

# **L'AMPLIFICATEUR DIFFERENTIEL**

# L'AMPLIFICATEUR DIFFERENTIEL

## 1. INTRODUCTION

## 2. SCHÉMA ET PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

## 3. CARACTÉRISTIQUE DE TRANSFERT "GRANDS SIGNAUX"

## 4. COMPORTEMENT "PETITS SIGNAUX" AVEC CHARGES RÉSISTIVES

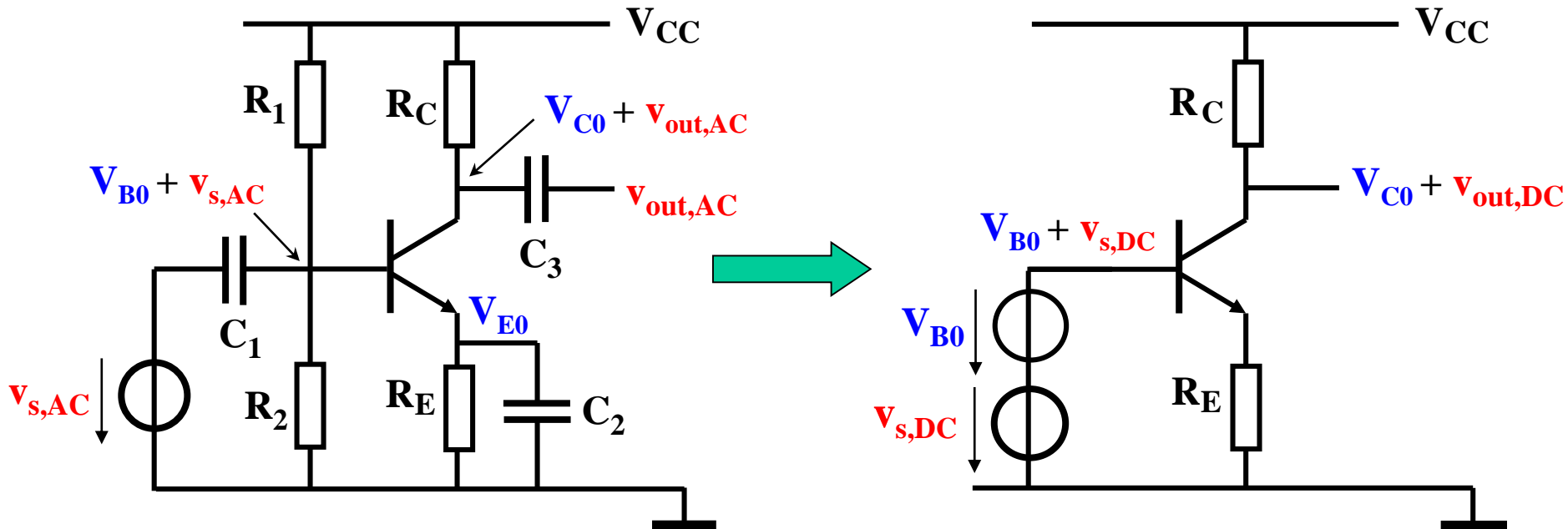
## 5. AMPLI DIFFÉRENTIEL À CHARGES ACTIVES

## 6. APPLICATION PARTICULIÈRE DE L'AMPLI DIFFÉRENTIEL: LE MULTIPLIEUR ANALOGIQUE

# 1. INTRODUCTION

## 1. PROBLÈME DE L'AMPLIFICATION DE PETITS SIGNAUX DC

### POLARISATION "CLASSIQUE"



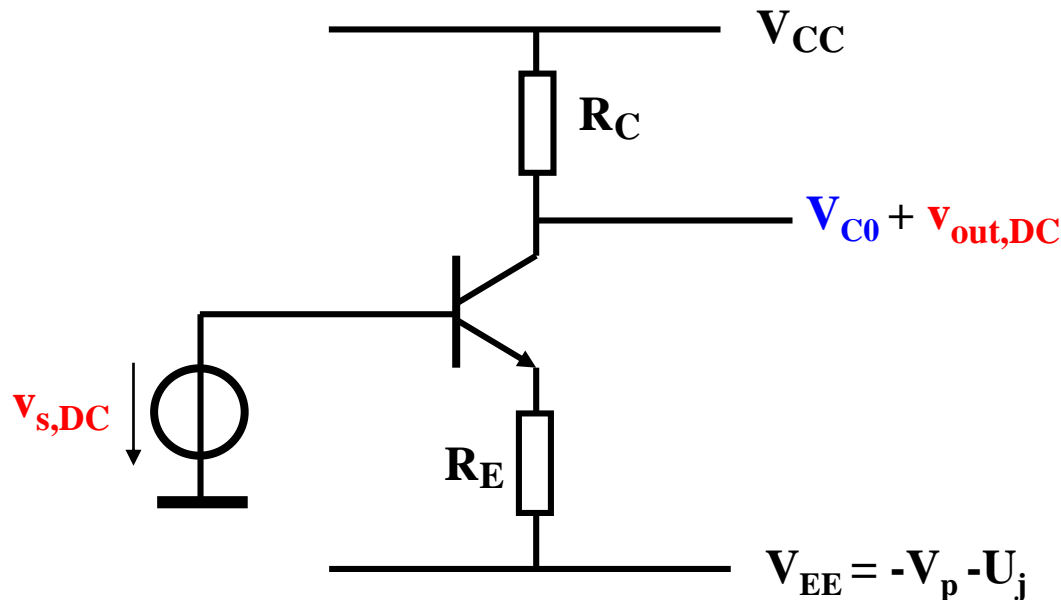
### Problèmes:

1. polarisation d'entrée inacceptable (flottante et ultra-précise)
2. sensible à la température
3. gain en tension très faible  $\rightarrow R_C/R_E$

# 1. INTRODUCTION

## 1. PROBLÈME DE L'AMPLIFICATION DE PETITS SIGNAUX DC

### POLARISATION À 2 SOURCES ?

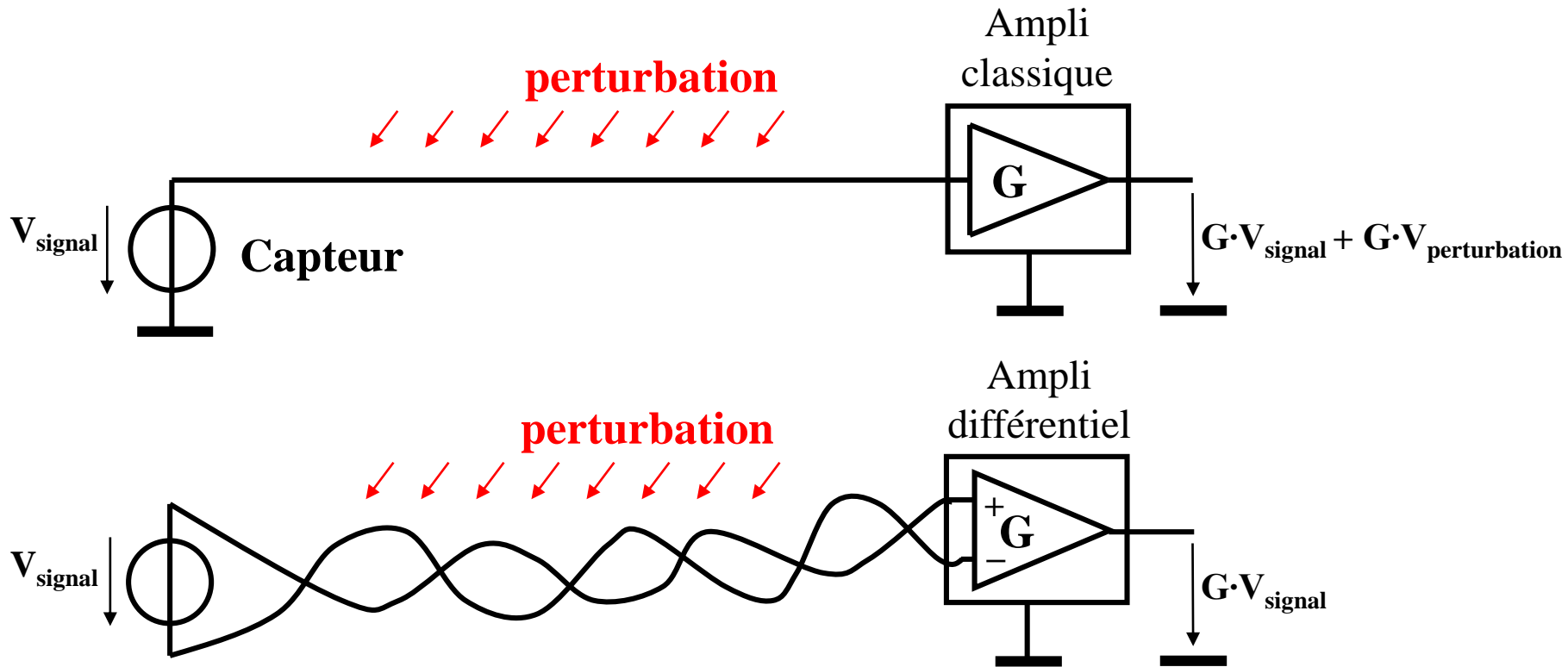


#### Problèmes :

- sensibilité aux variations de l'alimentation  $V_{EE}$
- sensibilité à la température
- gain très faible  $\rightarrow R_C/R_E$

# 1. INTRODUCTION

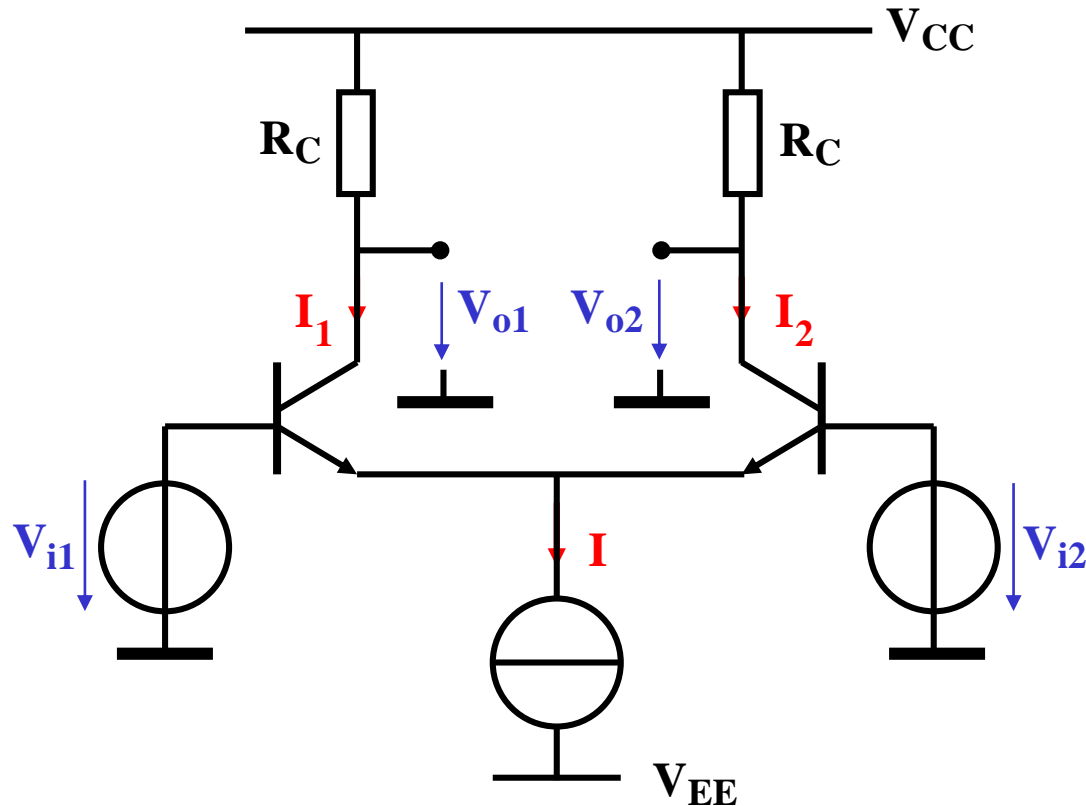
## 2. AMPLI DIFFÉRENTIEL OU AMPLI À ENTRÉE ASYMETRIQUE ?



Dans le cas d'un signal différentiel, les perturbations affectent les deux fils de façon identique.

Il s'agit d'un signal de "mode commun" qui n'est pas pris en compte par l'ampli différentiel.

## 2. L'AMPLIFICATEUR DIFFERENTIEL : SCHEMA DE BASE ET PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

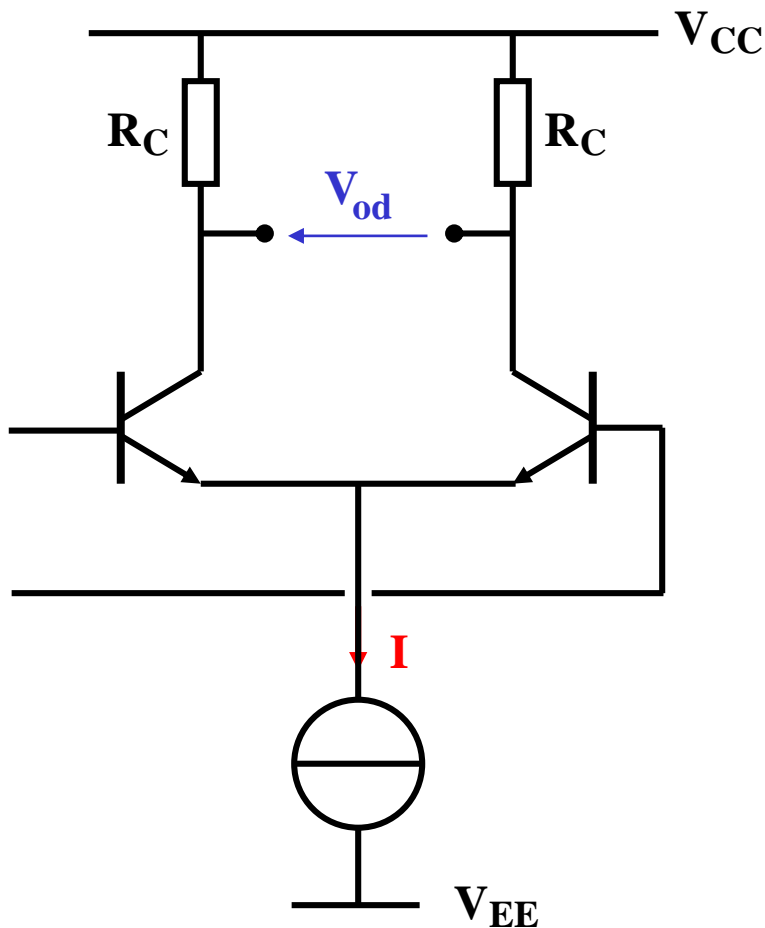


- Symétrie
- Couplage DC
- Amplifie ( $V_{i1} - V_{i2}$ )
- Tenue en température
- Techno Bipolaire ou MOS
- $I_1 + I_2 = I$  constant

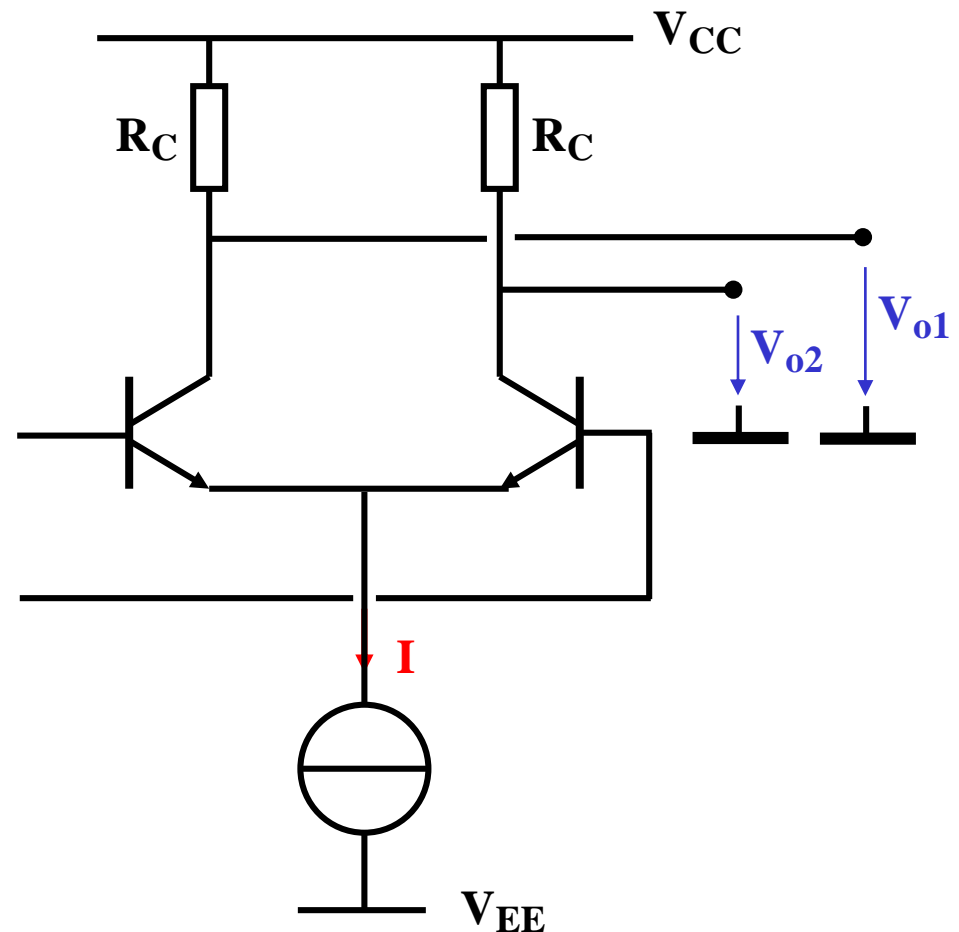
## 2. L'AMPLIFICATEUR DIFFERENTIEL : SCHEMA DE BASE ET PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

### DEUX MODES DE SORTIE

#### DIFFERENTIELLE



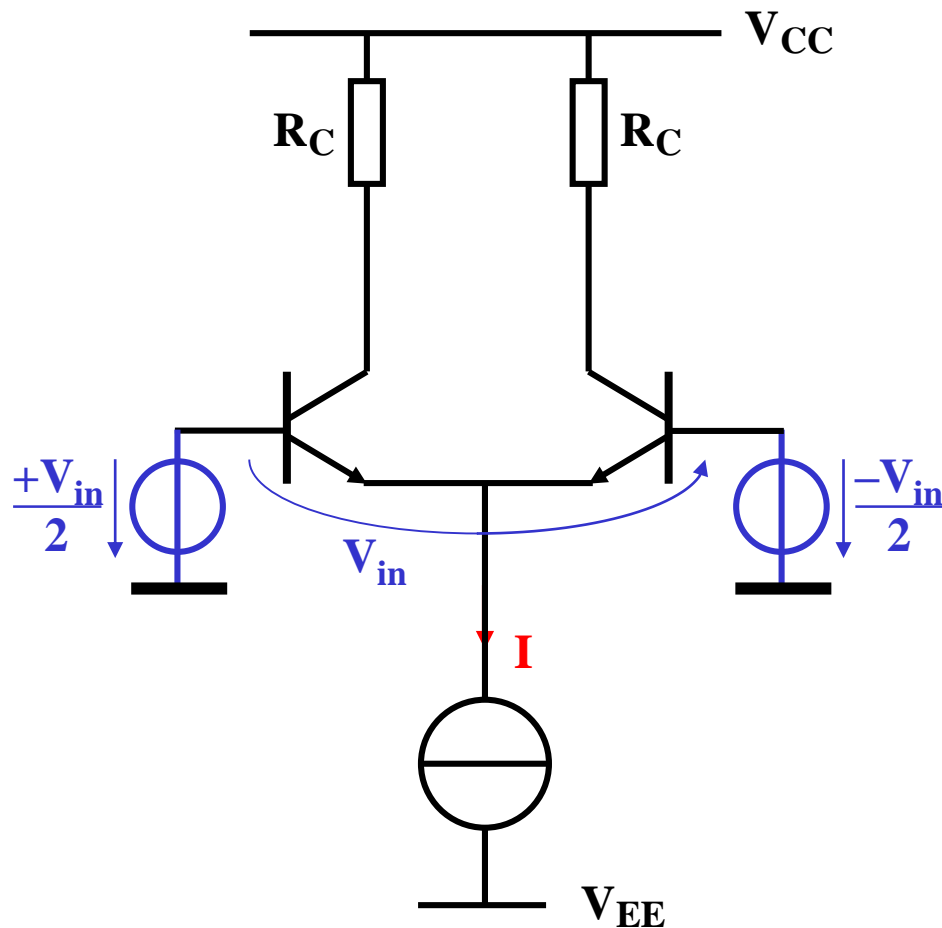
#### ASYMETRIQUE(S) "SINGLE ENDED"



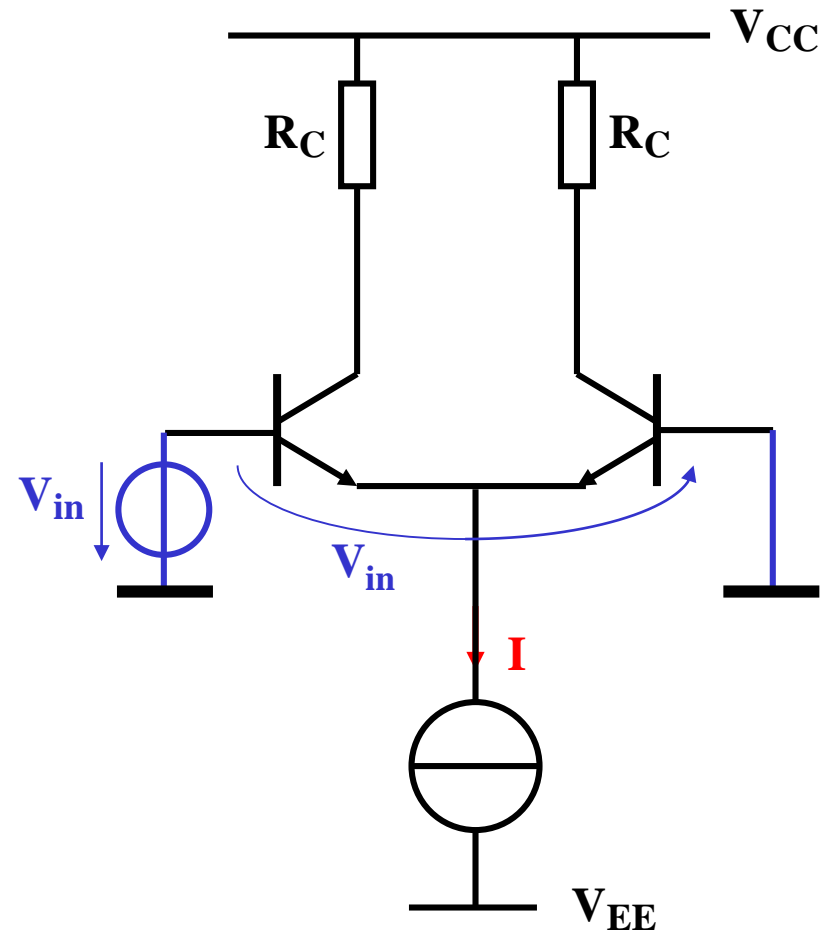
## 2. L'AMPLIFICATEUR DIFFERENTIEL : SCHEMA DE BASE ET PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

### DEUX MODES D'ENTRÉE

#### DIFFERENTIELLE



#### ASYMETRIQUE





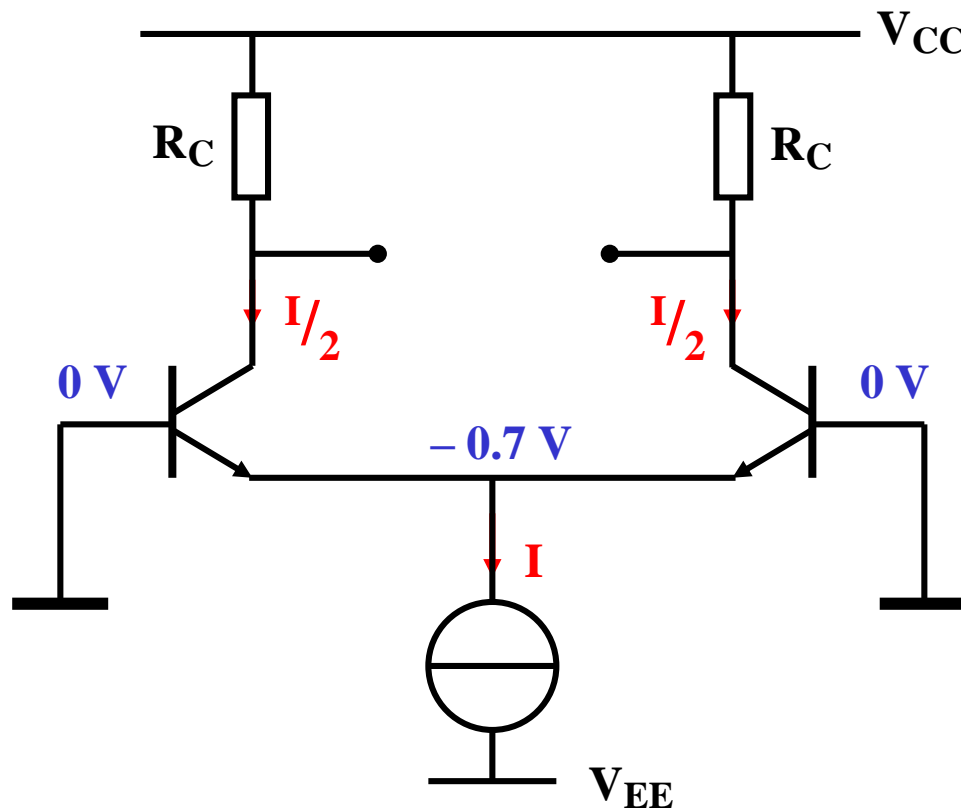
## 2. L'AMPLIFICATEUR DIFFERENTIEL : SCHEMA DE BASE ET PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

