

# Cours d'électronique spécialisée : Étages d'entrée à amplificateur différentiel et miroirs de courant

A. Arciniegas  
V. Gauthier

IUT Cergy-Pontoise, Dep GEII, site de Neuville



1 Amplificateur différentiel

2 Amélioration du CMRR : Polarisation par miroir de courant

# Amplificateur différentiel

- Les transistors, les diodes et les résistances sont les seuls composants inclus dans les circuits intégrés (CI) classiques.

# Avant propos

- Les transistors, les diodes et les résistances sont les seuls composants inclus dans les circuits intégrés (CI) classiques.
- On réalise aussi des condensateurs, mais ils ont de petites capacités généralement inférieures à 50 pF.

- Les transistors, les diodes et les résistances sont les seuls composants inclus dans les circuits intégrés (CI) classiques.
- On réalise aussi des condensateurs, mais ils ont de petites capacités généralement inférieures à 50 pF.
- Par conséquent, les concepteurs de CI ne peuvent utiliser les condensateurs de liaison et de découplage comme le font les concepteurs de circuits discrets.

- Les transistors, les diodes et les résistances sont les seuls composants inclus dans les circuits intégrés (CI) classiques.
- On réalise aussi des condensateurs, mais ils ont de petites capacités généralement inférieures à 50 pF.
- Par conséquent, les concepteurs de CI ne peuvent utiliser les condensateurs de liaison et de découplage comme le font les concepteurs de circuits discrets.
- Ils doivent employer le couplage direct entre les étages et aussi supprimer les condensateurs de découplage d'émetteur sans perdre trop de gain.

- Les transistors, les diodes et les résistances sont les seuls composants inclus dans les circuits intégrés (CI) classiques.
- On réalise aussi des condensateurs, mais ils ont de petites capacités généralement inférieures à 50 pF.
- Par conséquent, les concepteurs de CI ne peuvent utiliser les condensateurs de liaison et de découplage comme le font les concepteurs de circuits discrets.
- Ils doivent employer le couplage direct entre les étages et aussi supprimer les condensateurs de découplage d'émetteur sans perdre trop de gain.

De ces faits...

## Amplificateur différentiel

Il est souvent nécessaire d'amplifier la différence de deux potentiels non nuls (p.e. sortie d'un capteur). Une structure différentielle permet cette amplification, mais permet aussi :



- Les transistors, les diodes et les résistances sont les seuls composants inclus dans les circuits intégrés (CI) classiques.
- On réalise aussi des condensateurs, mais ils ont de petites capacités généralement inférieures à 50 pF.
- Par conséquent, les concepteurs de CI ne peuvent utiliser les condensateurs de liaison et de découplage comme le font les concepteurs de circuits discrets.
- Ils doivent employer le couplage direct entre les étages et aussi supprimer les condensateurs de découplage d'émetteur sans perdre trop de gain.

De ces faits...

## Amplificateur différentiel

Il est souvent nécessaire d'amplifier la différence de deux potentiels non nuls (p.e. sortie d'un capteur). Une structure différentielle permet cette amplification, mais permet aussi :

- d'obtenir un amplificateur large bande

- Les transistors, les diodes et les résistances sont les seuls composants inclus dans les circuits intégrés (CI) classiques.
- On réalise aussi des condensateurs, mais ils ont de petites capacités généralement inférieures à 50 pF.
- Par conséquent, les concepteurs de CI ne peuvent utiliser les condensateurs de liaison et de découplage comme le font les concepteurs de circuits discrets.
- Ils doivent employer le couplage direct entre les étages et aussi supprimer les condensateurs de découplage d'émetteur sans perdre trop de gain.

De ces faits...

## Amplificateur différentiel

Il est souvent nécessaire d'amplifier la différence de deux potentiels non nuls (p.e. sortie d'un capteur). Une structure différentielle permet cette amplification, mais permet aussi :

- d'obtenir un amplificateur large bande
- d'amplifier une tension continue

- Les transistors, les diodes et les résistances sont les seuls composants inclus dans les circuits intégrés (CI) classiques.
- On réalise aussi des condensateurs, mais ils ont de petites capacités généralement inférieures à 50 pF.
- Par conséquent, les concepteurs de CI ne peuvent utiliser les condensateurs de liaison et de découplage comme le font les concepteurs de circuits discrets.
- Ils doivent employer le couplage direct entre les étages et aussi supprimer les condensateurs de découplage d'émetteur sans perdre trop de gain.

De ces faits...

## Amplificateur différentiel

Il est souvent nécessaire d'amplifier la différence de deux potentiels non nuls (p.e. sortie d'un capteur). Une structure différentielle permet cette amplification, mais permet aussi :

- d'obtenir un amplificateur large bande
- d'amplifier une tension continue
- d'être à la base des amplificateurs opérationnels

- Les transistors, les diodes et les résistances sont les seuls composants inclus dans les circuits intégrés (CI) classiques.
- On réalise aussi des condensateurs, mais ils ont de petites capacités généralement inférieures à 50 pF.
- Par conséquent, les concepteurs de CI ne peuvent utiliser les condensateurs de liaison et de découplage comme le font les concepteurs de circuits discrets.
- Ils doivent employer le couplage direct entre les étages et aussi supprimer les condensateurs de découplage d'émetteur sans perdre trop de gain.

De ces faits...

## Amplificateur différentiel

Il est souvent nécessaire d'amplifier la différence de deux potentiels non nuls (p.e. sortie d'un capteur). Une structure différentielle permet cette amplification, mais permet aussi :

- d'obtenir un amplificateur large bande
- d'amplifier une tension continue
- d'être à la base des amplificateurs opérationnels
- de réaliser des circuits multiplicateurs (modulation)

# Avant propos

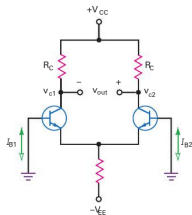
- Les transistors, les diodes et les résistances sont les seuls composants inclus dans les circuits intégrés (CI) classiques.
- On réalise aussi des condensateurs, mais ils ont de petites capacités généralement inférieures à 50 pF.
- Par conséquent, les concepteurs de CI ne peuvent utiliser les condensateurs de liaison et de découplage comme le font les concepteurs de circuits discrets.
- Ils doivent employer le couplage direct entre les étages et aussi supprimer les condensateurs de découplage d'émetteur sans perdre trop de gain.

De ces faits...

## Amplificateur différentiel

Il est souvent nécessaire d'amplifier la différence de deux potentiels non nuls (p.e. sortie d'un capteur). Une structure différentielle permet cette amplification, mais permet aussi :

- d'obtenir un amplificateur large bande
- d'amplifier une tension continue
- d'être à la base des amplificateurs opérationnels
- de réaliser des circuits multiplicateurs (modulation)



Entrées et sorties différentielles (d'après A. Malvino).

