

Méthode de conception en électronique

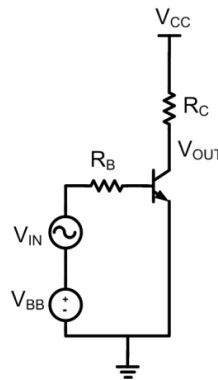
Cours 4

Dernier cours

- Retour sur les BJT
 - Fonctionnement
 - Analyse DC: région active ou saturation
- Introduction à l'analyse AC:
 - Observations
 - Dérivation mathématique
- Aujourd'hui, on parle de stratégie pour l'analyse complète...

Analyse: difficultés

- $V_{BE}=0.7$, mais on veut analyser son comportement lorsque v_{be} varie.
 - Est-ce que $V_{BE}=0.7$ ou est-ce que ça peut changer?
- On veut V_C pour région active, mais v_{be} peut faire changer v_C ...
 - Let transistor sera-t-il encore en active?

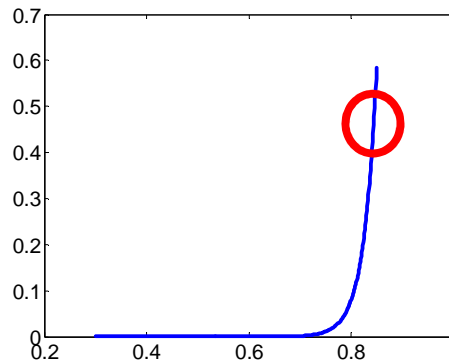


Analyse: stratégie

- La stratégie est de décomposer en 2:
 - Une analyse DC, avec $V_{BE}=0.7$, pour savoir si le transistor est en région active
 - Une analyse AC, avec v_{be} qui change, qui fait semblant qu'on restera toujours en région active
- Pour faciliter la gestion, on applique la loi de la superposition:
 - En analyse DC, on met les sources AC à 0
 - En analyse AC, on met les sources DC à 0

Analyse AC: Stratégie

- Donc, l'analyse DC nous place où le cercle rouge se trouve
- L'analyse AC varie la tension un peu pour voir ce que donne le courant
 - L'analyse AC **suppose** que v_{be} et v_c font que l'approximation linéaire reste valide



Analyse AC: Stratégie

- Analyse AC:

- En faisant varier V_{BE} un peu (v_{be}) autour de 0.7v, le BJT se comporte moins exponentiel et plus linéaire
- Le courant I_C change (i_c) de façon linéaire

$$\underline{i_c} = g_m \underline{v_{be}}$$

- La relation entre v_{be} et i_b est aussi linéaire puisque $i_c = \beta i_b$

- v_{be} cause changement linéaire de courant i_b : c'est comme une résistance entre b et e!

$$i_c = g_m v_{be} = \beta i_b \quad \Rightarrow \quad \frac{v_{be}}{i_b} = \frac{\beta}{g_m} = r_\pi$$

Analyse AC: Stratégie

- Il y a donc COMME une résistance entre base et émetteur:



A vertical resistor symbol with terminal 'B' at the top and terminal 'E' at the bottom. The label r_π is placed to the left of the resistor.

$$r_\pi = \frac{\beta}{g_m}$$

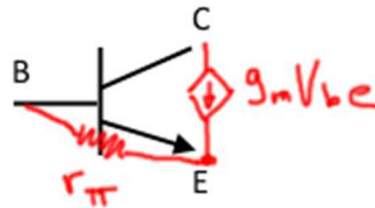
- Et le courant i_c est proportionnel à v_{be} :



A dependent current source symbol represented by a diamond with a downward-pointing arrow. Terminal 'C' is at the top and terminal 'E' is at the bottom. The label $g_m v_{be}$ is placed to the right of the diamond.

