique
  - Amplification petits signaux
  - Analyse des signaux
    - Eléments du Q équivalent
    - Bilan des puissances
    - Calcul du rendement

### • Conditions de l'étude statique

- Pas de signaux variables
  - $\rightarrow v_e(t)$  éteinte
- Capacités chargées à des tensions constantes
  - $\rightarrow$  Circuits ouverts





## Classe A : Etude statique

- **Point de repos ( $I_{Co}$ -  $V_{CEO}$ )**

- Maille d'entrée (gauche)

$$I_{Co} = \frac{E_{th} - V_{be}}{R_E + \frac{R_{th}}{\beta}}$$

- Maille de sortie (droite)

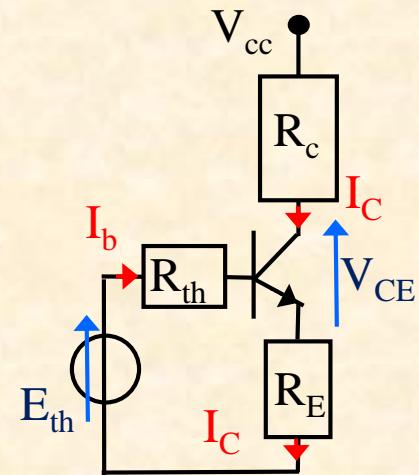
$$V_{ce} = V_{cc} - (R_C + R_E) I_C$$

- **Données**

- $V_{cc} = 20 \text{ V}$
- $R_1 = 21 \text{ [k}\Omega\text{]}$
- $R_2 = 2 \text{ [k}\Omega\text{]}$
- $R_E = 1 \text{ [k}\Omega\text{]}$
- $R_c = 8 \text{ [k}\Omega\text{]}$
- $R_u = 10 \text{ [k}\Omega\text{]}$

$$E_{th} = \frac{R_2 V_{cc}}{R_1 + R_2}$$

$$R_{th} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$



- **Thévenin**

- $R_{th} = 1,8 \text{ [k}\Omega\text{]}$
- $E_{th} = 1,7 \text{ [V]}$

- **Point de repos**

- $I_{co} = 1,0 \text{ [mA]}$
- $V_{CEO} = 10,7 \text{ [V]}$

- **Potentiels particuliers**

- $V_{BMo} = 1,7 \text{ [V]}$
- $V_{EMo} = 1,0 \text{ [V]}$
- $V_{CMo} = 11,7 \text{ [V]}$

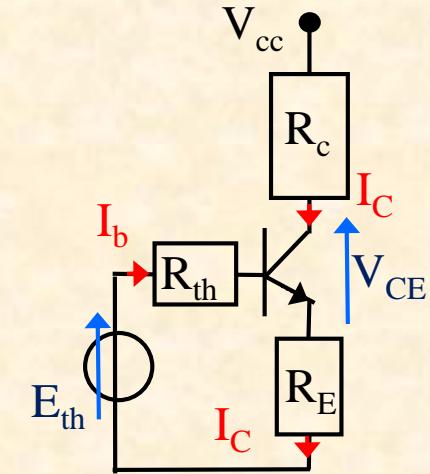
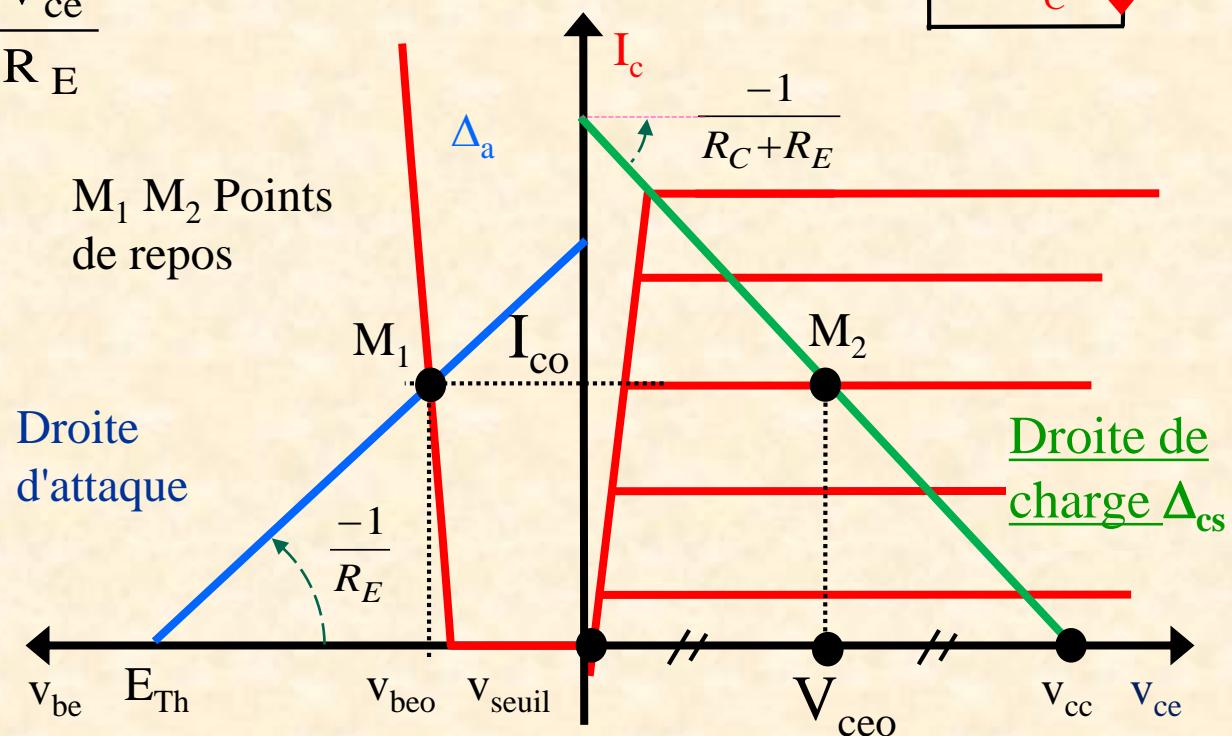
## Classe A : Point de Repos

- **Droite d'attaque  $\Delta_a$  :  $I_C = f(V_{be})$**

$$I_c \approx \frac{E_{th} - V_{be}}{R_E}$$

- **Droite de charge statique  $\Delta_{cs}$  :  $I_C = f(V_{ce})$**

$$I_c = \frac{V_{cc} - V_{ce}}{R_C + R_E}$$



## Classe A : Etude dynamique

- **e(t) sinusoïdale « f » dans la bande passante**

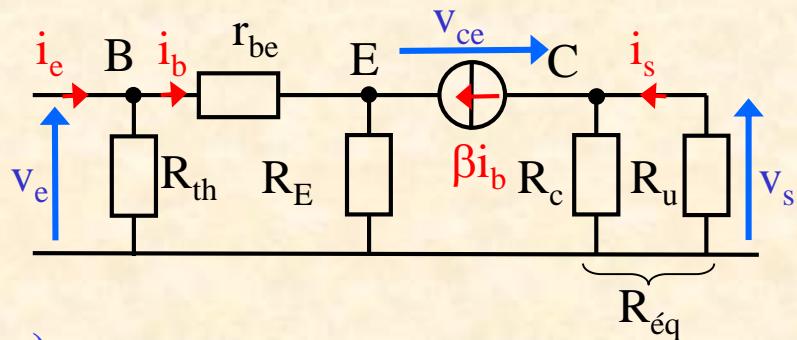
- Capacités → Impédance négligeable / autres impédances
- ddp constantes → Equivalent à des courts circuits

- **Montage petits signaux**

- Linéarisation autour du point de repos

- **Droite de charge dynamique  $\Delta_{cd}$  :  $i_c = f(v_{ce})$**

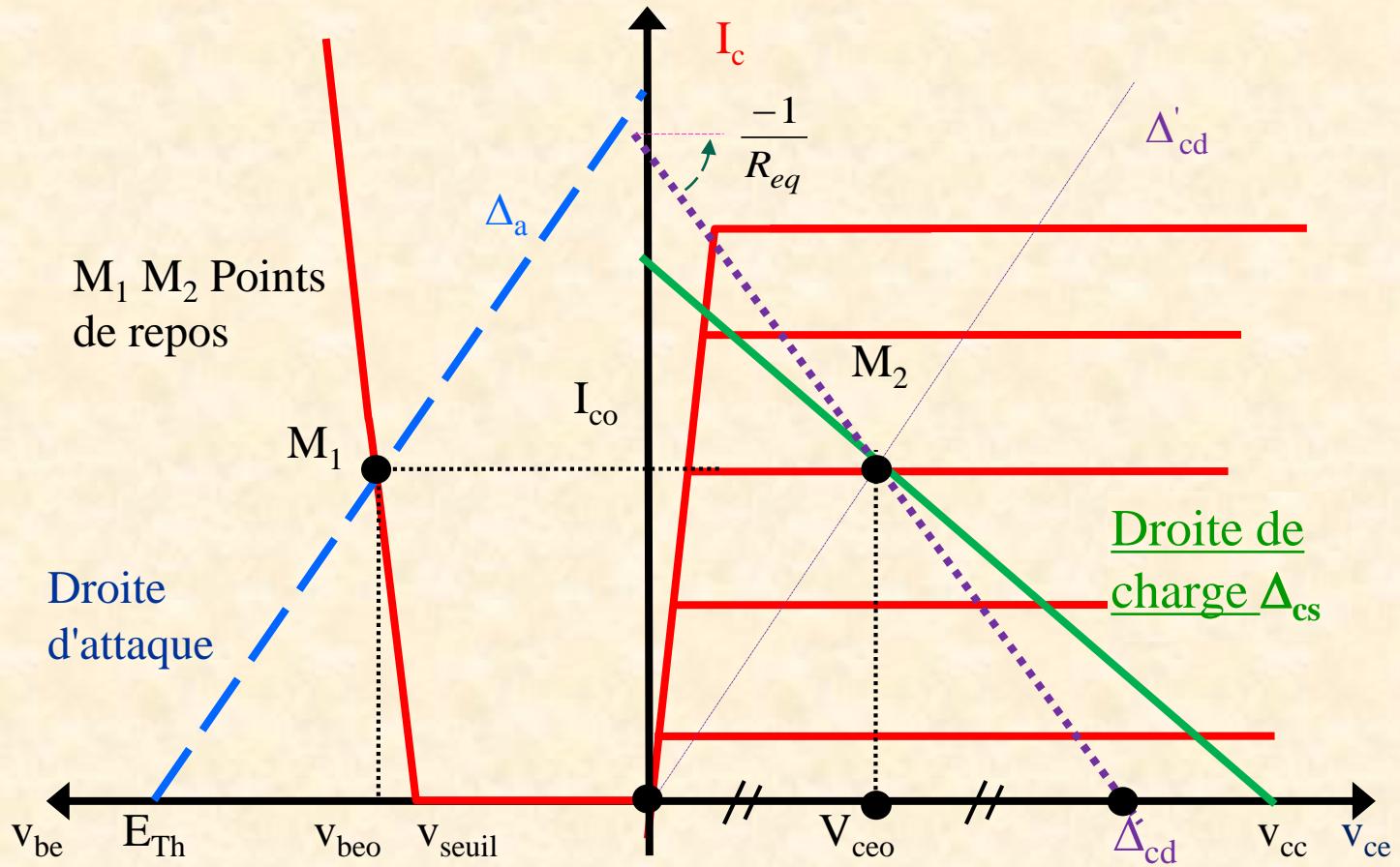
- Modèle petits signaux ≡ variations
  - → Pente de  $\Delta_{cd}$
  - $R_{eq} > R_C \rightarrow$  pente dynamique > pente statique
- Equation complète
  - → Passage par le point de repos statique  $M_2(V_{ceo}, I_{co})$



