

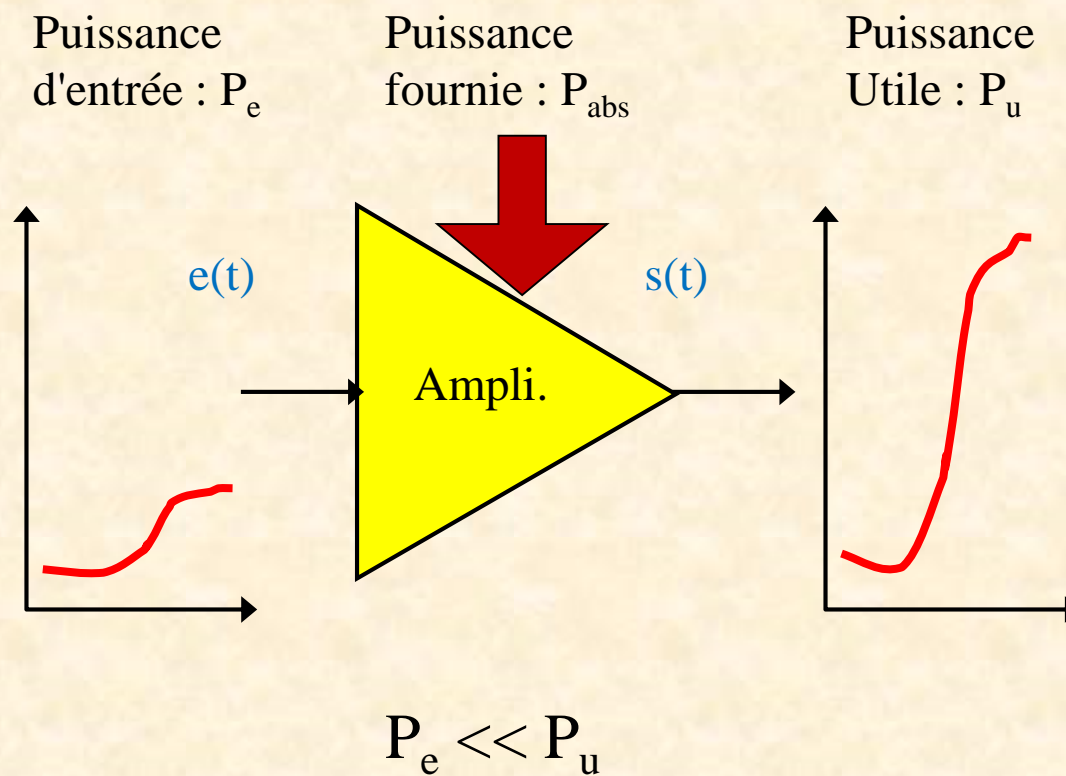
# Amplificateurs



C'est quoi !  
Classe A  
Classe B



## Présentation





## Angle de conduction

### • Entrée sinusoïdale

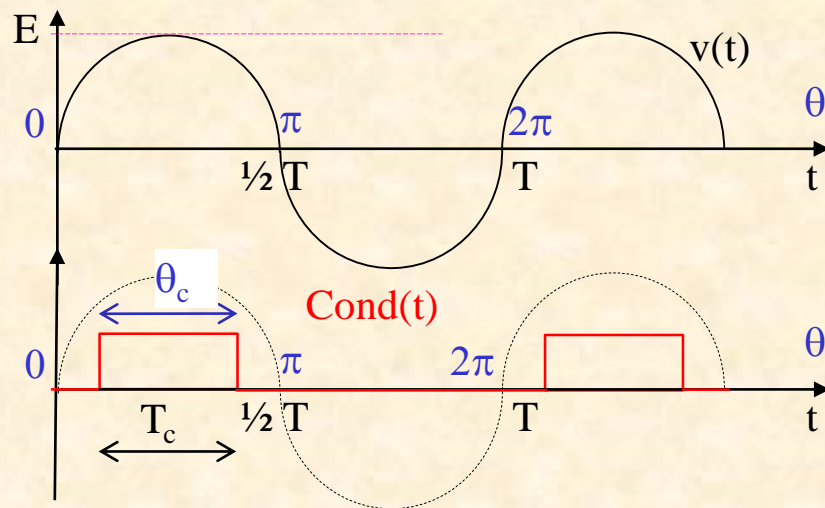
- $e(t) = E \sin(\omega t)$

### • 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

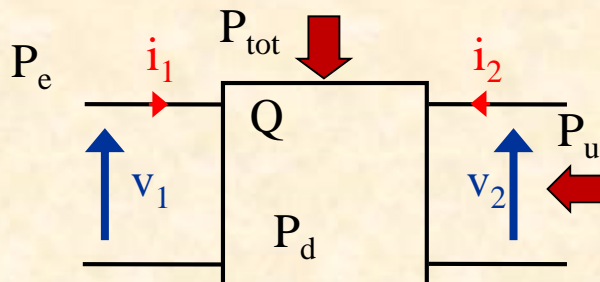
### • Ampli réel $\rightarrow$ ampli parfait

- $H \rightarrow 1^+$



## Bilan des puissances

### • Structure amplificateur



### • P instantanée d'entrée

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

### • P instantanée de sortie (utile)

- $p_u(t) = v_2(t) \cdot i_2(t)$  [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

$$A_v = \left. \frac{v_s}{v_e} \right|_{i_s=0}$$

- Impédance d'entrée

$$Z_e = \left. \frac{v_e}{i_e} \right|_{i_s=0}$$

- de sortie

$$Z_s = \left. \frac{v_s}{i_s} \right|_{v_e=0}$$

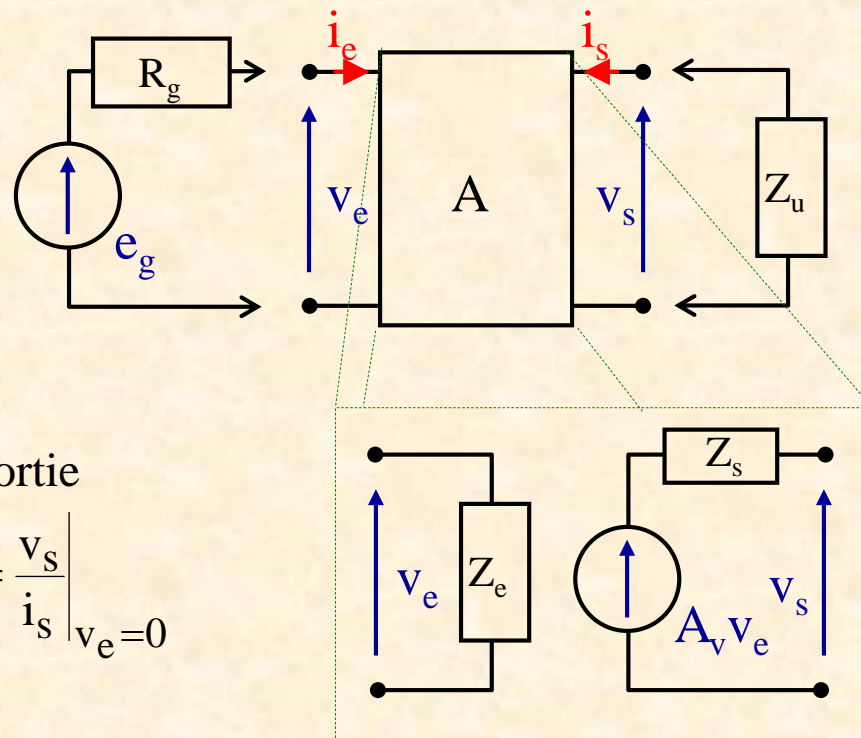
### • Nota Bene

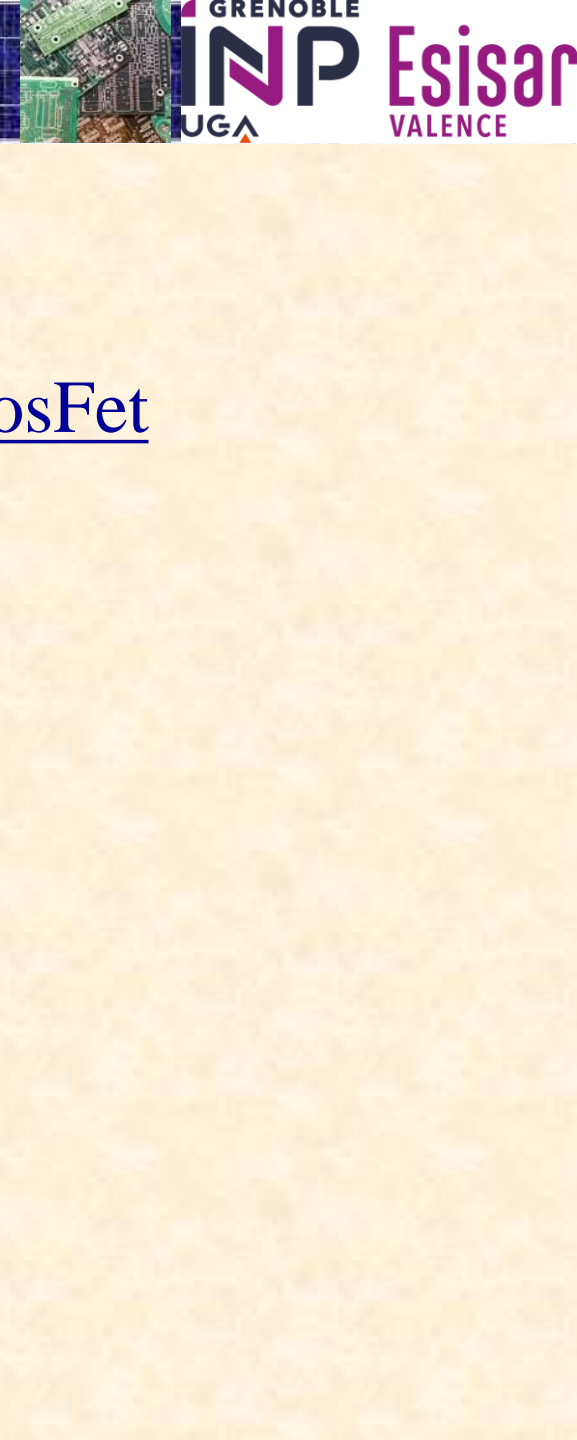
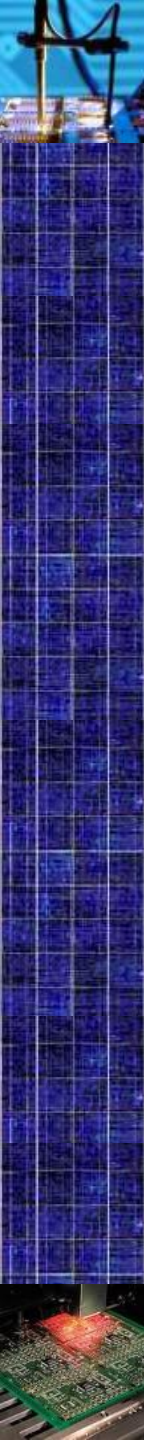
- Gain en charge

$$A_{vc} = \left. \frac{v_s}{v_e} \right|_{Z_u \neq \infty} = \frac{Z_u}{Z_u + Z_s} A_v$$

- Gain composite

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





## Transistors ...

Bipolaire - Effet de champ - MosFet

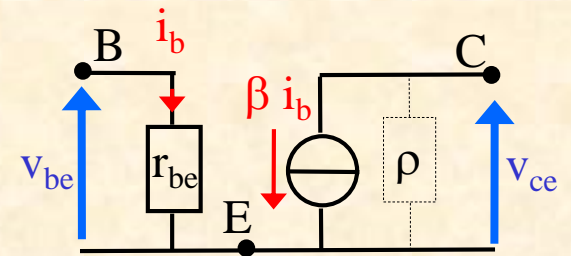
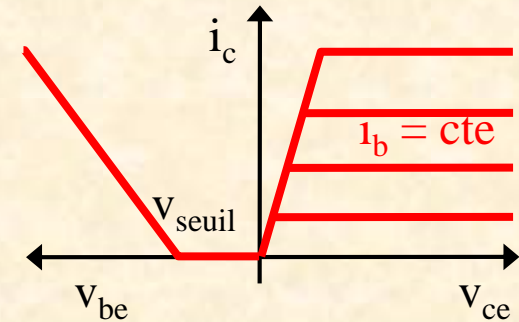
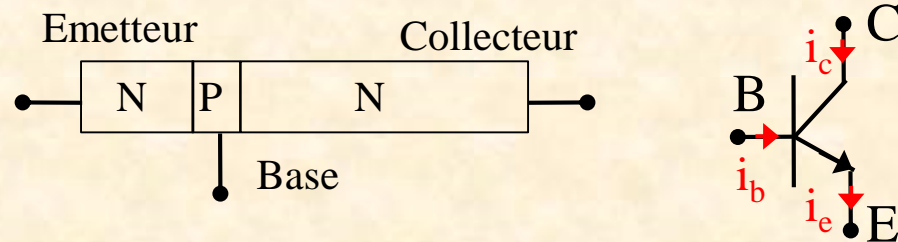
AOP réel

