LES AMPLIFICATEURS A UN TRANSISTOR

LES AMPLIFICATEURS A UN TRANSISTOR

1. Transistors Bipolaire et MOS: lois de base

2. Modèle "petits signaux"

3. Comparaison Bipolaire - MOS

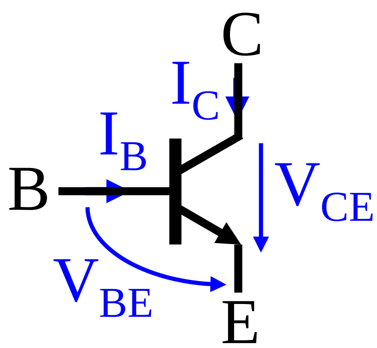
4. Caractéristiques des montages fondamentaux

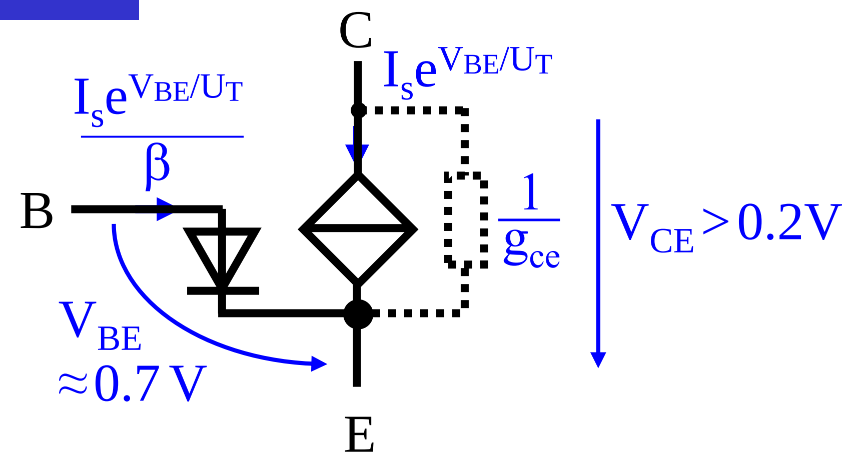
5. Calcul direct des résistances d'entrée et de sortie

6. Autres remarques

1. Transistor Bipolaire: lois de base

Transistor bipolaire en mode normal



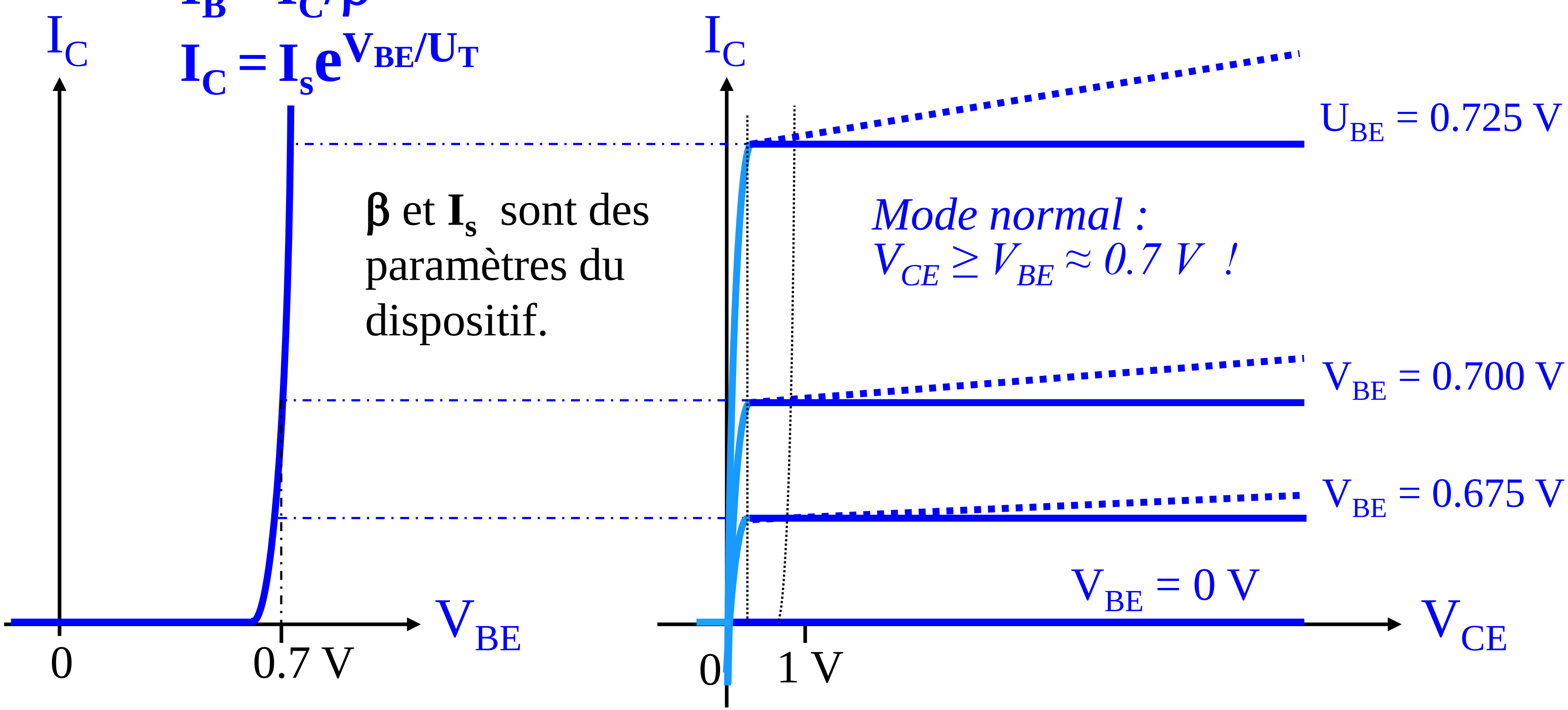


$$\mathbf{I_B = I_C/\beta}$$

$$\mathbf{I_C = I_s e^{V_{BE}/U_T}}$$

β et $\mathbf{I_s}$ sont des paramètres du dispositif.

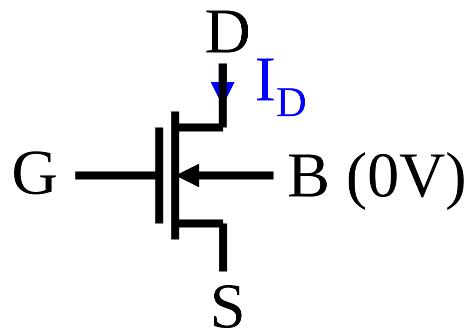
Mode normal :
$V_{CE} \geq V_{BE} \approx 0.7\ V$ *!*

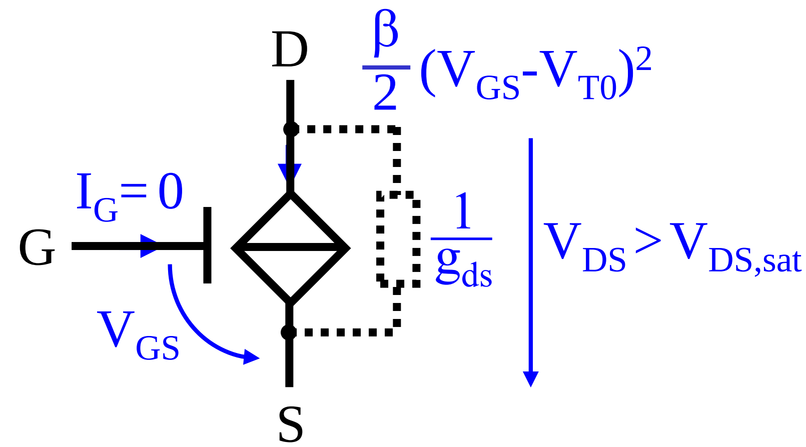


1. Transistor MOS: lois de base

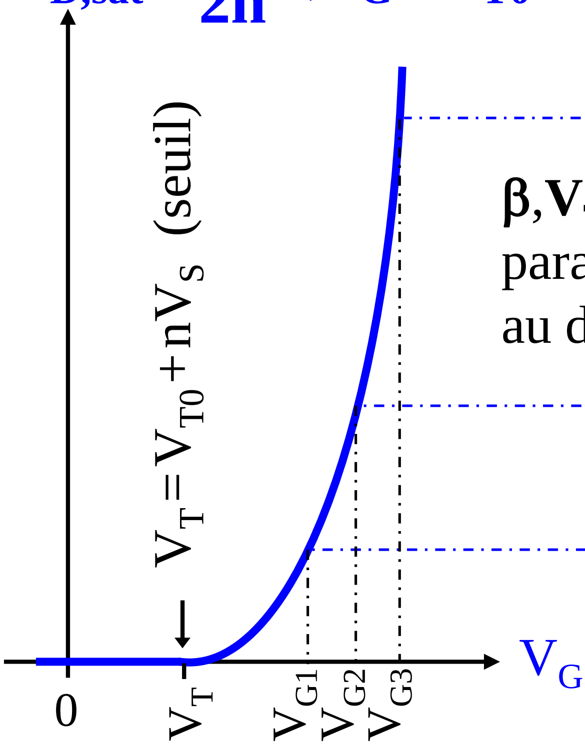
n =1 (techno moderne) ou
V_S = 0 (transistor discrets)

