

L'AMPLIFICATEUR DIFFERENTIEL

EPFL

L'AMPLIFICATEUR DIFFERENTIEL

1. INTRODUCTION

2. SCHÉMA ET PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

3. CARACTÉRISTIQUE DE TRANSFERT "GRANDS SIGNAUX"

4. COMPORTEMENT "PETITS SIGNAUX« AVEC CHARGES RÉSISTIVES

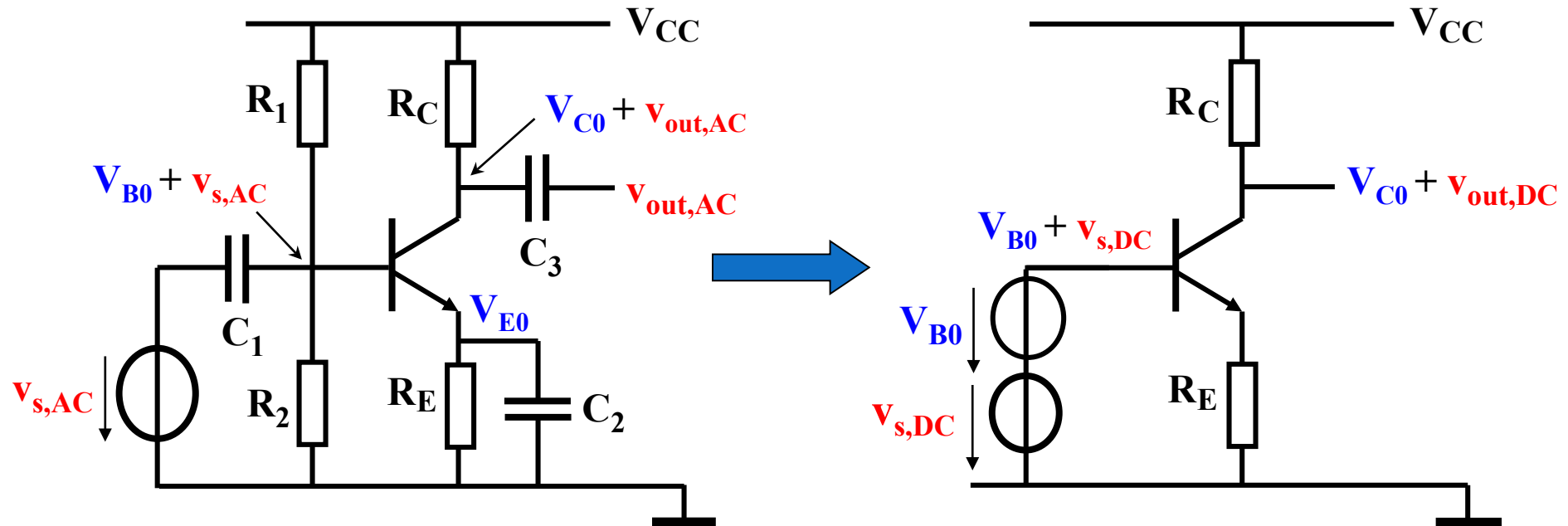
5. AMPLI DIFFÉRENTIEL À CHARGES ACTIVES

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

1. INTRODUCTION

1. PROBLÈME DE L'AMPLIFICATION DE PETITS SIGNAUX DC

POLARISATION "CLASSIQUE"



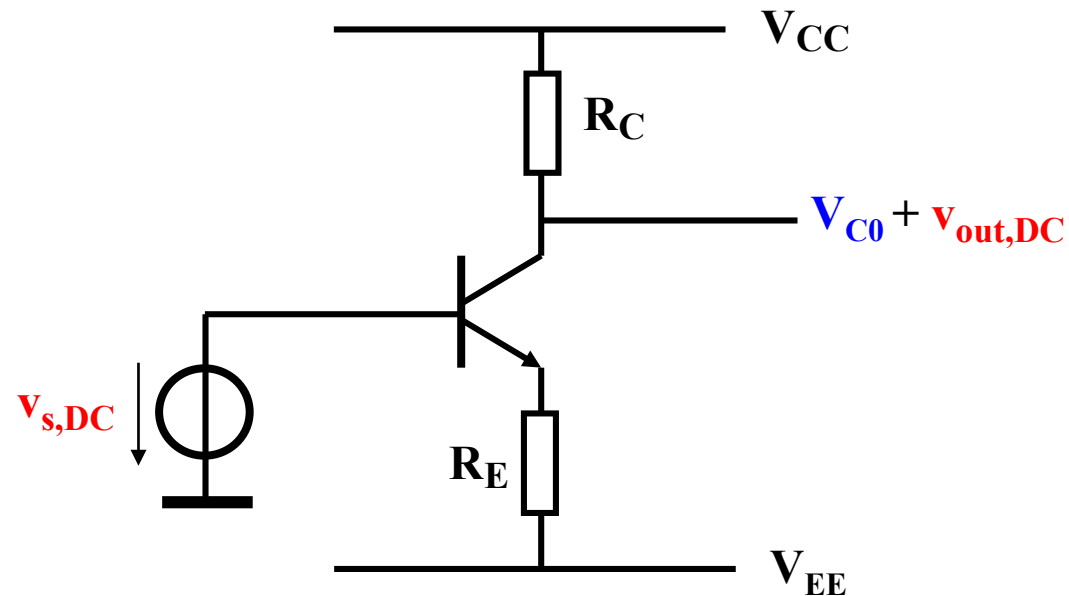
Problèmes:

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 ?

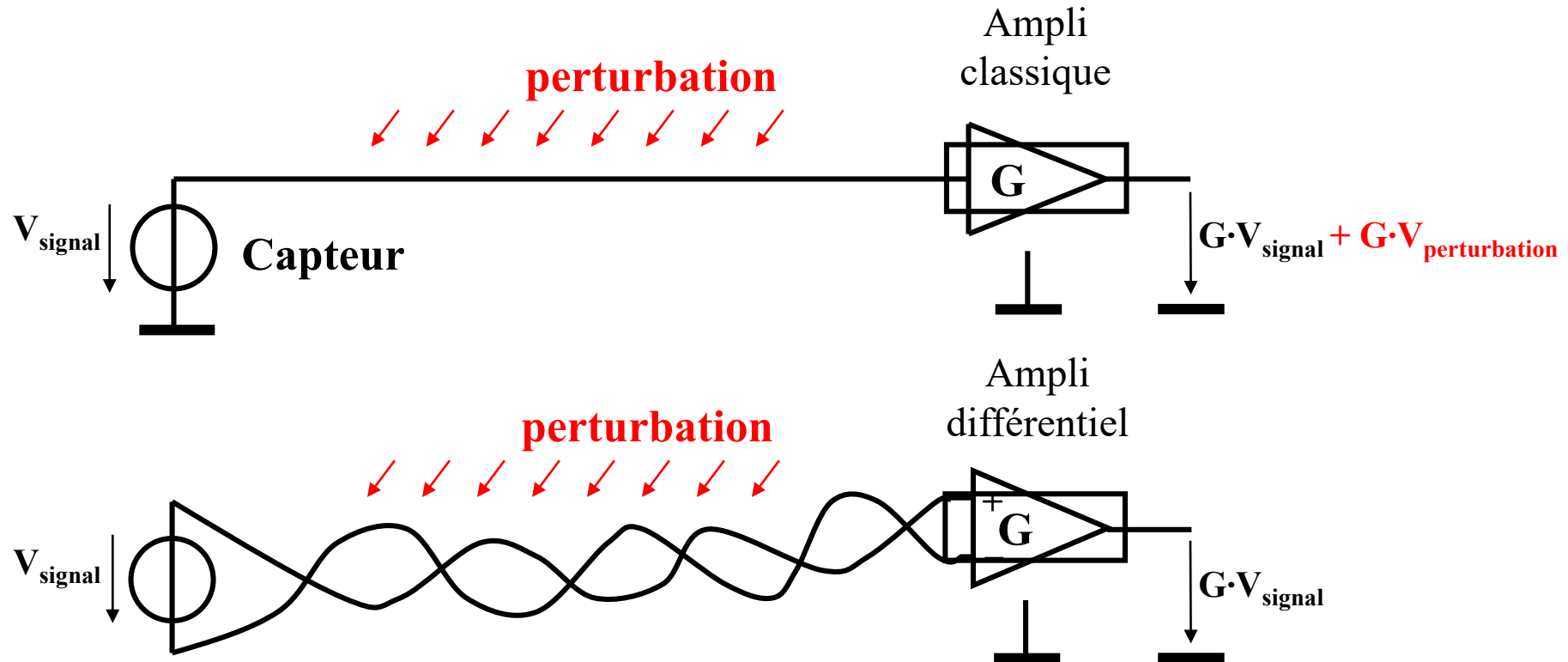


Problèmes :

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

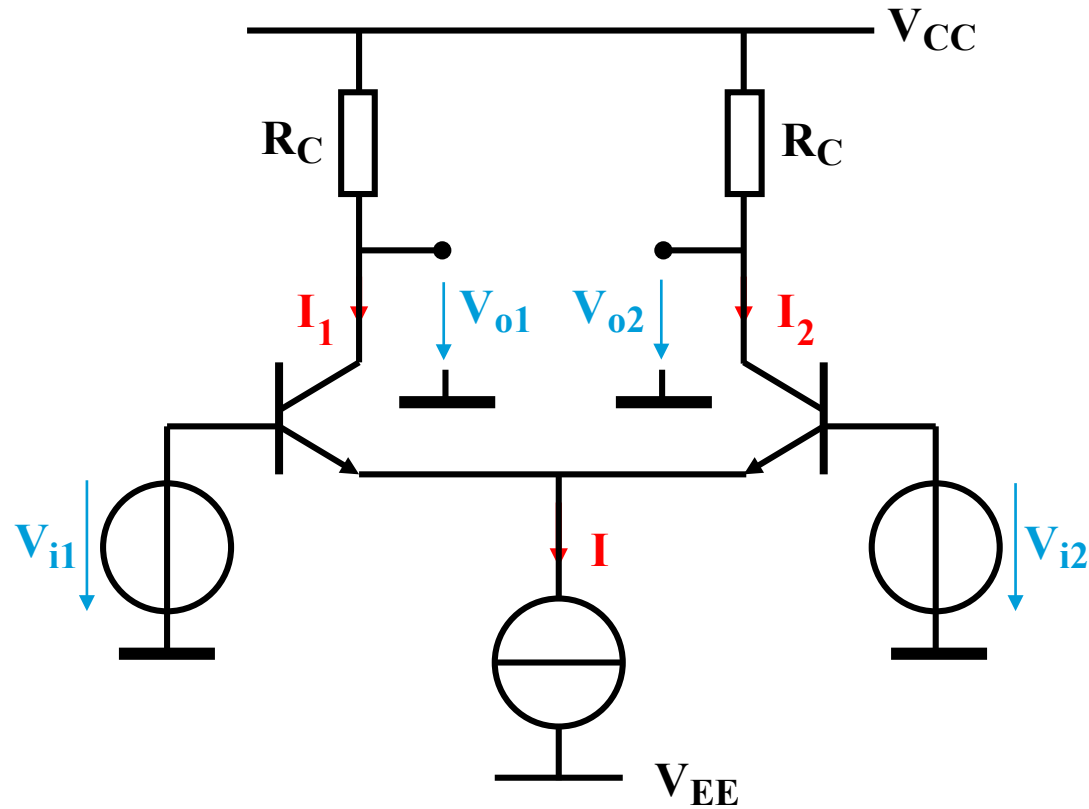
1. INTRODUCTION

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

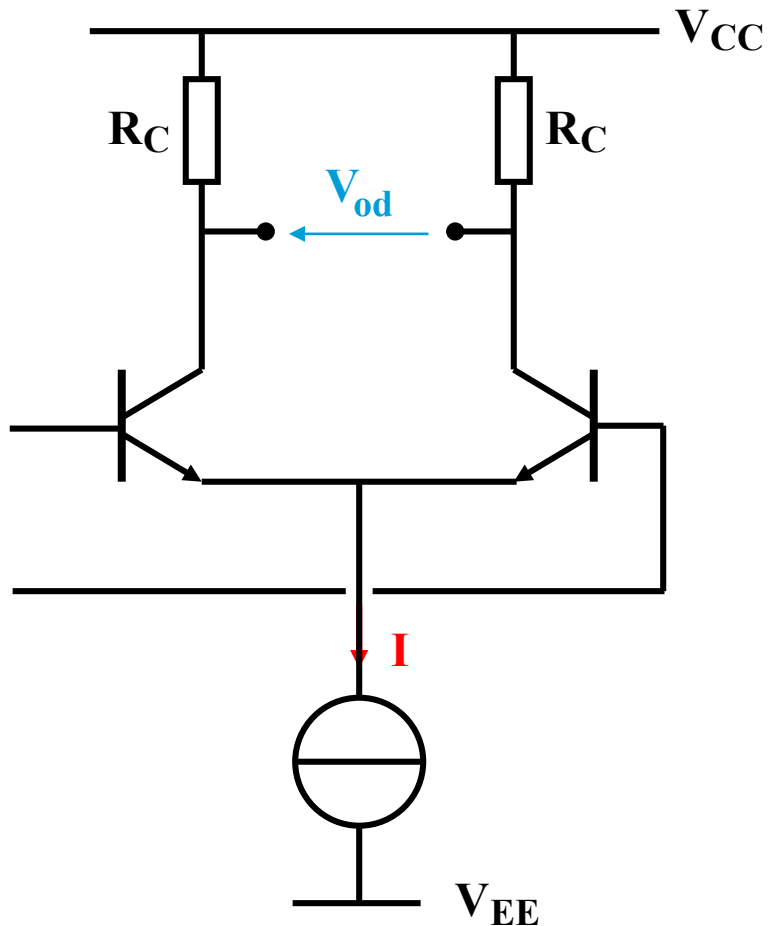


- Symétrie
- Couplage DC
- Amplifie ($V_{i1} - V_{i2}$)
- Tenue en température
- Techno Bipolaire ou MOS
- $I_1 + I_2 = I$ constant

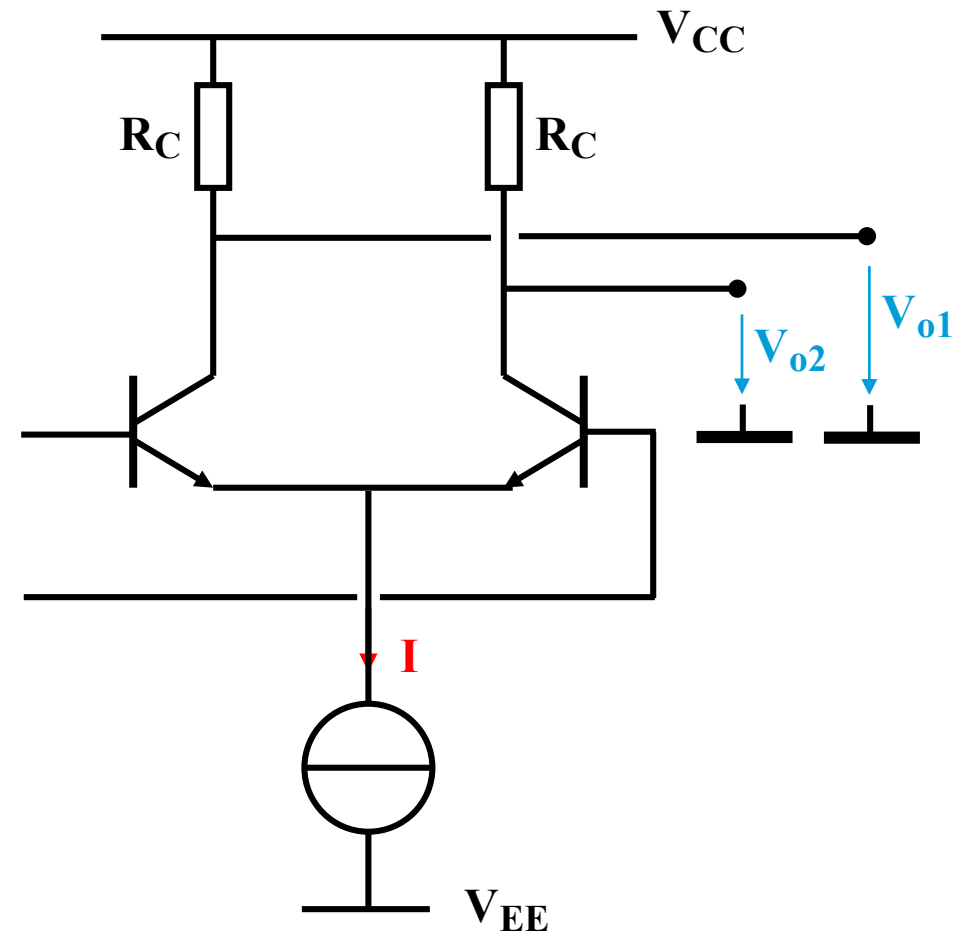
2. L'AMPLIFICATEUR DIFFERENTIEL : SCHEMA DE BASE ET PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

DEUX MODES DE SORTIE

DIFFERENTIELLE



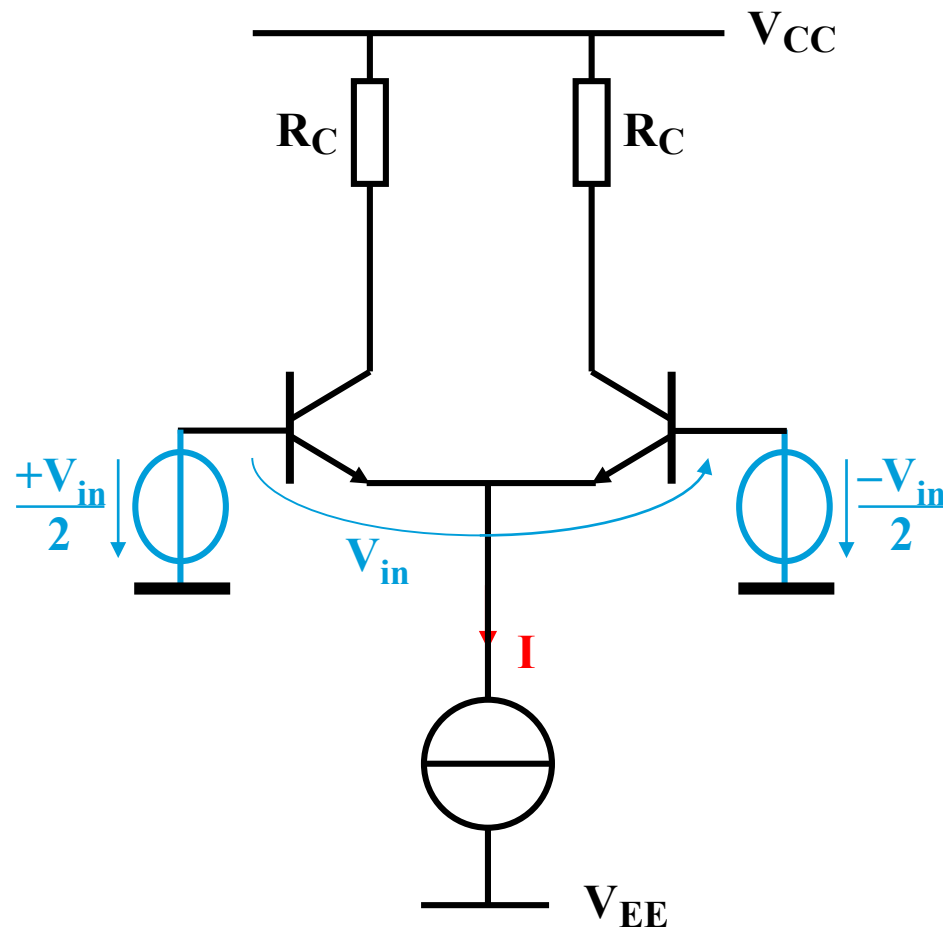
ASYMETRIQUE(S) "SINGLE ENDED"



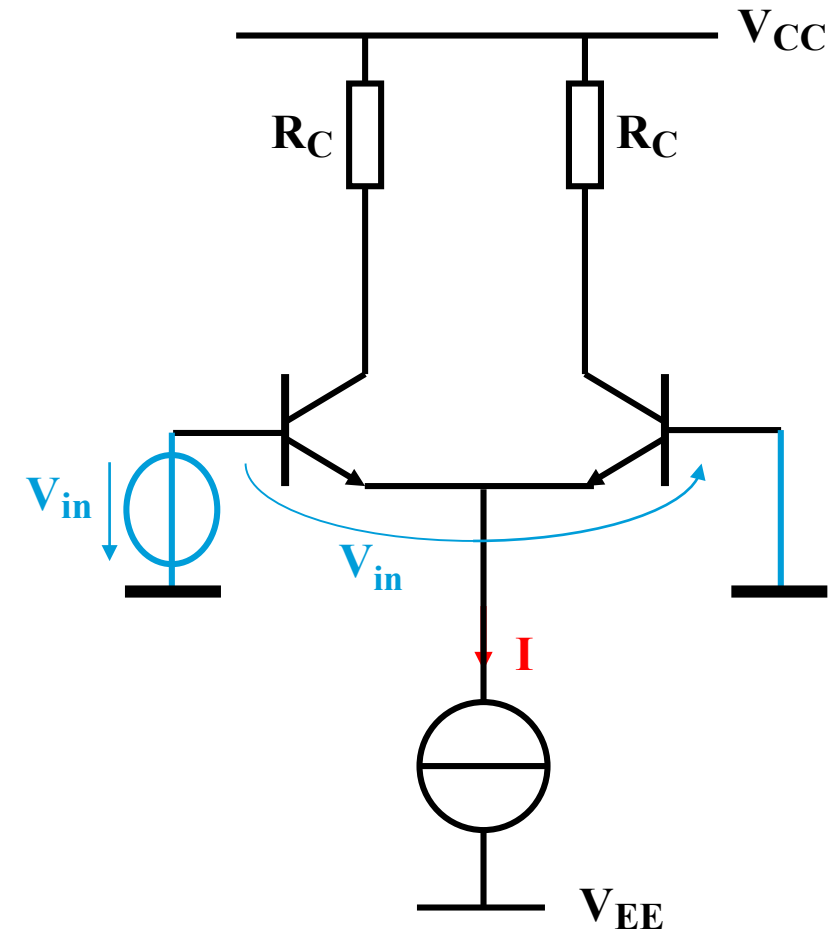
2. L'AMPLIFICATEUR DIFFERENTIEL : SCHEMA DE BASE ET PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

DEUX MODES D'ENTRÉE

DIFFERENTIELLE



ASYMETRIQUE



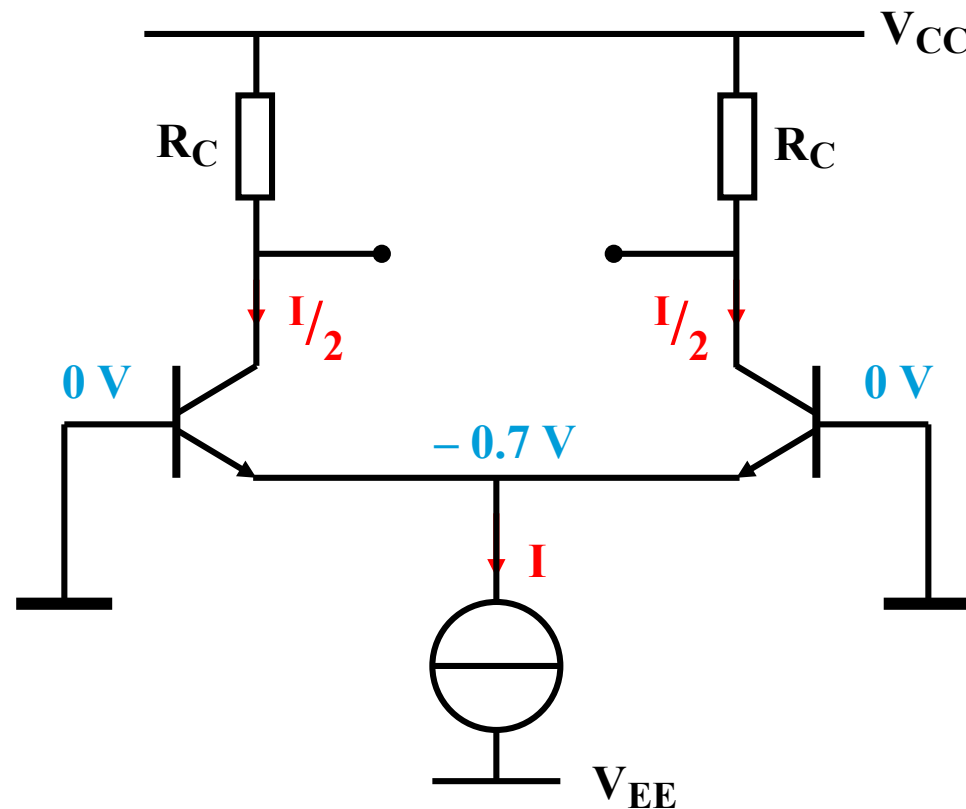
2. L'AMPLIFICATEUR DIFFERENTIEL : SCHEMA DE BASE ET PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