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

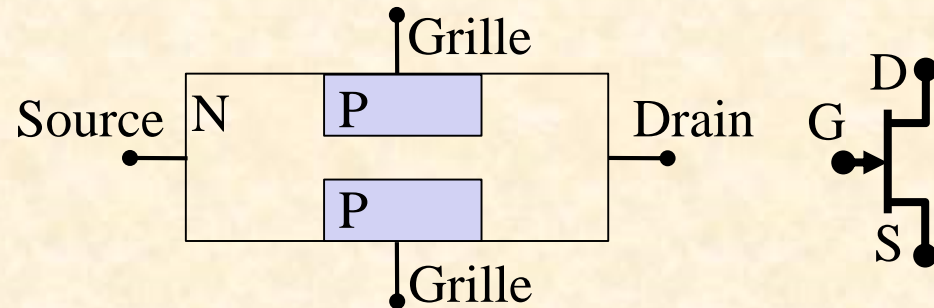






## Transistor à effet de champ canal N

- **Structure / Symbole**

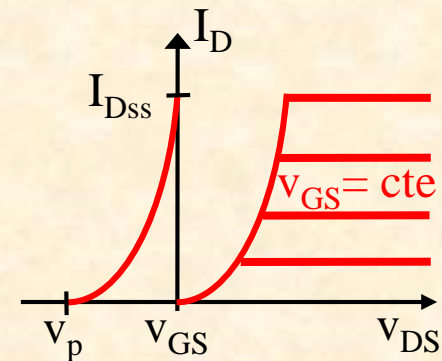


- **Fonctionnement linéaire**

- Jonction GS en inverse
- $I_D = I_{DSS}(V_p + V_{GS})^2$

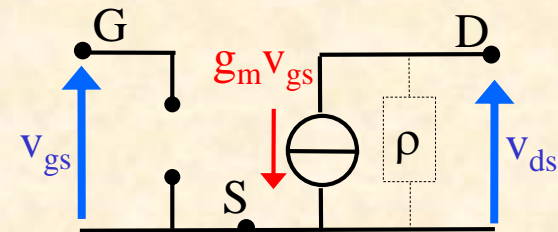
- **Schéma petits signaux**

- Transconductance :  $g_m$
- Tension de pincement :  $V_p$



- **Valeurs typiques**

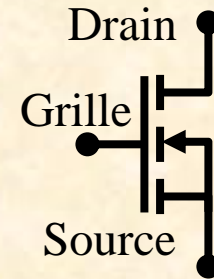
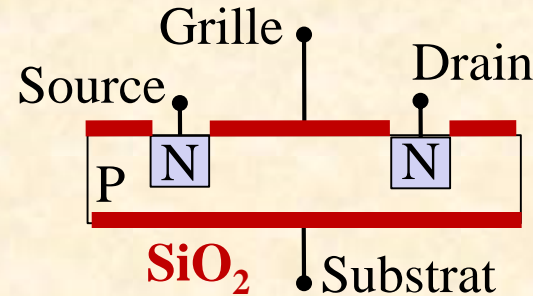
- $V_p = \text{qq V}$
- $I_{dss} = \text{qq } 10 \text{ mA}$
- $g_m = \text{qq } 10 \text{ mA/V}$





## Transistor Mosfet

### • Structure / Symbole

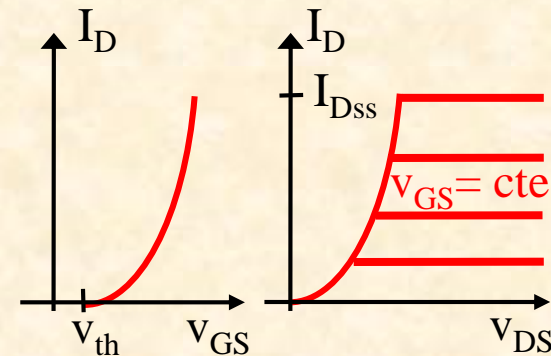


### • Fonctionnement linéaire

- Appauvrissement
  - Conducteur pour  $v_{GS}=0$
- Enrichissement
  - Bloqué pour  $v_{GS}=0$

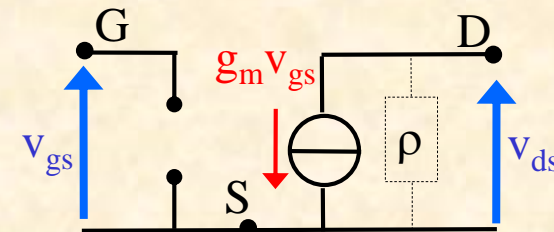
### • Schéma petits signaux

- $V_{th}$  = Tension de seuil



### • Valeurs typiques

- $-qqv < V_{th} < +qqV$
- $I_{dss} = qq \text{ } 10 \text{ mA}$
- $g_m = qq10 \text{ mA/V}$

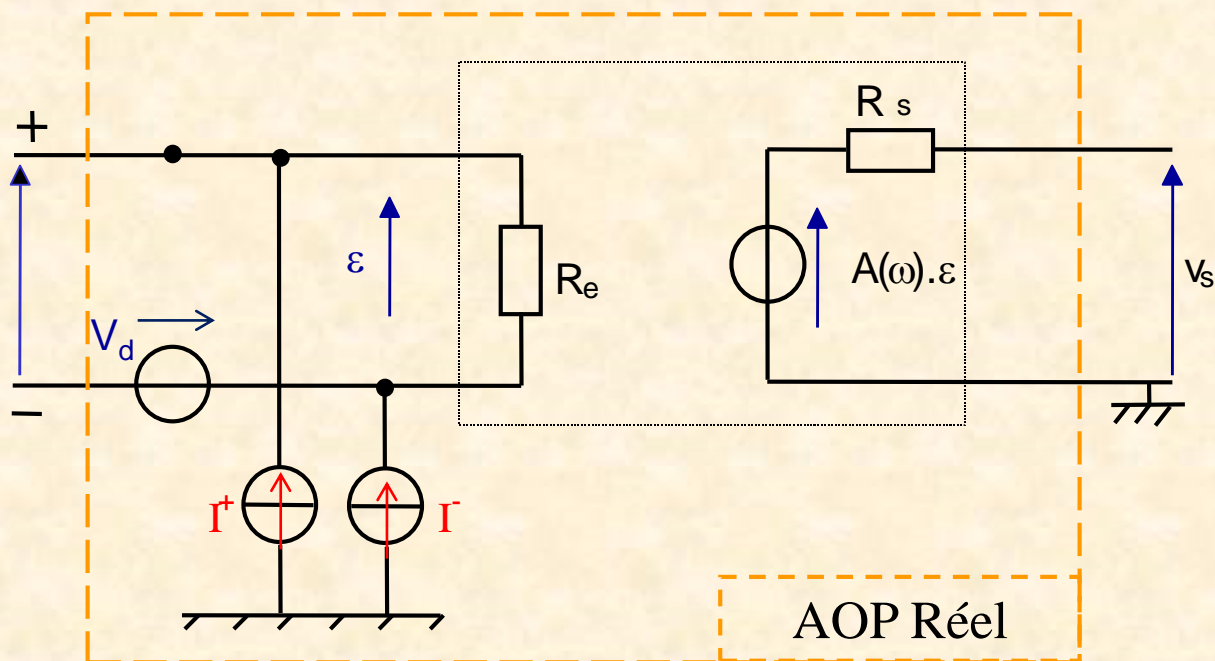


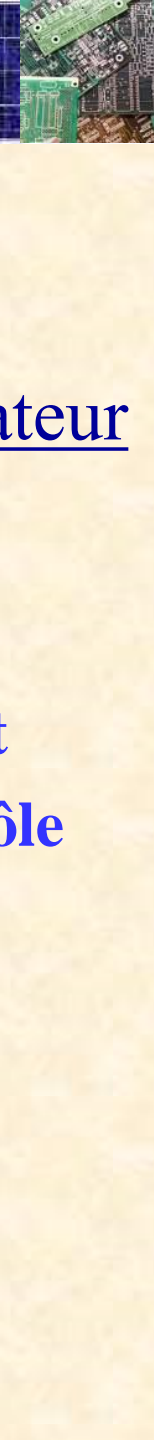
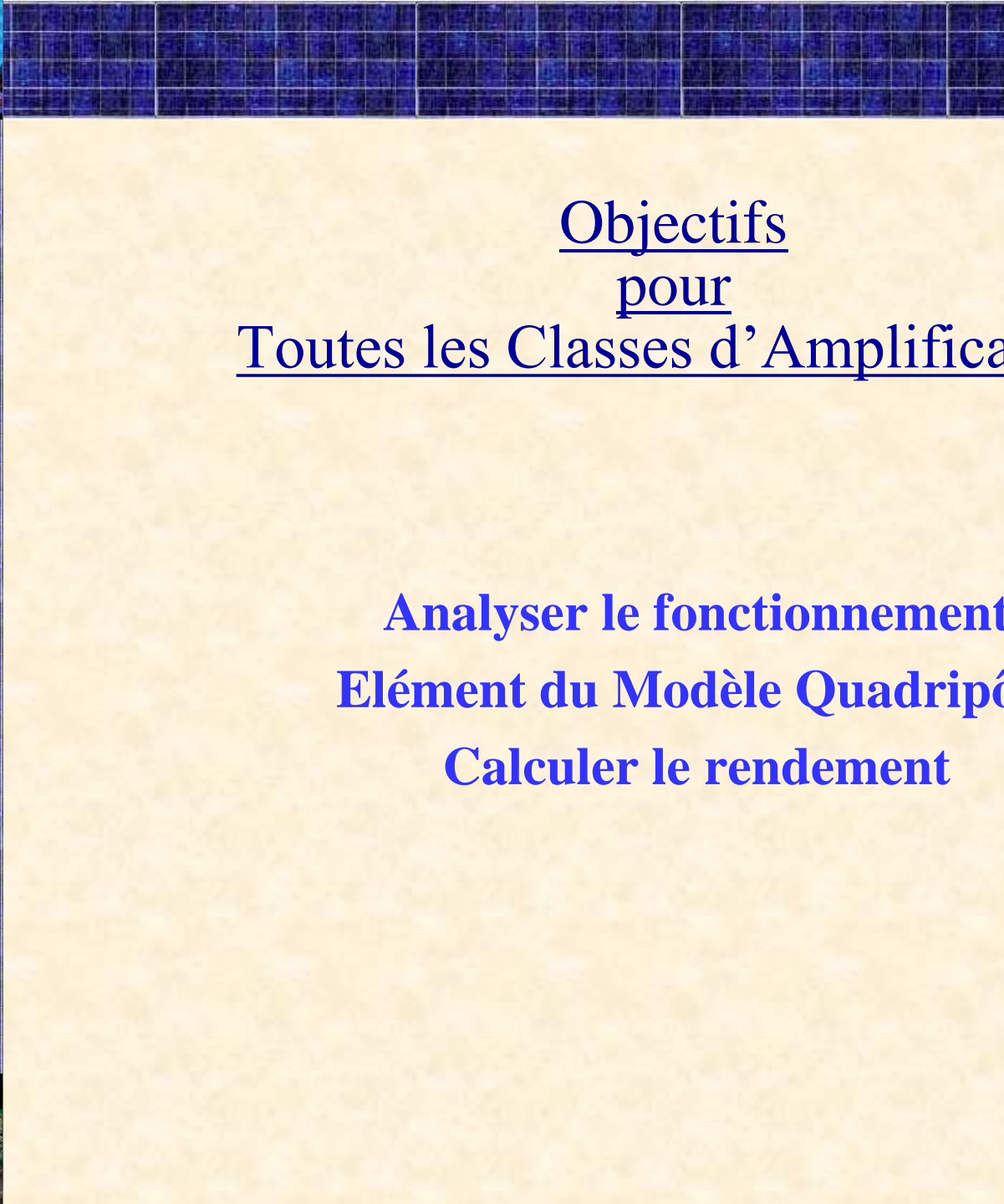
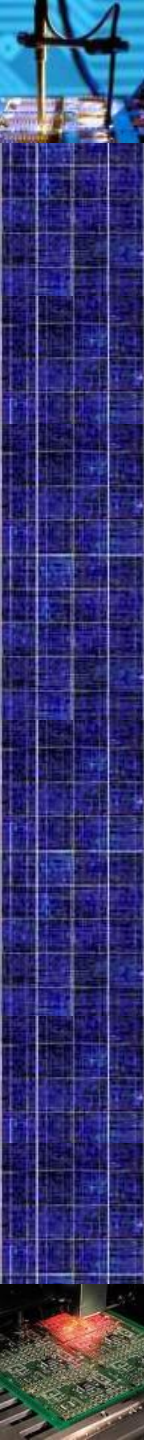