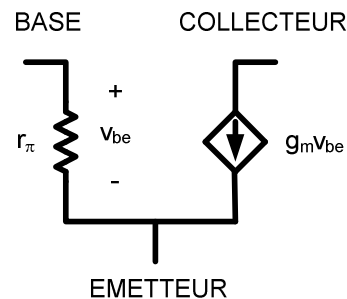
$$g_m = \frac{I_C}{V_T}$$

- Notre transistor se comporte comme ceci en AC:



Analyse AC: Stratégie

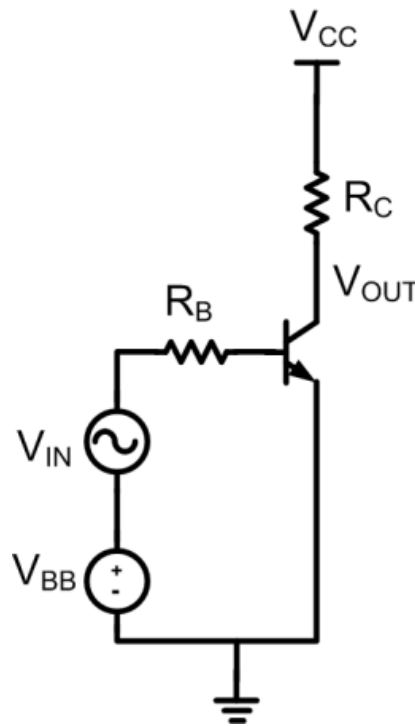
- On appelle ça le modèle en π



- Pour faire l'analyse AC, on **REMPLECE** le transistor avec le modèle:
 - On fait SEMBLANT que le transistor est linéaire
 - Donc, on l'analyse comme en Circuit électrique

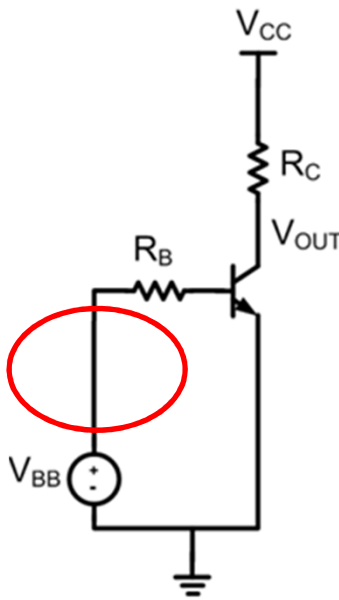
Problème typique...

- Trouvez le gain V_{OUT}/V_{IN} :



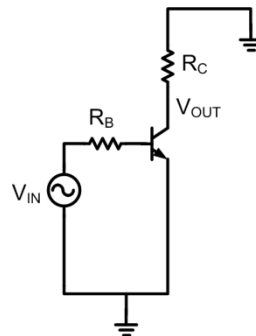
Problème typique...

- Première étape: analyse DC
 - On met les sources AC à 0 (superposition)
 - On trouve V_C (région linéaire?)
 - On trouve I_C (pour analyse AC)

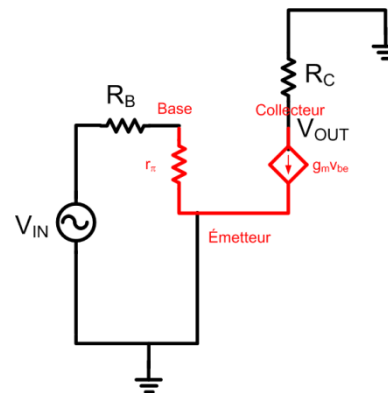


Problème typique...

- Deuxième étape: analyse AC
 - On remet les sources AC et on met les sources DC à 0

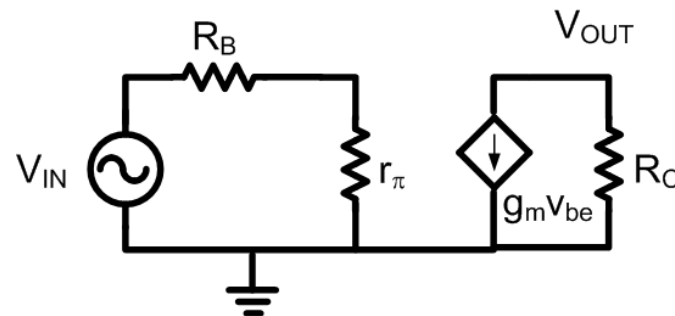


- On remplace le transistor par son modèle petit signal



Problème typique...