ENTRÉES NULLES:

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

↑
exact

EQUILIBRE

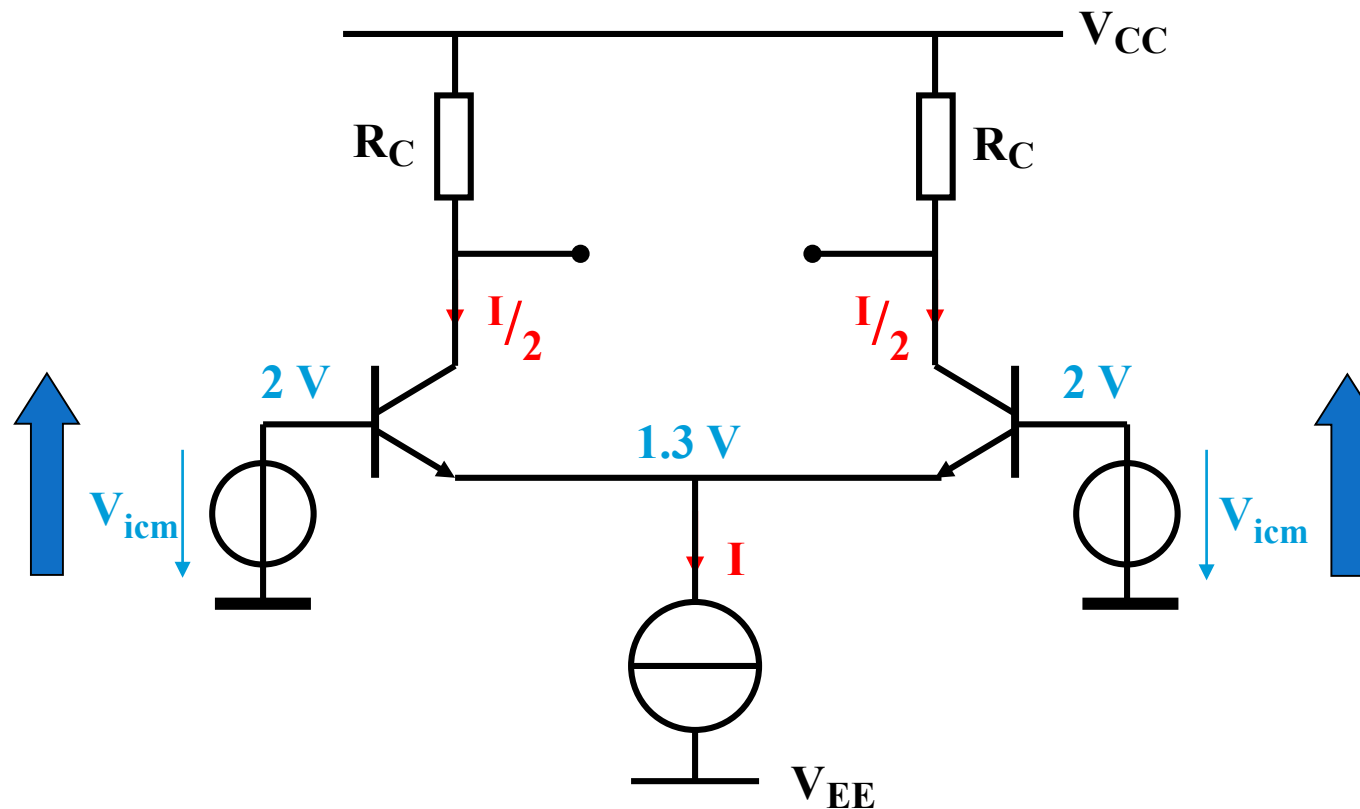


2. L'AMPLIFICATEUR DIFFERENTIEL : SCHEMA DE BASE ET PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

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

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

L' EQUILIBRE EST MAINTENU

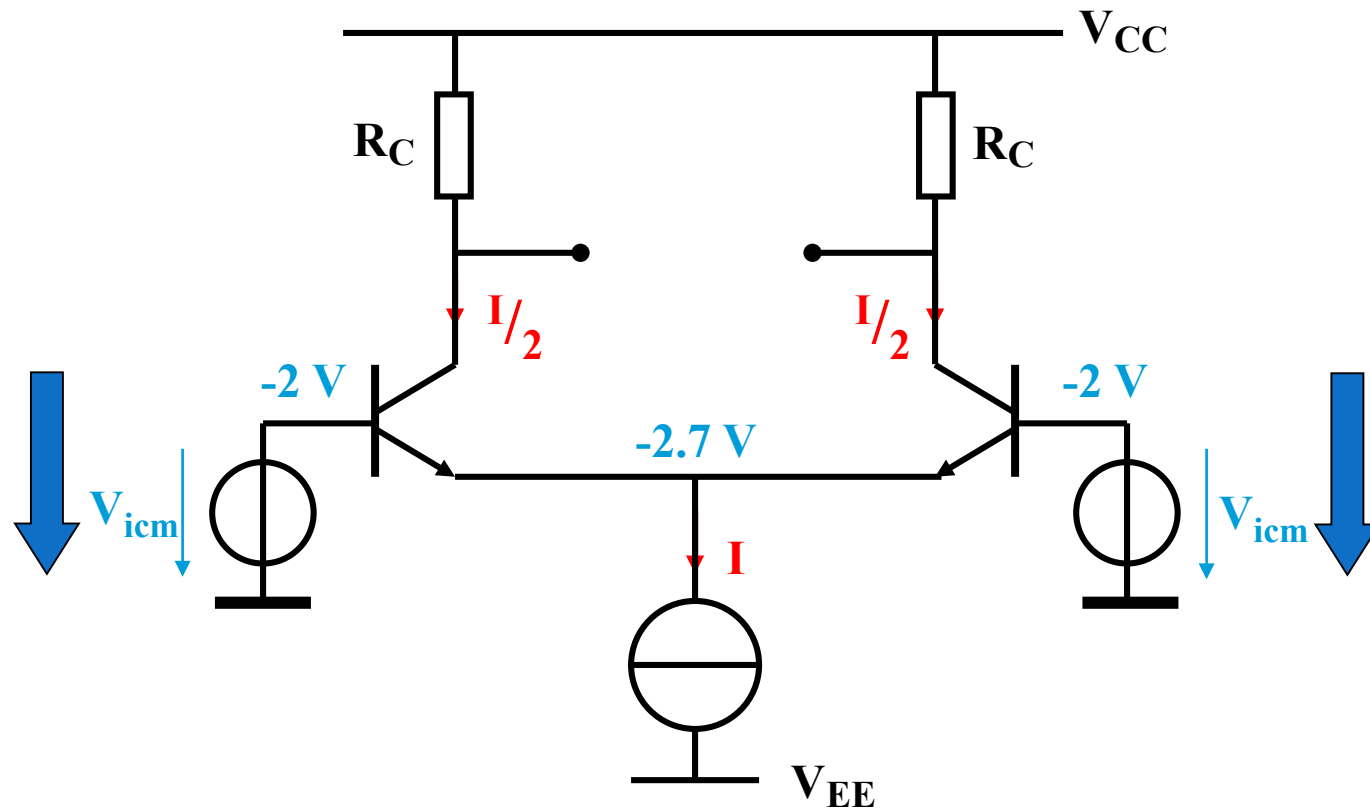


2. L'AMPLIFICATEUR DIFFERENTIEL : SCHEMA DE BASE ET PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

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

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

L' EQUILIBRE EST MAINTENU

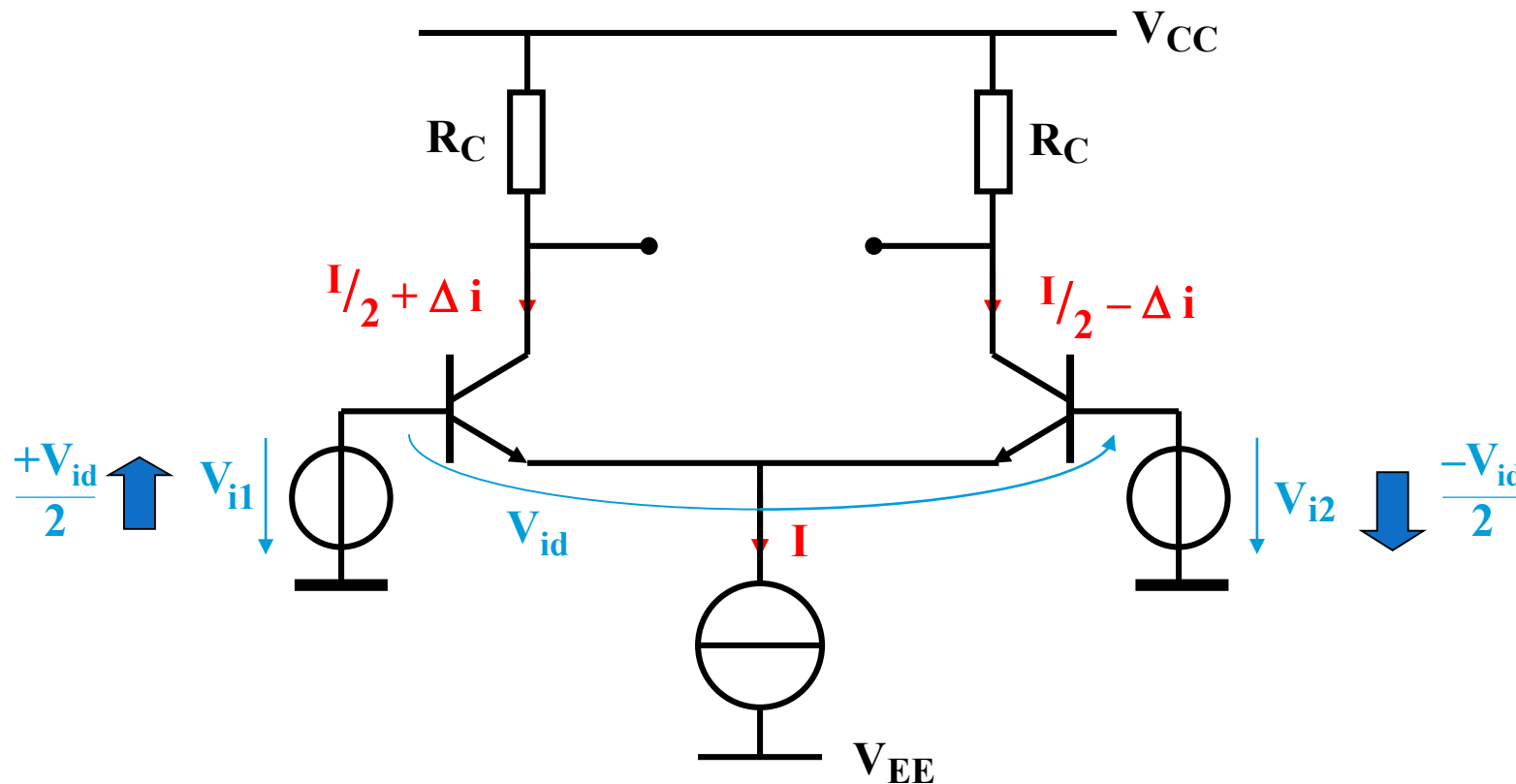


2. L'AMPLIFICATEUR DIFFERENTIEL : SCHEMA DE BASE ET PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

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}

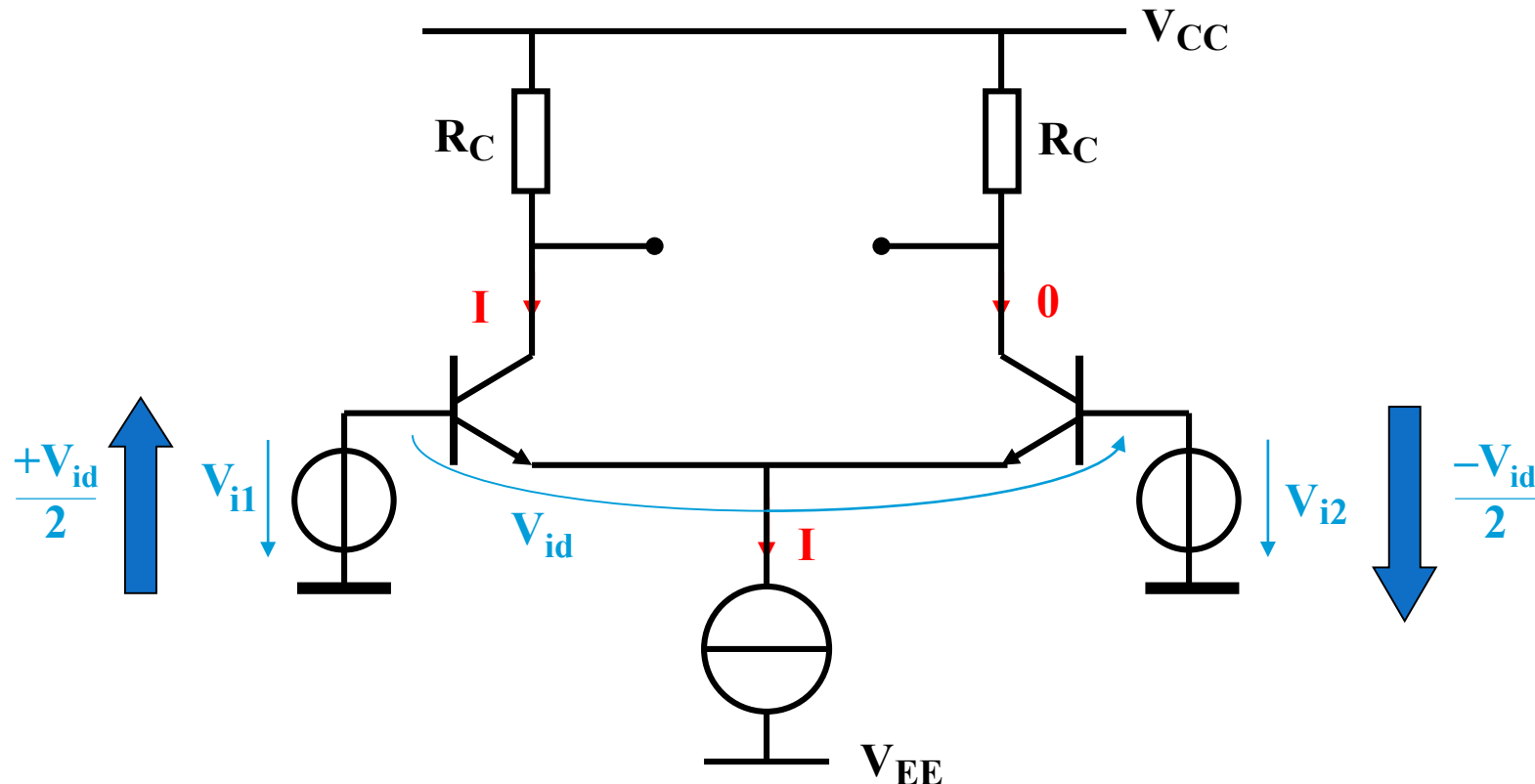


2. L'AMPLIFICATEUR DIFFERENTIEL : SCHEMA DE BASE ET PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

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}

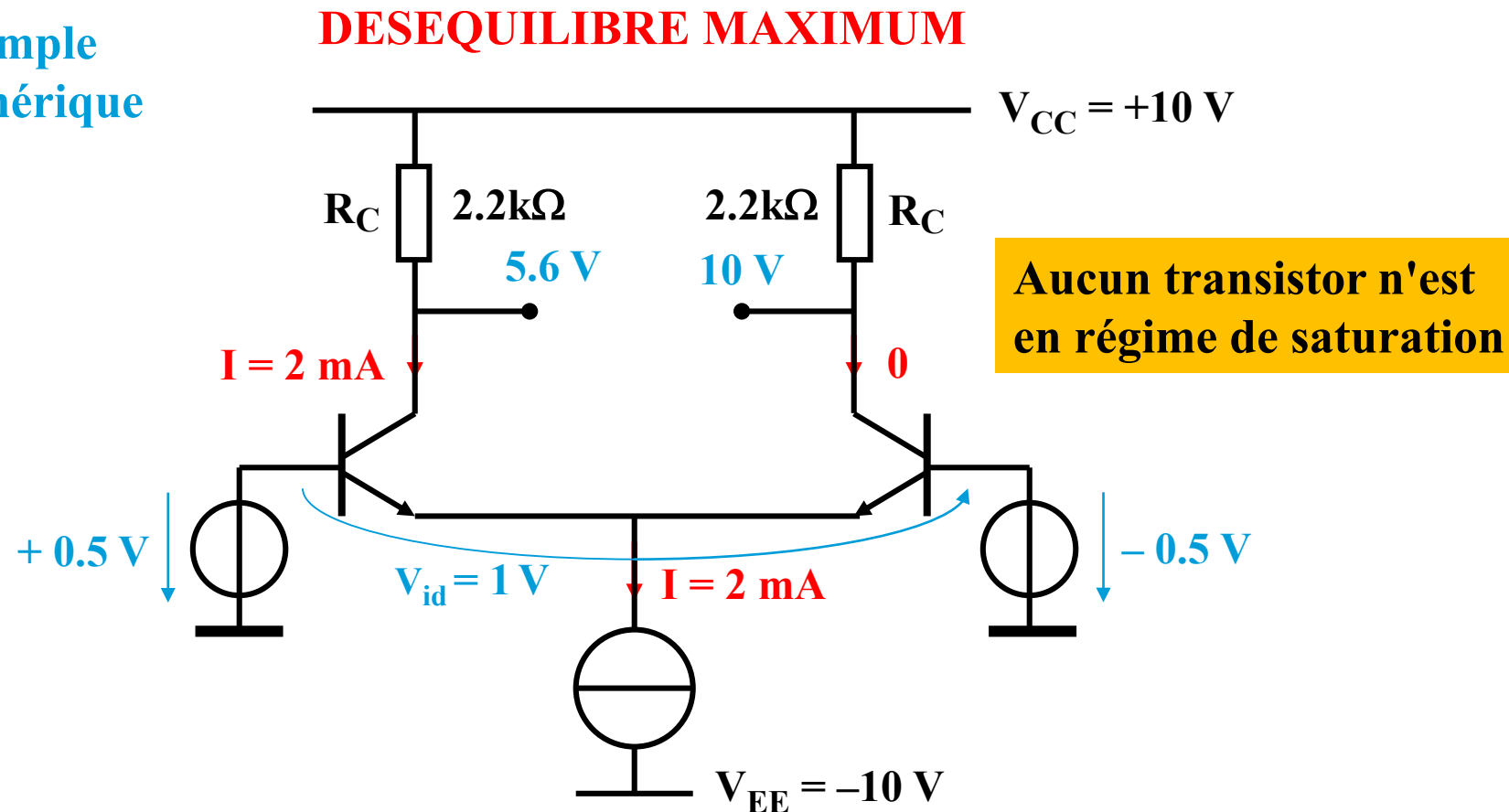


2. L'AMPLIFICATEUR DIFFERENTIEL : SCHEMA DE BASE ET PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

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

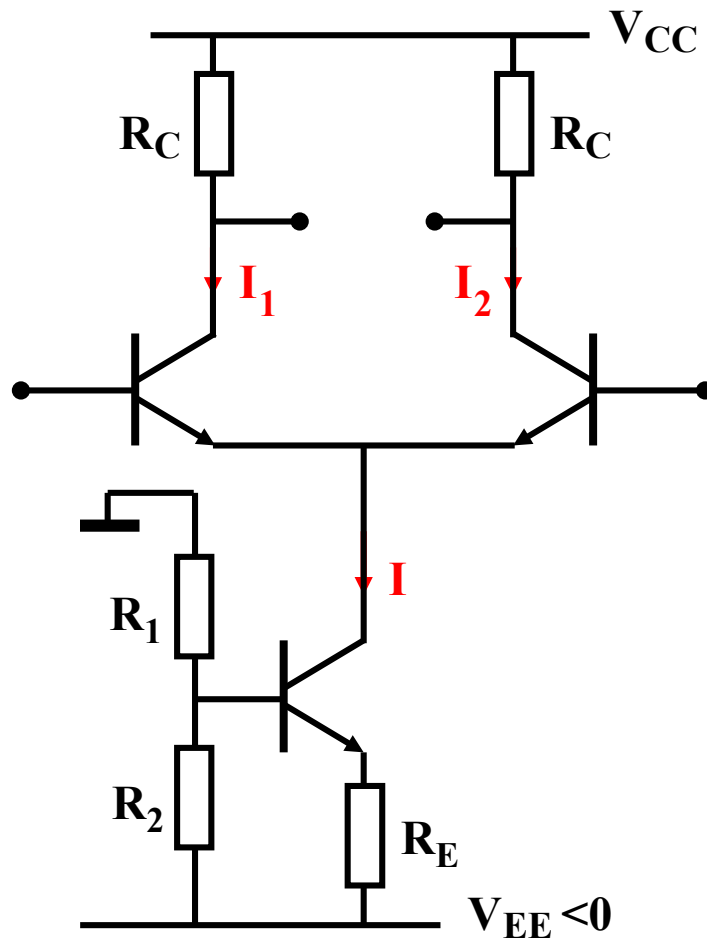
Exemple
numérique



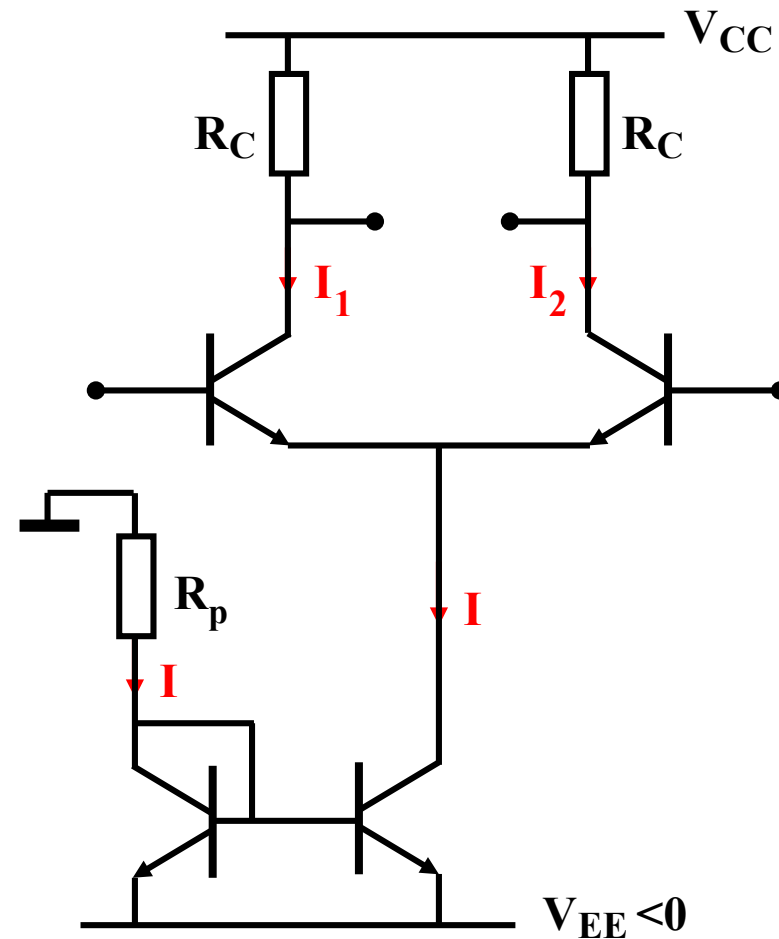
2. L'AMPLIFICATEUR DIFFERENTIEL : SCHEMA DE BASE ET PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

