

# Méthodes de conception en électronique

Cours 5

# Amplificateur

- On a vu 3 caractéristiques des amplificateurs
  - Gain ( $A$ )
  - Résistance en entrée ( $R_{IN}$ )
  - Résistance de sortie ( $R_{OUT}$ )
- Quand on conçoit, il faut pouvoir les calculer
- On va faire des exemples de calcul
  - On en profite pour présenter les 3 configurations de base des amplificateurs avec BJT

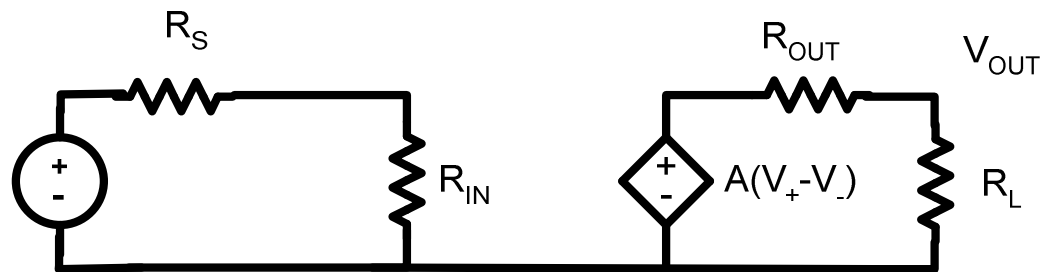
# Mesure des caractéristiques

- On va revoir les 3 caractéristiques et apprendre à les calculer/mesurer
- Rappel:
  - Ces caractéristiques s'appliquent aux VARIATIONS et non aux valeurs moyennes
- Pour le gain et  $R_{IN}$ , les manipulations en laboratoire sont identiques
- Pour  $R_{OUT}$ , on va procéder différemment

# Amplificateur: Gain

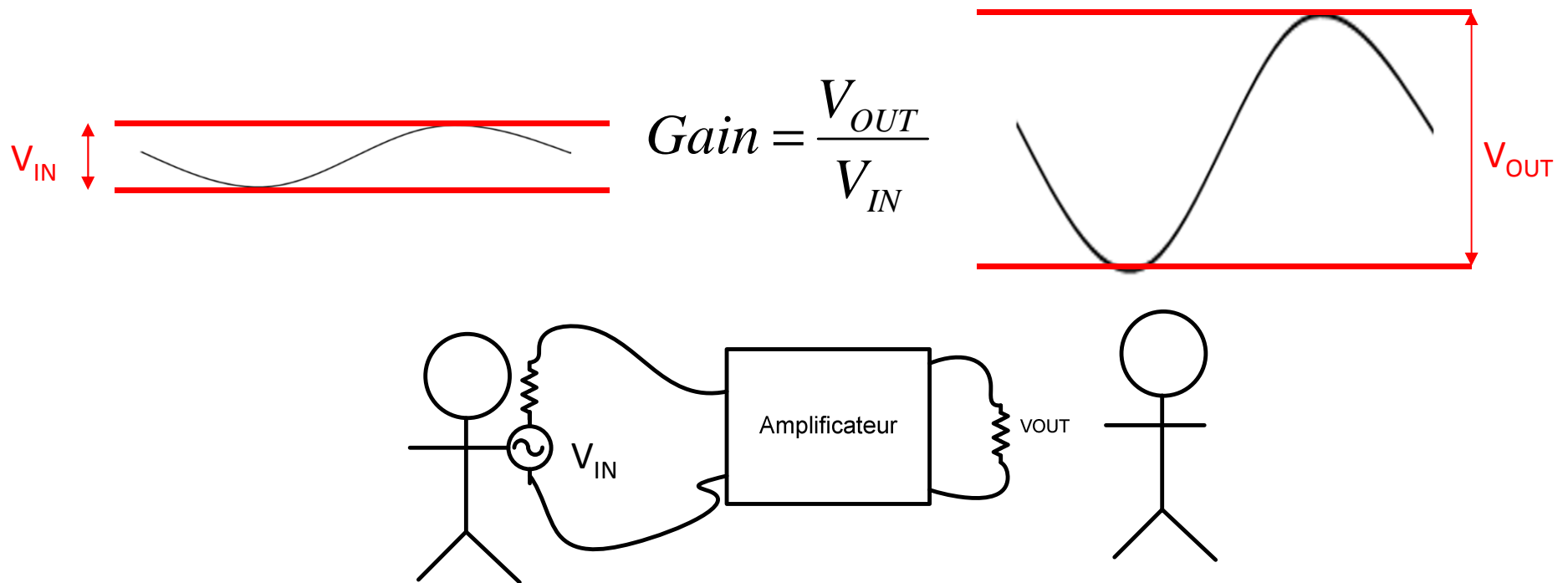
- Le gain d'un amplificateur se trouve de la manière suivante:
  - On fait l'analyse DC
  - On substitue par le modèle petit signal
  - On trouve  $V_{OUT}/V_{IN}$ .

$$Gain = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}}$$



# Ampli op: Gain

- En pratique, on applique une tension  $V_{IN}$  et on regarde son  $V_{OUT}$

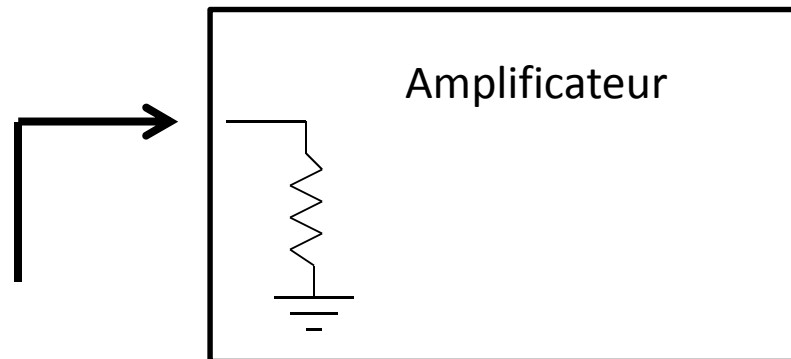


# Amplificateur: $R_{IN}$

- Le  $R_{IN}$  reflète le fait qu'un changement de  $V_{IN}$  donne un changement de  $I_{IN}$

$$R_{IN} = \frac{V_{IN}}{I_{IN}}$$

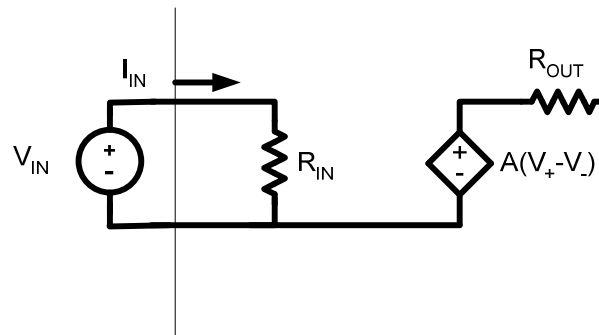
- C'est la résistance que « voit » le circuit en amont



# Amplificateur: $R_{IN}$

- Pour le mesurer, on met une source IDÉALE à l'entrée
  - On néglige sa résistance de source ( $R_S=0$ )
  - On examine le courant tiré ( $I_{IN}$ )
  - Le ratio  $V_{IN}/I_{IN}$  est la résistance en entrée

$$R_{IN} = \frac{V_{IN}}{I_{IN}}$$

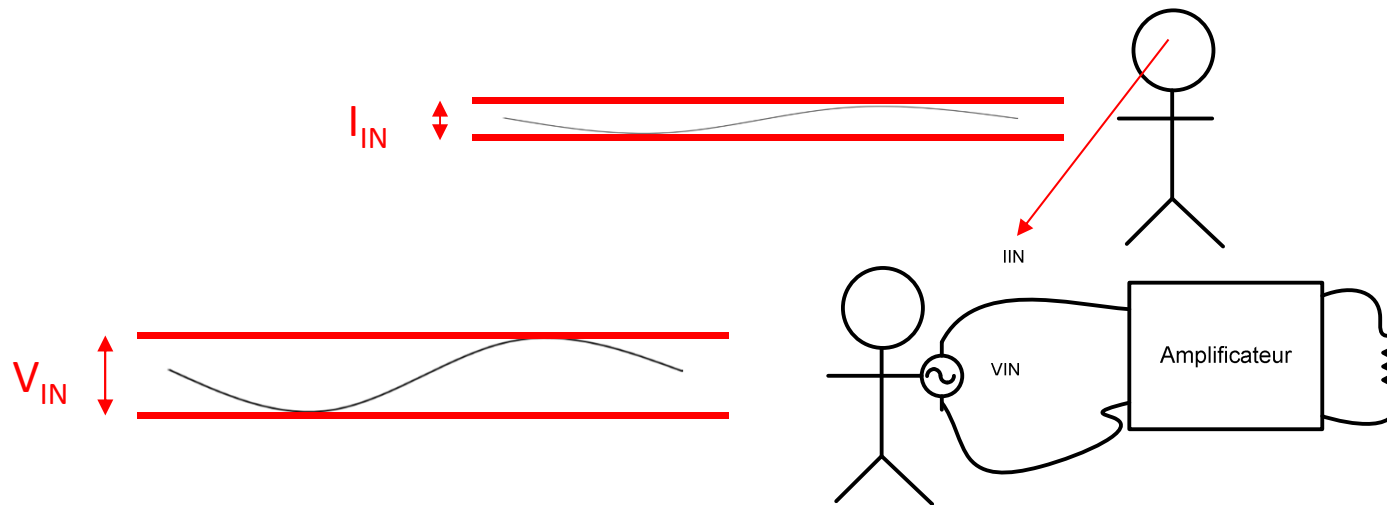


# Amplificateur: $R_{IN}$

- Donc, en laboratoire:

- On applique une tension  $V_{IN}$
- On examine le courant  $I_{IN}$  tiré

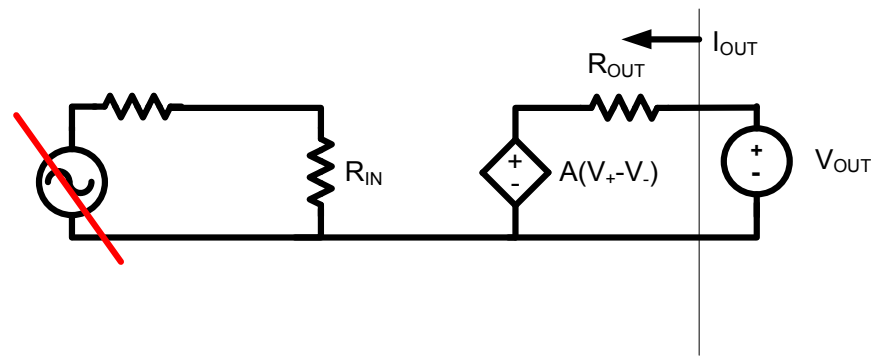
$$R_{IN} = \frac{V_{IN}}{I_{IN}}$$





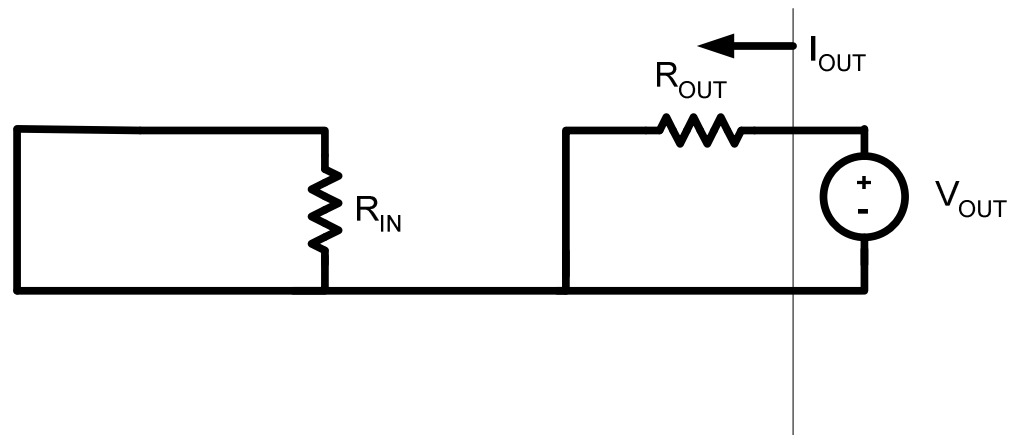
# Amplificateur: $R_{OUT}$

- Pour trouver le  $R_{OUT}$ , on pourrait faire la même chose en théorie
  - Appliquer une tension et examiner le courant tiré
- Mais! Le courant tiré dépend aussi de l'entrée
- Il faudrait mettre  $V_S=0$  pour éliminer l'effet de l'entrée