$$I_c = \frac{V_{cc} - V_{ce}}{R_C + R_E}$$

$$i_c = -\frac{v_{ce}}{R_E + R_{eq}}$$

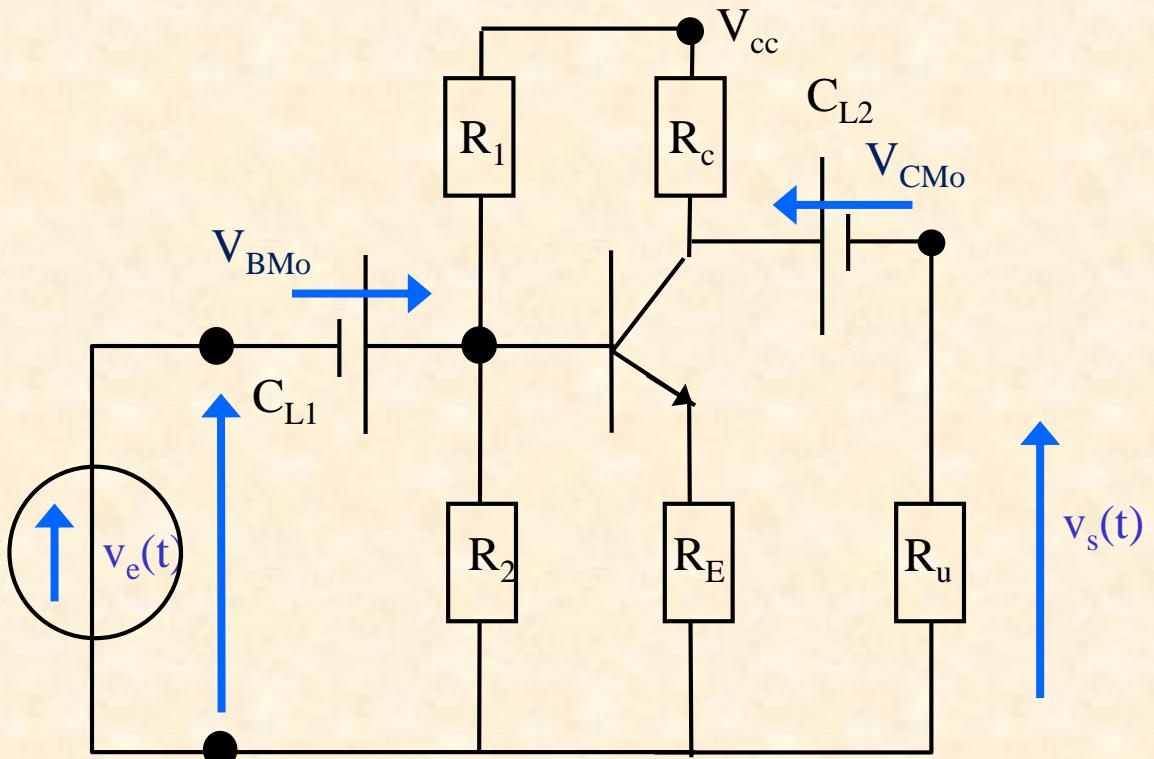
## Classe A : Analyse dynamique





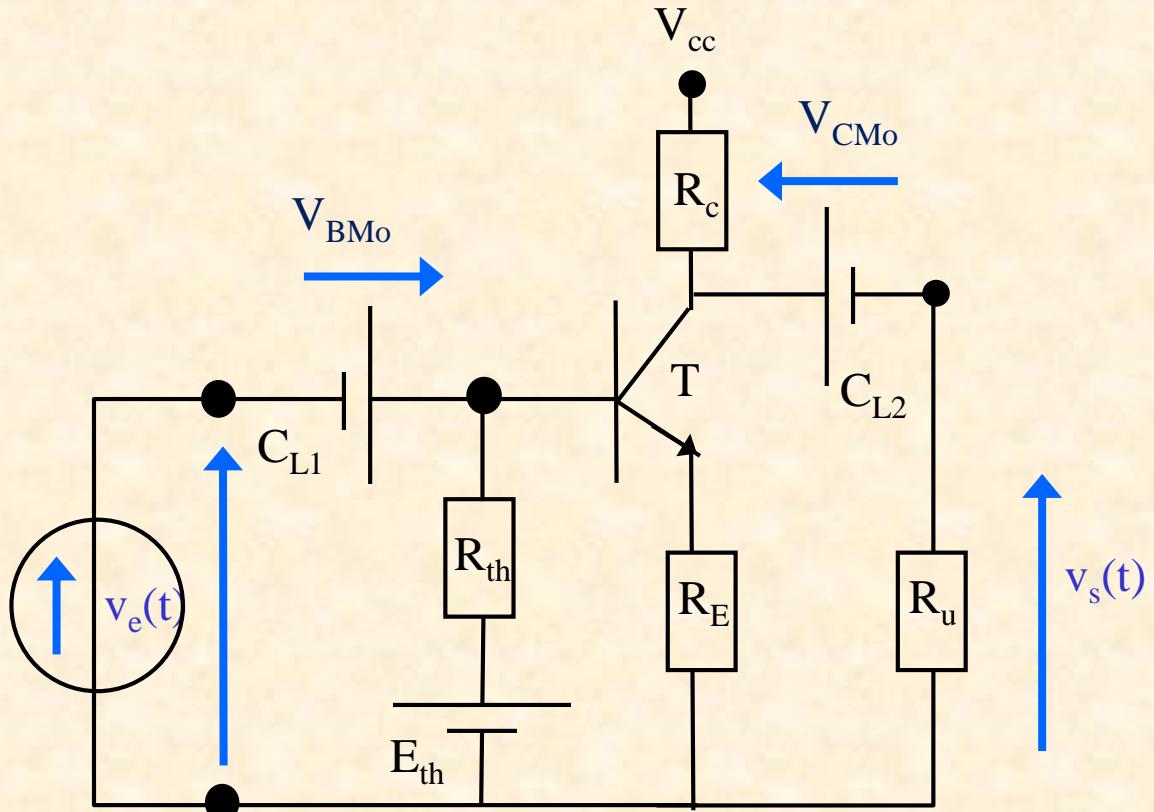
## Classe A : Analyse Complète

- $U_{\text{capacité de Liaison}} \approx \text{constante}$ 
  - → Sources de tension

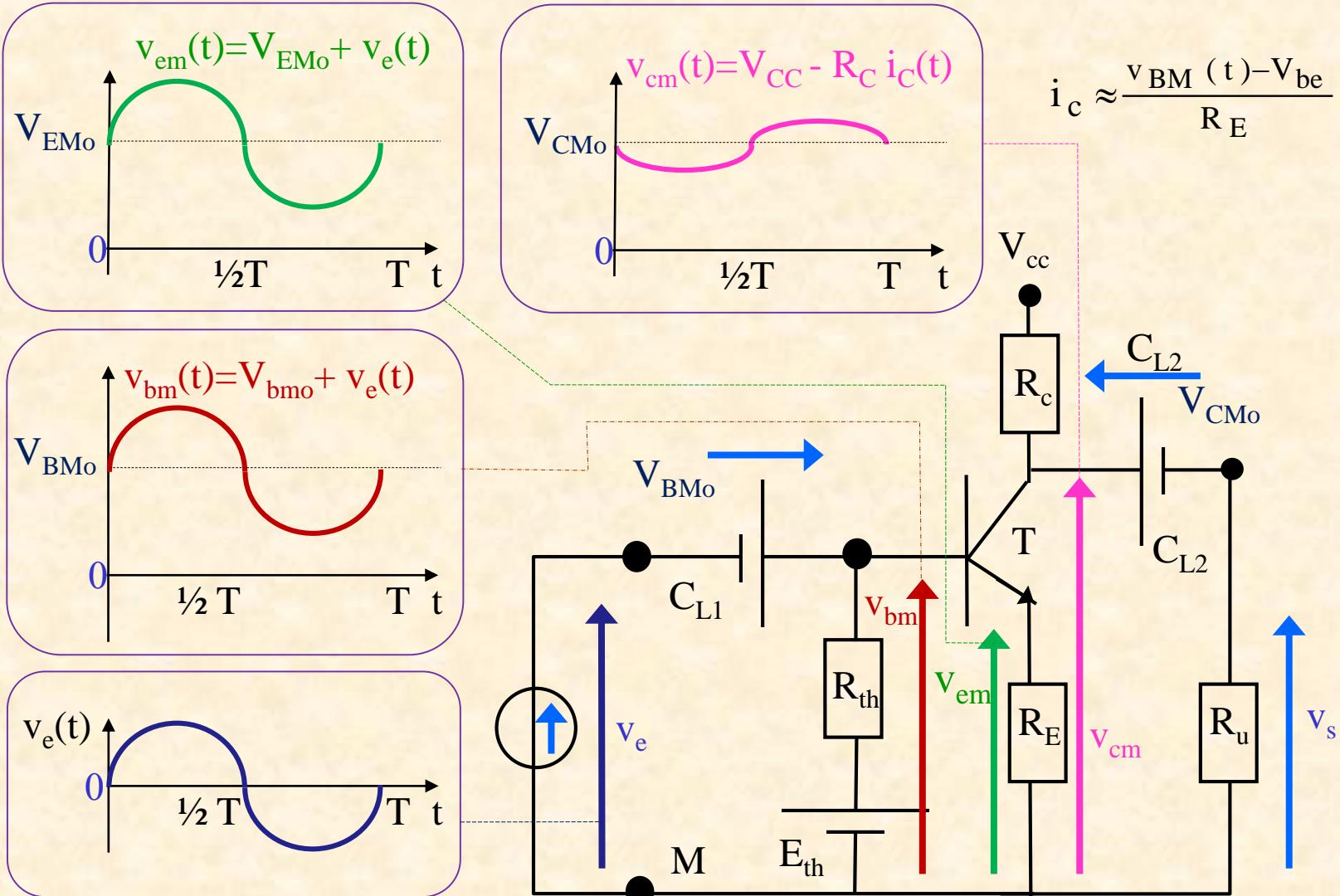


## Classe A : Analyse Complète

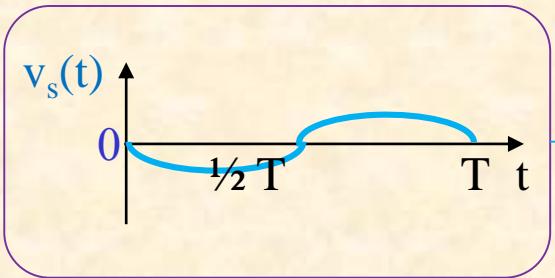
- **Polarisation par pont**
  - → Générateur de Thévenin