## AOP réel : Schéma équivalent

- 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**





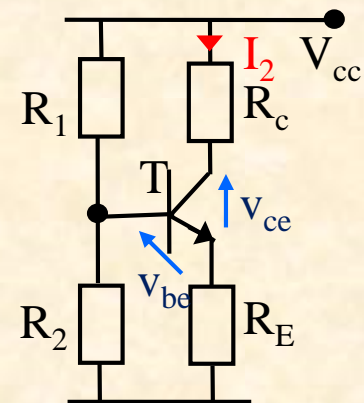
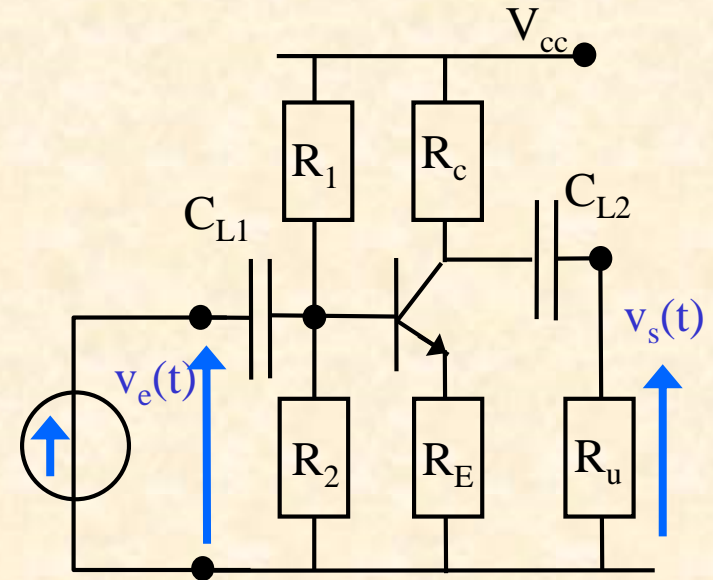
## Classe A : Montage

### • 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
  - ➔  $v_e(t)$  éteinte
- Capacités chargées à des tensions constantes
  - ➔ Circuits ouverts





## Classe A : Etude statique

### • Point de repos ( $I_{C0}$ - $V_{CE0}$ )

- Maille d'entrée (gauche)

$$I_{C0} = \frac{E_{th} - V_{be}}{R_E + \frac{R_{th}}{\beta}}$$

- Maille de sortie (droite)

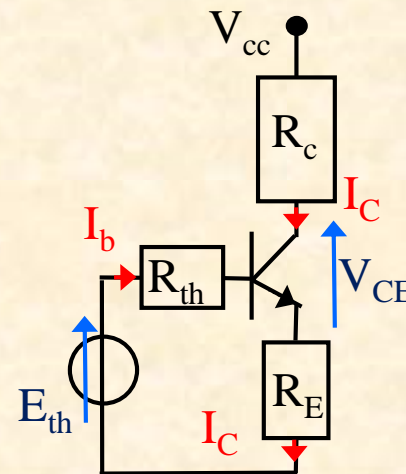
$$V_{ce} = V_{cc} - (R_C + R_E) I_C$$

### • Données

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

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

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



### • Thévenin

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

### • Point de repos

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

### • Potentiels particuliers

- $V_{BM0} = 1,7$  [V]
- $V_{EM0} = 1,0$  [V]
- $V_{CM0} = 11,7$  [V]



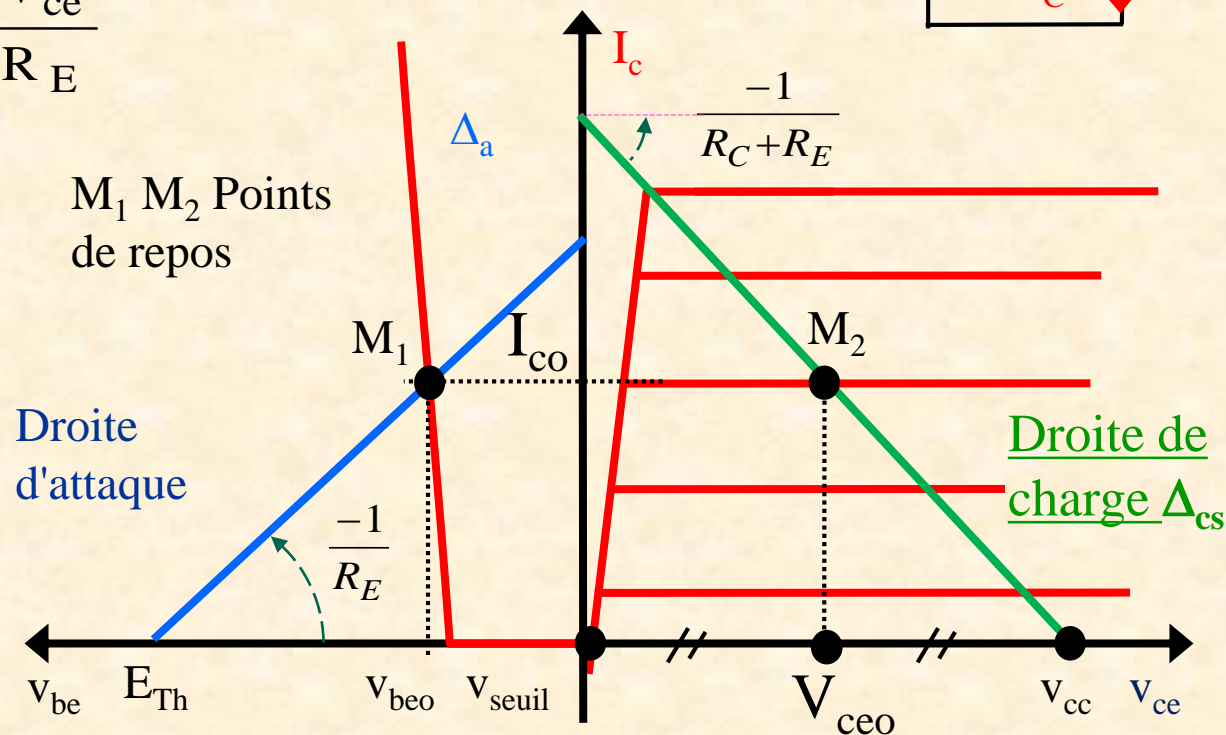
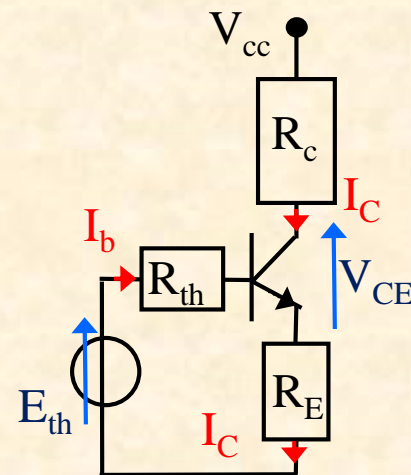
## Classe A : Point de Repos

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

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

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

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





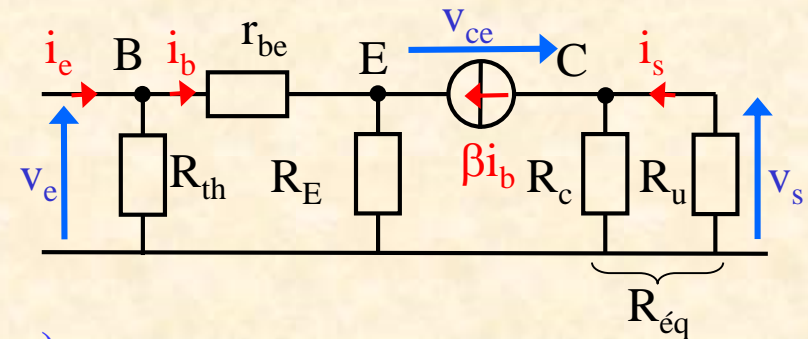
## Classe A : Etude dynamique

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

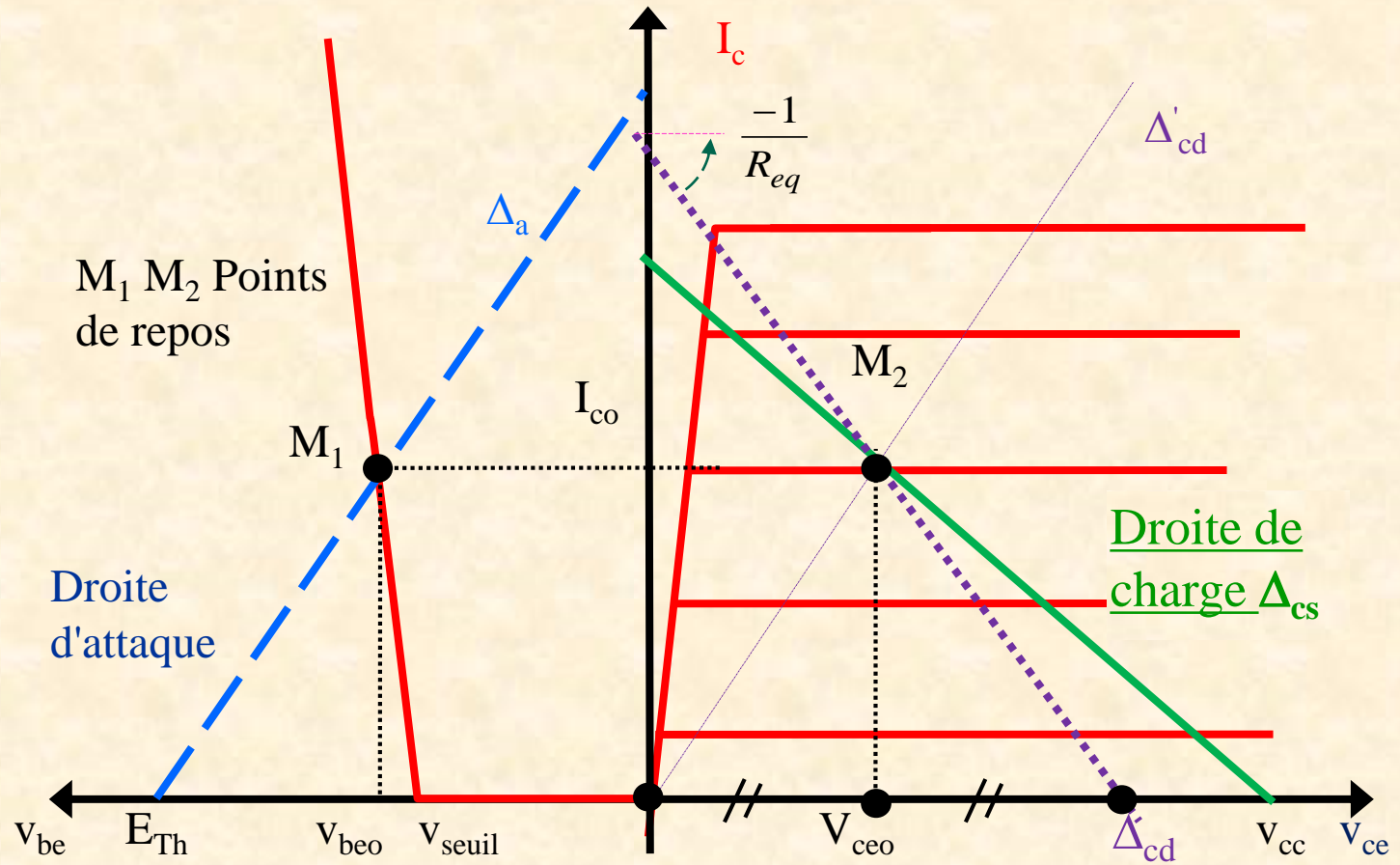
- Modèle petits signaux  $\equiv$  variations
  - → Pente de  $\Delta_{cd}$
  - $R_{eq} > R_C \rightarrow$  pente dynamique  $>$  pente statique
- Equation complète
  - → Passage par le point de repos statique  $M_2(V_{ce0}, I_{co})$