ENTRÉES NULLES:

$$V_{BE1} = V_{BE2} \Rightarrow I_{C1} = I_{C2} = I/2$$

↑  
exact

**EQUILIBRE**



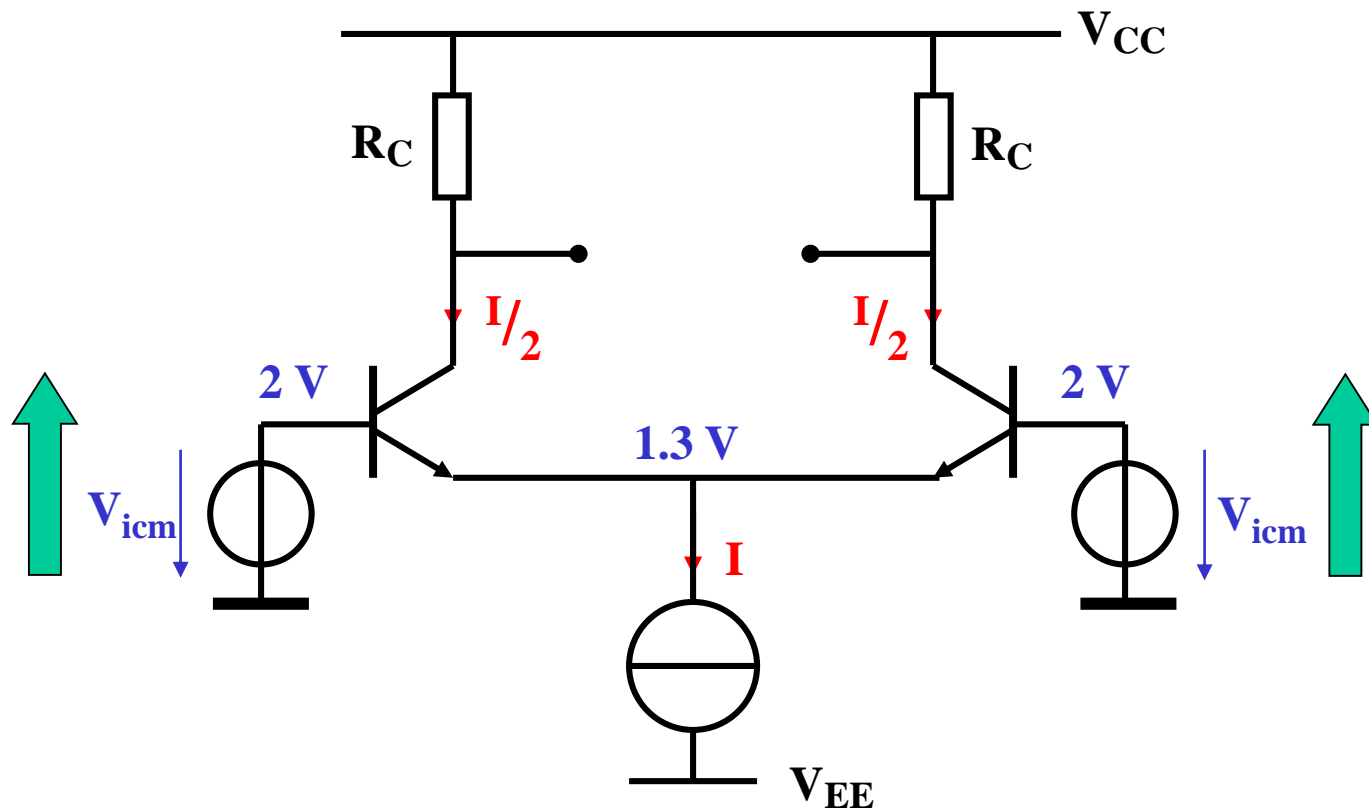
## 2. L'AMPLIFICATEUR DIFFERENTIEL : SCHEMA DE BASE ET PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

SIGNAL D'ENTRÉE DIFFÉRENTIEL NUL  
SIGNAL D'ENTRÉE DE MODE COMMUN NON-NUL :

$$V_{B1} = V_{B2} = V_{icm} \quad \Rightarrow \quad V_{BE1} = V_{BE2} \quad \Rightarrow \quad I_{C1} = I_{C2} = I/2$$

↑  
exact

**L' EQUILIBRE EST MAINTENU**

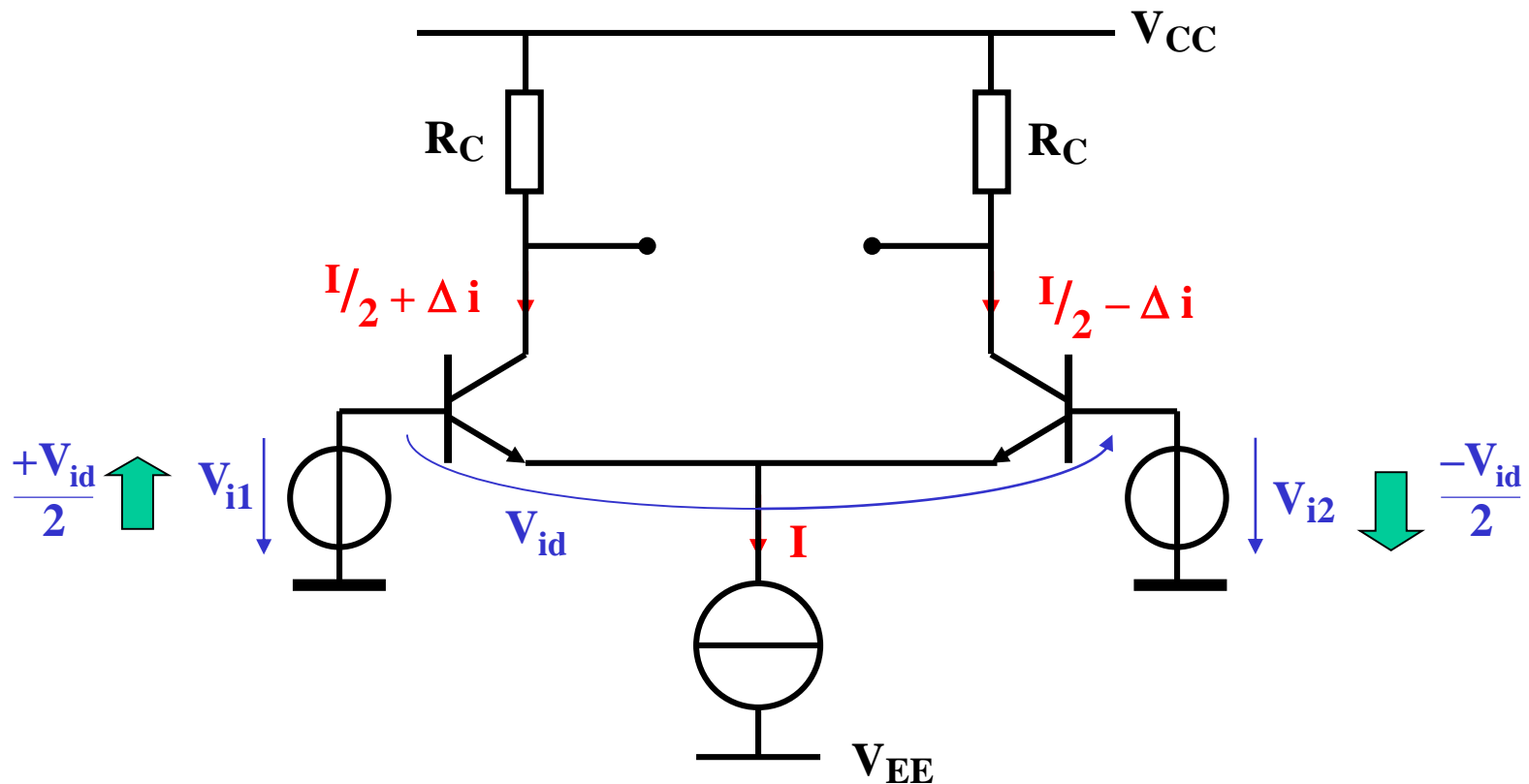


## 2. L'AMPLIFICATEUR DIFFERENTIEL : SCHEMA DE BASE ET PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

SIGNAL D'ENTRÉE DIFFÉRENTIEL NON-NUL "FAIBLE"

$$V_{i1} - V_{i2} = V_{BE1} - V_{BE2} = V_{id} \Rightarrow I_{C1} \neq I_{C2} \quad \text{mais: } I_{C1} + I_{C2} = I = \text{cst}$$

**DESEQUILIBRE FONCTION DE  $V_{id}$**

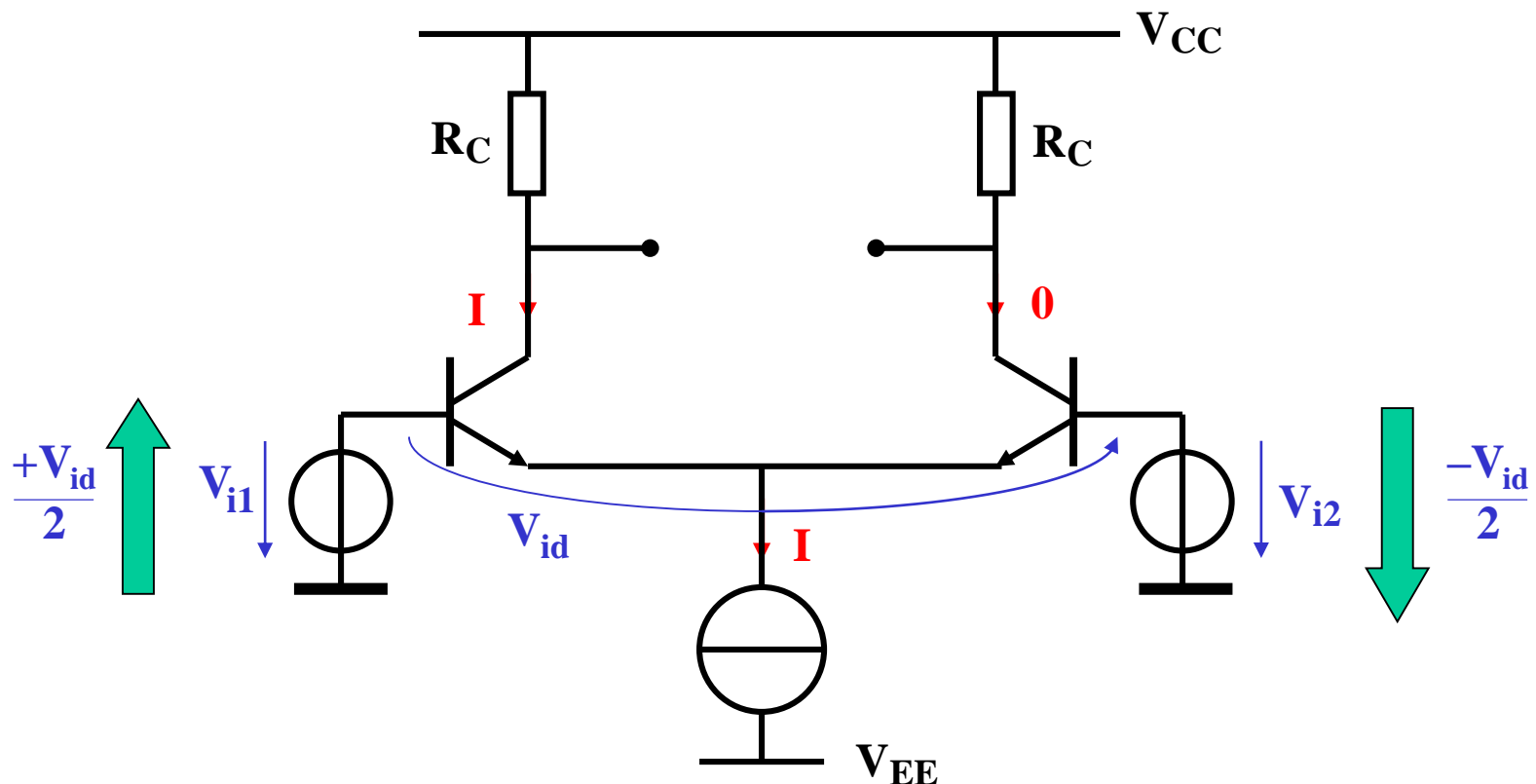


## 2. L'AMPLIFICATEUR DIFFERENTIEL : SCHEMA DE BASE ET PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

SIGNAL D'ENTRÉE DIFFÉRENTIEL NON-NUL "FORT"

Pour  $V_{i1} \gg V_{i2}$  la totalité du courant  $I$  passe par l'une des deux branches

**DESEQUILIBRE MAXIMUM** indépendant de  $V_{id}$

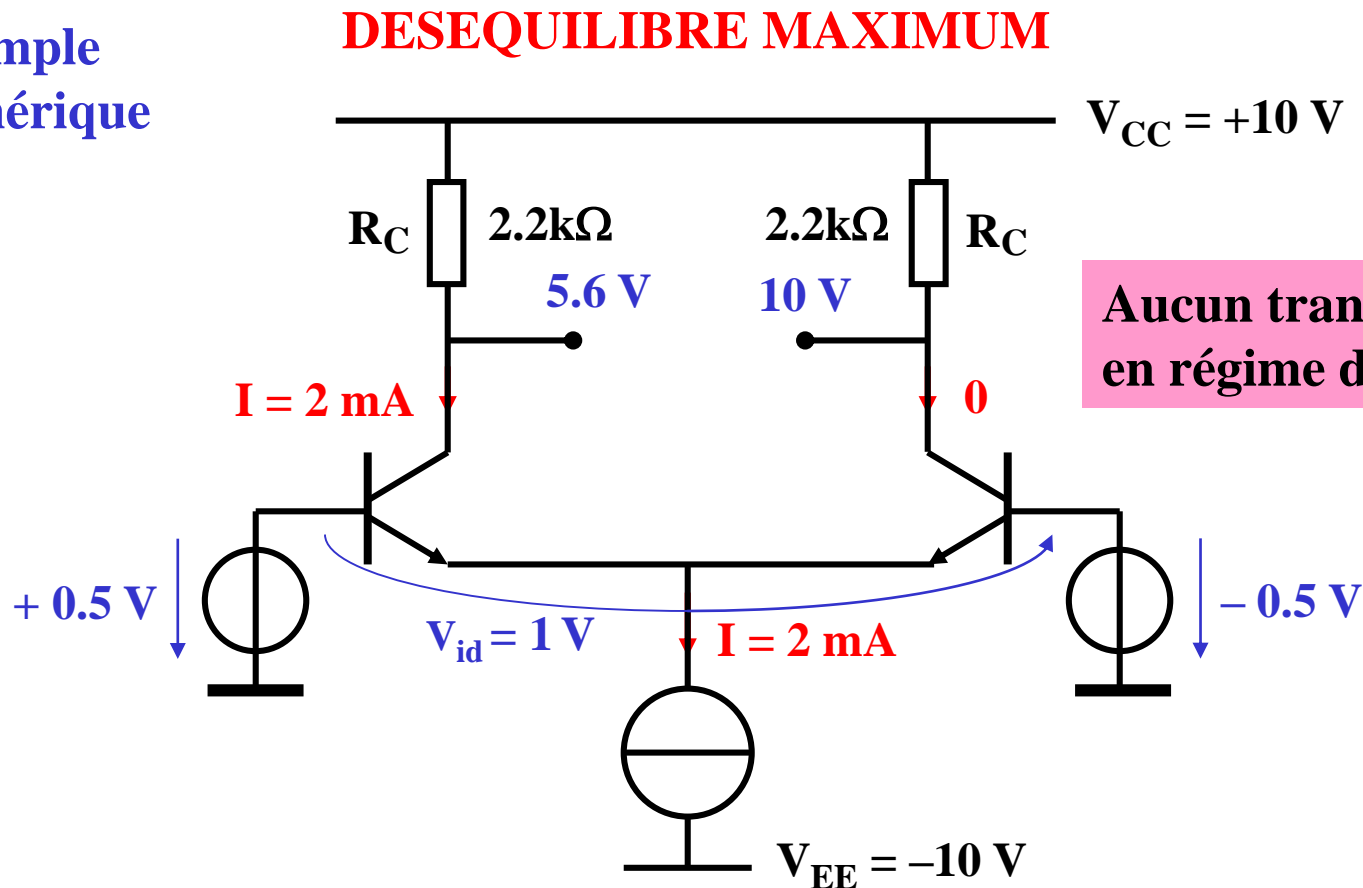


## 2. L'AMPLIFICATEUR DIFFERENTIEL : SCHEMA DE BASE ET PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

SIGNAL D'ENTRÉE DIFFÉRENTIEL NON-NUL "FORT"

Pour  $V_{i1} \gg V_{i2}$  la totalité du courant  $I$  passe par l'une des deux branches

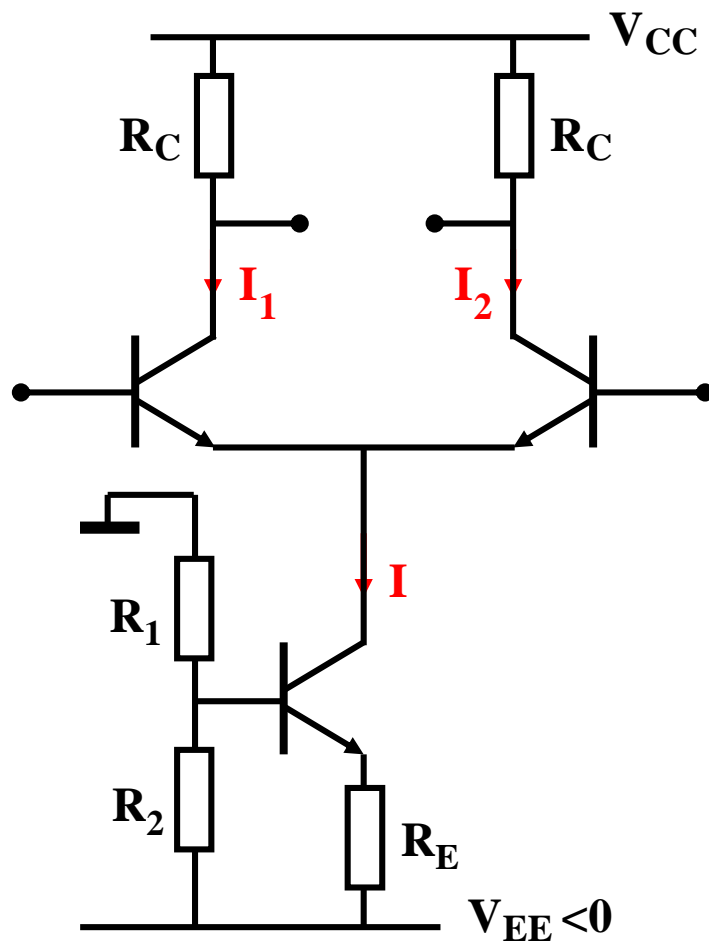
Exemple  
numérique



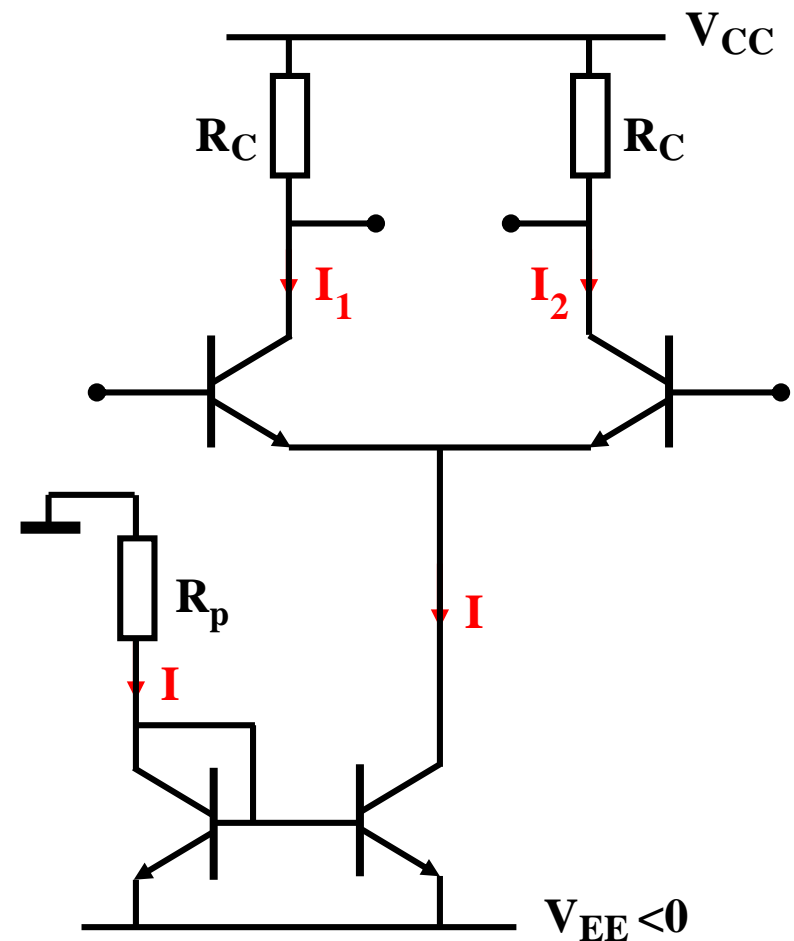
## 2. L'AMPLIFICATEUR DIFFERENTIEL : SCHEMA DE BASE ET PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

### EXEMPLES DE RÉALISATION DE LA SOURCE DE COURANT

#### ELÉMENTS DISCRETS



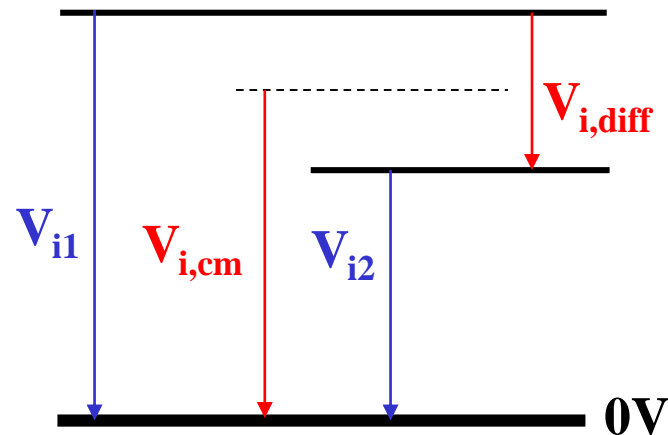
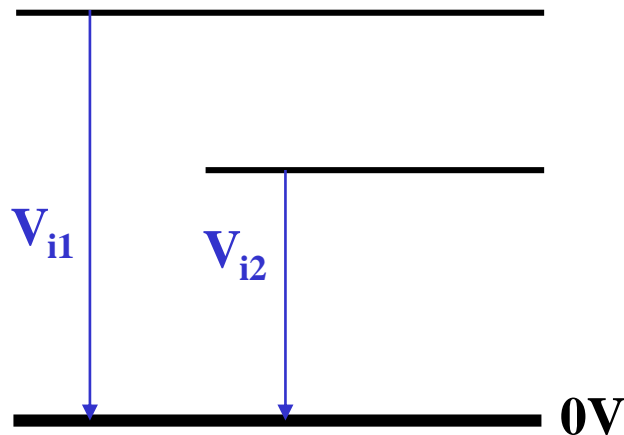
#### CIRCUIT INTÉGRÉ



## 2. L'AMPLIFICATEUR DIFFERENTIEL : SCHEMA DE BASE ET PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

### SIGNAUX D'ENTRÉE QUELCONQUES

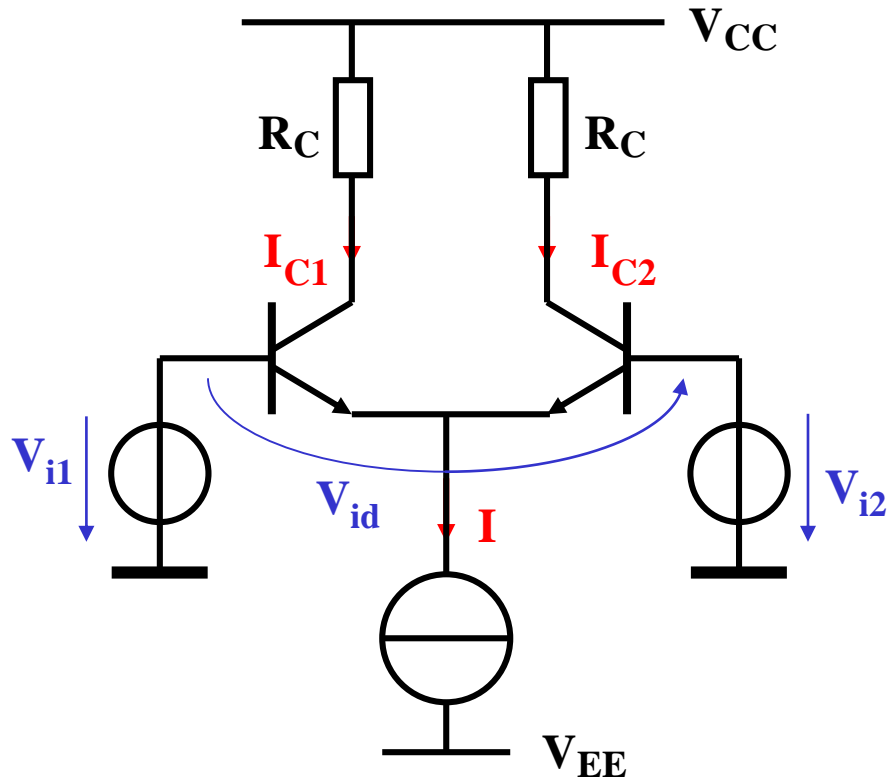
On peut toujours décomposer des signaux d'entrée quelconques en une composante de mode commun et une composante différentielle



$$V_{i,cm} = \frac{V_{i1} + V_{i2}}{2} \quad V_{i,diff} = V_{i1} - V_{i2}$$

$$V_{i1} = V_{i,cm} + \frac{V_{i,dif}}{2} \quad V_{i2} = V_{i,cm} - \frac{V_{i,dif}}{2}$$

### 3. L'AMPLIFICATEUR DIFFERENTIEL : CARACTÉRISTIQUE DE TRANSFERT "GRANDS SIGNAUX"



$$I_{C1} = I_S \cdot e^{V_{BE1}/U_T} \Rightarrow V_{BE1} = U_T \cdot \ln \frac{I_{C1}}{I_S}$$

$$I_{C2} = I_S \cdot e^{V_{BE2}/U_T} \Rightarrow V_{BE2} = U_T \cdot \ln \frac{I_{C2}}{I_S}$$

$$V_{id} = V_{i1} - V_{i2} = V_{BE1} - V_{BE2} = U_T \cdot \ln \frac{I_{C1}}{I_{C2}}$$

$$I_{C1} + I_{C2} = I \Rightarrow \begin{cases} I_{C1} = I/2 + \Delta I \\ I_{C2} = I/2 - \Delta I \end{cases}$$