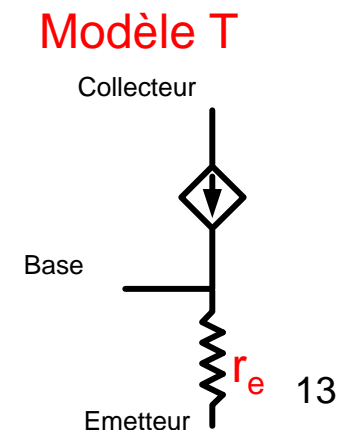
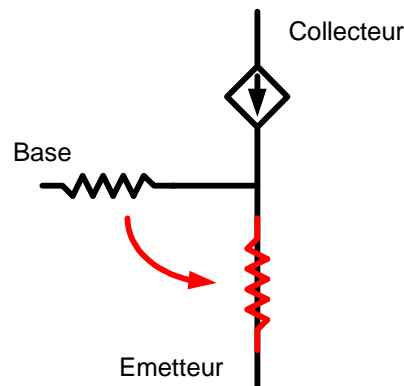
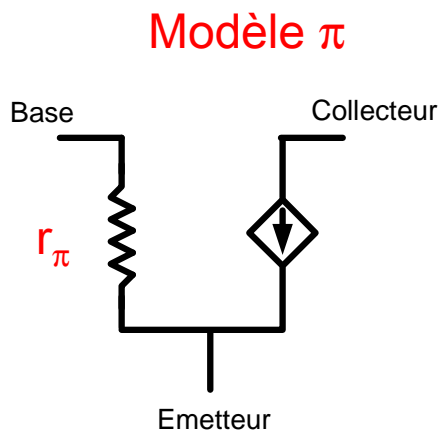
- On réorganise le circuit pour le rendre compréhensible:



- Et on utilise les techniques connues pour trouver V_{OUT}/V_{IN}

Modèle petit signal (T)

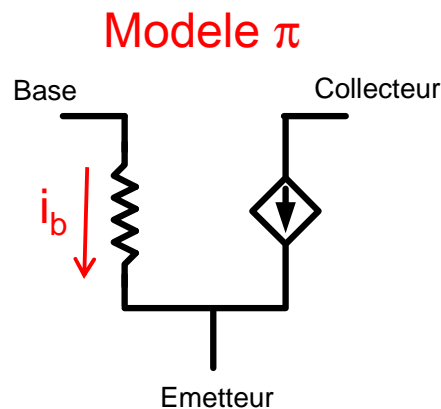
- Il existe aussi un autre modèle petit signal:
 - Le modèle T
 - Les analyses sont parfois plus simples avec l'un ou l'autre
- La différence est l'emplacement de la résistance



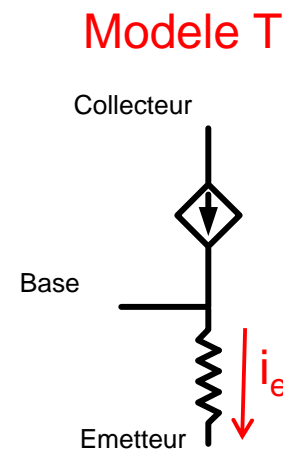
Modèle petit signal (T)

- La résistance est toujours entre la base et l'émetteur
 - Le courant dans la résistance qui est différent
 - v_{be} doit être le même dans les 2 modèles...

$$v_{be} = i_b r_\pi$$



$$v_{be} = i_e r_e$$



Modèle petit signal (T)

- Si:
 - v_{be} est le même
 - i_e est $(\beta+1)$ fois plus gros que i_b
 - r_e doit nécessairement être $(\beta+1)$ plus petit que r_π