EXEMPLES DE RÉALISATION DE LA SOURCE DE COURANT

ELÉMENTS DISCRETS



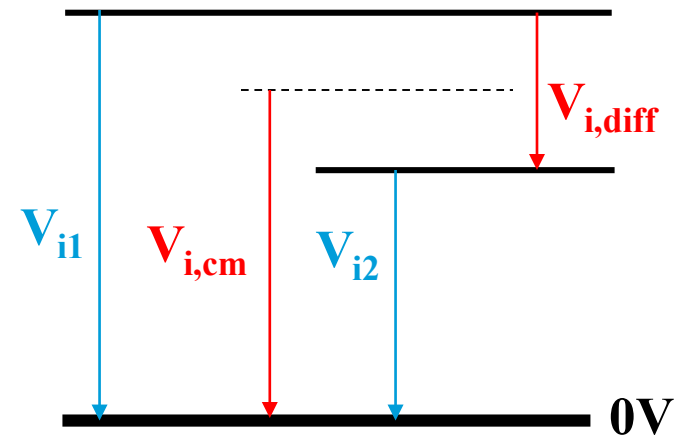
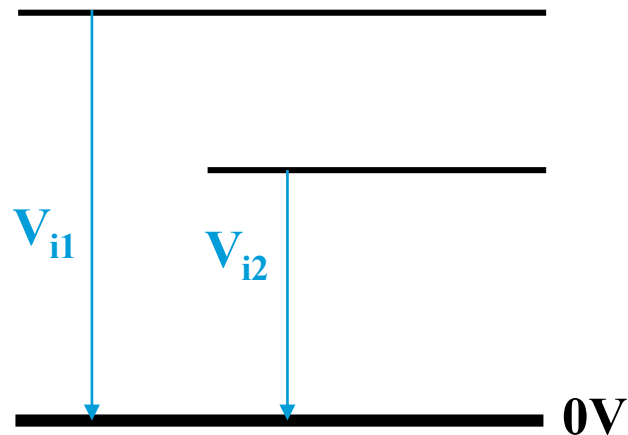
CIRCUIT INTÉGRÉ



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

SIGNAUX D'ENTRÉE QUELCONQUES

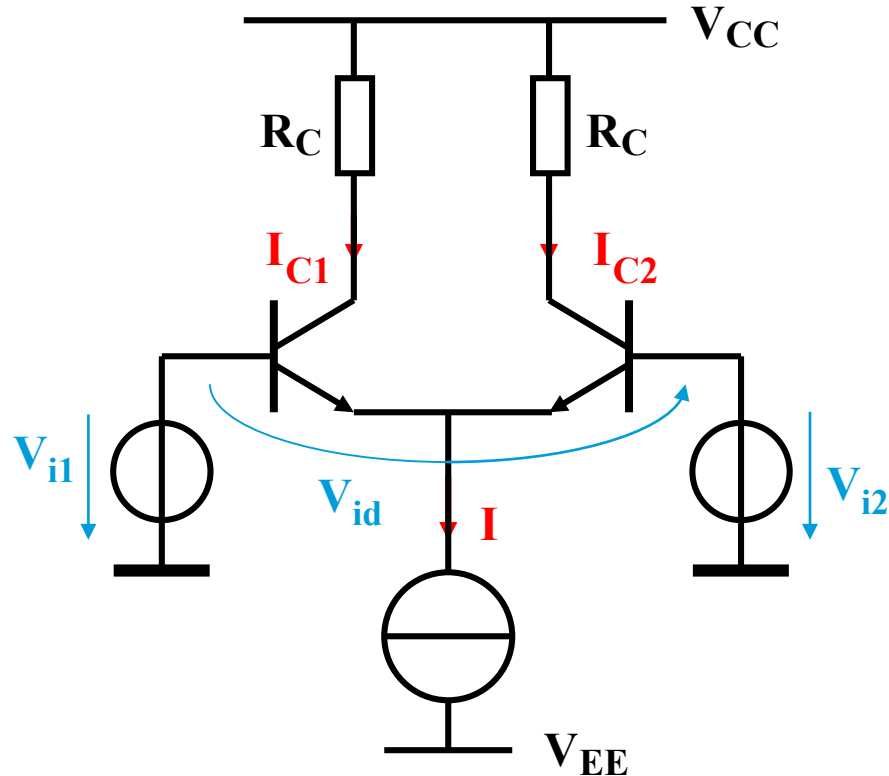
On peut toujours décomposer des signaux d'entrée quelconques en une composante de mode commun et une composante différentielle



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

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

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



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

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

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

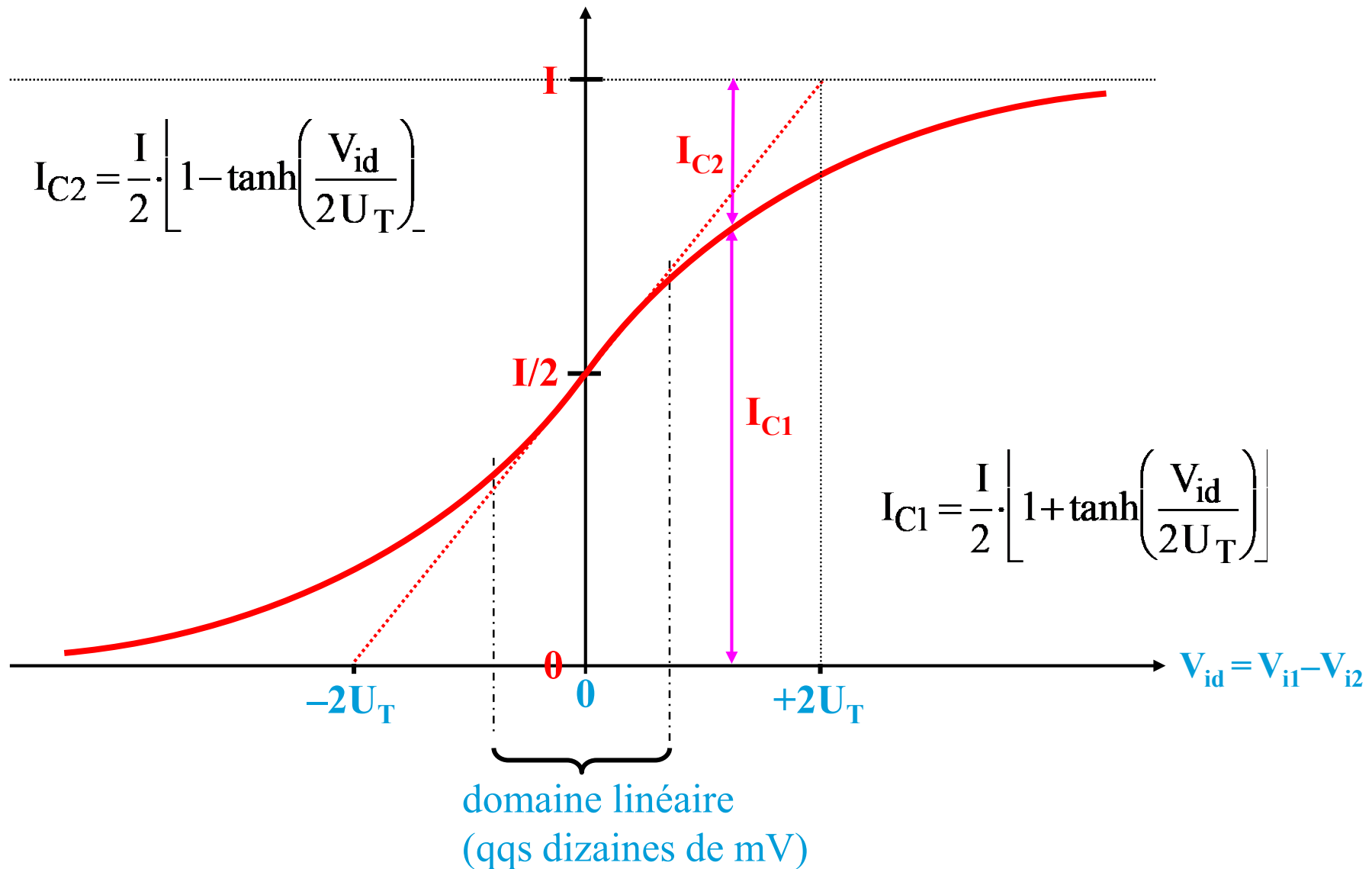
$$I_{C1} + I_{C2} = I \Rightarrow \begin{cases} I_{C1} = I/2 + \Delta I \\ I_{C2} = I/2 - \Delta I \end{cases}$$

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

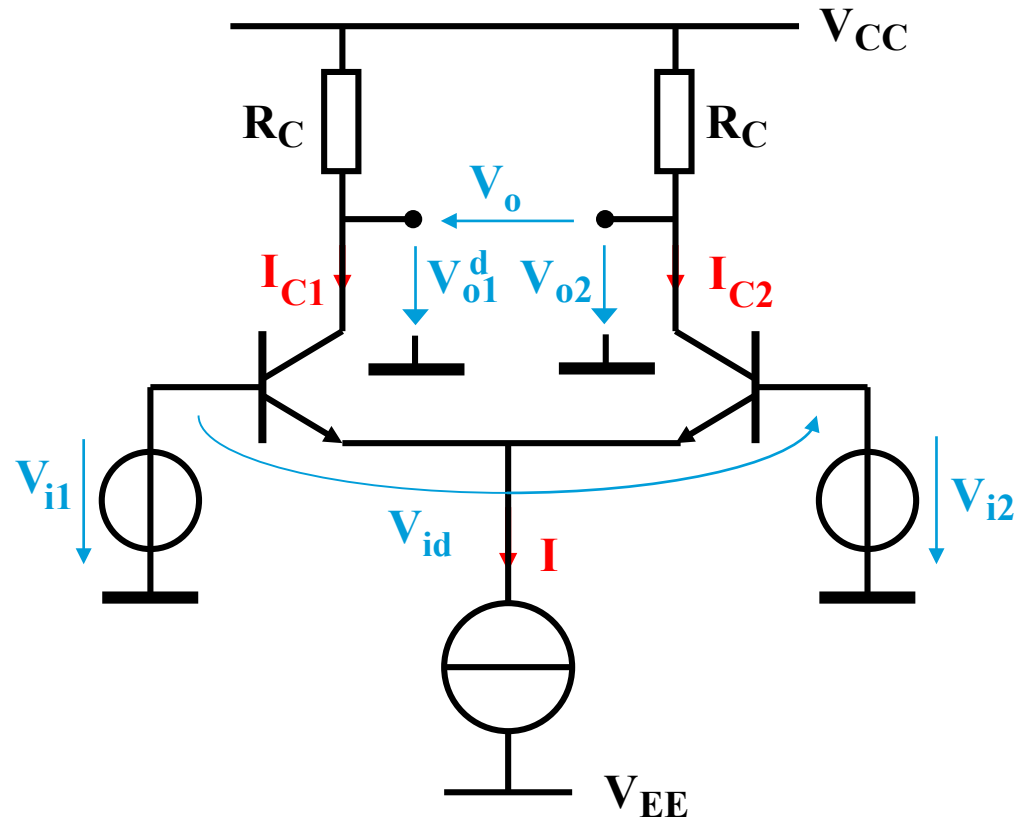
$$I_{C1} = \frac{I}{2} \cdot \left(1 + \tanh\left(\frac{V_{id}}{2 \cdot U_T}\right)\right)$$

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

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



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



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

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

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

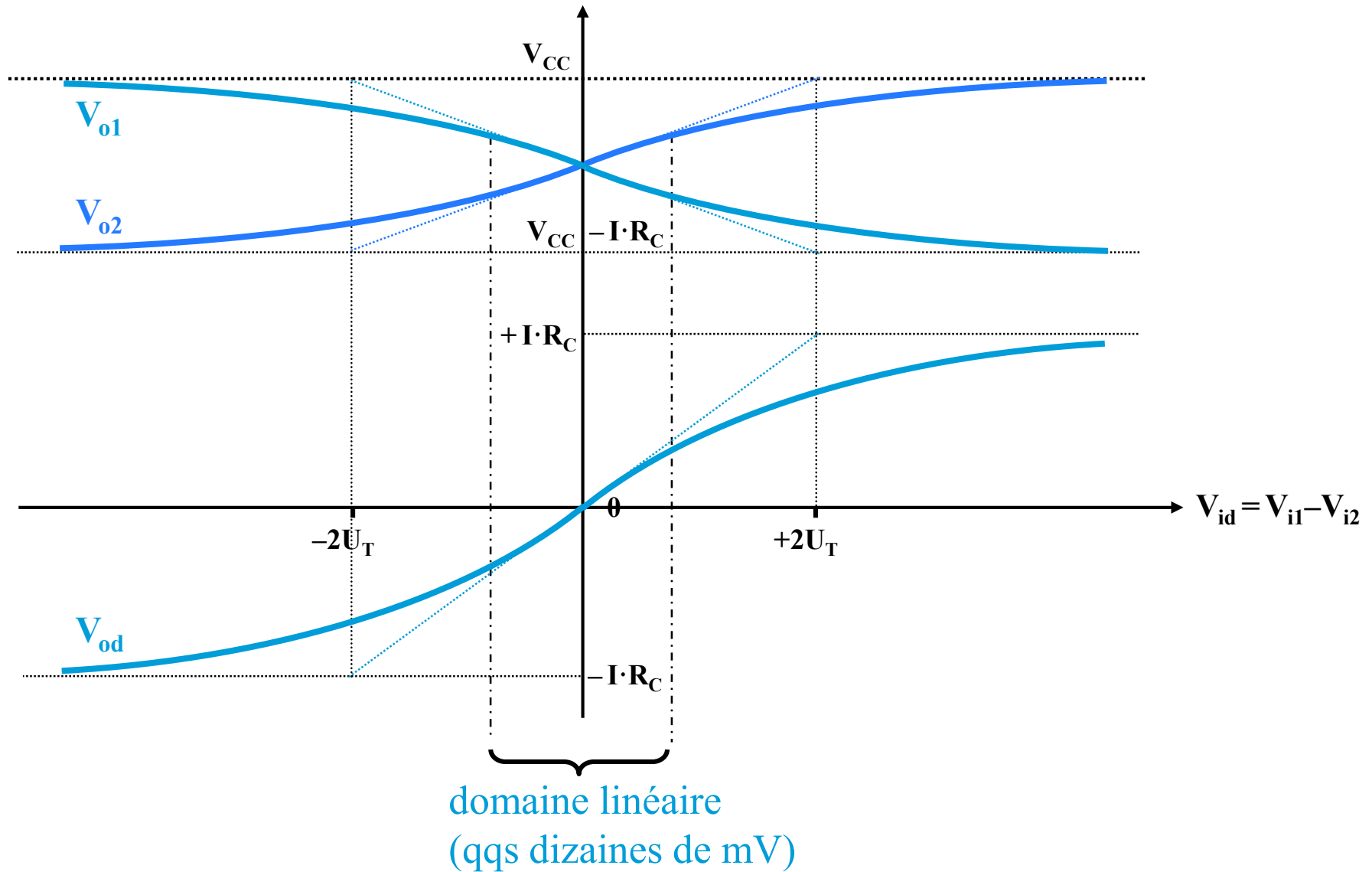
$$V_{o1} = V_{CC} - \frac{I \cdot R_C}{2} - \frac{I \cdot R_C}{2} \cdot \tanh\left(\frac{V_{id}}{2 \cdot U_T}\right)$$

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

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

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

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



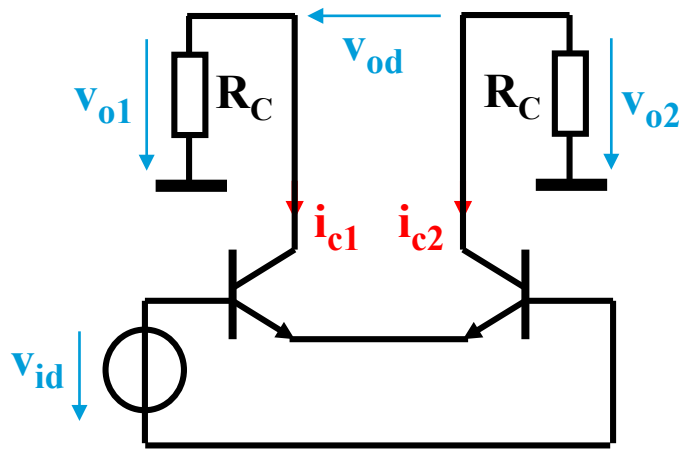
4. L'AMPLIFICATEUR DIFFÉRENTIEL : COMPORTEMENT "PETITS SIGNAUX" AVEC CHARGES RÉSISTIVES

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

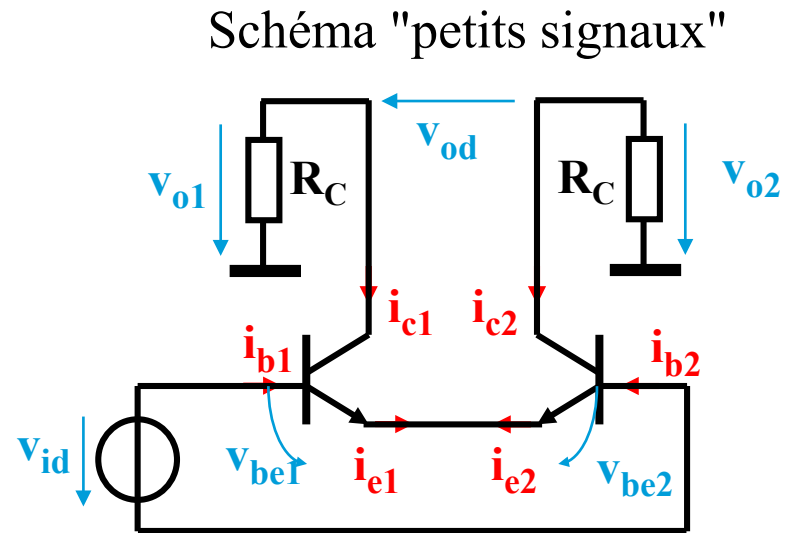
sortie asym. : gain en tension divisé par 2

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"



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

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

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

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

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

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

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

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

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

sortie asym. : gain en tension divisé par 2

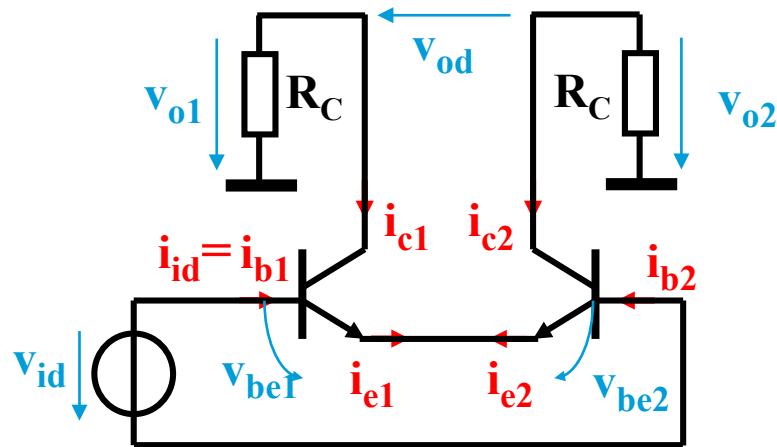
4. L'AMPLIFICATEUR DIFFÉRENTIEL : COMPORTEMENT "PETITS SIGNAUX" AVEC CHARGES RÉSISTIVES

4.1. RÉSISTANCE D'ENTRÉE DIFFÉRENTIELLE R_{id}

MÉTHODE 2

Calcul direct sur le schéma "petits signaux"

Schéma "petits signaux"



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

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

si : $\beta_1 = \beta_2 = \beta$

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

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

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

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

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

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

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

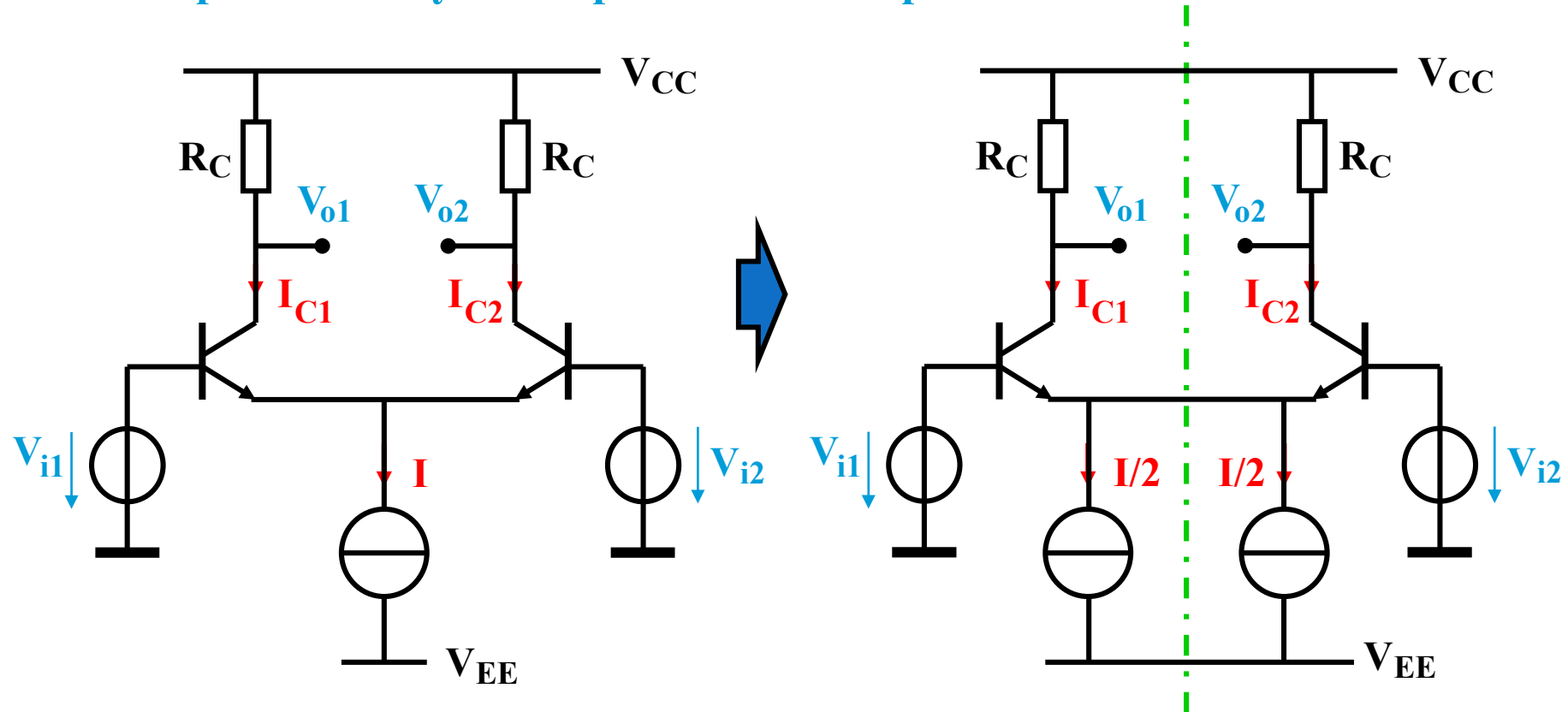
4. L'AMPLIFICATEUR DIFFÉRENTIEL : COMPORTEMENT "PETITS SIGNAUX" AVEC CHARGES RÉSISTIVES

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



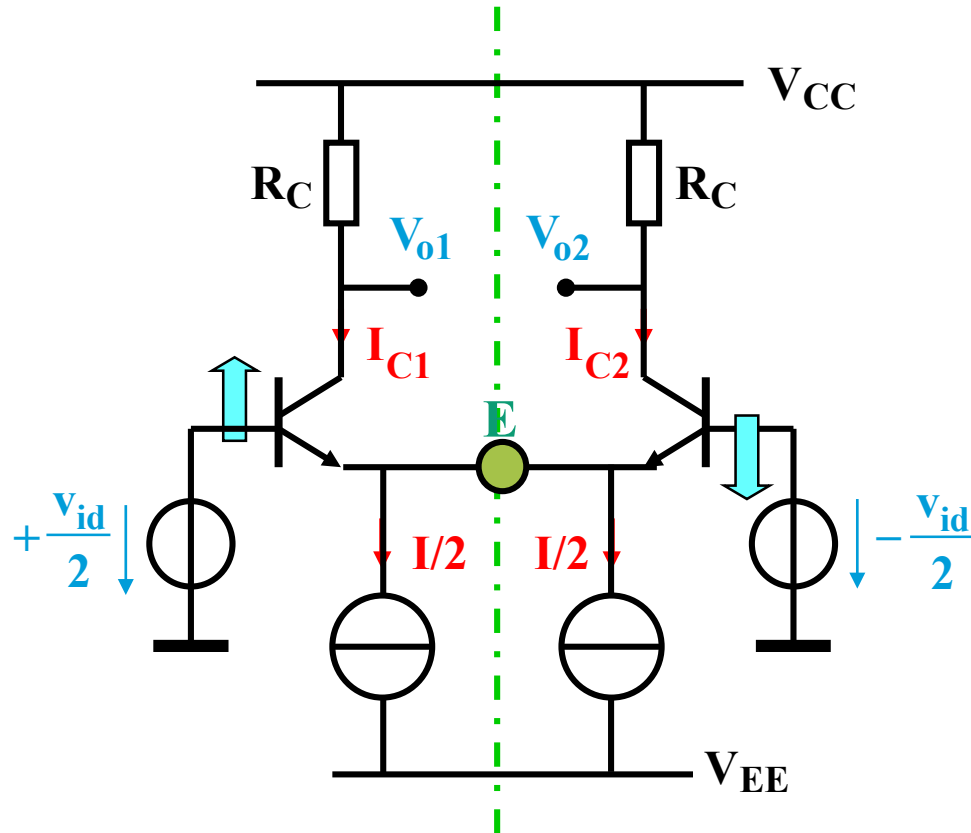
4. L'AMPLIFICATEUR DIFFÉRENTIEL : COMPORTEMENT "PETITS SIGNAUX" AVEC CHARGES RÉSISTIVES

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 !