# Fonctionnement de base (1/4) : Principe

La paire différentielle BJT fonctionne en :

La paire différentielle BJT fonctionne en :

- Mode Commun

La paire différentielle BJT fonctionne en :

- Mode Commun
- Mode Différentiel



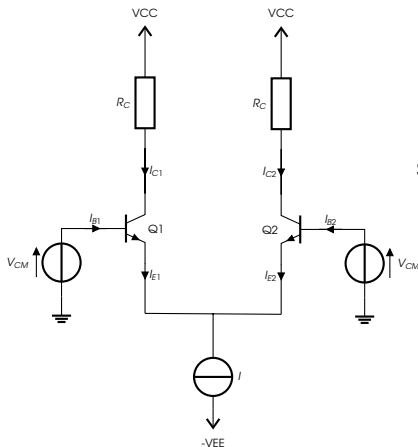
La paire différentielle BJT fonctionne en :

- **Mode Commun**
- Mode Différentiel

# Fonctionnement de base (1/4) : Principe

La paire différentielle BJT fonctionne en :

- Mode Commun
- Mode Différentiel



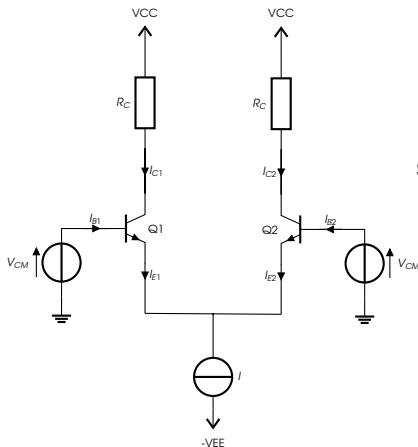
Si les transistors sont appariés ( $\beta_1 = \beta_2 = \beta$ ), alors :

Amplificateur différentiel en mode commun.

# Fonctionnement de base (1/4) : Principe

La paire différentielle BJT fonctionne en :

- Mode Commun
- Mode Différentiel



Si les transistors sont appariés ( $\beta_1 = \beta_2 = \beta$ ), alors :

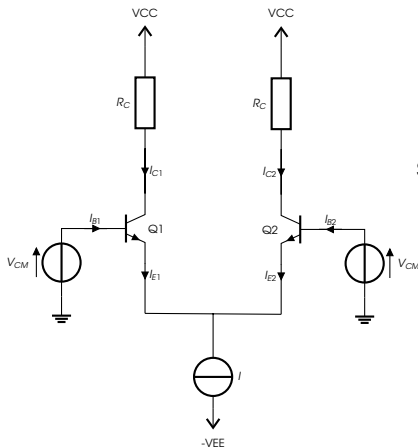
- $I_{B1} = I_{B2} = I_B$

Amplificateur différentiel en mode commun.

# Fonctionnement de base (1/4) : Principe

La paire différentielle BJT fonctionne en :

- Mode Commun
- Mode Différentiel



Si les transistors sont appariés ( $\beta_1 = \beta_2 = \beta$ ), alors :

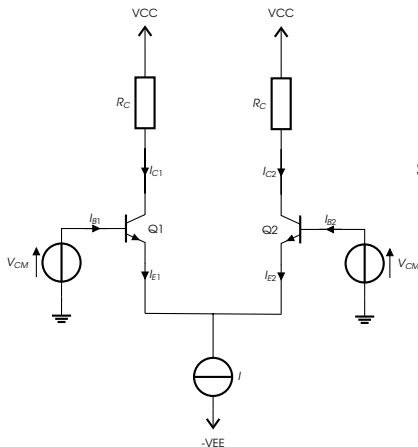
- $I_{B1} = I_{B2} = I_B$
- $I_{E1} = I_{E2} = I_E = I/2$  ;  $I_B = \frac{I_E}{\beta+1}$

Amplificateur différentiel en mode commun.

# Fonctionnement de base (1/4) : Principe

La paire différentielle BJT fonctionne en :

- Mode Commun
- Mode Différentiel



Si les transistors sont appariés ( $\beta_1 = \beta_2 = \beta$ ), alors :

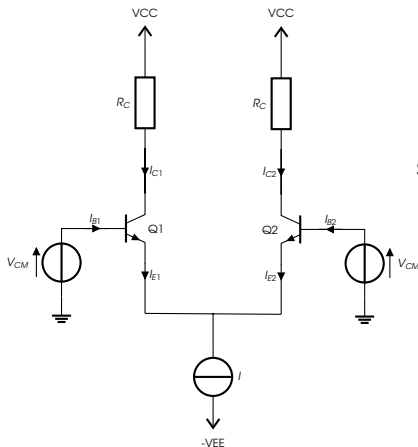
- $I_{B1} = I_{B2} = I_B$
- $I_{E1} = I_{E2} = I_E = I/2$  ;  $I_B = \frac{I_E}{\beta+1}$
- $I_{C1} = I_{C2} = I_C = \beta I_B = \frac{\beta}{\beta+1} I_E = \alpha I_E$

Amplificateur différentiel en mode commun.

# Fonctionnement de base (1/4) : Principe

La paire différentielle BJT fonctionne en :

- Mode Commun
- Mode Différentiel



Si les transistors sont appariés ( $\beta_1 = \beta_2 = \beta$ ), alors :

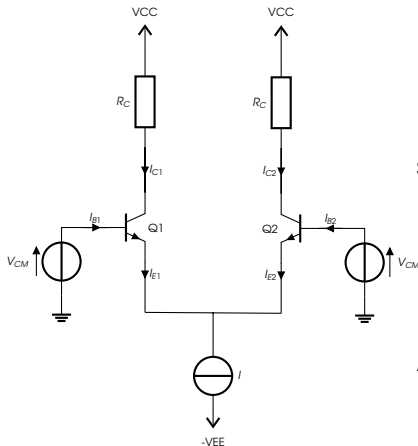
- $I_{B1} = I_{B2} = I_B$
- $I_{E1} = I_{E2} = I_E = I/2$  ;  $I_B = \frac{I_E}{\beta+1}$
- $I_{C1} = I_{C2} = I_C = \beta I_B = \frac{\beta}{\beta+1} I_E = \alpha I_E$
- $V_{C1} = V_{CC} - I_C R_C = V_{CC} - \alpha \frac{I}{2} R_C$  et  $V_{C2} = V_{C1}$

Amplificateur différentiel en mode commun.

# Fonctionnement de base (1/4) : Principe

La paire différentielle BJT fonctionne en :

- Mode Commun
- Mode Différentiel



Si les transistors sont appariés ( $\beta_1 = \beta_2 = \beta$ ), alors :

- $I_{B1} = I_{B2} = I_B$
- $I_{E1} = I_{E2} = I_E = I/2$  ;  $I_B = \frac{I_E}{\beta+1}$
- $I_{C1} = I_{C2} = I_C = \beta I_B = \frac{\beta}{\beta+1} I_E = \alpha I_E$
- $V_{C1} = V_{CC} - I_C R_C = V_{CC} - \alpha \frac{I}{2} R_C$  et  $V_{C2} = V_{C1}$

Ainsi  $v_{out} = V_{C2} - V_{C1} = 0$  quand  $V_{B1} = V_{B2} = V_{CM}$

Amplificateur différentiel en mode commun.