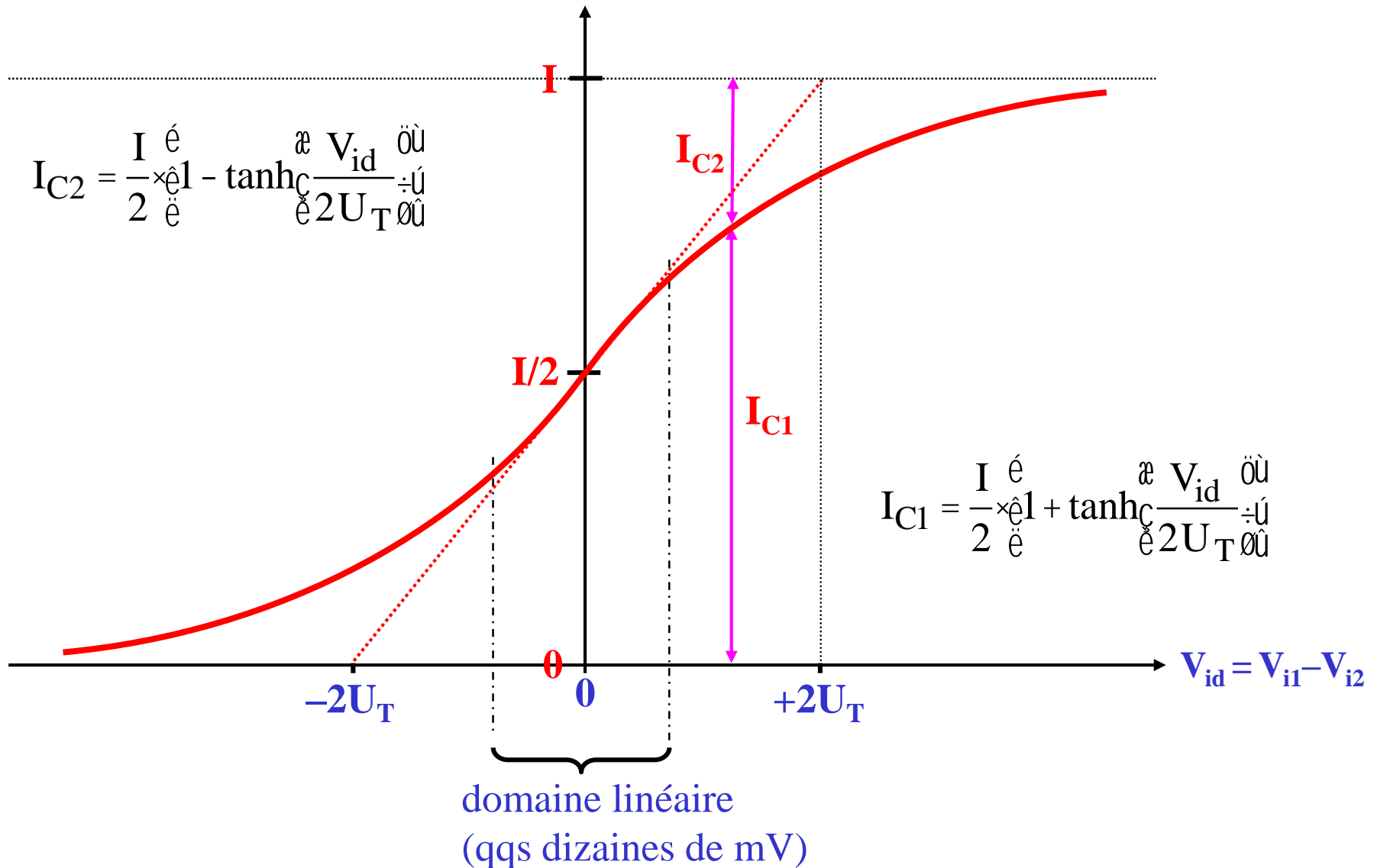
$$\text{solution: } \Delta I = \frac{I}{2} \cdot \tanh\left(\frac{V_{id}}{2 \cdot U_T}\right)$$

$$I_{C1} = \frac{I}{2} \cdot \left(1 + \tanh\left(\frac{V_{id}}{2 \cdot U_T}\right)\right)$$

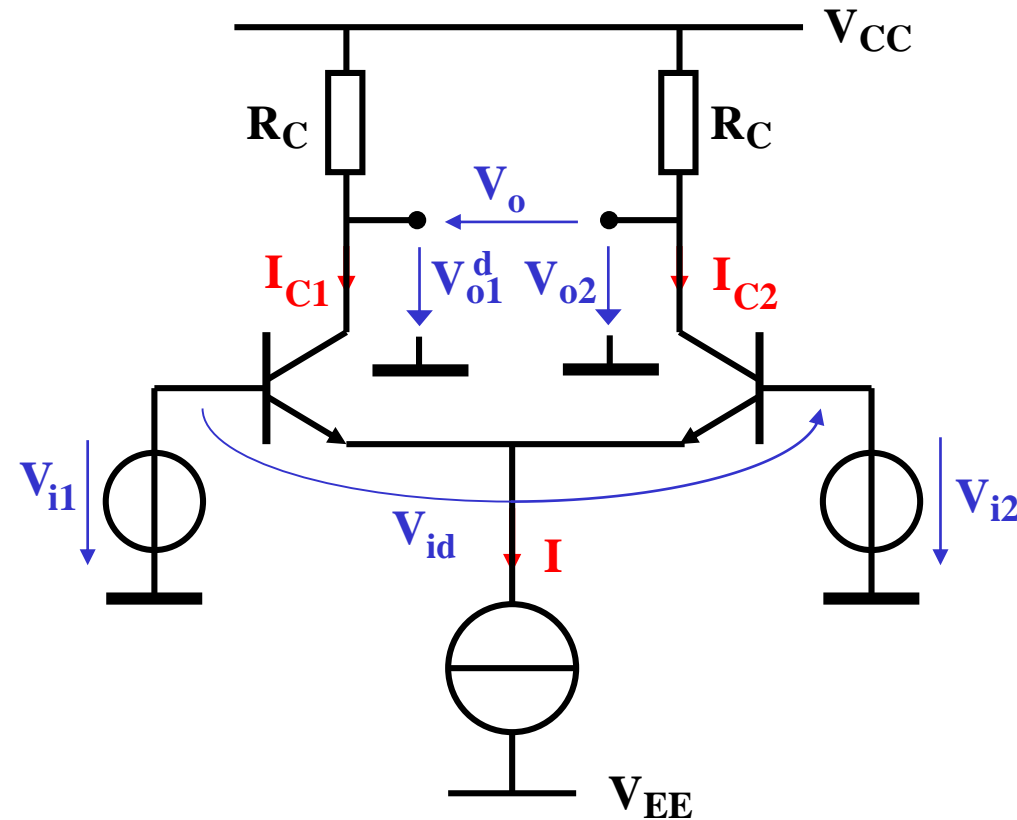
$$I_{C2} = \frac{I}{2} \cdot \left(1 - \tanh\left(\frac{V_{id}}{2 \cdot U_T}\right)\right)$$



### 3. L'AMPLIFICATEUR DIFFERENTIEL : CARACTÉRISTIQUE DE TRANSFERT "GRANDS SIGNAUX"



### 3. L'AMPLIFICATEUR DIFFERENTIEL : CARACTÉRISTIQUE DE TRANSFERT "GRANDS SIGNAUX"



$$I_{C1} = \frac{I}{2} \cdot \left(1 + \tanh\left(\frac{V_{id}}{2 \cdot U_T}\right)\right)$$

$$I_{C2} = \frac{I}{2} \cdot \left(1 - \tanh\left(\frac{V_{id}}{2 \cdot U_T}\right)\right)$$

$$V_{o1} = V_{CC} - I_{C1} \cdot R_C$$

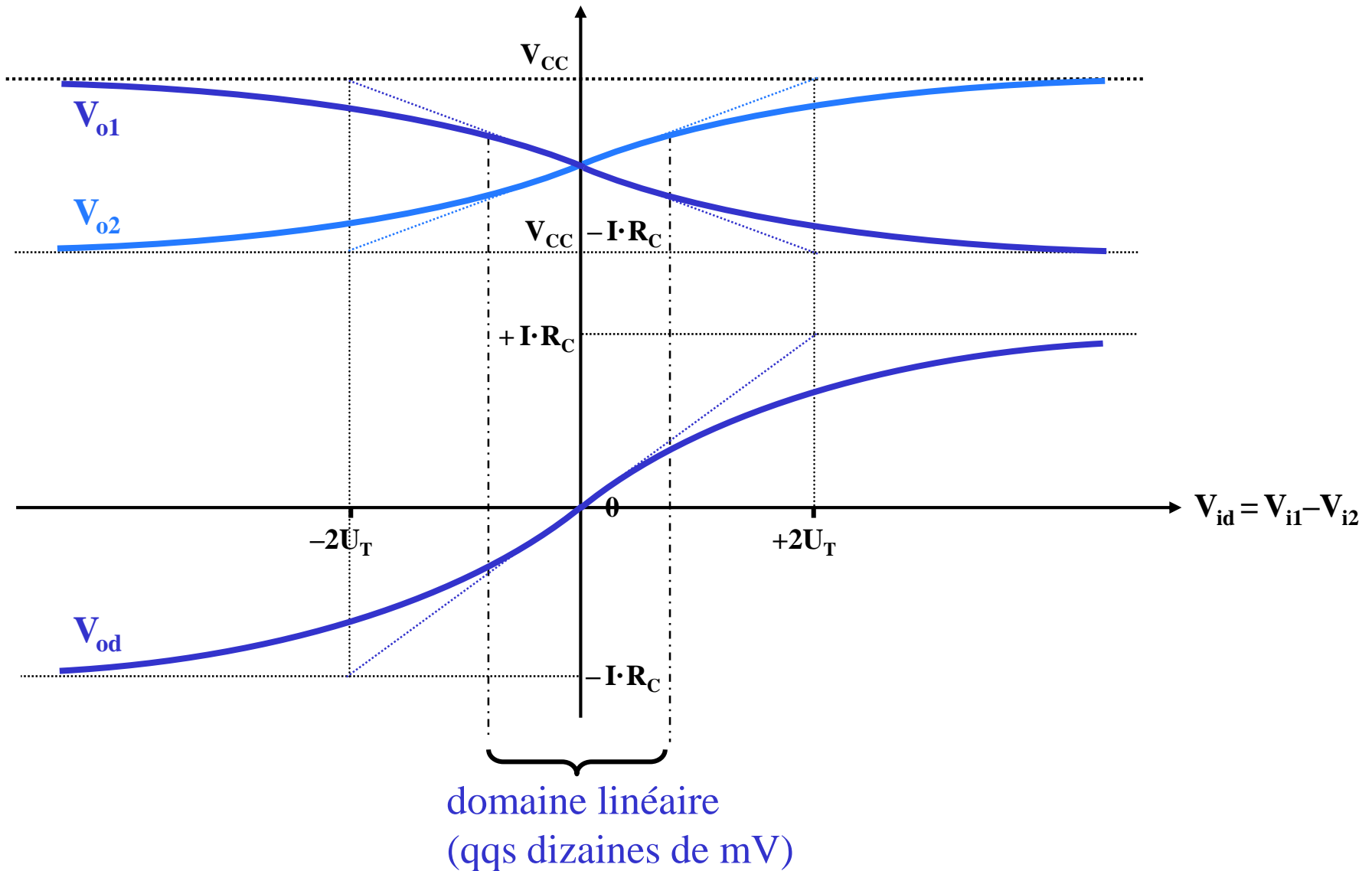
$$V_{o1} = V_{CC} - \frac{I \cdot R_C}{2} - \frac{I \cdot R_C}{2} \cdot \tanh\left(\frac{V_{id}}{2 \cdot U_T}\right)$$

$$V_{o2} = V_{CC} - I_{C2} \cdot R_C$$

$$V_{o2} = V_{CC} - \frac{I \cdot R_C}{2} + \frac{I \cdot R_C}{2} \cdot \tanh\left(\frac{V_{id}}{2 \cdot U_T}\right)$$

$$V_{od} = V_{o2} - V_{o1} = + I \cdot R_C \cdot \tanh\left(\frac{V_{id}}{2 \cdot U_T}\right)$$

### 3. L'AMPLIFICATEUR DIFFERENTIEL : CARACTÉRISTIQUE DE TRANSFERT "GRANDS SIGNAUX"



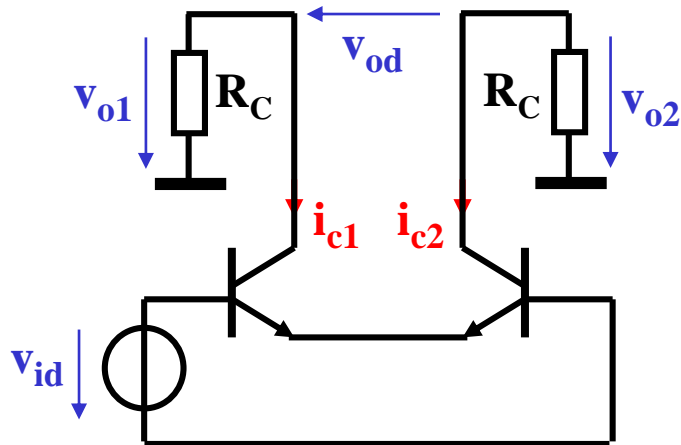
# 4. L'AMPLIFICATEUR DIFFÉRENTIEL : COMPORTEMENT "PETITS SIGNAUX" AVEC CHARGES RÉSISTIVES

## 4.1. GAIN EN TENSION DIFFÉRENTIEL $A_d$

### MÉTHODE 1

Linéarisation (tangente) de la caractéristique de transfert "Grands Signaux"  
autour de l'origine  $V_{id} = 0$

Schéma "petits signaux"



au repos :  $I_{C1,0} = I_{C2,0} = I/2$

$$\Rightarrow g_{m1} = g_{m2} = g_m = \frac{I}{2 \cdot U_T}$$

Grands Signaux:  $V_{od} = + I \cdot R_C \cdot \tanh\left(\frac{V_{id}}{2 \cdot U_T}\right)$

Pour x petit:  $\tanh(x) = x$

Petits Signaux:  $v_{od} = + I \cdot R_C \cdot \frac{v_{id}}{2 \cdot U_T}$

sortie diff. :  $A_d = \frac{v_{od}}{v_{id}} = \frac{I}{2 \cdot U_T} \cdot R_C = g_m \cdot R_C$

sortie asym. : gain en tension divisé par 2

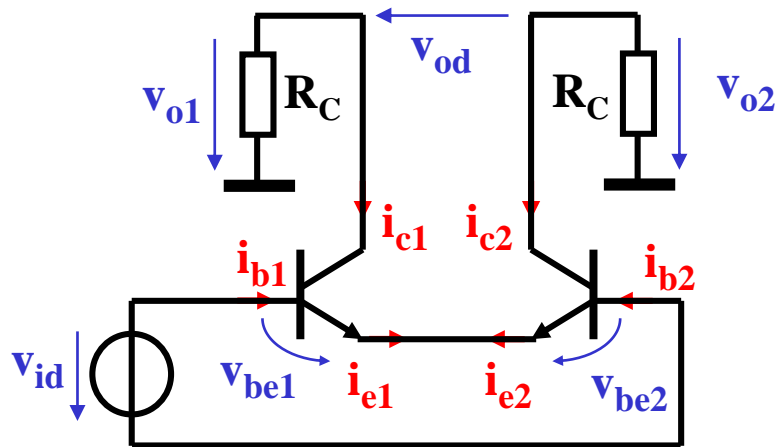
# 4. L'AMPLIFICATEUR DIFFÉRENTIEL : COMPORTEMENT "PETITS SIGNAUX" AVEC CHARGES RÉSISTIVES

## 4.1. GAIN EN TENSION DIFFÉRENTIEL $A_d$

## MÉTHODE 2

Calcul direct sur le schéma "petits signaux"

Schéma "petits signaux"



au repos :  $I_{C1,0} = I_{C2,0} = I/2$

$$\Rightarrow g_{m1} = g_{m2} = g_m = I/2U_T$$

$$i_{e1} \approx i_{c1} = g_m \cdot v_{be1} \quad i_{e2} \approx i_{c2} = g_m \cdot v_{be2}$$

$$i_{e1} + i_{e2} = 0 \quad \Rightarrow \quad v_{be1} = -v_{be2}$$

$$v_{be1} - v_{be2} = v_{id} \quad \Rightarrow \quad \begin{aligned} v_{be1} &= +v_{id}/2 \\ v_{be2} &= -v_{id}/2 \end{aligned}$$

$$v_{o1} = -R_C \cdot i_{c1} = -g_m \cdot R_C \cdot v_{be1} = -\frac{g_m \cdot R_C}{2} \cdot v_{id}$$

$$v_{o2} = -R_C \cdot i_{c2} = -g_m \cdot R_C \cdot v_{be2} = +\frac{g_m \cdot R_C}{2} \cdot v_{id}$$

$$v_{od} = v_{o2} - v_{o1} = +g_m \cdot R_C \cdot v_{id}$$

$$\text{sortie diff. :} \quad A_d = \frac{v_{od}}{v_{id}} = g_m \cdot R_C = \frac{I}{2 \cdot U_T} \cdot R_C$$

sortie asym. : gain en tension divisé par 2

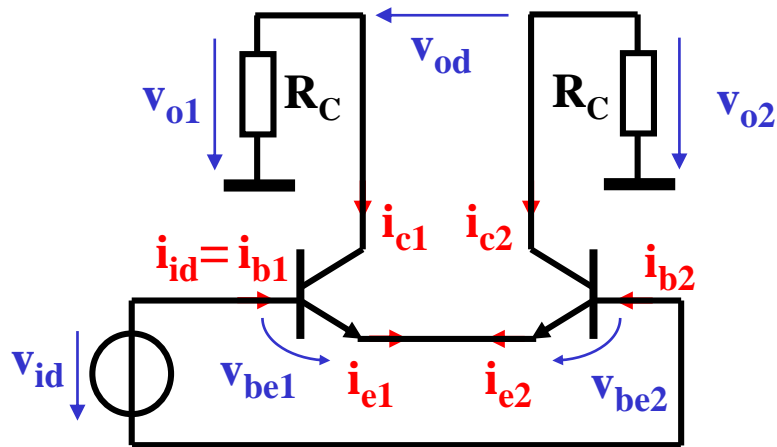
# 4. L'AMPLIFICATEUR DIFFÉRENTIEL : COMPORTEMENT "PETITS SIGNAUX" AVEC CHARGES RÉSISTIVES

## 4.1. RÉSISTANCE D'ENTRÉE DIFFÉRENTIELLE $R_{id}$

## MÉTHODE 2

Calcul direct sur le schéma "petits signaux"

Schéma "petits signaux"



$$i_{e1} \approx i_{c1} = g_m \cdot v_{be1} \quad i_{e2} \approx i_{c2} = g_m \cdot v_{be2}$$

$$i_{e1} + i_{e2} = 0 \quad \Rightarrow \quad v_{be1} = -v_{be2}$$

$$v_{be1} - v_{be2} = v_{id} \quad \Rightarrow \quad \begin{aligned} v_{be1} &= +v_{id}/2 \\ v_{be2} &= -v_{id}/2 \end{aligned}$$

$$i_{b1} = g_{be} \cdot v_{be1} = g_{be} \cdot \frac{+v_{id}}{2}$$

$$i_{b2} = g_{be} \cdot v_{be2} = g_{be} \cdot \frac{-v_{id}}{2} = -i_{b1}$$

$$\text{au repos : } I_{C1,0} = I_{C2,0} = I/2$$

$$\Rightarrow g_{m1} = g_{m2} = g_m = I/2U_T$$

$$\text{si : } \beta_1 = \beta_2 = \beta$$

$$\Rightarrow g_{be1} = g_{be2} = g_{be} = I/2\beta U_T$$

$$R_{id} = \frac{v_{id}}{i_{id}} = \frac{2}{g_{be}} = \frac{4 \cdot \beta \cdot U_T}{I}$$

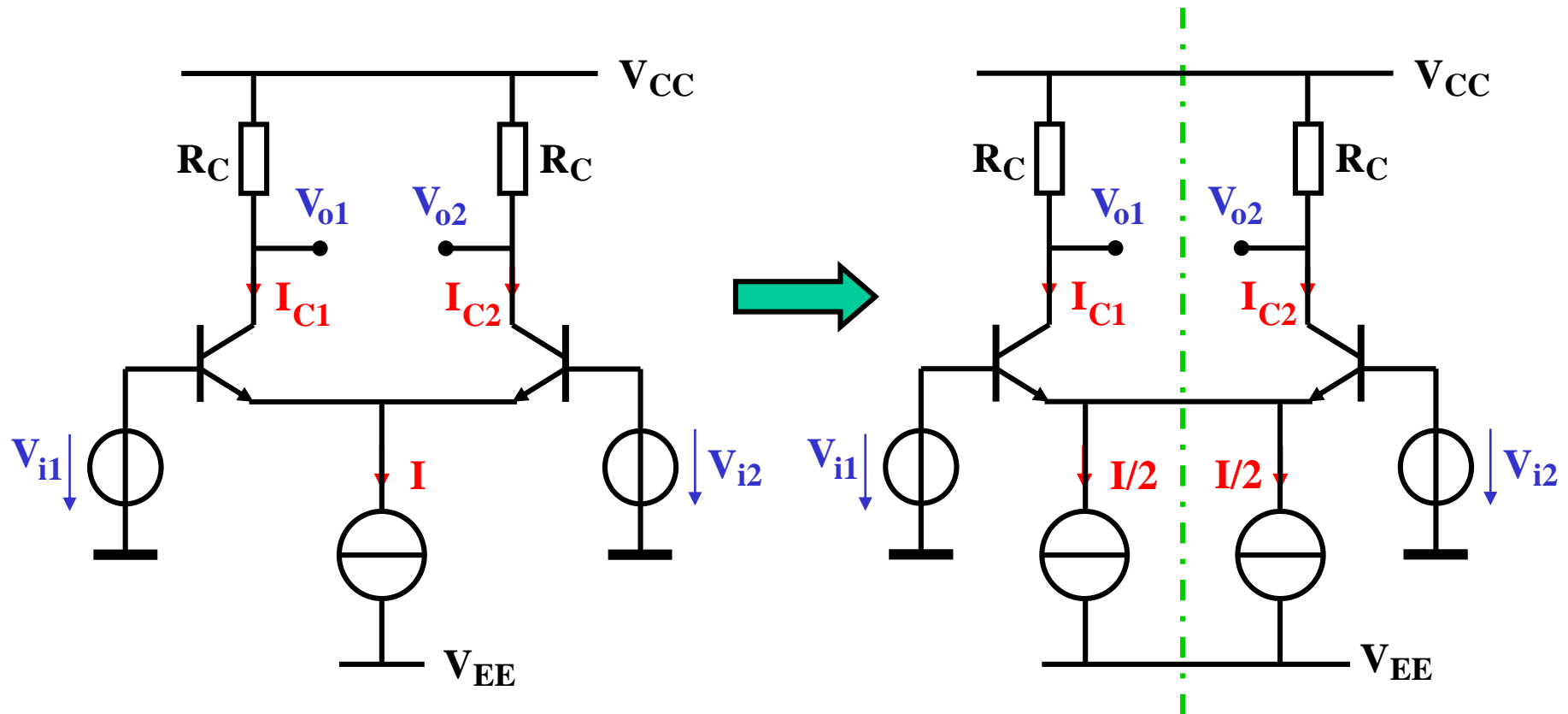
## 4. L'AMPLIFICATEUR DIFFÉRENTIEL : COMPORTEMENT "PETITS SIGNAUX" AVEC CHARGES RÉSISTIVES

### 4.1. GAIN EN TENSION DIFFÉRENTIEL $A_d$

### MÉTHODE 3

Méthode du demi-circuit équivalent

Cette méthode repose sur la symétrie parfaite de l'ampli différentiel



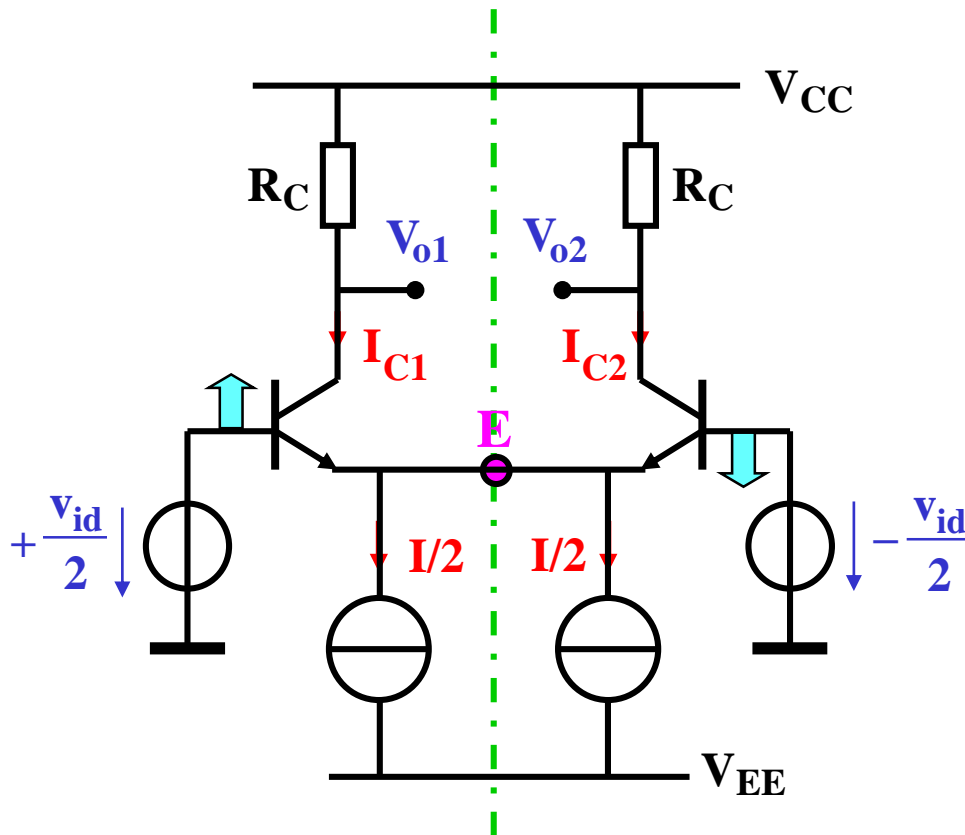
## 4. L'AMPLIFICATEUR DIFFÉRENTIEL : COMPORTEMENT "PETITS SIGNAUX" AVEC CHARGES RÉSISTIVES

### 4.1. GAIN EN TENSION DIFFÉRENTIEL $A_d$

### MÉTHODE 3

Méthode du demi-circuit équivalent

Cette méthode repose sur la symétrie parfaite de l'ampli différentiel



On applique aux entrées  
des petits signaux symétriques :

$$V_{i1} = -V_{i2} = v_{id}/2$$

En raison de la symétrie,  
le potentiel du point E  
reste constant.  
Dans le schéma "petit  
signaux" cela équivaut à  
une masse !