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

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



## Classe A : Analyse dynamique

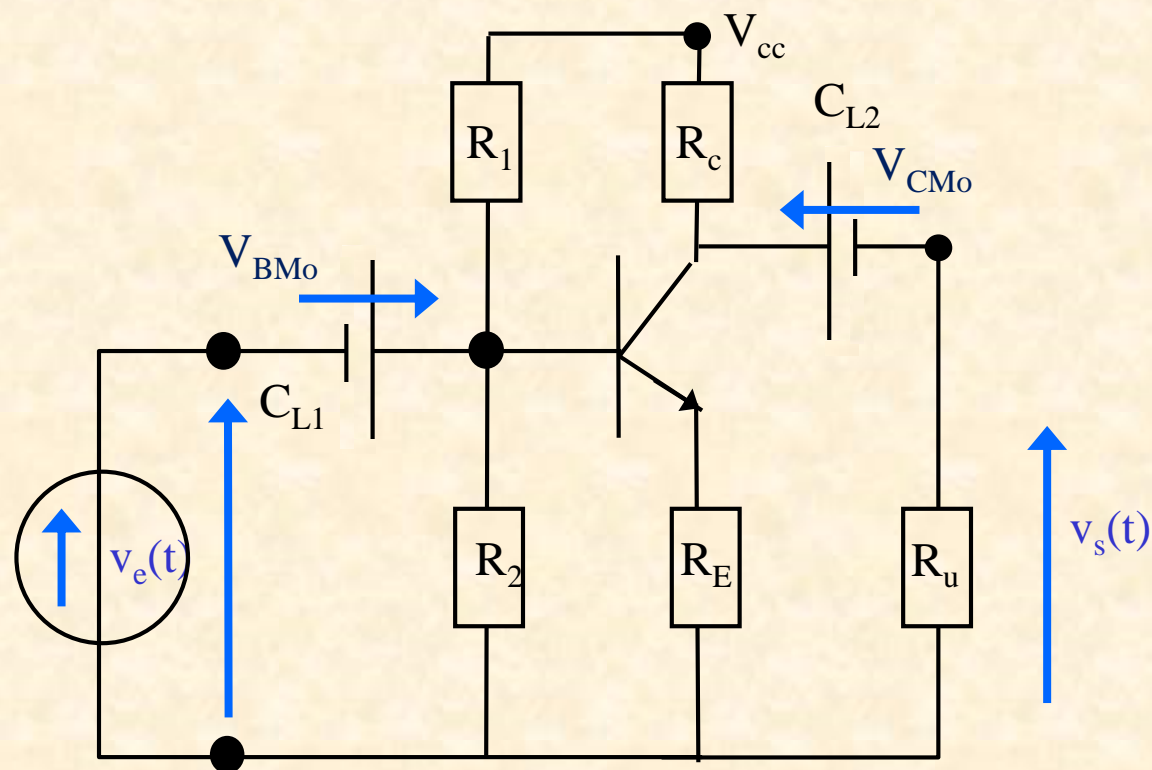






## Classe A : Analyse Complète

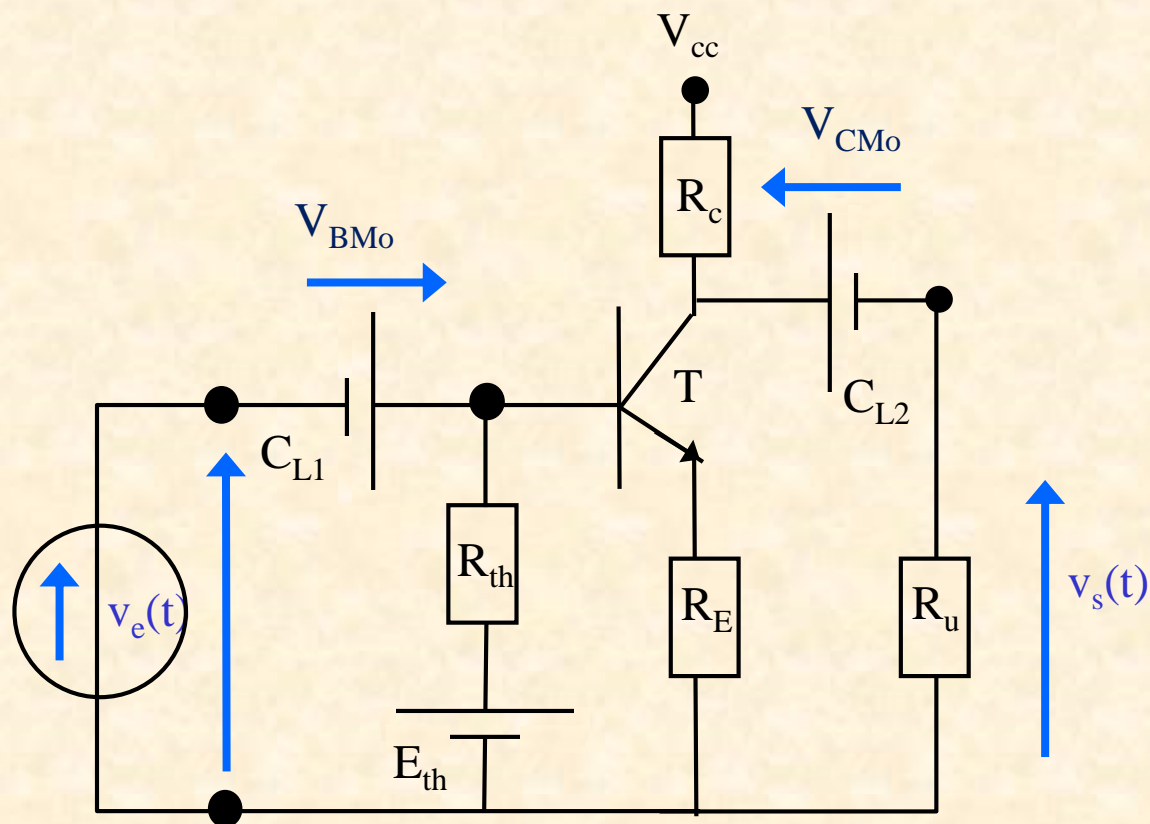
- $U_{\text{capacité de Liaison}} \approx \text{constante}$ 
  - ➔ Sources de tension





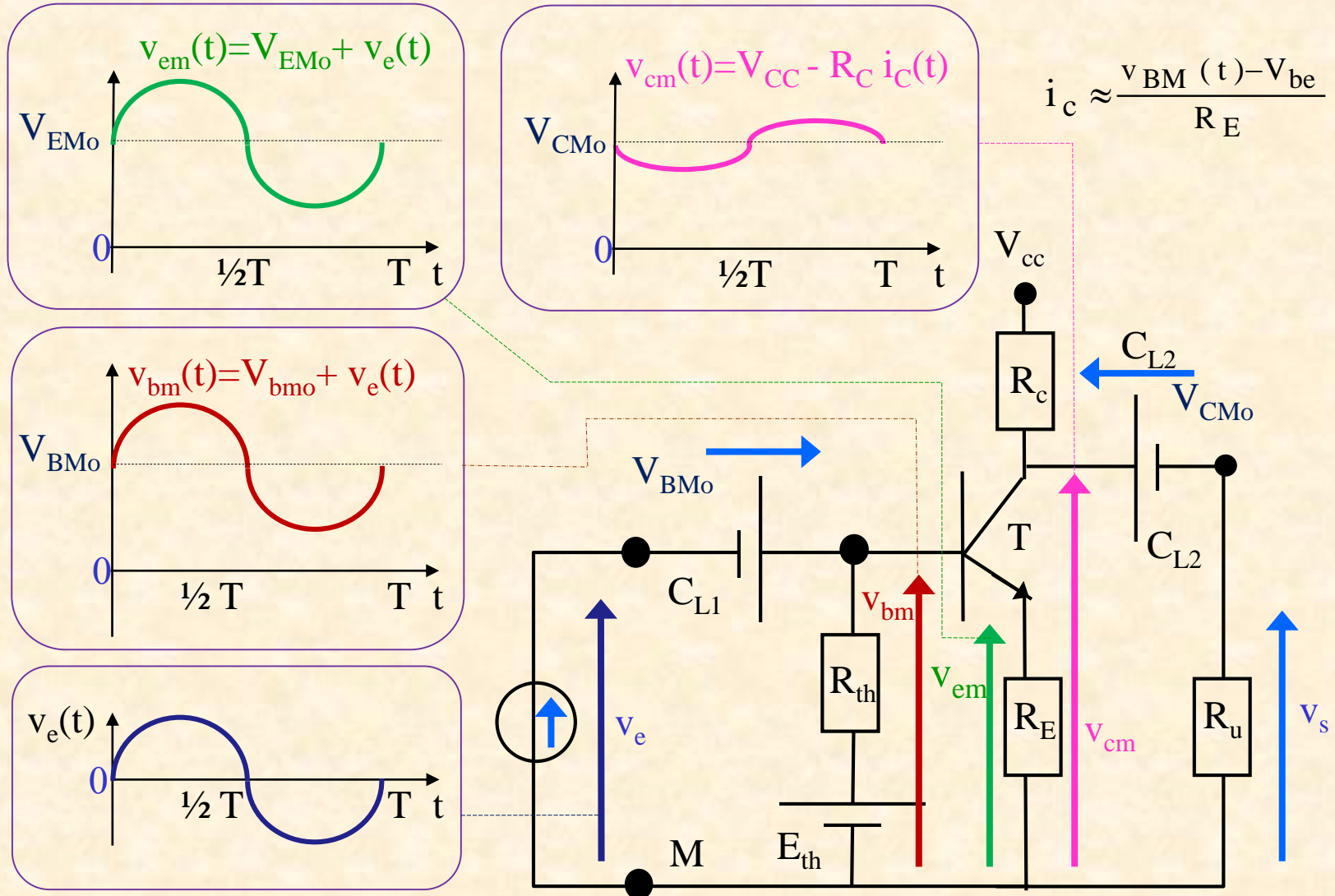
## Classe A : Analyse Complète

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



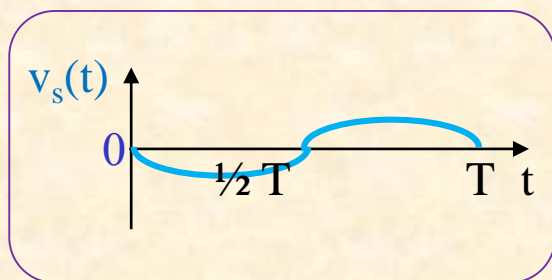


## Classe A : Signaux I

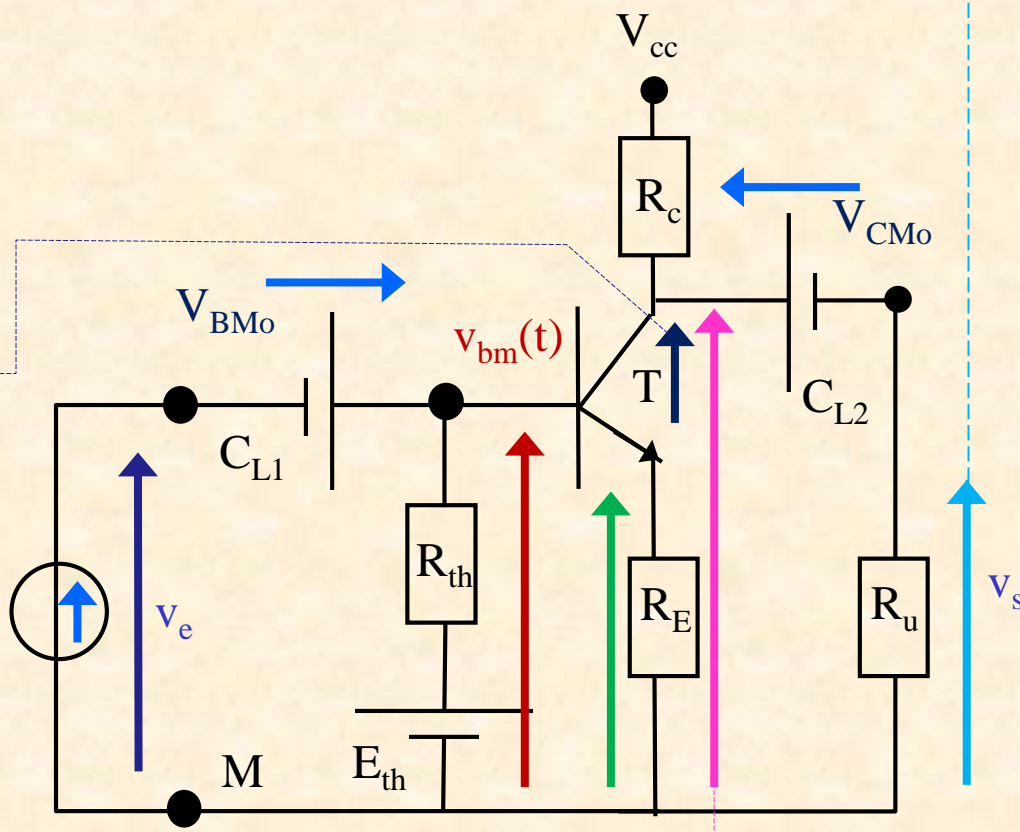
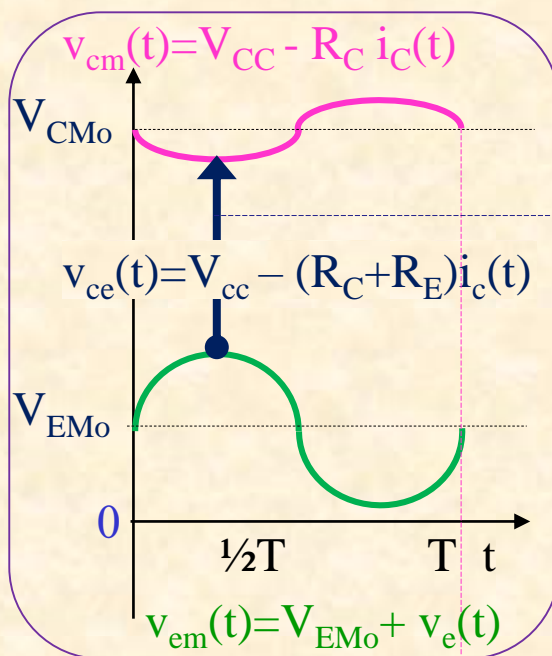