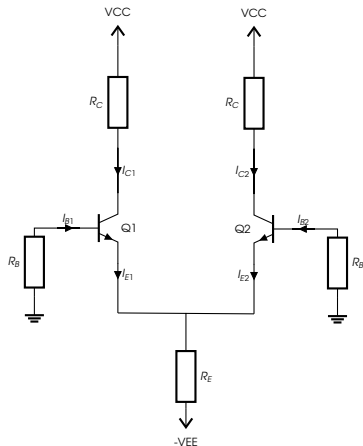
## Fonctionnement de base (2/4) : Polarisation

Polarisation dans le cas où le courant de queue  $I$  est assuré par une résistance  $R_E$ ,



## Fonctionnement de base (2/4) : Polarisation

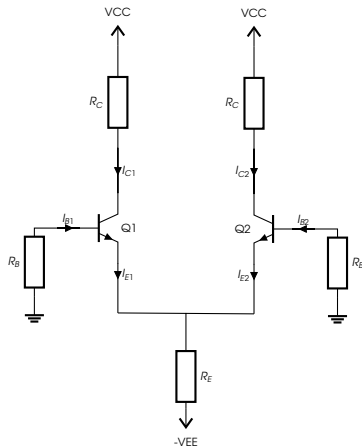
Polarisation dans le cas où le courant de queue  $I$  est assuré par une résistance  $R_E$ ,



Polarisation de l'amplificateur différentiel.

## Fonctionnement de base (2/4) : Polarisation

Polarisation dans le cas où le courant de queue  $I$  est assuré par une résistance  $R_E$ ,

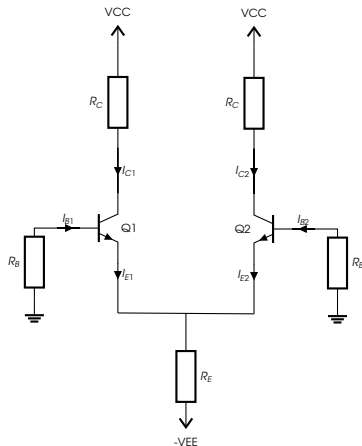


À condition que  $V_{CE1} > 0.4 \text{ V}$  et  $V_{CE2} > 0.4 \text{ V}$ , alors :

Polarisation de l'amplificateur différentiel.

## Fonctionnement de base (2/4) : Polarisation

Polarisation dans le cas où le courant de queue  $I$  est assuré par une résistance  $R_E$ ,



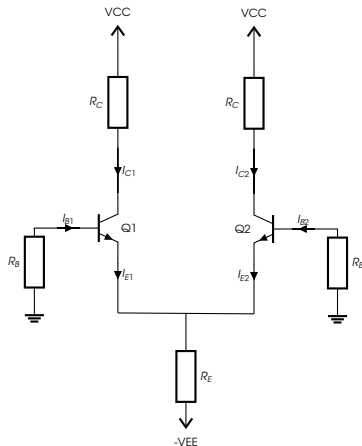
À condition que  $V_{CE1} > 0.4 \text{ V}$  et  $V_{CE2} > 0.4 \text{ V}$ , alors :

$$\bullet I_{B1} = -\frac{V_{B1}}{R_B} \text{ et } I_{B2} = -\frac{V_{B2}}{R_B}$$

Polarisation de l'amplificateur différentiel.

# Fonctionnement de base (2/4) : Polarisation

Polarisation dans le cas où le courant de queue  $I$  est assuré par une résistance  $R_E$ ,



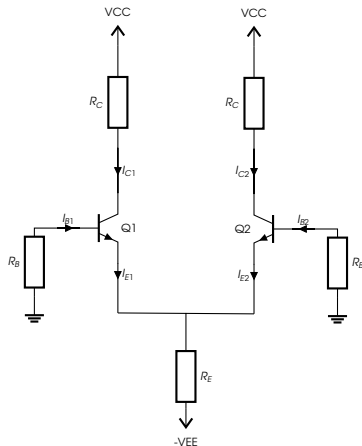
À condition que  $V_{CE1} > 0.4 \text{ V}$  et  $V_{CE2} > 0.4 \text{ V}$ , alors :

- $I_{B1} = -\frac{V_{B1}}{R_B}$  et  $I_{B2} = -\frac{V_{B2}}{R_B}$
- $I_{E1} = (\beta + 1)I_{B1}$ ,  $I_{E2} = (\beta + 1)I_{B2}$

Polarisation de l'amplificateur différentiel.

# Fonctionnement de base (2/4) : Polarisation

Polarisation dans le cas où le courant de queue  $I$  est assuré par une résistance  $R_E$ ,



À condition que  $V_{CE1} > 0.4 \text{ V}$  et  $V_{CE2} > 0.4 \text{ V}$ , alors :

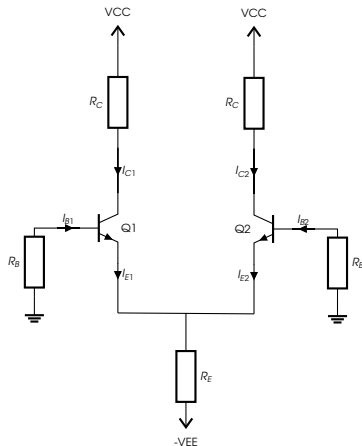
- $I_{B1} = -\frac{V_{B1}}{R_B}$  et  $I_{B2} = -\frac{V_{B2}}{R_B}$
- $I_{E1} = (\beta + 1)I_{B1}$ ,  $I_{E2} = (\beta + 1)I_{B2}$

Si les transistors sont appariés, alors :

Polarisation de l'amplificateur différentiel.

# Fonctionnement de base (2/4) : Polarisation

Polarisation dans le cas où le courant de queue  $I$  est assuré par une résistance  $R_E$ ,



À condition que  $V_{CE1} > 0.4 \text{ V}$  et  $V_{CE2} > 0.4 \text{ V}$ , alors :

- $I_{B1} = -\frac{V_{B1}}{R_B}$  et  $I_{B2} = -\frac{V_{B2}}{R_B}$
- $I_{E1} = (\beta + 1)I_{B1}$ ,  $I_{E2} = (\beta + 1)I_{B2}$

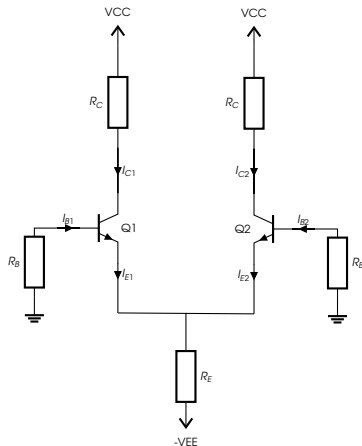
Si les transistors sont appariés, alors :

- $I_{B1} = I_{B2} = I_B$

Polarisation de l'amplificateur différentiel.

# Fonctionnement de base (2/4) : Polarisation

Polarisation dans le cas où le courant de queue  $I$  est assuré par une résistance  $R_E$ ,



À condition que  $V_{CE1} > 0.4 \text{ V}$  et  $V_{CE2} > 0.4 \text{ V}$ , alors :

- $I_{B1} = -\frac{V_{B1}}{R_B}$  et  $I_{B2} = -\frac{V_{B2}}{R_B}$
- $I_{E1} = (\beta + 1)I_{B1}$ ,  $I_{E2} = (\beta + 1)I_{B2}$

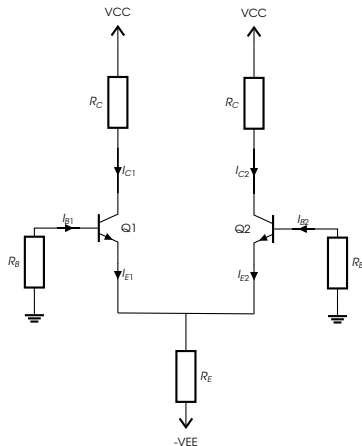
Si les transistors sont appariés, alors :

- $I_{B1} = I_{B2} = I_B$
- $I_{E1} = I_{E2} = I_E = \frac{I}{2}$

Polarisation de l'amplificateur différentiel.