Transistor MOS en forte inversion et saturation

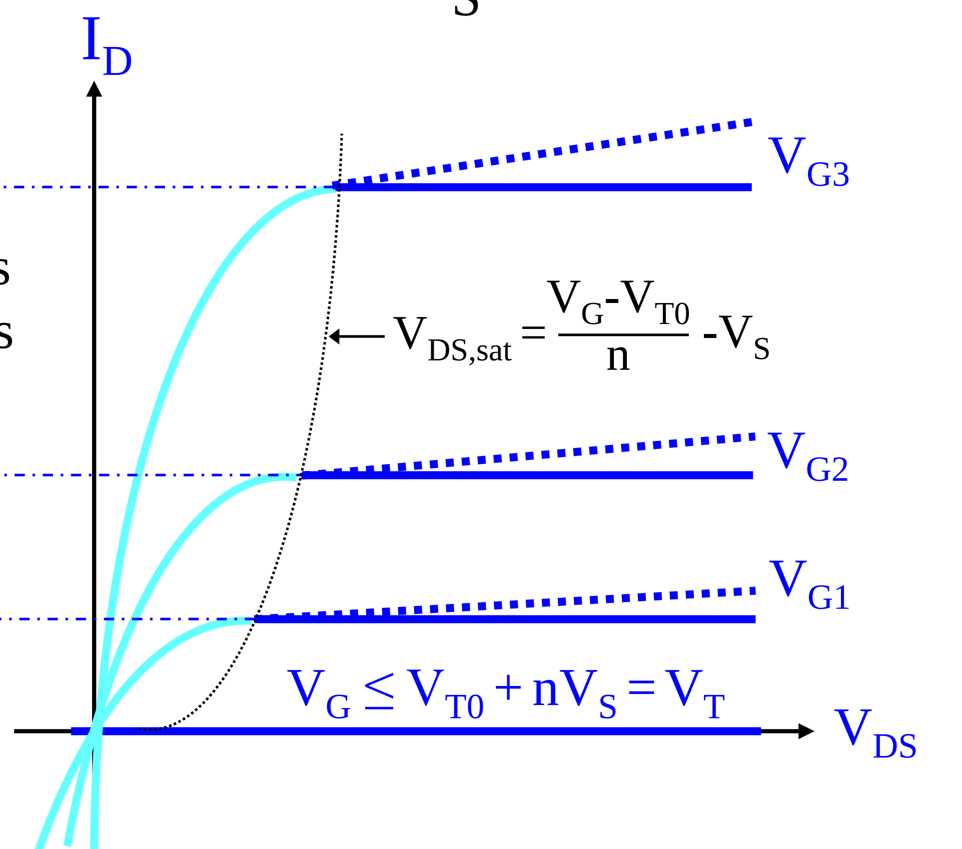




$$I_{D,sat} = \frac{\beta}{2n} \cdot (V_G - V_{T0} - nV_S)^2$$

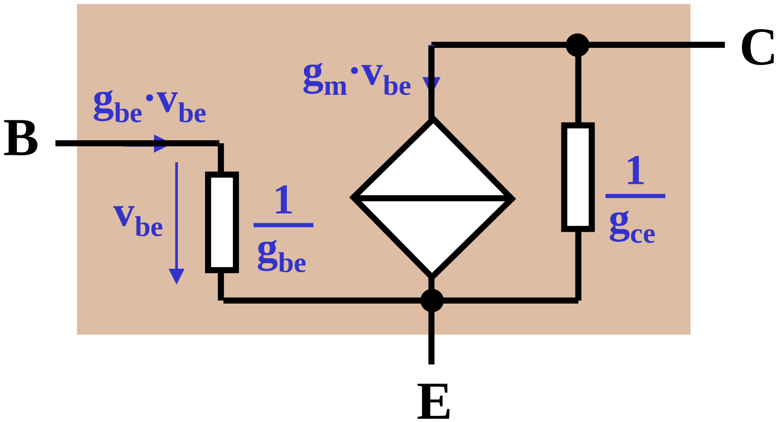


β,**V_{T0}** et **n** sont des paramètres propres au dispositif.



2. Modèle "petits signaux"

Transistor bipolaire (en mode normal)



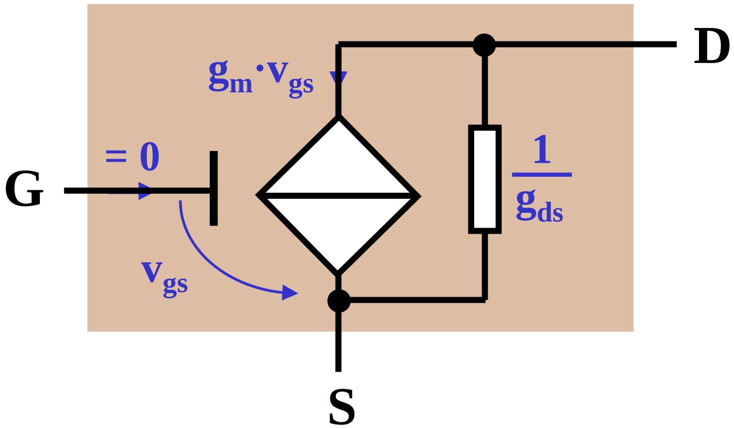
$$g_m = \frac{I_{C0}}{U_T}$$ $$38\ mA/V \approx \frac{1}{26\ \Omega}$$

$$g_{be} = \frac{g_m}{\beta} = \frac{I_{C0}}{\beta \cdot U_T}$$ $$190\ \mu A/V \approx \frac{1}{5\ k\Omega}$$

$$g_{ce} \approx \frac{I_{C0}}{V_A}$$ $$17\ \mu A/V \approx \frac{1}{60\ k\Omega}$$

Ex.: $I_{C0} = 1\ mA,\ \beta = 200,\ V_A = 60\ V$

Transistor MOS (en saturation)

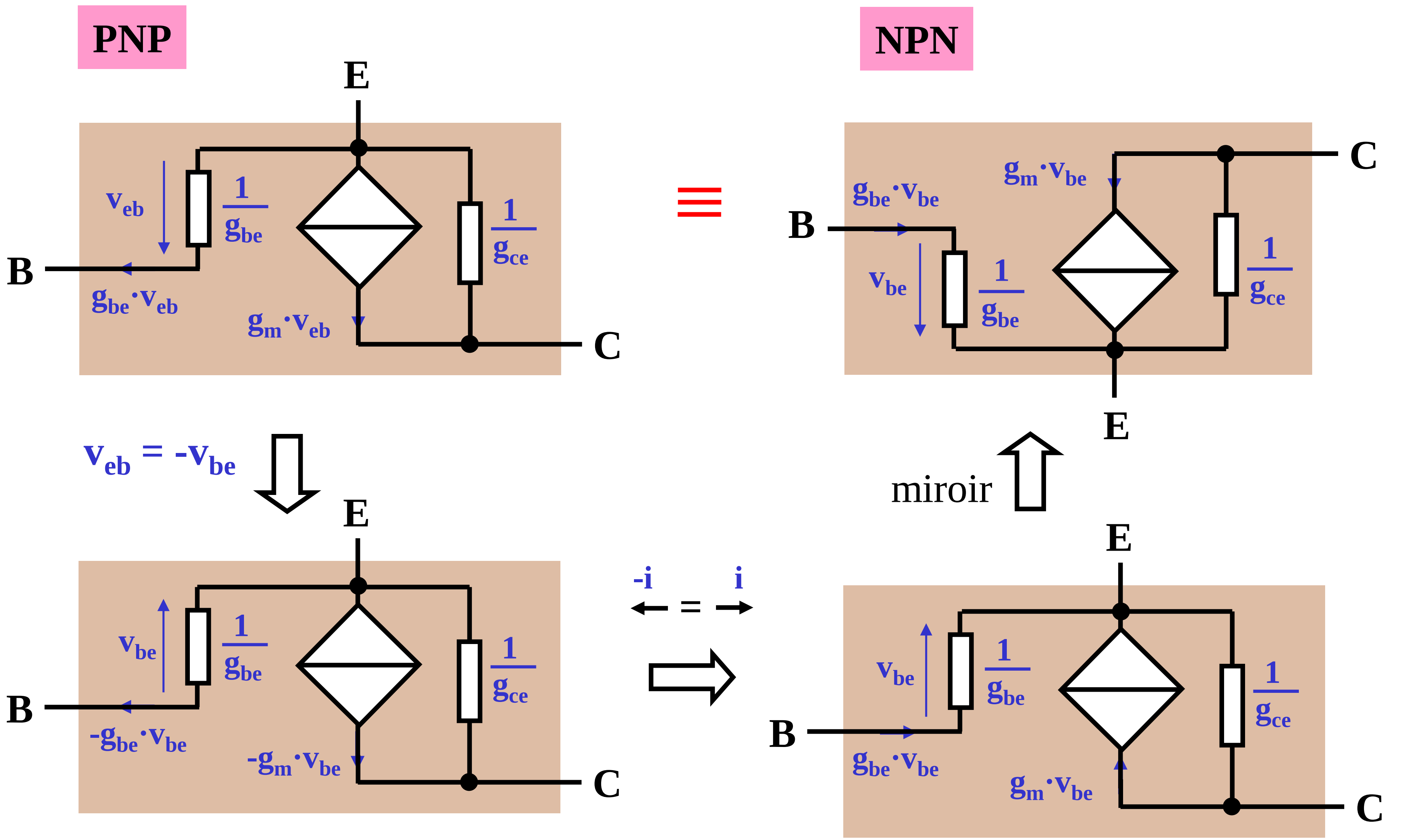


Circuit équivalent comparable, mais plus simple, en raison de la résistance d'entrée infinie du Gate

$$g_m = \sqrt{2 \cdot \mu \cdot C_{ox} \cdot \frac{W}{L} \cdot I_{D0}}$$

$$g_{ds} \approx \frac{I_{D0}}{V_A} = \frac{I_{D0}}{\lambda \cdot L}$$

2 bis. Modèle "petits signaux" PNP et NPN identiques



De même, les modèle "petits signaux" du PMOS et du NMOS sont identiques

3. Transistors MOS et Bipolaires: comparaison

Transistor bipolaire en mode normal

$$I_C = I_S \cdot e^{\frac{V_{BE}}{U_T}} \qquad I_C = \beta \cdot I_B$$

$$U_T = \frac{kT}{q} \approx 26 \text{ mV @ } 300^\circ \text{ K}$$

$$g_m = \frac{dI_C}{dV_{BE}} = \frac{I_C}{U_T}$$

Loi exponentielle

I_C peut facilement être élevé

g_m élevé,
indépendant de la géométrie

totalement différents

Transistor MOS saturé en forte inversion avec $V_S = 0$ ou $n \approx 1$

$$I_D = \frac{\beta}{2} \cdot (V_{GS} - V_T)^2$$

$$\beta = \mu \cdot C_{ox} \cdot W/L$$

$$g_m = \frac{dI_D}{dV_{GS}} = \beta \cdot (V_{GS} - V_T) = \sqrt{2\beta \cdot I_D}$$