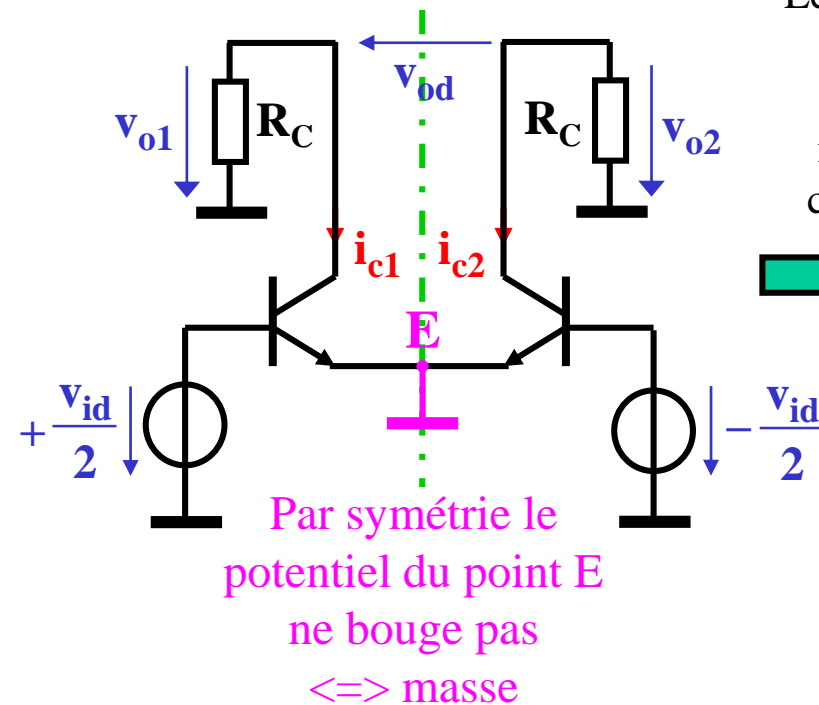
# 4. L'AMPLIFICATEUR DIFFÉRENTIEL : COMPORTEMENT "PETITS SIGNAUX" AVEC CHARGES RÉSISTIVES

## 4.1. GAIN EN TENSION DIFFÉRENTIEL $A_d$

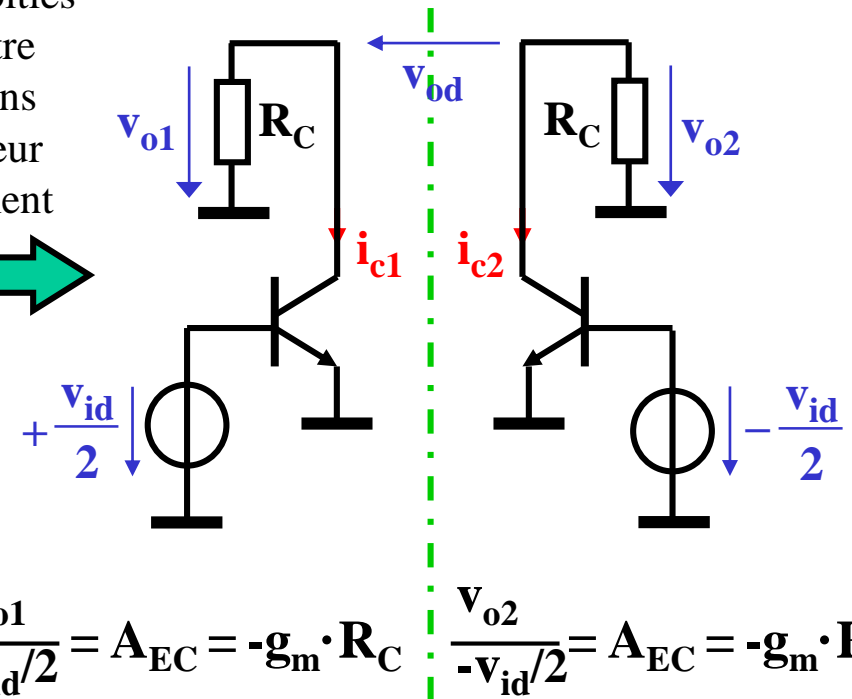
## MÉTHODE 3

### Demi-circuit équivalent en mode différentiel

Schéma "petits signaux"



Les deux moitiés peuvent être séparées sans modifier leur comportement



au repos :  $I_{C1,0} = I_{C2,0} = I/2$

$\Rightarrow g_{m1} = g_{m2} = g_m = I/2U_T$

$$A_d = \frac{v_{od}}{v_{id}} = \frac{v_{o2} - v_{o1}}{v_{id}} = g_m \cdot R_C = \frac{I}{2 \cdot U_T} \cdot R_C$$

## 4. L'AMPLIFICATEUR DIFFÉRENTIEL : COMPORTEMENT "PETITS SIGNAUX" AVEC CHARGES RÉSISTIVES

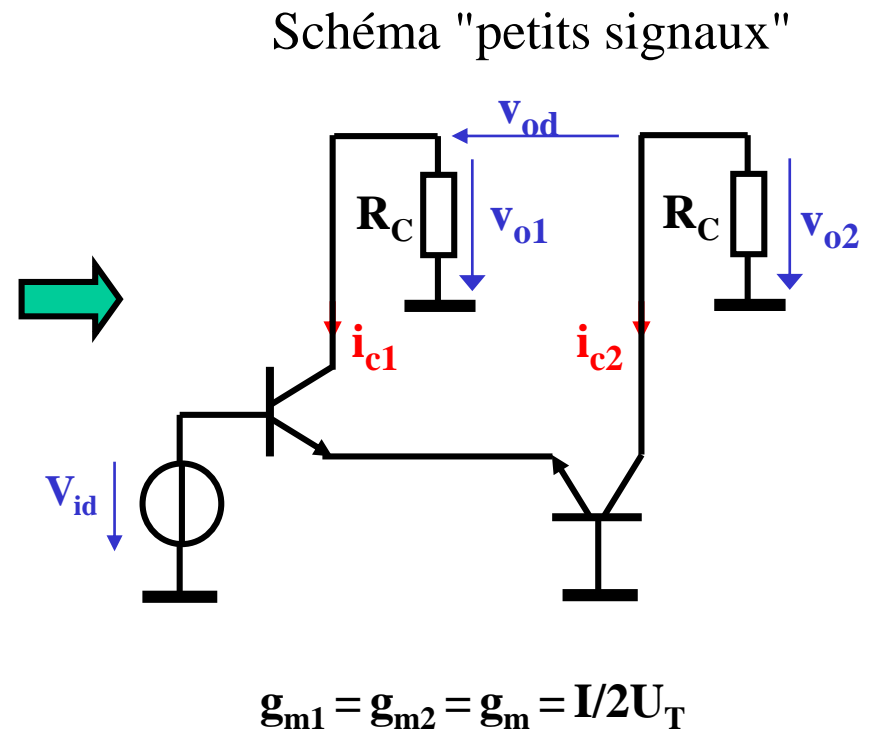
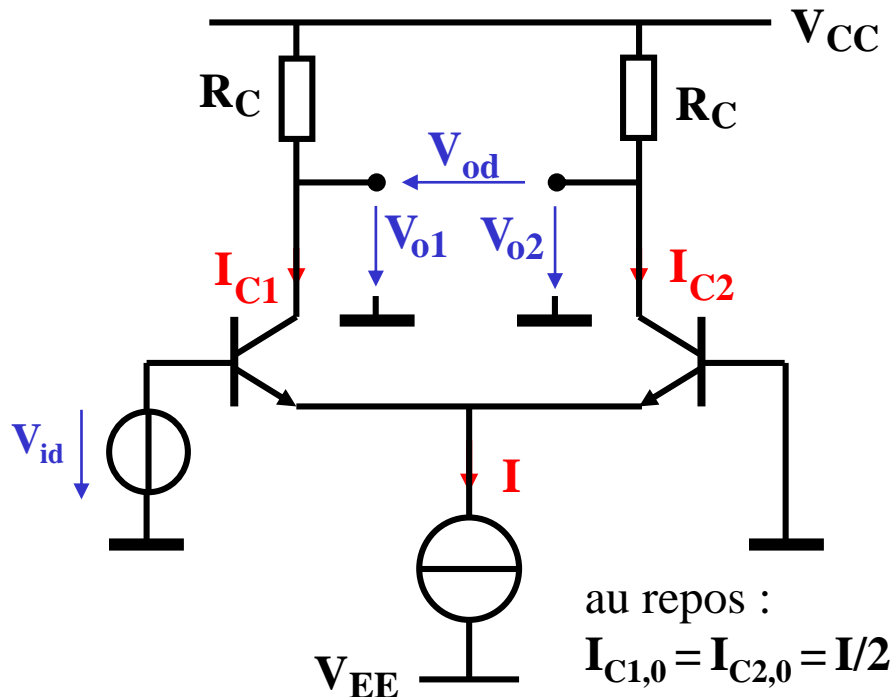
### 4.1. GAIN EN TENSION DIFFÉRENTIEL $A_d$

### MÉTHODE 4

#### Méthode de l'entrée asymétrique

On applique la totalité de la tension d'entrée sur une seule des entrées, l'autre entrée étant connectée à la masse.

**Cette opération ne modifie en rien la tension différentielle d'entrée ni le gain différentiel.**



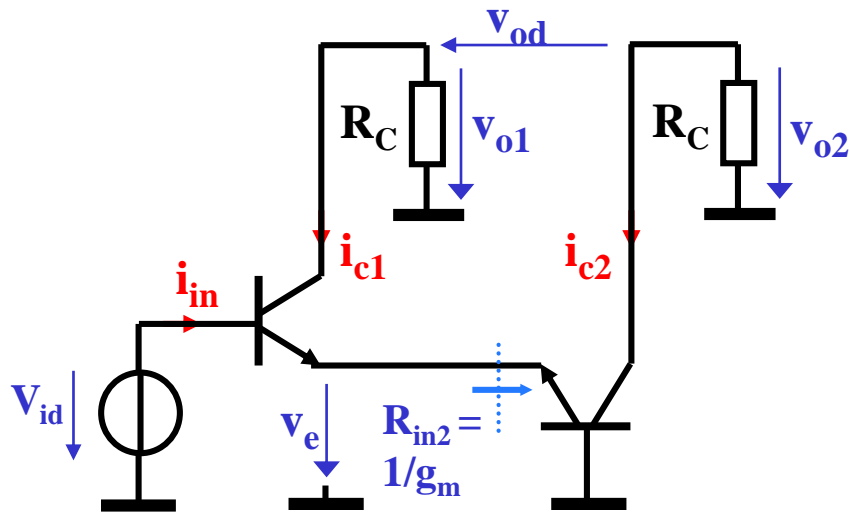
# 4. L'AMPLIFICATEUR DIFFÉRENTIEL : COMPORTEMENT "PETITS SIGNAUX" AVEC CHARGES RÉSISTIVES

## 4.1. GAIN EN TENSION DIFFÉRENTIEL $A_d$ ET RÉSISTANCE D'ENTRÉE $R_{id}$

### MÉTHODE 4

#### Méthode de l'entrée asymétrique

Schéma "petits signaux"



$$g_{m1} = g_{m2} = g_m = I/2U_T$$

$$\text{si : } \beta_1 = \beta_2 = \beta$$

$$\frac{v_{o1}}{v_{id}} = A_{ECdég.} = \frac{-g_m \cdot R_C}{1 + g_m \cdot R_{in2}} = -\frac{g_m \cdot R_C}{2}$$

$$\frac{v_{o2}}{v_{id}} = \frac{v_e}{v_{id}} \cdot \frac{v_{o2}}{v_e} = A_{CC} \cdot A_{BC}$$

$$\frac{v_{o2}}{v_{id}} = \frac{g_m \cdot R_{in2}}{1 + g_m \cdot R_{in2}} \cdot g_m \cdot R_C = +\frac{g_m \cdot R_C}{2}$$

$$A_d = \frac{v_{od}}{v_{id}} = \frac{v_{o2} - v_{o1}}{v_{id}} = g_m \cdot R_C = \frac{I}{2 \cdot U_T} \cdot R_C$$

$$R_{id} = \frac{v_{id}}{i_{in}} = \frac{1}{g_{be1}} + \beta_1 \cdot R_{in2}$$

$$R_{id} = \frac{v_{id}}{i_{in}} = \frac{2}{g_{be}} = \frac{2\beta}{g_m} = \frac{4 \cdot \beta \cdot U_T}{I}$$

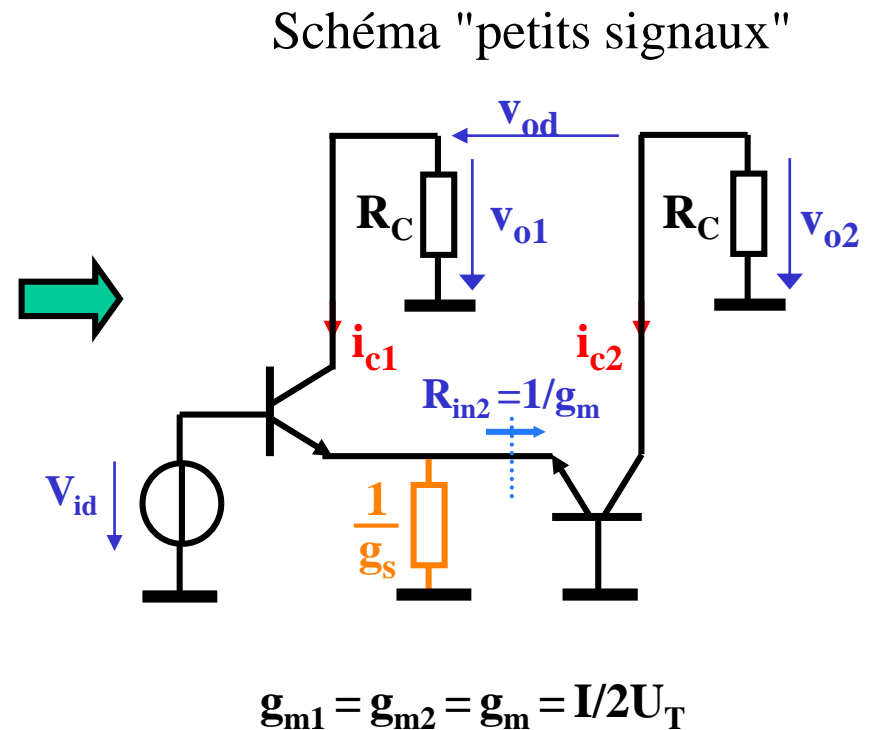
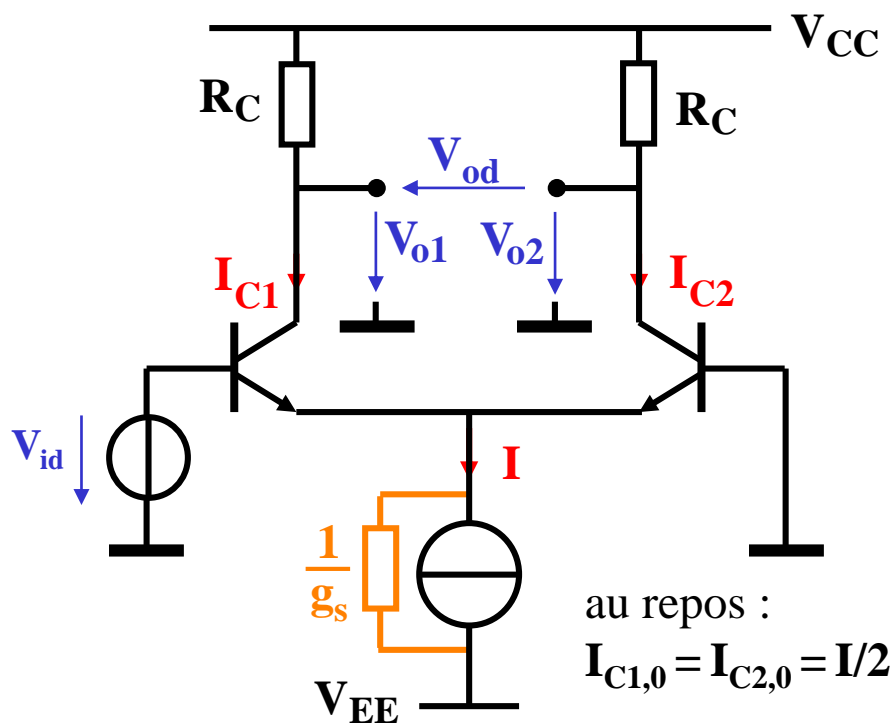
# 4. L'AMPLIFICATEUR DIFFÉRENTIEL : COMPORTEMENT "PETITS SIGNAUX" AVEC CHARGES RÉSISTIVES

## 4.1. GAIN EN TENSION DIFFÉRENTIEL $A_d$

### MÉTHODE 4

#### Méthode de l'entrée asymétrique

Effet de la résistance non-infinie de la source de courant sur le gain  $A_d$

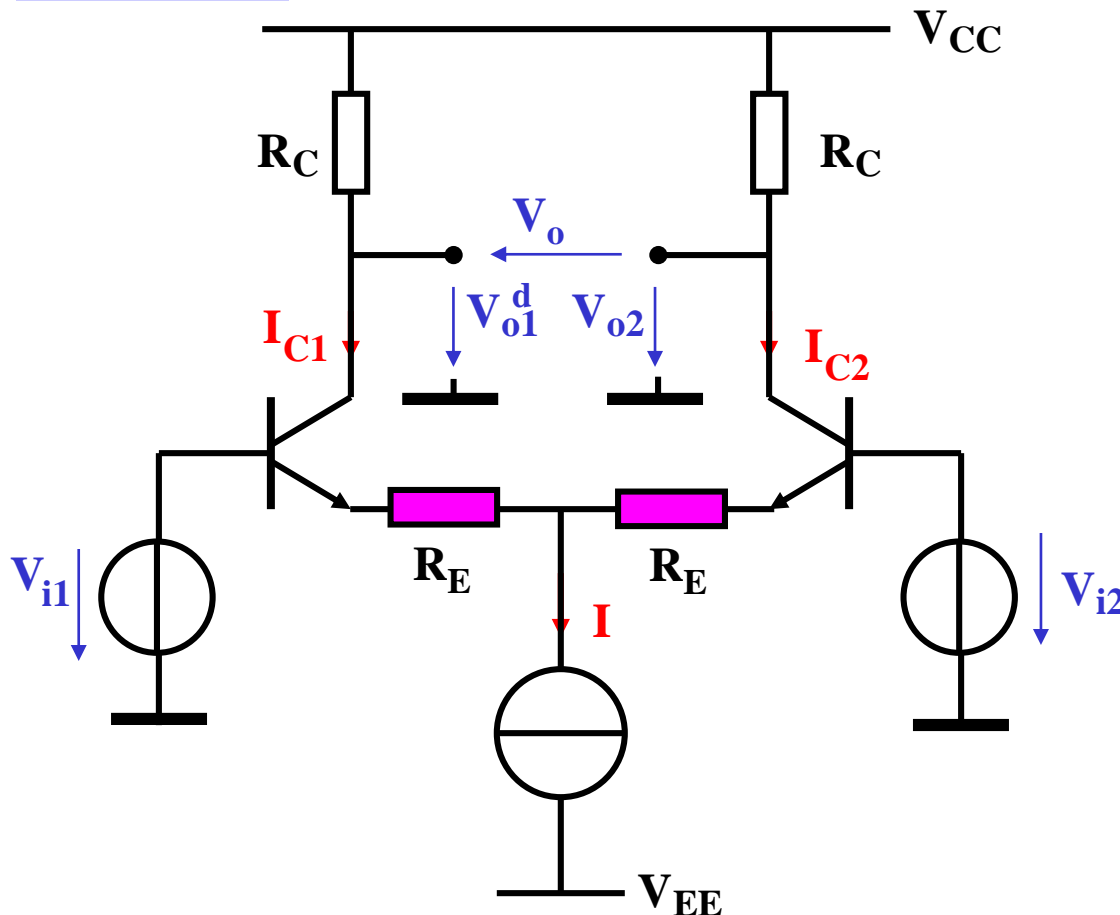


$g_s$  n'affecte pas le gain différentiel  $A_d$  pour autant que  $g_s \ll g_m$

## 4. L'AMPLIFICATEUR DIFFÉRENTIEL : COMPORTEMENT "PETITS SIGNAUX" AVEC CHARGES RÉSISTIVES

### 4.2. L'AMPLI DIFFÉRENTIEL DÉGÉNÉRÉ

#### SCHÉMA

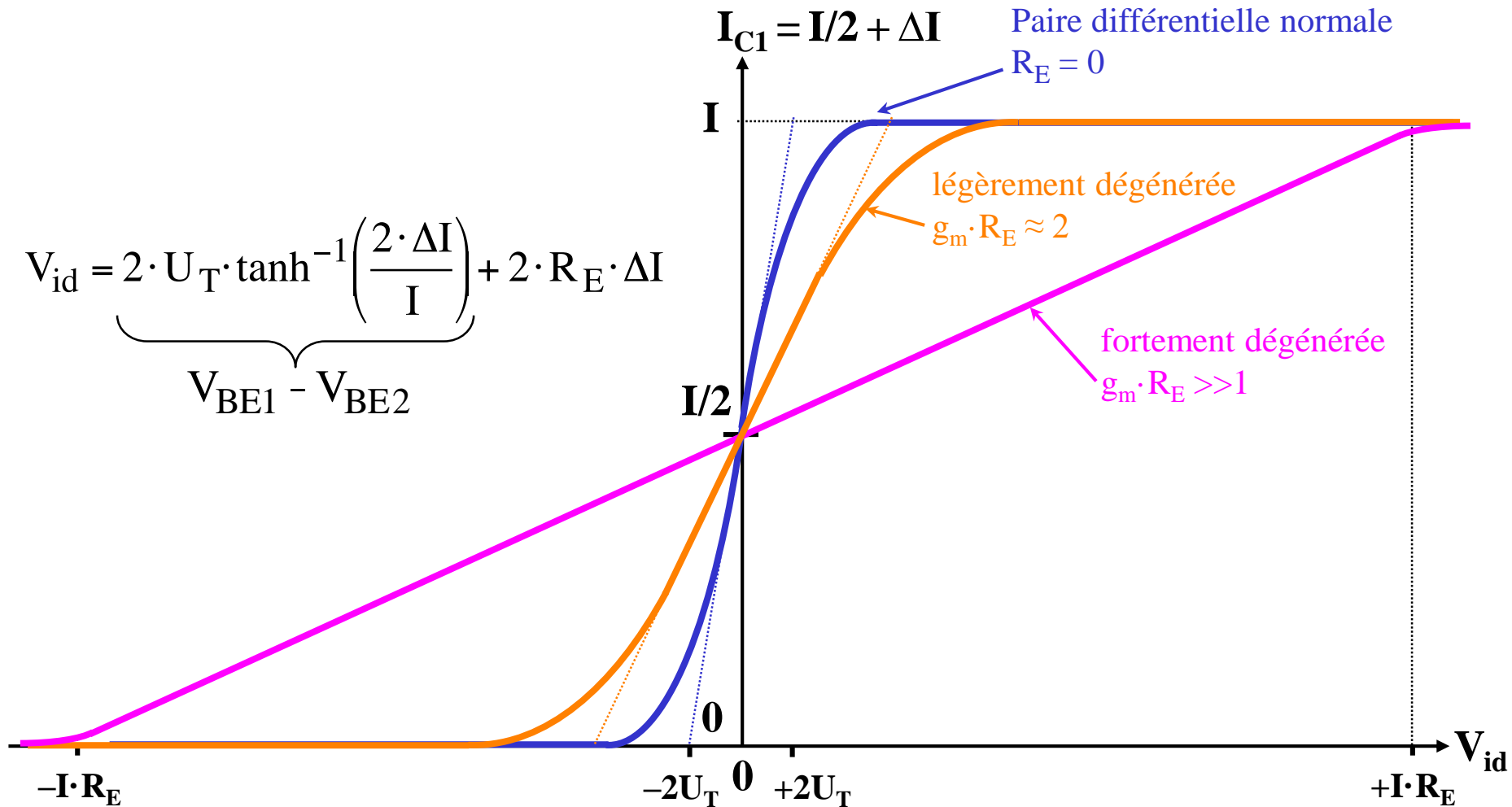


#### Effet des résistances $R_E$ :

- Réduction du gain  $A_d$
- Contrôle précis de la valeur du gain  $A_d$
- Augmentation de la plage de linéarité
- Augmentation de la résistance d'entrée différentielle  $R_{id}$