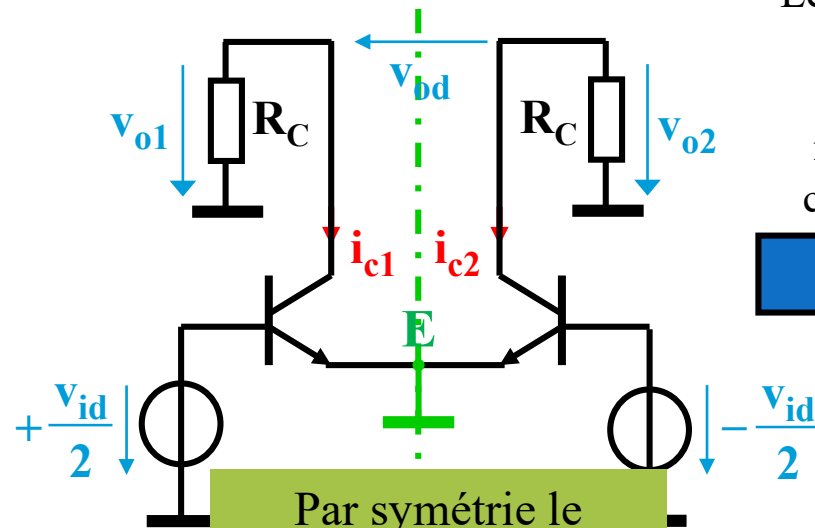
4. L'AMPLIFICATEUR DIFFÉRENTIEL : COMPORTEMENT "PETITS SIGNAUX" AVEC CHARGES RÉSISTIVES

4.1. GAIN EN TENSION DIFFÉRENTIEL A_d

MÉTHODE 3

Demi-circuit équivalent en mode différentiel

Schéma "petits signaux"

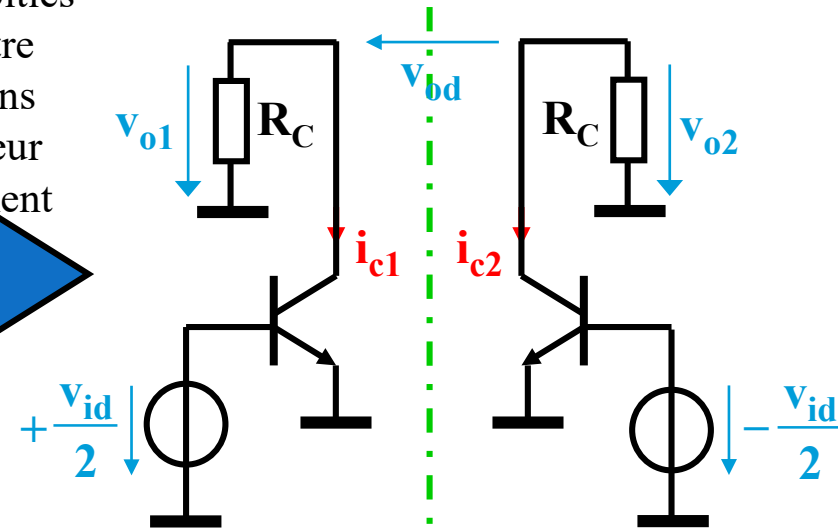


Par symétrie le
potentiel du point E
ne bouge pas
 $\Leftrightarrow$ masse

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

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

Les deux moitiés
peuvent être
séparées sans
modifier leur
comportement



$$\frac{V_{o1}}{V_{id}/2} = A_{EC} = -g_m \cdot R_C \quad ; \quad \frac{V_{o2}}{-V_{id}/2} = A_{EC} = -g_m \cdot R_C$$

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

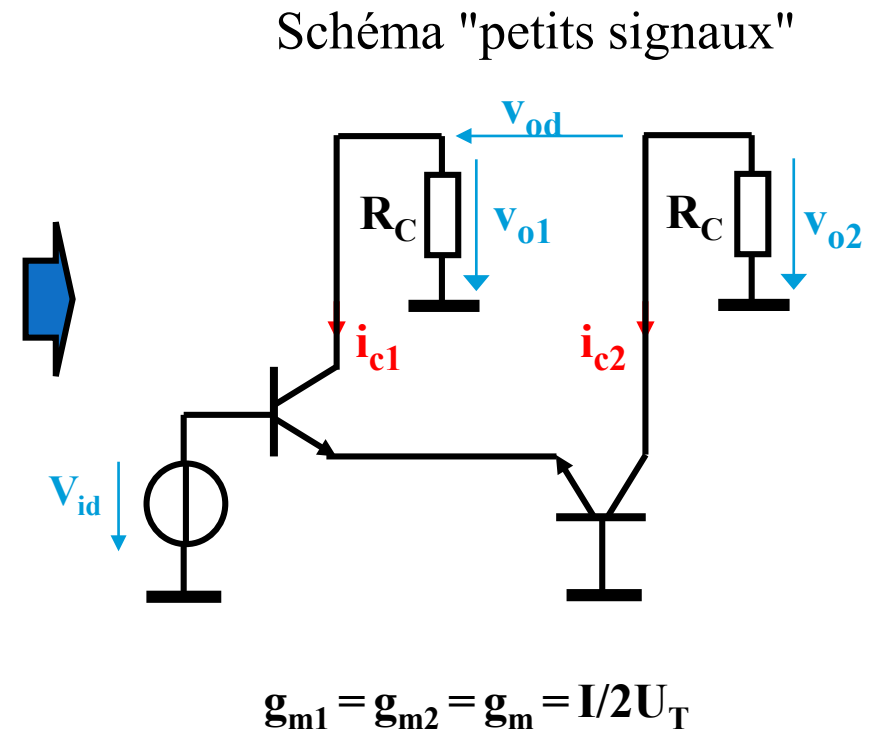
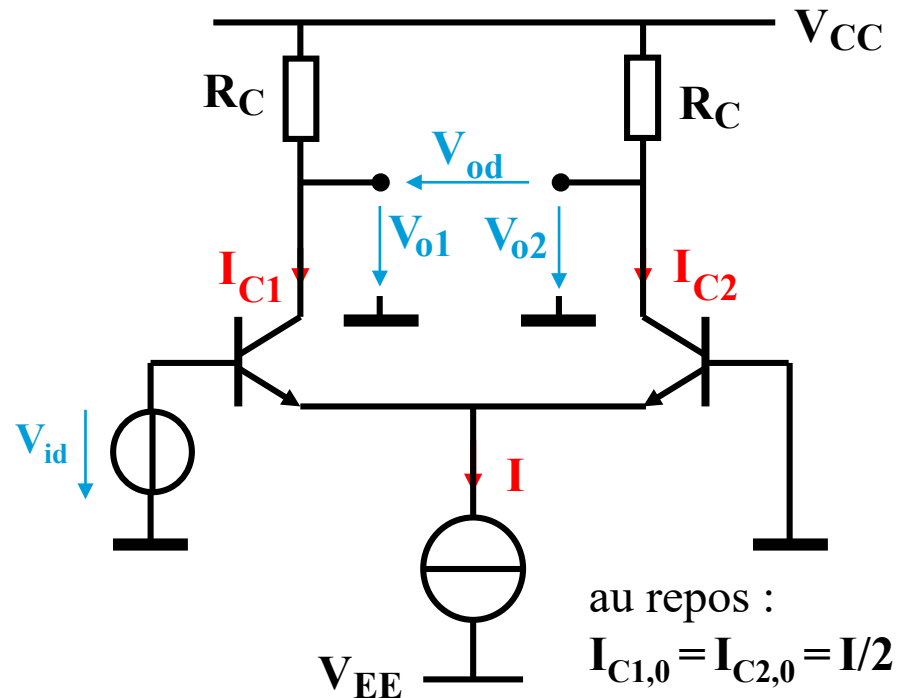
4. L'AMPLIFICATEUR DIFFÉRENTIEL : COMPORTEMENT "PETITS SIGNAUX" AVEC CHARGES RÉSISTIVES

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.



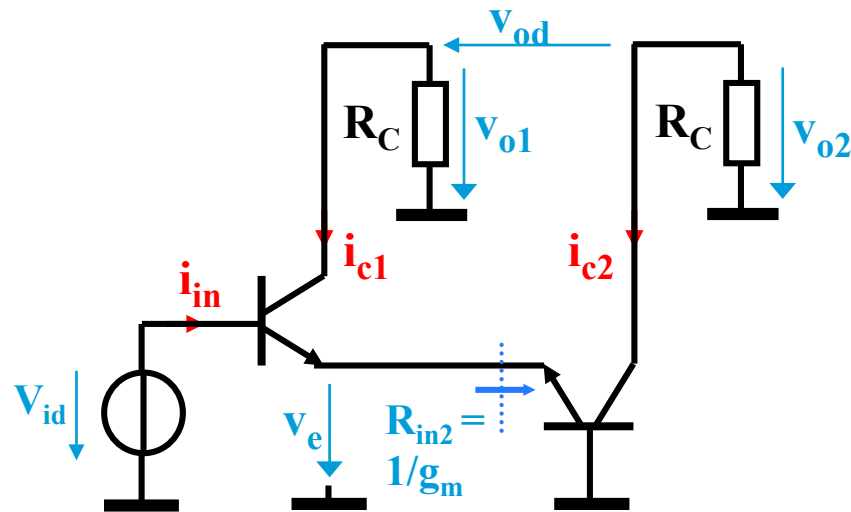
4. L'AMPLIFICATEUR DIFFÉRENTIEL : COMPORTEMENT "PETITS SIGNAUX" AVEC CHARGES RÉSISTIVES

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

MÉTHODE 4

Méthode de l'entrée asymétrique

Schéma "petits signaux"



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

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

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

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

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

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

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

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

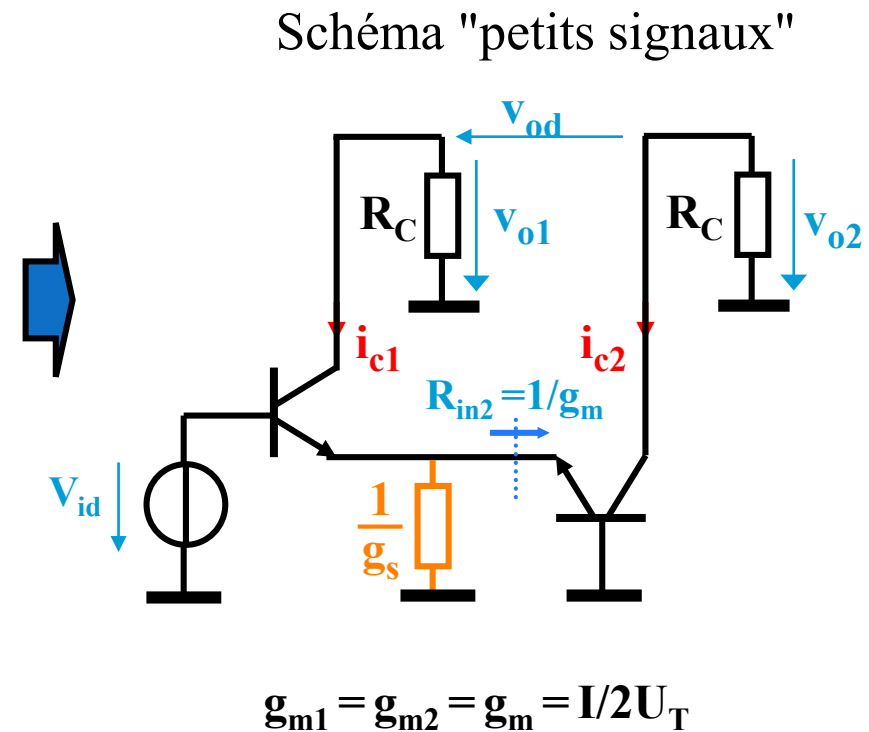
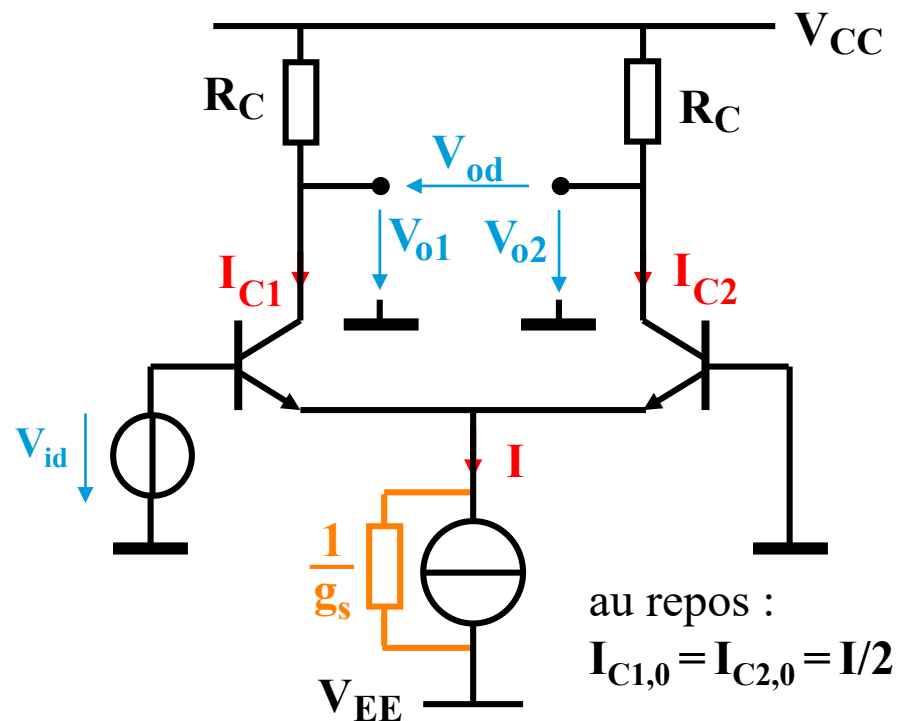
4. L'AMPLIFICATEUR DIFFÉRENTIEL : COMPORTEMENT "PETITS SIGNAUX" AVEC CHARGES RÉSISTIVES

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

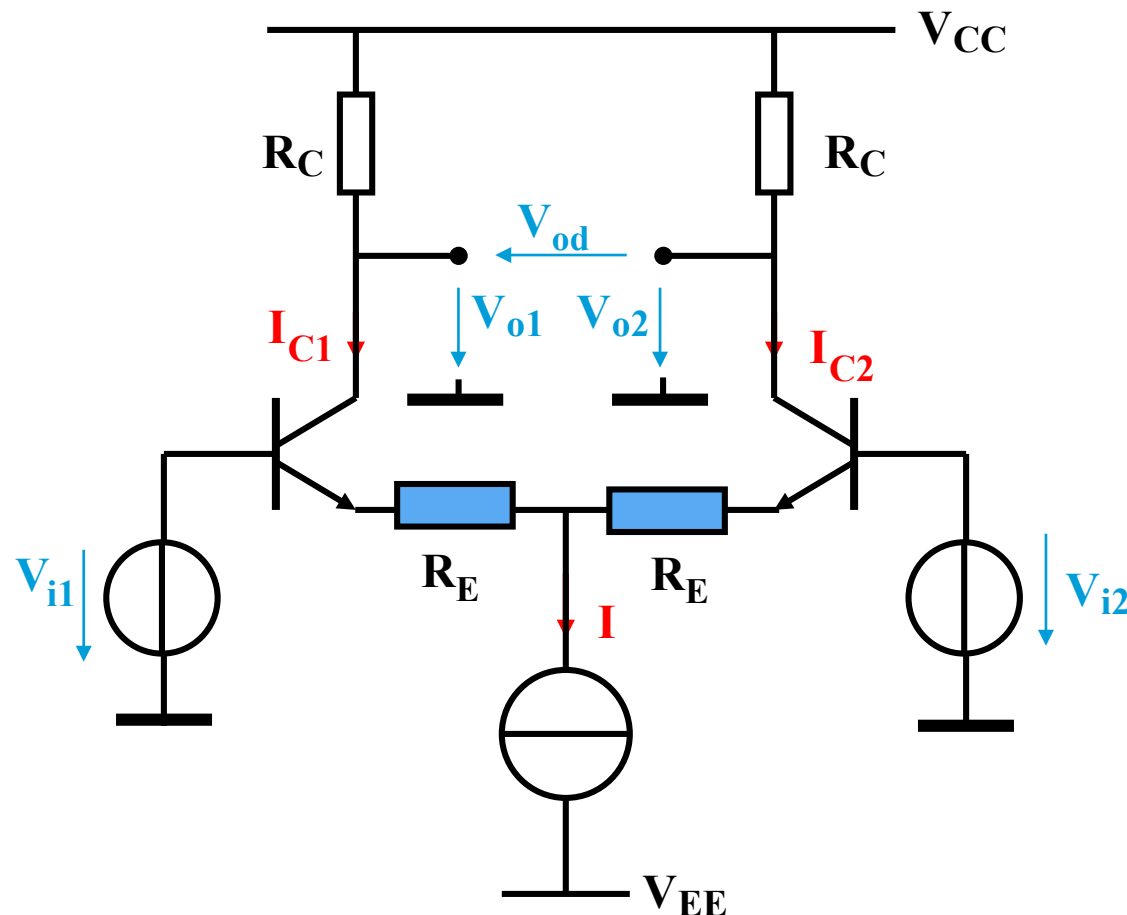


g_s n'affecte pas le gain différentiel A_d pour autant que $g_s \ll g_m$

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

4.2. L'AMPLI DIFFÉRENTIEL DÉGÉNÉRÉ

SCHÉMA

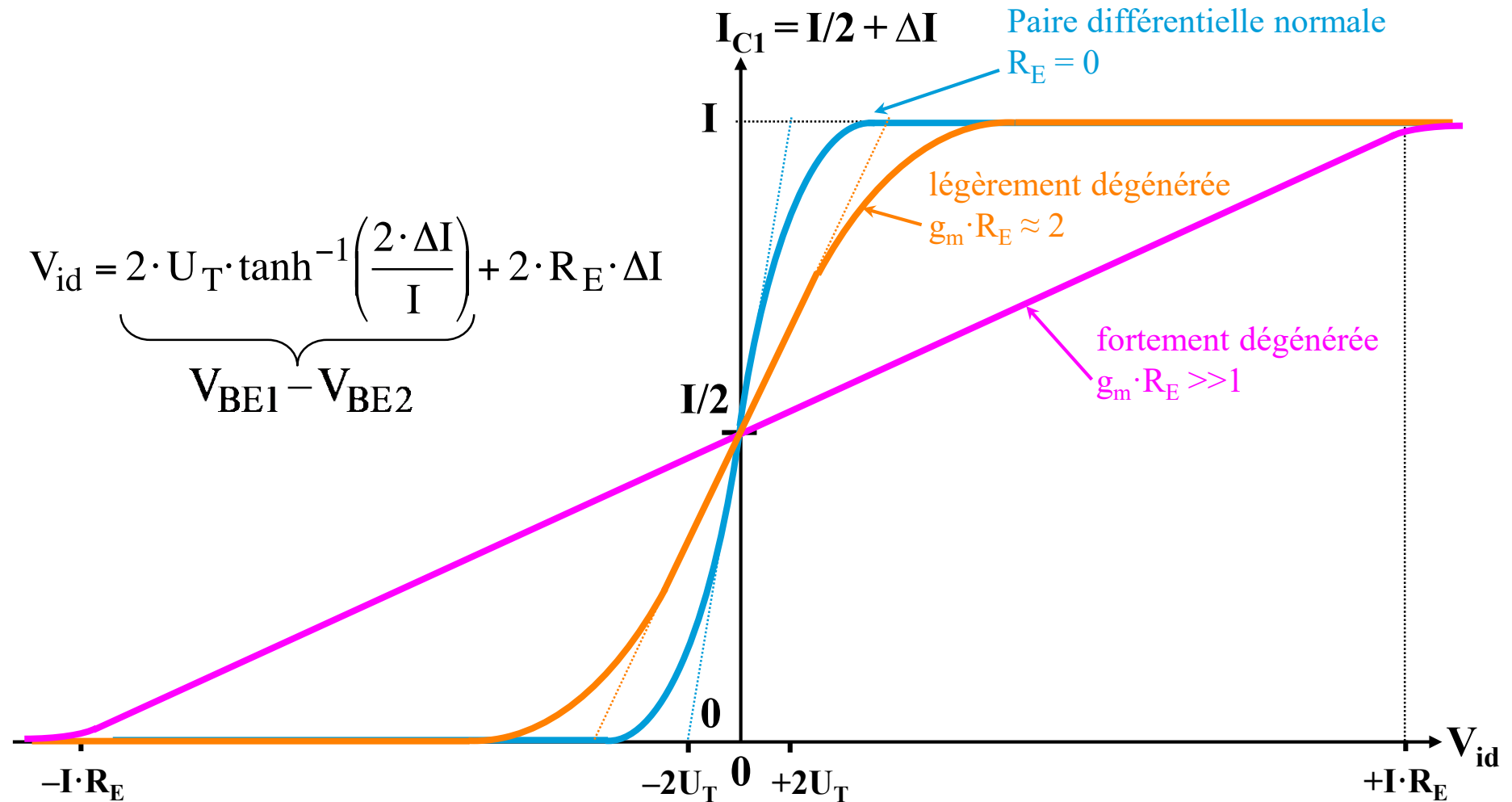


Effet des résistances R_E :

- 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 DIFFERENTIEL : COMPORTEMENT "PETITS SIGNAUX" AVEC CHARGES RÉSISTIVES

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

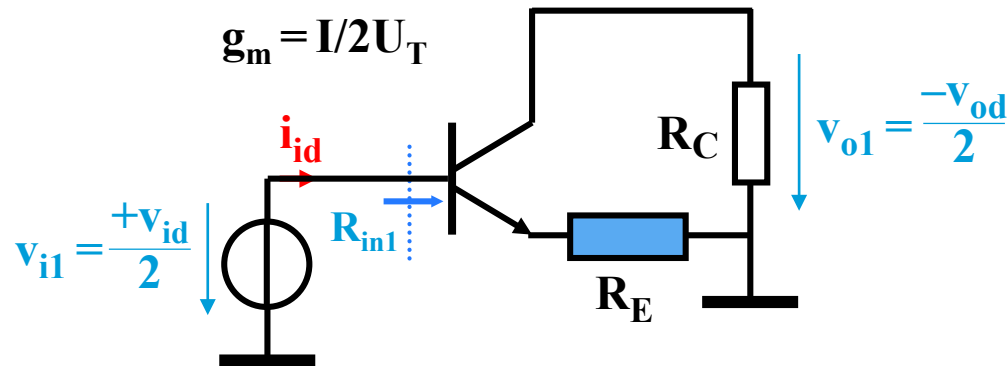


4. L'AMPLIFICATEUR DIFFÉRENTIEL : COMPORTEMENT "PETITS SIGNAUX" AVEC CHARGES RÉSISTIVES

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

Méthode du demi-circuit équivalent
en mode différentiel

Schéma "petits signaux"