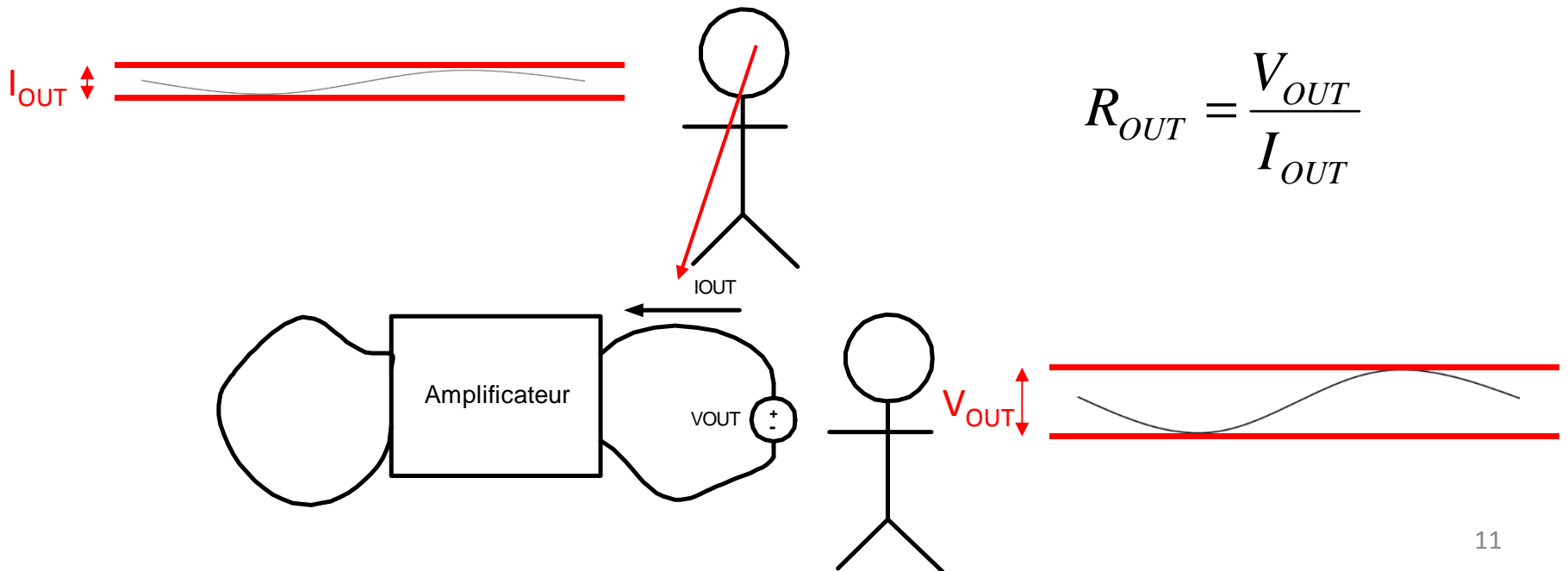
# Amplificateur: $R_{OUT}$

- Lorsqu'il y a une charge  $R_L$ , il faudrait aussi l'enlever
  - Il ne fait pas partie du circuit et changerait la valeur trouvée



# Amplificateur: $R_{OUT}$

- On applique une tension à la sortie  $V_{OUT}$
- On voit le courant  $I_{OUT}$  tiré
- Le ratio  $V_{OUT}/I_{OUT}$  est  $R_{OUT}$

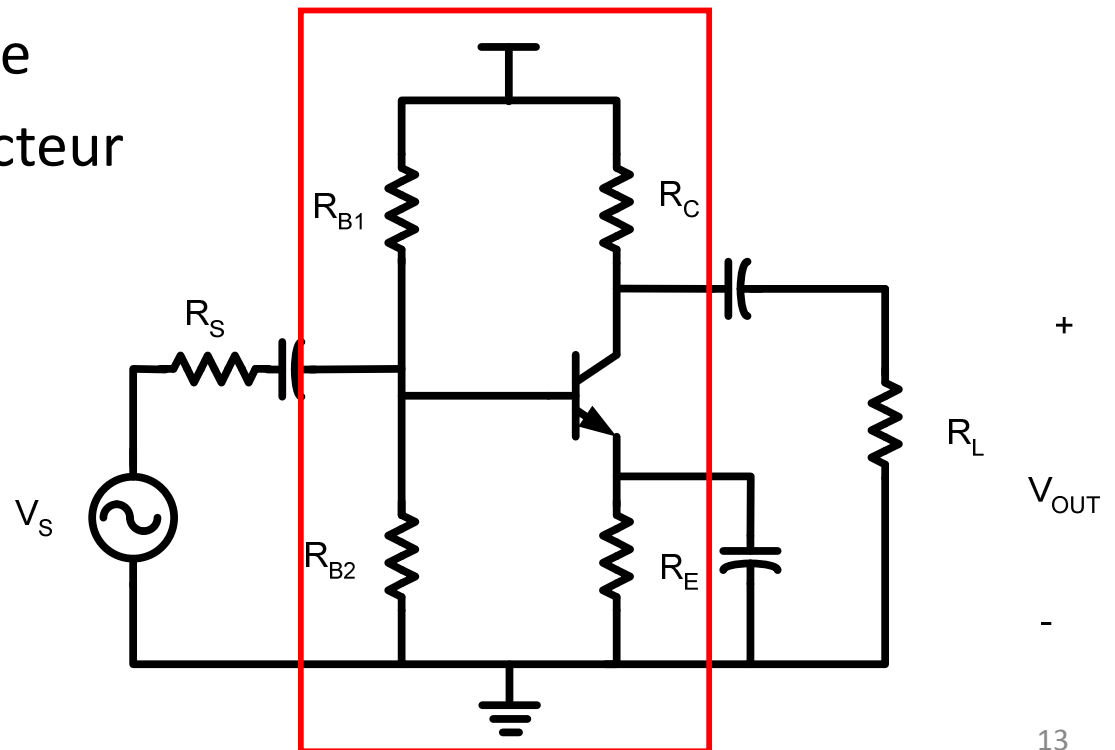


# Amplificateurs avec BJT

- Il y a 3 amplificateurs de base
  - Émetteur commun
  - Base Commune
  - Émetteur suiveur (collecteur commun)
- On va les présenter et calculer leurs caractéristiques:
  - Gain
  - Resistance a l'entrée
  - Resistance de sortie

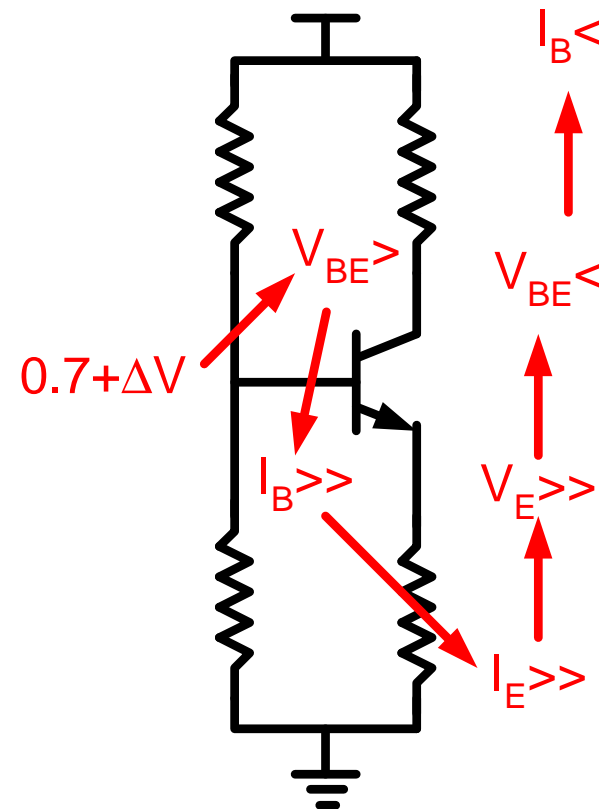
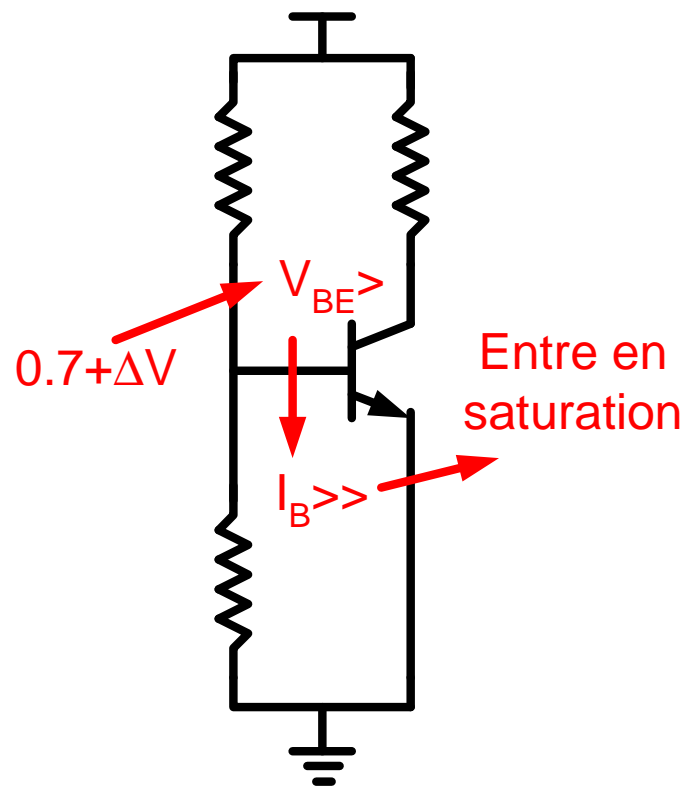
# Émetteur commun

- Émetteur commun
  - Commun veut dire “ground”
  - Émetteur commun: émetteur collé au ground (AC)
  - Entrée à la base
  - Sortie au collecteur



# Émetteur commun

- $R_E$  sert a stabiliser le  $V_{BE}$  et le courant



# Émetteur commun

- Si  $V_B$  augmente,  $I_B$  augmente

- $I_B$  augmente  $\Rightarrow I_E$  augmente

- $I_E$  augmente  $\Rightarrow V_E$  augmente

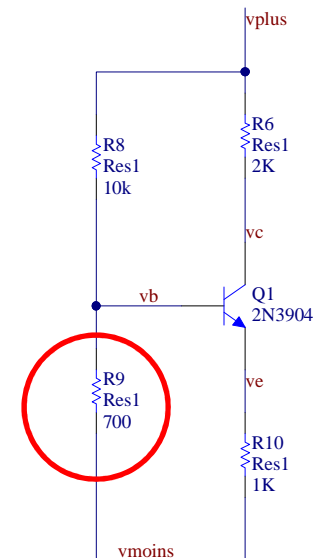
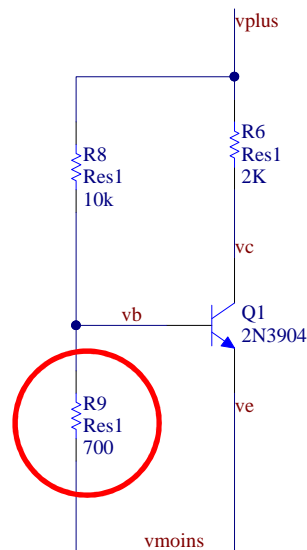
- $V_E$  augmente  $\Rightarrow V_{BE}$  stabilise

$V_B \uparrow$      $V_E \uparrow$      $V_{BE}$  stable  
 $V_B \downarrow$      $V_E \downarrow$      $V_{BE}$  stable

- Ça stabilise (immobilise)  $V_{BE}$  pour éviter de tomber en saturation
- Même si  $V_B$  veut augmenter,  $V_E$  augmente pour que  $V_{BE}$  reste pareil (0.7v)