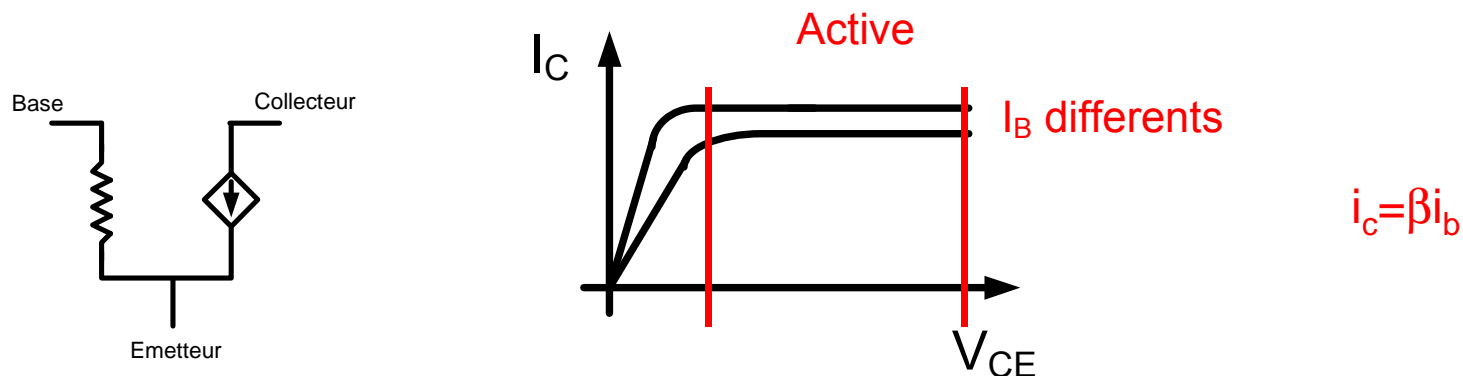
$$v_{be} = i_b \cdot r_\pi = i_e \cdot r_e \quad \Rightarrow \quad r_e = \frac{r_\pi}{(\beta+1)}$$

\uparrow \downarrow

Il reste un détail...

Résistance de sortie

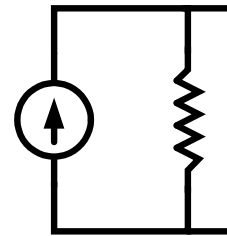
- En région active, on sait que $i_c = \beta i_b$
 - i_c ne dépend PAS de la tension au collecteur (v_{ce})
 - On peut dessiner la courbe $I_C - V_{CE}$:



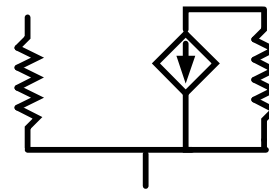
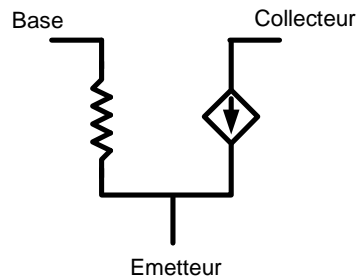
- En région active, un changement de V_{CE} ne change pas le courant I_C

Résistance de sortie

- Dans la vraie vie, on sait qu'une source de courant a une résistance de sortie:
 - Sinon, en circuit ouvert (R infini), on aura une tension infinie... (pas très réaliste)



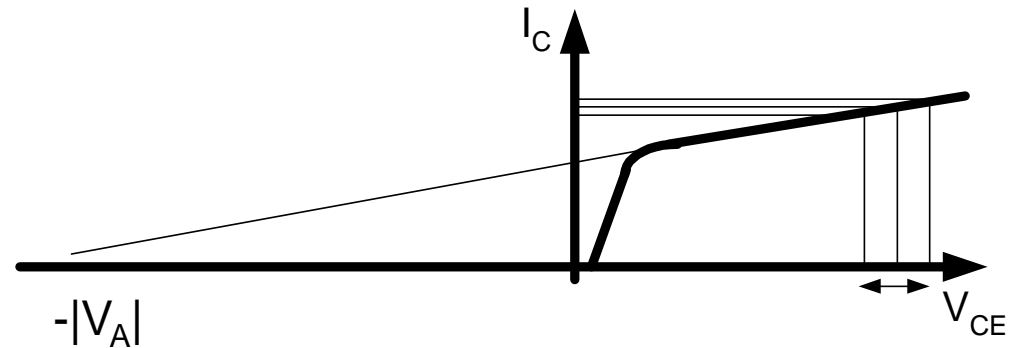
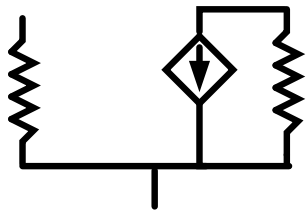
- La même chose s'applique à notre modèle