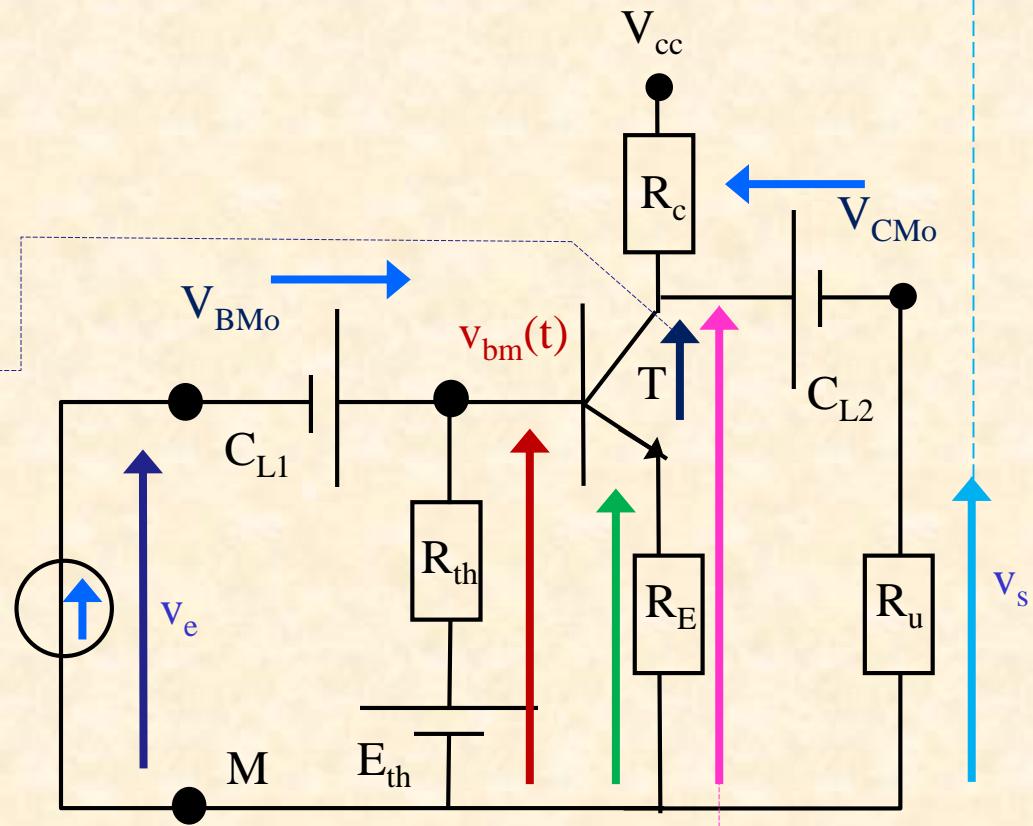
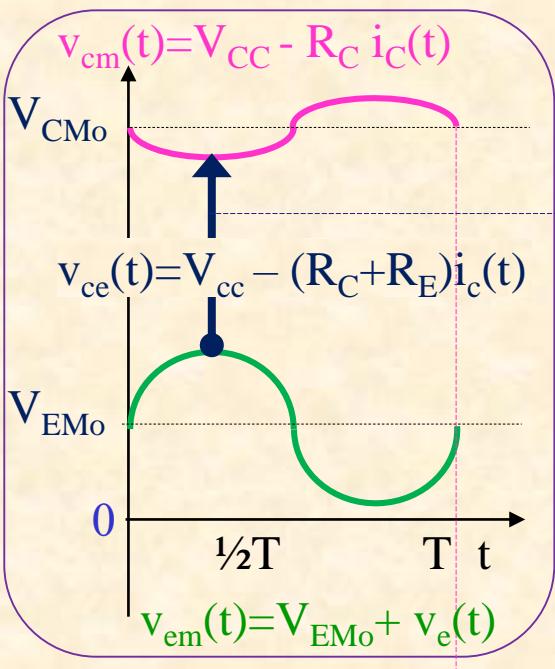
## Classe A : Signaux I



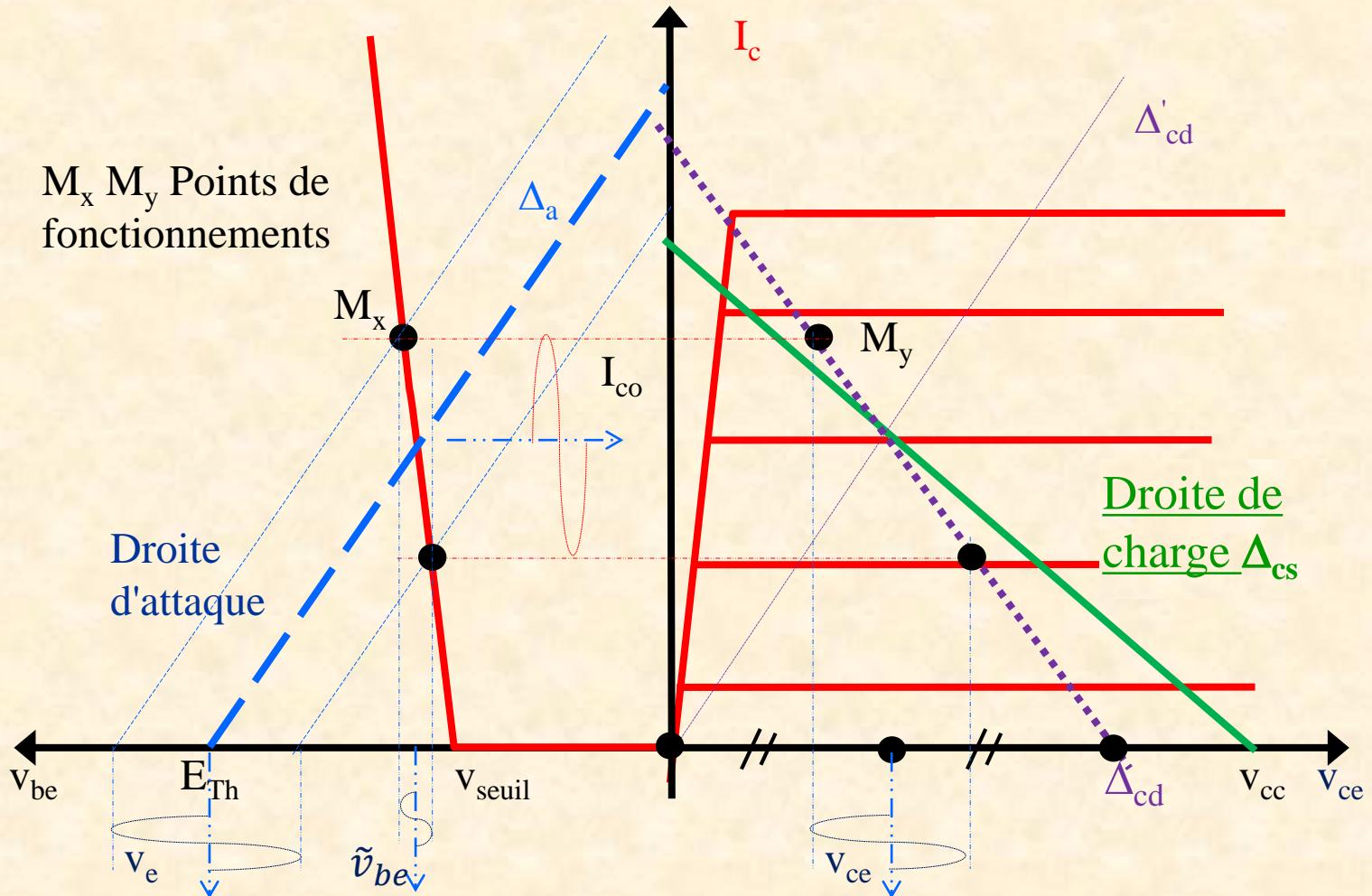
# Classe A : Signaux II



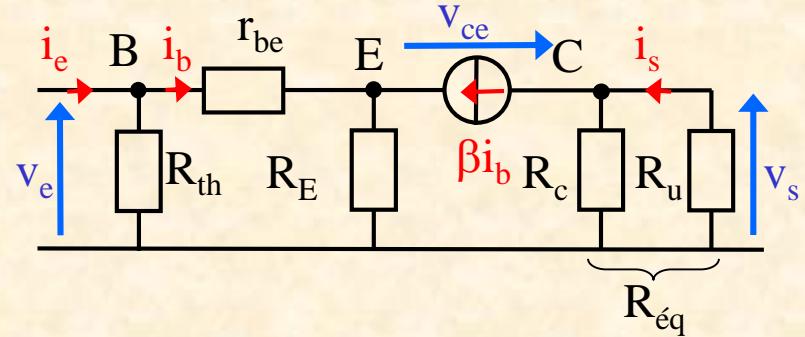
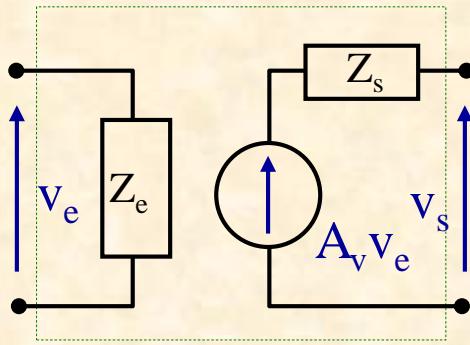
$$i_c \approx \frac{v_{BM}(t) - v_{be}}{R_E}$$