# Émetteur commun

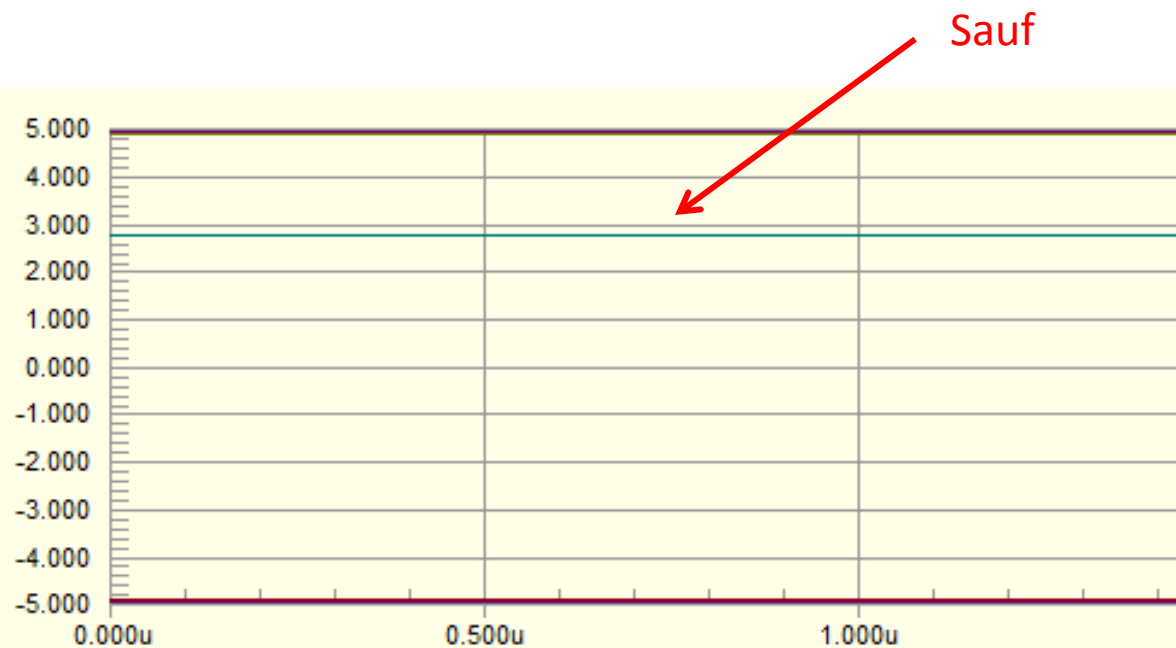
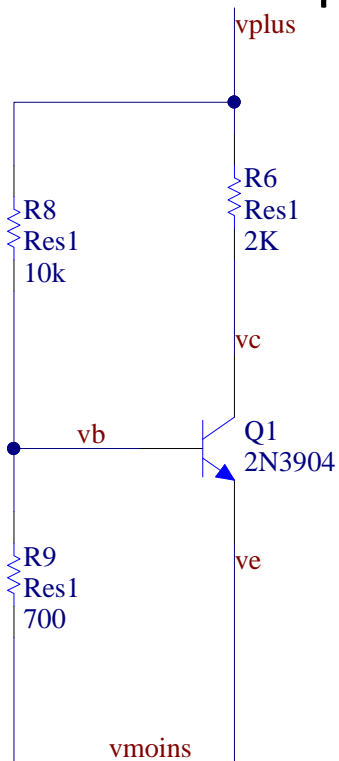
- Examinons la situation avec et sans  $R_E$ 
  - La stabilisation est requise pour minimiser l'impact des variations de  $\beta$
  - Simuler des variations de  $\beta$  est difficile alors on va imiter le comportement en variant  $R_9$ :





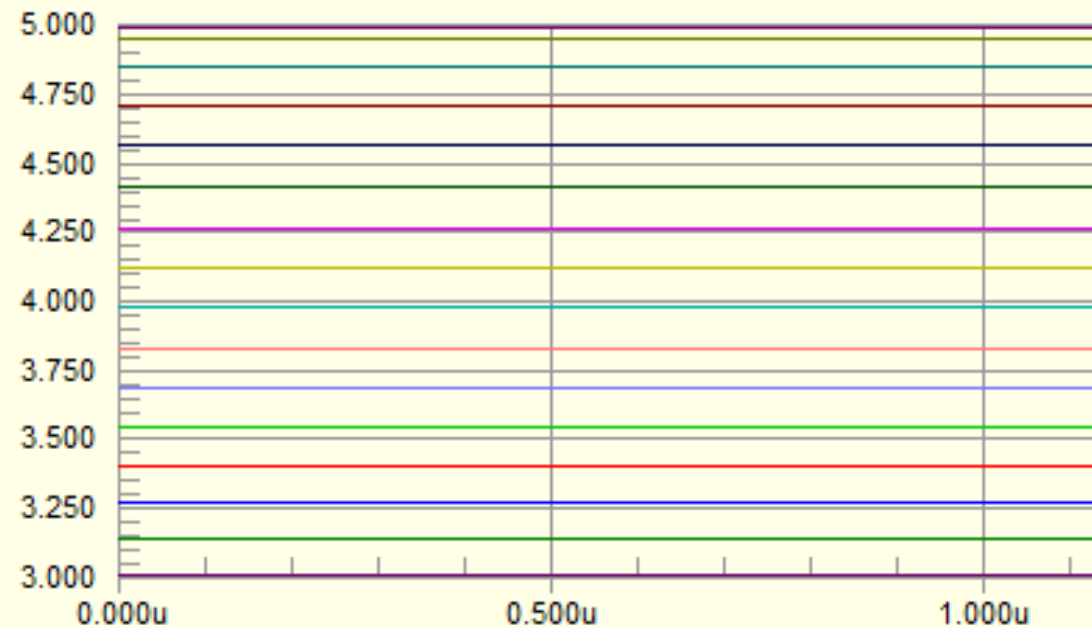
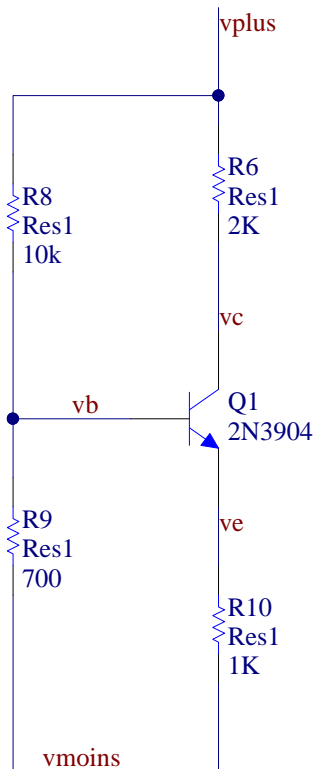
# Émetteur commun

- On varie R9 entre 500 et 2K...
  - Soit que le transistor ne conduit pas
  - Soit que le transistor est en saturation



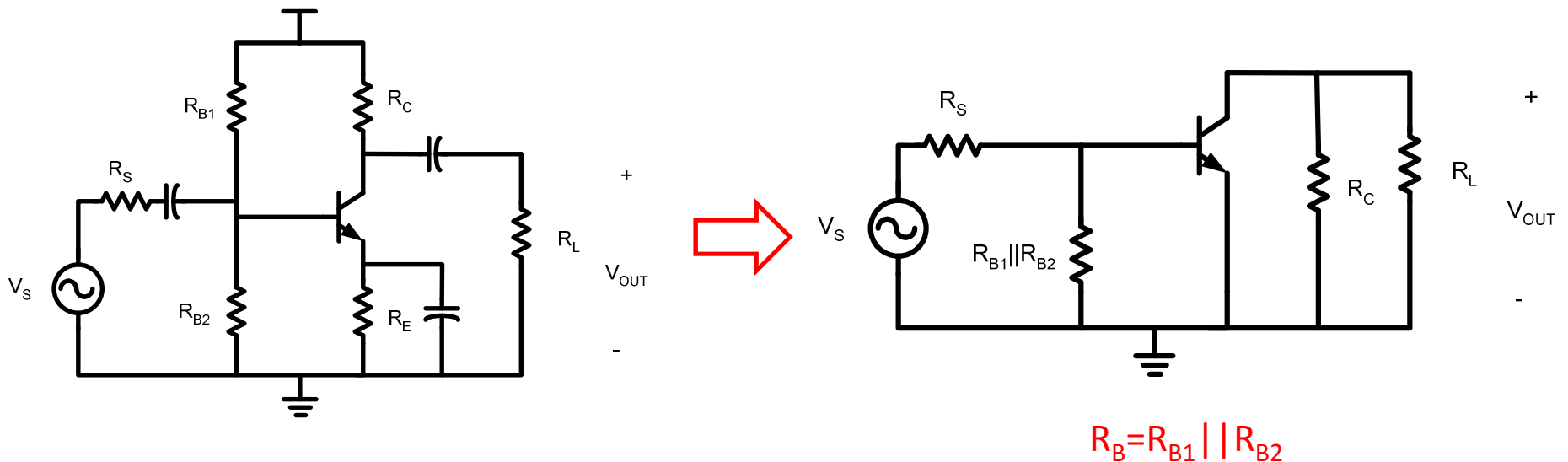
# Émetteur commun

- On varie R9 entre 500 et 2K...
- La plupart des valeurs sont encore en région active



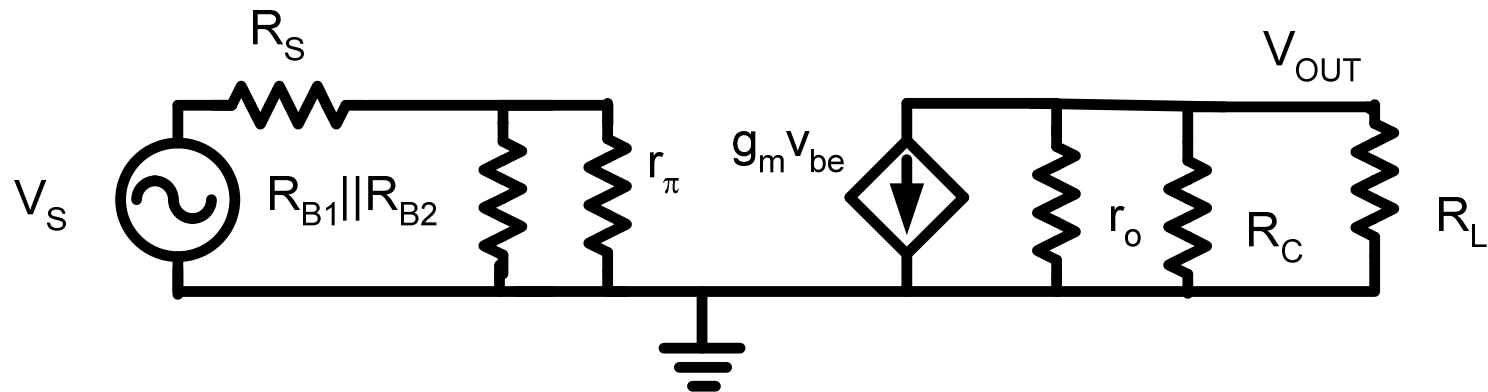
# Émetteur commun

- Commençons l'analyse
- On applique la superposition (avant de remplacer le transistor)
- C'est une étape intermédiaire...



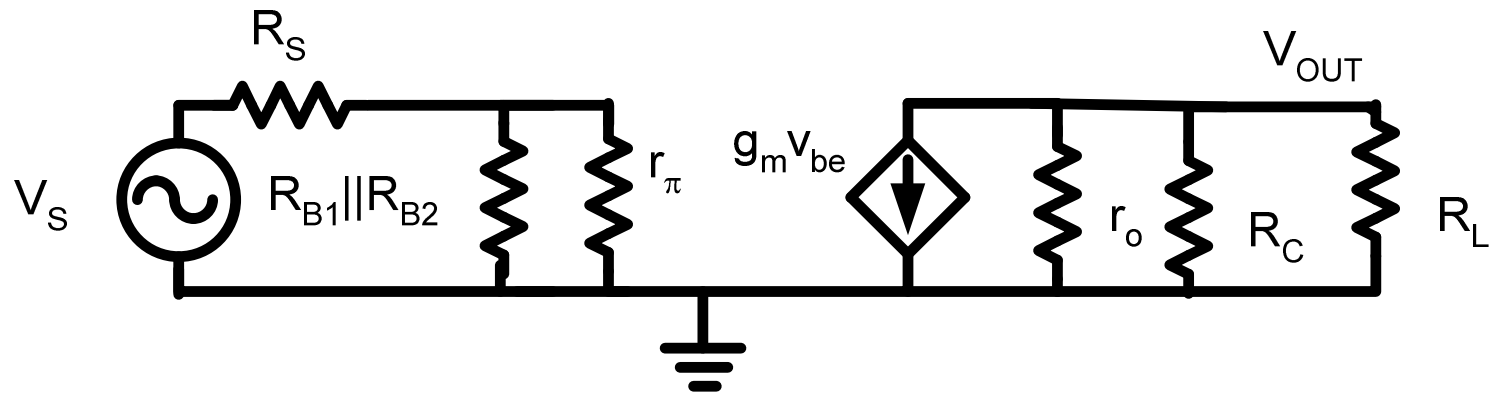
# Émetteur commun: gain

- Avec le modèle petit signal



$$v_{out} = -g_m v_{be} (R_L \parallel R_C \parallel r_o)$$

# Émetteur commun: gain



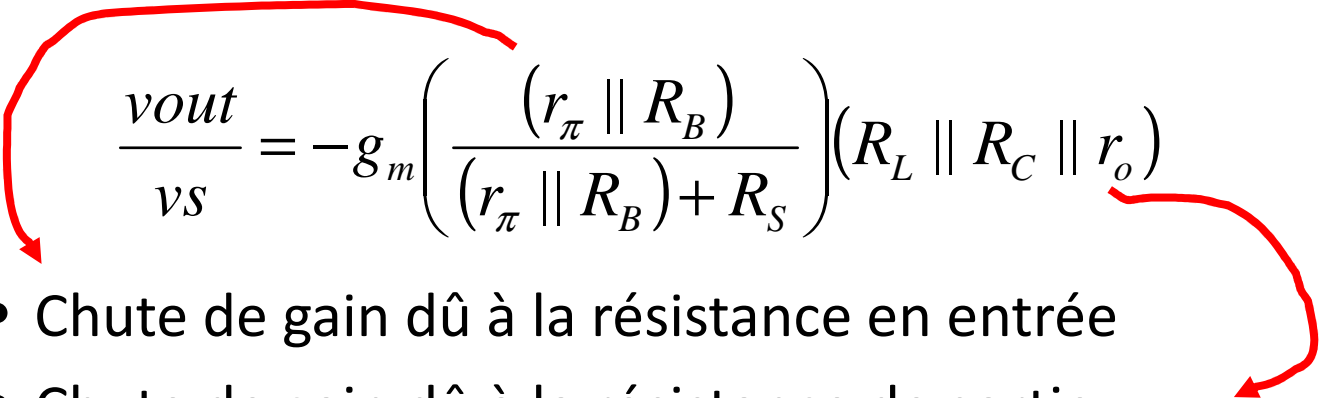
- $v_{be}$  se trouve avec un diviseur de tension