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

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

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

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

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

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

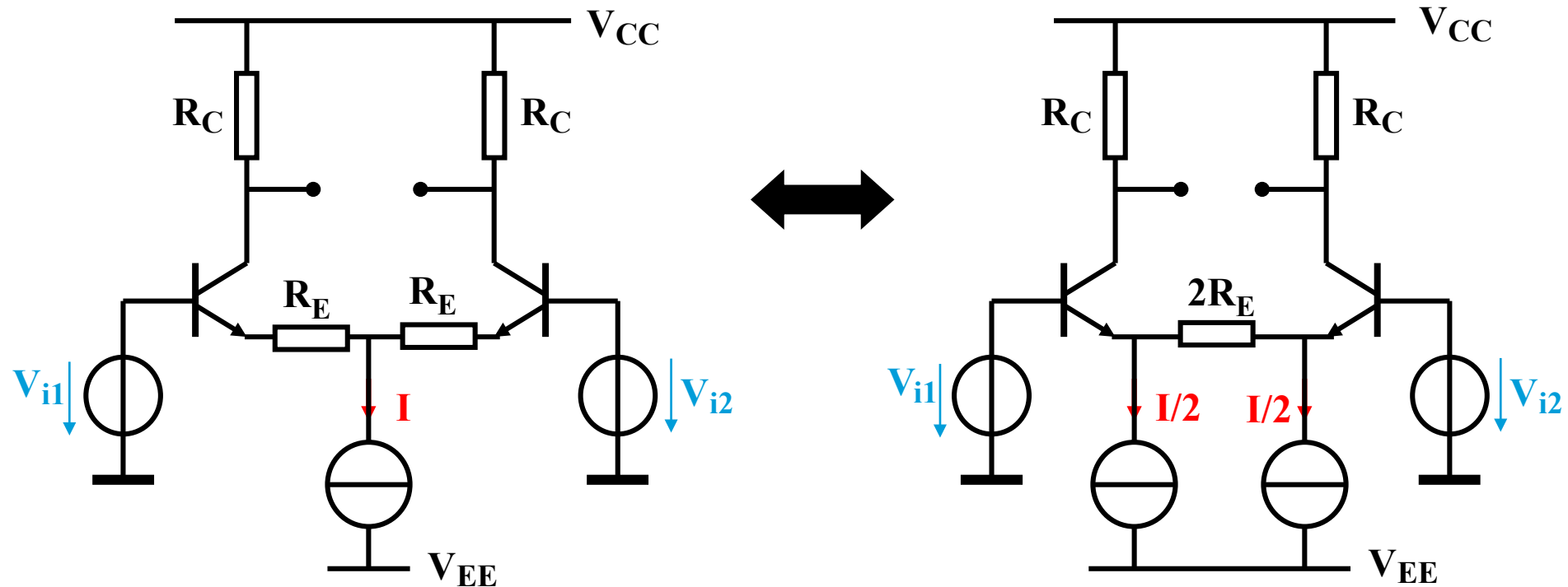
si : $R_E \gg \frac{1}{g_m}$ $A_d = \frac{R_C}{R_E}$

sortie asymétrique : gain divisé par 2

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

4.2. AMPLI DIFFÉRENTIEL DÉGÉNÉRÉ, RÉALISATION PRATIQUE

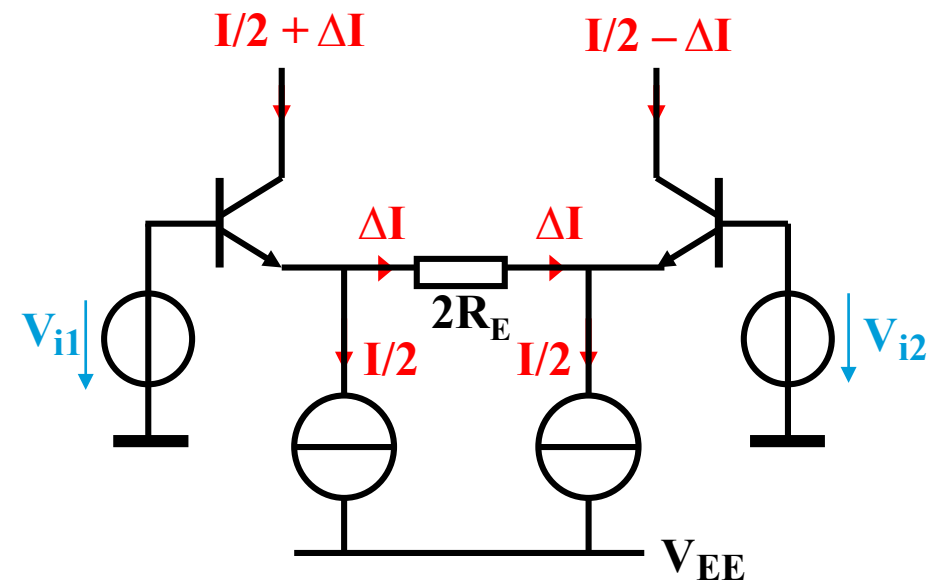
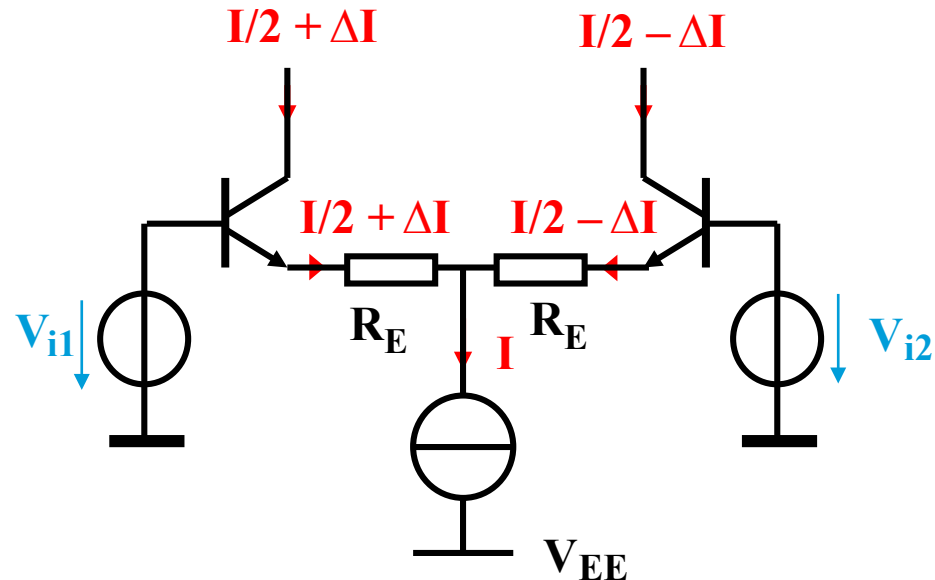
VARIANTE DU SCHÉMA DE BASE



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.

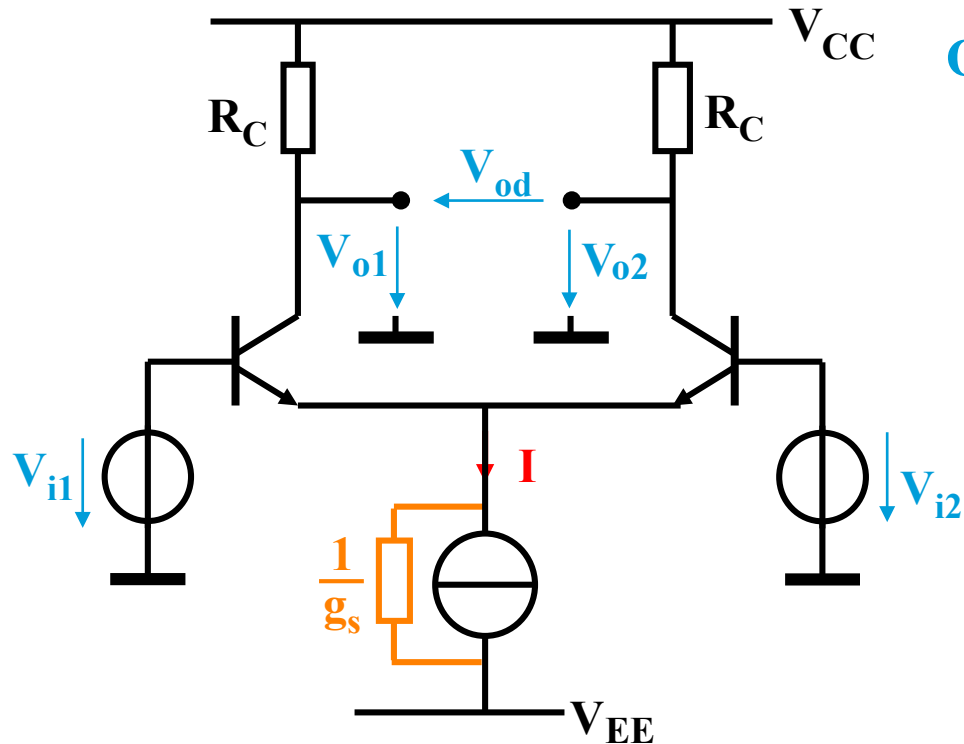
La résistance $2R_E$ est parcourue uniquement par le courant différentiel.

Solution préférée en circuit intégré.

2ème séance (25/09)

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

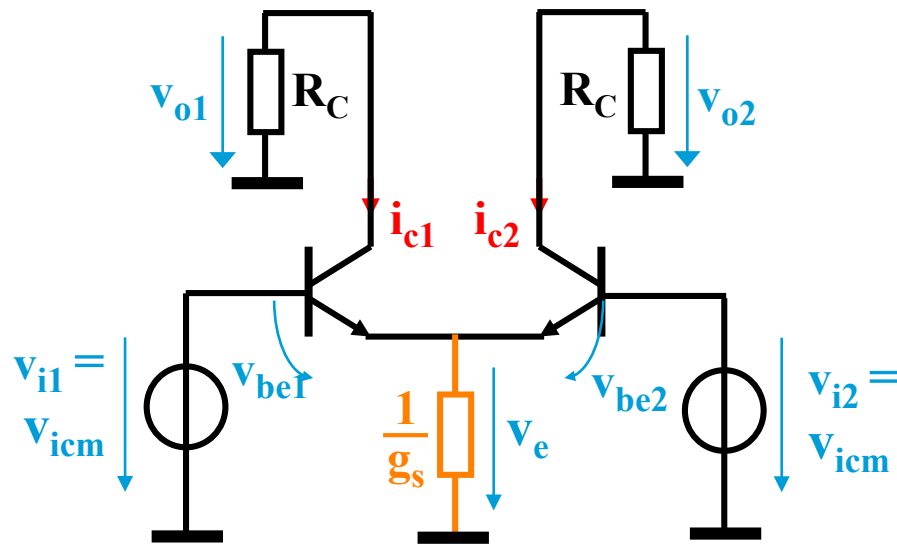
- Le gain de mode commun est un défaut des amplis différentiels, essentiellement lié à la conductance parasite g_s de la source de courant I de polarisation.
- Le signal de sortie de mode commun apparaît entre une sortie et la masse. Il n'est pas perceptible sur la sortie différentielle (*).

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"



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

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

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

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

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

$$\text{Si: } g_m \gg g_s$$

Gain de mode commun :

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

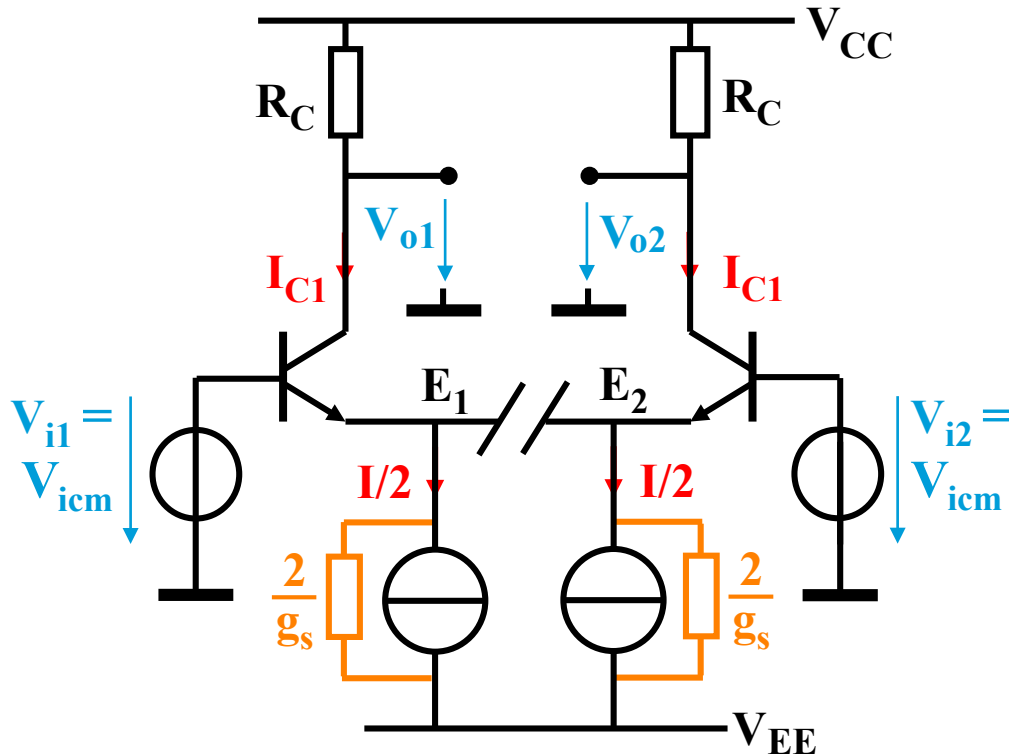
avec: $j = 1 \text{ ou } 2$

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

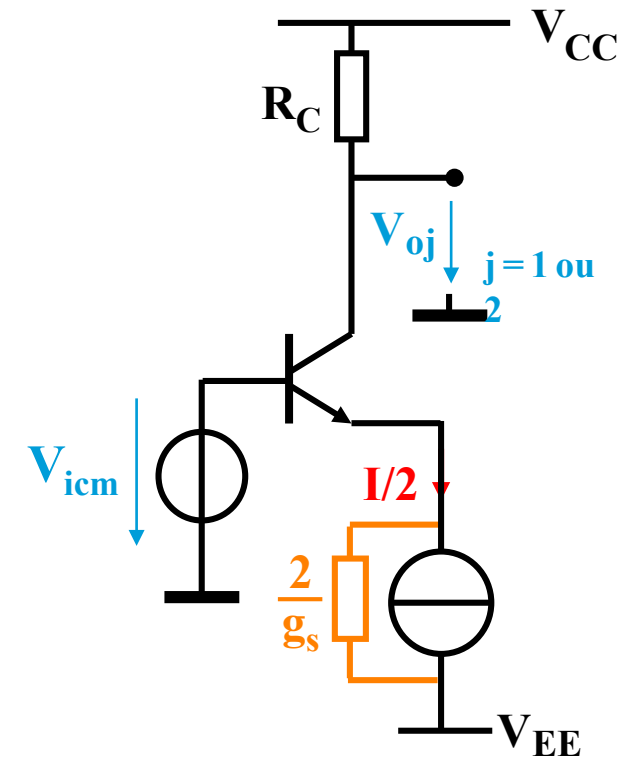
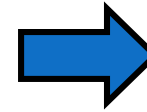
4. L'AMPLIFICATEUR DIFFERENTIEL : COMPORTEMENT "PETITS SIGNAUX" AVEC CHARGES RÉSISTIVES

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

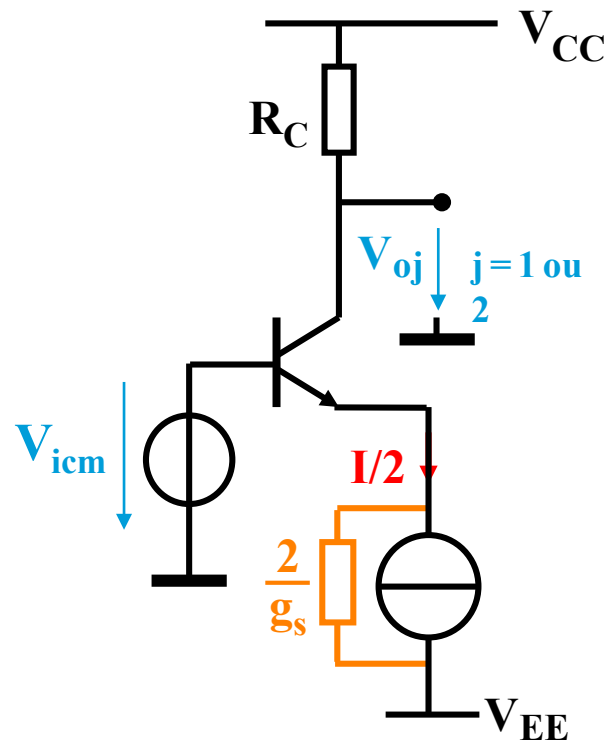
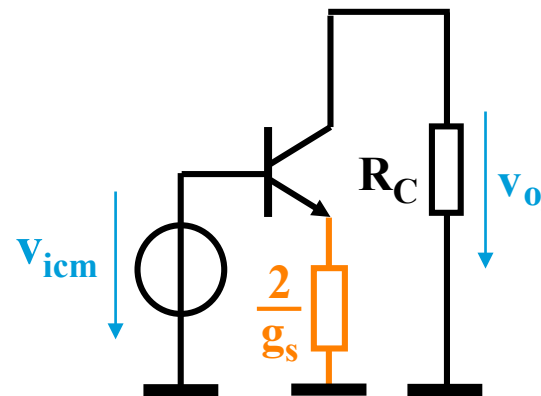


Schéma "petits
signaux"



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 DIFFÉRENTIEL : 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

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

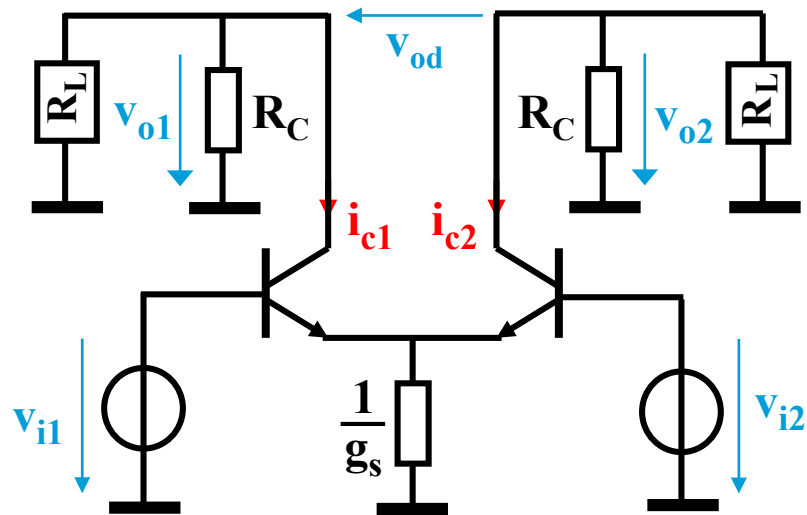
Pour les amplis différentiels de qualité, ce rapport est supérieur à 100 dB.

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

4.5. EFFET DE CHARGE(S) EXTÉRIEURE(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

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

$j = 1 \text{ ou } 2$

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

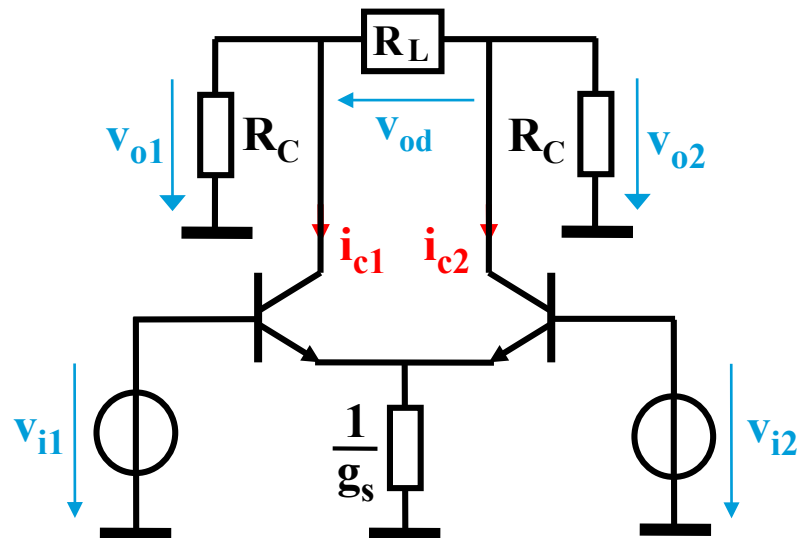
$j = 1 \text{ ou } 2$

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

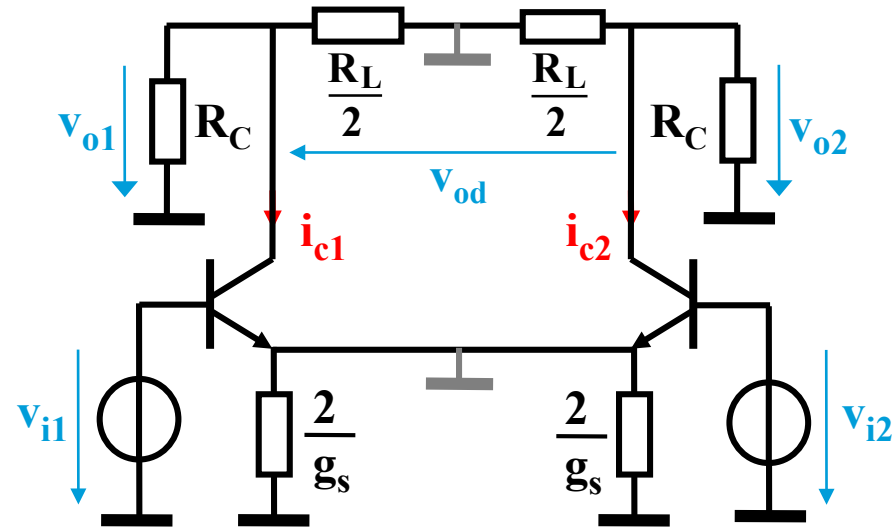
4.5. EFFET DE CHARGE(S) EXTÉRIEURE(S)

CHARGE DIFFÉRENTIELLE

Schéma "petits signaux"



Demi-schéma équivalent
en mode différentiel



$R_L/2$ apparaît en parallèle sur R_C

sortie symétrique :