# Classe A : Points de fonctionnements dynamiques



## Classe A : Etude dynamique & Quadripôle



- Amplification en tension ( $R_u$  présente)

$$\bullet \quad A_v = \frac{v_s}{v_e} = - \frac{R_{eq}\beta}{r_{be} + (\beta + 1)R_E}$$

$$A_v = \frac{v_s}{v_e} = -4,3$$

- Impédance d'entrée :  $Z_e \triangleq \frac{v_e}{i_e}$

$$\bullet \quad Y_{in} = Y_{th} + Y'_{in}$$

$$Z_e = 1,8 \text{ k}\Omega$$

$$\bullet \quad Z'_{th} = r_{be} + (\beta + 1)R_E$$

- Impédance de sortie :  $Z_s \triangleq \frac{v_s}{i_s}$

$$Z_s = 4,4 \text{ k}\Omega$$

$$\bullet \quad Z_s = R_{eq}$$



## Classe A : Rendement

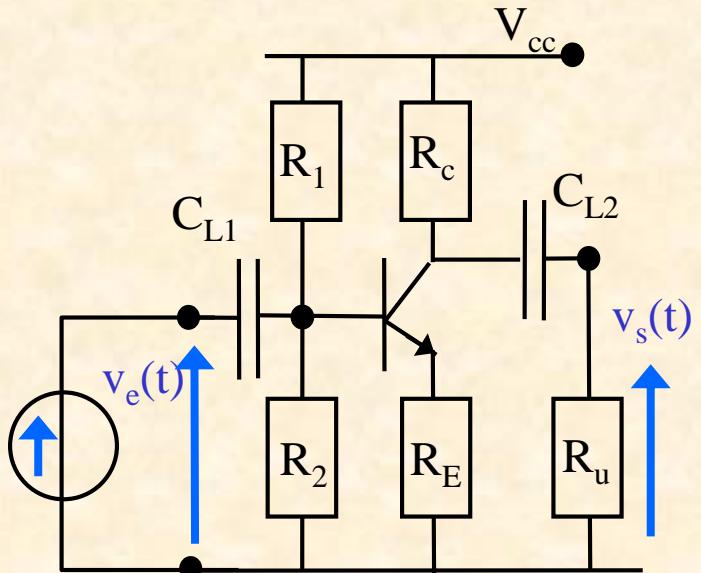
### • Majoration du rendement

$$\eta = \frac{P_u}{P_{abs}}$$

- Variables d'écritures
  - $V_{CC}$
  - $I_{Co}$

### • Hypothèses

- Attaque sinusoïdale
- Fréquence compatible modèle du transistor simple
- Point de repos idéal
  - Amplitude maximum des signaux (avant distorsion)
  - Apparition distorsion sur les 2 alternances au même niveau



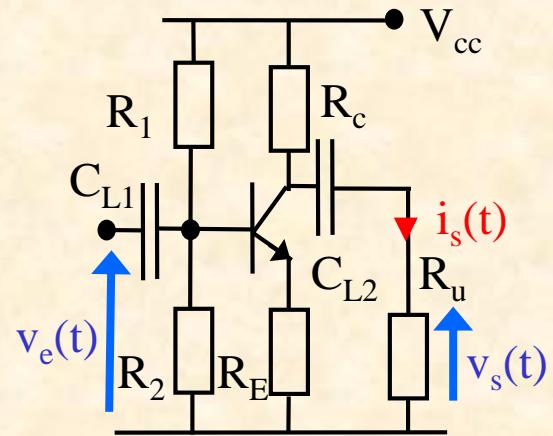
## Classe A : $\eta$

- Puissance utile maximum

$$P_u = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \frac{V_s^2(t)}{R_u} dt = \frac{1}{TR_u} \int_{-T/2}^{T/2} V_{s\_max}^2 \sin^2(\omega t) dt$$

$$= \frac{V_{s\_max}^2}{2R_u}$$

$$P_u = \frac{V_{s\_max}^2}{2R_u}$$



- Maximisation :

- $R_u > R_{eq}$
- $P_{Ru} < P_{Req}$

$$P_u \leq \frac{V_{s\_max}^2}{2R_{eq}} \leq \frac{V_{s\_max}}{2} \frac{V_{s\_max}}{R_{eq}}$$

- Variables de travail

- $V_{s\_max} = 1/2V_{cc}$

$$I_{max} = I_{co}$$

$$P_u \leq \frac{V_{s\_max} I_{s\_max}}{2}$$

- Points de fonctionnement



$$P_u \leq \frac{V_{cc} \cdot I_{co}}{4}$$



## Classe A : $\eta$

- Puissance utile maximum

$$P_u \leq \frac{V_{cc} \cdot I_{co}}{4}$$

- Puissance absorbée

$$\begin{aligned} P_{abs} &= \frac{1}{T} \int_0^T V_{cc}(t) i_c(t) dt \\ &= \frac{V_{cc}}{T} \int_0^T [I_{co} - I_{c\_max} \sin(\omega t)] dt \\ &= \frac{V_{cc}}{T} (I_{co} T + 0) \end{aligned}$$

$$P_{abs} = V_{cc} I_{co}$$

- Rendement

$$\eta = \frac{P_u}{P_{abs}} \leq \frac{1}{4}$$

- Conclusion

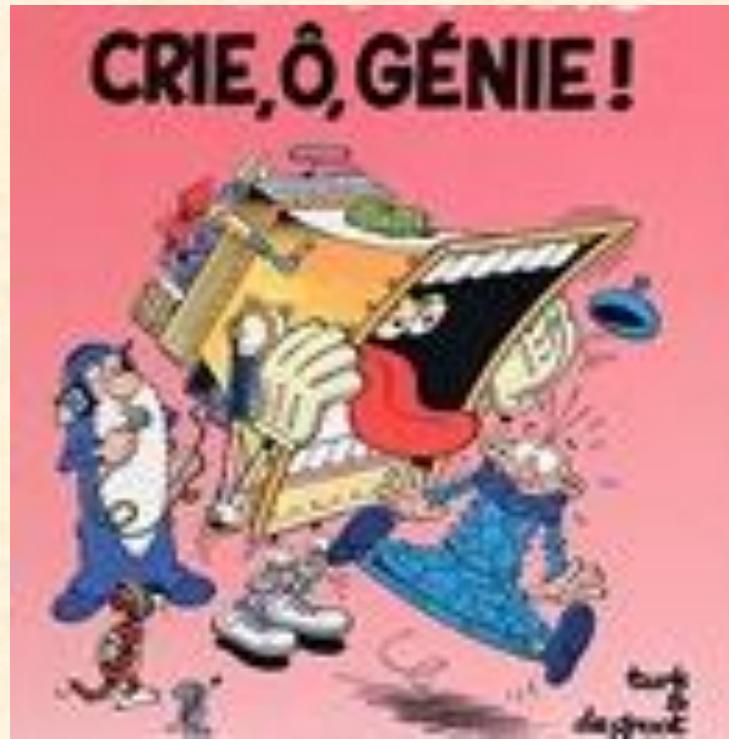
- $\eta < 25\%$  très faible
- Transistors en zone linéaire
- Signaux de faibles amplitudes.

- Fil rouge : Calcul  $P_{abs}$

- $P_u = 25 \text{ W}$
- $P_{abs} > \frac{25}{25\%} = 100 \text{ W}$



## Amplificateur



Classe B



## Classe B : Montage de principe

### • Schéma de principe

- 2 transistors duaux
- Bases/Collecteurs communs
- Alimentation symétriques

### • Schéma d'étude

### • Etude statique

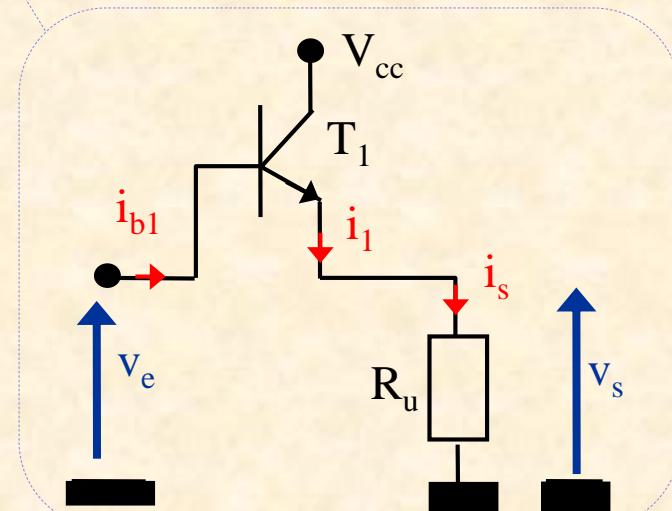
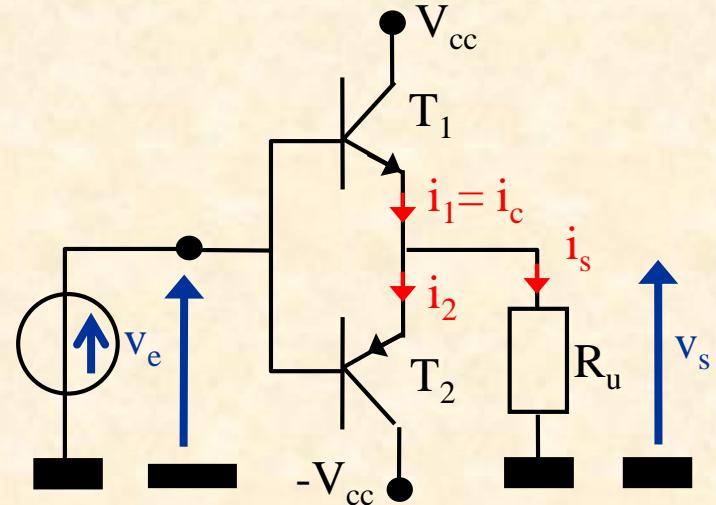
- Droite d'attaque  $\Delta_{as}$  :  $I_c = f(V_{BE})$

$$I_c = \frac{V_e - v_{be}}{R_u} \text{ Polarisation du } T_r \text{ par } v_e$$

- Droite de charge  $\Delta_{cs}$  :  $I_c = f(V_{CE})$
- $I_c$  indépendant de  $V_{CE}$  ;  $V_{CE} = V_{CC}$ 
  - Droite verticale

### • Point de repos

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{CEO} = V_{CC} \\ I_c = 0 \end{array} \right.$$



## Classe B : Etude dynamique

- Schéma dynamique

- Droite de charge :  $i_c = -\frac{v_{ce}}{R_u}$

- Amplification ...