Loi quadratique

I_D plus faible, sauf au prix d'une surface très élevée

g_m : même remarque que pour I_D
fonction de la géométrie: W/L

Dépendance plus forte des paramètres technologiques

3. Transistors MOS et Bipolaires intégrés: comparaison

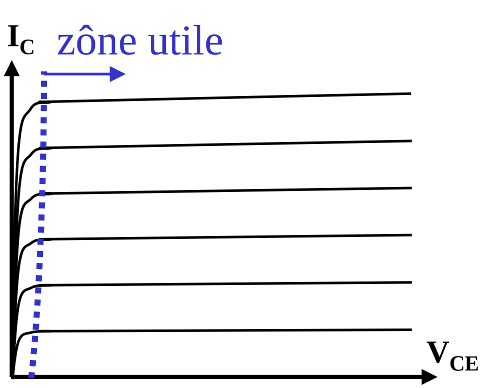
Transistor bipolaire

g_m plus élevé

Courant de sortie plus important par unité de surface

Moins sensible aux variations du processus de fabrication

Plage utile plus étendue



biplolaire

Transistor MOS

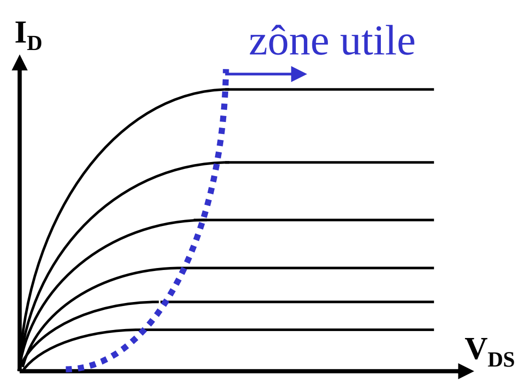
Surface minimale plus petite
→ circuits à très haute densité

Circuits à très faible puissance

Switch "idéal" bi-directionnel

Le Gate (capacité) est une mémoire dynamique intrinsèque

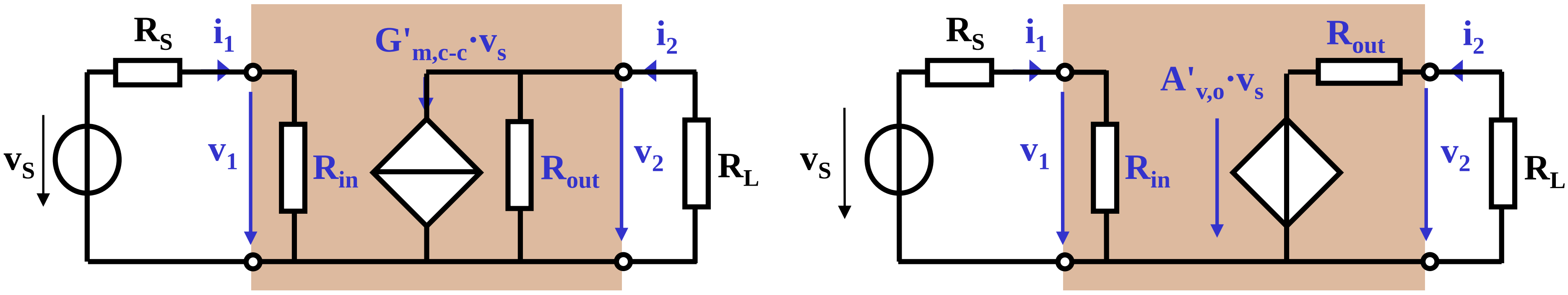
Plusieurs modes de fonctionnement possibles :
faible ($V_G < V_T$), moyenne ($V_G \approx V_T$) ou forte ($V_G > V_T$) inversion



MOS

4. Caractéristiques des montages fondamentaux

Modélisation et définitions



Grandeurs "accessibles": v_1, i_1, v_2, i_2

Résistance d'entrée : $R_{in} = \frac{v_1}{i_1}$

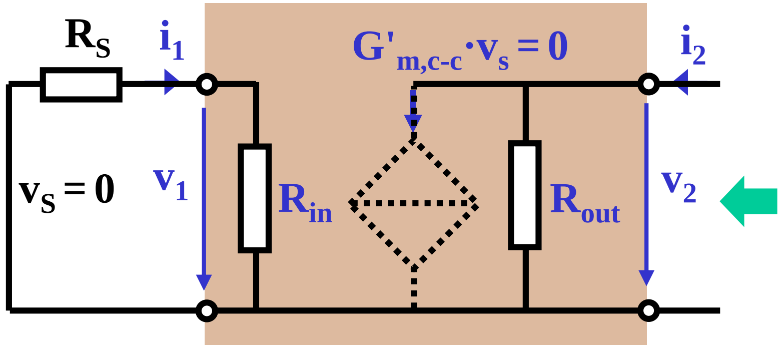
Gain en tension : $A_v = \frac{v_2}{v_1}$

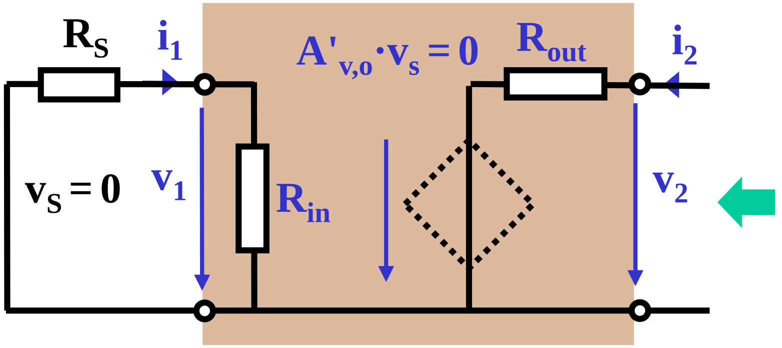
Gain en courant : $A_i = \frac{i_2}{i_1}$

pour une charge R_L donnée !

4. Caractéristiques des montages fondamentaux

Définition de la résistance de sortie





La résistance de sortie est l'élément parasite interne au quadripôle, qui rend la source commandée non-idéale, et qui se situe en parallèle (source de courant) ou en série (source de tension) avec la charge R_L.

Pour mesurer ou calculer la résitance de sortie, il faut:

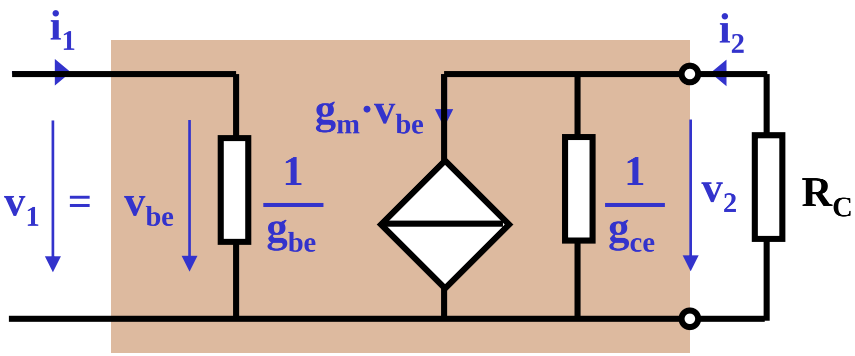
- enlever la charge R_L
- annuler la source indépendante d'entrée v_s (ou i_s selon les cas)
- mesurer ou calculer la résistance visible, dans ces conditions, entre les bornes de sortie

$$R_{out} = \left.\frac{v_2}{i_2}\right|_{v_S = 0}$$

pour une résistance de source R_S donnée !

4. Caractéristiques des montages fondamentaux

Emetteur Commun (1/2)



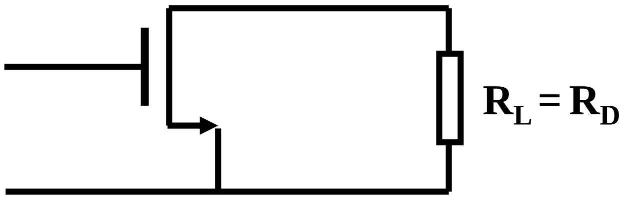
$$R_{in} = \frac{1}{g_{be}}$$

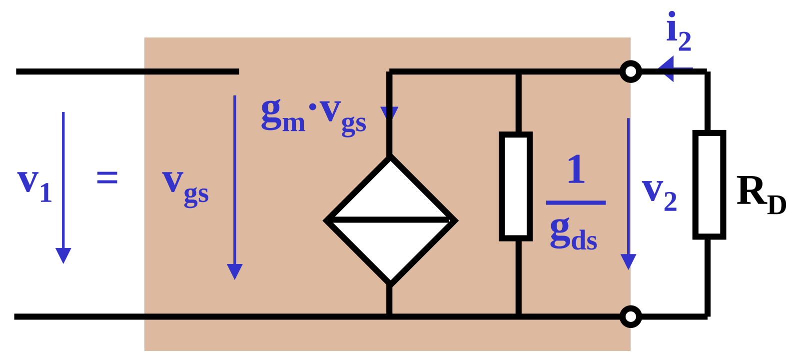
$$A_V = -\, g_m \cdot \left(R_C \,//\, \frac{1}{g_{ce}}\right) \overset{\star}{\approx} -\, g_m \cdot R_C$$

$$A_i = \beta \cdot \frac{1}{1 + g_{ce} \cdot R_C} \overset{\star}{\approx} \beta$$