## Classe A : Signaux II

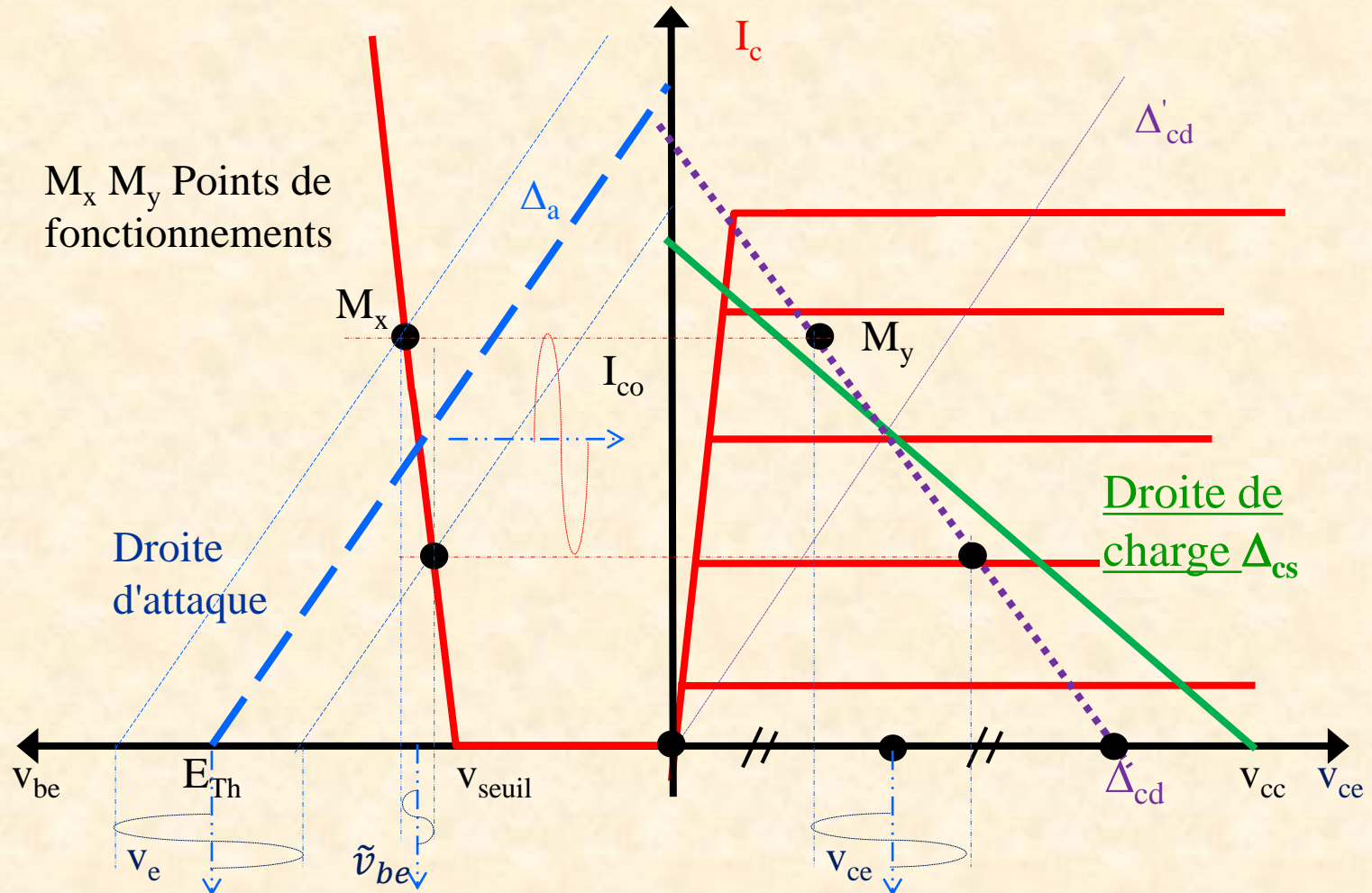


$$i_c \approx \frac{v_{BM}(t) - V_{be}}{R_E}$$





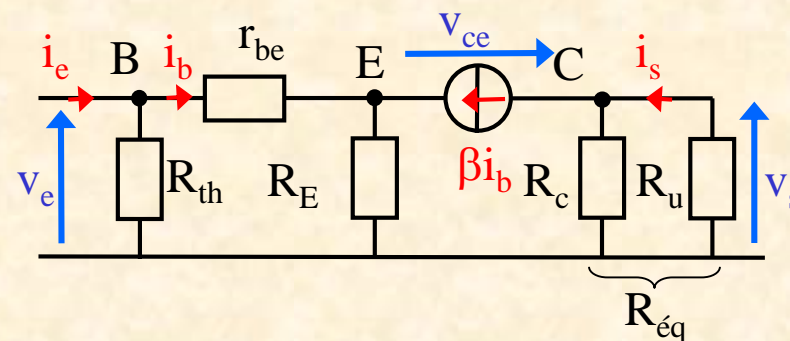
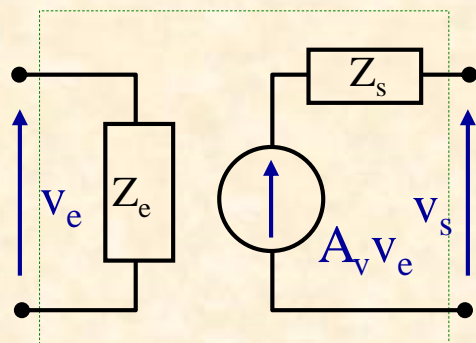
## Classe A : Points de fonctionnements dynamiques







## Classe A : Etude dynamique & Quadripôle



### • Amplification en tension ( $R_u$ présente)

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

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

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

$$Y_{in} = Y_{th} + Y'_{in}$$

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

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

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

$$Z_s = R_{eq}$$

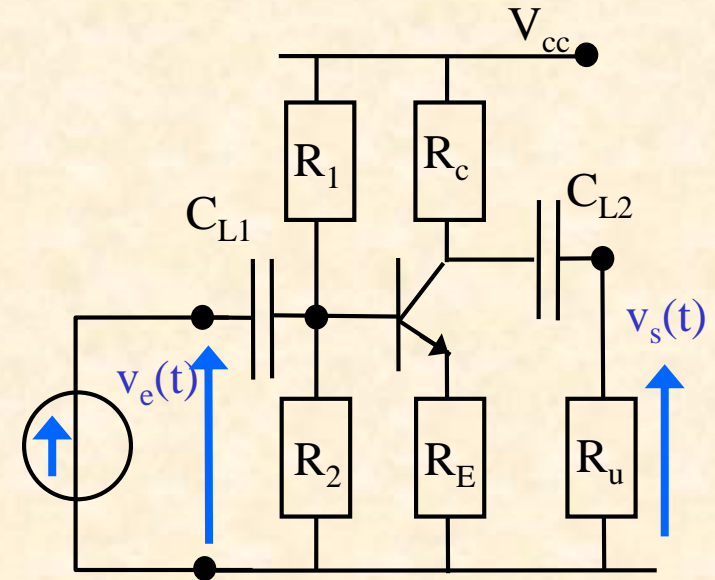
$$Z_s = 4,4 \text{ k}\Omega$$



## 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



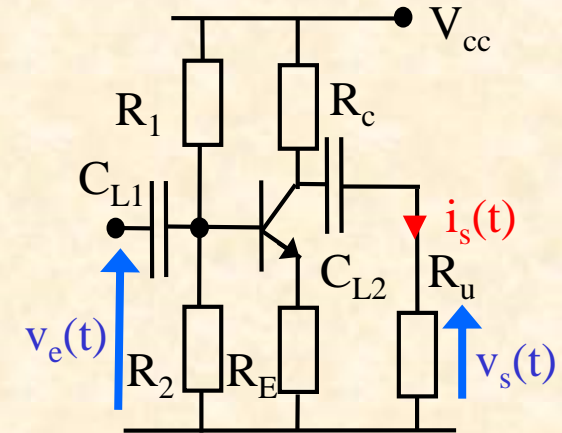
## Classe A : $\eta$

### • Puissance utile maximum

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

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

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



### • 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

- $V_{s\_max} = \frac{1}{2}V_{cc}$        $I_{max} = I_{co}$

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

### • 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

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

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

- Rendement

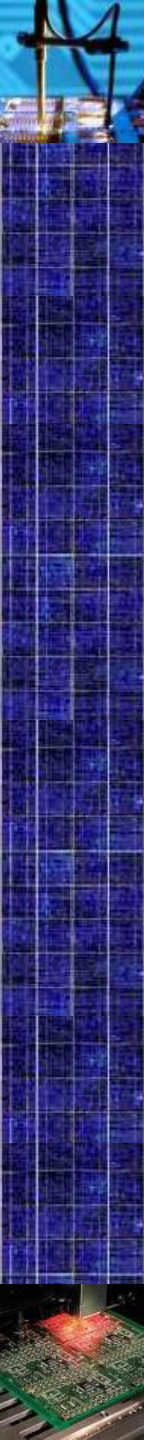
$$\eta = \frac{P_u}{P_{abs}} \leq \frac{1}{4}$$

- 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

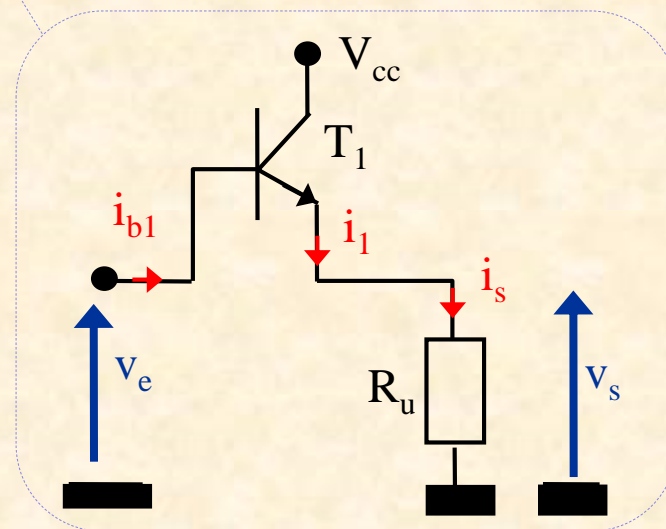
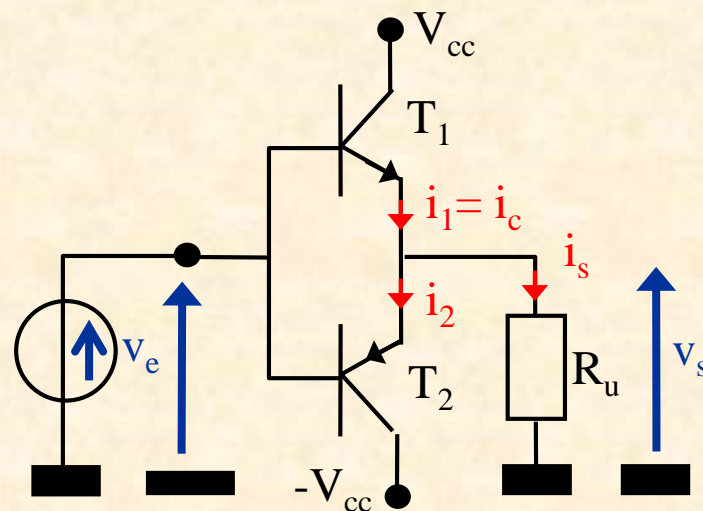
- Droite d'attaque  $\Delta_{as}$  :  $I_c = f(V_{BE})$

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

- 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

$$\begin{cases} V_{ceo} = V_{cc} \\ I_c = 0 \end{cases}$$





## Classe B : Etude dynamique

### • Schéma dynamique

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

### • Amplification ...

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

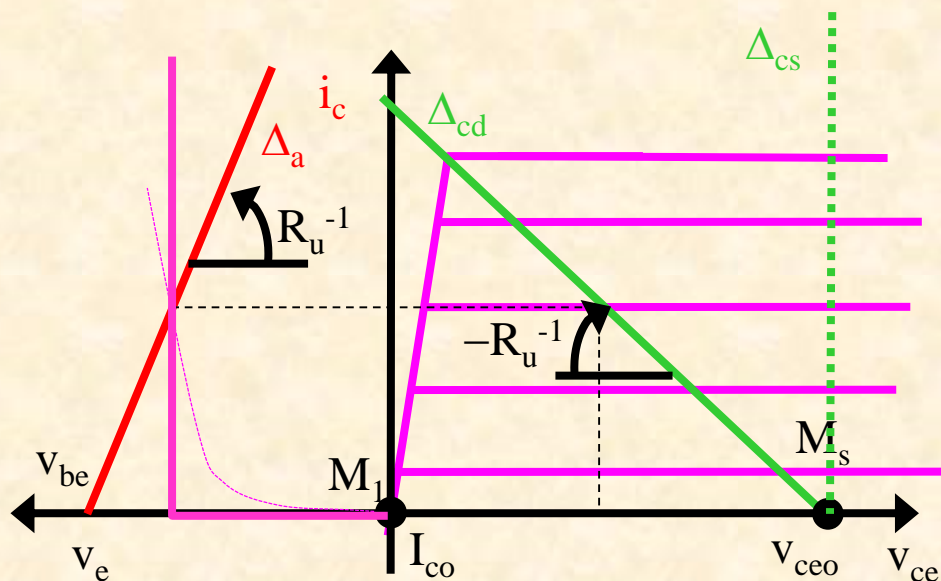
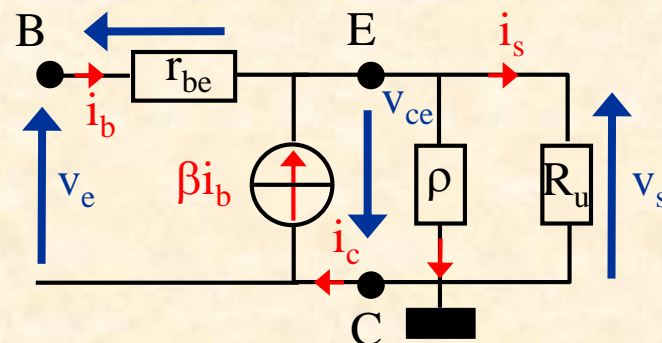
- en tension