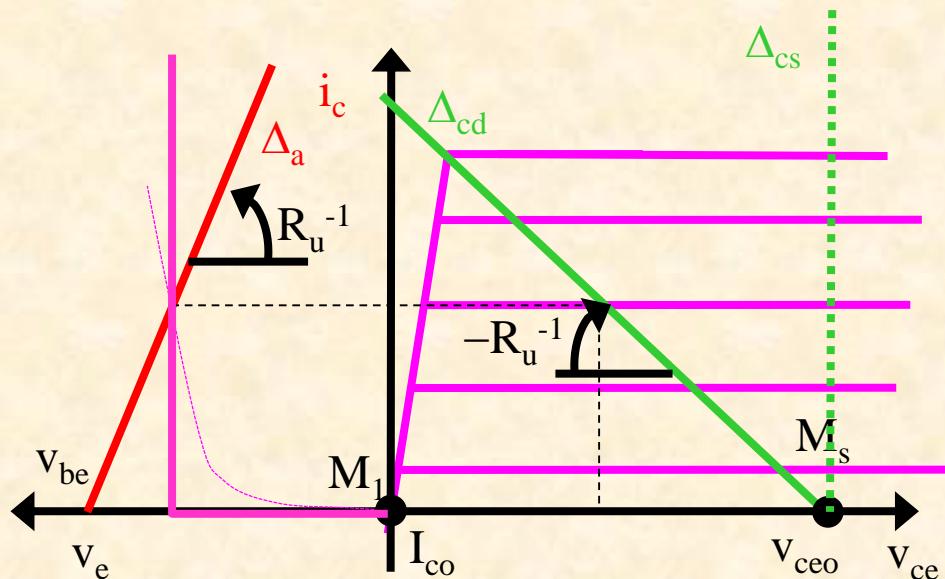
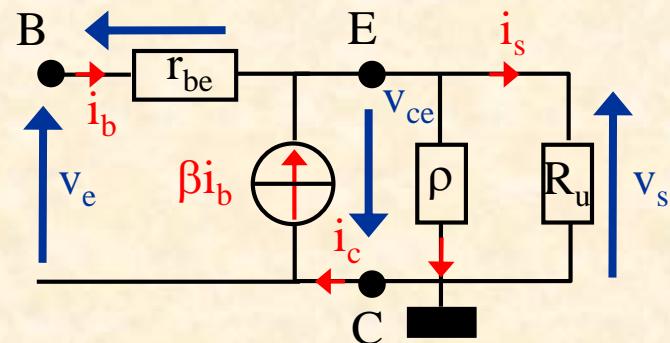
- en courant  $A_i = \frac{i_{\text{sortie}}}{i_{\text{entrée}}} = \frac{i_e}{i_b} = \beta + 1 \approx \beta$

- en tension

$$A_v = \frac{v_s}{v_e} = \frac{R_u i_c}{[(r_{be} + (\beta+1)r_u) i_b]} \\ = \frac{R_u \beta}{r_{be} + (\beta+1)R_u} \approx 1^-$$

- NB

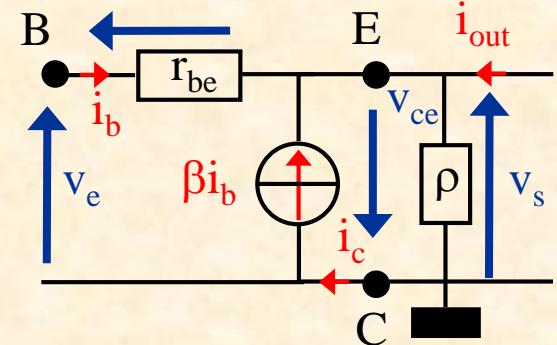
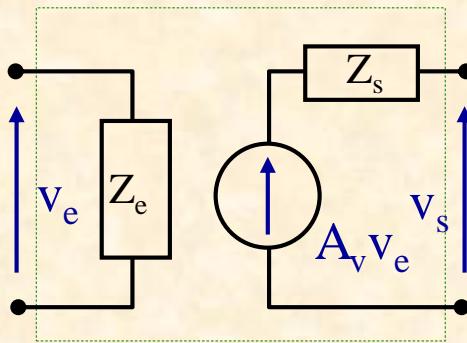
- La charge  $R_u$  est branchée





## Classe B : Etude dynamique & Quadripôle

- $R_u$  débranchée



- Amplification en tension  $R_u \rightarrow \rho$

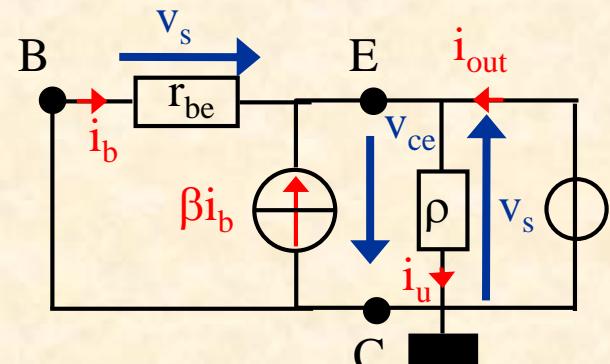
$$\bullet A_v = 1$$

$$\bullet \text{Impédance d'entrée : } Z_e \triangleq \frac{v_e}{i_e}$$

$$\bullet Z_e = \frac{v_e}{i_b} = r_{be} + (\beta + 1)\rho$$

$$\bullet \text{Impédance de sortie : } Z_s \triangleq \left. \frac{v_s}{i_{out}} \right|_{v_e=0}$$

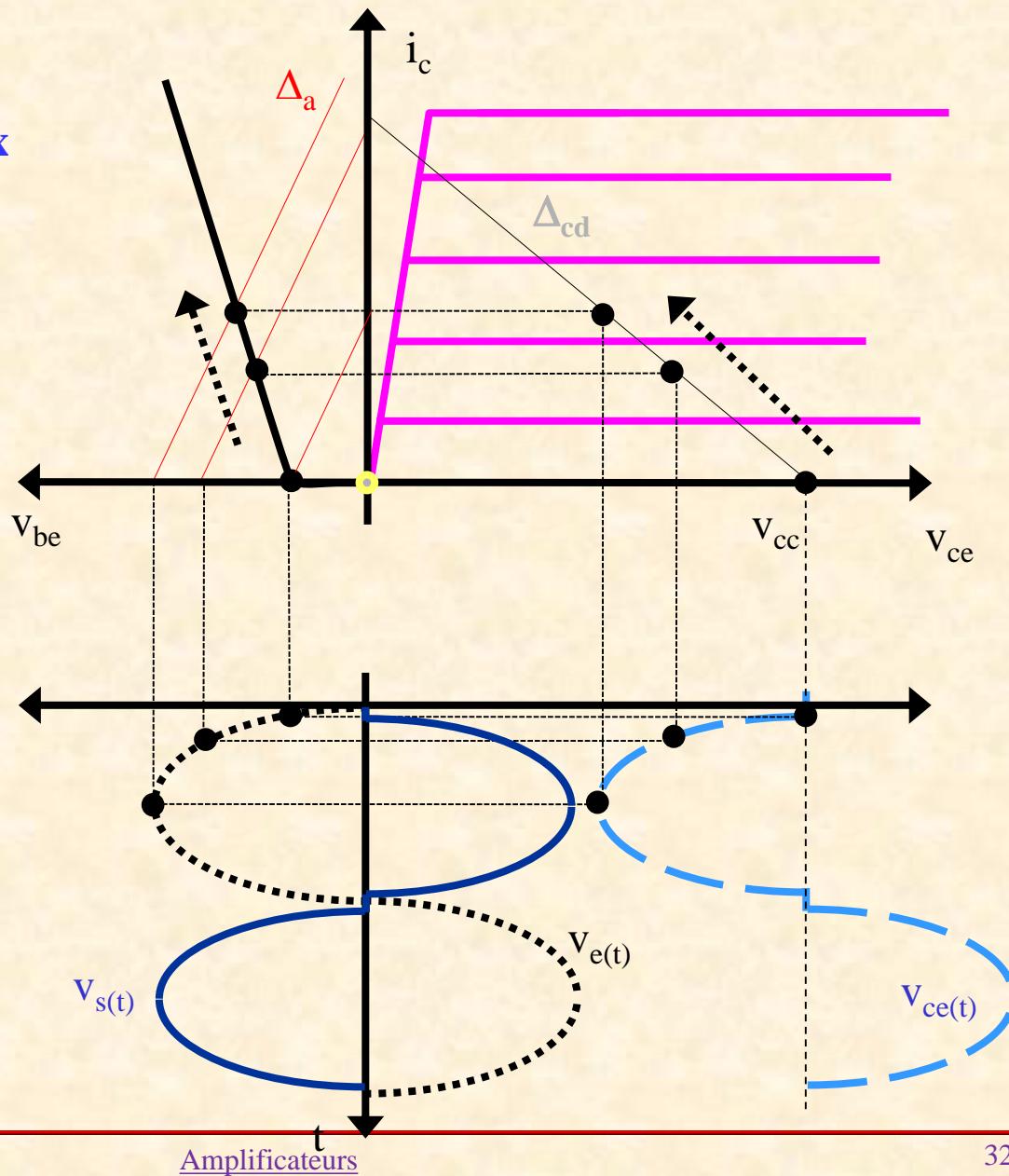
$$\bullet Z_s = \frac{\rho r_{be}}{r_{be} + \rho(\beta + 1)}$$





## Classe B

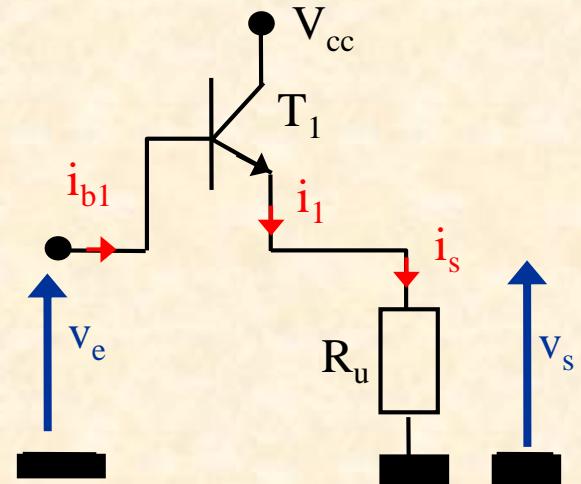
- **Évolution des signaux**



## Classe B : étude du rendement

- Puissance utile
- $V_e(t)$  sinusoïdale
  - $\Rightarrow v_s(t)$  sinusoïdale
  - $\Rightarrow V_{s\_max} = V_{cc} - V_{sat} \approx V_{cc}$

$$P_u = \frac{V_{s\_max}^2}{2R_u} \leq \frac{V_{cc}^2}{2R_u}$$



- Puissance absorbée par le montage complet

$$\begin{aligned} P_{alim} &= \frac{1}{T} \int_T V_{cc} \cdot i_{c1}(t) dt \\ &= \frac{V_{cc}}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} I_{c1\_max} \cdot \sin(\omega t) dt \\ &= \frac{V_{cc} I_{c1\_max}}{\pi} = \frac{V_{cc}}{\pi} \frac{V_{cc}}{R_u} \end{aligned}$$

$$P_{abs} = 2P_{alim} = \frac{2}{\pi} \frac{V_{cc}^2}{R_u}$$



## Classe B : Rendement

- **Rendement**

$$\eta = \frac{P_u}{P_{abs}} \leq \frac{\pi}{4}$$

$$\eta \leq 78,5\%$$

- **Conclusion**

- $\eta_{\text{classe B}} \gg \eta_{\text{classe A}}$
- Forte puissance (pertes plus faibles)