$\star$ si: $R_C < \frac{1}{g_{ce}}$

Source Commune (1/2)





$$R_{in} = \infty$$

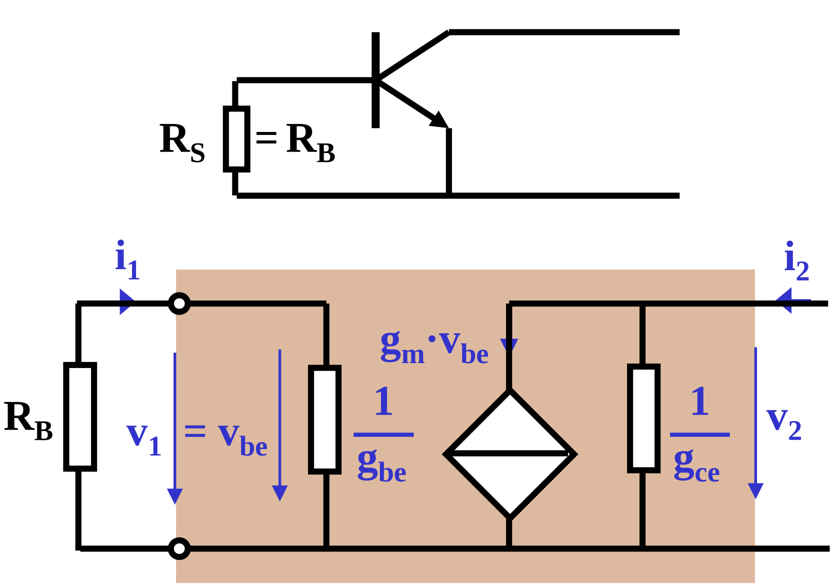
$$A_V = -\, g_m \cdot \left(R_D \,//\, \frac{1}{g_{ds}}\right) \overset{\star}{\approx} -\, g_m \cdot R_D$$

$$A_i = \infty$$

$\star$ si: $R_D < \frac{1}{g_{ds}}$

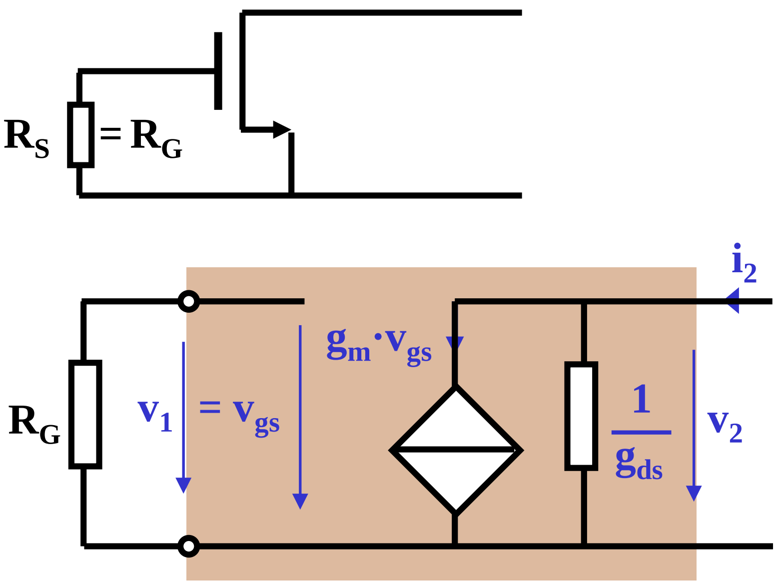
4. Caractéristiques des montages fondamentaux

Emetteur Commun (2/2)



$$R_{out} = \frac{1}{g_{ce}}$$

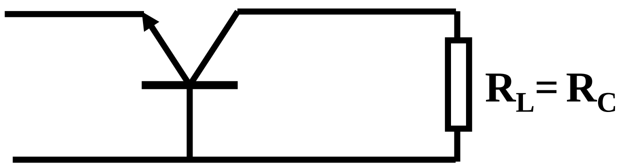
Source Commune (2/2)

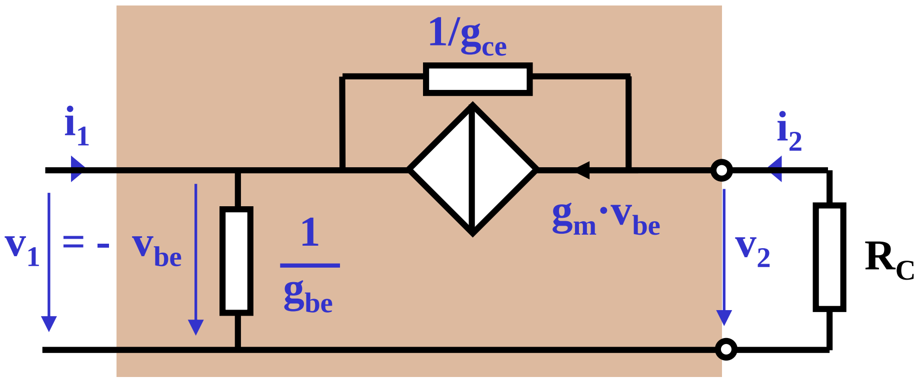


$$R_{out} = \frac{1}{g_{ds}}$$

4. Caractéristiques des montages fondamentaux

Base Commune (1/2)





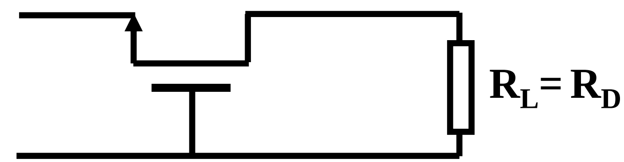
$$A_V = \frac{g_m \cdot R_C}{1+g_{ce} \cdot R_C} = g_m \cdot \left(R_C // \frac{1}{g_{ce}}\right) \overset{\star}{\approx} g_m \cdot R_C$$

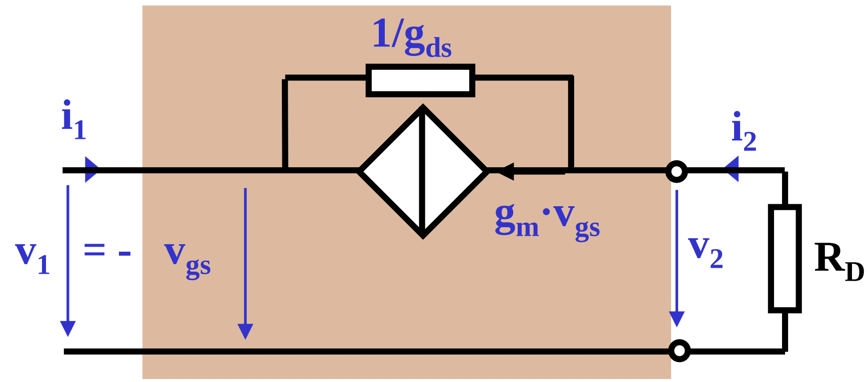
$$A_i = \frac{-1}{1+g_{ce} \cdot R_C/\beta} \approx -1$$

$\star$ si: $R_C < \frac{1}{g_{ce}}$

$$R_{in} = \frac{1}{g_m} \cdot \frac{1+g_{ce} \cdot R_C}{1+g_{ce} \cdot R_C/\beta} \overset{\star}{\approx} \frac{1}{g_m}$$

Gate Commun (1/2)





$$A_V = \frac{(g_m + g_{ds}) \cdot R_D}{1+g_{ds} \cdot R_D} = (g_m + g_{ds}) \cdot \left(R_D // \frac{1}{g_{ds}}\right)$$

$$\overset{\star}{\approx} (g_m + g_{ds}) \cdot R_D$$

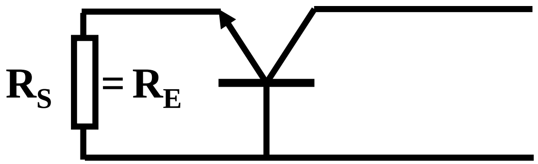
$$A_i = -1$$

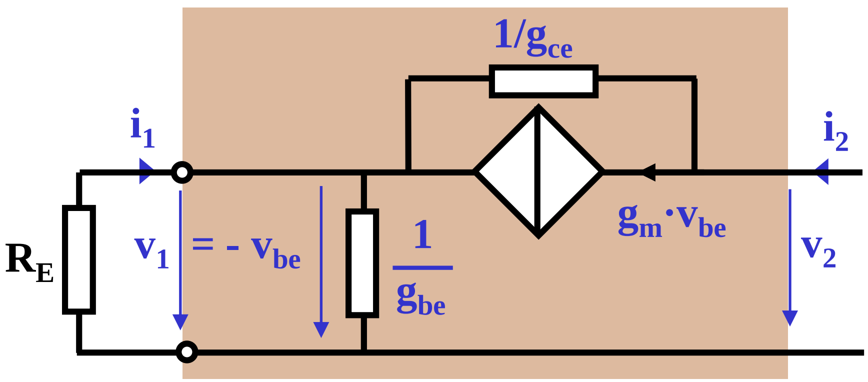
$\star$ si: $R_D < \frac{1}{g_{ds}}$

$$R_{in} = \frac{1+g_{ds} \cdot R_D}{g_m + g_{ds}} \overset{\star}{\approx} \frac{1}{g_m + g_{ds}}$$

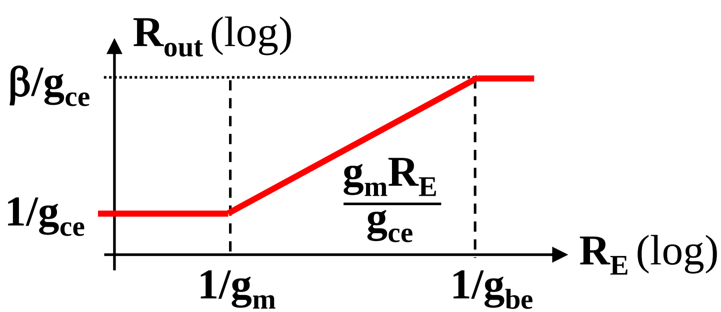
4. Caractéristiques des montages fondamentaux

Base Commune (2/2)