# 4. L'AMPLIFICATEUR DIFFÉRENTIEL : COMPORTEMENT "PETITS SIGNAUX" AVEC CHARGES RÉSISTIVES

## 4.2. CARACTÉRISTIQUE "GRAND SIGNAUX" DE L'AMPLI DIFFÉRENTIEL DÉGÉNÉRÉ

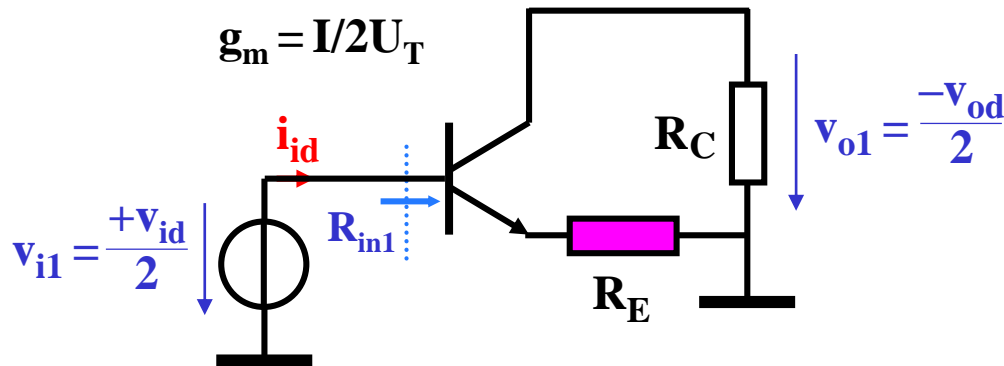


# 4. L'AMPLIFICATEUR DIFFÉRENTIEL : COMPORTEMENT "PETITS SIGNAUX" AVEC CHARGES RÉSISTIVES

## 4.2. GAIN EN TENSION DIFFÉRENTIEL $A_d$ DE L'AMPLI DIFFÉRENTIEL DÉGÉNÉRÉ

Méthode du demi-circuit  
équivalent en mode  
différentiel

Schéma "petits signaux"



$$\frac{v_{o1}}{v_{i1}} = A_{ECdég.} = \frac{-g_m \cdot R_C}{1 + g_m \cdot R_E}$$

$$\frac{v_{od}}{v_{id}} = \frac{-2v_{o1}}{2v_{i1}} = -\frac{v_{o1}}{v_{i1}}$$

$$R_{in1} = \frac{v_{i1}}{i_{id}} = \frac{1}{g_{be}} + \beta \cdot R_E$$

$$R_{id} = \frac{v_{id}}{i_{id}} = \frac{2v_{i1}}{i_{id}} = 2 \cdot R_{in1}$$

$$R_{id} = \frac{v_{id}}{i_{id}} = \frac{2}{g_{be}} + 2 \cdot \beta \cdot R_E$$

sortie différentielle :  $A_d = \frac{g_m \cdot R_C}{1 + g_m \cdot R_E}$

si :  $R_E \gg \frac{1}{g_m}$

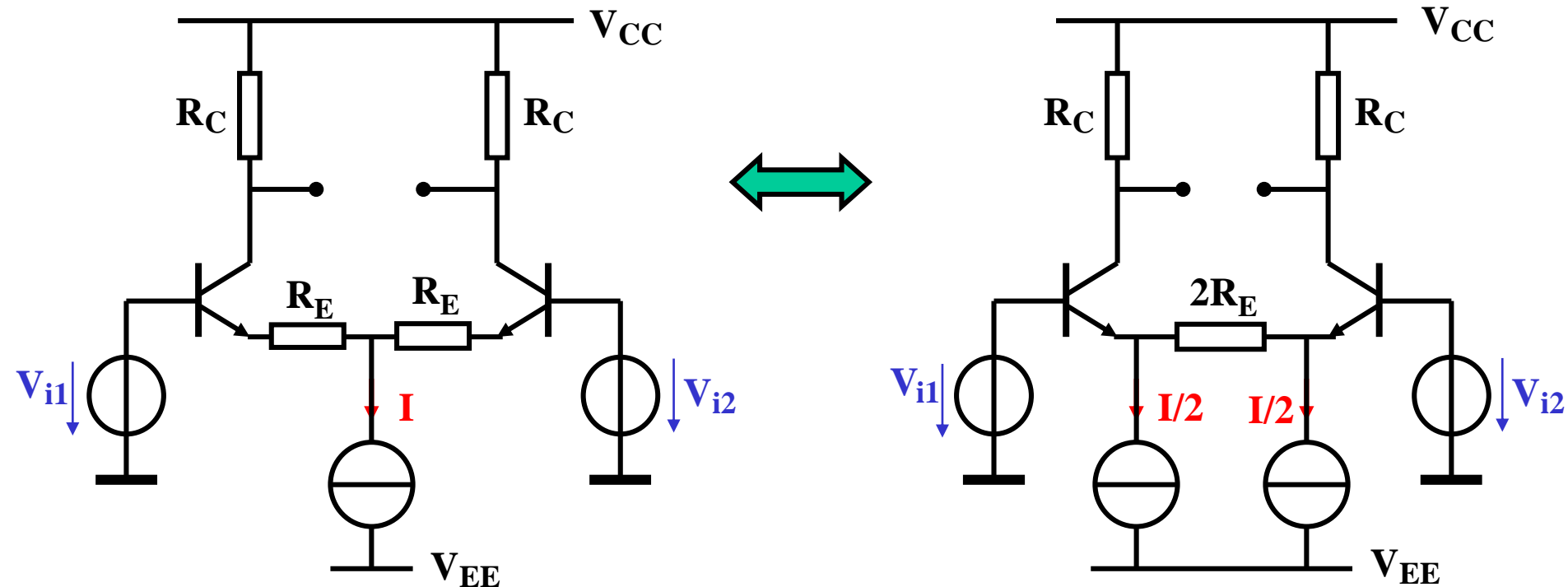
$$A_d = \frac{R_C}{R_E}$$

sortie asymétrique : gain divisé par 2

## 4. L'AMPLIFICATEUR DIFFÉRENTIEL : COMPORTEMENT "PETITS SIGNAUX" AVEC CHARGES RÉSISTIVES

### 4.2. AMPLI DIFFÉRENTIEL DÉGÉNÉRÉ, RÉALISATION PRATIQUE

#### VARIANTE DU SCHÉMA DE BASE

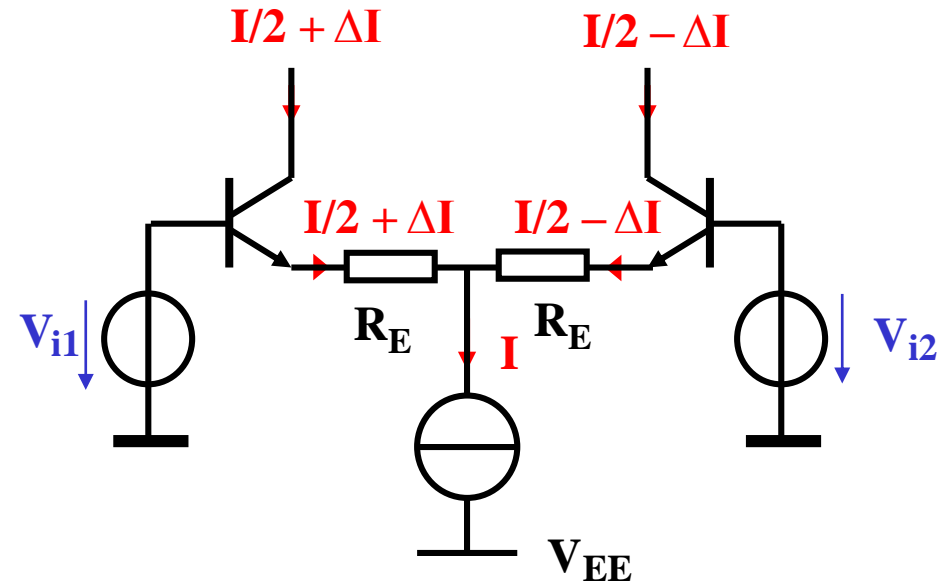


Le comportement "petits signaux" et le gain  $A_d$  ainsi que la résistance d'entrée  $R_{id}$  différentiels sont identiques car ces deux variantes ont le même demi-circuit équivalent et le même schéma "petits signaux".

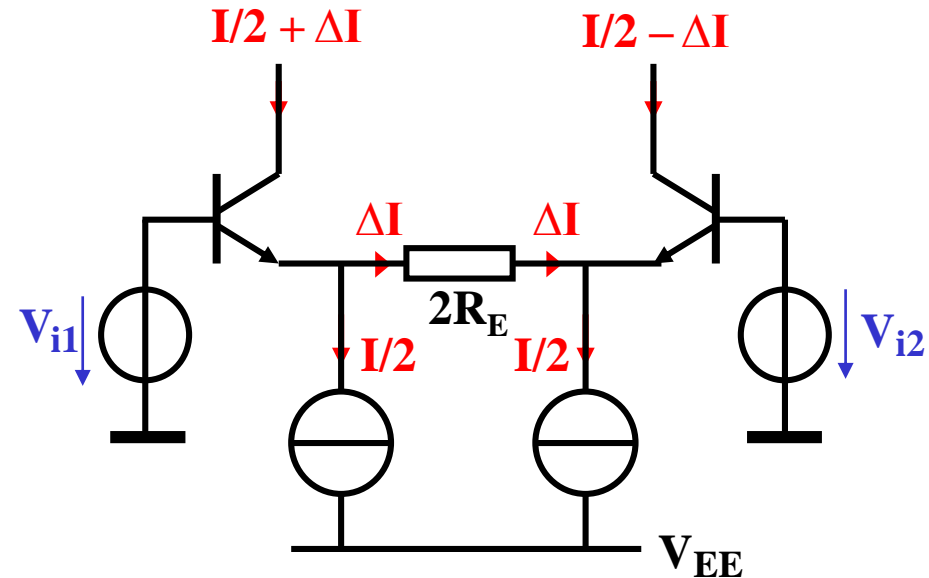


## 4. L'AMPLIFICATEUR DIFFÉRENTIEL : COMPORTEMENT "PETITS SIGNAUX" AVEC CHARGES RÉSISTIVES

### 4.2. AMPLI DIFFÉRENTIEL DÉGÉNÉRÉ, DYNAMIQUE D'ENTRÉE



Les résistances  $R_E$  sont parcourues par le courant de polarisation et le courant différentiel. La chute de tension constante  $R_E \cdot I/2$  diminue d'autant la dynamique d'entrée de mode commun.

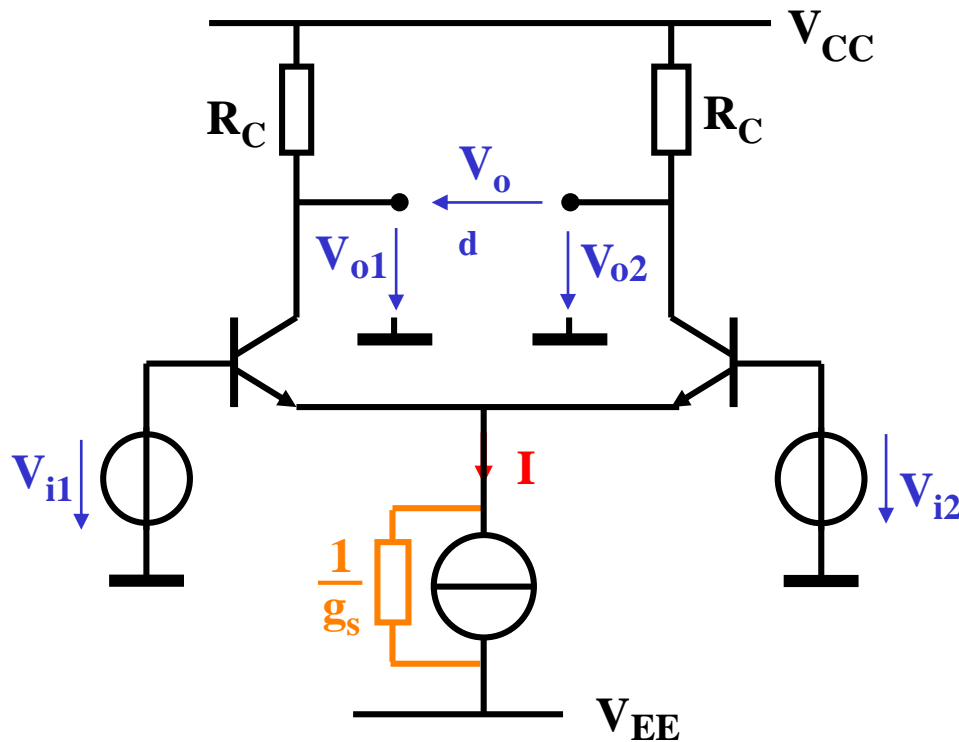


La résistance  $2R_E$  est parcourue uniquement par le courant différentiel.

**Solution préférée en circuit intégré.**

## 4. L'AMPLIFICATEUR DIFFERENTIEL : COMPORTEMENT "PETITS SIGNAUX" AVEC CHARGES RÉSISTIVES

### 4.3. GAIN DE MODE COMMUN $A_c$



On applique le même signal aux 2 entrées de l'ampli différentiel :

$$V_{i1} = V_{i2} = V_{icm}$$

Le gain de mode commun  $A_c$  est défini dans ces conditions par:

$$A_c = \frac{\Delta V_{o1}}{V_{icm}} = \frac{\Delta V_{o2}}{V_{icm}} \quad (*)$$

(\*) Valable pour un appariement parfait des composants

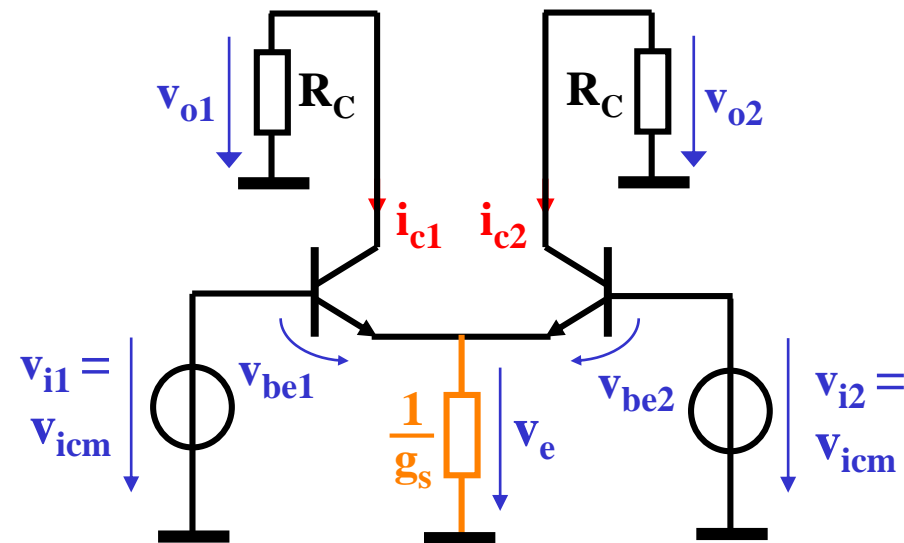
- Le gain de mode commun est un défaut des amplis différentiels, essentiellement lié à la conductance parasite  $g_s$  de la source de courant  $I$  de polarisation.
- Le signal de sortie de mode commun apparaît entre une sortie et la masse. Il n'est pas perceptible sur la sortie différentielle (\*).

# 4. L'AMPLIFICATEUR DIFFERENTIEL : COMPORTEMENT "PETITS SIGNAUX" AVEC CHARGES RÉSISTIVES

## 4.3. GAIN DE MODE COMMUN $A_c$

### Méthode par calcul direct

Schéma "petits signaux"



$$v_{i1} = v_{i2} \Rightarrow v_{be1} = v_{be2} = v_{be}$$

$$i_{e1} \approx i_{c1} = g_m \cdot v_{be1} = g_m \cdot v_{be}$$

$$i_{e2} \approx i_{c2} = g_m \cdot v_{be2} = g_m \cdot v_{be}$$

$$v_{icm} = v_{be} + v_e = v_{be} + \frac{i_{c1} + i_{c2}}{g_s} = v_{be} + \frac{2g_m \cdot v_{be}}{g_s}$$

$$v_{oj} = -R_C \cdot g_m \cdot v_{be} \Rightarrow \frac{v_{oj}}{v_{icm}} = \frac{-g_m \cdot R_C}{1 + g_m \cdot \frac{2}{g_s}}$$

si:  $g_m \gg g_s$

Gain de mode commun :

$$\frac{v_{oj}}{v_{icm}} = A_c = \frac{-g_s \cdot R_C}{2}$$

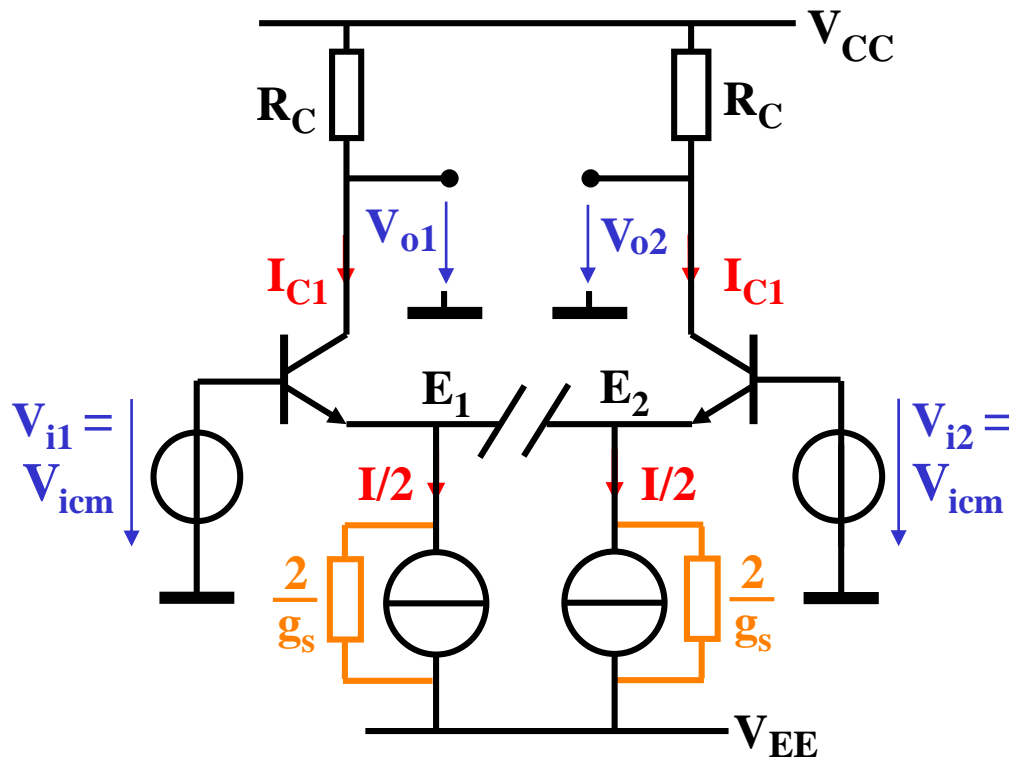
avec:  $j = 1 \text{ ou } 2$

**Conclusion:** pour réduire  $A_c$  il faut utiliser une source de courant à très faible conductance interne

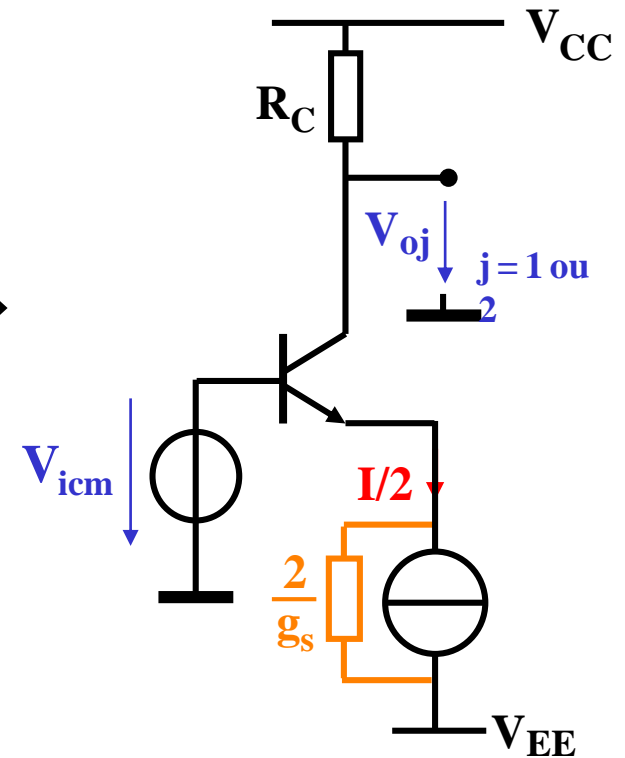
## 4. L'AMPLIFICATEUR DIFFERENTIEL : COMPORTEMENT "PETITS SIGNAUX" AVEC CHARGES RÉSISTIVES

### 4.3. GAIN DE MODE COMMUN $A_c$

Méthode du demi-circuit équivalent



Si  $V_{i1} = V_{i2}$ , alors  $V_{BE1} = V_{BE2}$  et donc  $I_{C1} = I_{C2}$ .  
Il en résulte que le courant dans la connexion entre les nœuds  $E_1$  et  $E_2$  est nul. Celle-ci peut donc être coupée (supprimée) sans modifier le comportement du circuit.



Il reste alors deux circuits identiques dit demi-circuits équivalents de mode commun.

## 4. L'AMPLIFICATEUR DIFFERENTIEL : COMPORTEMENT "PETITS SIGNAUX" AVEC CHARGES RÉSISTIVES

### 4.3. GAIN DE MODE COMMUN $A_c$

Méthode du demi-circuit équivalent

Demi-schéma équivalent  
en mode commun

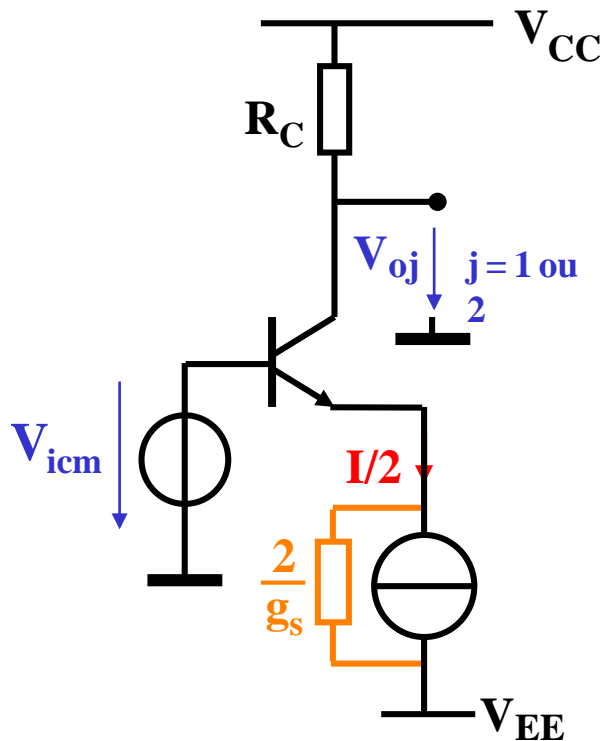
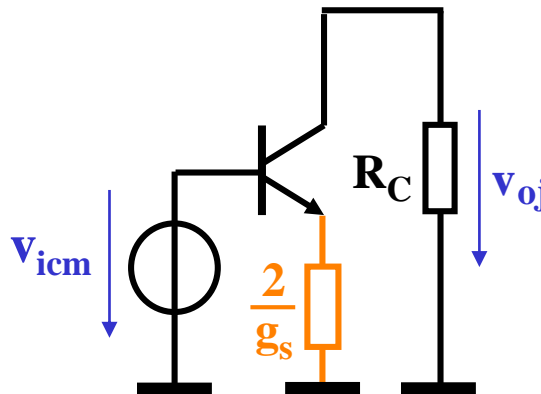


Schéma "petits signaux"



Gain de mode commun :

$$\frac{V_{oj}}{V_{icm}} = A_{ECdég.} = \frac{-g_m \cdot R_C}{1 + g_m \cdot \frac{2}{g_s}}$$

Si:  $g_m \gg g_s$

$$\frac{V_{oj}}{V_{icm}} = A_c = \frac{-g_s \cdot R_C}{2}$$

**Conclusion:** Pour réduire  $A_c$  il faut utiliser une source de courant à très faible conductance interne

## 4. L' AMPLIFICATEUR DIFFERENTIEL : COMPORTEMENT "PETITS SIGNAUX" AVEC CHARGES RÉSISTIVES

### 4.4. TAUX DE RÉJECTION DU MODE COMMUN COMMON MODE REJECTION RATIO

Le « CMRR » est une caractéristique fondamentale des amplis différentiels, définie comme le rapport entre le gain de mode différentiel  $A_d$  et le gain de mode commun  $A_c$  :

$$\text{CMRR} = \frac{A_d}{A_c}$$

ou

$$\text{CMRR [dB]} = 20 \cdot \log \frac{A_d}{A_c}$$

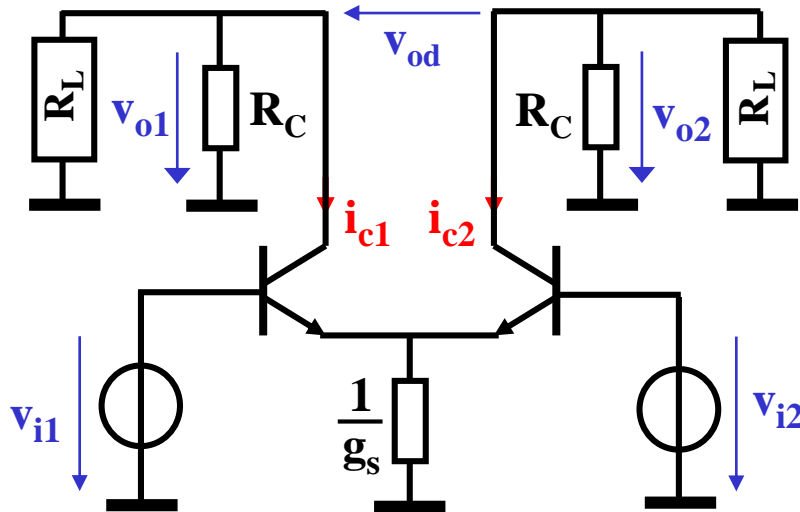
Pour les amplis différentiels de qualité, ce rapport est supérieur à 100 dB.