# Fonctionnement de base (2/4) : Polarisation

Polarisation dans le cas où le courant de queue  $I$  est assuré par une résistance  $R_E$ ,



Polarisation de l'amplificateur différentiel.

À condition que  $V_{CE1} > 0.4 \text{ V}$  et  $V_{CE2} > 0.4 \text{ V}$ , alors :

- $I_{B1} = -\frac{V_{B1}}{R_B}$  et  $I_{B2} = -\frac{V_{B2}}{R_B}$
- $I_{E1} = (\beta + 1)I_{B1}$ ,  $I_{E2} = (\beta + 1)I_{B2}$

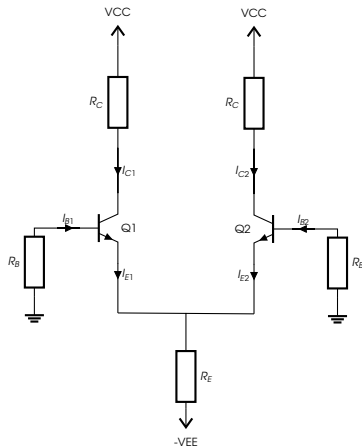
Si les transistors sont appariés, alors :

- $I_{B1} = I_{B2} = I_B$
- $I_{E1} = I_{E2} = I_E = \frac{I}{2}$
- Loi des Mailles :  $-V_{B1} = V_{BE} + R_E I - V_{EE}$



# Fonctionnement de base (2/4) : Polarisation

Polarisation dans le cas où le courant de queue  $I$  est assuré par une résistance  $R_E$ ,



Polarisation de l'amplificateur différentiel.

À condition que  $V_{CE1} > 0.4 \text{ V}$  et  $V_{CE2} > 0.4 \text{ V}$ , alors :

- $I_{B1} = -\frac{V_{B1}}{R_B}$  et  $I_{B2} = -\frac{V_{B2}}{R_B}$
- $I_{E1} = (\beta + 1)I_{B1}$ ,  $I_{E2} = (\beta + 1)I_{B2}$

Si les transistors sont appariés, alors :

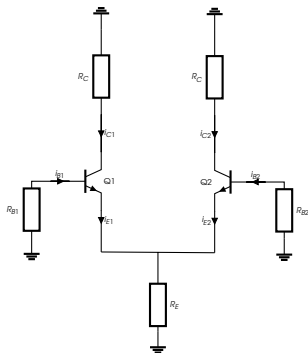
- $I_{B1} = I_{B2} = I_B$
- $I_{E1} = I_{E2} = I_E = \frac{I}{2}$
- Loi des Mailles :  $-V_{B1} = V_{BE} + R_E I - V_{EE}$
- $I = \frac{V_{EE} - V_{BE}}{R_E + \frac{R_B}{\beta + 1}}$

## Fonctionnement de base (3/4) : Mode Différentiel AC (Large signal)

Lorsque l'amplificateur fonctionne en **Mode Différentiel (Large signal)**, le circuit étudié précédemment devient :

## Fonctionnement de base (3/4) : Mode Différentiel AC (Large signal)

Lorsque l'amplificateur fonctionne en **Mode Différentiel (Large signal)**, le circuit étudié précédemment devient :



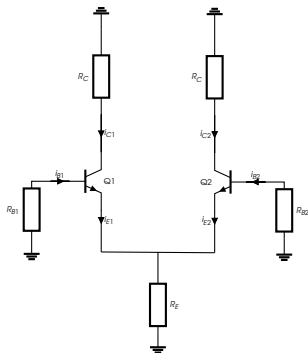
Étude AC.

## Fonctionnement de base (3/4) : Mode Différentiel AC (Large signal)

Lorsque l'amplificateur fonctionne en **Mode Différentiel (Large signal)**, le circuit étudié précédemment devient :

D'après les résultats de la physique du solide, le courant de collecteur peut s'écrire  $I_C = I_S e^{(V_{be}/V_T)}$ , avec :

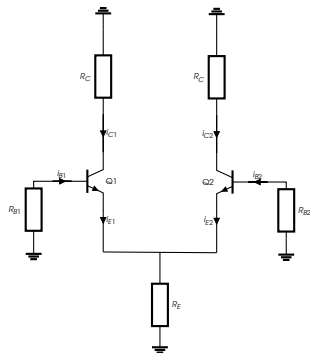
- $I_S$  : courant de saturation
- $V_T$  : tension thermique



Étude AC.

## Fonctionnement de base (3/4) : Mode Différentiel AC (Large signal)

Lorsque l'amplificateur fonctionne en **Mode Différentiel (Large signal)**, le circuit étudié précédemment devient :



Étude AC.

D'après les résultats de la physique du solide, le courant de collecteur peut s'écrire  $i_C = I_S e^{(v_{be}/v_T)}$ , avec :

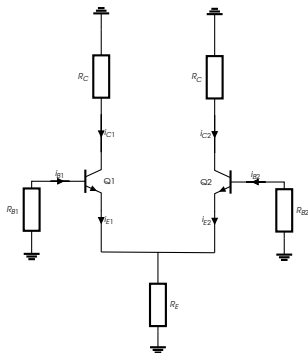
- $I_S$  : courant de saturation
- $v_T$  : tension thermique

Ainsi,

- $i_{E1} = \frac{I_S}{\alpha} e^{(v_{B1}-v_E)/v_T}$
- $i_{E2} = \frac{I_S}{\alpha} e^{(v_{B2}-v_E)/v_T}$

## Fonctionnement de base (3/4) : Mode Différentiel AC (Large signal)

Lorsque l'amplificateur fonctionne en **Mode Différentiel (Large signal)**, le circuit étudié précédemment devient :



Étude AC.

D'après les résultats de la physique du solide, le courant de collecteur peut s'écrire  $i_C = I_S e^{(v_{be}/v_T)}$ , avec :

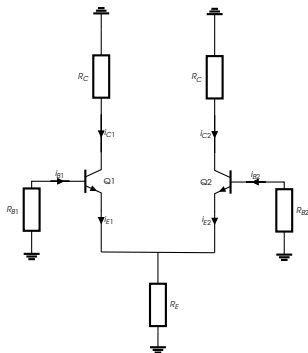
- $I_S$  : courant de saturation
- $v_T$  : tension thermique

Ainsi,

- $i_{E1} = \frac{I_S}{\alpha} e^{(v_{B1} - v_E)/v_T}$
- $i_{E2} = \frac{I_S}{\alpha} e^{(v_{B2} - v_E)/v_T}$
- $\frac{i_{E1}}{i_{E2}} = e^{(v_{B1} - v_{B2})/v_T}$  ;  $v_{id} = v_{B1} - v_{B2}$

## Fonctionnement de base (3/4) : Mode Différentiel AC (Large signal)

Lorsque l'amplificateur fonctionne en **Mode Différentiel (Large signal)**, le circuit étudié précédemment devient :



Étude AC.