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

$$= \frac{R_u \beta}{r_{be} + (\beta + 1)R_u} \approx 1^-$$

### • NB

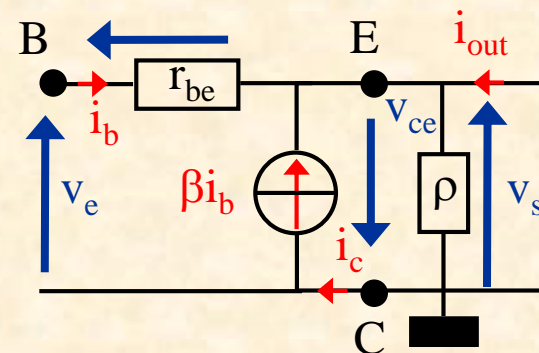
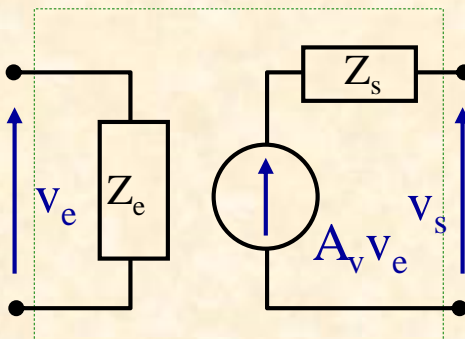
- La charge  $R_u$  est branchée





## Classe B : Etude dynamique & Quadripôle

- $R_u$  débranchée



- Amplification en tension  $R_u \rightarrow \rho$

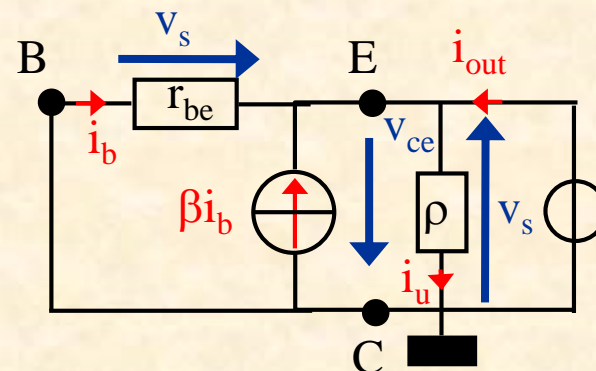
- $A_v = 1$

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

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

- Impédance de sortie :  $Z_s \triangleq \frac{v_s}{i_{out}} \Big|_{v_e=0}$

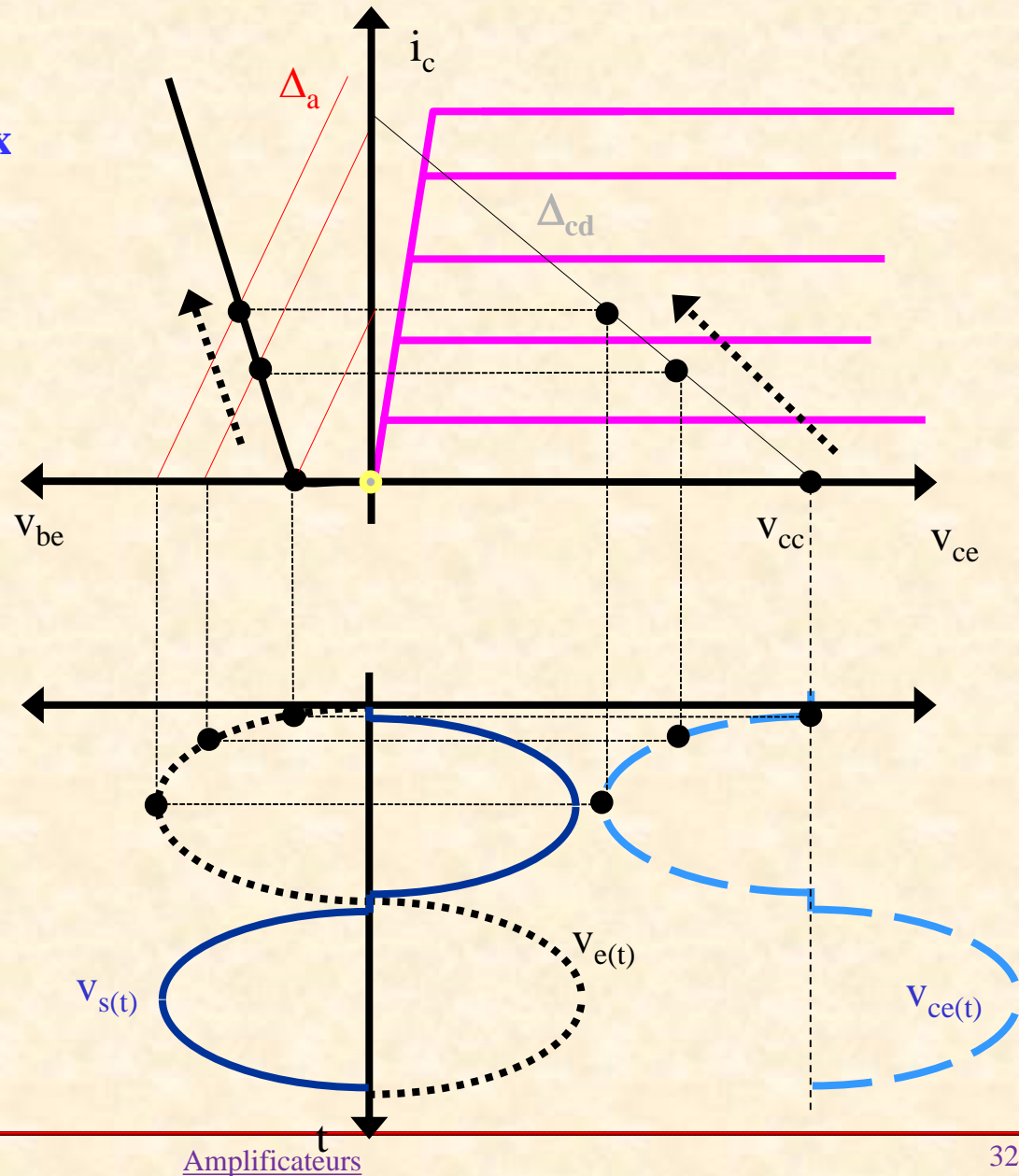
- $Z_s = \frac{\rho r_{be}}{r_{be} + \rho(\beta + 1)}$