v_{ce} va affecter le courant i_c

Résistance de sortie

- Plus v_{ce} est élevé, plus ça augmente le courant i_c



- Pour caractériser cette dépendance, on utilise V_A , la tension de Early:
 - La tension où l'extrapolation de la courbe croise 0.

V_A est un paramètre connu et fourni

Résistance de sortie

- La résistance s'appelle la résistance de sortie r_o
 - Si v_{ce} changeait de ΔV_{ce} , de combien changerait i_c ?

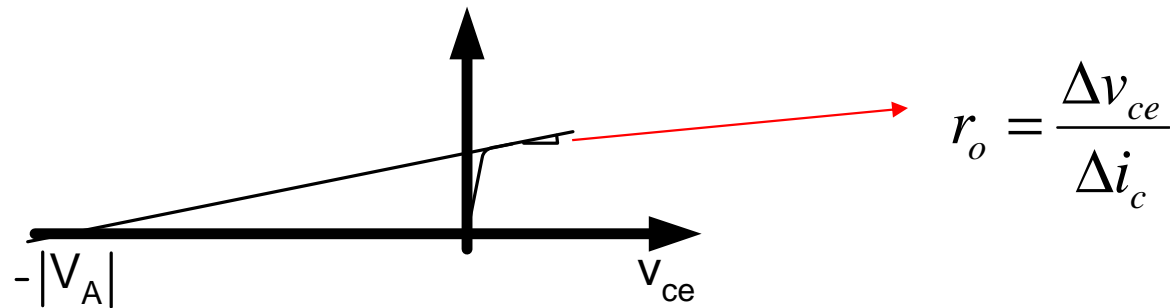
$$r_o = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{\Delta v_{ce}}{\Delta i_c}$$

- Idéalement, r_o serait infini, puisque le courant ne changerait pas du tout avec v_{ce}

$$r_o = \frac{\Delta V}{0} \rightarrow \infty$$

Résistance de sortie

- Comment calcule-t-on r_o à partir de V_A ?
 - r_o est l'inverse de la pente



- On peut calculer cette même pente (inverse) avec V_A

$$r_o = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{V_{CE} - (-|V_A|)}{I_C - 0} \cong \frac{|V_A|}{I_C}$$

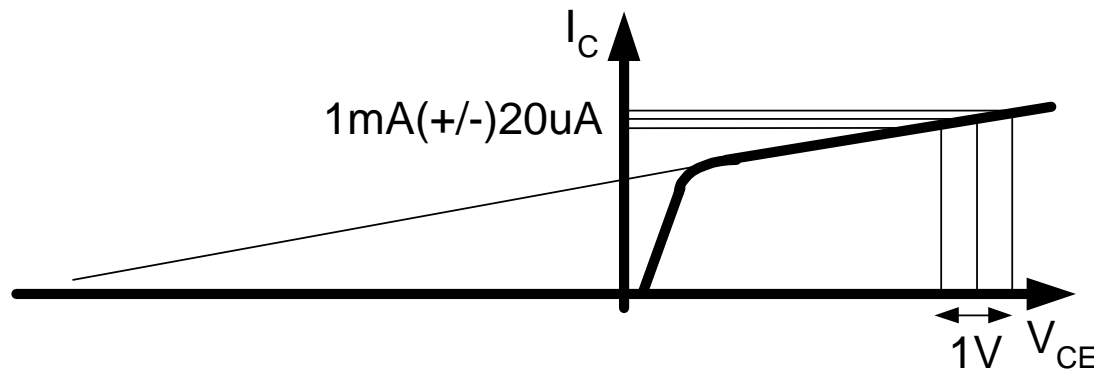
V_A est typiquement beaucoup plus grand que V_{CE}

Exemple

- On a un BJT avec $V_A=50$ polarisé avec $I_C=1\text{mA}$
- Si v_{ce} changeait de 1V , de combien changerait i_c ?