D'après les résultats de la physique du solide, le courant de collecteur peut s'écrire  $i_C = I_S e^{(v_{be}/V_T)}$ , avec :

- $I_S$  : courant de saturation
- $V_T$  : tension thermique

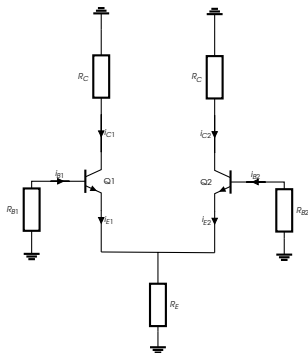
Ainsi,

- $i_{E1} = \frac{I_S}{\alpha} e^{(v_{B1} - v_E)/V_T}$
- $i_{E2} = \frac{I_S}{\alpha} e^{(v_{B2} - v_E)/V_T}$
- $\frac{i_{E1}}{i_{E2}} = e^{(v_{B1} - v_{B2})/V_T}$  ;  $v_{id} = v_{B1} - v_{B2}$

Or, le circuit impose la contrainte  $I = i_{E1} + i_{E2}$  et on peut montrer que :

## Fonctionnement de base (3/4) : Mode Différentiel AC (Large signal)

Lorsque l'amplificateur fonctionne en **Mode Différentiel (Large signal)**, le circuit étudié précédemment devient :



Étude AC.

D'après les résultats de la physique du solide, le courant de collecteur peut s'écrire  $i_C = I_S e^{(v_{be}/V_T)}$ , avec :

- $I_S$  : courant de saturation
- $V_T$  : tension thermique

Ainsi,

- $i_{E1} = \frac{I_S}{\alpha} e^{(v_{B1} - v_E)/V_T}$
- $i_{E2} = \frac{I_S}{\alpha} e^{(v_{B2} - v_E)/V_T}$
- $\frac{i_{E1}}{i_{E2}} = e^{(v_{B1} - v_{B2})/V_T}$  ;  $v_{id} = v_{B1} - v_{B2}$

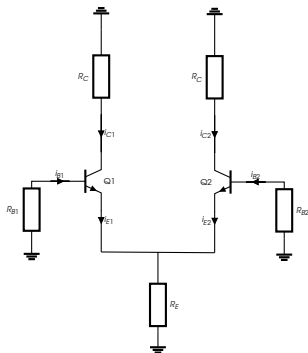
Or, le circuit impose la contrainte  $I = i_{E1} + i_{E2}$  et on peut montrer que :

- $$i_{E1} = \frac{I}{1 + e^{-v_{id}/V_T}}$$



## Fonctionnement de base (3/4) : Mode Différentiel AC (Large signal)

Lorsque l'amplificateur fonctionne en **Mode Différentiel (Large signal)**, le circuit étudié précédemment devient :



Étude AC.

D'après les résultats de la physique du solide, le courant de collecteur peut s'écrire  $i_C = I_S e^{(v_{be}/V_T)}$ , avec :

- $I_S$  : courant de saturation
- $V_T$  : tension thermique

Ainsi,

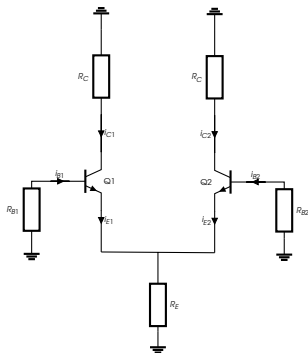
- $i_{E1} = \frac{I_S}{\alpha} e^{(v_{B1}-v_E)/V_T}$
- $i_{E2} = \frac{I_S}{\alpha} e^{(v_{B2}-v_E)/V_T}$
- $\frac{i_{E1}}{i_{E2}} = e^{(v_{B1}-v_{B2})/V_T}$  ;  $v_{id} = v_{B1} - v_{B2}$

Or, le circuit impose la contrainte  $I = i_{E1} + i_{E2}$  et on peut montrer que :

- $i_{E1} = \frac{I}{1+e^{-v_{id}/V_T}}$
- $i_{E2} = \frac{I}{1+e^{v_{id}/V_T}}$

## Fonctionnement de base (3/4) : Mode Différentiel AC (Large signal)

Lorsque l'amplificateur fonctionne en **Mode Différentiel (Large signal)**, le circuit étudié précédemment devient :



Étude AC.

D'après les résultats de la physique du solide, le courant de collecteur peut s'écrire  $i_C = I_S e^{(v_{be}/V_T)}$ , avec :

- $I_S$  : courant de saturation
- $V_T$  : tension thermique

Ainsi,

- $i_{E1} = \frac{I_S}{\alpha} e^{(v_{B1} - v_E)/V_T}$
- $i_{E2} = \frac{I_S}{\alpha} e^{(v_{B2} - v_E)/V_T}$
- $\frac{i_{E1}}{i_{E2}} = e^{(v_{B1} - v_{B2})/V_T}$  ;  $v_{id} = v_{B1} - v_{B2}$

Or, le circuit impose la contrainte  $I = i_{E1} + i_{E2}$  et on peut montrer que :

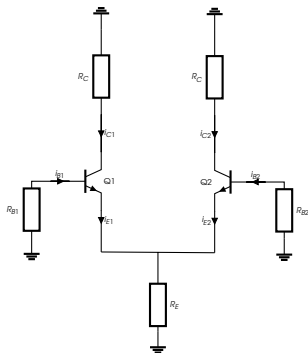
- $i_{E1} = \frac{I}{1 + e^{-v_{id}/V_T}}$
- $i_{E2} = \frac{I}{1 + e^{v_{id}/V_T}}$

Alors si  $v_{B2} = 0$ ,  $v_{C1} = i_{C1} R_C$  et  $v_{C2} = i_{C2} R_C$ , il est possible (mais difficile) de montrer que:

$$v_{out} = v_{C2} - v_{C1} = \alpha I R_C \tanh\left(\frac{v_{B1}}{2V_T}\right)$$

## Fonctionnement de base (3/4) : Mode Différentiel AC (Large signal)

Lorsque l'amplificateur fonctionne en **Mode Différentiel (Large signal)**, le circuit étudié précédemment devient :



Étude AC.

D'après les résultats de la physique du solide, le courant de collecteur peut s'écrire  $i_C = I_S e^{(v_{be}/V_T)}$ , avec :

- $I_S$  : courant de saturation
- $V_T$  : tension thermique

Ainsi,

- $i_{E1} = \frac{I_S}{\alpha} e^{(v_{B1} - v_E)/V_T}$
- $i_{E2} = \frac{I_S}{\alpha} e^{(v_{B2} - v_E)/V_T}$
- $\frac{i_{E1}}{i_{E2}} = e^{(v_{B1} - v_{B2})/V_T}$  ;  $v_{id} = v_{B1} - v_{B2}$

Or, le circuit impose la contrainte  $I = i_{E1} + i_{E2}$  et on peut montrer que :

- $i_{E1} = \frac{I}{1 + e^{-v_{id}/V_T}}$
- $i_{E2} = \frac{I}{1 + e^{v_{id}/V_T}}$

Alors si  $v_{B2} = 0$ ,  $v_{C1} = i_{C1} R_C$  et  $v_{C2} = i_{C2} R_C$ , il est possible (mais difficile) de montrer que:

$$v_{out} = v_{C2} - v_{C1} = \alpha I R_C \tanh\left(\frac{v_{B1}}{2V_T}\right)$$

### Remarque

L'amplificateur différentiel se comporte comme un amplificateur **non-linéaire**.