$$v_{be} = v_s \left( \frac{(r_\pi \parallel R_B)}{(r_\pi \parallel R_B) + R_S} \right)$$

$$v_{out} = -g_m v_{be} (R_L \parallel R_C \parallel r_o) = -g_m v_s \left( \frac{(r_\pi \parallel R_B)}{(r_\pi \parallel R_B) + R_S} \right) (R_L \parallel R_C \parallel r_o)$$

# Émetteur commun: gain

- On isole:

$$\frac{v_{out}}{v_S} = -g_m \left( \frac{(r_\pi \parallel R_B)}{(r_\pi \parallel R_B) + R_S} \right) (R_L \parallel R_C \parallel r_o)$$


- Chute de gain dû à la résistance en entrée
  - Chute de gain dû à la résistance de sortie
- Avec  $R_S=0$ :

$$\frac{v_{out}}{v_s} = -g_m (R_L \parallel R_C \parallel r_o)$$

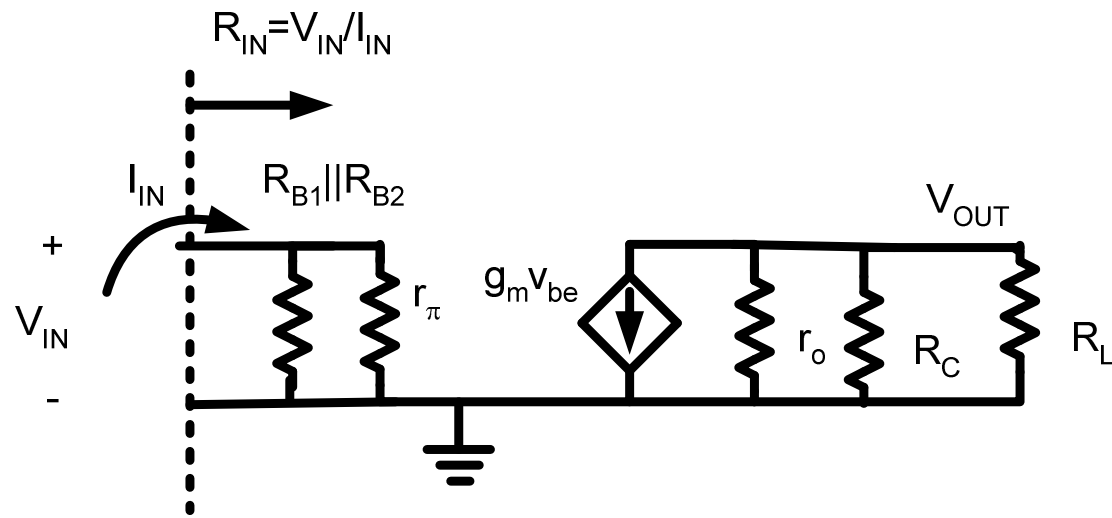
# Émetteur commun: gain

- Gain: dépend de  $R_L$ ,  $R_C$  et  $r_o$ 
  - Typiquement, la valeur est élevée
- Quand  $r_o$  est grand, sa contribution devient négligeable
- Dans ce cas, le gain devient:

$$\frac{v_{out}}{v_s} = -g_m (R_L \parallel R_C)$$

# Émetteur commun: $R_{IN}$

- On injecte  $V_{IN}$  sans résistance de source
  - On calcule le courant tiré



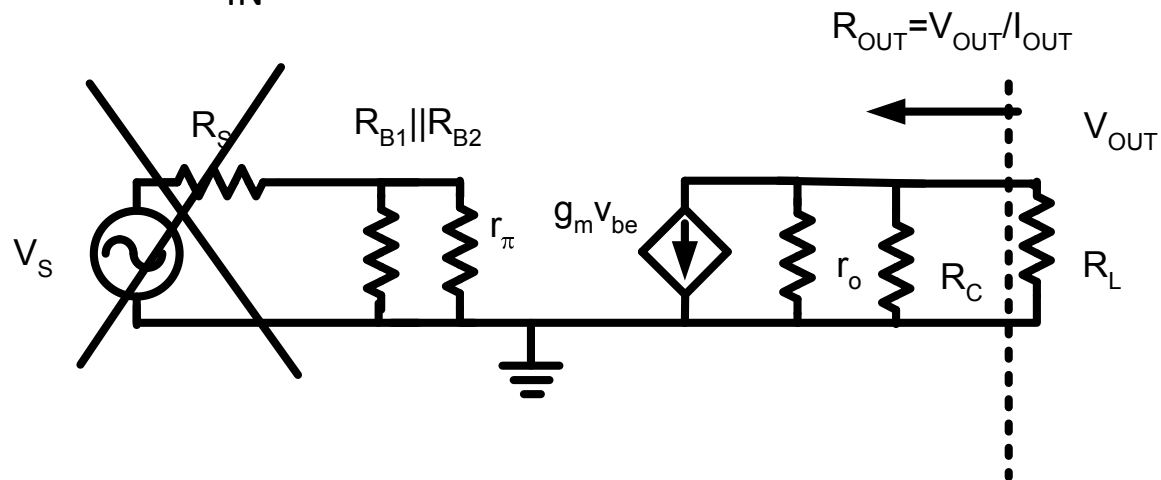
$$I_{IN} = \frac{V_{IN}}{R_B \parallel r_{\pi}}$$

$$R_{IN} = \frac{V_{IN}}{I_{IN}} = R_B \parallel r_{\pi}$$



# Emetteur commun: $R_{OUT}$

- On injecte  $V_{OUT}$  sans résistance de source
  - On ignore  $R_L$
  - On met  $V_{IN}$  à 0



$$I_{OUT} = \frac{V_{OUT}}{R_C \parallel r_o} + \cancel{g_m v_{be}}$$

$$R_{OUT} = \frac{V_{OUT}}{I_{OUT}} = R_C \parallel r_o$$

# Émetteur commun: résumé

- Gain sans  $R_S$  (élevé):

$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = -g_m (R_L \parallel R_C \parallel r_o)$$

- Résistance à l'entrée (élevée):

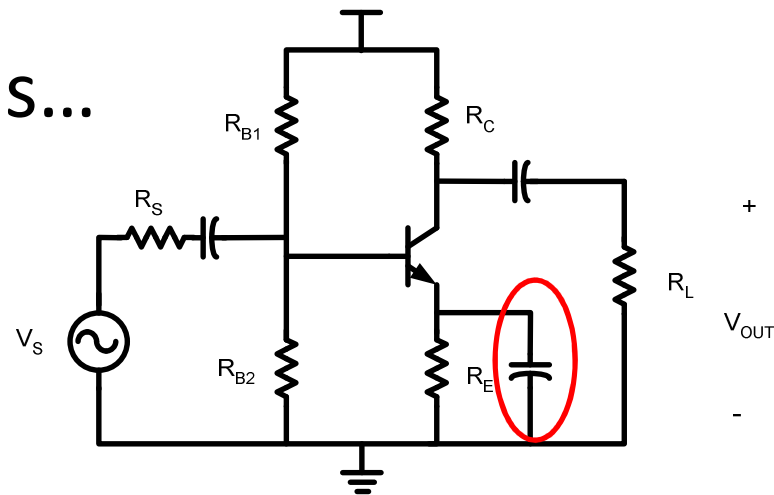
$$R_{IN} = R_B \parallel r_\pi$$

- Résistance à la sortie (élevée):

$$R_{OUT} = R_C \parallel r_o$$

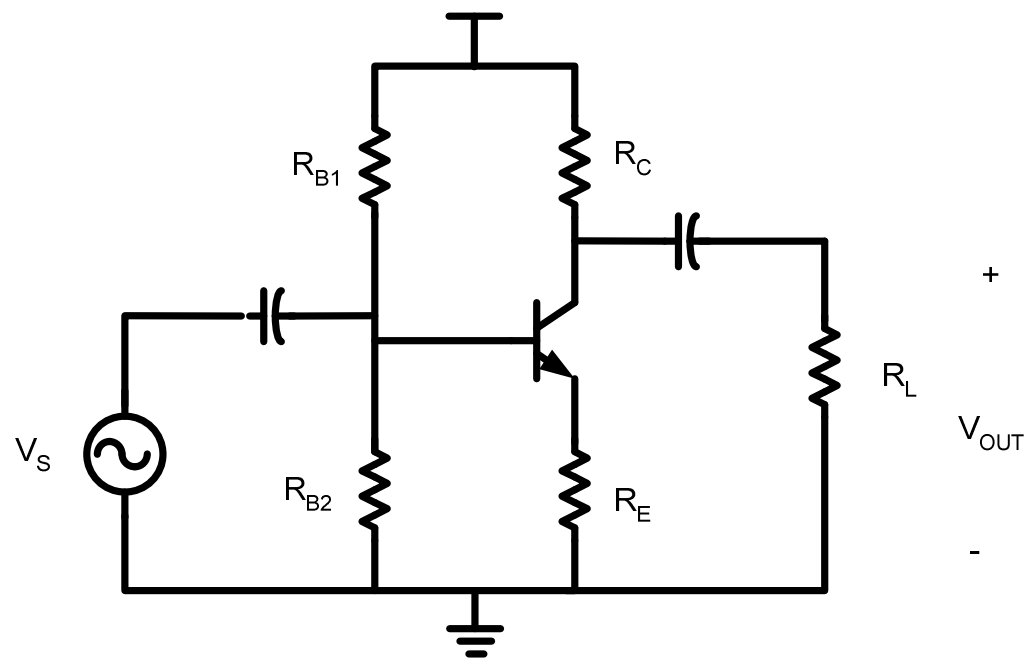
# Émetteur commun

- Condensateur utilisé pour contourner  $R_E$ 
  - Pourquoi?
- Rappel:  $R_E$  sert à limiter la variation de  $V_{BE}$
- En petit signal, pour avoir un très gros gain, on veut faire varier  $v_{be}$
- Voyons ça en details...