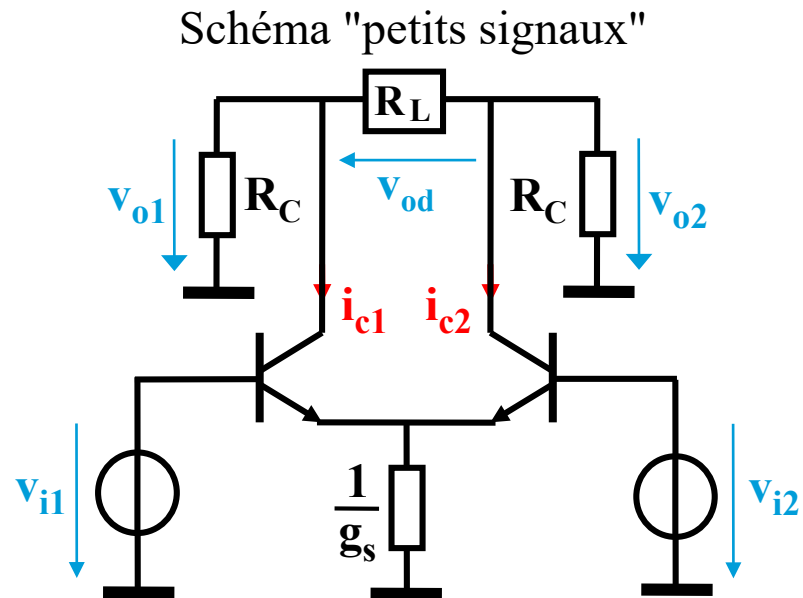
$$A_d = \frac{v_{od}}{v_{id}} = g_m \cdot \frac{R_C \cdot R_L/2}{R_C + R_L/2}$$

sortie asymétrique : gain différentiel divisé par 2

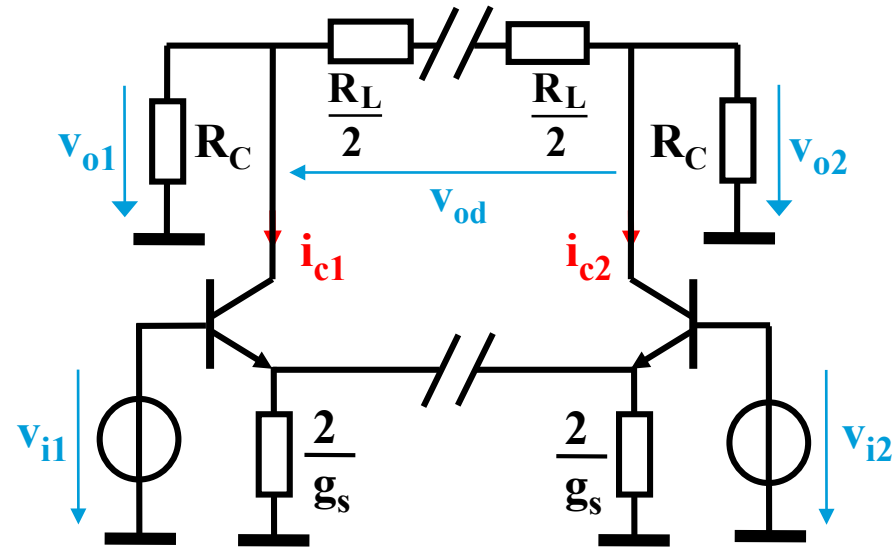
4. L'AMPLIFICATEUR DIFFÉRENTIEL : COMPORTEMENT "PETITS SIGNAUX" AVEC CHARGES RÉSISTIVES

4.5. EFFET DE CHARGE(S) EXTÉRIEURE(S)

CHARGE DIFFÉRENTIELLE



Demi-schéma équivalent
en mode commun



R_L est sans effet

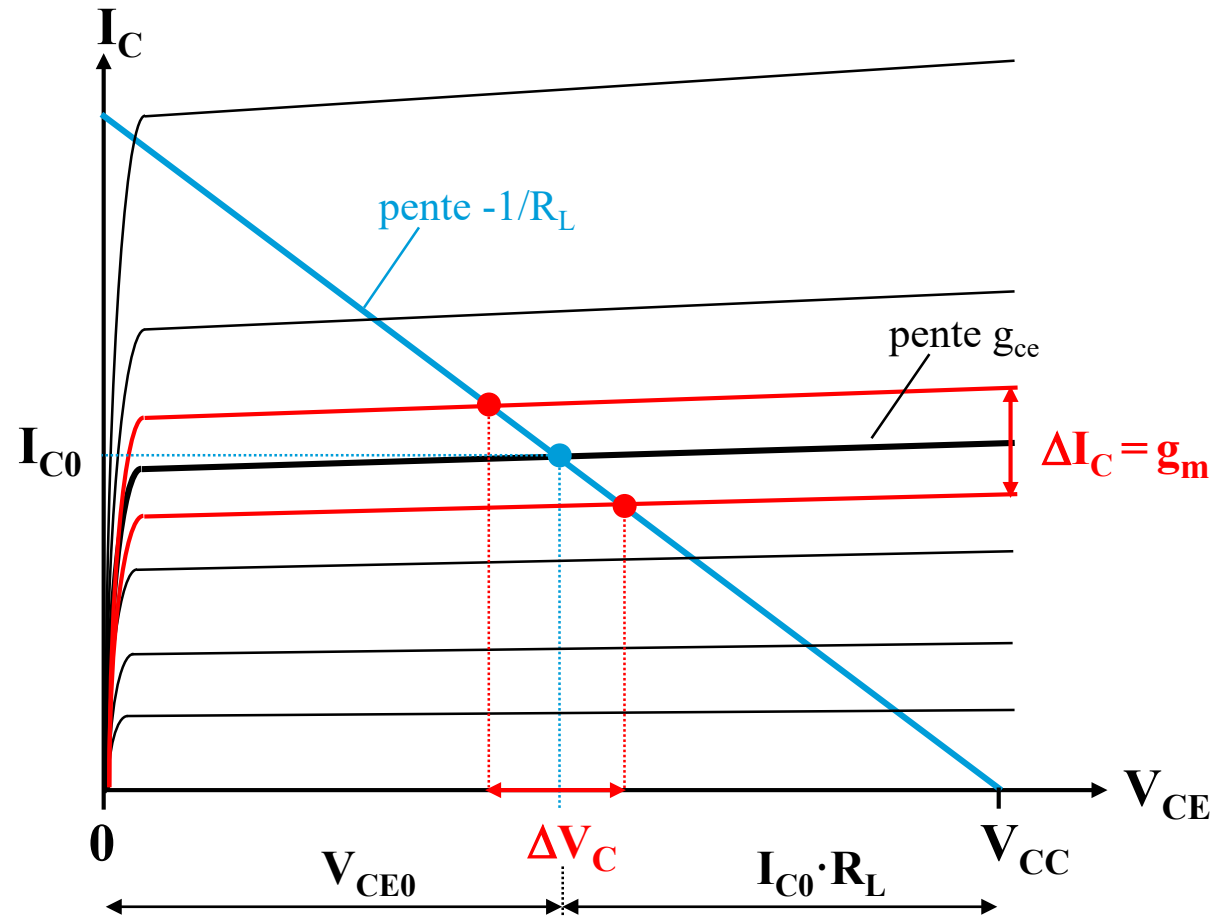
$$A_C = \frac{v_{oj}}{v_{icm}} = -\frac{g_s \cdot R_C}{2}$$

$j = 1 \text{ ou } 2$

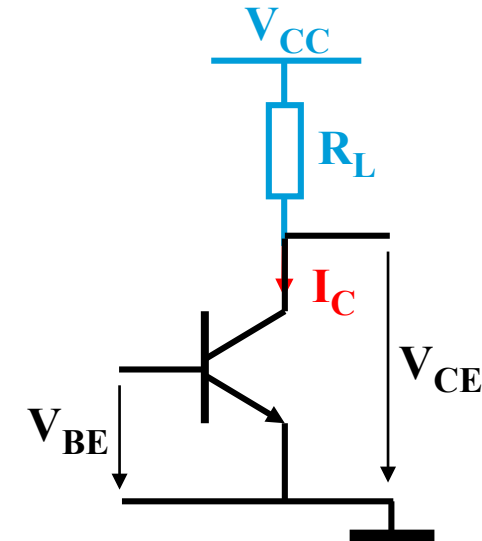
5. AMPLI DIFFERENTIEL A CHARGES ACTIVES

LIMITE DU GAIN EN TENSION DES AMPLIS À CHARGES RÉSISTIVES

EXEMPLE DE L'EMETTEUR COMMUN



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



$$A_V = -g_m \cdot R_L$$

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

Pour une dynamique optimale:

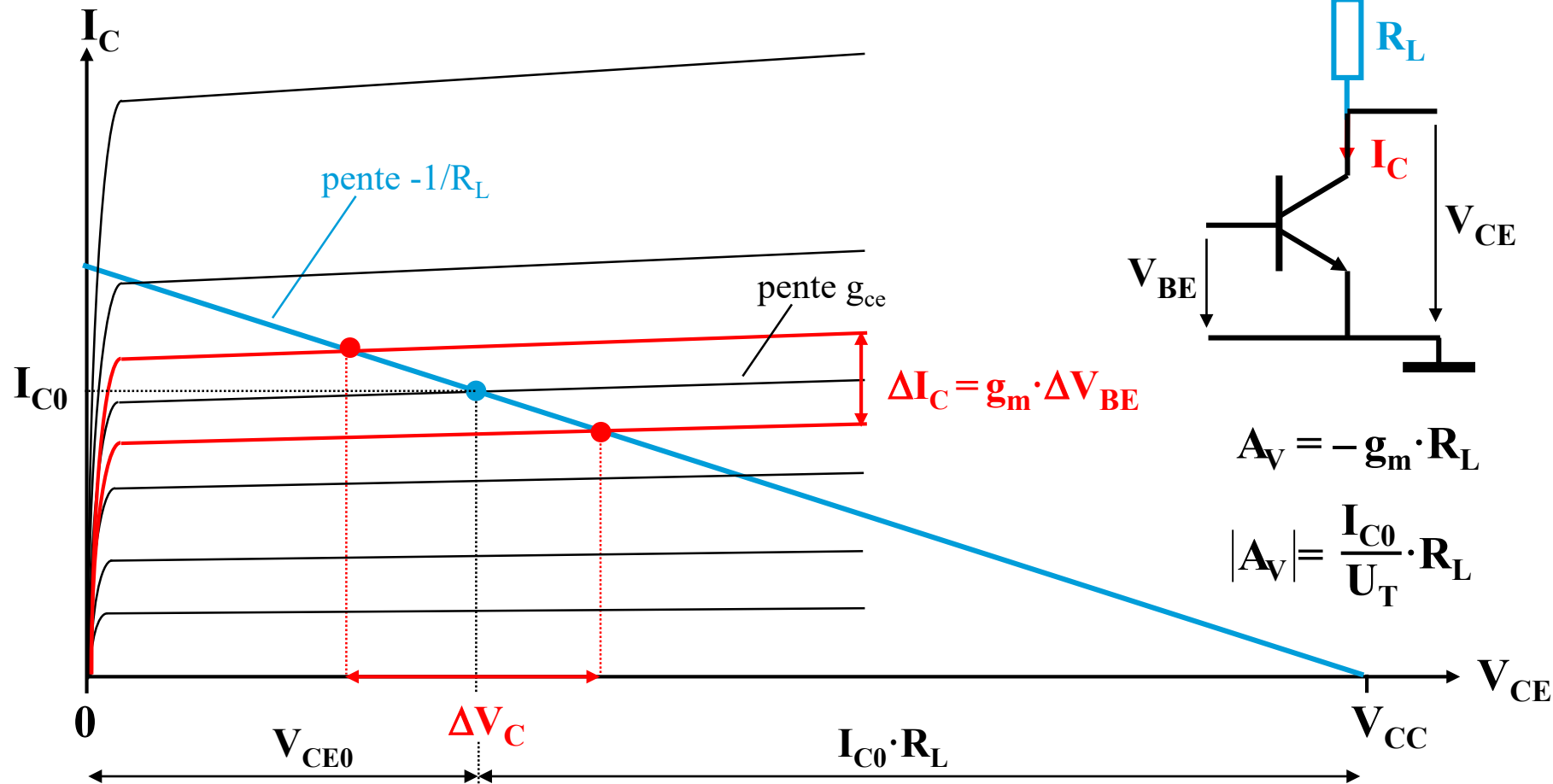
$$V_{CE0} \approx I_{C0} \cdot R_L \approx V_{CC}/2$$

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

5. AMPLI DIFFERENTIEL A CHARGES ACTIVES

LIMITE DU GAIN EN TENSION DES AMPLIS À CHARGES RÉSISTIVES

EXEMPLE DE L'EMETTEUR COMMUN



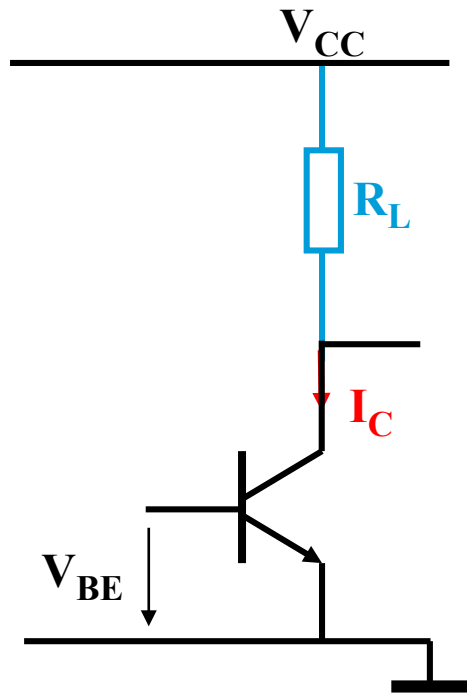
Pour augmenter le gain: augmenter R_L et V_{CC} !

5. AMPLI DIFFERENTIEL A CHARGES ACTIVES

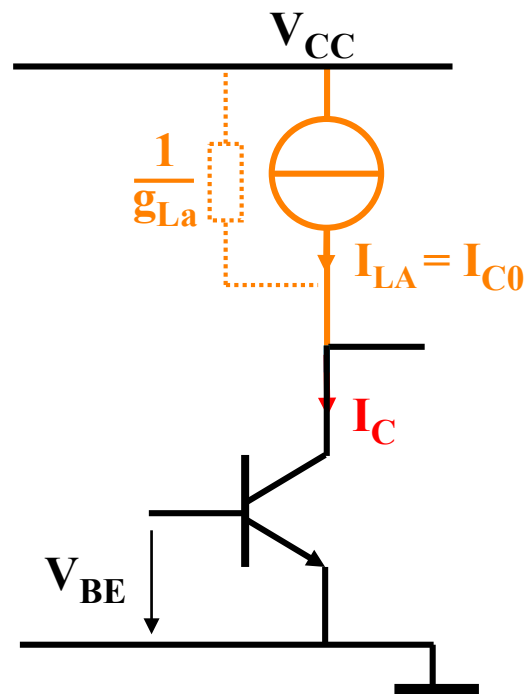
PRINCIPE DE LA CHARGE ACTIVE

EXEMPLE DE L'EMETTEUR COMMUN

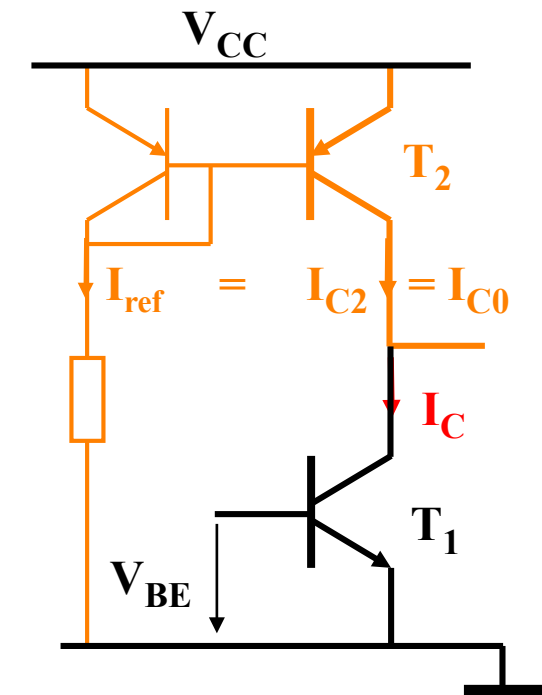
La résistance de charge est remplacée par ...



une source de courant



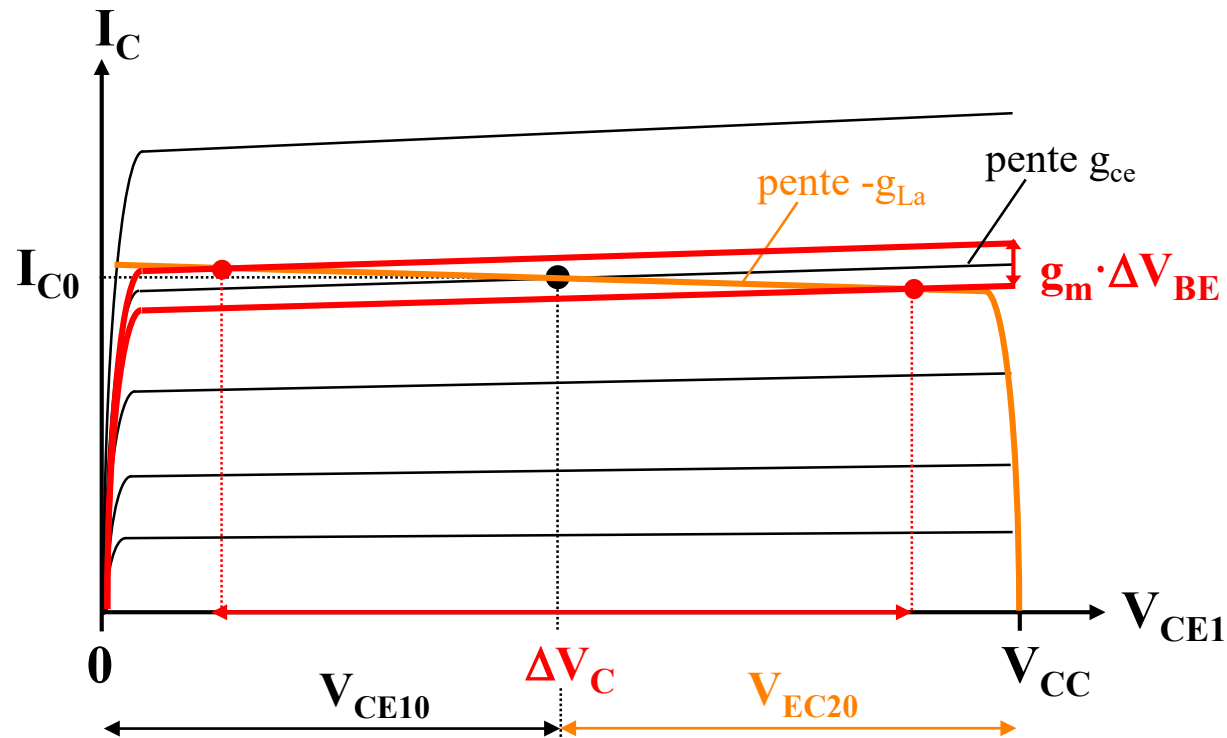
Exemple de réalisation



5. AMPLI DIFFERENTIEL A CHARGES ACTIVES

FONCTIONNEMENT

EXEMPLE DE L'EMETTEUR COMMUN

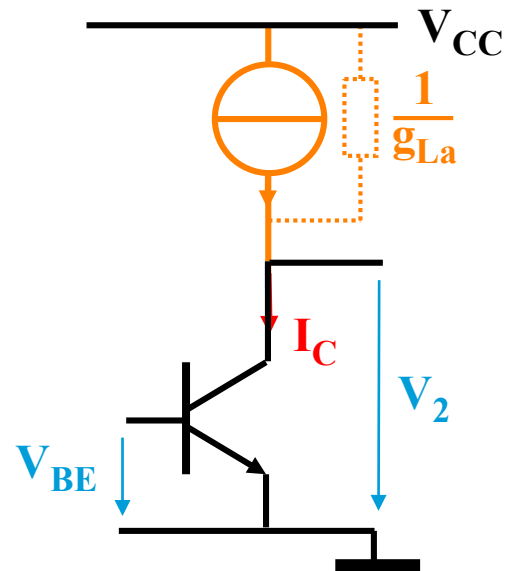


Le gain est limité uniquement par la conductance de sortie de T_1 et celle de la source de courant qui forme la charge active (T_2 dans cet exemple).

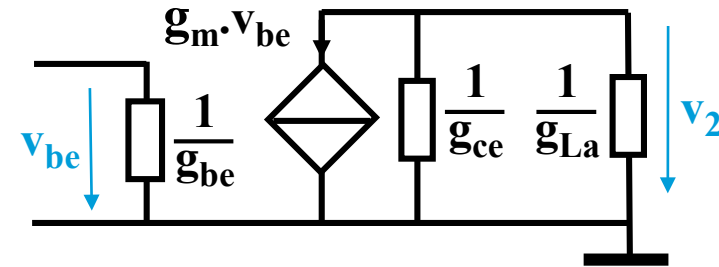
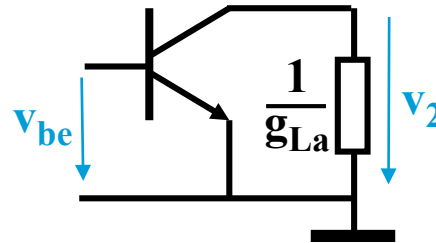
5. AMPLI DIFFERENTIEL A CHARGES ACTIVES

ETUDE "PETITS SIGNAUX" - GAIN EN TENSION A_v

EXEMPLE DE L'EMETTEUR COMMUN



Schémas petits signaux



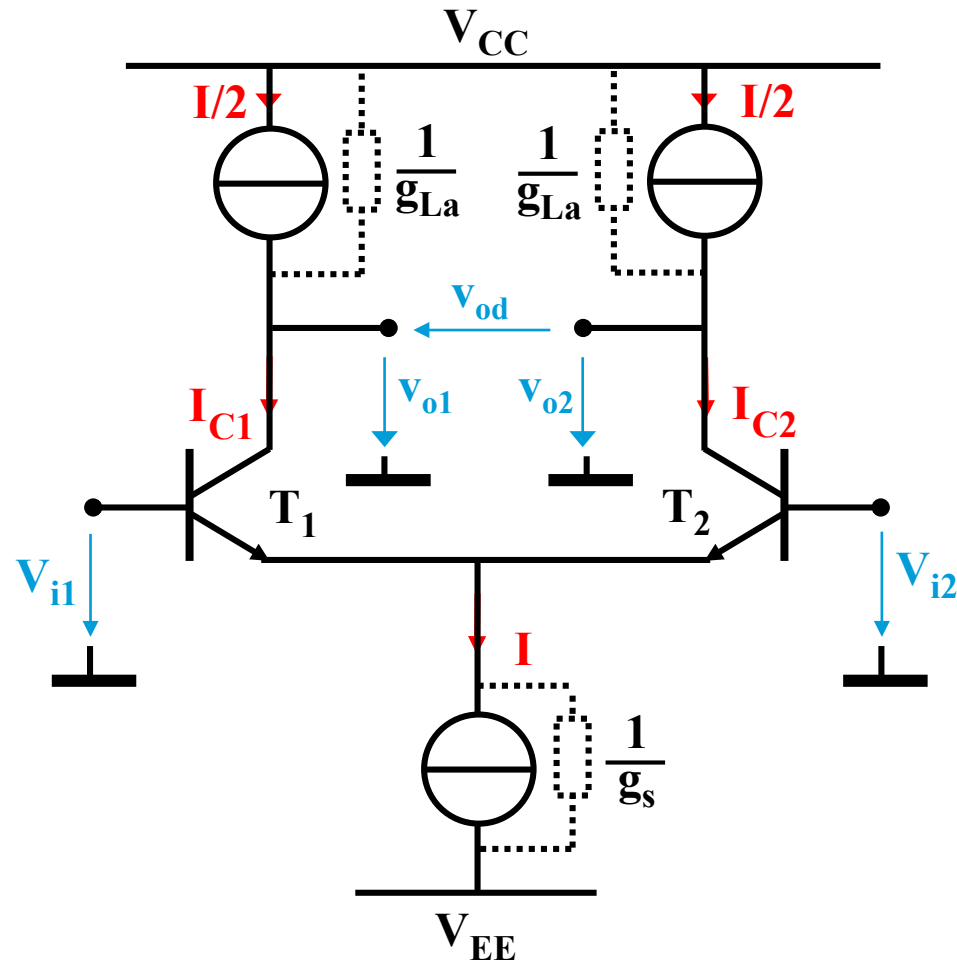
$$v_2 = -g_m \cdot v_{be} \cdot \frac{1}{g_{ce} + g_{La}}$$

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

5. AMPLI DIFFERENTIEL A CHARGES ACTIVES

CHARGE SYMÉTRIQUE AVEC DEUX SOURCES DE COURANT

SORTIE(S) DIFFÉRENTIELLE OU ASYMÉTRIQUE(S)