En **petit signal**, pour un **amplificateur différentiel** polarisé avec une source de courant, le courant de collecteur est :

$$i_{C1} = \alpha i_{E1} = \frac{\alpha I}{1 + e^{-v_{id}/V_T}} = \frac{\alpha I e^{v_{id}/2V_T}}{e^{v_{id}/2V_T} + e^{-v_{id}/2V_T}}$$

## Fonctionnement de base (4/4) : Mode Différentiel AC (Petit signal)

En **petit signal**, pour un **amplificateur différentiel** polarisé avec une source de courant, le courant de collecteur est :

$$i_{C1} = \alpha i_{E1} = \frac{\alpha I}{1 + e^{-v_{id}/v_T}} = \frac{\alpha I e^{v_{id}/2v_T}}{e^{v_{id}/2v_T} + e^{-v_{id}/2v_T}}$$

Lorsque  $v_{id} \ll v_T$ , la fonction exponentielle peut être linéarisée ainsi :

$$i_{C1} = \frac{\alpha I \left(1 + \frac{v_{id}}{2v_T}\right)}{\left(1 + \frac{v_{id}}{2v_T} + 1 - \frac{v_{id}}{2v_T}\right)} = \frac{\alpha I}{2} + \frac{\alpha I}{2} \frac{v_{id}}{2v_T}$$

## Fonctionnement de base (4/4) : Mode Différentiel AC (Petit signal)

En **petit signal**, pour un **amplificateur différentiel** polarisé avec une source de courant, le courant de collecteur est :

$$i_{C1} = \alpha I_{E1} = \frac{\alpha I}{1 + e^{-v_{id}/v_T}} = \frac{\alpha I e^{v_{id}/2v_T}}{e^{v_{id}/2v_T} + e^{-v_{id}/2v_T}}$$

Lorsque  $v_{id} \ll v_T$ , la fonction exponentielle peut être linéarisée ainsi :

$$i_{C1} = \frac{\alpha I \left(1 + \frac{v_{id}}{2v_T}\right)}{\left(1 + \frac{v_{id}}{2v_T} + 1 - \frac{v_{id}}{2v_T}\right)} = \frac{\alpha I}{2} + \frac{\alpha I}{2} \frac{v_{id}}{2v_T}$$

On peut démontrer que :  $i_{C2} = \frac{\alpha I}{2} - \frac{\alpha I}{2} \frac{v_{id}}{2v_T}$

## Fonctionnement de base (4/4) : Mode Différentiel AC (Petit signal)

En **petit signal**, pour un **amplificateur différentiel** polarisé avec une source de courant, le courant de collecteur est :

$$i_{C1} = \alpha I_{E1} = \frac{\alpha I}{1 + e^{-v_{id}/v_T}} = \frac{\alpha I e^{v_{id}/2v_T}}{e^{v_{id}/2v_T} + e^{-v_{id}/2v_T}}$$

Lorsque  $v_{id} \ll v_T$ , la fonction exponentielle peut être linéarisée ainsi :

$$i_{C1} = \frac{\alpha I \left(1 + \frac{v_{id}}{2v_T}\right)}{\left(1 + \frac{v_{id}}{2v_T} + 1 - \frac{v_{id}}{2v_T}\right)} = \frac{\alpha I}{2} + \frac{\alpha I}{2} \frac{v_{id}}{2v_T}$$

On peut démontrer que :  $i_{C2} = \frac{\alpha I}{2} - \frac{\alpha I}{2} \frac{v_{id}}{2v_T}$

Ainsi les variations du courant de collecteur par rapport au point de repos s'expriment :

$$i_{C2} = -\frac{\alpha I}{2} \frac{v_{id}}{2v_T}$$

## Fonctionnement de base (4/4) : Mode Différentiel AC (Petit signal)

En **petit signal**, pour un **amplificateur différentiel** polarisé avec une source de courant, le courant de collecteur est :

$$i_{C1} = \alpha I_{E1} = \frac{\alpha I}{1 + e^{-v_{id}/V_T}} = \frac{\alpha I e^{v_{id}/2V_T}}{e^{v_{id}/2V_T} + e^{-v_{id}/2V_T}}$$

Lorsque  $v_{id} \ll V_T$ , la fonction exponentielle peut être linéarisée ainsi :

$$i_{C1} = \frac{\alpha I \left(1 + \frac{v_{id}}{2V_T}\right)}{\left(1 + \frac{v_{id}}{2V_T} + 1 - \frac{v_{id}}{2V_T}\right)} = \frac{\alpha I}{2} + \frac{\alpha I}{2} \frac{v_{id}}{2V_T}$$

On peut démontrer que :  $i_{C2} = \frac{\alpha I}{2} - \frac{\alpha I}{2} \frac{v_{id}}{2V_T}$

Ainsi les variations du courant de collecteur par rapport au point de repos s'expriment :

$$i_{C2} = -\frac{\alpha I}{2} \frac{v_{id}}{2V_T}$$

La tension AC en sortie unique :  $v_{out} = -i_c R_C = \frac{\alpha I}{2} \frac{v_{id}}{2V_T} R_C = \frac{I_C}{V_T} \frac{R_C}{2} v_{id}$



## Fonctionnement de base (4/4) : Mode Différentiel AC (Petit signal)

En **petit signal**, pour un **amplificateur différentiel** polarisé avec une source de courant, le courant de collecteur est :

$$i_{C1} = \alpha I_{E1} = \frac{\alpha I}{1 + e^{-v_{id}/V_T}} = \frac{\alpha I e^{v_{id}/2V_T}}{e^{v_{id}/2V_T} + e^{-v_{id}/2V_T}}$$

Lorsque  $v_{id} \ll V_T$ , la fonction exponentielle peut être linéarisée ainsi :

$$i_{C1} = \frac{\alpha I \left(1 + \frac{v_{id}}{2V_T}\right)}{\left(1 + \frac{v_{id}}{2V_T} + 1 - \frac{v_{id}}{2V_T}\right)} = \frac{\alpha I}{2} + \frac{\alpha I}{2} \frac{v_{id}}{2V_T}$$

On peut démontrer que :  $i_{C2} = \frac{\alpha I}{2} - \frac{\alpha I}{2} \frac{v_{id}}{2V_T}$

Ainsi les variations du courant de collecteur par rapport au point de repos s'expriment :

$$i_{C2} = -\frac{\alpha I}{2} \frac{v_{id}}{2V_T}$$

La tension AC en sortie unique :  $v_{out} = -i_c R_C = \frac{\alpha I}{2} \frac{v_{id}}{2V_T} R_C = \frac{I_C}{V_T} \frac{R_C}{2} v_{id}$

L'amplificateur différentiel se comporte comme un amplificateur **linéaire** et le **gain en tension** est alors :  $A_{su} = \frac{R_C}{2r_e'}$

## Fonctionnement de base (4/4) : Mode Différentiel AC (Petit signal)

En **petit signal**, pour un **amplificateur différentiel** polarisé avec une source de courant, le courant de collecteur est :

$$i_{C1} = \alpha I_{E1} = \frac{\alpha I}{1 + e^{-v_{id}/v_T}} = \frac{\alpha I e^{v_{id}/2v_T}}{e^{v_{id}/2v_T} + e^{-v_{id}/2v_T}}$$

Lorsque  $v_{id} \ll v_T$ , la fonction exponentielle peut être linéarisée ainsi :

$$i_{C1} = \frac{\alpha I \left(1 + \frac{v_{id}}{2v_T}\right)}{\left(1 + \frac{v_{id}}{2v_T} + 1 - \frac{v_{id}}{2v_T}\right)} = \frac{\alpha I}{2} + \frac{\alpha I}{2} \frac{v_{id}}{2v_T}$$