- **Fil Rouge : AN**

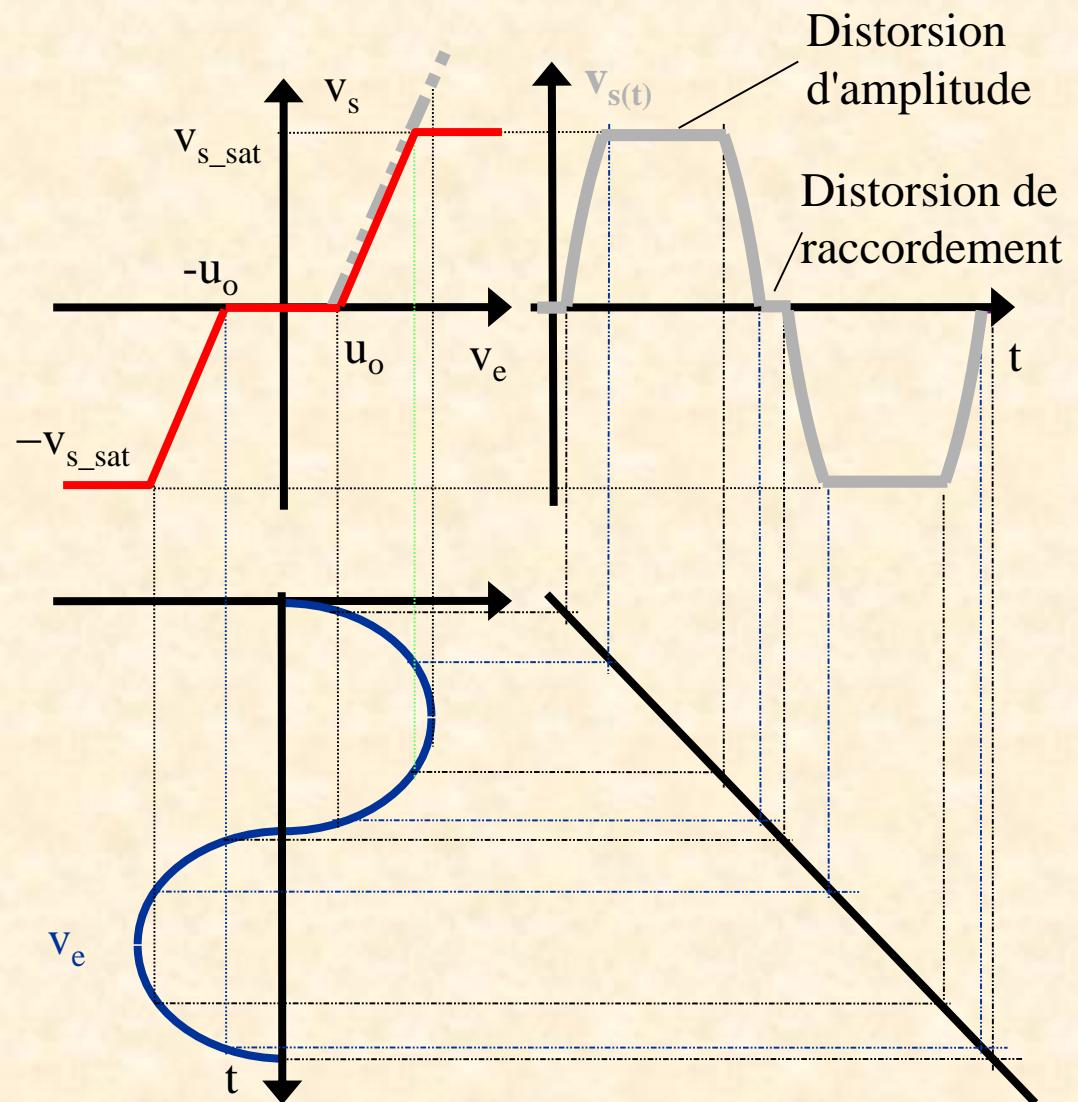
- $P_u = 25W$
- Classe B
  - $P_{abs} = 25/78,5\% = 31,85 W$
- Rappel Classe A
  - $P_{abs} = 25/25\% = 100 W$



## Classe B

### • Distorsions

- d'amplitude
- de croisement



## Classe B : Compensation distorsion de croisement

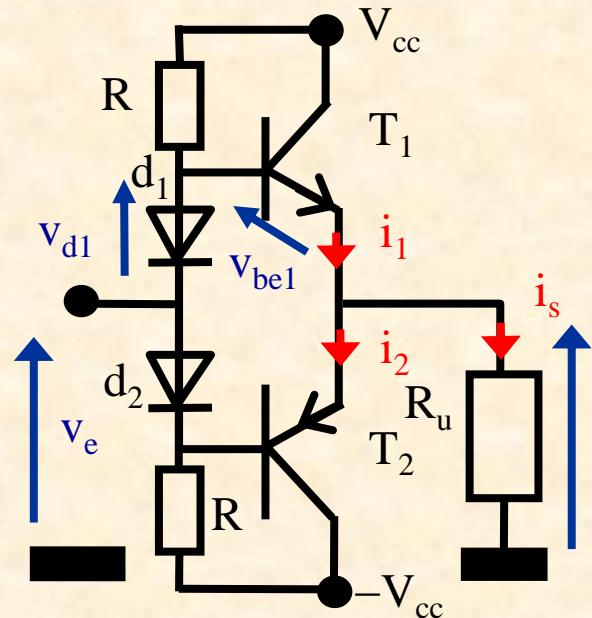
- **Compensation à diodes**

- $v_e > 0$

- $v_s = v_e + \underbrace{v_{d1} - v_{bel}}_{\approx 0}$

- **NB**

- $d_1$  et  $d_2$  toujours passantes
- Amplification en tension  $\approx 1$



## Classe B : Compensation distorsion de croisement

- **Compensation à diodes**

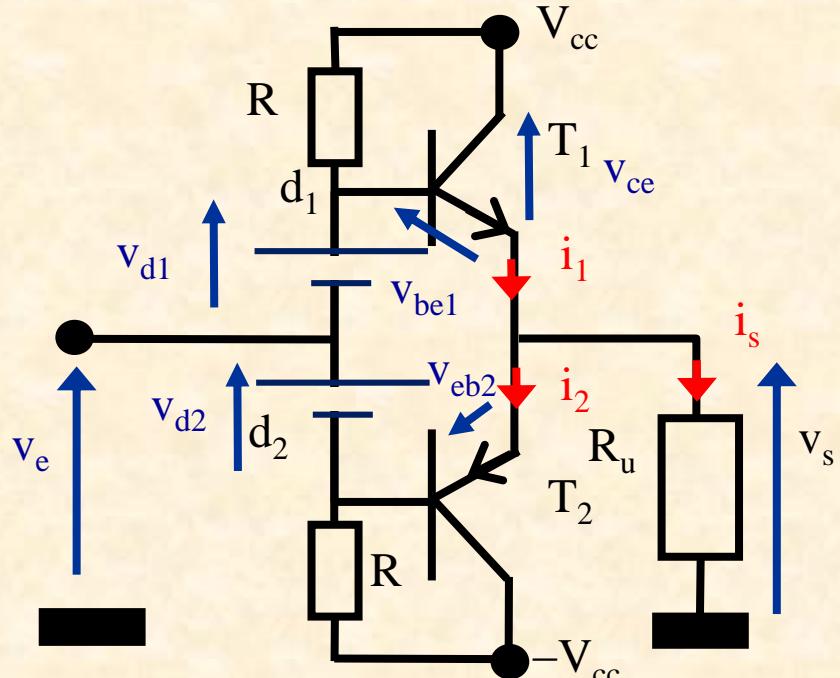
- $v_e > 0$
- $v_e + \underbrace{v_{d1} - v_{be1}} = v_s \approx 0$

- **NB**

- $d_1$  et  $d_2$  **toujours passantes**
- Amplification en tension  $\approx 1$

- **Danger**

- Si  $v_{d1} > v_{be1}$  alors le transistor est toujours passant risque de sur puissance dans le transistor normalement off (rendu conducteur car  $v_{d1} > v_{be1}$ )



## Classe B : Compensation distorsion de croisement

- Compensation à diodes ... diode off
- $V_e > 0 \rightarrow T_2$  off

- $V_{cc} - V_{be1} - (Rp/\beta + Ru) Ic = 0$

- $Ic = \frac{V_{cc} - V_{be}}{R_p/\beta + Ru} = \frac{14,4}{\frac{50k}{100} + 22} = 0,3 \text{ A}$

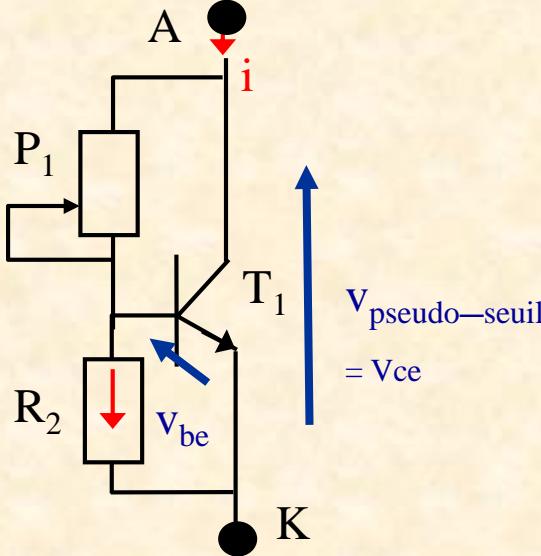
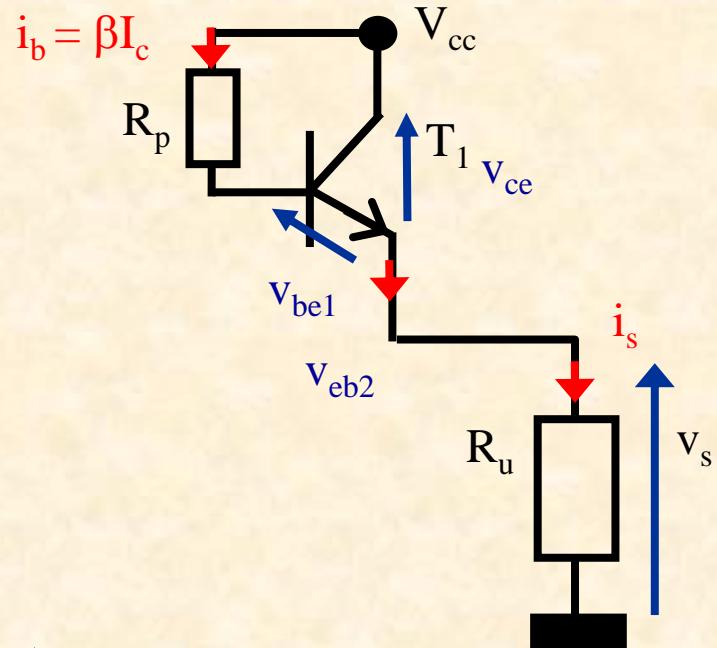
- $V_s = Ru Ic = 22 * 0,3 = 6,6 \text{ V}$