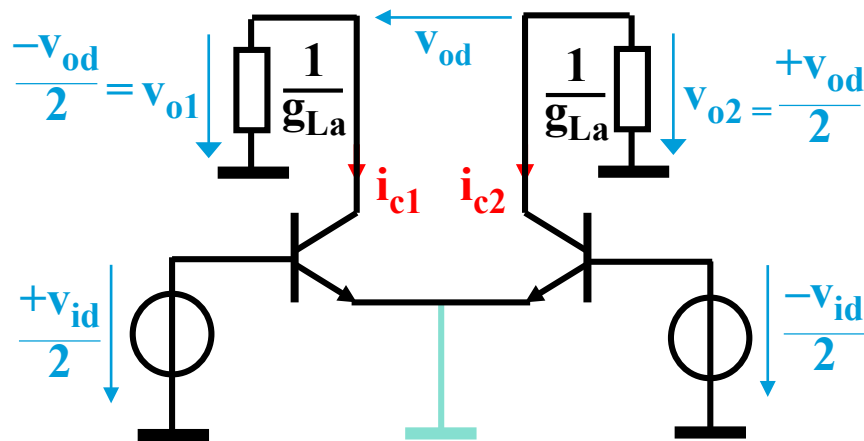
5. AMPLI DIFFERENTIEL A CHARGES ACTIVES

CHARGE SYMÉTRIQUE AVEC DEUX SOURCES DE COURANT

GAINS EN TENSION DIFFÉRENTIEL ET DE MODE COMMUN

Demi-schémas équivalents "petits signaux"

Mode différentiel

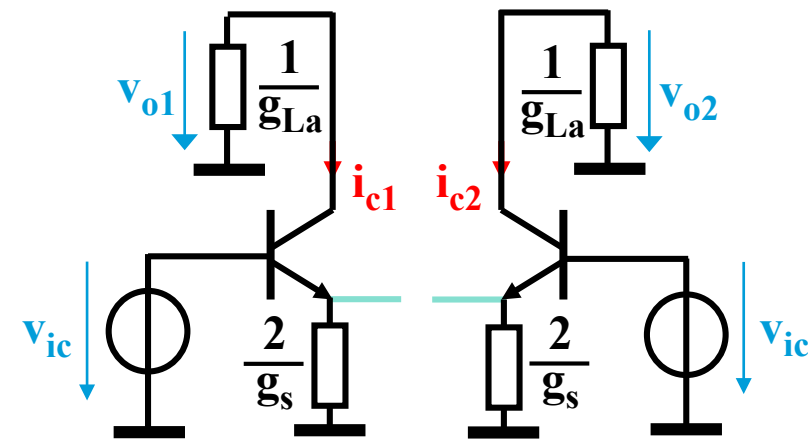


$$A_d = \frac{g_m}{g_{La} + g_{ce}}$$

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



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

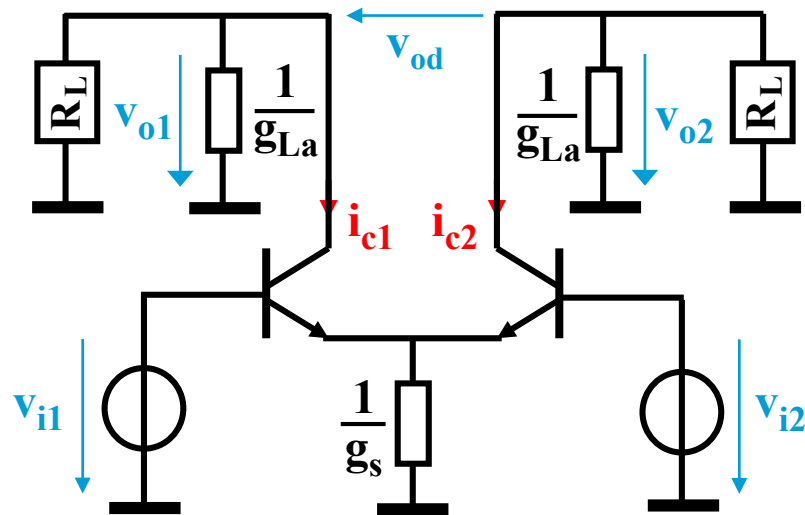
⊗ Le gain de mode commun
augmente considérablement

5. AMPLI DIFFERENTIEL A CHARGES ACTIVES

CHARGE SYMÉTRIQUE AVEC DEUX SOURCES DE COURANT

AVEC CHARGE(S) EXTÉRIEURE(S)

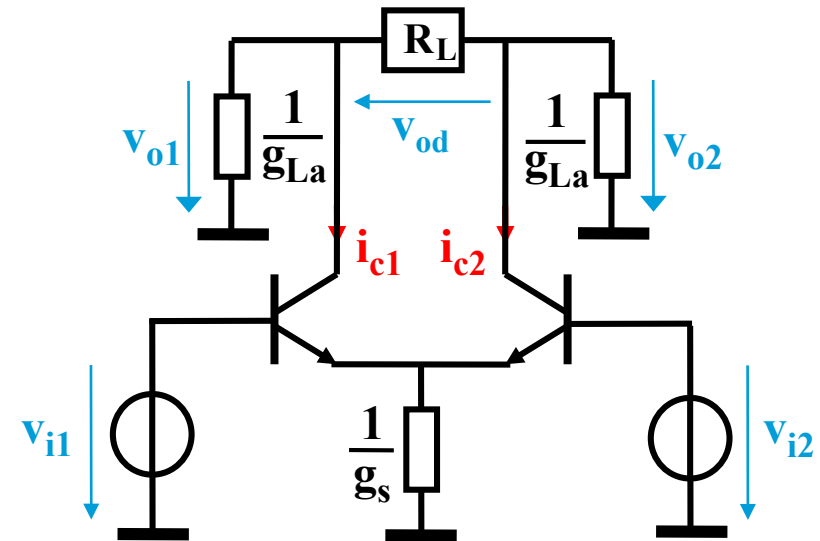
Schémas "petits signaux"



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

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

Réduit de moitié
pour les sorties
asymétriques



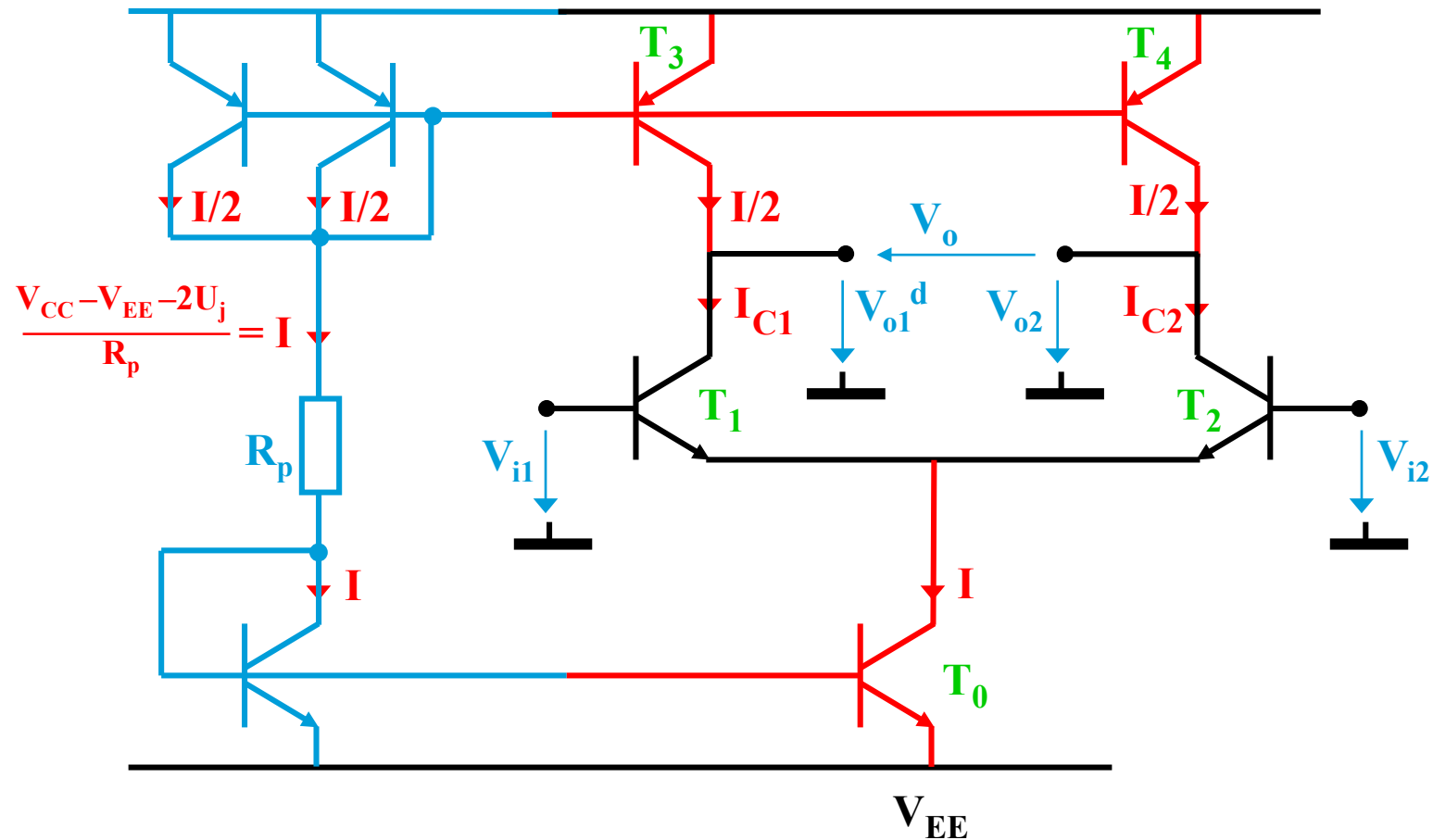
$$A_d = - \frac{g_m}{g_{ce} + g_{La} + 2/R_L}$$

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

5. AMPLI DIFFERENTIEL A CHARGES ACTIVES

CHARGE SYMÉTRIQUE AVEC DEUX SOURCES DE COURANT

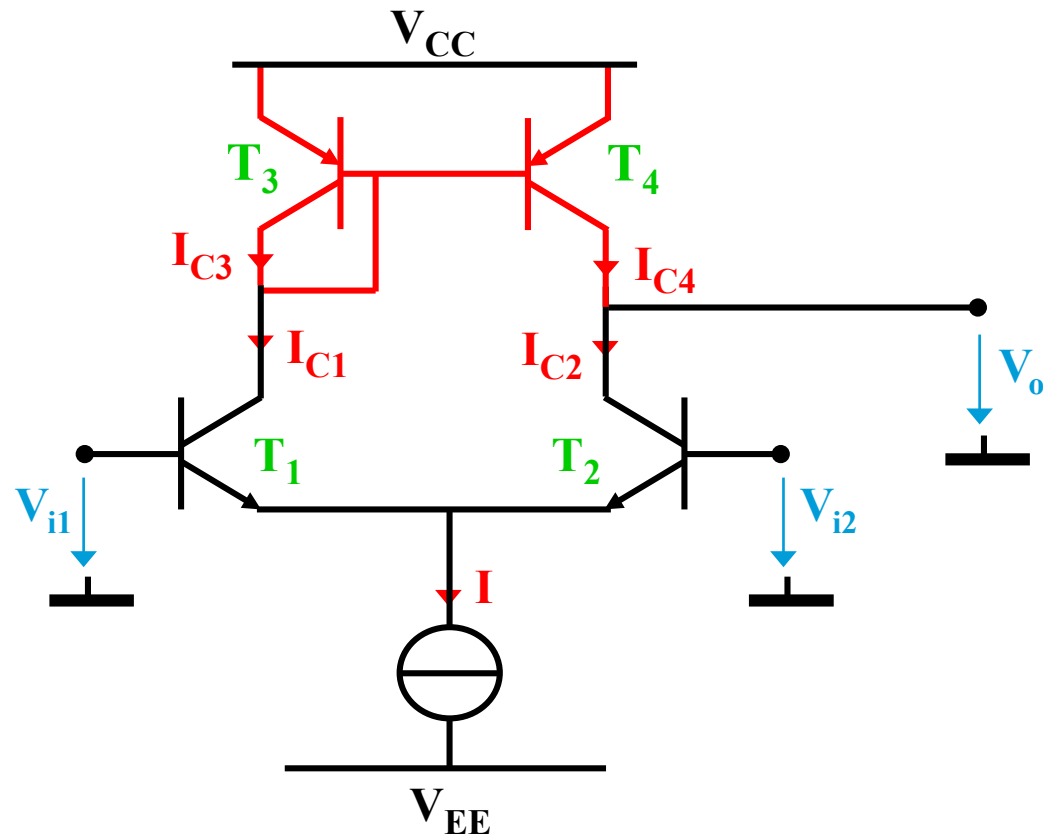
EXEMPLE DE RÉALISATION



5. AMPLI DIFFERENTIEL A CHARGES ACTIVES

CHARGE ASYMÉTRIQUE AVEC MIROIR DE COURANT

SORTIE ASYMÉTRIQUE UNIQUEMENT

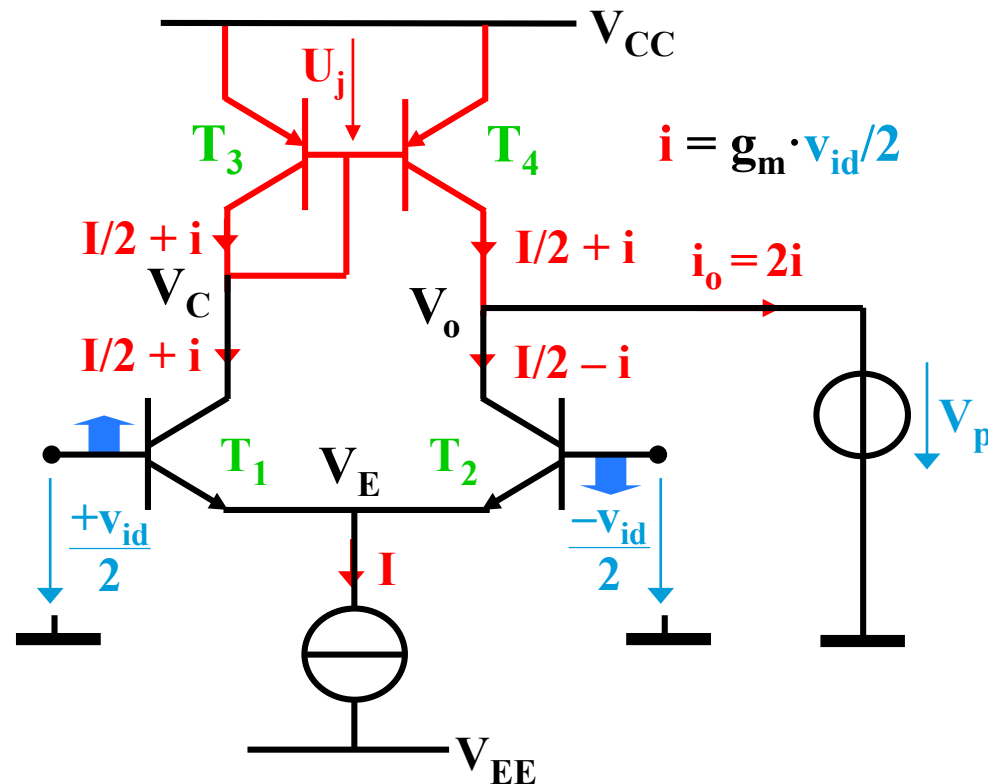


Une seule sortie
asymétrique !

5. AMPLI DIFFERENTIEL A CHARGES ACTIVES

CHARGE ASYMÉTRIQUE AVEC MIROIR DE COURANT

SORTIE ASYMÉTRIQUE EN COURANT



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

transconductance en court-circuit :

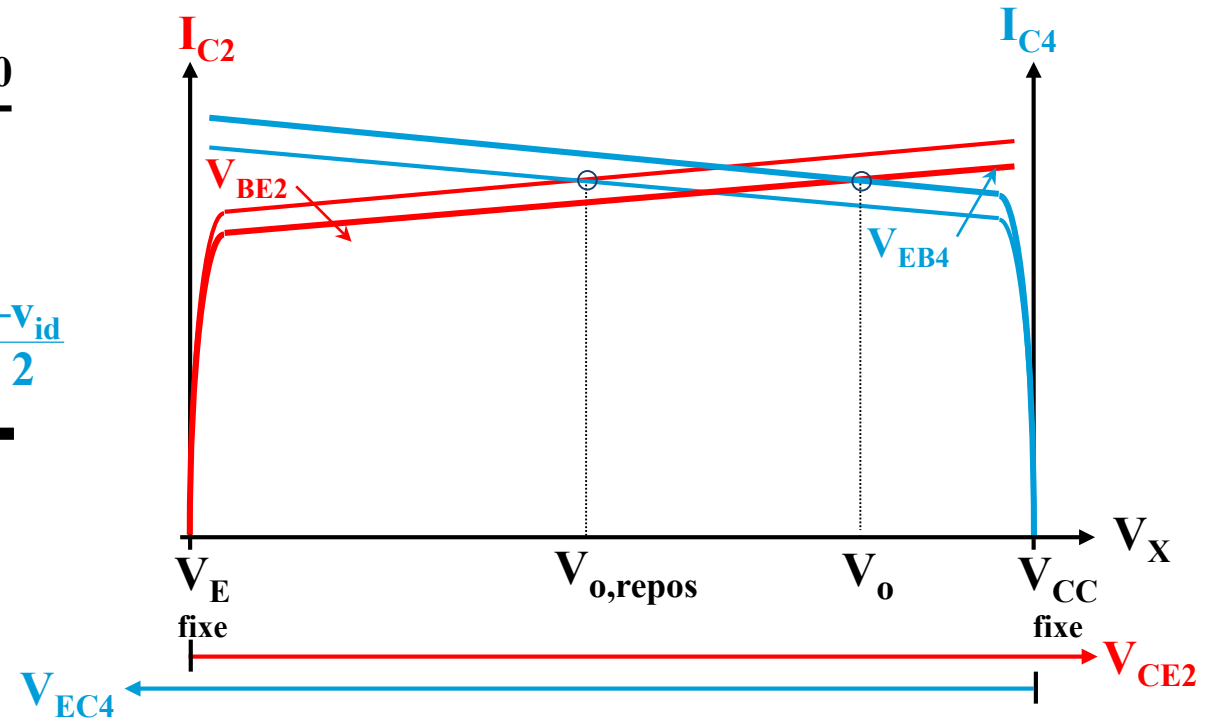
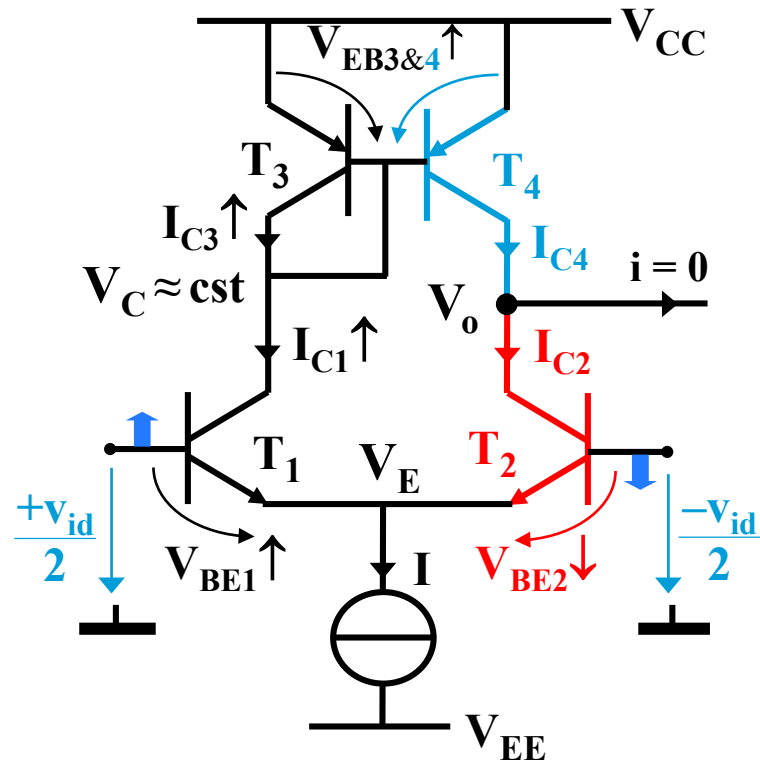
$$G_{md} = \left. \frac{i_o}{v_{id}} \right|_{v_o=0} = g_m = \frac{I}{2 \cdot U_T}$$

5. AMPLI DIFFERENTIEL A CHARGES ACTIVES

CHARGE ASYMÉTRIQUE AVEC MIROIR DE COURANT

SORTIE ASYMÉTRIQUE EN TENSION

Sortie en circuit ouvert

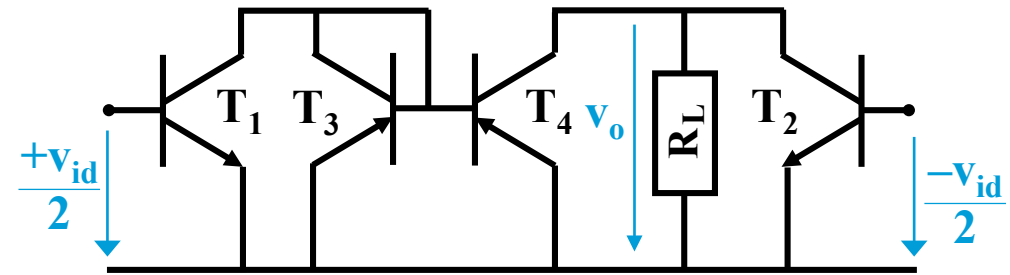
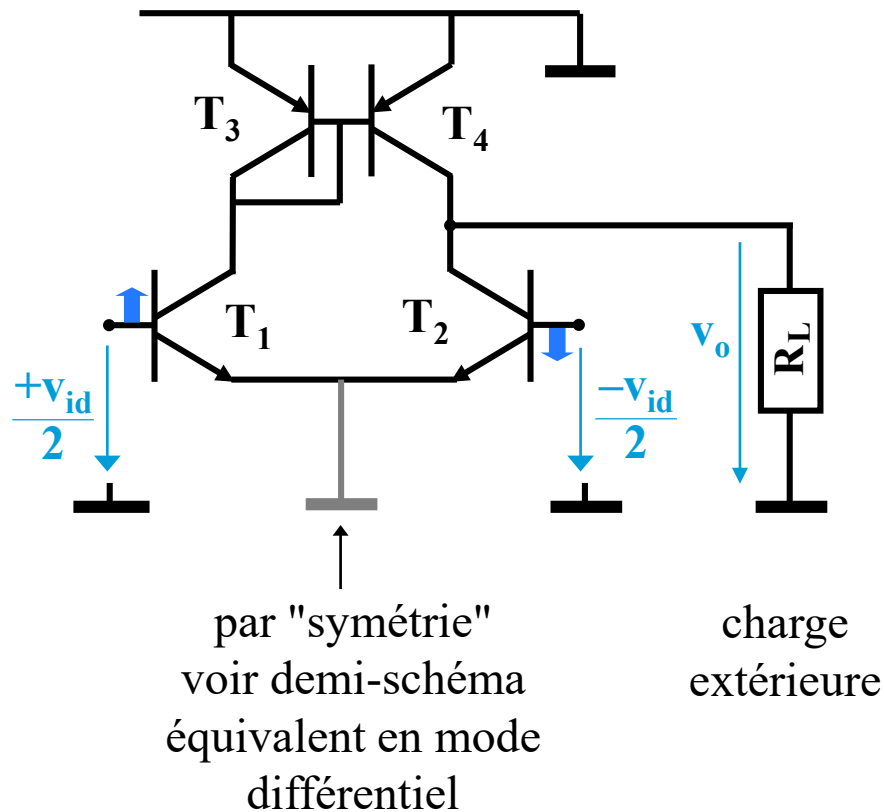


5. AMPLI DIFFERENTIEL A CHARGES ACTIVES

CHARGE ASYMÉTRIQUE AVEC MIROIR DE COURANT

GAIN EN TENSION DIFFÉRENTIEL A_d (1/2)

Schéma "petits signaux"