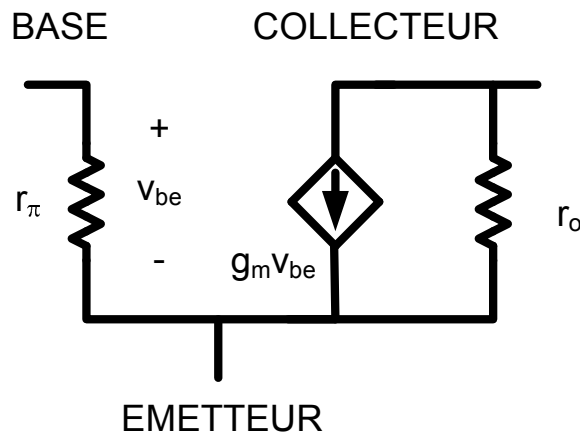
$$r_o = \frac{V_A}{I_C} = \frac{50}{1\text{m}} = 50\text{K}$$

$$r_o = \frac{\Delta V}{\Delta I} \Rightarrow \Delta I = \frac{1}{50\text{K}} = 20\mu\text{A}$$

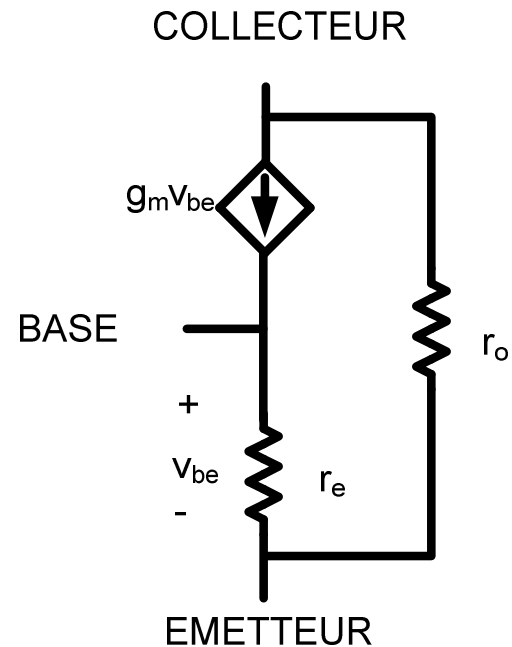


Résistance de sortie

- La résistance de sortie se place entre collecteur et émetteur :



Modèle π



Modèle T

Exemple

- Après analyse DC, on voit que:

$$I_C = 1 \text{ mA} \quad (\text{calculé})$$

$$V_A = 50 \text{ V} \quad (\text{fourni})$$

$$\beta = 100 \quad (\text{fourni})$$

- Trouvez g_m , r_e , r_π et r_o .

Exemple

- On trouve g_m : $g_m = \frac{1mA}{25mV} = 0.04A/V$

- r_π : $r_\pi = \frac{\beta}{g_m} = \frac{100}{0.04} = 2500\Omega$

- r_e : $r_e = \frac{100}{(101)(0.04)} = 24.75\Omega$

- r_o : $r_o = \frac{50V}{1mA} = 50000\Omega$

Les paramètres petit-signal

- Les paramètres petit signal sont seulement valides en analyse AC
 - r_{π} , r_e , r_o ne sont pas des vraies résistances (V/I)
 - Ce sont des résistances du type $\Delta V/\Delta I$