# 4. L'AMPLIFICATEUR DIFFERENTIEL : COMPORTEMENT "PETITS SIGNAUX" AVEC CHARGES RÉSISTIVES

## 4.5. EFFET DE CHARGE(S) EXTÉRIURE(S)

### CHARGES ASYMÉTRIQUES

Schéma "petits signaux"



$R_L$  apparaît en parallèle sur  $R_C$   
tant en mode différentiel  
qu'en mode commun

sortie symétrique :

$$A_d = \frac{v_{od}}{v_{id}} = g_m \cdot \frac{R_C \cdot R_L}{R_C + R_L}$$

sortie asymétrique :  
gain différentiel divisé par 2

$$A_d = \frac{v_{oj}}{v_{id}} = \pm \frac{g_m}{2} \cdot \frac{R_C \cdot R_L}{R_C + R_L}$$

$j = 1 \text{ ou } 2$

$$A_c = \frac{v_{oj}}{v_{icm}} = - \frac{g_s}{2} \cdot \frac{R_C \cdot R_L}{R_C + R_L}$$

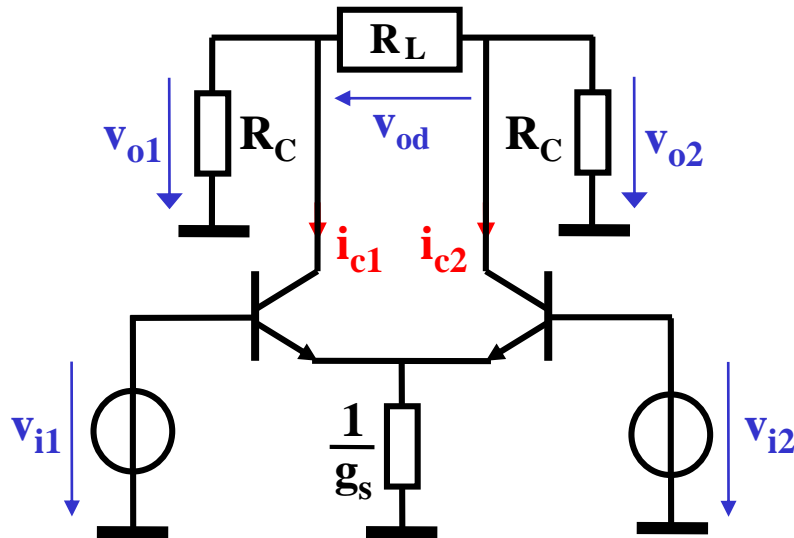
$j = 1 \text{ ou } 2$

# 4. L'AMPLIFICATEUR DIFFÉRENTIEL : COMPORTEMENT "PETITS SIGNAUX" AVEC CHARGES RÉSISTIVES

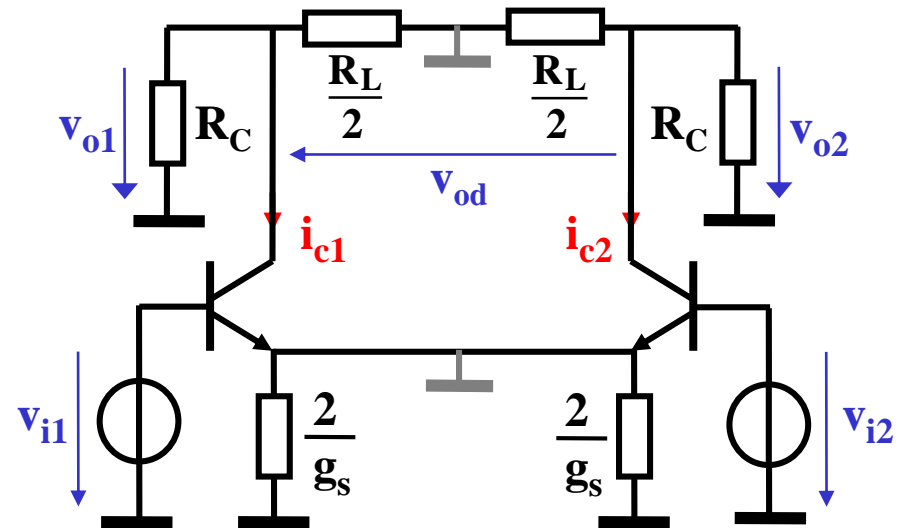
## 4.5. EFFET DE CHARGE(S) EXTÉRIEURE(S)

### CHARGE DIFFÉRENTIELLE

Schéma "petits signaux"



Demi-schéma équivalent  
en mode différentiel



$R_L/2$  apparaît en parallèle sur  $R_C$

sortie symétrique :

$$A_d = \frac{v_{od}}{v_{id}} = g_m \cdot \frac{R_C \cdot R_L/2}{R_C + R_L/2}$$

sortie asymétrique : gain différentiel divisé par 2

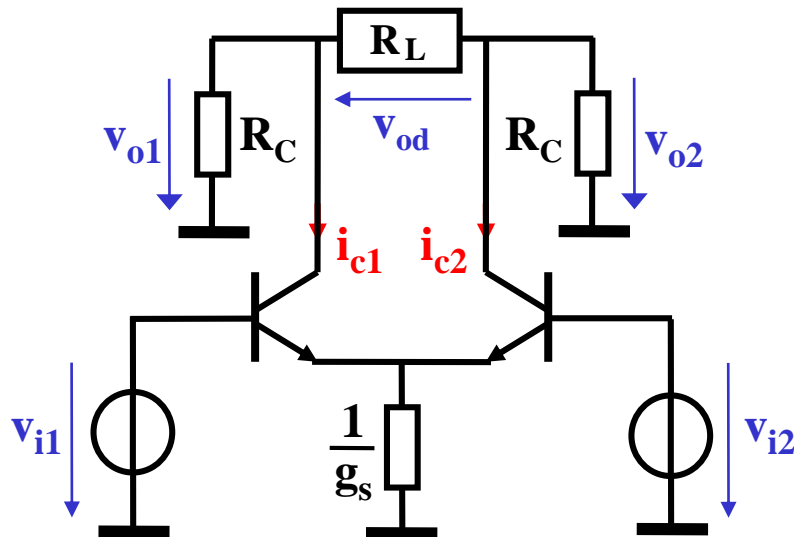


# 4. L'AMPLIFICATEUR DIFFERENTIEL : COMPORTEMENT "PETITS SIGNAUX" AVEC CHARGES RÉSISTIVES

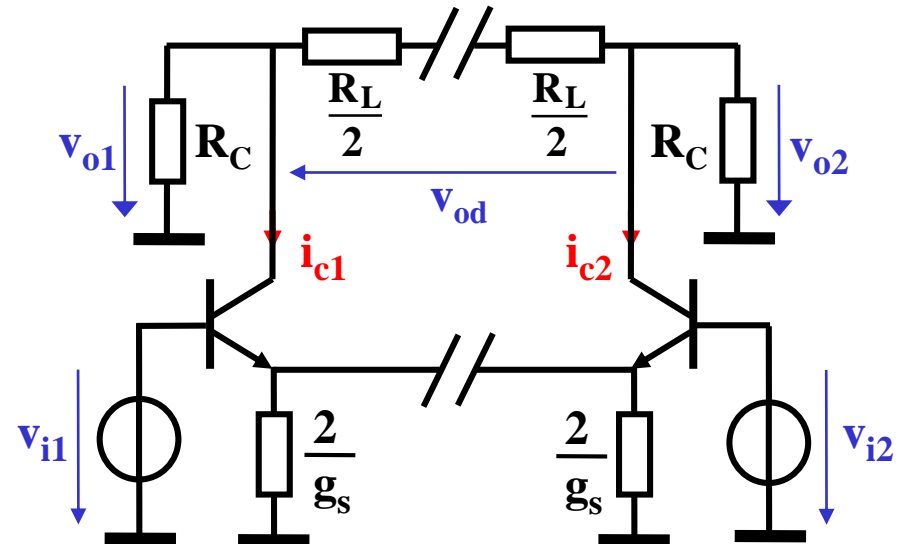
## 4.5. EFFET DE CHARGE(S) EXTÉRIEURE(S)

### CHARGE DIFFÉRENTIELLE

Schéma "petits signaux"



Demi-schéma équivalent  
en mode commun



$R_L$  est sans effet

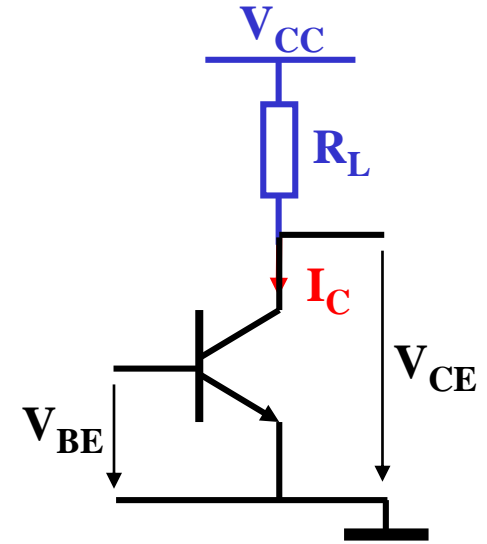
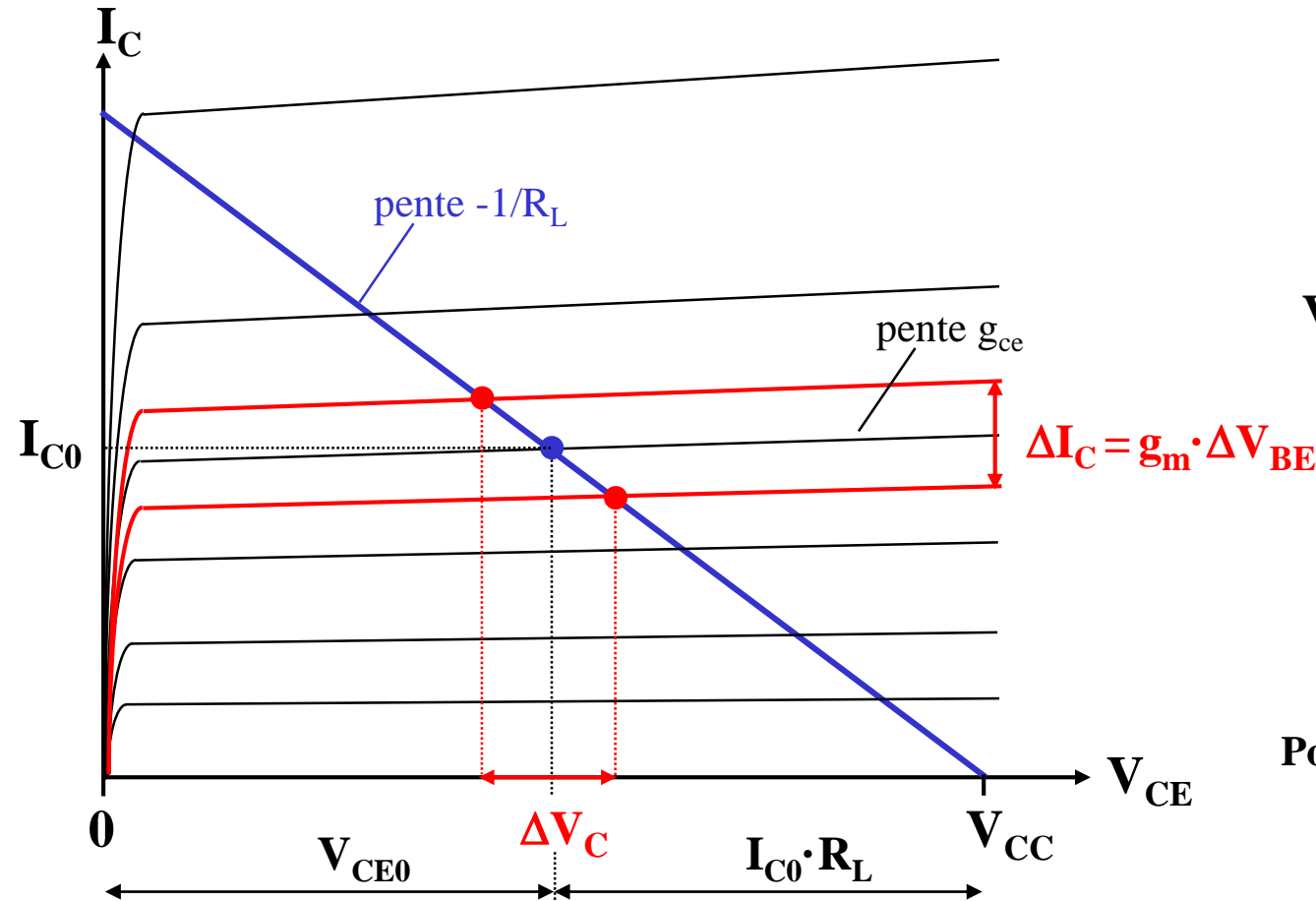
$$A_C = \frac{v_{oj}}{v_{icm}} = -\frac{g_s \cdot R_C}{2}$$

$j = 1 \text{ ou } 2$

# 5. AMPLI DIFFERENTIEL A CHARGES ACTIVES

## LIMITE DU GAIN EN TENSION DES AMPLIS À CHARGES RÉSISTIVES

### EXEMPLE DE L'EMETTEUR COMMUN



$$A_V = -g_m \cdot R_L$$

$$|A_V| = \frac{I_{C0}}{U_T} \cdot R_L$$

Pour une dynamique optimale:

$$V_{CE0} \approx I_{C0} \cdot R_L \approx V_{CC}/2$$

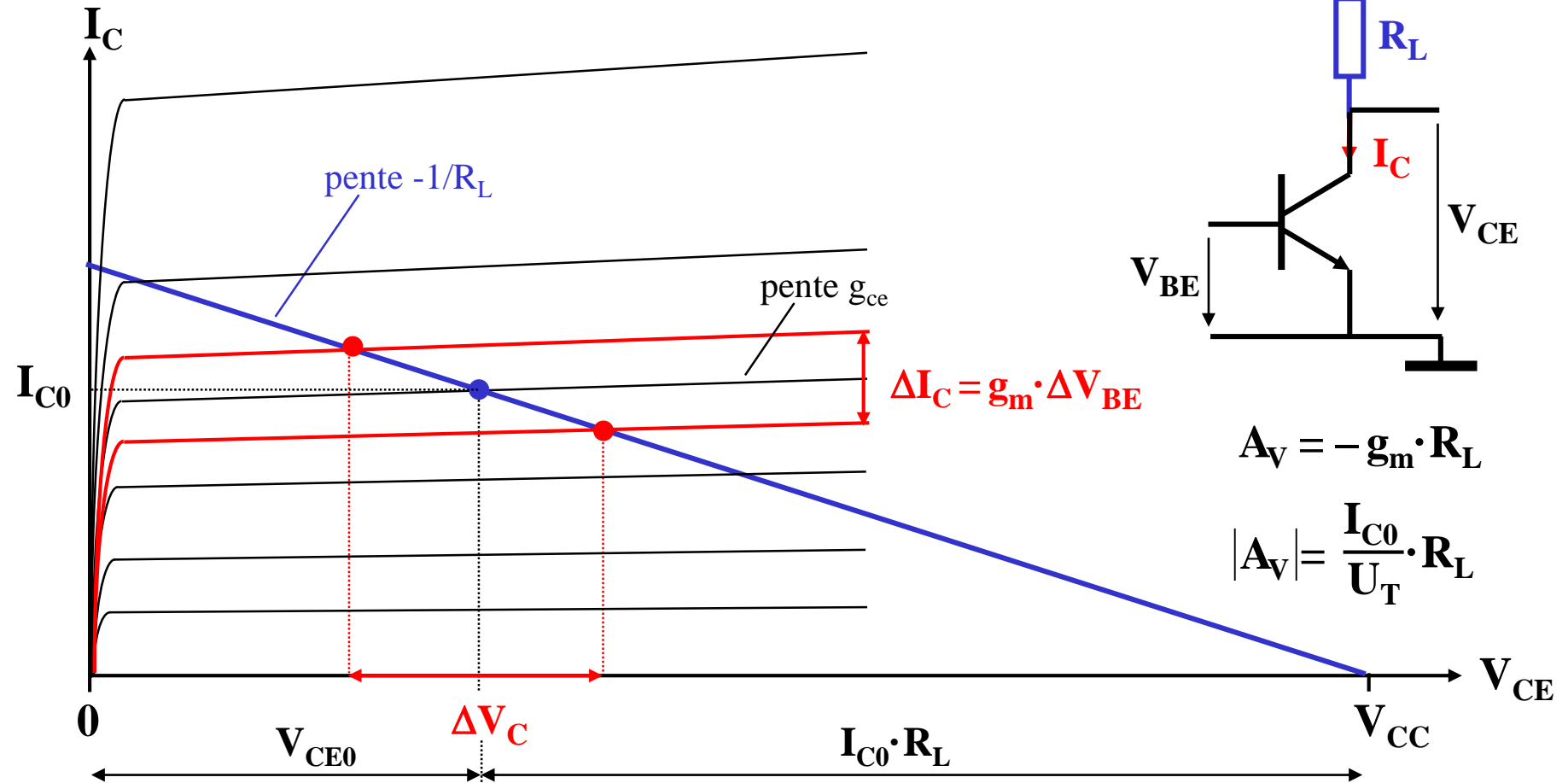
$$|A_V| \approx \frac{V_{CC}}{2 \cdot U_T}$$

Exemple numérique:  $V_{CC} = 10V$   $A_V < 200$

# 5. AMPLI DIFFERENTIEL A CHARGES ACTIVES

## LIMITE DU GAIN EN TENSION DES AMPLIS À CHARGES RÉSISTIVES

### EXEMPLE DE L'EMETTEUR COMMUN



Pour augmenter le gain: augmenter  $R_L$  .... et  $V_{CC}$  !

# 5. AMPLI DIFFERENTIEL A CHARGES ACTIVES

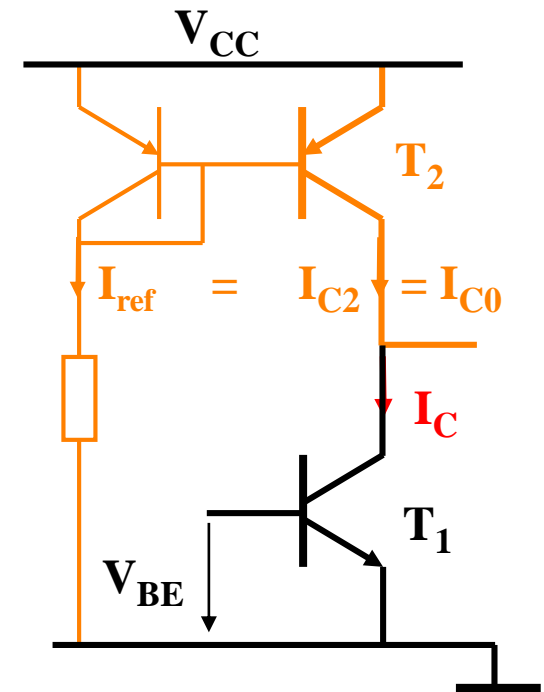
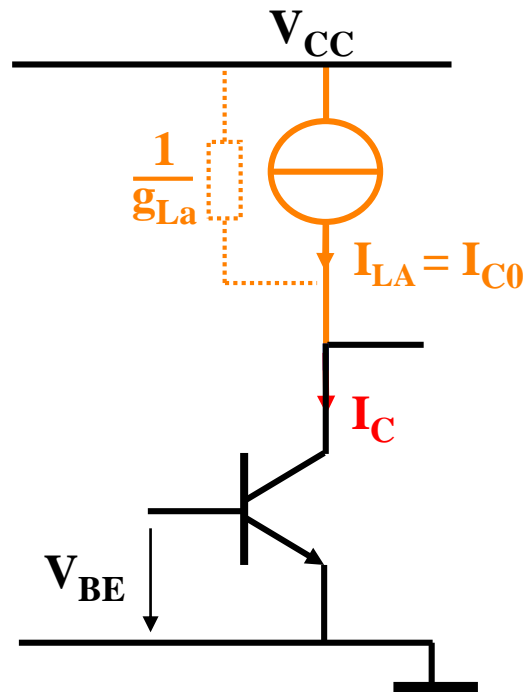
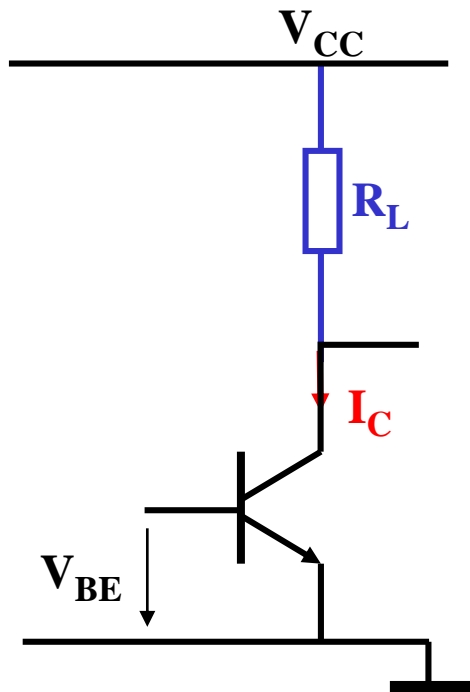
## PRINCIPE DE LA CHARGE ACTIVE

### EXEMPLE DE L'EMETTEUR COMMUN

La résistance de charge  
est remplacée par ...

une source de courant

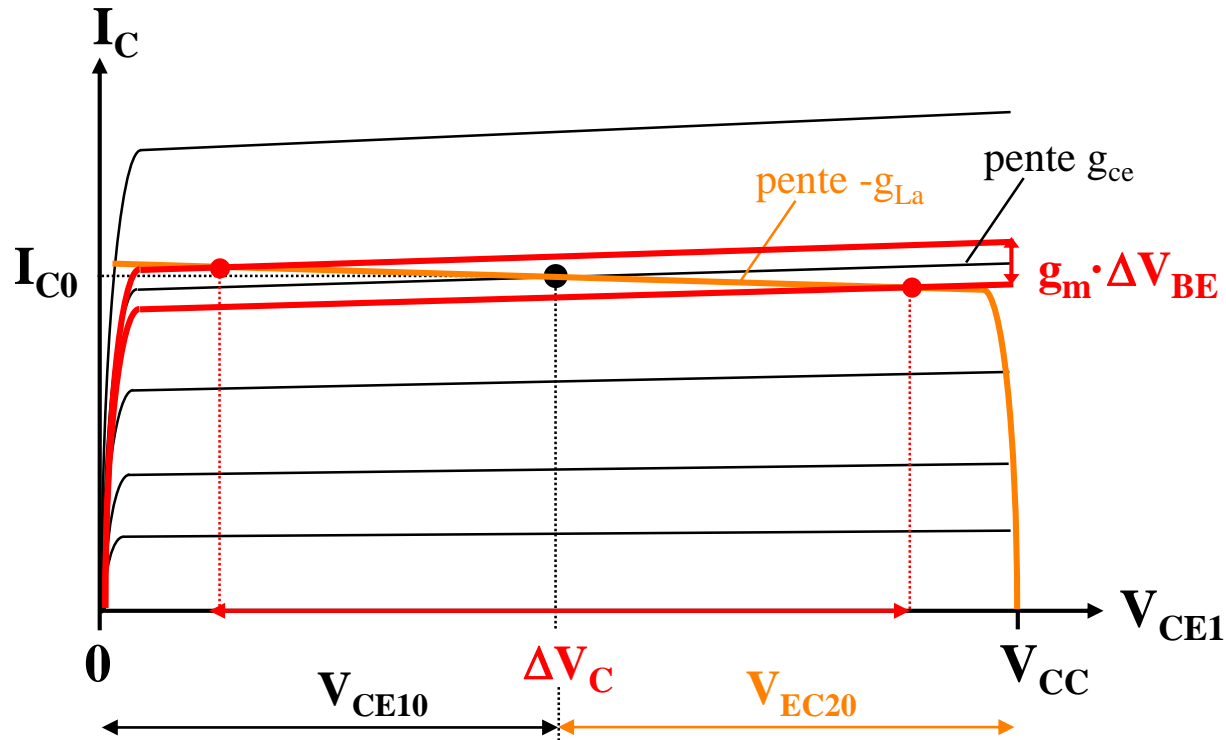
Exemple de réalisation



# 5. AMPLI DIFFERENTIEL A CHARGES ACTIVES

## FONCTIONNEMENT

### EXEMPLE DE L'EMETTEUR COMMUN

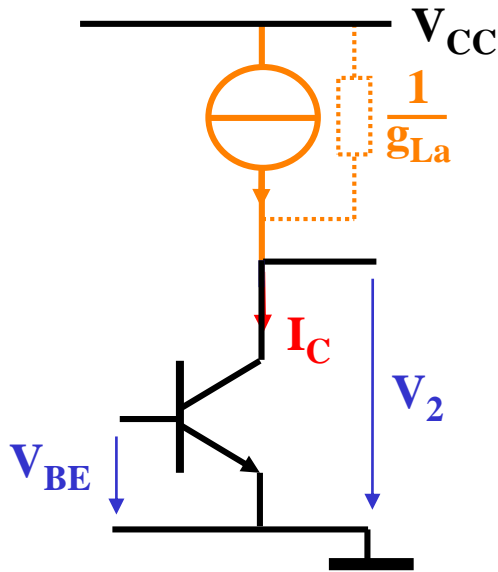


Le gain est limité uniquement par la conductance de sortie de  $T_1$  et celle de la source de courant qui forme la charge active ( $T_2$  dans cet exemple).

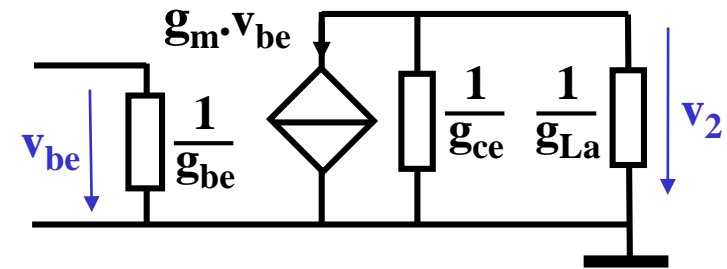
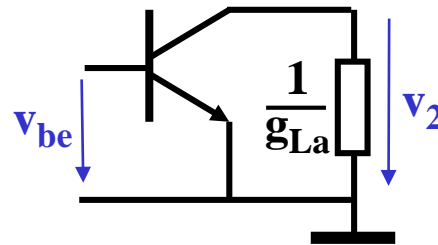
## 5. AMPLI DIFFERENTIEL A CHARGES ACTIVES

### ETUDE "PETITS SIGNAUX" - GAIN EN TENSION $A_v$

#### EXEMPLE DE L'EMETTEUR COMMUN



Schémas petits signaux



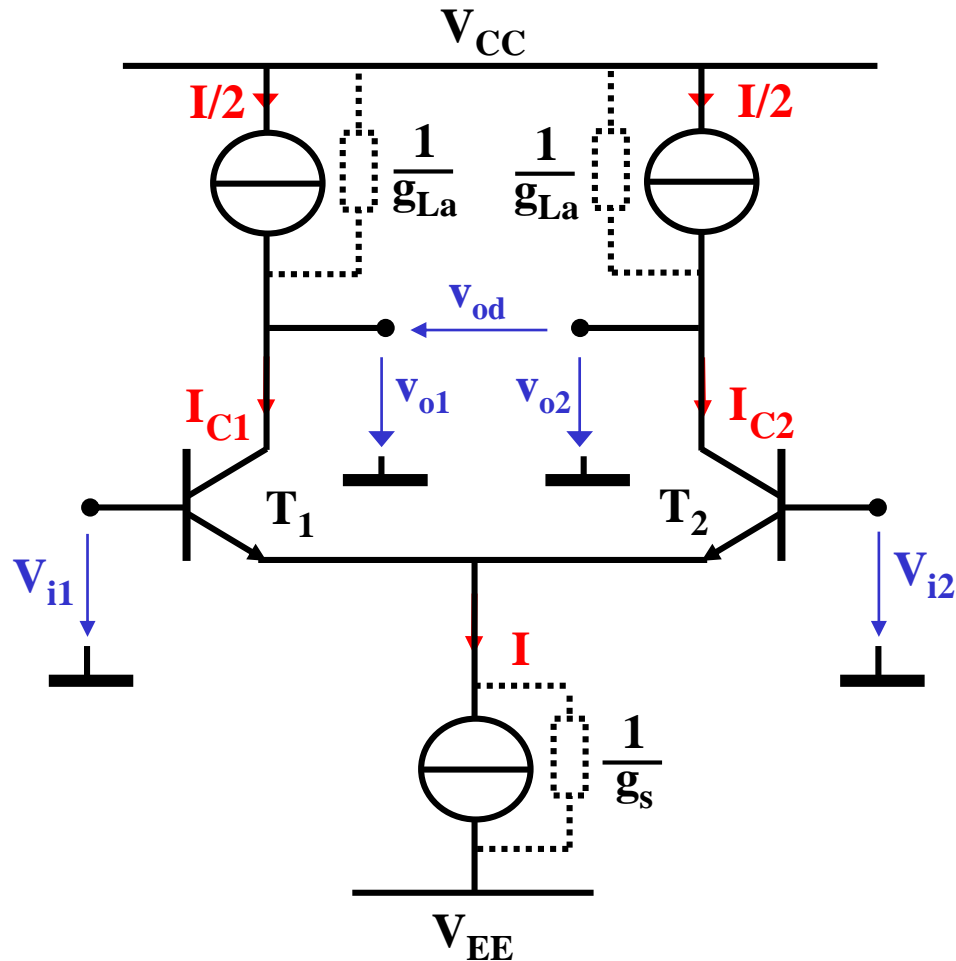
$$v_2 = -g_m \cdot v_{be} \cdot \frac{1}{g_{ce} + g_{La}}$$

$$A_v = - \frac{g_m}{g_{ce} + g_{La}}$$

## 5. AMPLI DIFFERENTIEL A CHARGES ACTIVES

CHARGE SYMÉTRIQUE AVEC DEUX SOURCES DE COURANT

SORTIE(S) DIFFÉRENTIELLE OU ASYMÉTRIQUE(S)