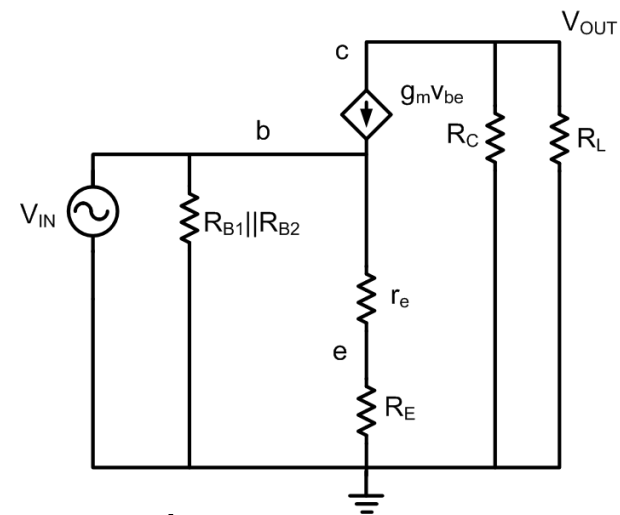
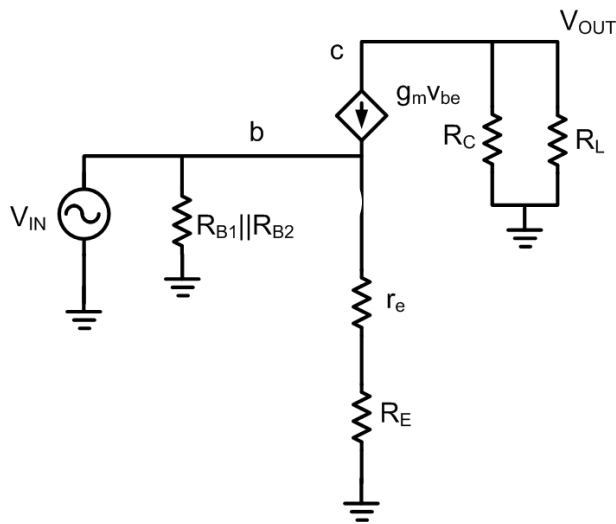
# Émetteur commun sans bypass

- On enlève le C qui contourne  $R_E$ :
- On a aussi enlevé  $R_S$  pour simplifier l'analyse



# Émetteur commun sans bypass

- On utilise le modèle T pour faciliter le travail
  - Quand il y a une résistance à l'émetteur, le modèle T est souvent plus simple
  - On néglige la  $R_S$  pour alléger l'équation



$$v_{out} = -g_m v_{be} (R_L \parallel R_C)$$

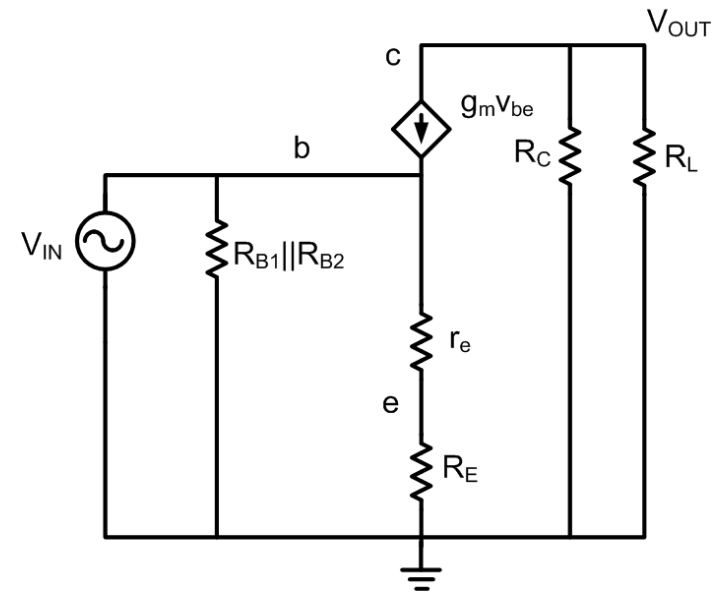
# Émetteur commun sans bypass

- Pour trouver  $v_{be}$ , il faut trouver  $v_b$  et  $v_e$
- $v_b$  est connecté à la source:

$$v_b = v_{in}$$

- $v_e$  est un diviseur de tension

$$v_e = v_{in} \frac{R_E}{r_e + R_E}$$



# Émetteur commun sans bypass

- On écrit l'équation de  $v_{be}$

$$v_{be} = v_b - v_e = v_{in} - v_{in} \frac{R_E}{r_e + R_E}$$

- Ça se manipule...

$$v_{be} = v_{in} \left( 1 - \frac{R_E}{r_e + R_E} \right) = v_{in} \left( \frac{r_e + R_E}{r_e + R_E} - \frac{R_E}{r_e + R_E} \right) = v_{in} \frac{r_e}{r_e + R_E}$$

# Émetteur commun sans bypass

- La sortie sera donc:

$$v_{out} = -g_m v_{be} (R_L \parallel R_C)$$

- On substitue  $v_{be}$ :

$$v_{out} = -g_m v_{in} \left( \frac{r_e}{r_e + R_E} \right) (R_L \parallel R_C)$$

Faisons quelques simplifications...



# Émetteur commun sans bypass

- On s'arrange pour que  $R_E \gg r_e$ :

$$v_{out} = -g_m v_{in} \left( \frac{r_e}{r_e + R_E} \right) (R_L \parallel R_C)$$

- On remplace  $r_e$  par  $(r_\pi/\beta+1)$ :

$$v_{out} = -g_m v_{in} \left( \frac{r_\pi}{\beta + 1} \right) \frac{1}{R_E} (R_L \parallel R_C)$$

- Et  $r_\pi$  c'est  $\beta/g_m$ :

$$v_{out} = -g_m v_{in} \frac{\beta}{g_m (\beta + 1)} \frac{1}{R_E} (R_L \parallel R_C)$$

# Émetteur commun sans bypass

- Les  $g_m$  s'annulent et on estime que  $\beta$  est grand:

$$v_{out} = -\cancel{g_m} v_{in} \frac{\cancel{\beta}}{\cancel{g_m} (\beta + 1)} \frac{1}{R_E} (R_L \parallel R_C)$$

- Ça donne finalement une équation utilisable:

$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = -\frac{(R_L \parallel R_C)}{R_E}$$

# Émetteur commun sans bypass

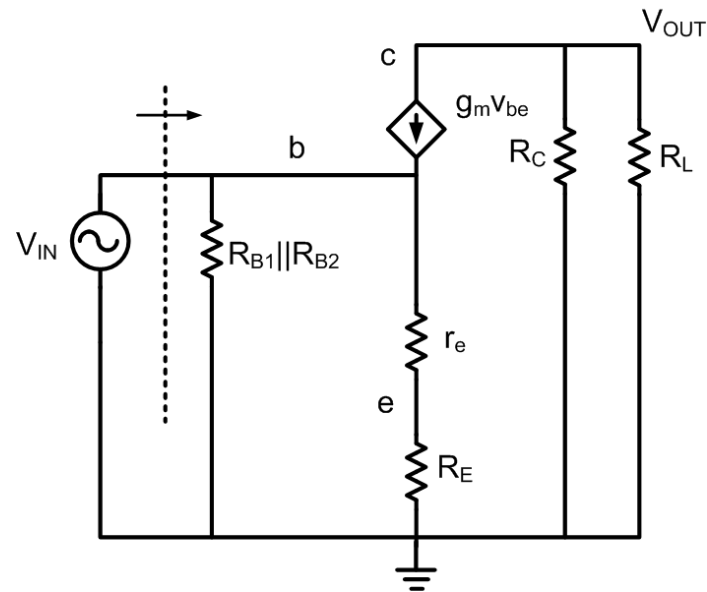
- Le gain est plus faible qu'avec le C:

$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = - \frac{(R_L \parallel R_C)}{R_E}$$

- Mais ça ne dépend pas du  $\beta$  du transistor, ni des courants:
  - Quand même une bonne caractéristique
- Pour avoir un plus très gros gain, il faut avoir C

# Émetteur commun sans bypass: $R_{IN}$

- Le courant en entrée est donné par:



$$I_{IN} = \frac{V_{IN}}{r_e + R_E} + \frac{V_{IN}}{R_B} - g_m v_{be}$$

Mais on ne connaît pas  $v_{be}$ ...

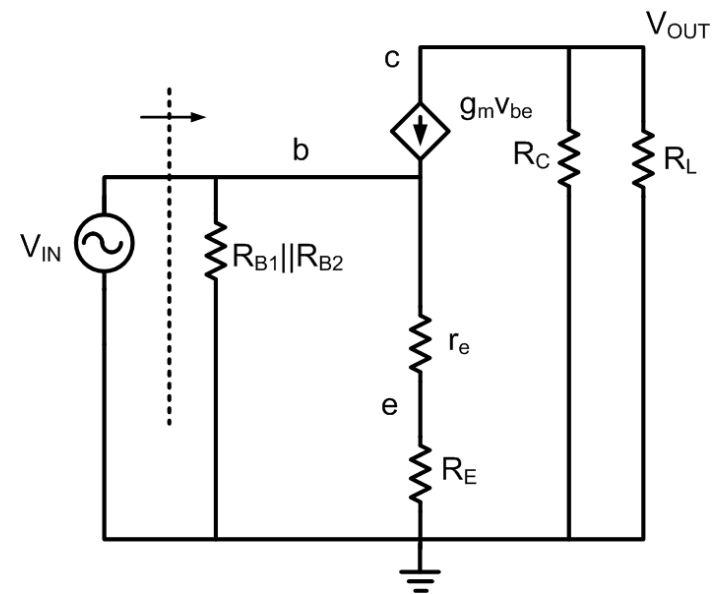
# Émetteur commun sans bypass: $R_{IN}$

- Par définition,  $v_{be}$  est:

$$v_{be} = v_b - v_e = V_{IN} - V_{IN} \frac{R_E}{R_E + r_e}$$

- On manipule et ça devient:

$$v_{be} = V_{IN} \frac{r_e}{R_E + r_e}$$



- On l'insère dans l'autre équation:

$$I_{IN} = \frac{V_{IN}}{r_e + R_E} + \frac{V_{IN}}{R_B} - g_m V_{IN} \frac{r_e}{r_e + R_E}$$

# Émetteur commun sans bypass: $R_{IN}$

- On factorise les  $V_{IN}$  :

$$I_{IN} = V_{IN} \left( \frac{1}{r_e + R_E} + \frac{1}{R_B} - \frac{g_m r_e}{r_e + R_E} \right)$$

- On isole  $R_{IN}$ :

$$R_{IN} = \frac{V_{IN}}{I_{IN}} = \frac{1}{\left( \frac{1 - g_m r_e}{r_e + R_E} + \frac{1}{R_B} \right)}$$

On essaie de faire mieux...

# Émetteur commun sans bypass: $R_{IN}$

- On développe le  $r_e$  en  $r_\pi$  et on simplifie:

$$R_{IN} = \frac{1}{\left( \frac{1 - g_m \frac{r_\pi}{\beta + 1}}{r_e + R_E} + \frac{1}{R_B} \right)} = \frac{1}{\left( \frac{\cancel{\beta}}{\cancel{1 - g_m} \frac{\cancel{g_m}}{\beta + 1}} + \frac{1}{R_B} \right)}$$

- Finalement, on retrouve ceci:

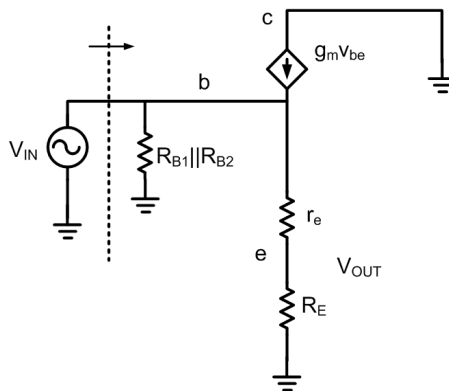
$$R_{IN} = \frac{1}{\left( \frac{1}{\frac{\beta + 1}{r_e + R_E}} + \frac{1}{R_B} \right)} = \frac{1}{\left( \frac{1}{(\beta + 1)(r_e + R_E)} + \frac{1}{R_B} \right)}$$

# Émetteur commun sans bypass: $R_{IN}$

- On obtient une expression qui nous parle:

$$R_{IN} = (\beta + 1)(r_e + R_E) \parallel R_B$$

- Combinaison parallèle de  $R_B$  et la résistance à l'émetteur fois  $\beta+1$ :
  - Semblable à  $r_e$  qui devient  $r_\pi$  qui  $\beta+1$  fois plus gros