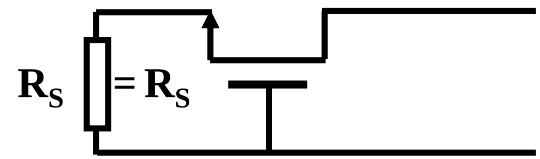


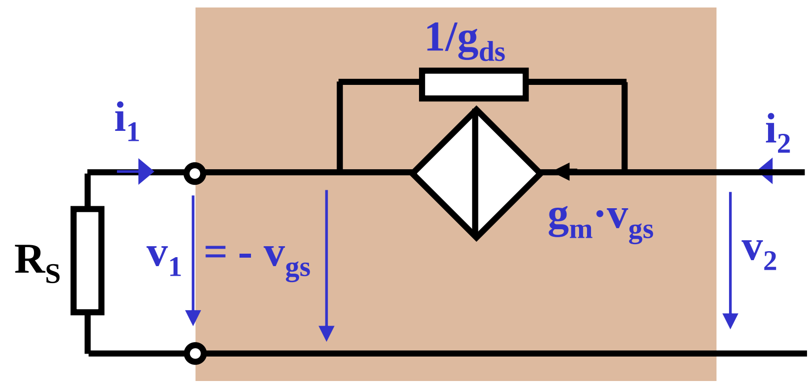


$$R_{out} = \frac{1}{g_{ce}} \cdot \frac{1 + g_m \cdot R_E}{1 + g_{be} \cdot R_E}$$

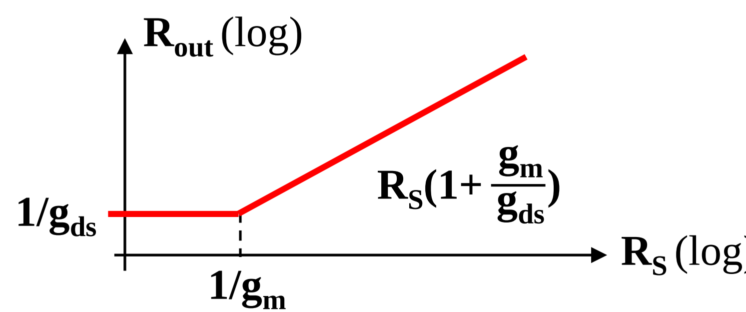


Gate Commun (2/2)



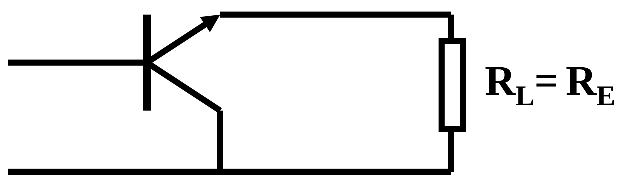


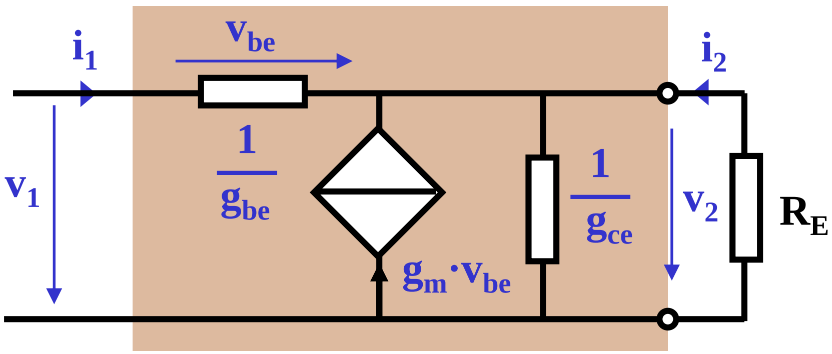
$$R_{out} = \frac{1}{g_{ds}} \cdot (1 + (g_m + g_{ds}) \cdot R_S)$$



4. Caractéristiques des montages fondamentaux

Collecteur Commun (1/2)





$$A_V = \frac{g_m \cdot R_E}{1 + g_m \cdot R_E} \approx 1$$

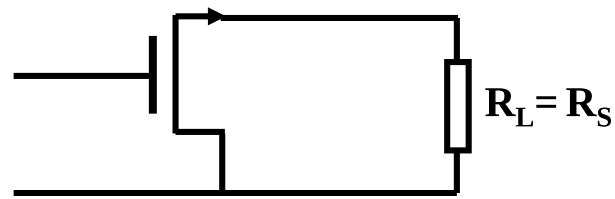
◈ si: $R_E > \frac{1}{g_m}$

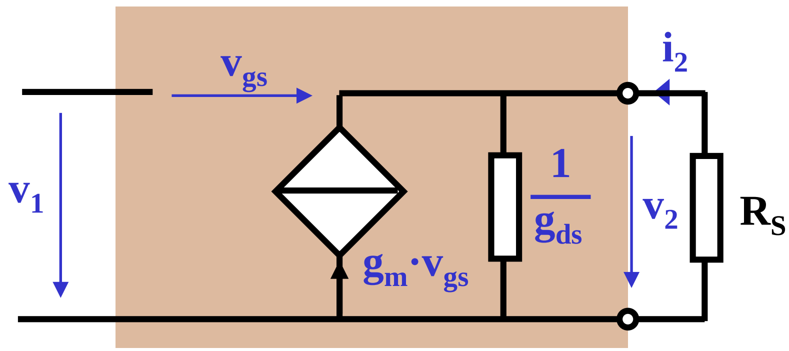
$$A_i = -\beta \cdot \frac{1}{1 + g_{ce} \cdot R_E} \approx -\beta$$

★ si: $R_E < \frac{1}{g_{ce}}$

$$R_{in} = \frac{1}{g_{be}} + \beta \cdot \left(R_E // \frac{1}{g_{ce}}\right) \approx \frac{1}{g_{be}} + \beta \cdot R_E \approx \beta \cdot R_E$$

Drain Commun (1/2)





$$A_V = \frac{g_m \cdot R_S}{1 + (g_m + g_{ds}) \cdot R_S} \approx \frac{g_m}{g_m + g_{ds}}$$

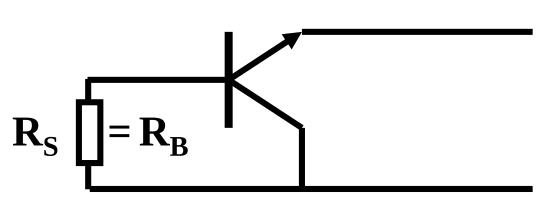
◈ si: $R_S > \frac{1}{g_m}$

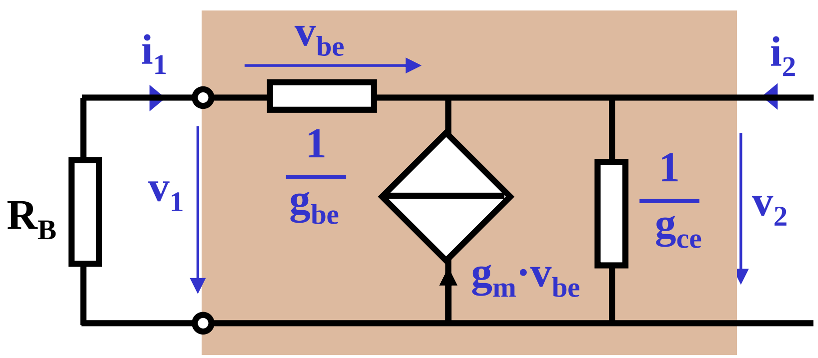
$A_i = \infty$

$R_{in} = \infty$

4. Caractéristiques des montages fondamentaux

Collecteur Commun (2/2)

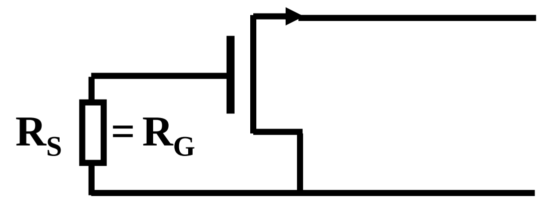


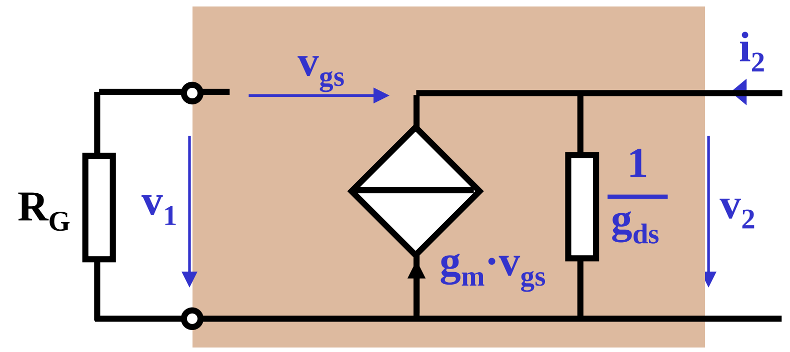


$$R_{out} = \frac{1}{g_{ce}} // \left(\frac{1}{g_m} + \frac{R_B}{\beta}\right) \overset{\star}{\approx} \frac{1}{g_m} + \frac{R_B}{\beta} \underset{\star}{\overset{\diamond}{\approx}} \frac{R_B}{\beta}$$

$\star$ si: $R_B < \frac{\beta}{g_{ce}}$ $\diamond$ si: $R_B > \frac{1}{g_{be}}$

Drain Commun (2/2)