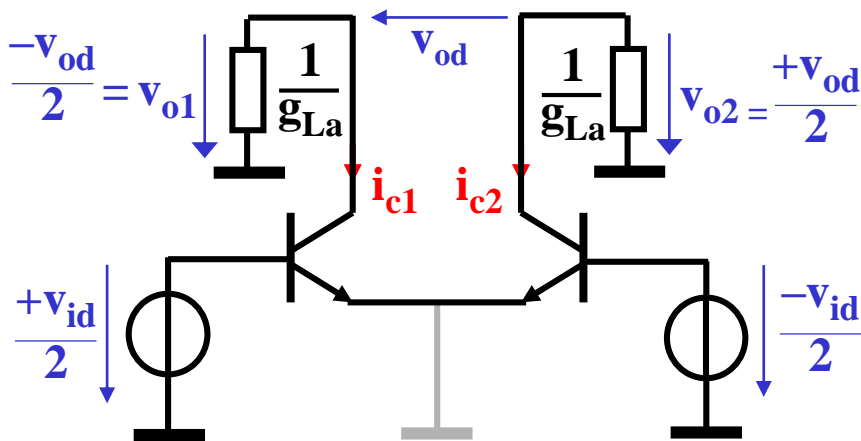
# 5. AMPLI DIFFERENTIEL A CHARGES ACTIVES

## CHARGE SYMÉTRIQUE AVEC DEUX SOURCES DE COURANT

### GAINS EN TENSION DIFFÉRENTIEL ET DE MODE COMMUN

Demi-schémas équivalents "petits signaux"

Mode différentiel

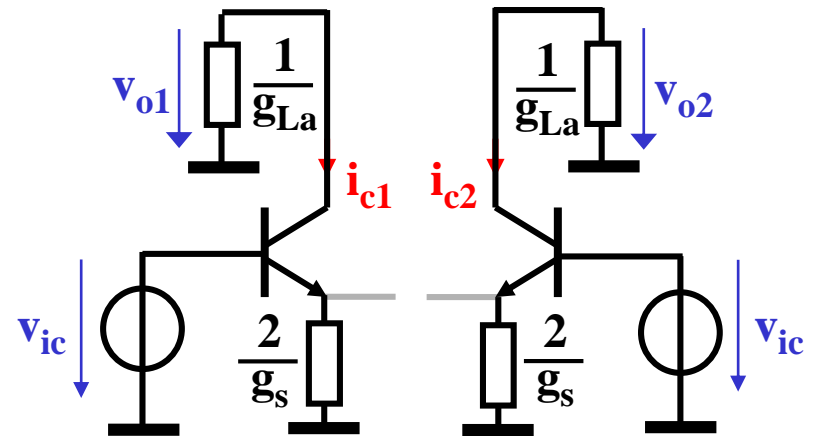


$$A_d = \frac{g_m}{g_{La} + g_{ce}}$$

divisé par 2  
pour les sorties  
asymétriques

avec:  $g_m = \frac{I}{2 \cdot U_T}$   $g_{ce} = \frac{I}{2 \cdot V_A}$

Mode commun



$$A_c = - \frac{g_s}{2 \cdot g_{La}}$$

⊗ Le gain de mode commun  
augmente considérablement

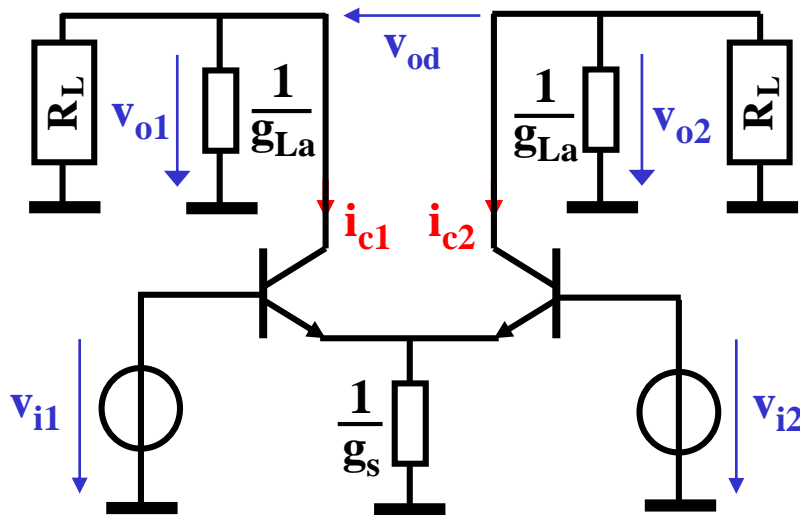


# 5. AMPLI DIFFERENTIEL A CHARGES ACTIVES

## CHARGE SYMÉTRIQUE AVEC DEUX SOURCES DE COURANT

### AVEC CHARGE(S) EXTÉRIEURE(S)

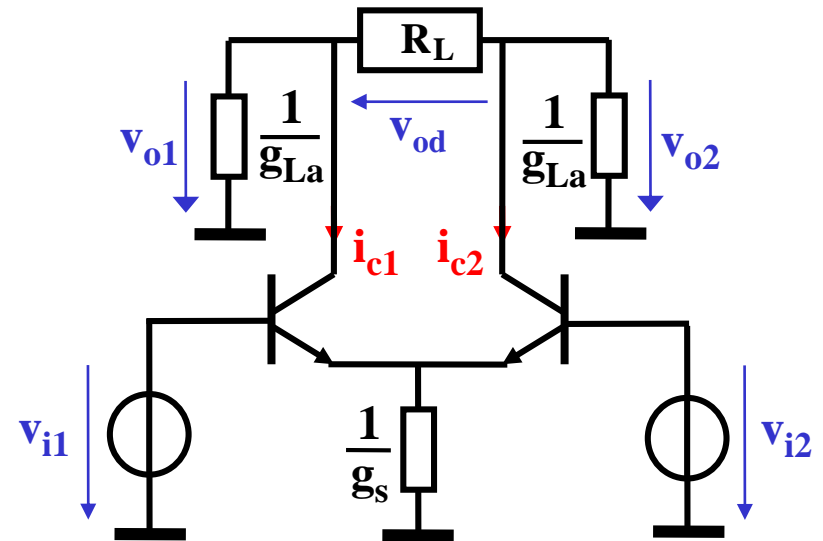
Schémas "petits signaux"



$$A_d = - \frac{g_m}{g_{ce} + g_{La} + 1/R_L}$$

$$A_c = - \frac{g_s}{2 \cdot (g_{La} + 1/R_L)}$$

Réduit de moitié  
pour les sorties  
asymétriques



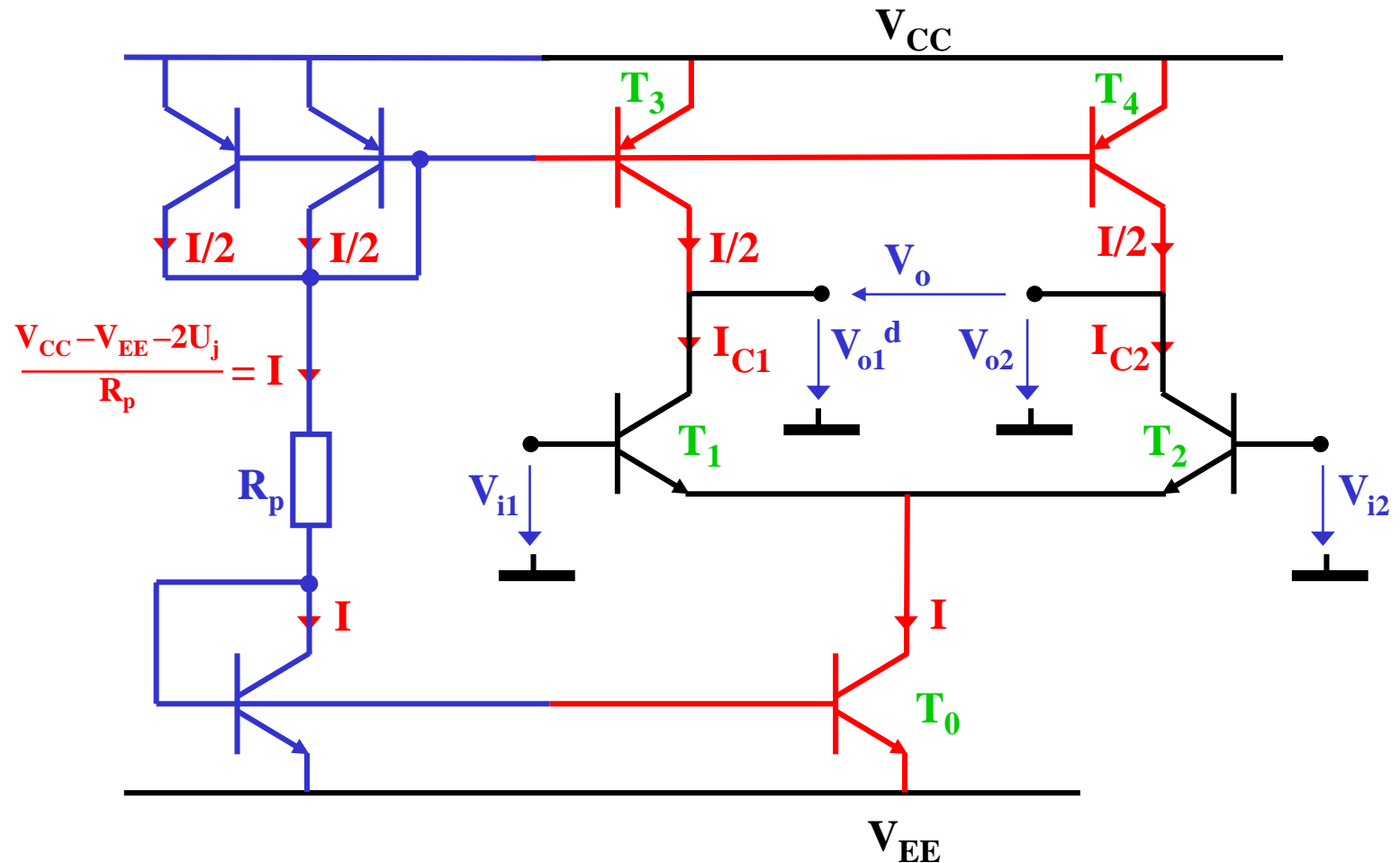
$$A_d = - \frac{g_m}{g_{ce} + g_{La} + 2/R_L}$$

$$A_c = - \frac{g_s}{2 \cdot g_{La}}$$

## 5. AMPLI DIFFERENTIEL A CHARGES ACTIVES

### CHARGE SYMÉTRIQUE AVEC DEUX SOURCES DE COURANT

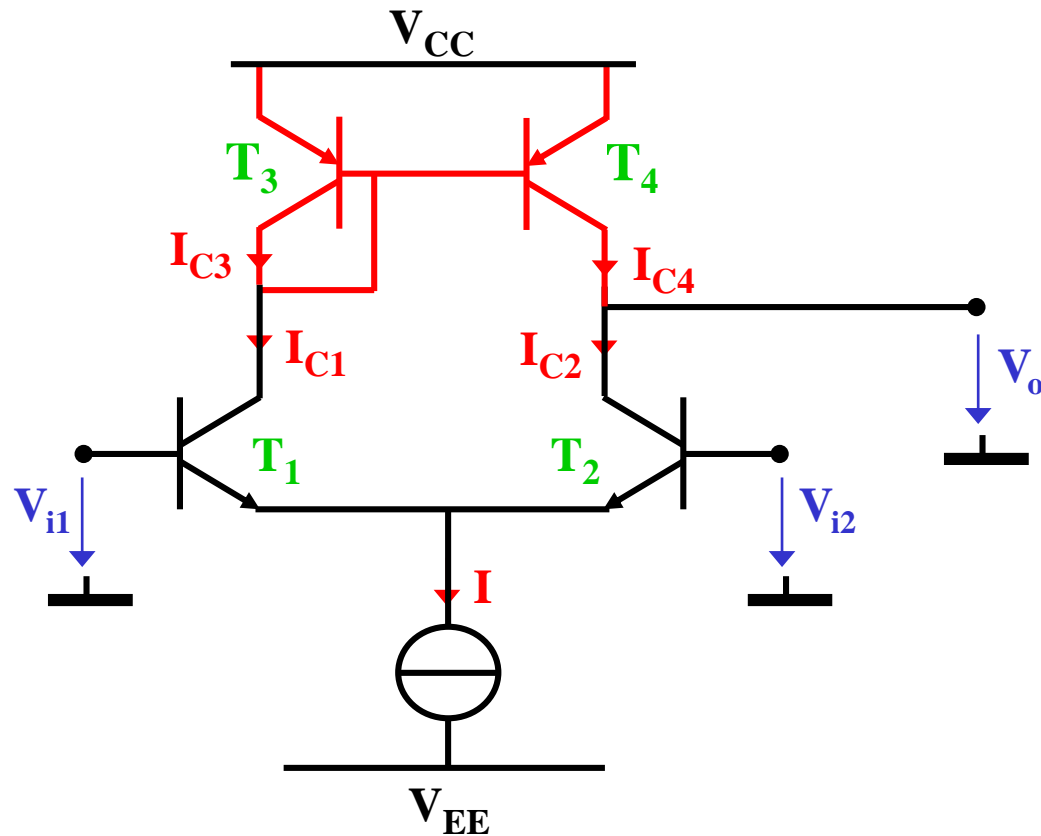
#### EXEMPLE DE RÉALISATION



## 5. AMPLI DIFFERENTIEL A CHARGES ACTIVES

### CHARGE ASYMÉTRIQUE AVEC MIROIR DE COURANT

#### SORTIE ASYMÉTRIQUE UNIQUEMENT

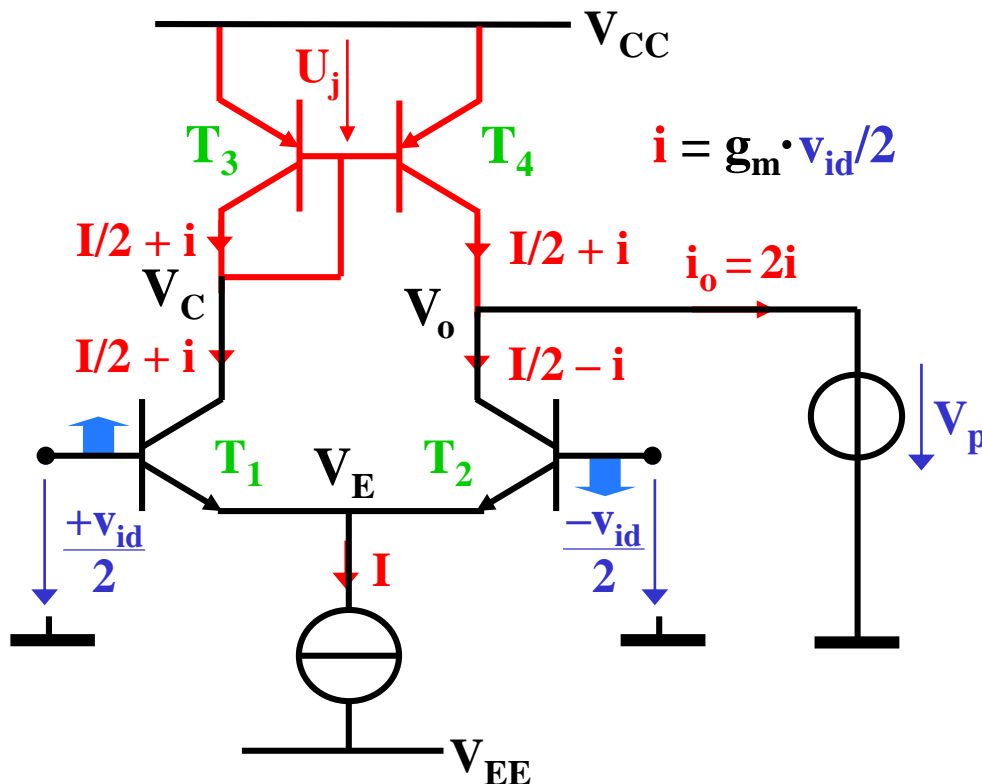


Une seule sortie  
asymétrique !

## 5. AMPLI DIFFERENTIEL A CHARGES ACTIVES

### CHARGE ASYMÉTRIQUE AVEC MIROIR DE COURANT

#### SORTIE ASYMÉTRIQUE EN COURANT



transconductance en court-circuit :

Sortie en court-circuit  
sur un point à potentiel fixe

$$V_C = V_{CC} - U_J \approx \text{cst}$$

$$V_E \approx \text{cst} \text{ par symétrie}$$

$$V_o = V_p = \text{cst}$$

$\Rightarrow g_{ce}$  sans influence,  
les transistors se  
comportent en  
sources de courant  
parfaites

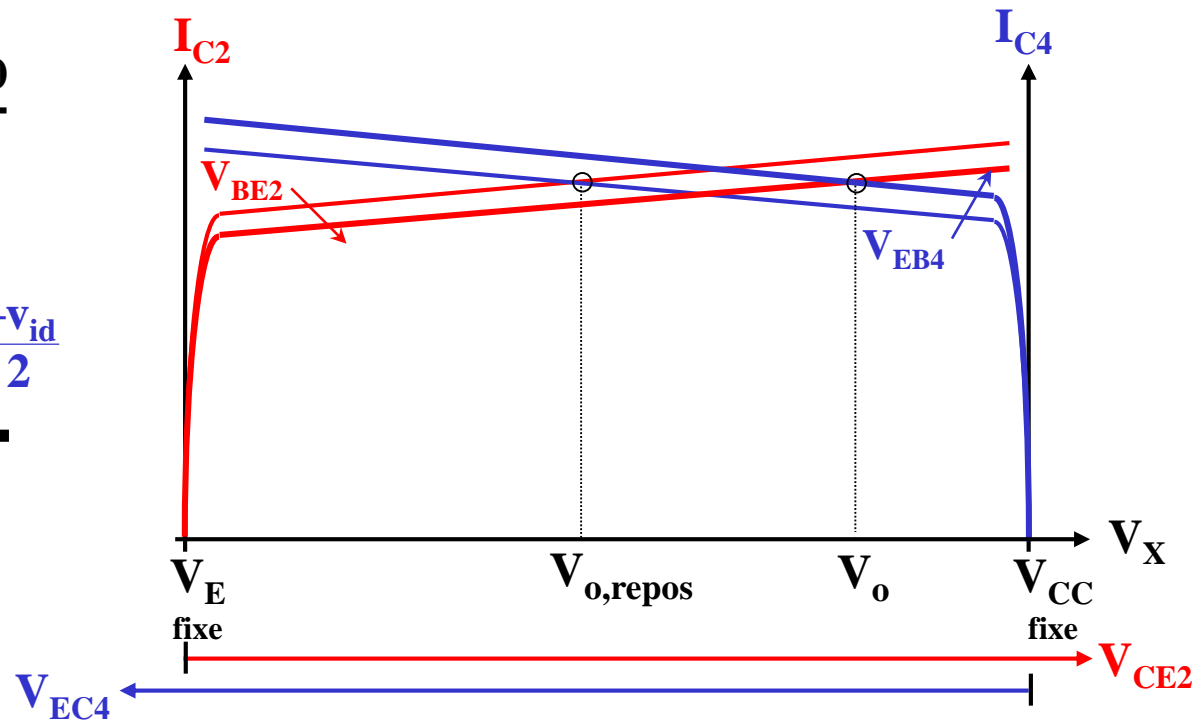
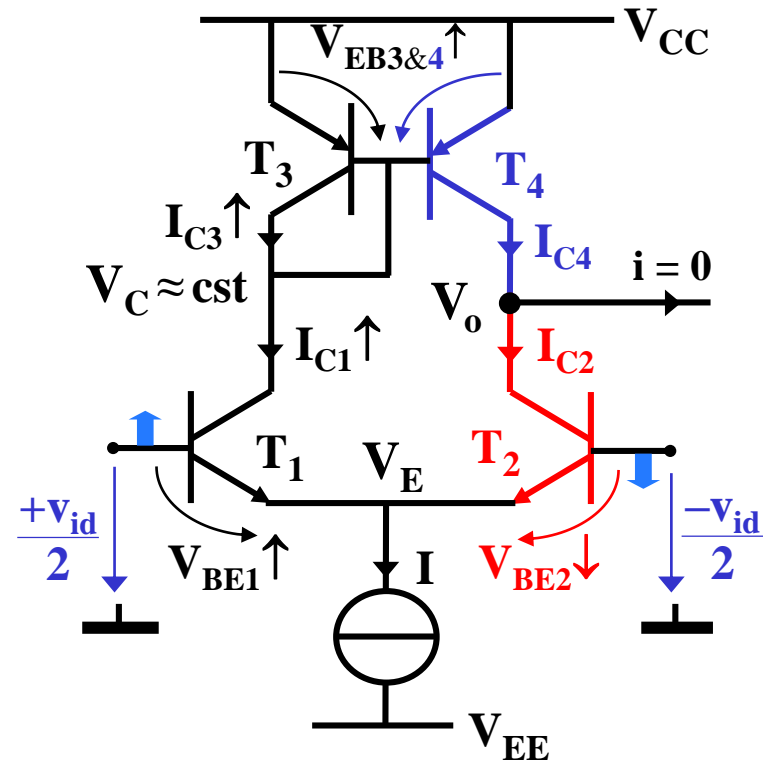
$$G_{md} = \left. \frac{i_o}{v_{id}} \right|_{v_o=0} = g_m = \frac{I}{2 \cdot U_T}$$

# 5. AMPLI DIFFERENTIEL A CHARGES ACTIVES

## CHARGE ASYMÉTRIQUE AVEC MIROIR DE COURANT

### SORTIE ASYMÉTRIQUE EN TENSION

Sortie en circuit ouvert

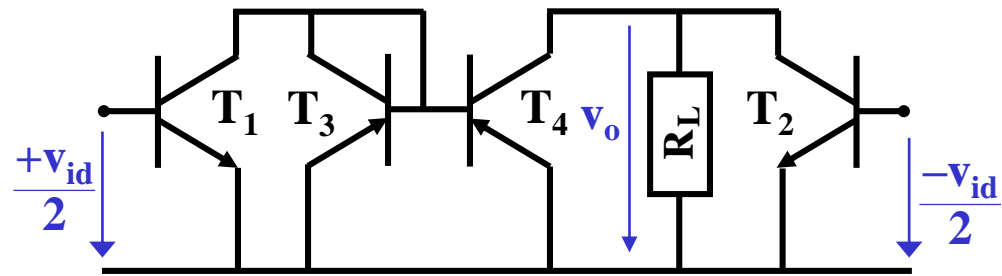
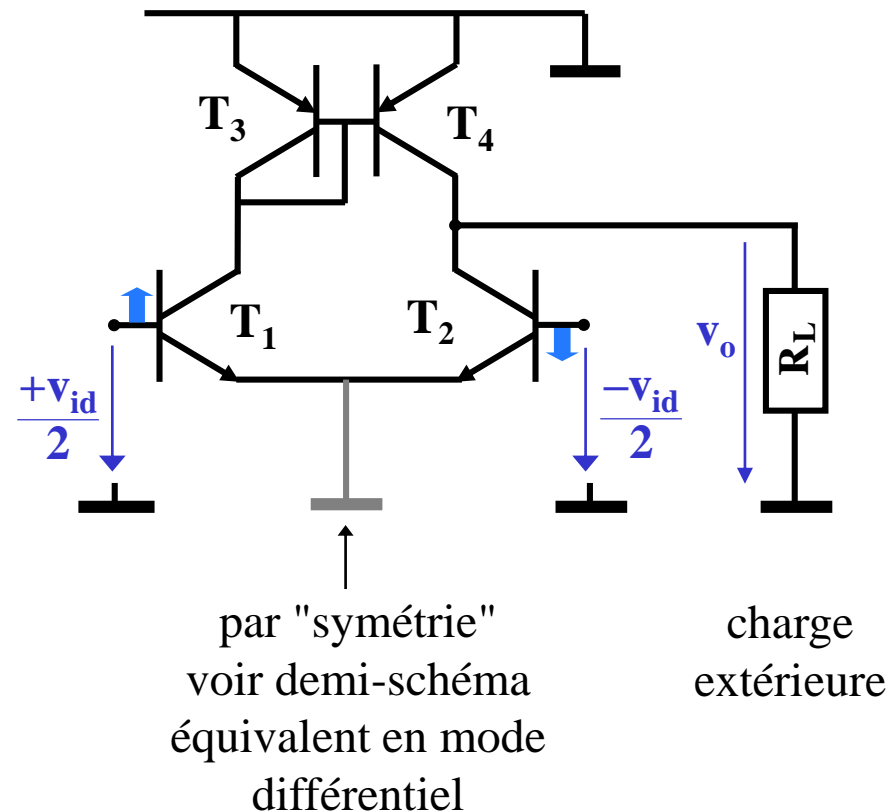


# 5. AMPLI DIFFERENTIEL A CHARGES ACTIVES

## CHARGE ASYMÉTRIQUE AVEC MIROIR DE COURANT

### GAIN EN TENSION DIFFÉRENTIEL $A_d$ (1/2)

Schéma "petits signaux"