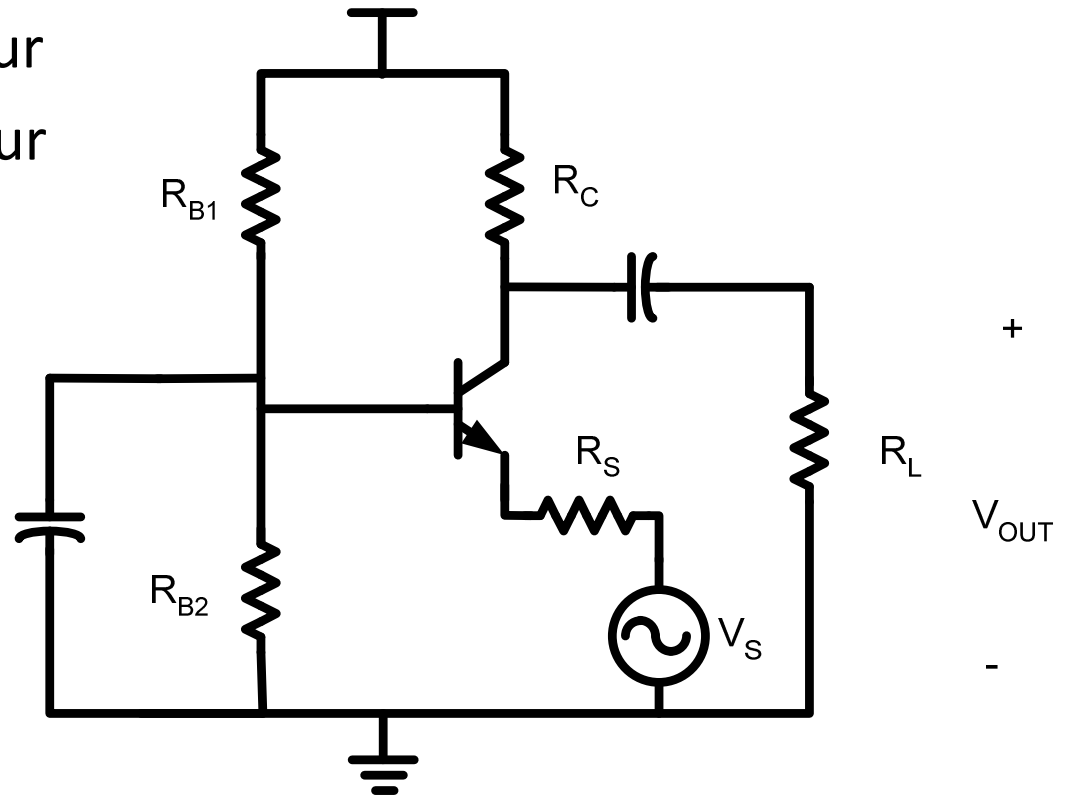


On peut déplacer une résistance de l'émetteur à la base en multipliant par  $\beta+1$ <sup>40</sup>



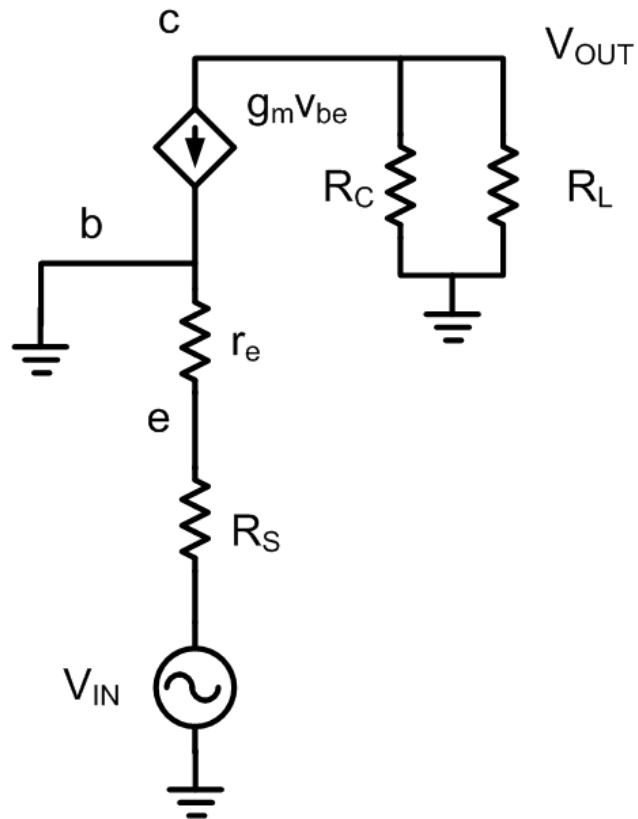
# Base Commune

- Base commune
  - Base connectée au ground (AC)
  - Entrée a l'émetteur
  - Sortie au collecteur



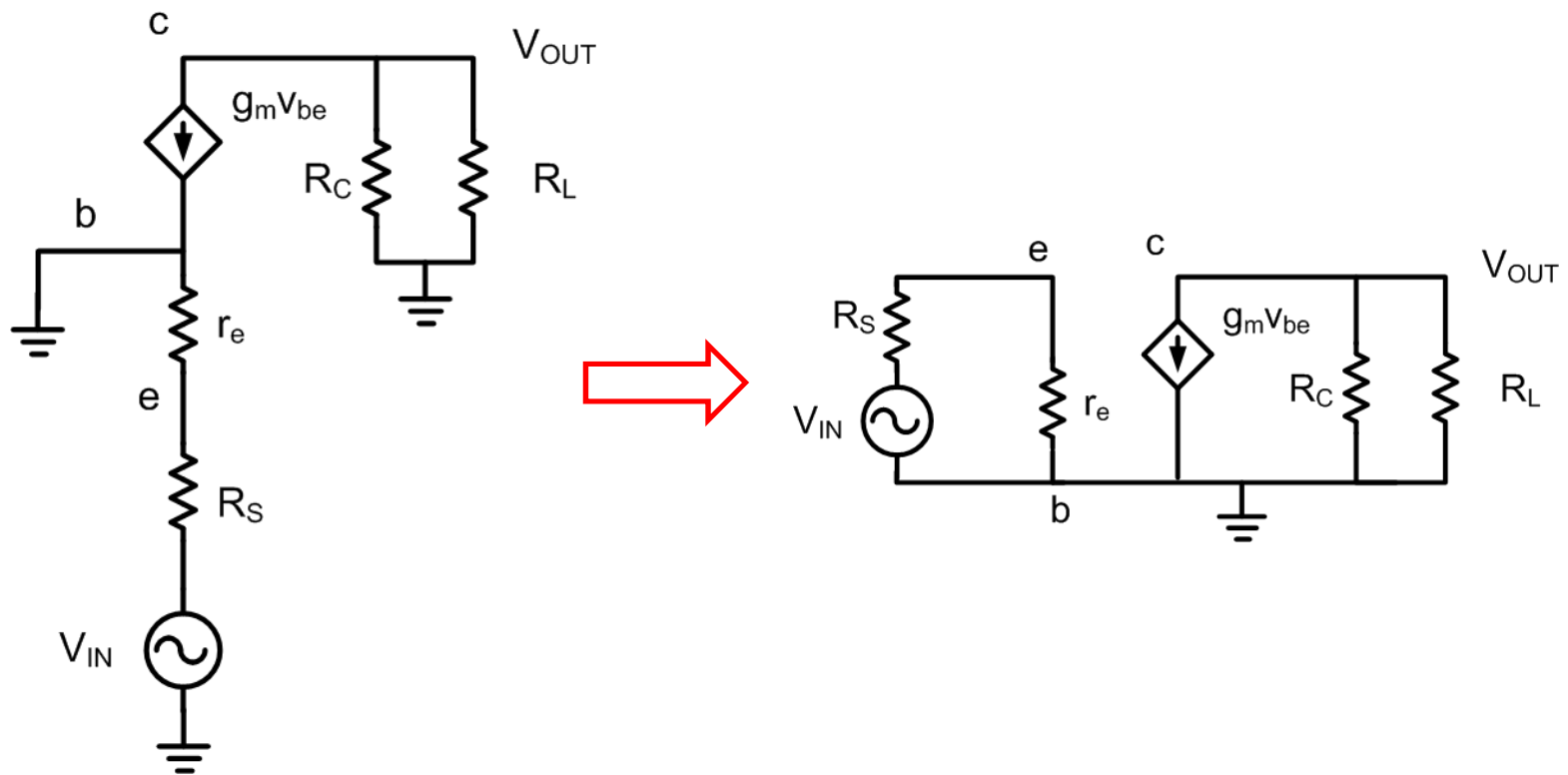
# Base Commune

- On transforme pour l'analyse AC:



# Base Commune

- On le réarrange:



# Base Commune

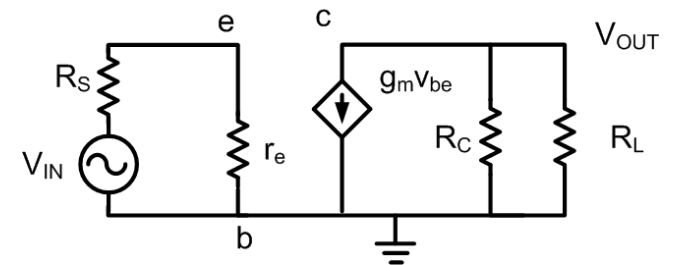
- La sortie est égale à:

$$v_{out} = -g_m v_{be} (R_L \parallel R_C)$$

- Pour  $v_{be}$ , on trouve  $v_b$  et  $v_e$ :

- $v_b = 0$
- $v_e$  est un diviseur de tension:

$$v_e = v_{in} \frac{r_e}{r_e + R_S}$$



# Base Commune

- Donc,  $v_{be}$  est égal à:

$$v_{be} = -v_{in} \frac{r_e}{r_e + R_S}$$

- Et la sortie devient:

$$v_{out} = -g_m \left( -v_{in} \frac{r_e}{r_e + R_S} \right) (R_L \parallel R_C)$$

- Et le gain est:

$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{r_e}{r_e + R_S} g_m (R_L \parallel R_C)$$

# Base Commune: gain

- Gain intrinsèque (sans  $R_S$  ni  $R_L$ ) élevé
  - Même gain que EC en négligeant  $R_S$  et  $R_L$

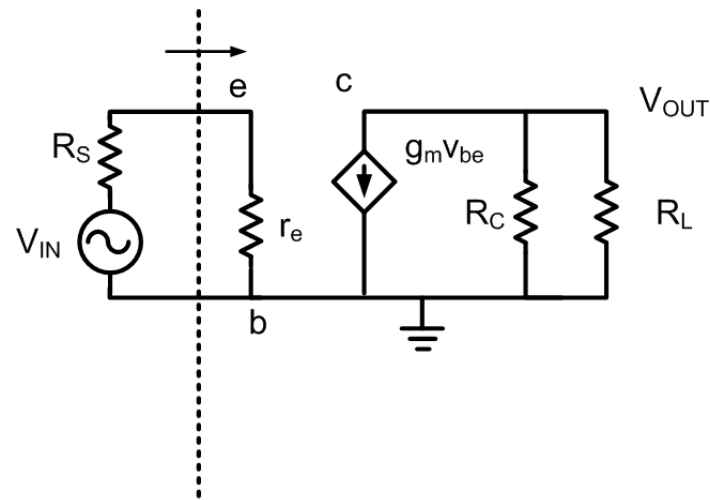
$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = g_m R_C$$

- Gain positif plutôt que négatif

$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{r_e}{r_e + R_S} g_m (R_L \parallel R_C)$$

# Base Commune: $R_{IN}$

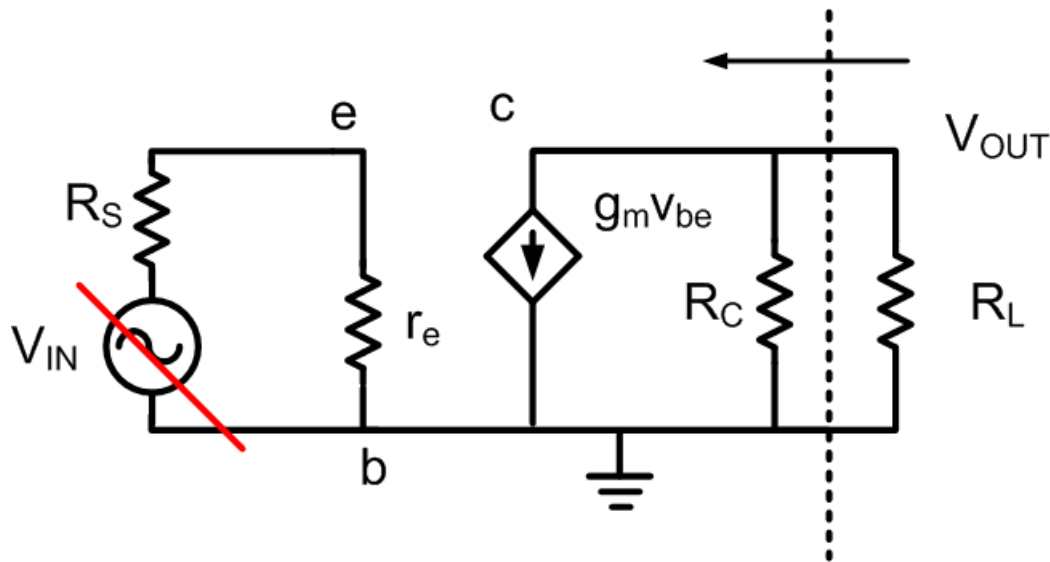
- On écrit l'équation du noeud à l'entrée:



$$R_{IN} = r_e = \frac{r_\pi}{\beta + 1}$$

# Base Commune: $R_{OUT}$

- On écrit l'équation au noeud de sortie:



$$I_{OUT} = \frac{V_{OUT}}{R_C} + g_m v_{be}$$

$$R_{OUT} = \frac{V_{OUT}}{I_{OUT}} = R_C$$



# Base commune: résumé

- Gain sans  $R_S$  (élevé):

$$\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = g_m (R_C \parallel R_L)$$