## Classe B

- Évolution des signaux

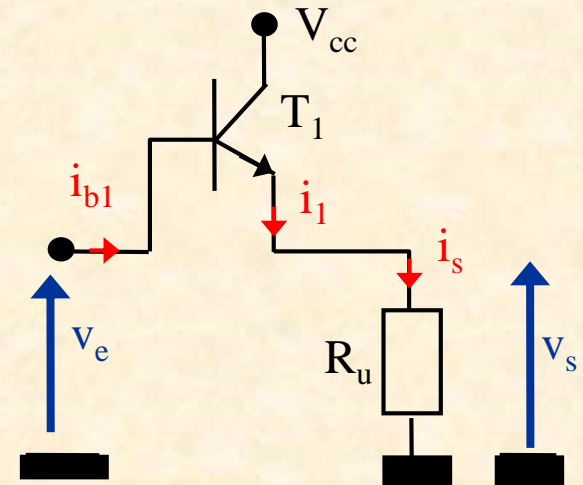




## Classe B : étude du rendement

- **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**

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

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



## 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**

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

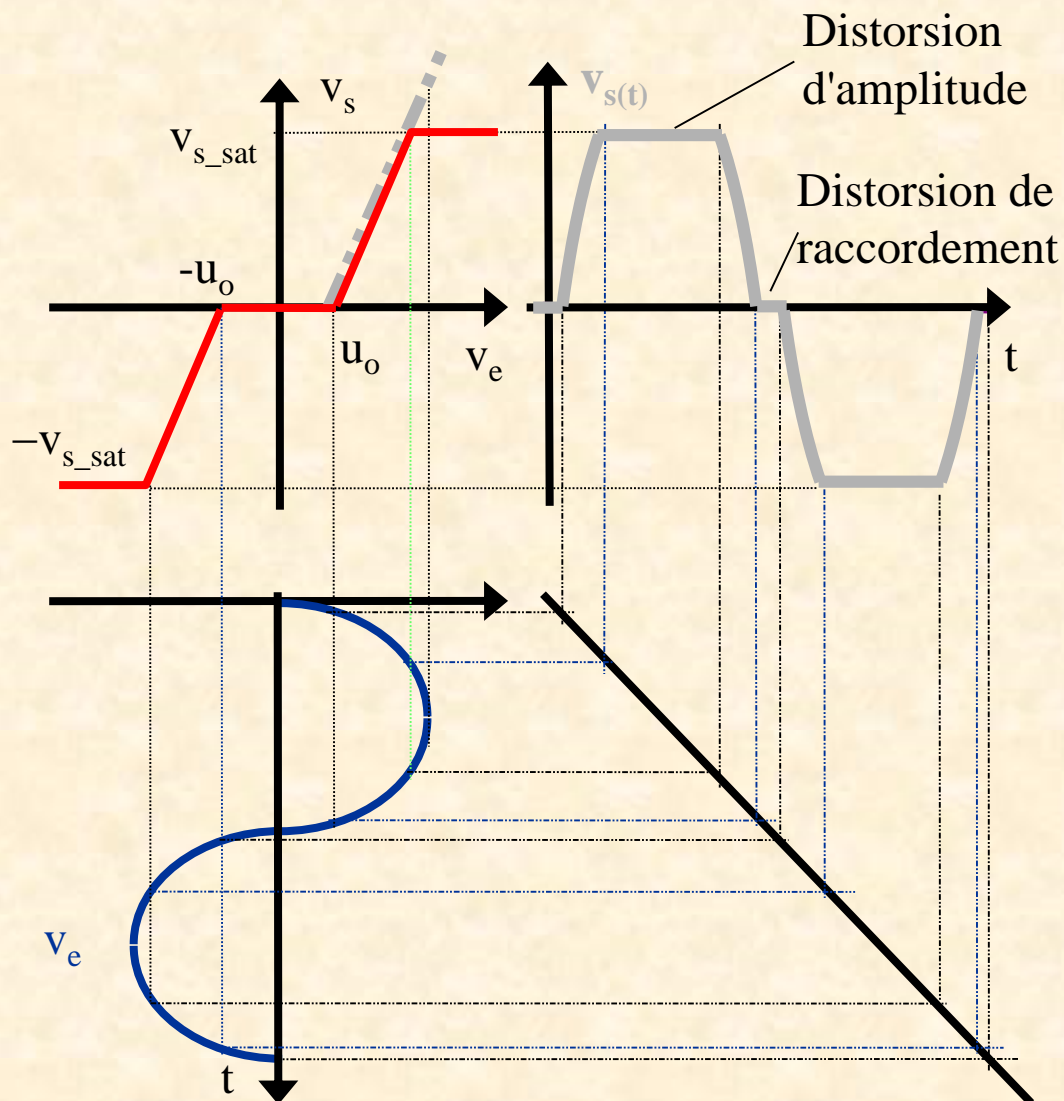




## Classe B

### • Distorsions

- d'amplitude
- de croisement





## Classe B : Compensation distorsion de croisement

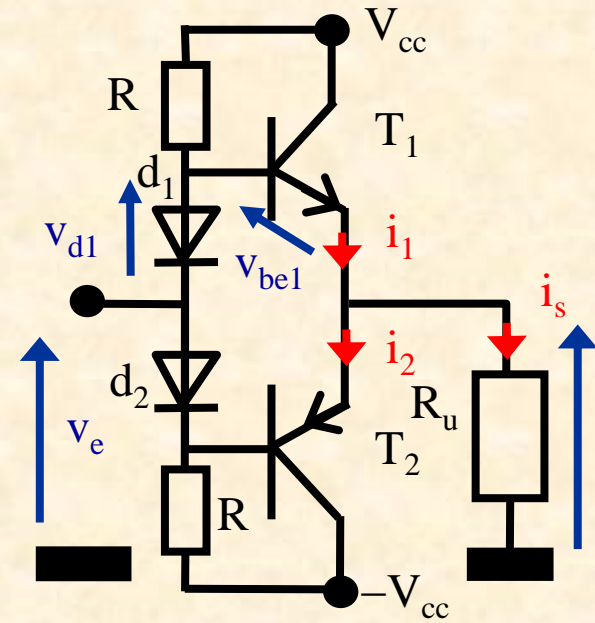
- **Compensation à diodes**

- $v_e > 0$

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

- **NB**

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





## Classe B : Compensation distorsion de croisement

### • Compensation à diodes

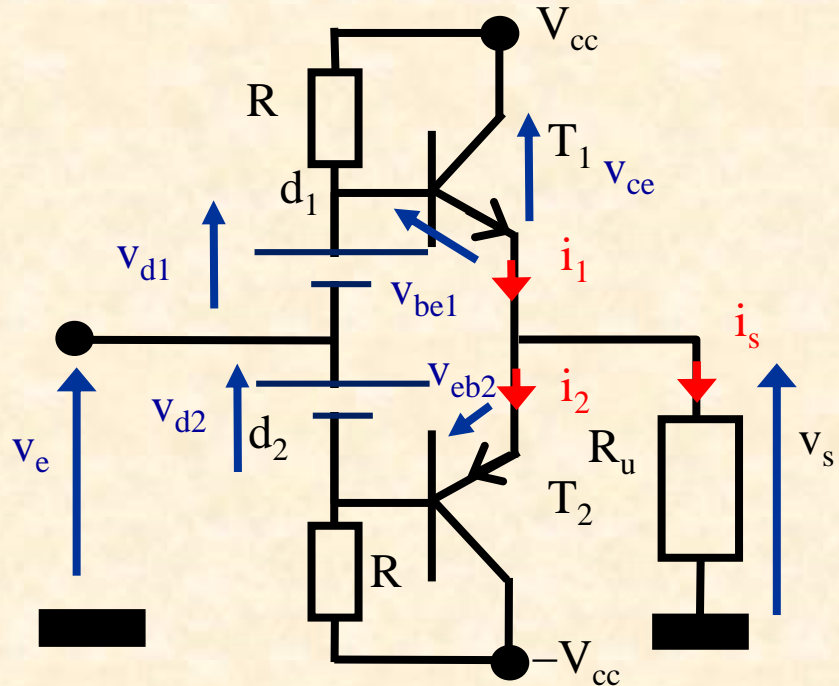
- $v_e > 0$
- $v_e + \underbrace{v_{d1} - v_{be1}} = v_s$
- $\approx 0$

### • 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
- $V_e > 0 \rightarrow T2 \text{ off}$

$$V_{cc} - V_{be1} - (R_p / \beta + R_u) I_c = 0$$

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

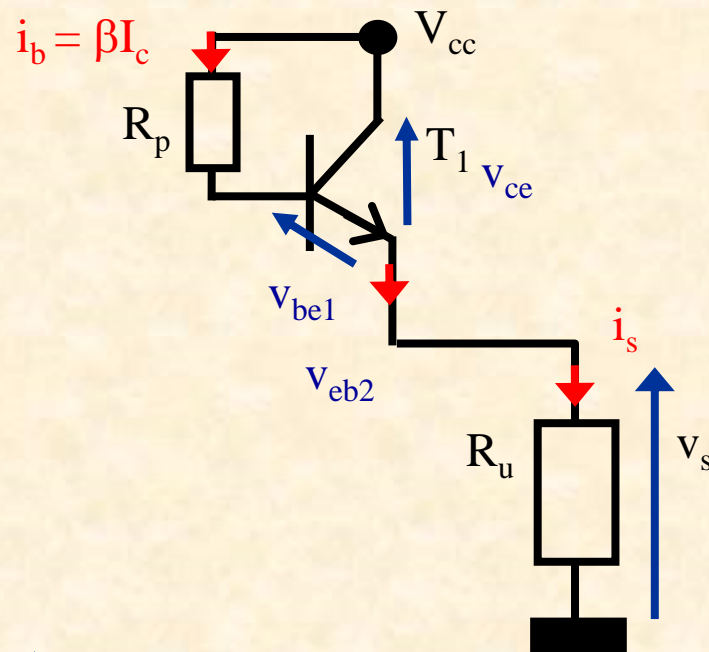
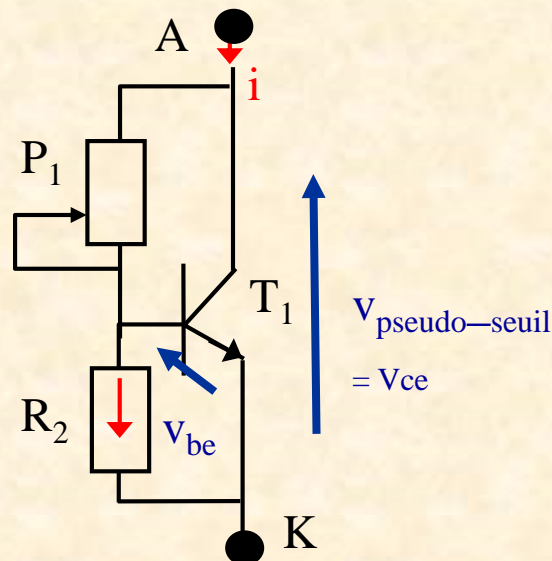
$$V_s = R_u I_c = 22 * 0,3 = 6,6 \text{ V}$$

### • Pseudo diode

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

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

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





## Classe B : Compensation à AOP

### • Montage Suiveur

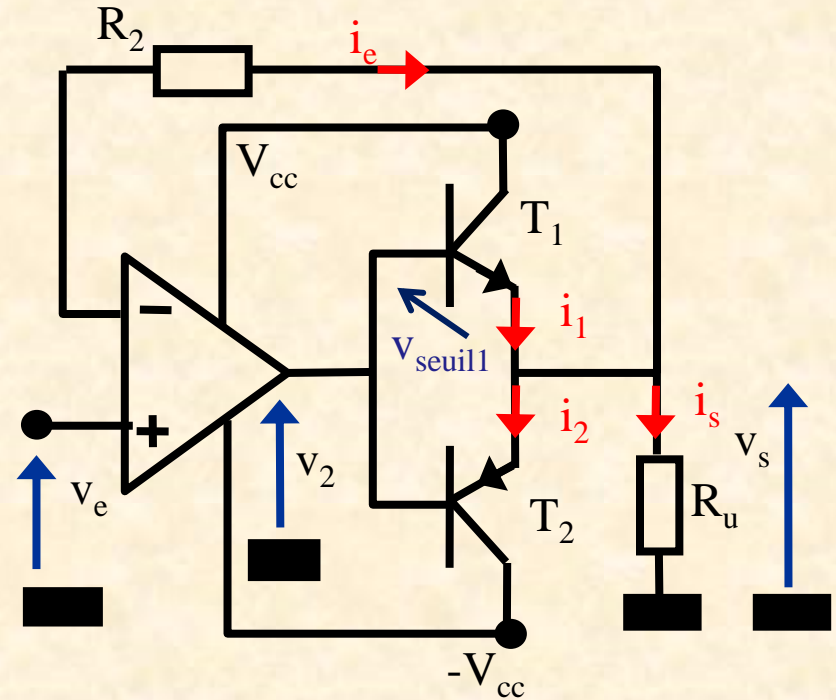
- AOP parfait
- Bras de pont dans la chaîne direct
- Gain en tension :
  - $A_v = 1$

### • Asservissement parfait

- $v_e = 0^+ \rightarrow v_s = 0^+$ 
  - $\rightarrow V_2 = V_{\text{seuil}_1} + 0^+$
- $0^+ \rightarrow 0^-$ 
  - $V_2 + 0^+ \rightarrow -0^+$  Il y a basculement pour rendre conducteur le T2

### • Commentaire

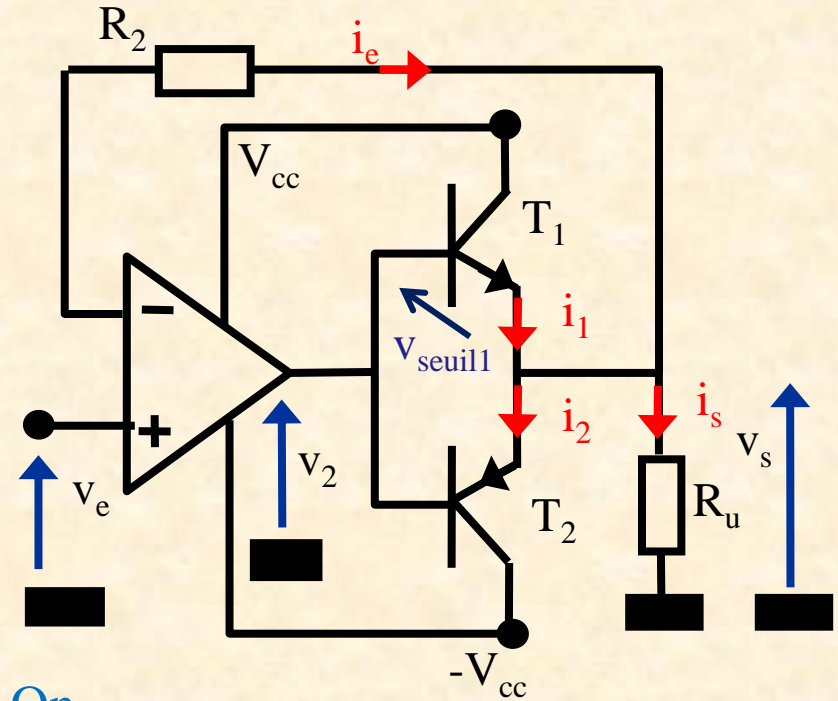
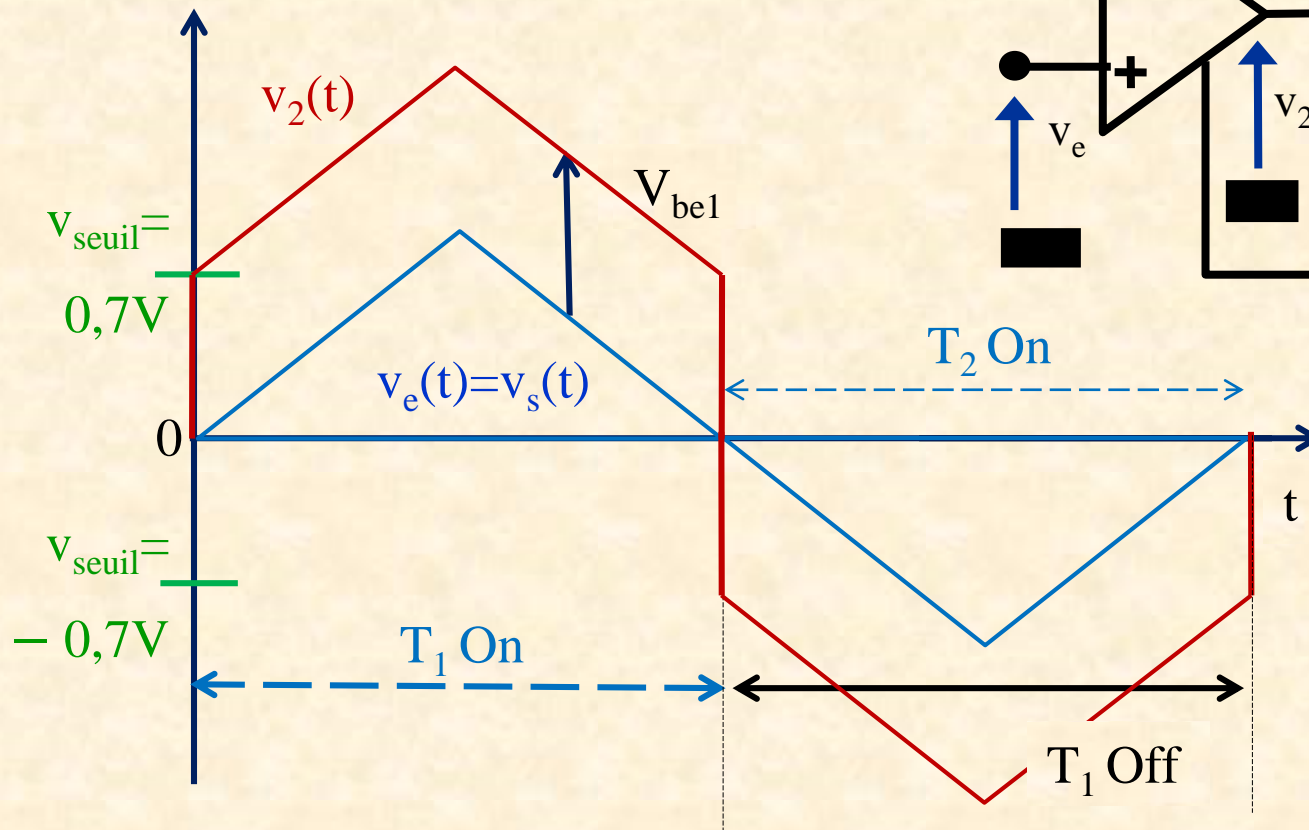
- L'AOP crée une tension de compensation  $\pm V_{be}$  qui polarise les T, grâce à l'asservissement qui maintient  $\varepsilon$  à 0V.