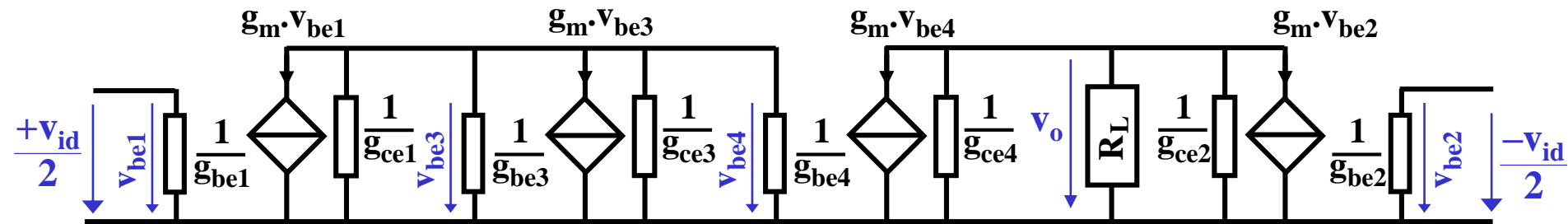


# 5. AMPLI DIFFERENTIEL A CHARGES ACTIVES

## CHARGE ASYMÉTRIQUE AVEC MIROIR DE COURANT

### GAIN EN TENSION DIFFÉRENTIEL $A_d$ (2/2)

Schéma petits signaux détaillé



$$v_{be3} = v_{be4} \quad \text{et} \quad g_m \cdot v_{be1} + g_m \cdot v_{be3} + (g_{be3} + g_{be4} + g_{ce1} + g_{ce3}) \cdot v_{be3} \approx g_m \cdot v_{be1} + g_m \cdot v_{be3} = 0$$

$$\Rightarrow v_{be3} = v_{be4} = -v_{be1} = -v_{id}/2$$

$$v_o = -(g_m \cdot v_{be2} + g_m \cdot v_{be4}) / (g_{ce2} + g_{ce4} + 1/R_L) = g_m \cdot v_{id} / (g_{ce2} + \overset{\substack{\downarrow \\ g_{La}}}{g_{ce4}} + 1/R_L)$$

$$A_d = \frac{v_o}{v_{id}} = \frac{g_m}{g_{ce2} + g_{La} + 1/R_L}$$

$g_{La}$  conductance de la charge active de  $T_2$

= conductance de sortie du miroir

$g_{ce4}/\beta_4 \leq g_{La} \leq g_{ce4}$  suivant la structure du miroir

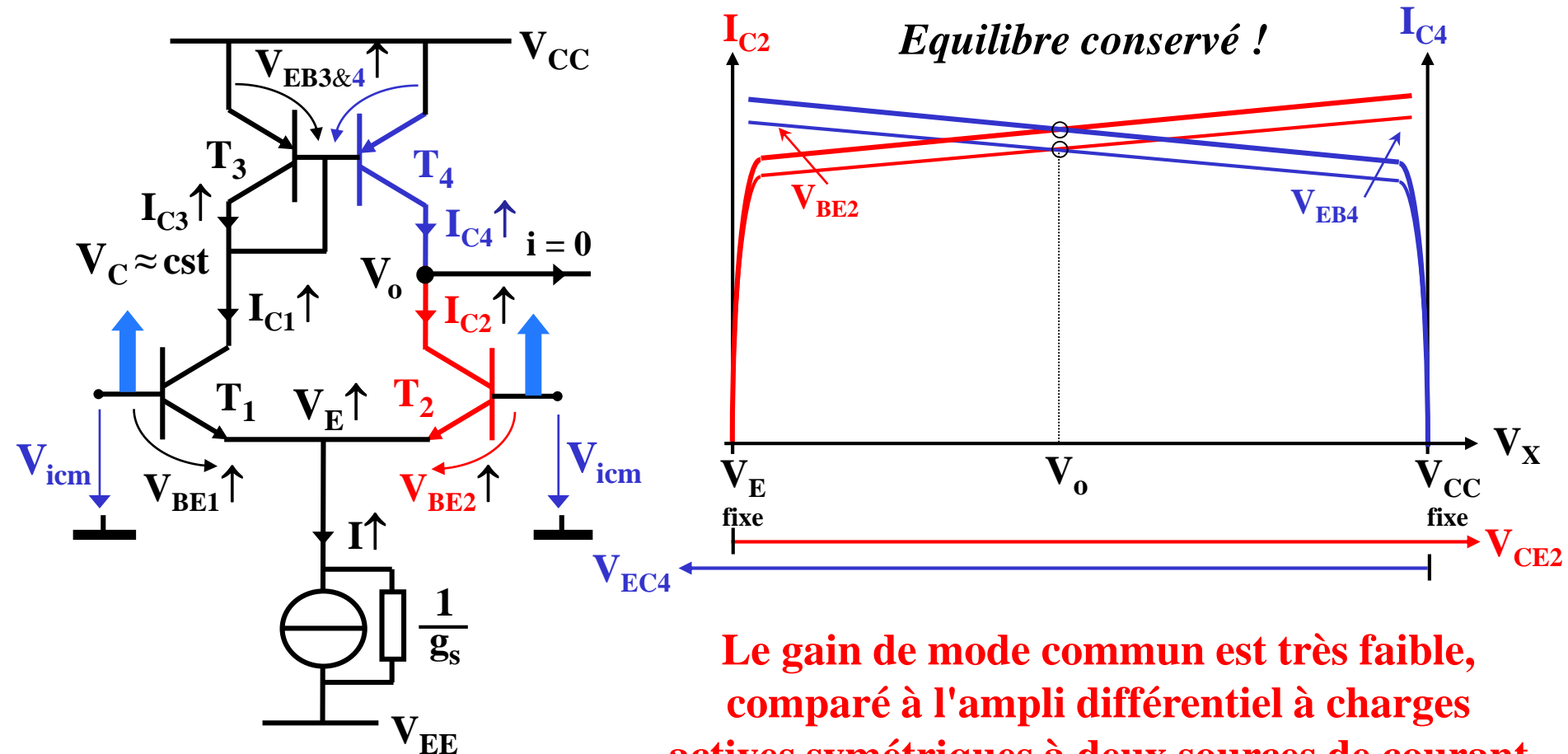
**Sortie asymétrique, pourtant même  $A_d$  que pour la sortie différentielle du montage à charges symétriques par deux sources de courant !**

# 5. AMPLI DIFFERENTIEL A CHARGES ACTIVES

## CHARGE ASYMÉTRIQUE AVEC MIROIR DE COURANT

GAIN EN TENSION DE MODE COMMUN  $A_c$

Sortie en circuit ouvert

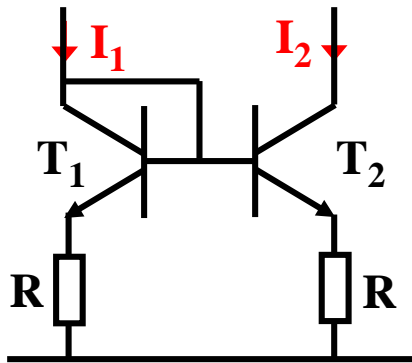




# 5. AMPLI DIFFERENTIEL A CHARGES ACTIVES

## UTILISATION DE COMPOSANTS DISCRETS

AJOUT DE RÉSISTANCES D'ÉMETTEUR DANS UN MIROIR DE COURANT POUR RÉDUIRE L'EFFET D'UN MAUVAIS APPARIEMENT DES TRANSISTORS



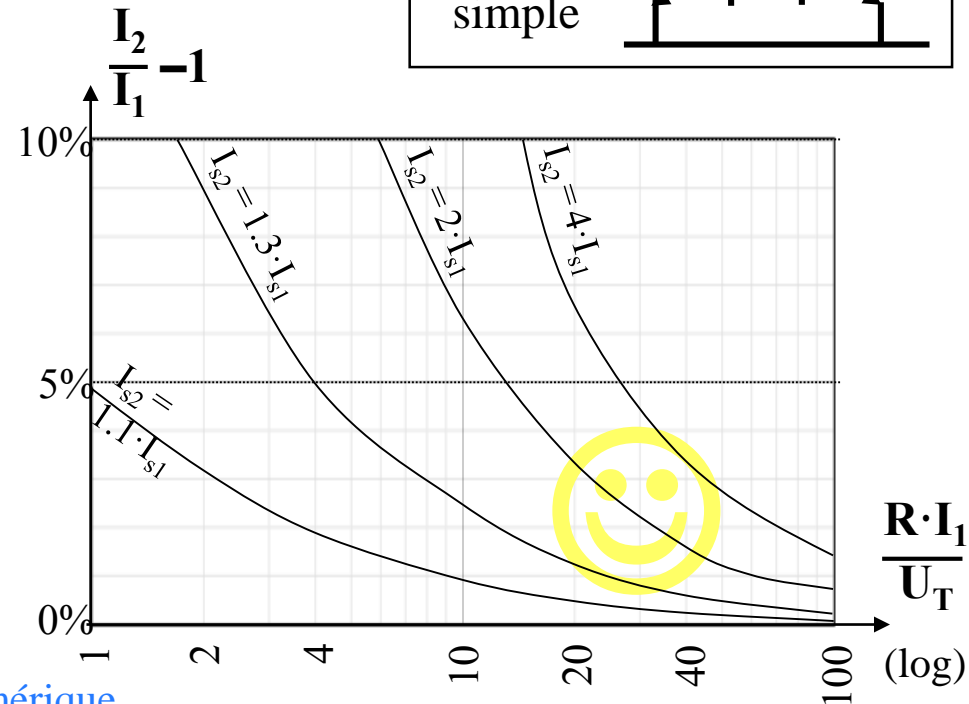
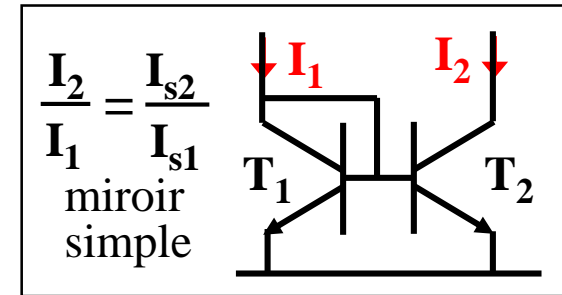
$$V_{BE1} + I_1 \cdot R = V_{BE2} + I_2 \cdot R$$

$$I_2 = I_1 + \frac{1}{R} \cdot (V_{BE1} - V_{BE2})$$

$$I_2 = I_1 + \frac{1}{R} \cdot \left( U_T \cdot \ln \frac{I_1}{I_{s1}} - U_T \cdot \ln \frac{I_2}{I_{s2}} \right)$$

$$\frac{I_2}{I_1} = 1 + \frac{U_T}{R \cdot I_1} \cdot \ln \left( \frac{I_1}{I_2} \cdot \frac{I_{s2}}{I_{s1}} \right)$$

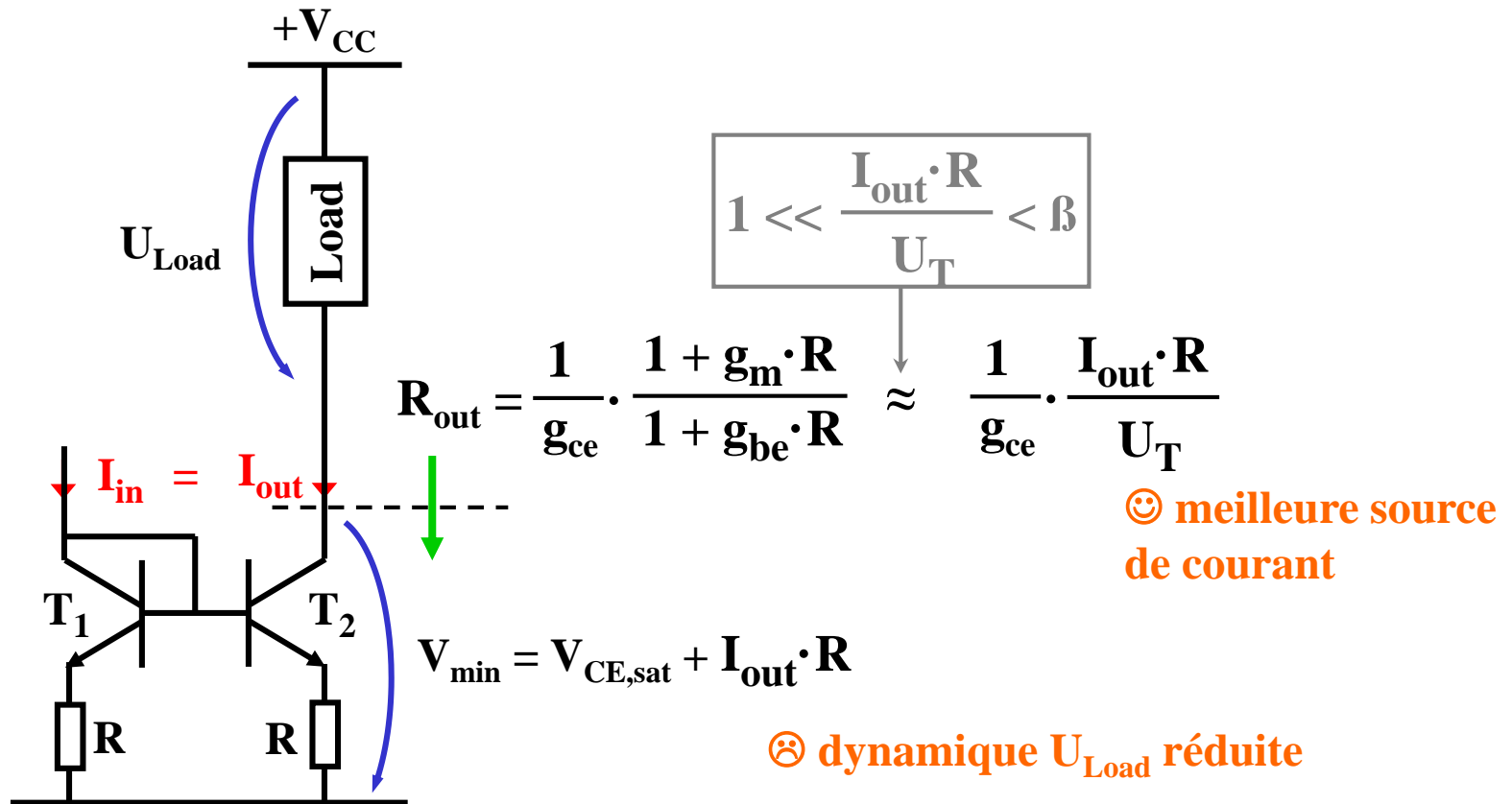
résolution numérique  
point par point



# 5. AMPLI DIFFERENTIEL A CHARGES ACTIVES

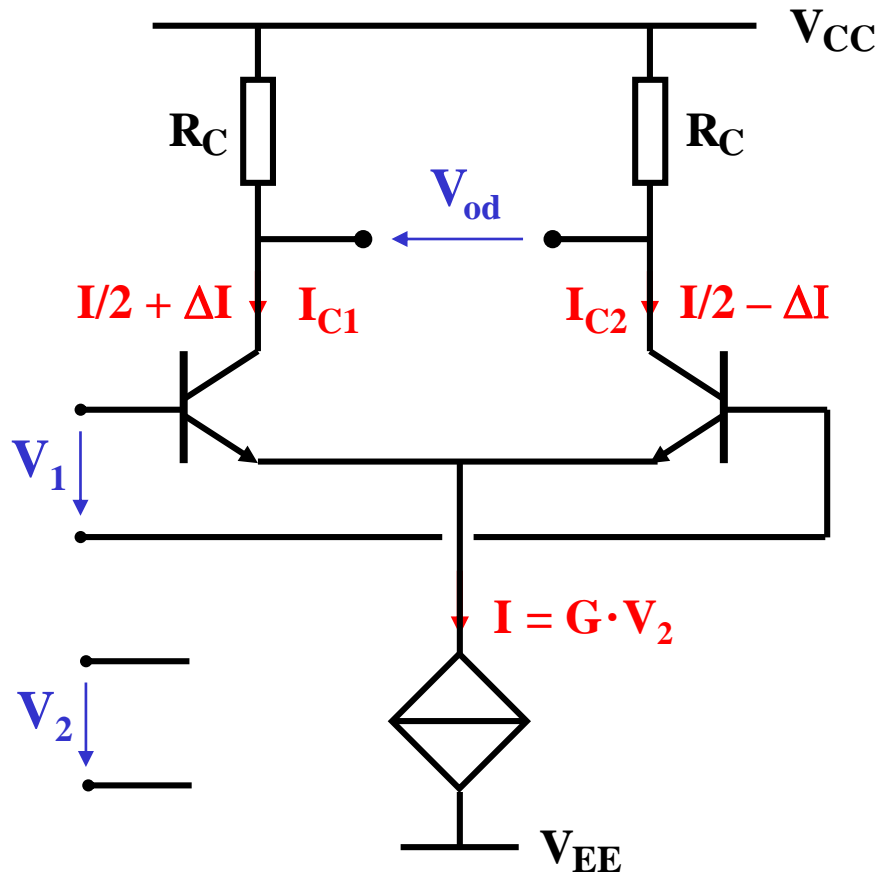
## UTILISATION DE COMPOSANTS DISCRETS

### AUTRES EFFETS DE L'AJOUT DE RÉSISTANCES D'ÉMETTEUR DANS UN MIROIR DE COURANT



## 6. MULTIPLIEUR ANALOGIQUE

### AMPLI DIFFERENTIEL A TRANSCONDUCTANCE VARIABLE MULTIPLIEUR ANALOGIQUE "DEUX QUADRANTS"



$$V_{od} = 2 \cdot \Delta I \cdot R_C = I \cdot R_C \cdot \tanh\left(\frac{V_1}{2 \cdot U_T}\right)$$

Pour  $|V_1| < \text{une dizaine de mV}$

$$V_{od} = I \cdot R_C \cdot \frac{V_1}{2 \cdot U_T}$$

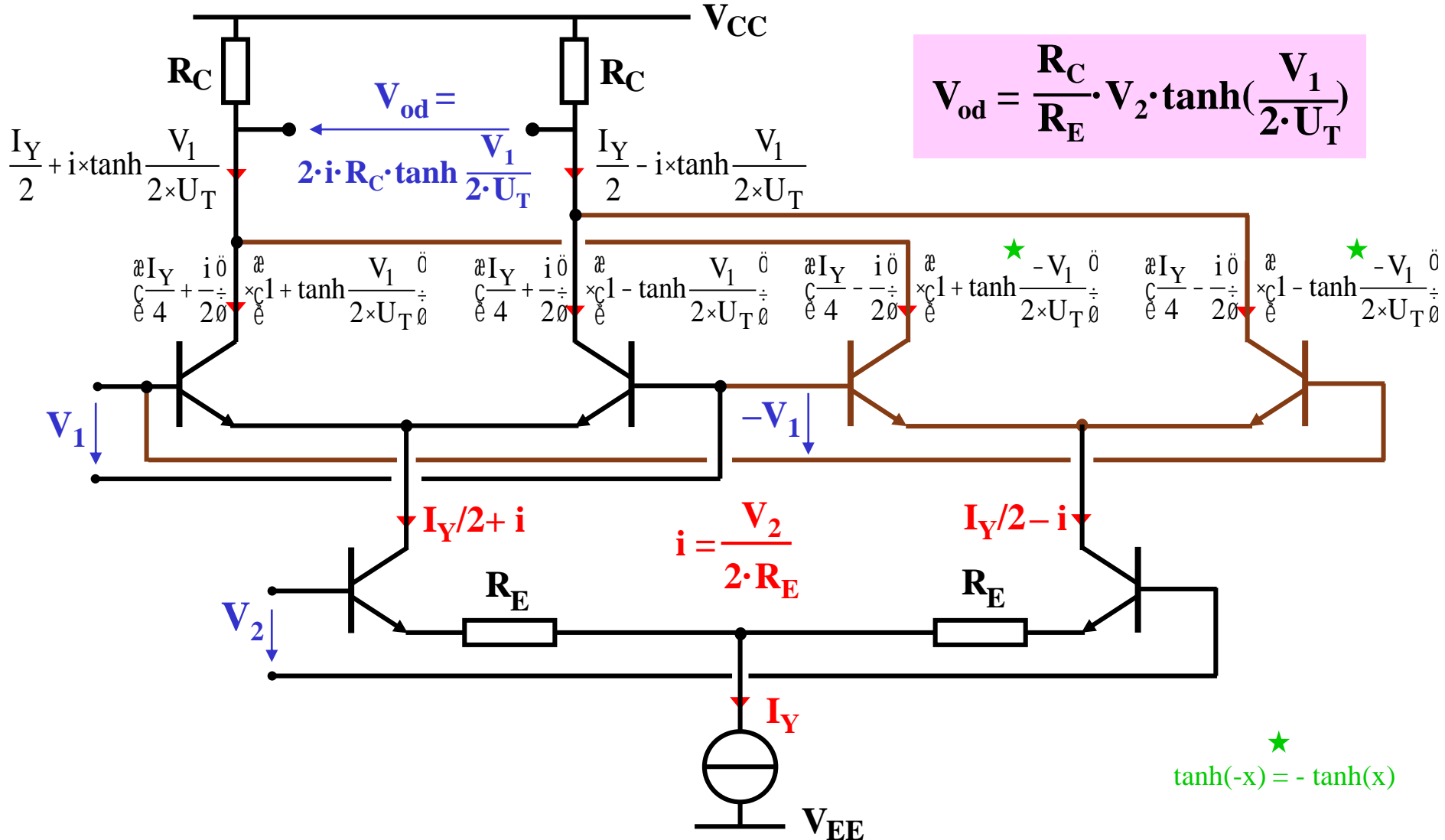
En remplaçant la source  $I = \text{cst}$   
par une source commandée

$$V_{od} = \underbrace{G \cdot V_2}_{>0} \cdot R_C \cdot \frac{V_1}{2 \cdot U_T} \Rightarrow V_2 \text{ unipolaire}$$

$$V_{od} = V_1 \cdot V_2 \cdot \frac{G \cdot R_C}{2 \cdot U_T}$$

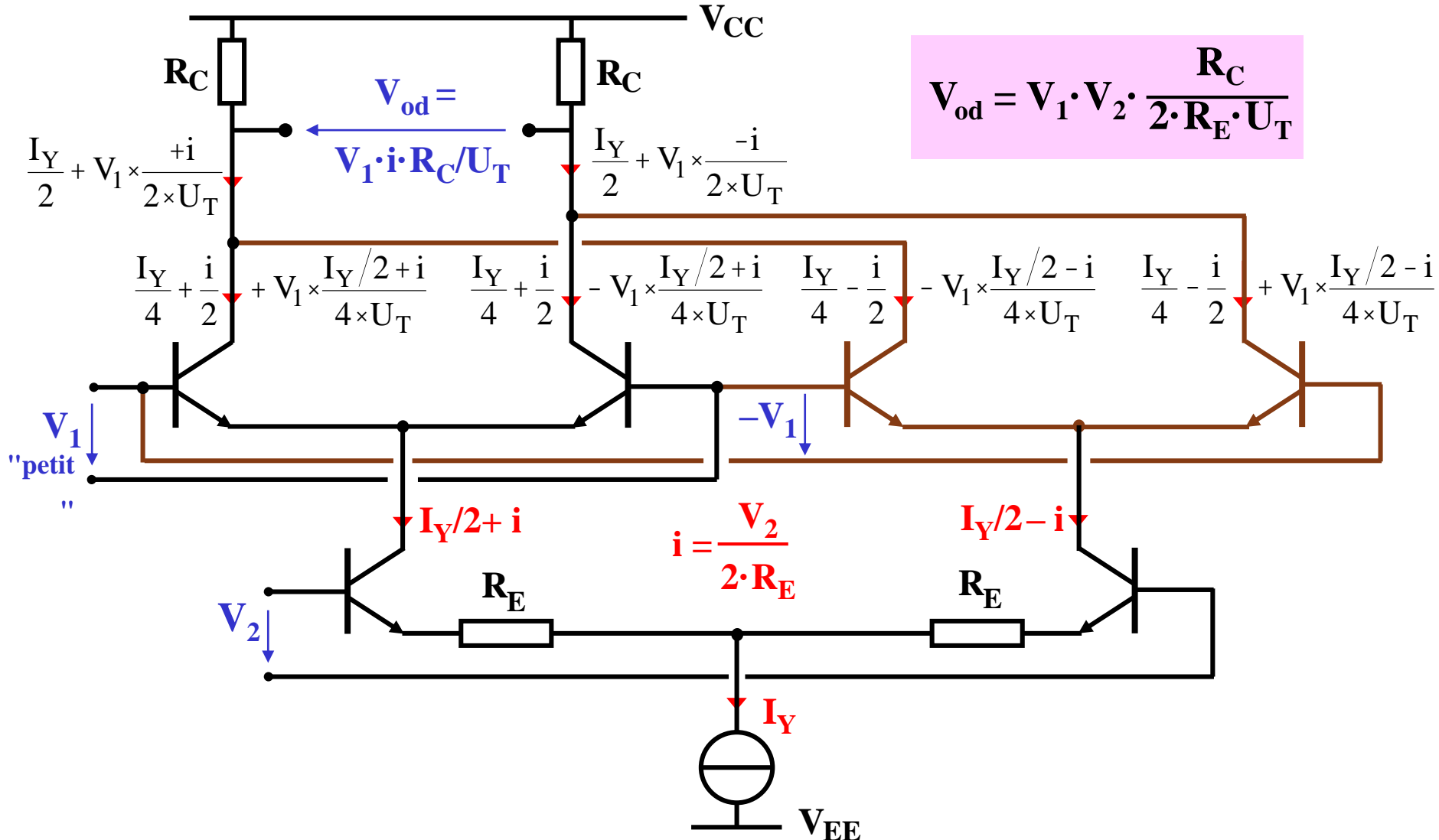
## 6. MULTIPLIEUR ANALOGIQUE

# MULTIPLIEUR ANALOGIQUE "QUATRE QUADRANTS" A CELLULE DE "GILBERT"



## 6. MULTIPLIEUR ANALOGIQUE

### MULTIPLIEUR ANALOGIQUE "QUATRE QUADRANTS" A CELLULE DE "GILBERT"



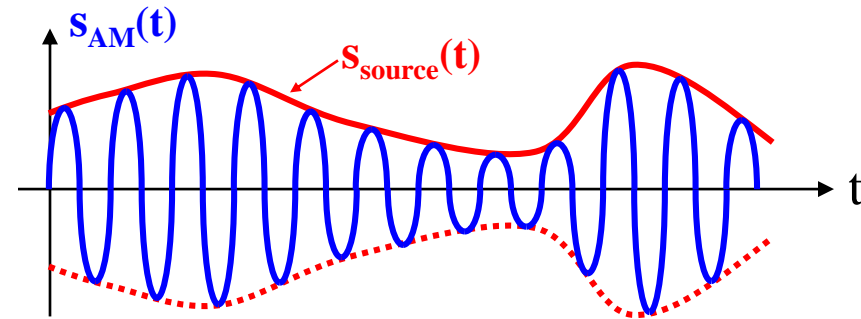
## 6. MULTIPLIEUR ANALOGIQUE

### MULTIPLIEUR ANALOGIQUE "QUATRE QUADRANTS" A CELLULE DE "GILBERT"

#### APPLICATIONS:

- Modulation AM:

$$S_{AM}(t) = S_{source}(t) \times \sin(2\pi \times f_{porteuse} \times t)$$



- Démodulation AM synchrone:

$$\begin{aligned} S_{AM}(t) \times \sin(2\pi \times f_{porteuse} \times t) &= S_{source}(t) \times \sin(2\pi \times f_{porteuse} \times t) \times \sin(2\pi \times f_{porteuse} \times t) \\ &= \frac{1}{2} \times S_{source}(t) - \cancel{\frac{1}{2} \times S_{source}(t) \times \cos(2\pi \times 2f_{porteuse} \times t)} \end{aligned}$$

- Changement de fréquence:

$$\begin{aligned} \sin(2\pi \times f_1 \times t) \times \sin(2\pi \times f_2 \times t) &= \frac{1}{2} \times \cos(2\pi \times (f_2 - f_1) \times t) - \cancel{\frac{1}{2} \times \cos(2\pi \times (f_2 + f_1) \times t)} \end{aligned}$$

- Détection de phase:

$$\begin{aligned} \sin(2\pi \times f_1 \times t + f) \times \sin(2\pi \times f_1 \times t) &= \frac{1}{2} \times \cos(f) - \cancel{\frac{1}{2} \times \cos(2\pi \times 2f_1 \times t)} \end{aligned}$$