- Résistance à l'entrée (faible):

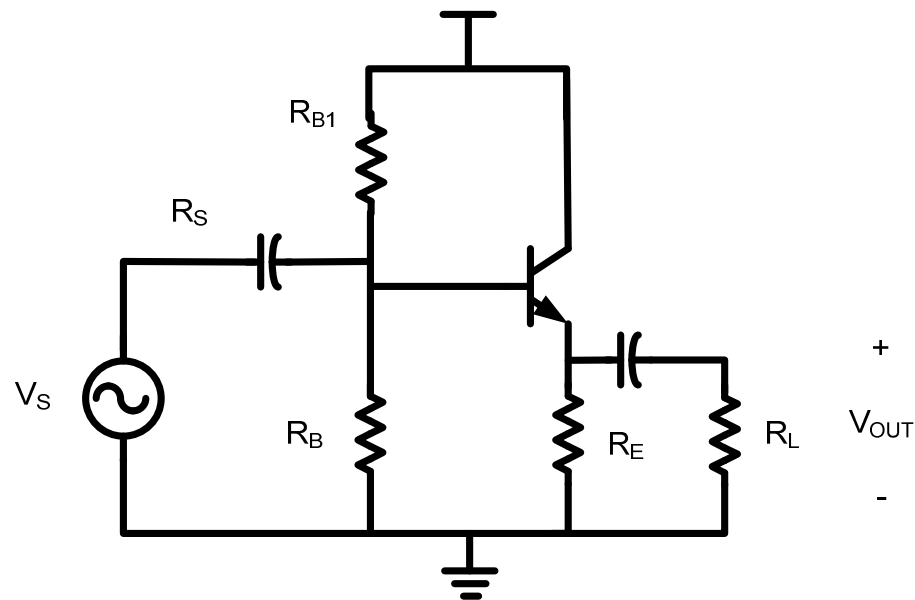
$$R_{IN} = r_e$$

- Résistance à la sortie (élevée):

$$R_{OUT} = R_C$$

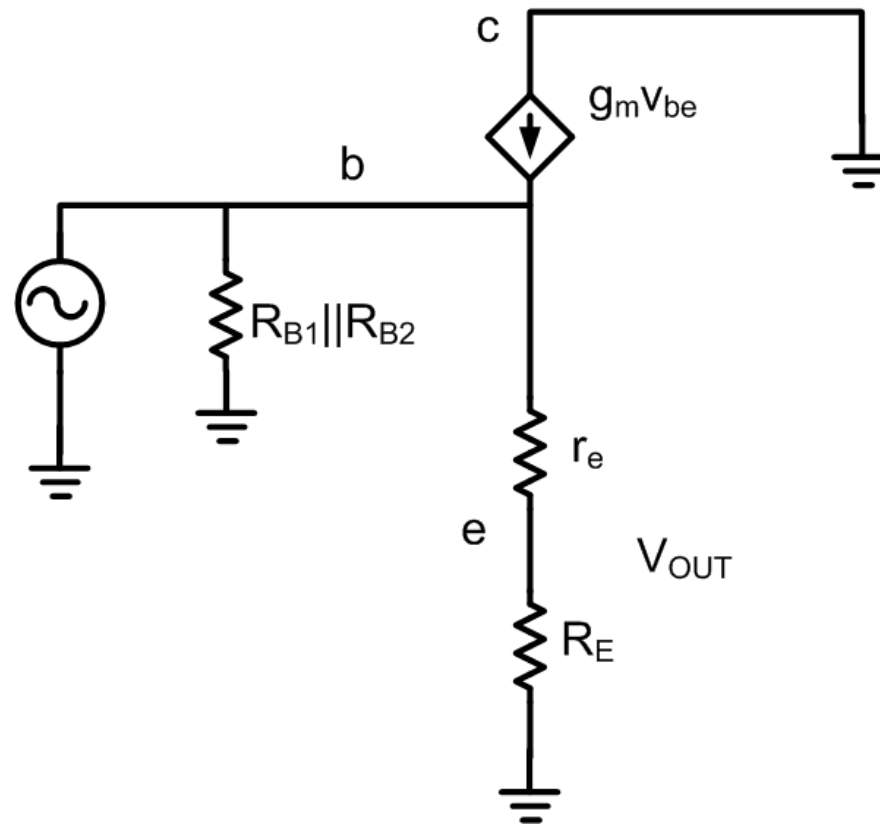
# Émetteur suiveur

- Émetteur suiveur (Collecteur commun)
  - Signification: collecteur connecté au ground (AC)
  - Entrée à la base
  - Sortie au collecteur



# Émetteur suiveur

- Prêt pour l'analyse AC:



# Émetteur suiveur: gain

- L'équation au noeud de sortie est:

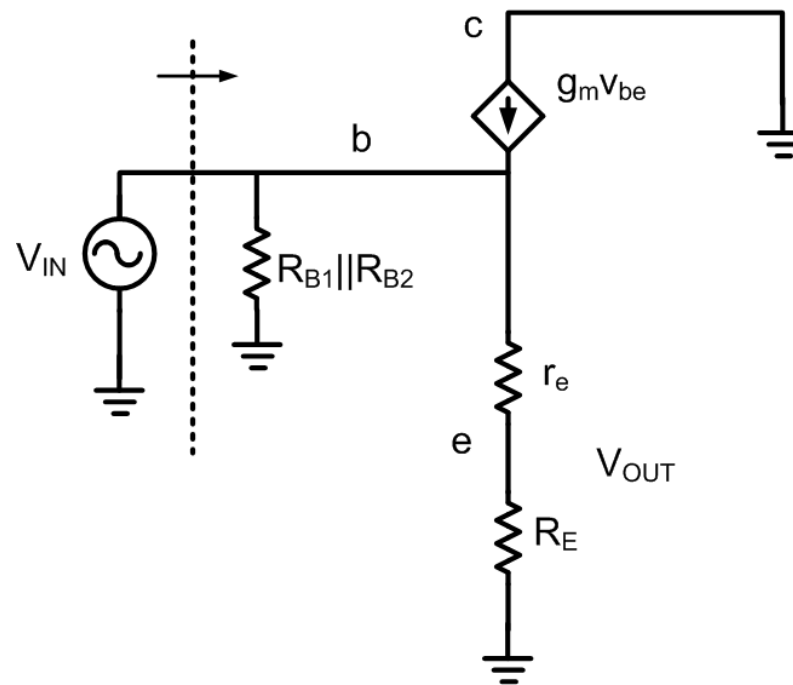
$$v_{out} = v_{in} \frac{R_E}{r_e + R_E}$$

- Si  $r_e$  est petit par rapport à  $R_E$ :

$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{R_E}{R_E} \cong 1$$

# Émetteur suiveur: $R_{IN}$

- On écrit l'équation au noeud d'entrée

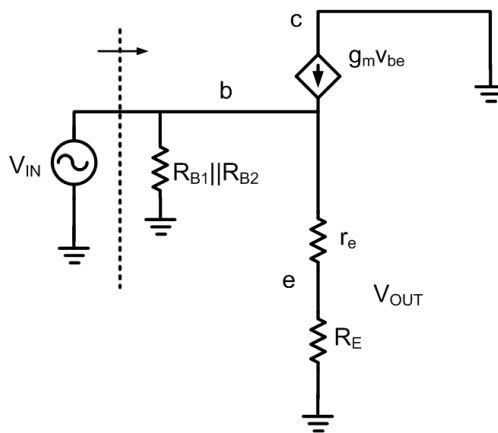


Situation semblable à émetteur commun sans bypass

# Émetteur suiveur: $R_{IN}$

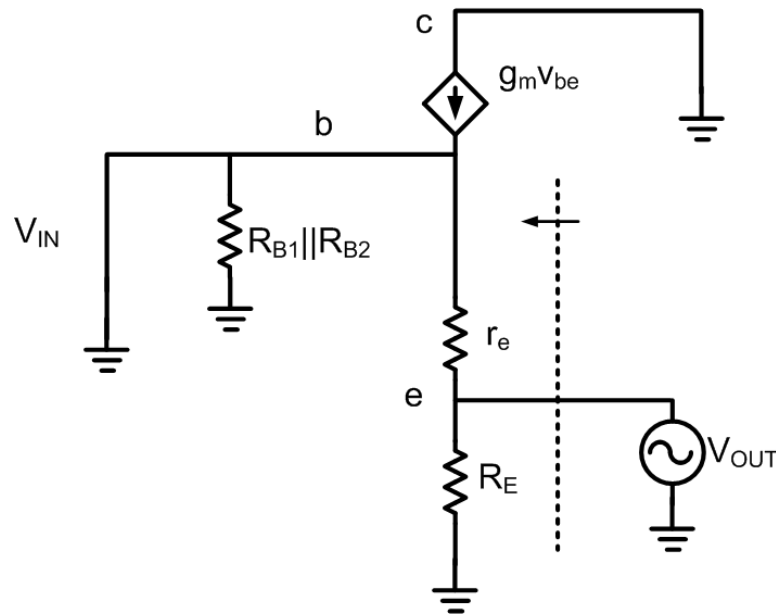
- On peut donc déplacer la résistance  $r_e + R_E$  vers la base
  - Le résultat est une résistance de  $(\beta + 1)(r_e + R_E)$
  - Donc:

$$R_{IN} = (\beta + 1)(r_e + R_E) \parallel R_B$$



# Émetteur suiveur: $R_{OUT}$

- On écrit l'équation au noeud de sortie:



$$I_{OUT} = \frac{V_{OUT}}{(R_E \parallel r_e)}$$

# Émetteur suiveur: $R_{OUT}$

- On isole  $V_{OUT}/I_{OUT}$

$$R_{OUT} = \frac{V_{OUT}}{I_{OUT}} = (R_E \parallel r_e)$$

- Puisque  $r_e$  est typiquement très petit ça se simplifie...

$$R_{OUT} = r_e$$



# Résumé des connexions

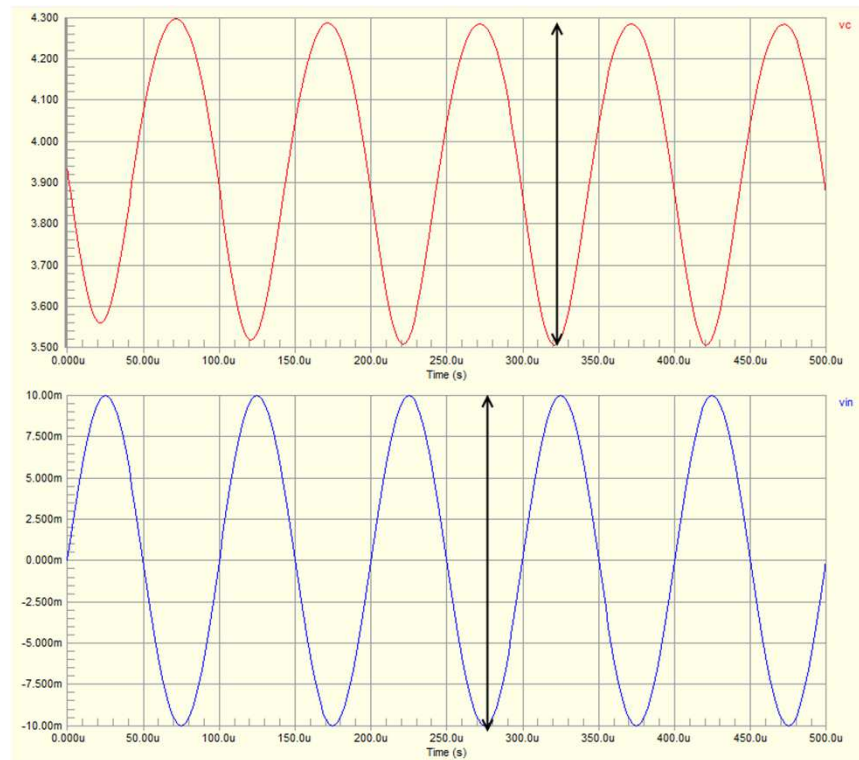
Configuration	Ground	Entrée	Sortie
Emetteur commun	Emetteur	Base	Collecteur
Base commune	Base	Emetteur	Collecteur
Collecteur commun	Collecteur	Base	Emetteur

# Résumé des caractéristiques

Configuration	Gain	$R_{IN}$	$R_{OUT}$
Émetteur Commun	Élevé	Élevé	Élevé
Base Commune	Élevé	Faible	Élevé
Collecteur Commun	Faible	Élevé	Faible