## Distorsion de croisement

- AOP parfait

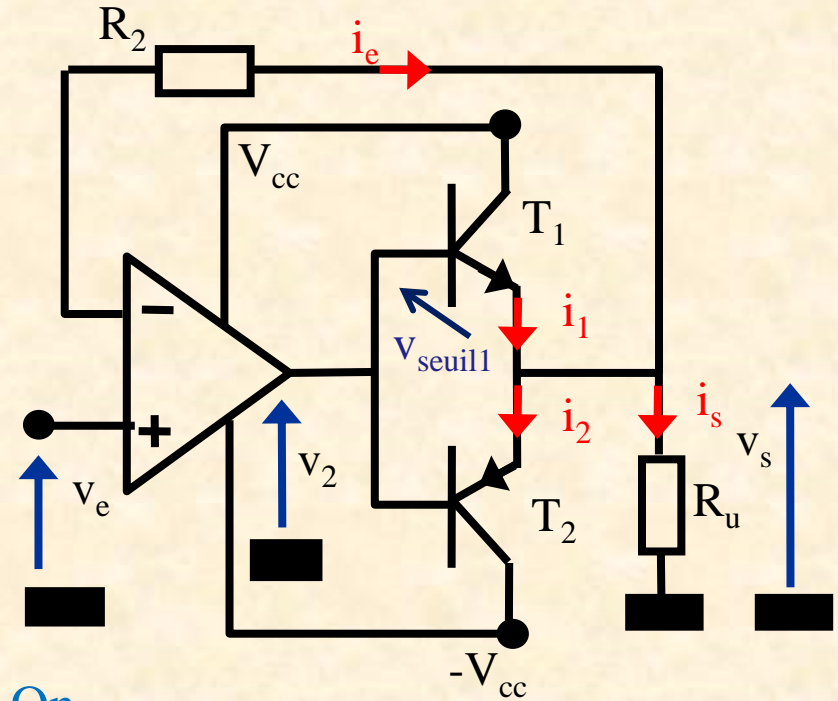
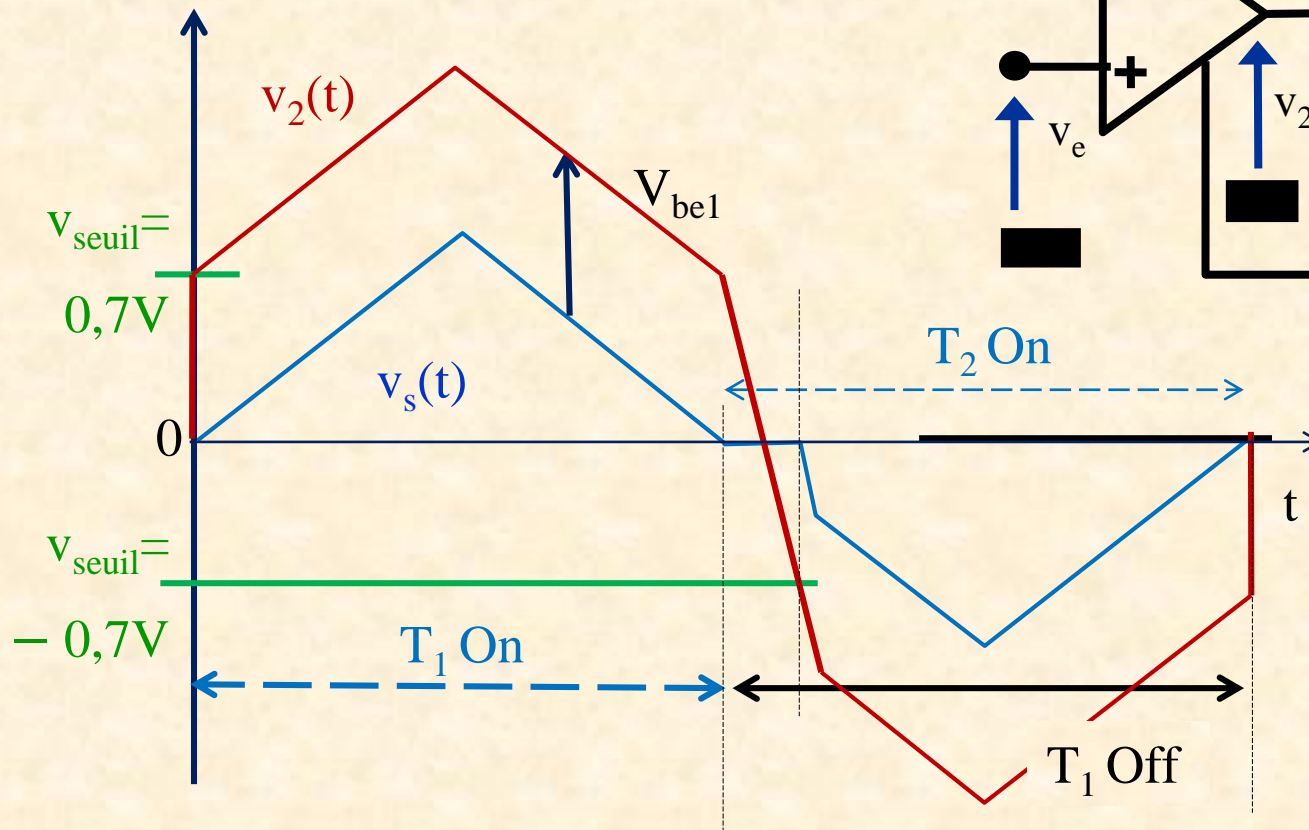






## Distorsion de croisement

- AOP avec slew rate





## Classe B : Compensation à AOP

### • Montage inverseur

- AOP parfait
- Bras de pont dans la chaîne direct
- Gain en tension :

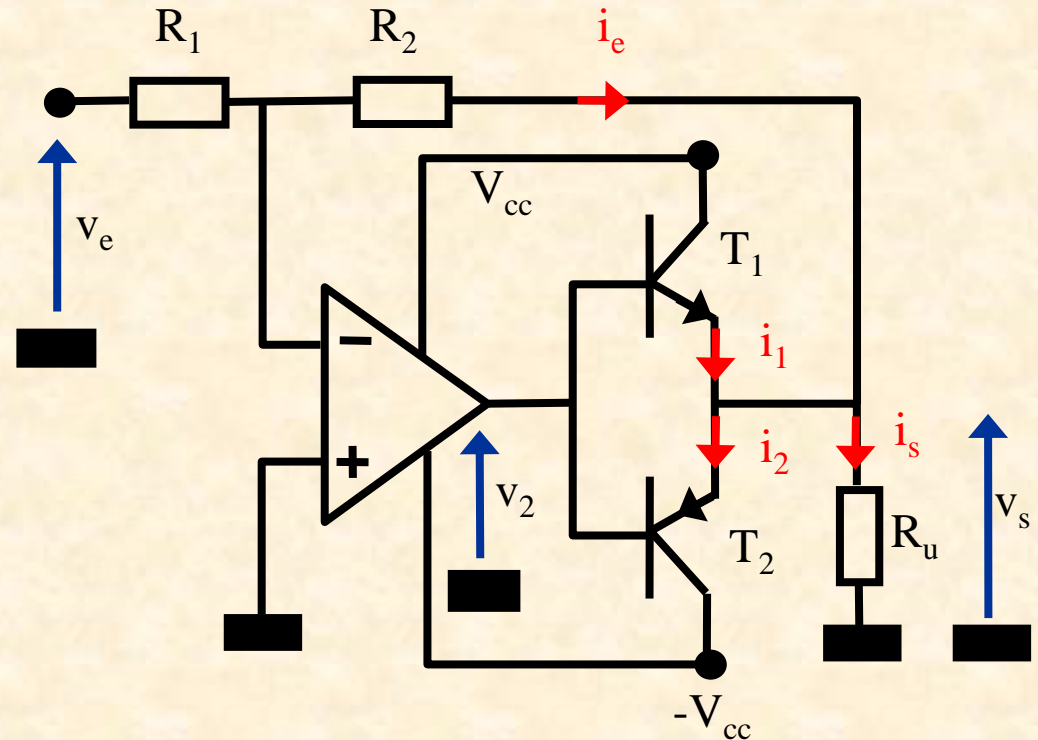
$$A_v = -\frac{R_2}{R_1}$$

### • 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.





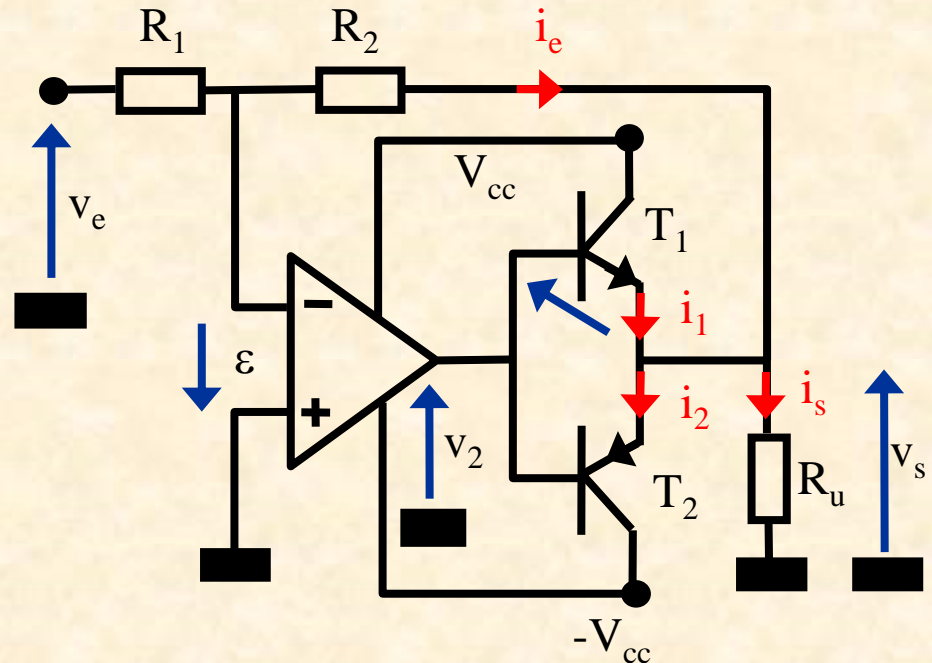
## Classe B : Compensation à AOP

- **Quantification amélioration**

- Recherche du seuil équivalent

- **AOP réel**

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





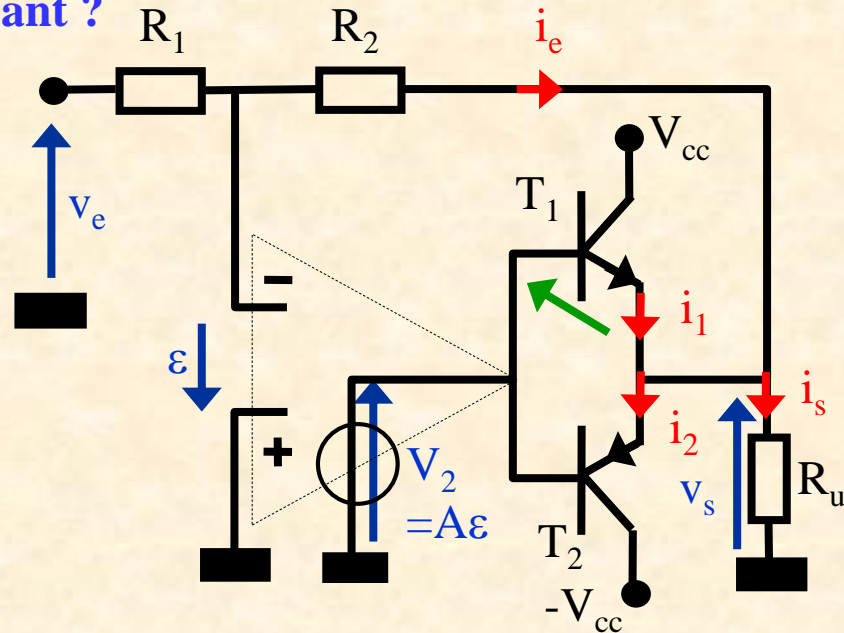
## Classe B : Compensation à AOP

### • 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 $v_e = f(v_s)$

$$v_e = -\left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \frac{v_{be}}{A} - \frac{(A+1)R_1 + R_2}{AR_2} v_s$$

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



## 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 montée de la tension de sortie de l'AOP fini

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

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

### • Conclusion

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