On peut démontrer que :  $i_{C2} = \frac{\alpha I}{2} - \frac{\alpha I}{2} \frac{v_{id}}{2v_T}$

Ainsi les variations du courant de collecteur par rapport au point de repos s'expriment :

$$i_{C2} = -\frac{\alpha I}{2} \frac{v_{id}}{2v_T}$$

La tension AC en sortie unique :  $v_{out} = -i_c R_C = \frac{\alpha I}{2} \frac{v_{id}}{2v_T} R_C = \frac{I_C}{V_T} \frac{R_C}{2} v_{id}$

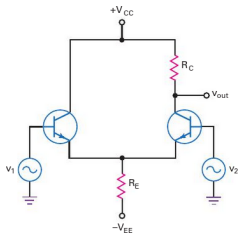
L'amplificateur différentiel se comporte comme un amplificateur **linéaire** et le **gain en tension** est alors :  $A_{su} = \frac{R_C}{2r_{e'}}$

### Remarque

Lorsque le circuit est polarisé utilisant une résistance d'émetteur, le gain est :

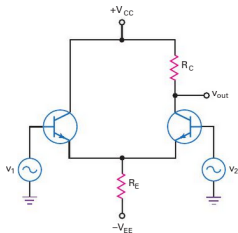
$$A_{su} = \frac{R_C}{2(r_{e'} || R_E)} \approx \frac{R_C}{2r_{e'}}$$

# Amplificateur différentiel à sortie unique

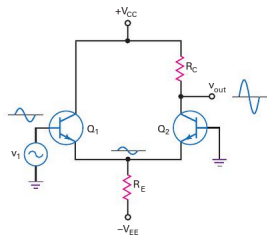


Entrée différentielle et sortie unique (d'après A. Malvino).

# Amplificateur différentiel à sortie unique

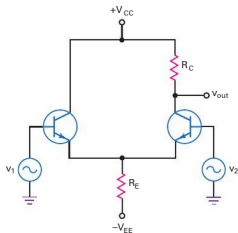


Entrée différentielle et sortie unique (d'après A. Malvino).

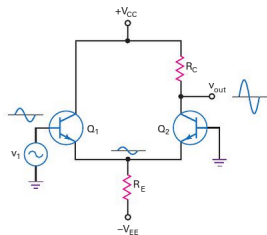


Entrée non inverseuse  
(d'après A. Malvino).

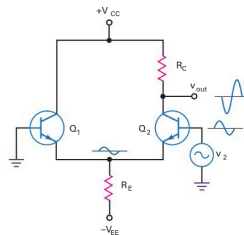
# Amplificateur différentiel à sortie unique



Entrée différentielle et sortie unique (d'après A. Malvino).

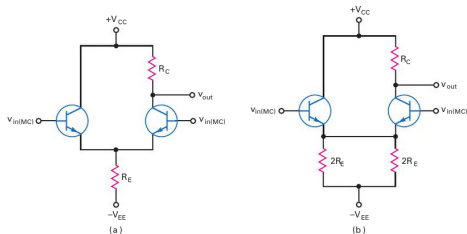


Entrée non inverseuse  
(d'après A. Malvino).



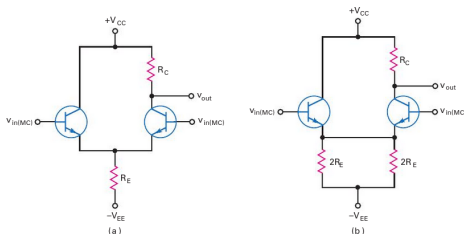
Entrée inverseuse  
(d'après A. Malvino).

# Gain en Mode Commun et Taux de réjection du MC (CMRR)



Signal d'entrée en MC et circuit équivalent (d'après A. Malvino).

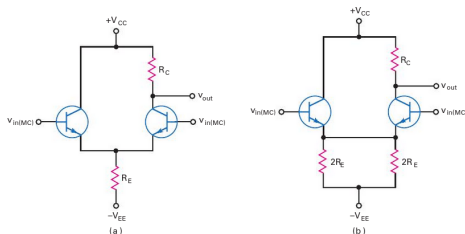
# Gain en Mode Commun et Taux de réjection du MC (CMRR)



Signal d'entrée en MC et circuit équivalent (d'après A. Malvino).

En étudiant le modèle en petit signal, on peut montrer que le **gain en mode commun** est :  $A_{mc} \approx \frac{R_C}{2R_E}$

# Gain en Mode Commun et Taux de réjection du MC (CMRR)



Signal d'entrée en MC et circuit équivalent (d'après A. Malvino).

En étudiant le modèle en petit signal, on peut montrer que le **gain en mode commun** est :  $A_{mc} \approx \frac{R_C}{2R_E}$

## Définition

$$CMRR = \frac{A_{su}}{A_{mc}}$$

et

$$CMRR_{dB} = 20 \log_{10}(CMRR)$$



## À RETENIR 15.1 – Configurations de l'ampli différentiel

Entrée	Sortie	$V_E$	$V_{out}$
différentielle	différentielle	$V_1 - V_2$	$V_{C2} - V_{C1}$
différentielle	unique	$V_1 - V_2$	$V_{C2}$
unique	différentielle	$V_1$ ou $V_2$	$V_{C2} - V_{C1}$
unique	unique	$V_1$ ou $V_2$	$V_{C2}$

Configurations de l'ampli diff (d'après A. Malvino).

## À RETENIR 15.1 – Configurations de l'ampli différentiel

Entrée	Sortie	$V_E$	$V_{out}$
différentielle	différentielle	$V_1 - V_2$	$V_{C2} - V_{C1}$
différentielle	unique	$V_1 - V_2$	$V_{C2}$
unique	différentielle	$V_1$ ou $V_2$	$V_{C2} - V_{C1}$
unique	unique	$V_1$ ou $V_2$	$V_{C2}$

Configurations de l'ampli diff (d'après A. Malvino).

## À RETENIR 15.2 – Gains en tension de l'amplificateur différentiel

Entrée	Sortie	A	$V_{out}$
différentielle	différentielle	$R_{C2}/R'_E$	$A(v_1 - v_2)$
différentielle	unique	$R_{C2}/2R'_E$	$A(v_1 - v_2)$
unique	différentielle	$R_{C2}/R'_E$	$A, v_1$ ou $-A, v_2$
unique	unique	$R_{C2}/2R'_E$	$A, v_1$ ou $-A, v_2$

Gains en tension de l'ampli diff (d'après A. Malvino).

## À RETENIR 15.1 – Configurations de l'ampli différentiel

Entrée	Sortie	$V_E$	$V_{out}$
différentielle	différentielle	$V_1 - V_2$	$V_{C2} - V_{C1}$
différentielle	unique	$V_1 - V_2$	$V_{C2}$
unique	différentielle	$V_1$ ou $V_2$	$V_{C2} - V_{C1}$
unique	unique	$V_1$ ou $V_2$	$V_{C2}$

Configurations de l'ampli diff (d'après A. Malvino).

## À RETENIR 15.2 – Gains en tension de l'amplificateur différentiel

Entrée	Sortie	A	$V_{out}$
différentielle	différentielle	$R_d/2r'_e$	$A(v_1 - v_2)$
différentielle	unique	$R_d/2r'_e$	$A(v_1 - v_2)$
unique	différentielle	$R_d/r'_e$	$A, v_1$ ou $-A, v_2$
unique	unique	$R_d/2r'_e$	$A, v_1$ ou $-A, v_2$

Gains en tension de l'ampli diff (d'après A. Malvino).