- Pseudo diode

- $I_{R2} = V_{be}/R_2$

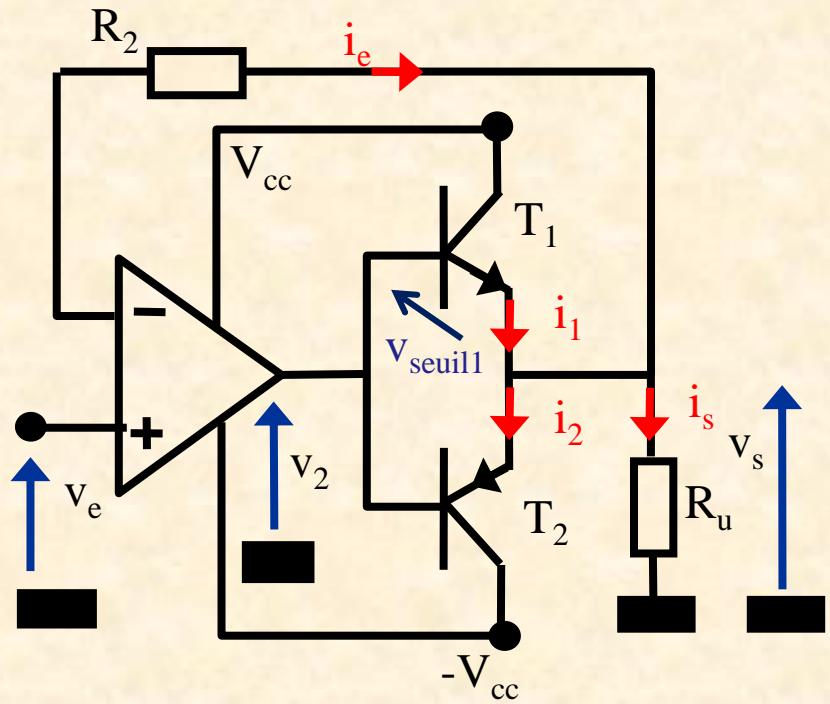
- $V_{ce} = (P_1 + R_2) V_{be}/R_2$

- $v_{seuil} = (1 + \frac{p_1}{R_2}) v_{be}$



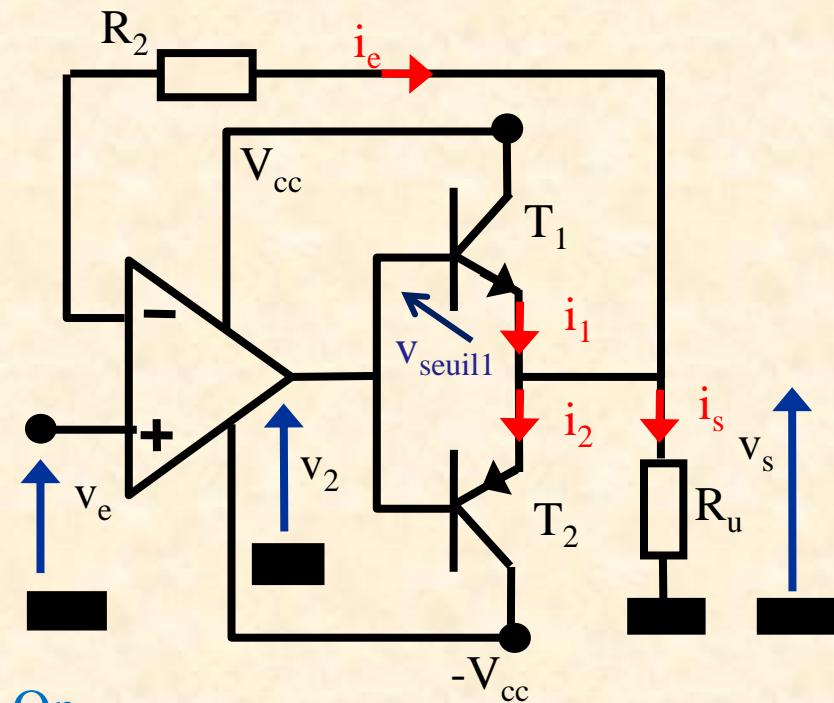
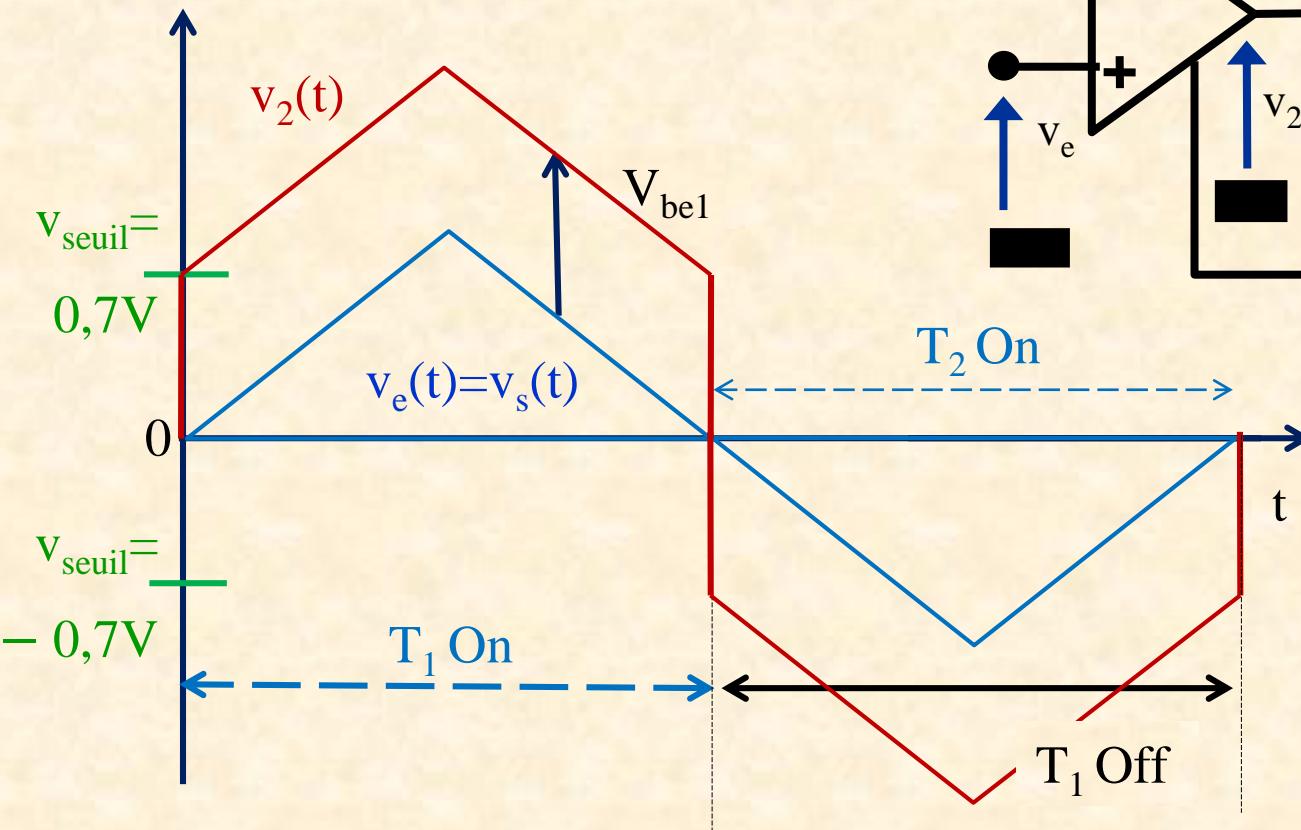
## Classe B : Compensation à AOP

- **Montage Suiveur**
  - AOP parfait
  - Bras de pont dans la chaîne direct
  - Gain en tension :
    - $A_v = 1$
- **Asservissement parfait**
  - $v_e = 0^+ \rightarrow v_s = 0^+$ 
    - $\rightarrow V_2 = V_{\text{seuil\_1}} + 0^+$
  - $0^+ \rightarrow 0^-$ 
    - $V_2 +07 \rightarrow -07$  Il y a basculement pour rendre conducteur le T2
- **Commentaire**
  - L'AOP crée une tension de compensation  $\pm V_{be}$  qui polarise les T, grâce à l'asservissement qui maintient  $\varepsilon$  à 0V.



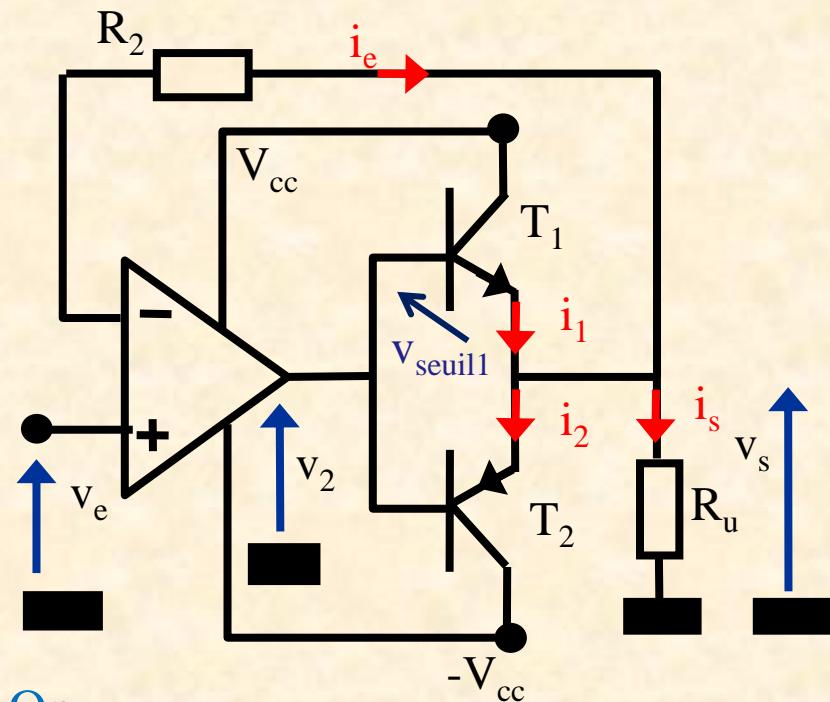
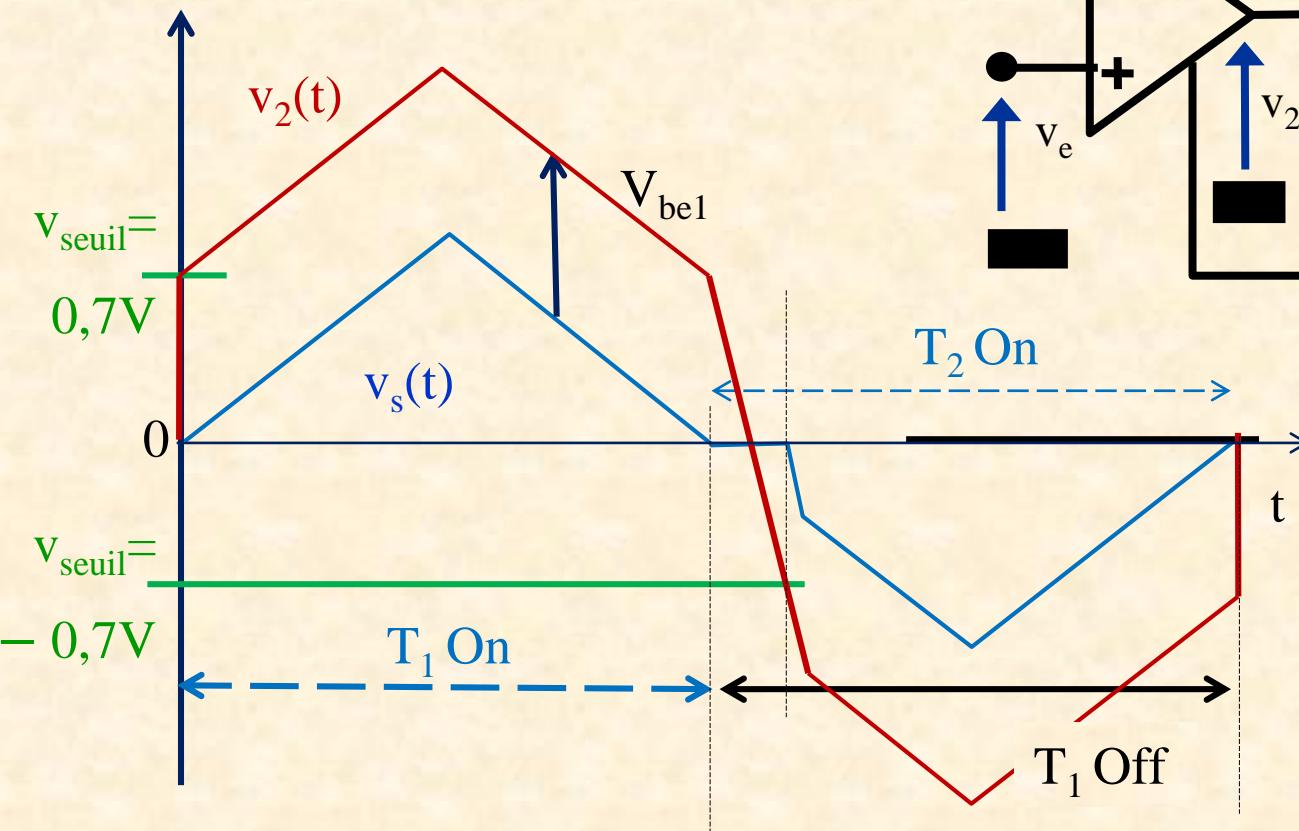
## Distorsion de croisement