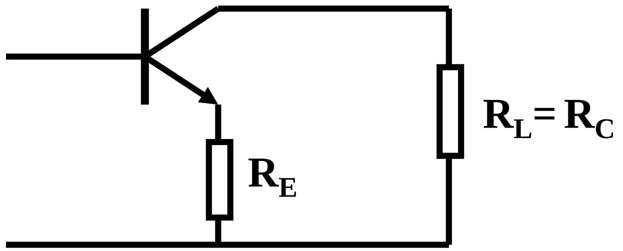


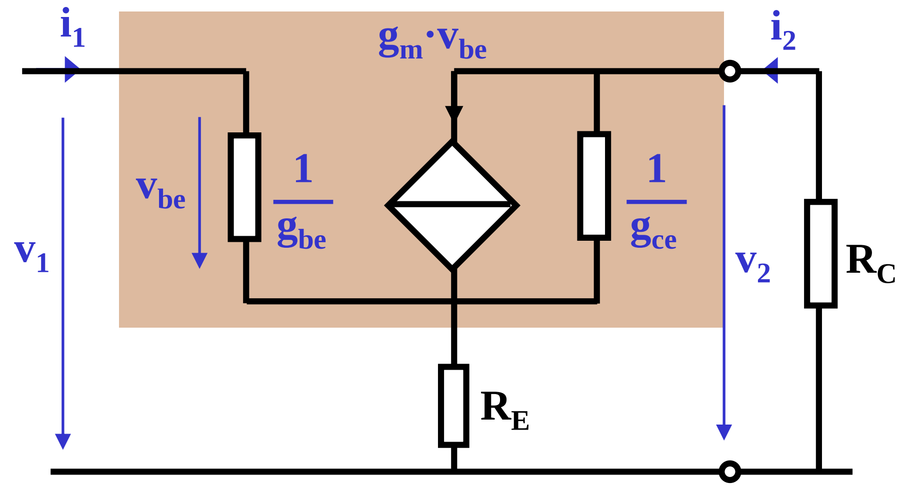
$$R_{out} = \frac{1}{g_m + g_{ds}}$$

4. Caractéristiques des montages fondamentaux

Emetteur Commun "dégénéré" (1/3)

Mélange d'Emetteur Commun et de Collecteur Commun





$$A_V = -\frac{g_m \cdot R_C \cdot \cancel{(1 - g_{ce} \cdot R_E / \beta)}}{1 + g_m \cdot R_E + g_{ce} \cdot R_C \cdot (1 + g_{be} \cdot R_E)} = -\frac{g_m}{1 + g_m \cdot R_E} \cdot \left(R_C // \frac{1}{g_{ce}} \cdot \frac{1 + g_m R_E}{1 + g_{be} R_E}\right)$$

presque toujours: $R_E < \dfrac{\beta}{g_{ce}}$

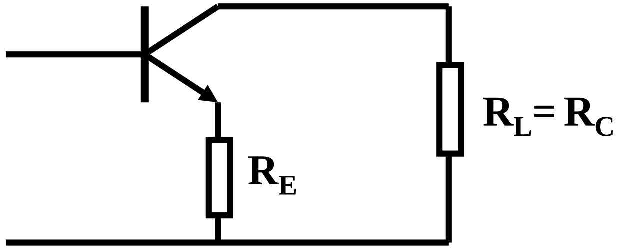
$$\overset{\star}{\approx} -\frac{g_m \cdot R_C}{1 + g_m \cdot R_E} \overset{\diamond}{\approx} -\frac{R_C}{R_E}$$

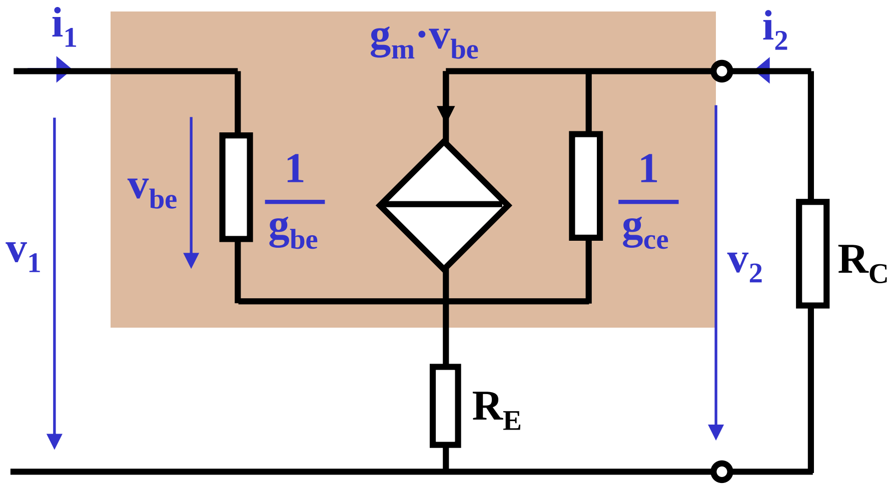
★ si: $R_C < \dfrac{1}{g_{ce}} \cdot \dfrac{1 + g_m R_E}{1 + g_{be} R_E}$ ◈ et si: $R_E > \dfrac{1}{g_m}$

4. Caractéristiques des montages fondamentaux

Emetteur Commun "dégénéré" (2/3)

Mélange d'Emetteur Commun et de Collecteur Commun





$$A_i = \frac{\beta}{1 + g_{ce}\cdot(R_C + R_E)} \approx \beta$$

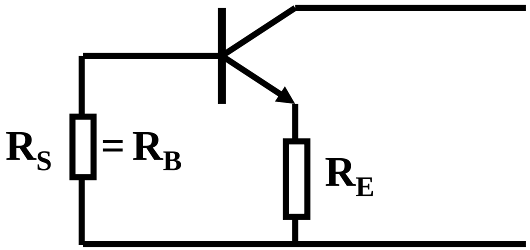
si: $(R_C + R_E) < \frac{1}{g_{ce}}$

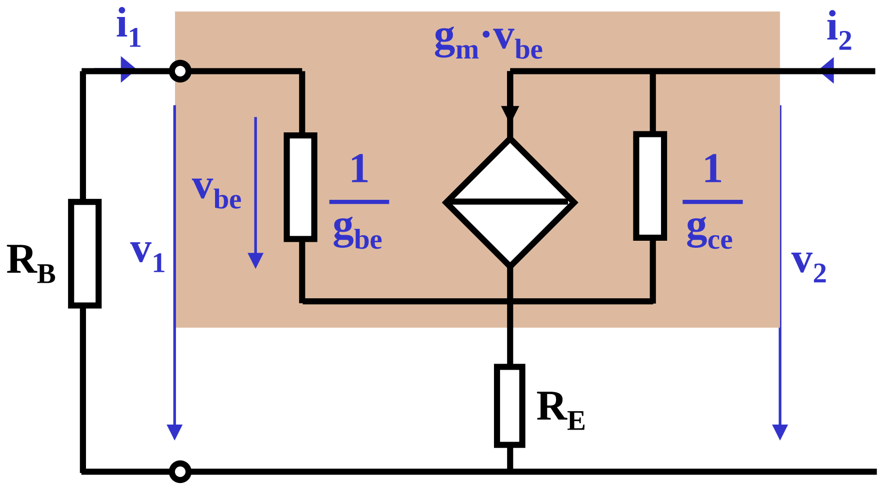
$$R_{in} = \frac{1 + g_m \cdot R_E + g_{ce}\cdot R_C(1 + g_{be}\cdot R_E)}{g_{be}\cdot\left(1 + g_{ce}\cdot(R_C + R_E)\right)} \approx \frac{1}{g_{be}} + \beta \cdot R_E$$

4. Caractéristiques des montages fondamentaux

Emetteur Commun "dégénéré" (3/2)

Mélange d'Emetteur Commun et de Collecteur Commun





$$R_{out} = \frac{1}{g_{ce}} \cdot \frac{1 + g_m \cdot R_E + g_{be} \cdot R_B \cdot (1 + g_{ce} \cdot R_E)}{1 + g_{be} \cdot (R_B + R_E)}$$

◈ si: $R_E < \frac{1}{g_{ce}}$

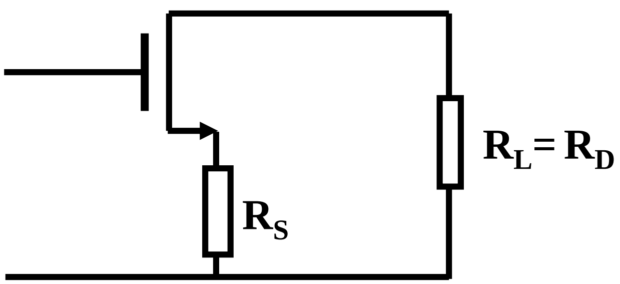
$$R_{out} \overset{◈}{\approx} \frac{1}{g_{ce}} \cdot \frac{1 + g_m \cdot R_E + g_{be} \cdot R_B}{1 + g_{be} \cdot (R_B + R_E)}$$

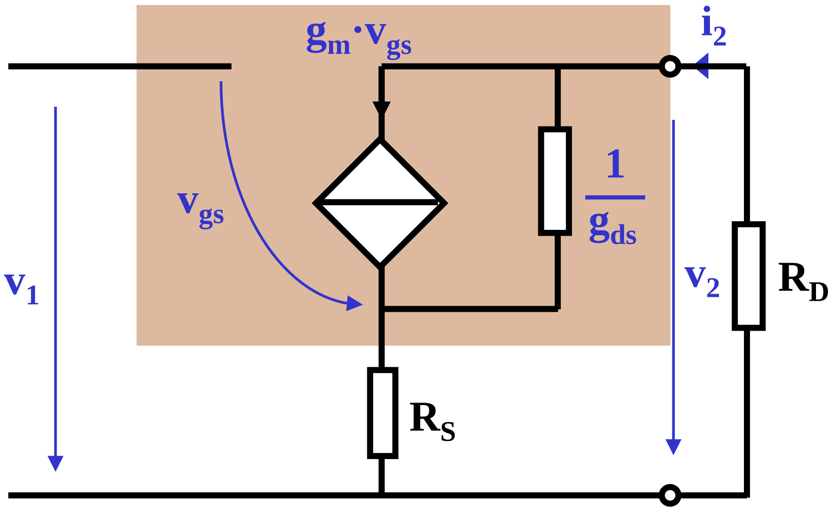
$$\frac{1}{g_{ce}} \leq R_{out} \leq \frac{\beta}{g_{ce}}$$