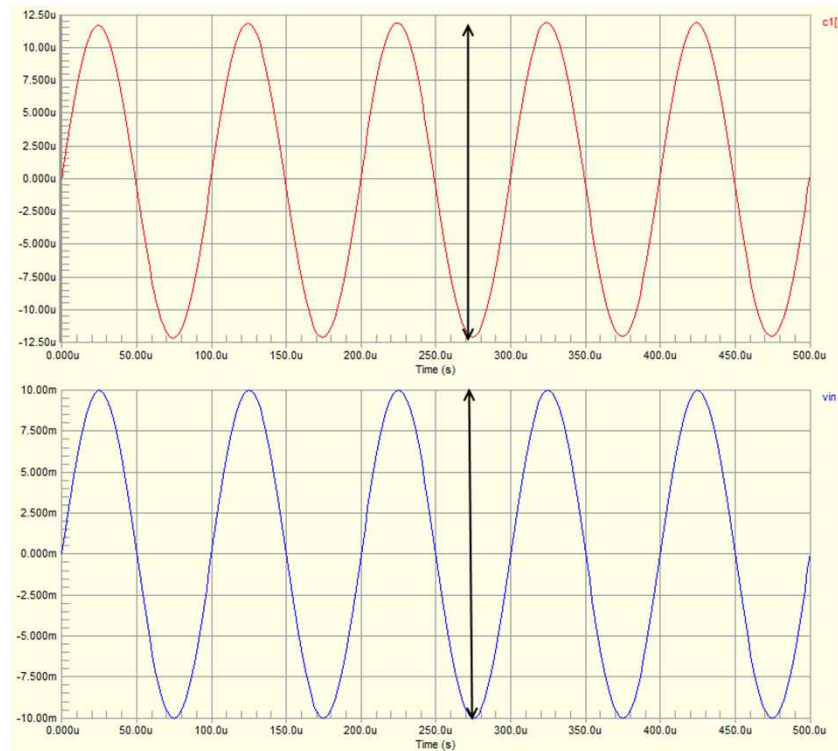
# En simulation

- Pour le gain, on compare  $v_c$  avec  $v_{in}$ :
  - Dans ce cas, c'est à peu près  $800\text{mV}/20\text{mV} = 40$



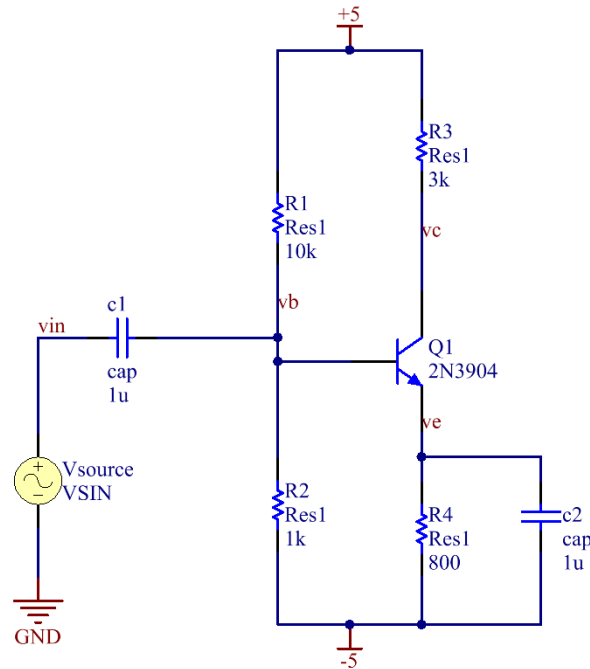
# En simulation

- Pour  $R_{IN}$ , on regarde  $V_{IN}$  et le courant tiré:
  - Ici, on a regardé le courant du condensateur
  - $20\text{mV}/11.9\mu\text{A} = 843\Omega$



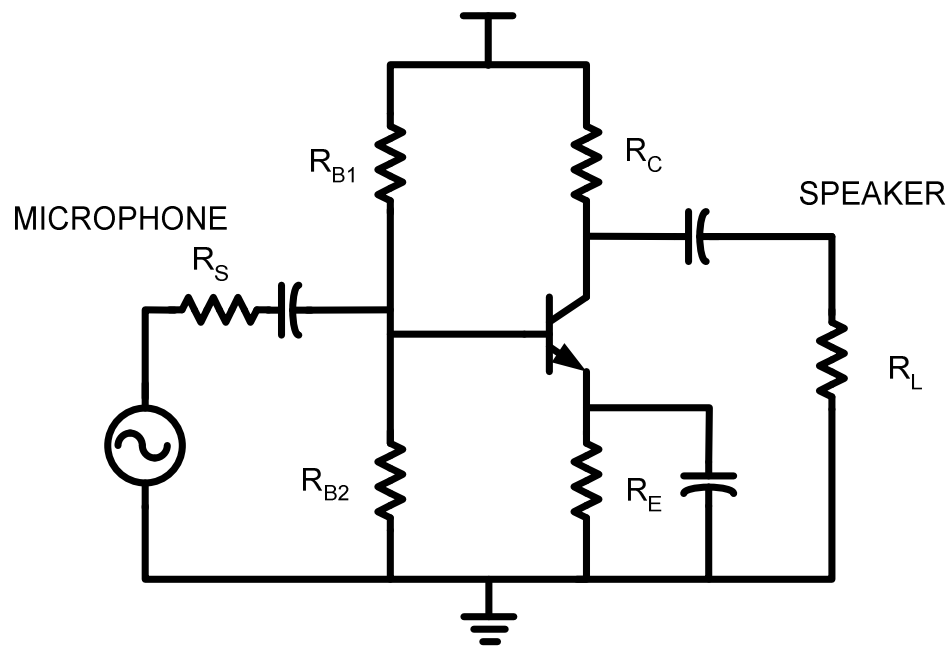
# En simulation

- On va vouloir trouver:
  - Le gain
  - La résistance en entrée
  - La résistance à la sortie



# Applications

- On veut amplifier la voix de quelqu'un
- On connecte un micro à un émetteur commun
- On connecte à un speaker "typique" ( $8\Omega$ )



# Applications

- Avant de le connecter au speaker, le gain de l'émetteur commun est  $-g_m(R_C || r_o)$
- En connectant au speaker, le gain devient  $-g_m(R_C || r_o || R_L)$
- Ex, avec  $g_m = 0.01$   $R_C = 10000$   $r_o$  infini
  - Sans connecter au speaker, le gain est -100
  - En connectant au speaker, on tombe à -0.08
- Le gain tombe lorsque la charge est faible...

Pourquoi?

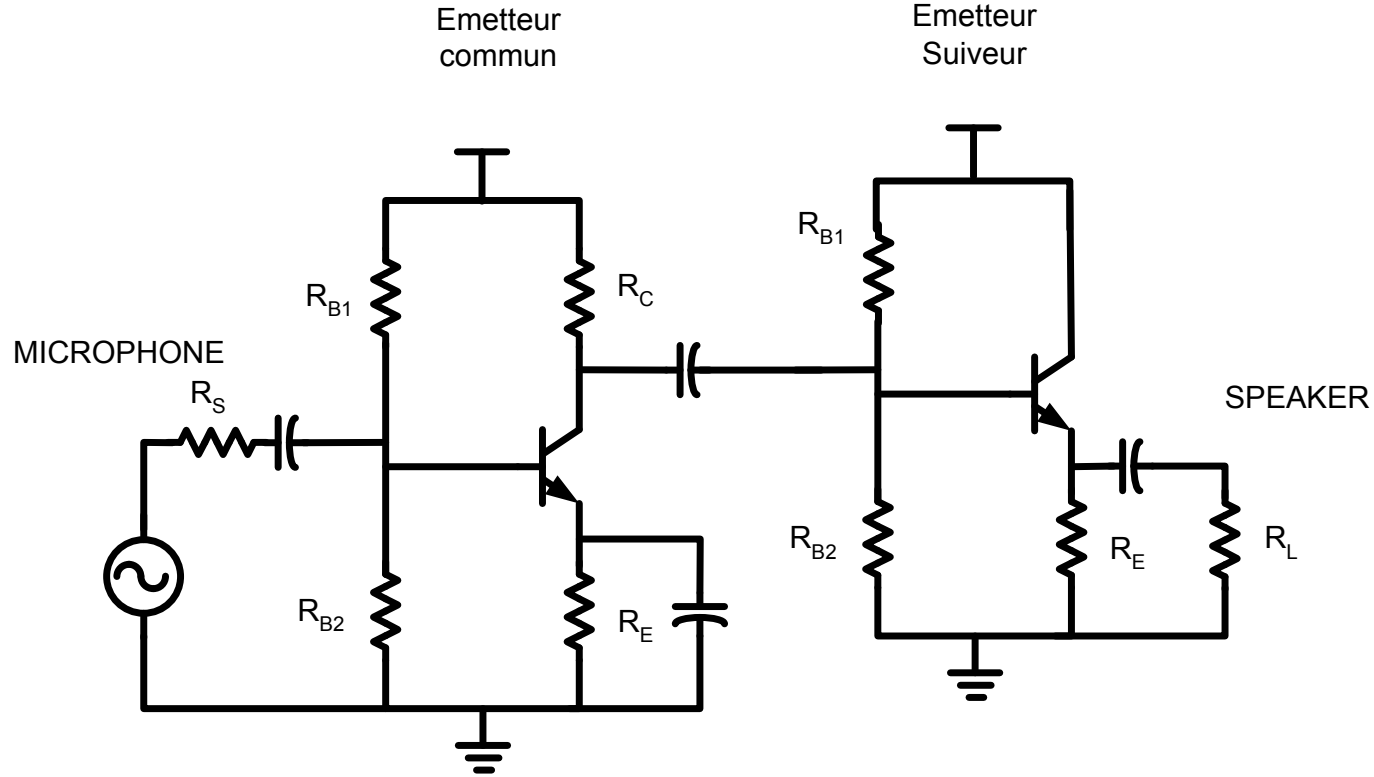
# Applications

- Le gain est faible parce que  $R_{OUT}$  est élevé par rapport à  $R_L$ :
  - $R_{OUT}$  et  $R_L$  forment un diviseur de tension
- Solution: il faudrait utiliser un amplificateur avec  $R_{OUT}$  faible:
  - Émetteur suiveur!
- On ne peut pas s'en servir seul: gain = 1
  - Mais on peut le mettre entre l'amplificateur et la charge



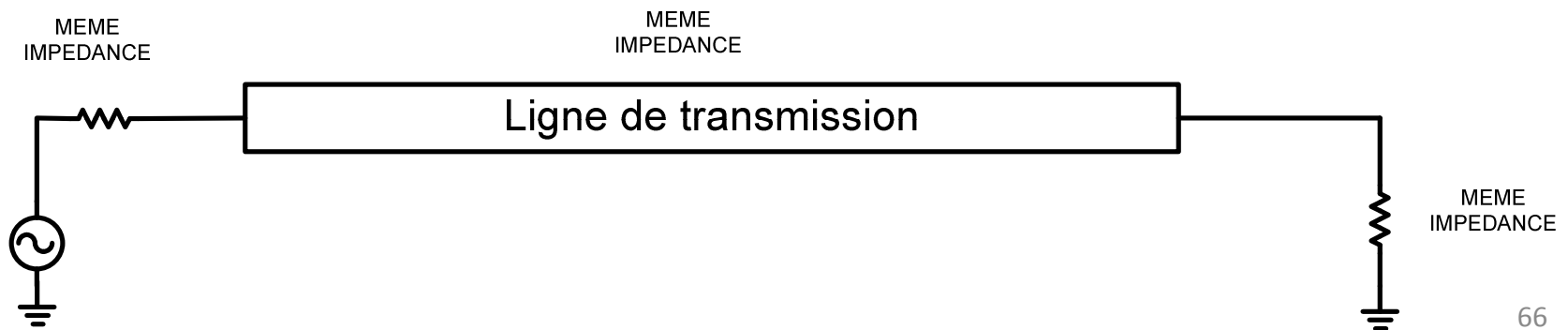
# Applications

- Implantation possible:



# Applications

- Ligne et ondes: Quand il y a différence d'impédance, il y aura réflexion du signal
- Devient apparent quand les lignes sont longues et les fréquences sont élevées
- Pour éviter la réflexion, il faut apparier les impédances



# Applications

- On parle souvent de  $50\Omega$  et  $75\Omega$
- Alors, source, ligne et destination doivent TOUS être  $50\Omega$  ou TOUS être  $75\Omega$
- Si la “destination” est l’amplificateur, il doit avoir impédance d’entrée faible
- On peut donc utiliser la base commune