## CMRR : Ampli diff à sortie unique

$$CMRR_{su} = \frac{A_{su}}{A_{mc}} =$$

## À RETENIR 15.1 – Configurations de l'ampli différentiel

Entrée	Sortie	$V_E$	$V_{out}$
différentielle	différentielle	$V_1 - V_2$	$V_{C2} - V_{C1}$
différentielle	unique	$V_1 - V_2$	$V_{C2}$
unique	différentielle	$V_1$ ou $V_2$	$V_{C2} - V_{C1}$
unique	unique	$V_1$ ou $V_2$	$V_{C2}$

Configurations de l'ampli diff (d'après A. Malvino).

## À RETENIR 15.2 – Gains en tension de l'amplificateur différentiel

Entrée	Sortie	A	$V_{out}$
différentielle	différentielle	$R_d/2r_e'$	$A(v_1 - v_2)$
différentielle	unique	$R_d/2r_e'$	$A(v_1 - v_2)$
unique	différentielle	$R_d/r_e'$	$A, v_1$ ou $-A, v_2$
unique	unique	$R_d/2r_e'$	$A, v_1$ ou $-A, v_2$

Gains en tension de l'ampli diff (d'après A. Malvino).

## CMRR : Ampli diff à sortie unique

$$CMRR_{su} = \frac{A_{su}}{A_{mc}} = \frac{\frac{R_C}{2r_{e'}}}{\frac{R_C}{2R_E}}$$

## À RETENIR 15.1 – Configurations de l'ampli différentiel

Entrée	Sortie	$V_E$	$V_{out}$
différentielle	différentielle	$V_1 - V_2$	$V_{C2} - V_{C1}$
différentielle	unique	$V_1 - V_2$	$V_{C2}$
unique	différentielle	$V_1$ ou $V_2$	$V_{C2} - V_{C1}$
unique	unique	$V_1$ ou $V_2$	$V_{C2}$

Configurations de l'ampli diff (d'après A. Malvino).

## À RETENIR 15.2 – Gains en tension de l'amplificateur différentiel

Entrée	Sortie	A	$V_{out}$
différentielle	différentielle	$R_d / r_e'$	$A(v_1 - v_2)$
différentielle	unique	$R_d / 2r_e'$	$A(v_1 - v_2)$
unique	différentielle	$R_d / r_e'$	$A, v_1$ ou $-A, v_2$
unique	unique	$R_d / 2r_e'$	$A, v_1$ ou $-A, v_2$

Gains en tension de l'ampli diff (d'après A. Malvino).

## CMRR : Ampli diff à sortie unique

$$CMRR_{su} = \frac{A_{su}}{A_{mc}} = \frac{\frac{R_C}{2r_{e'}}}{\frac{R_C}{2R_E}} = \frac{R_E}{r_{e'}}$$

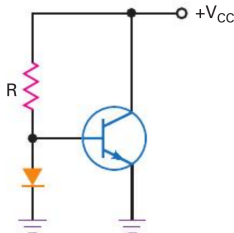
# Amélioration du CMRR

## Idée générale du fonctionnement recherché

Générer un courant de collecteur "image" d'un courant contrôlé.

## Idée générale du fonctionnement recherché

Générer un courant de collecteur "image" d'un courant contrôlé.

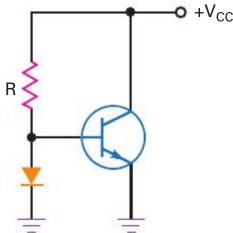


Miroir de courant avec diode de compensation (d'après A. Malvino).



## Idée générale du fonctionnement recherché

Générer un courant de collecteur "image" d'un courant contrôlé.

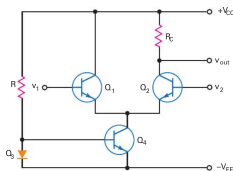


Miroir de courant avec diode de compensation (d'après A. Malvino).

## Source de courant

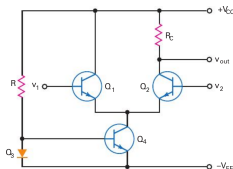
$$I_C = I_R = \frac{V_{CC} + V_{EE} - V_{BE}}{R}$$

## Application : polarisation d'un ampli diff



Polarisation par miroir de courant (d'après A. Malvino).

## Application : polarisation d'un ampli diff

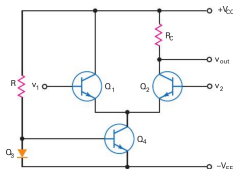


Polarisation par miroir de courant (d'après A. Malvino).

Rappel : Ampli diff à sortie unique

$$CMRR_{su} = \frac{R_E}{r_e}$$

## Application : polarisation d'un ampli diff



Polarisation par miroir de courant (d'après A. Malvino).

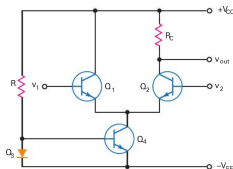
### Rappel : Ampli diff à sortie unique

$$CMRR_{su} = \frac{R_E}{r_e}$$

### Fonctionnement

- La diode de compensation est ici un transistor  $Q_3$  dont la base et le collecteur sont reliés.

## Application : polarisation d'un ampli diff



Polarisation par miroir de courant (d'après A. Malvino).

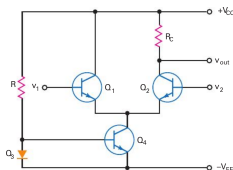
### Rappel : Ampli diff à sortie unique

$$CMRR_{su} = \frac{R_E}{r_e}$$

### Fonctionnement

- La diode de compensation est ici un transistor Q<sub>3</sub> dont la base et le collecteur sont reliés.
- Le miroir de courant impose le courant de queue ( $I_R$ ).

# Application : polarisation d'un ampli diff



Polarisation par miroir de courant (d'après A. Malvino).

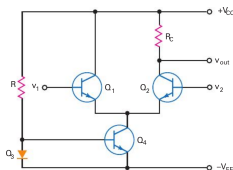
## Rappel : Ampli diff à sortie unique

$$CMRR_{su} = \frac{R_E}{r_e}$$

## Fonctionnement

- La diode de compensation est ici un transistor Q<sub>3</sub> dont la base et le collecteur sont reliés.
- Le miroir de courant impose le courant de queue ( $I_R$ ).
- Le transistor Q<sub>4</sub> se comporte comme une source de courant, il possède une très grande impédance de sortie (effet Early,  $r_o \approx \frac{V_A}{I_{C4}}$ ).

# Application : polarisation d'un ampli diff



Polarisation par miroir de courant (d'après A. Malvino).

## Rappel : Ampli diff à sortie unique

$$CMRR_{su} = \frac{R_E}{r_e}$$

## Fonctionnement

- La diode de compensation est ici un transistor  $Q_3$  dont la base et le collecteur sont reliés.
- Le miroir de courant impose le courant de queue ( $I_R$ ).
- Le transistor  $Q_4$  se comporte comme une source de courant, il possède une très grande impédance de sortie (effet Early,  $r_o \approx \frac{V_A}{I_{C4}}$ ).
- Par conséquent, la résistance équivalente  $r_o$  entre la paire différentielle et  $-V_{EE}$  vaut des centaines de  $k\Omega$ .