4. Caractéristiques des montages fondamentaux

Source Commune "dégénérée" (1/2)

Mélange de Source Commune et de Drain Commun





$$A_V = -\frac{g_m \cdot R_D}{1 + g_m \cdot R_S + g_{ds} \cdot (R_S + R_D)} = -\frac{g_m}{1 + (g_m + g_{ds}) \cdot R_S} \cdot \left[R_D // \frac{1}{g_{ds}} \cdot \left(1 + (g_m + g_{ds}) \cdot R_S\right) \right]$$

$$\overset{\star}{\approx} -\frac{g_m \cdot R_D}{1 + (g_m + g_{ds}) \cdot R_S}$$

$A_i = \infty$

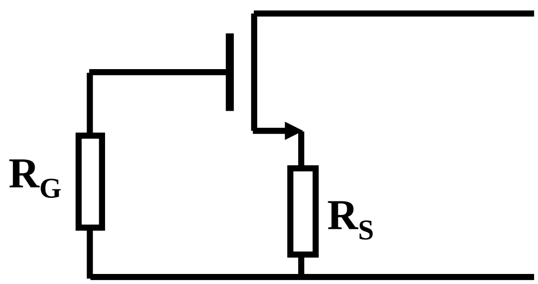
$R_{in} = \infty$

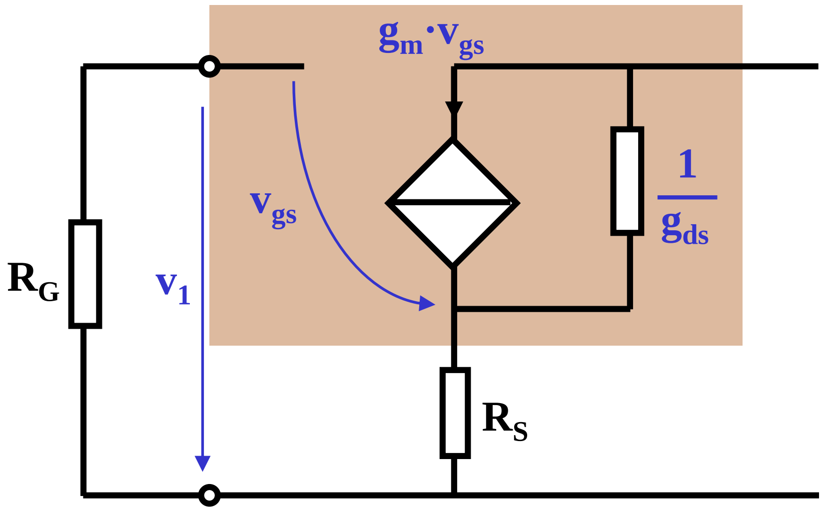
$\star$ si: $R_D < \frac{1}{g_{ds}} \cdot \left(1 + (g_m + g_{ds}) \cdot R_S\right)$

4. Caractéristiques des montages fondamentaux

Source Commune "dégénérée" (2/2)

Mélange de Source Commune et de Drain Commun





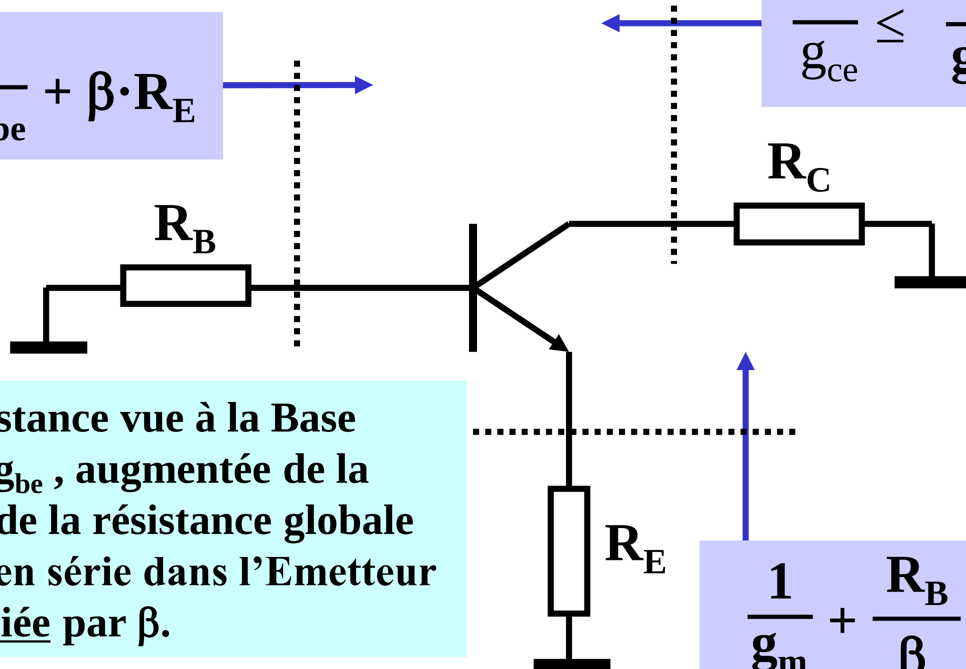
$$R_{out} = \frac{1}{g_{ds}} \cdot \left(1 + (g_m + g_{ds}) \cdot R_S\right)$$

5. Calcul direct des impédances d' entrée et de sortie

Transistor bipolaire

$$\frac{1}{g_{ce}} \leq \frac{1}{g_{ce}} \cdot \frac{1 + g_m \cdot R_E + g_{be} \cdot R_B}{1 + g_{be} \cdot (R_E + R_B)} \leq \frac{\beta}{g_{ce}}$$

$$\frac{1}{g_{be}} + \beta \cdot R_E$$



La résistance vue au Collecteur est comprise entre $1/g_{ce}$ et β/g_{ce} .

La résistance vue à la Base vaut $1/g_{be}$, augmentée de la valeur de la résistance globale placée en série dans l'Emetteur <u>multipliée</u> par β.

$$\frac{1}{g_m} + \frac{R_B}{\beta}$$

La résistance vue à l'Emetteur vaut $1/g_m$, augmentée de la valeur de la résistance globale placée en série dans la Base <u>divisée</u> par β.

Attention aux limites de validité !

5. Calcul direct des impédances d'entrée et de sortie

Transistor MOS

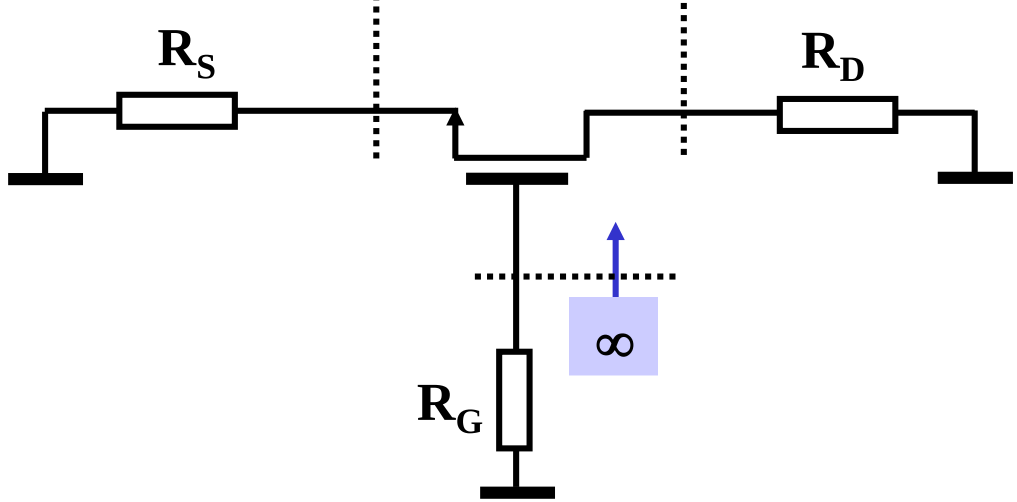
$$\frac{1}{g_m + g_{ds}} \cdot (1 + g_{ds} \cdot R_D)$$

$$\frac{1}{g_{ds}} \cdot (1 + (g_m + g_{ds}) \cdot R_S)$$

si : $g_m >> g_{ds}$

$$\frac{1}{g_m} \cdot (1 + g_{ds} \cdot R_D)$$

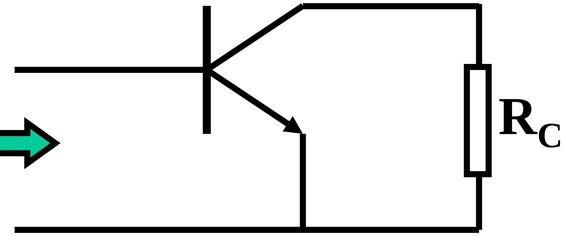
$$\frac{1}{g_{ds}} \cdot (1 + g_m \cdot R_S)$$