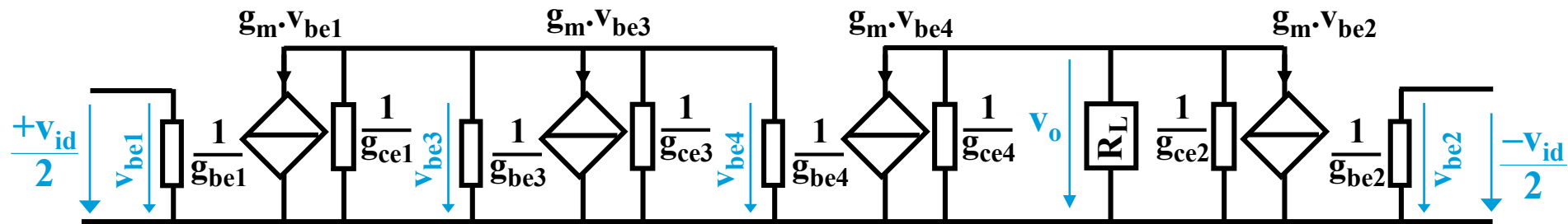


5. AMPLI DIFFERENTIEL A CHARGES ACTIVES

CHARGE ASYMÉTRIQUE AVEC MIROIR DE COURANT

GAIN EN TENSION DIFFÉRENTIEL A_d (2/2)

Schéma petits signaux détaillé



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

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

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

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

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

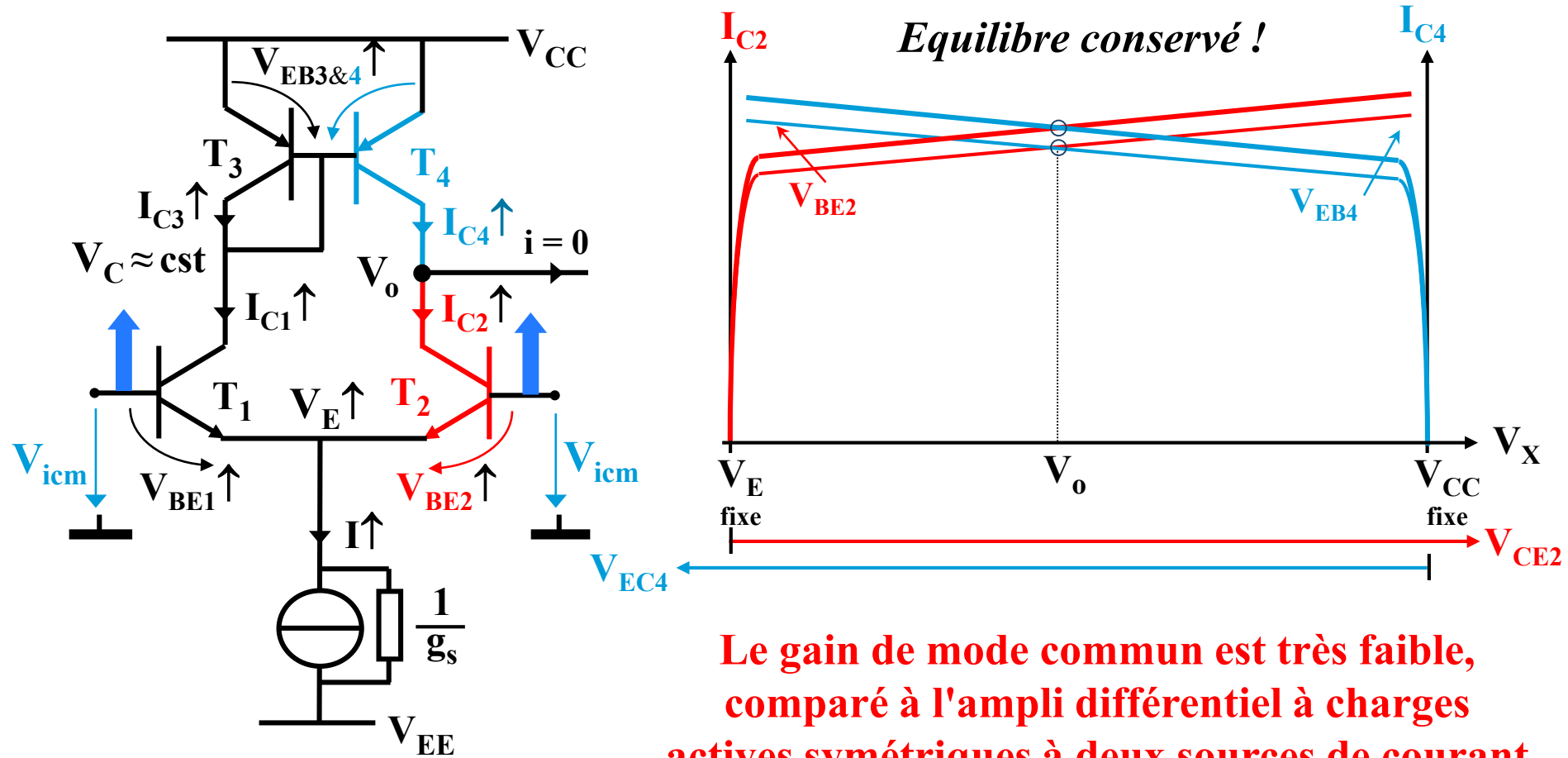
Sortie asymétrique, pourtant même A_d que pour la sortie différentielle du montage à charges symétriques par deux sources de courant !

5. AMPLI DIFFERENTIEL A CHARGES ACTIVES

CHARGE ASYMÉTRIQUE AVEC MIROIR DE COURANT

GAIN EN TENSION DE MODE COMMUN A_c

Sortie en circuit ouvert

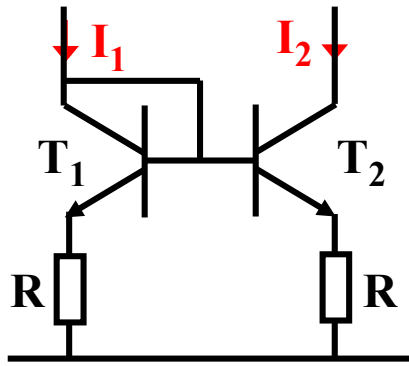


Le gain de mode commun est très faible, comparé à l'ampli différentiel à charges actives symétriques à deux sources de courant

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



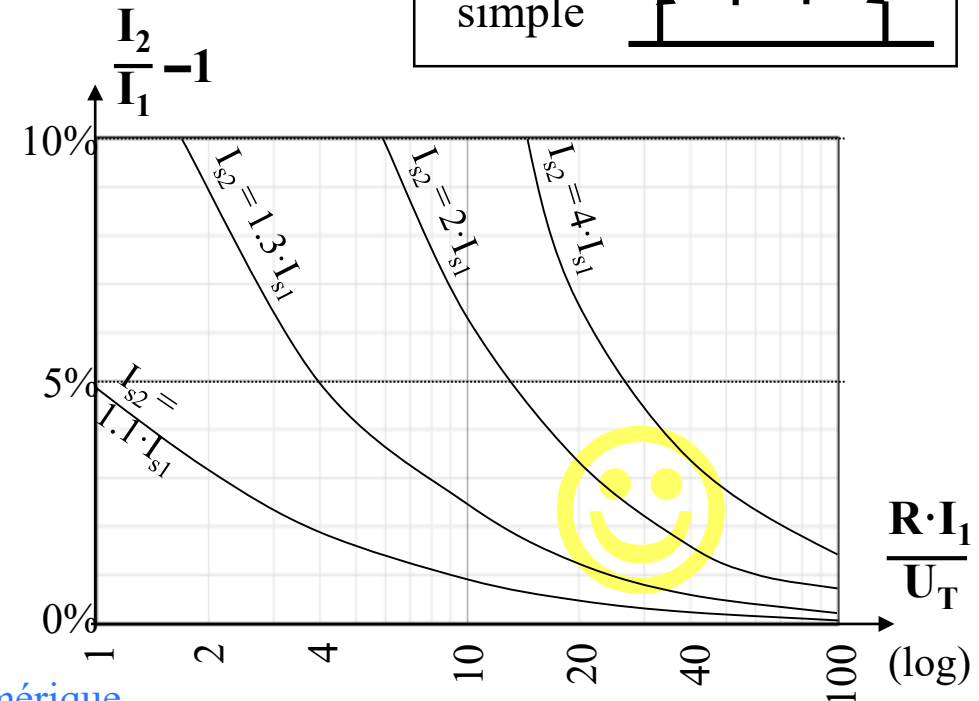
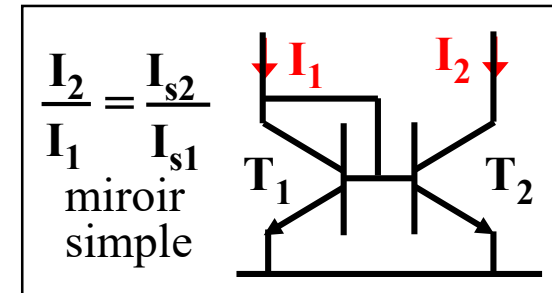
$$V_{BE1} + I_1 \cdot R = V_{BE2} + I_2 \cdot R$$

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

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

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

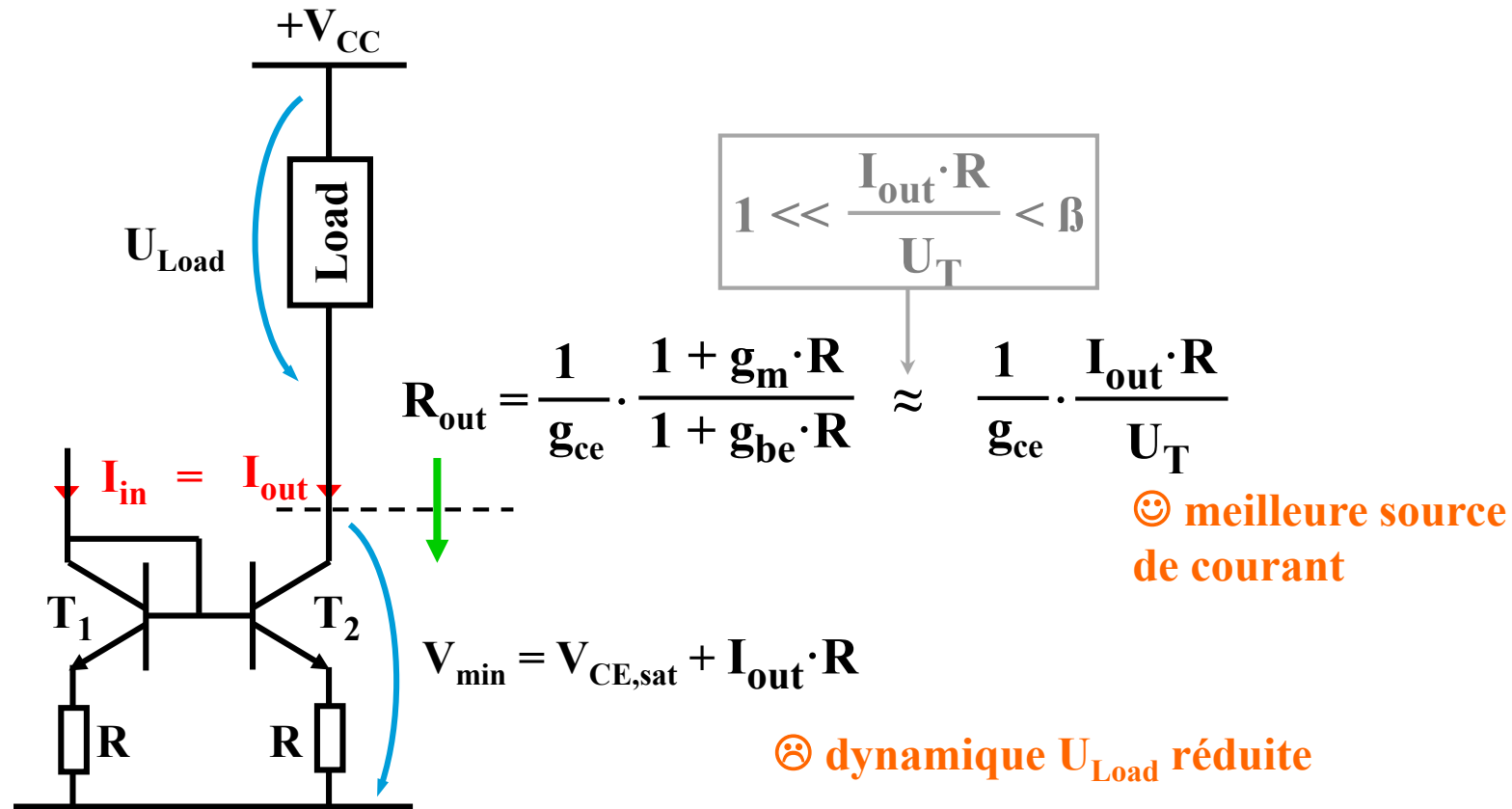
résolution numérique
point par point



5. AMPLI DIFFERENTIEL A CHARGES ACTIVES

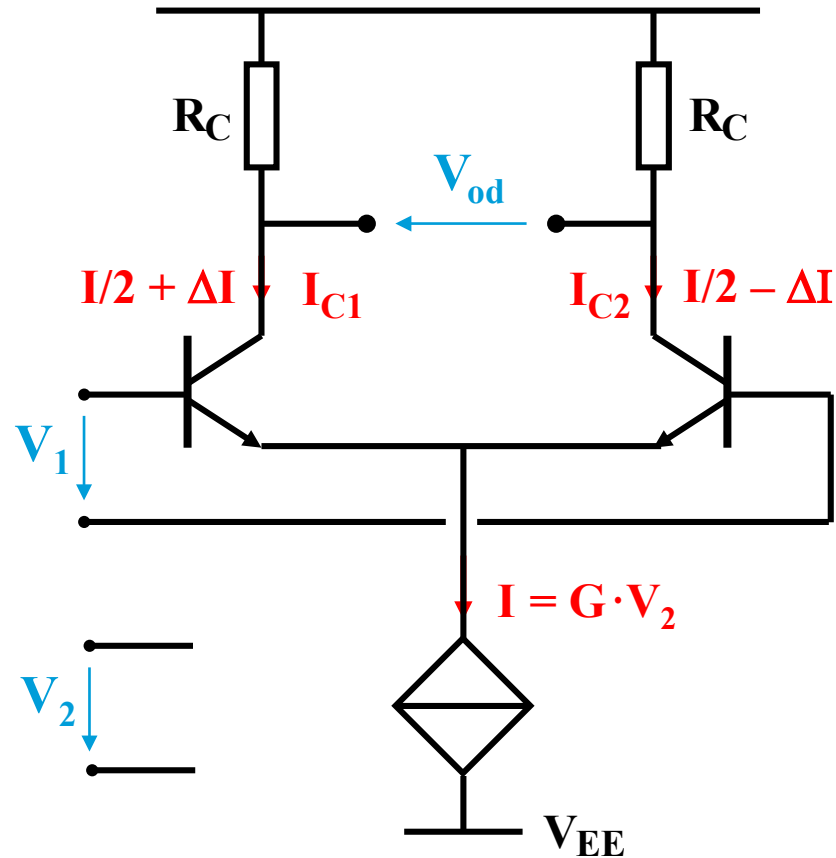
UTILISATION DE COMPOSANTS DISCRETS

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

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

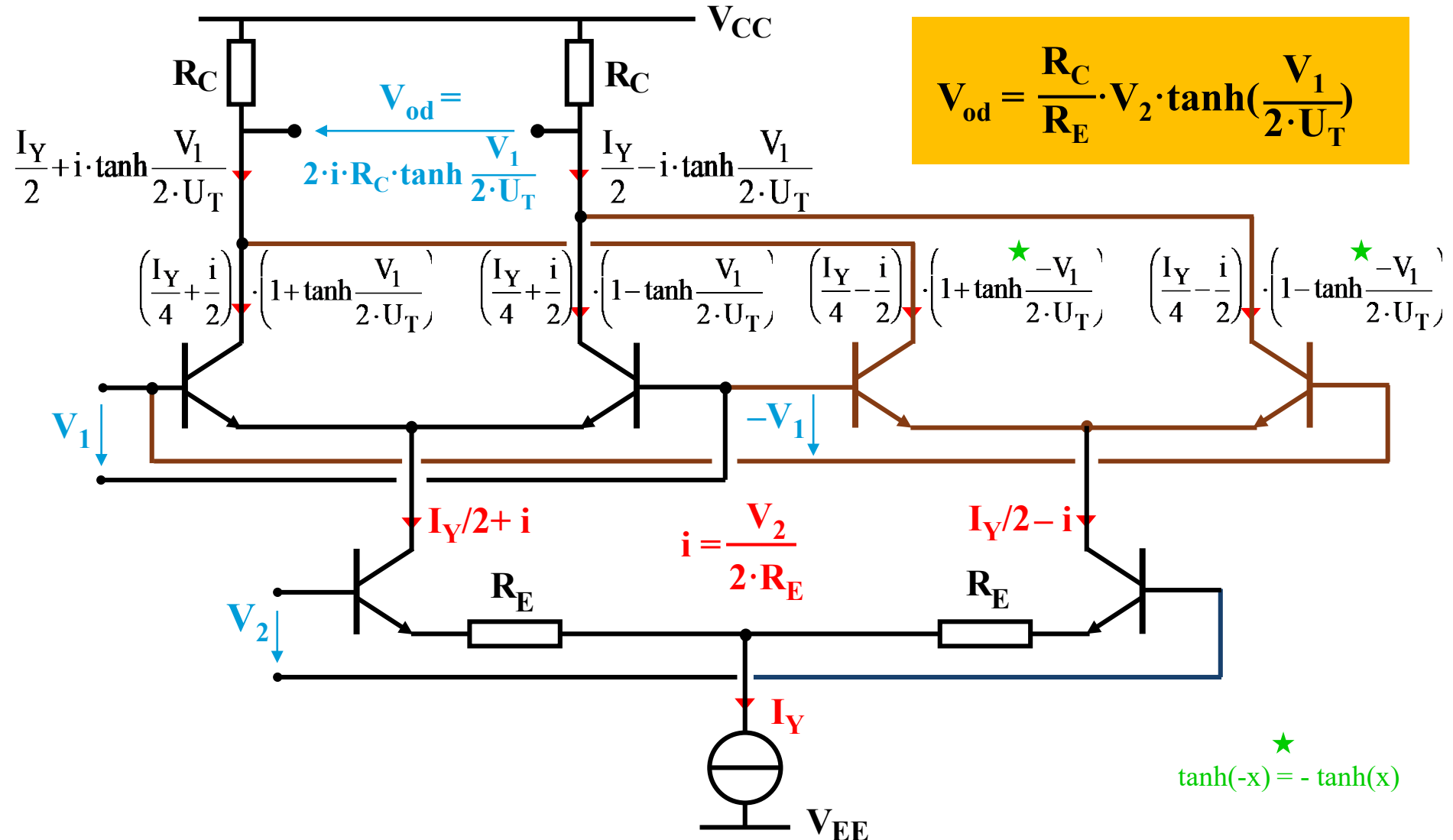
En remplaçant la source $I = \text{cst}$
par une source commandée

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

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

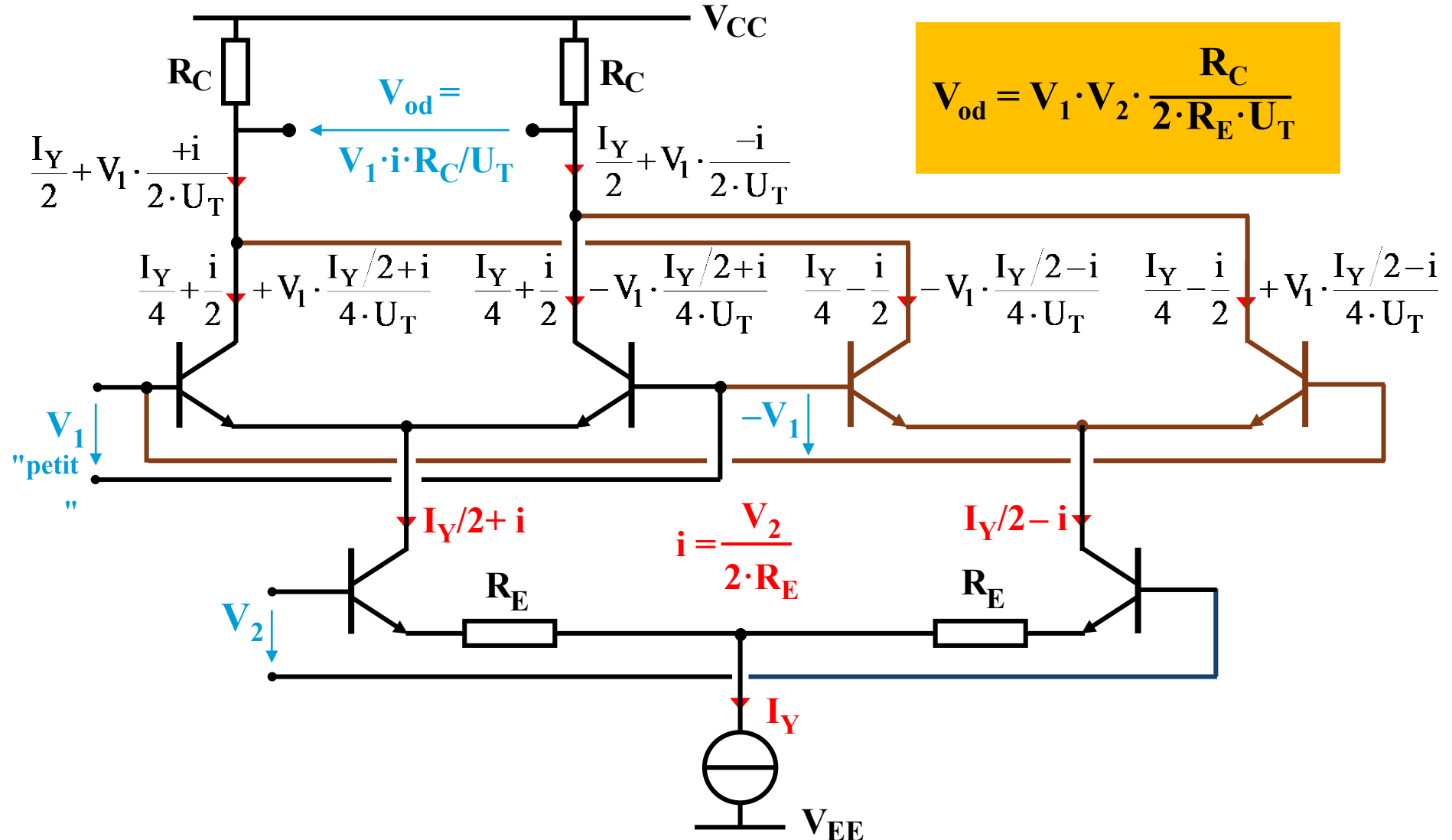
6. MULTIPLIEUR ANALOGIQUE

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



6. MULTIPLIEUR ANALOGIQUE

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



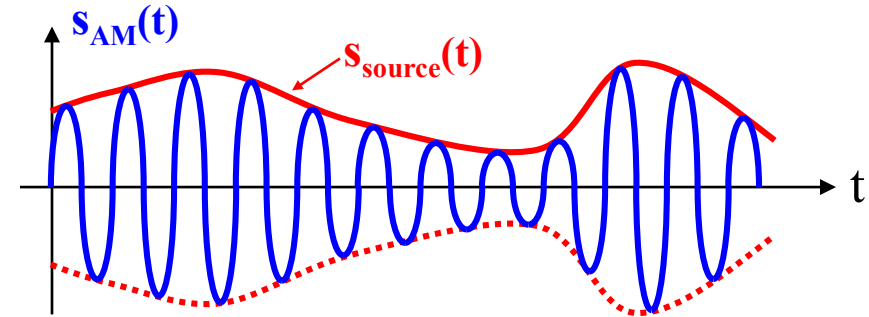
6. MULTIPLIEUR ANALOGIQUE

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

APPLICATIONS:

- Modulation AM:

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



- Démodulation AM synchrone:

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

- Changement de fréquence:

$$\sin(2\pi \cdot f_1 \cdot t) \cdot \sin(2\pi \cdot f_2 \cdot t) = \frac{1}{2} \cdot \cos(2\pi \cdot (f_2 - f_1) \cdot t) - \cancel{\frac{1}{2} \cdot \cos(2\pi \cdot (f_2 + f_1) \cdot t)}$$

- Détection de phase:

$$\sin(2\pi \cdot f_1 \cdot t + \phi) \cdot \sin(2\pi \cdot f_1 \cdot t) = \frac{1}{2} \cdot \cos(\phi) - \cancel{\frac{1}{2} \cdot \cos(2\pi \cdot 2f_1 \cdot t)}$$