- AOP parfait



## Distorsion de croisement

- AOP avec slew rate





## Classe B : Compensation à AOP

### • Montage inverseur

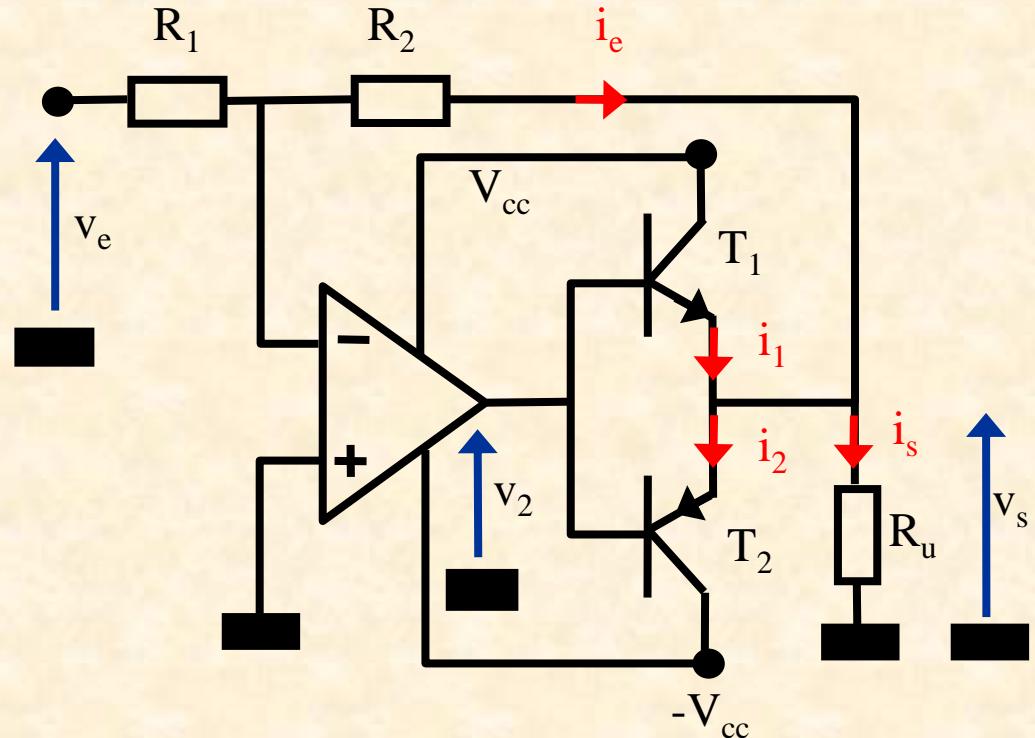
- AOP parfait
- Bras de pont dans la chaîne direct
- Gain en tension :
  - $A_v = -\frac{R_2}{R_1}$

### • Asservissement parfait

- $V_e = 0^+ \rightarrow V_s = 0^-$
- $\rightarrow V_2 = -V_{be}$

### • Commentaire

- L'AOP crée une tension de compensation  $\pm V_{be}$  qui polarise les T, grâce à l'asservissement qui maintient  $\varepsilon$  à 0V.



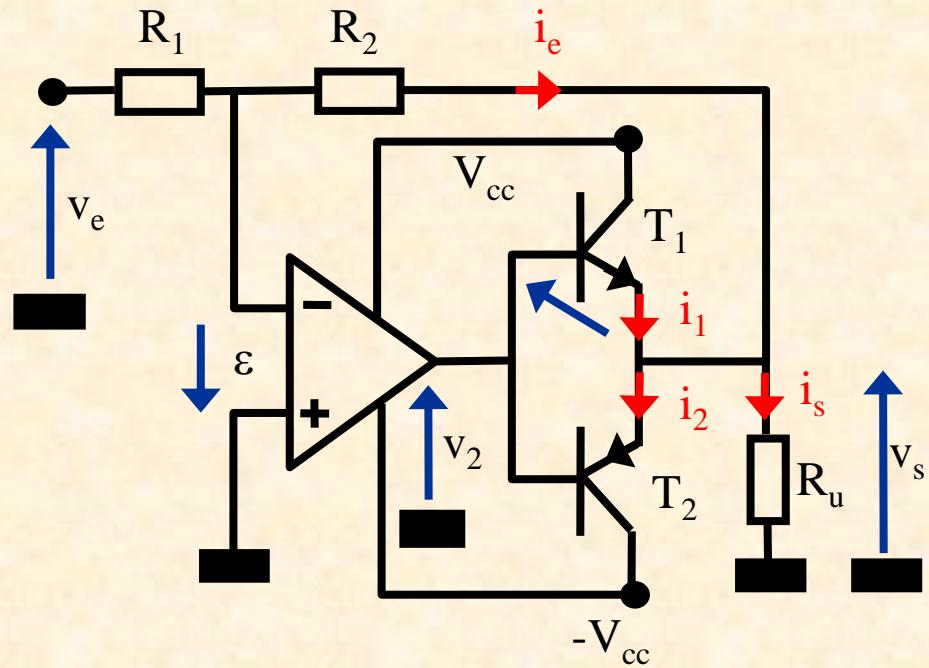
## Classe B : Compensation à AOP

- **Quantification amélioration**

- Recherche du seuil équivalent

- **AOP réel**

- Gain BO fini
  - $V_2 = A \cdot \varepsilon$
  - Tension  $\varepsilon$  non nulle





## Classe B : Compensation à AOP

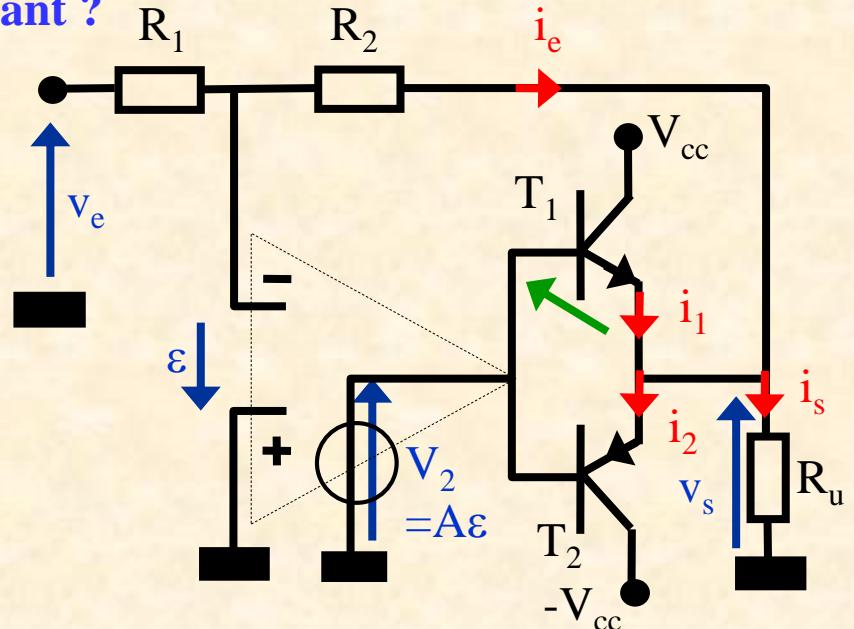
- Quelle tension  $V_{e\text{seuil}}$  rend  $T_1$  passant ?

- $v_e < 0$
- $T_1$  conducteur
- $v_e = f(v_{be}, v_s)$

- Equations AOP « réel »

- $v_2 = A \varepsilon$
- $v_e = R_1 i_e - \varepsilon$
- $v_2 = v_{be} + v_s$
- $v_e = (R_1 + R_2) i_e + v_s$

- Expression de  $v_e = f(v_s)$



$$\begin{aligned} v_e &= -(1 + \frac{R_1}{R_2}) \frac{v_{be}}{A} - \frac{(A+1)R_1 + R_2}{AR_2} v_s \\ &\approx -(1 + \frac{R_1}{R_2}) \frac{v_{be}}{A} - \frac{R_1}{R_2} v_s \end{aligned}$$



## Classe B : Compensation à AOP

- **Seuil Equivalent**

- $v_s = 0$  ;  $v_{be} = 0,6 \text{ V}$  ;
- $A = 10^4$  ;  $R_1 = R_2$

$$v_e \approx -\left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \frac{v_{be}}{A} - \frac{R_1}{R_2} v_s$$

$$v_{e \text{ seuil}} = -\frac{R_1 + R_2}{A R_2} v_{be} = -0,140 \text{ mV}$$

- **Temps de monté de la tension de sortie de l'AOP fini**

- Mise en conduction du transistor
  - $SR = 15 \text{ V}/\mu\text{s}$  ;
  - $V_2 : 0 \nearrow 0,6 \text{ V}$

$$\Delta T = \frac{v_{be}}{SR} = \frac{0,6}{15 \cdot 10^6} = 40 \text{ ns}$$

- **Conclusion**

- $\eta << 78\%$  insuffisant
- Distorsion limitée mais non nulle • Slew-rate fini