5. Calcul direct des impédances d’entrée et de sortie

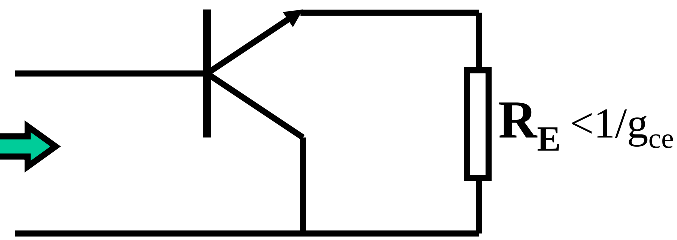
Exemples d'applications : entrée sur la base

$$R_{in} = \frac{1}{g_{be}}$$



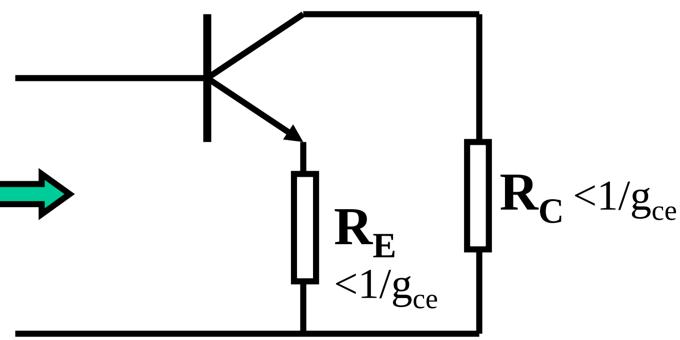
EC

$$R_{in} = \frac{1}{g_{be}} + \beta \cdot R_E$$



CC

$$R_{in} = \frac{1}{g_{be}} + \beta \cdot R_E$$

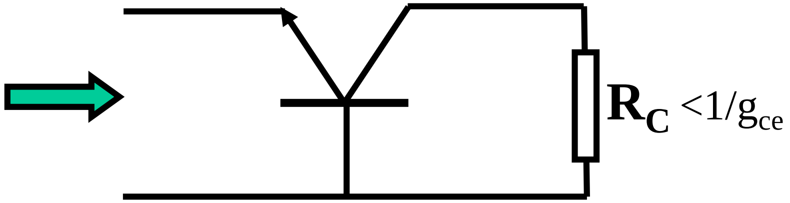


EC dégénéré

5. Calcul direct des impédances d’entrée et de sortie

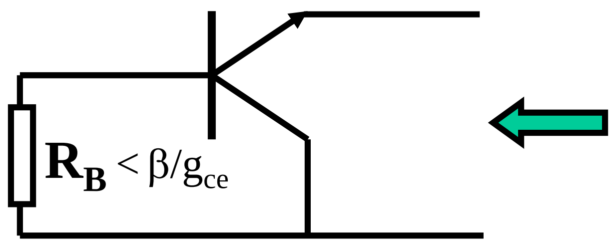
Exemples d'applications : entrée ou sortie sur l'émetteur

$$R_{in} = \frac{1}{g_m}$$



BC

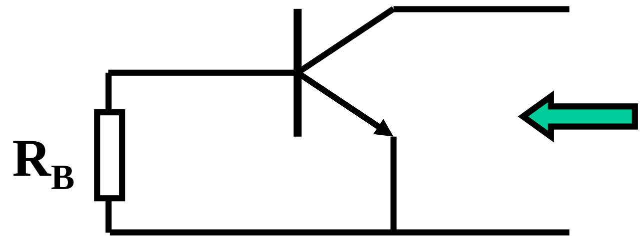
CC



$$R_{out} = \frac{1}{g_m} + \frac{R_B}{\beta}$$

5. Calcul direct des impédances d’entrée et de sortie

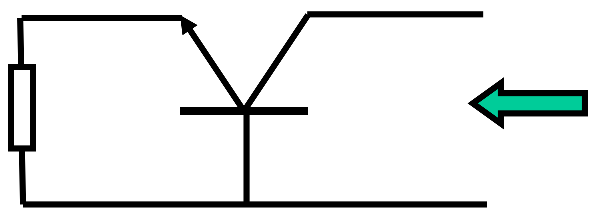
Exemples d'applications : sortie sur le collecteur



$$R_{out} = \frac{1}{g_{ce}}$$

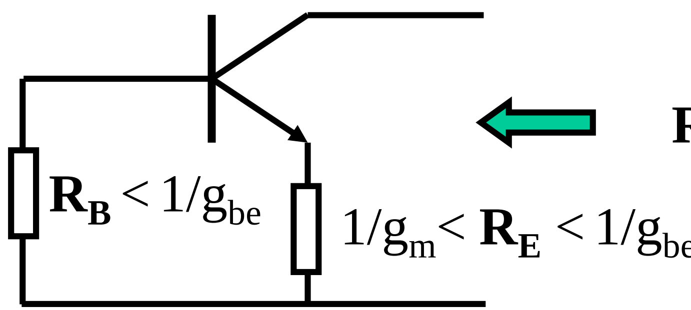
EC

$1/g_m < \mathbf{R_E} < 1/g_{be}$



$$R_{out} = \frac{1}{g_{ce}} \cdot g_m R_E$$

BC



$$R_{out} = \frac{1}{g_{ce}} \cdot g_m R_E$$

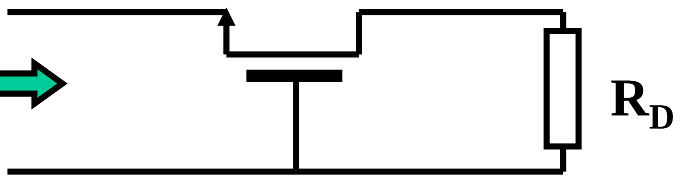
EC dégénéré

5. Calcul direct des impédances d' entrée et de sortie

Exemples d'applications

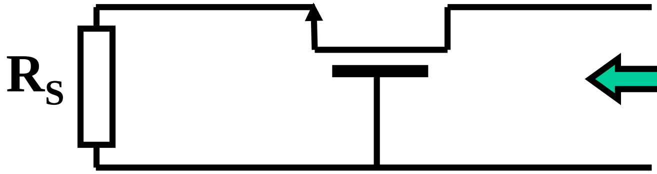
si : $g_m >> g_{ds}$

$$R_{in} = \frac{1}{g_m} + R_D \cdot \frac{g_{ds}}{g_m}$$

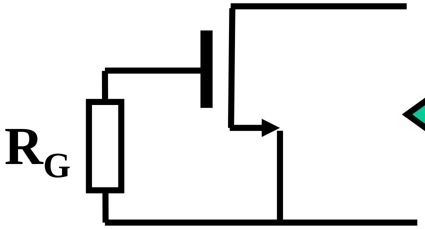


GC

GC

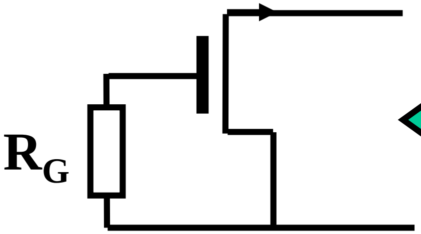


$$R_{out} = \frac{1}{g_{ds}} + R_S \cdot \frac{g_m}{g_{ds}}$$



$$R_{out} = \frac{1}{g_{ds}}$$

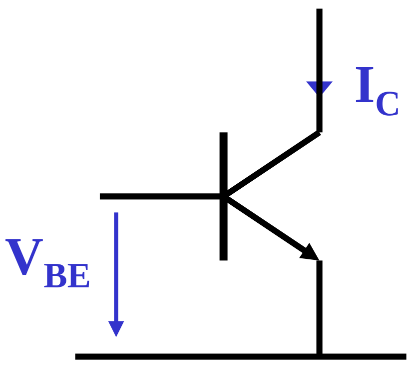
SC



$$R_{out} = \frac{1}{g_m}$$

DC

6. Autres remarques



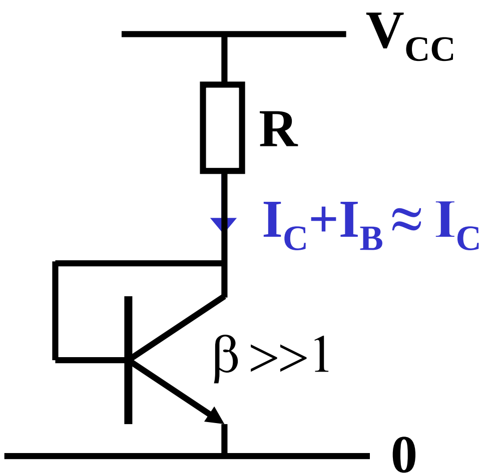
$$I_C = I_S \cdot e^{\frac{V_{BE}}{U_T}} \;\Rightarrow\; V_{BE} = U_T \cdot \ln \frac{I_C}{I_S}$$

Ex.: $I_S = 10^{-14}$ A

$U_T = 26$ mV

I_C (mA)	V_{BE} (V)
1	0.658
2	0.676
5	0.700
10	0.718

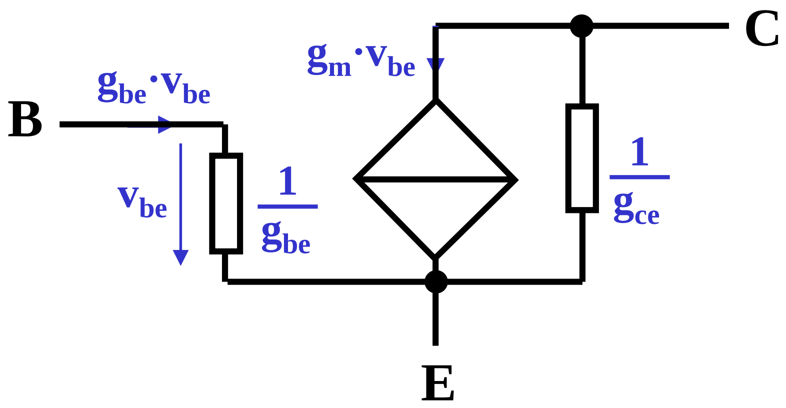
L'approximation $V_{BE} = U_j = 0.7$ V ne peut <u>jamais</u> être utiliée dans la loi exponentielle pour calculer le courant !



$$I_C = \frac{V_{CC} - 0.7}{R}$$

Par contre, l'approximation $V_{BE} = U_j = 0.7$ V est valable dans la plupart des cas pour calculer une polarisation.

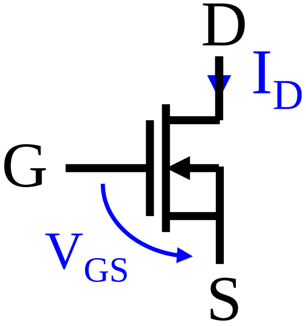
6. Autres remarques



En "petits signaux": $v_{be} \neq U_j = 0.7$ V

U_j n'a aucun sens dans un calcul "petits signaux"

6. Autres remarques



$$V_{GS} = V_T + \sqrt{\frac{2 \cdot I_D}{\beta}}$$

$$V_{GS} \neq U_j = 0.7\ V$$