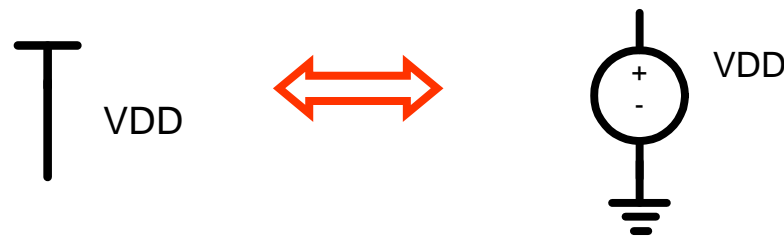
Recette

- Méthode d'analyse de circuits:
 - 1) Activer sources DC et mettre sources AC a 0
 - 2) Analyser en DC (trouver V_C , V_B , V_E , I_B , I_C et I_E)
 - 3) Calculer g_m , r_π , r_e et r_o .
 - 4) Remplacer transistor par équivalent petit signal
 - 5) Activer sources AC et mettre sources DC a 0
 - 6) Analyser en AC (trouver v_c , v_b , v_e , i_b , i_c et i_e)
 - 7) Les "vraies valeurs" seront V_C+v_c , V_B+v_b , V_E+v_e , I_B+i_b , I_C+i_c et I_E+i_e

Beaucoup d'étapes... allons voir un exemple

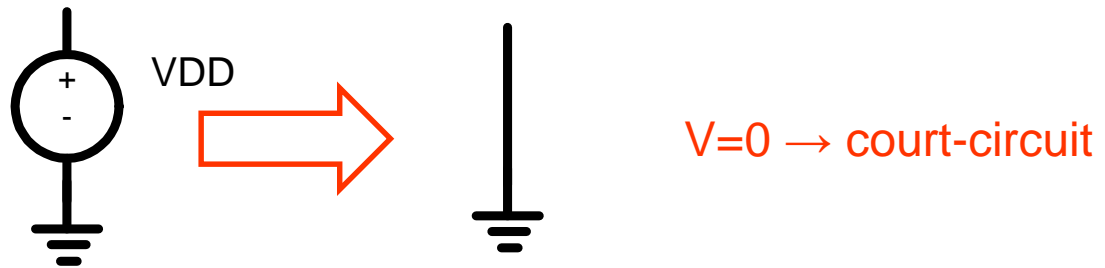
Notes

- 1) Après remplacement de transistor, le circuit devrait être redessiné:
 - Permet de combiner les “grounds”
 - Permet de voir les combinaisons parallèle/série
- 2) Ces symboles sont équivalents:

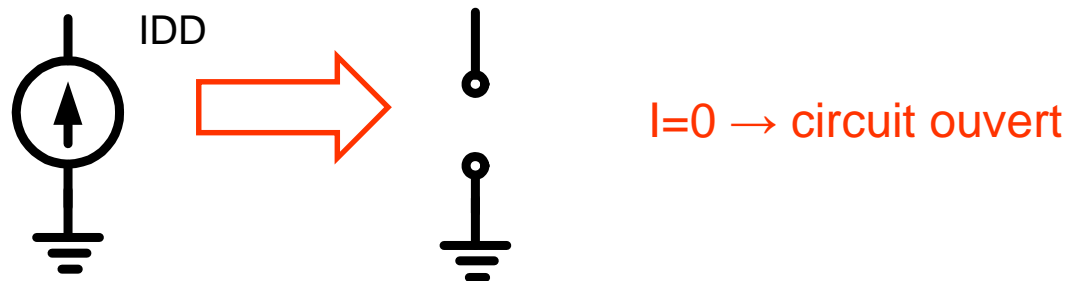


Notes

3) Source de tension de 0: court-circuit

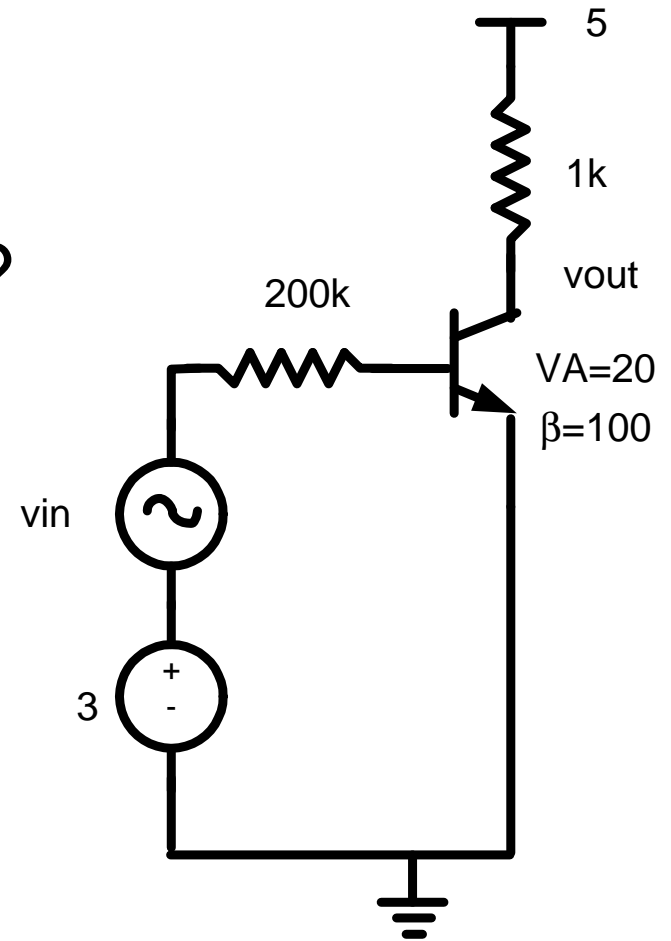


4) Source de courant de 0: circuit-ouvert



Exemple

- Trouvez le gain v_{out}/v_{in}
- Qu'est ce que ça implique?
 - Analyse DC et mettre AC=0
 - Paramètre petit signal
 - Substitution
 - Activer AC et mettre DC=0
 - Isoler v_{out}/v_{in} .



Exemple

- Analyse DC: AC=0
- Hypothèse: région active

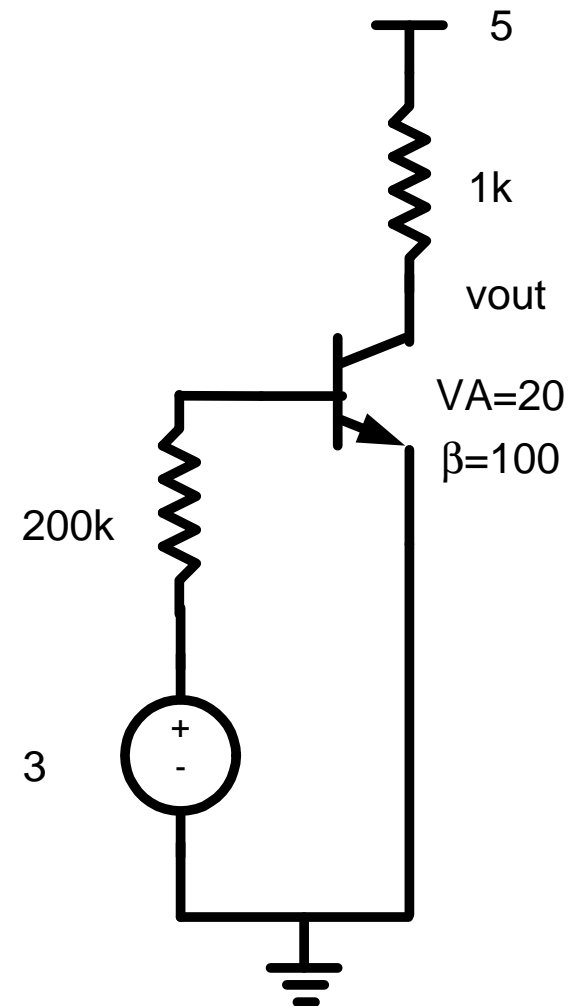
$$V_{BE} = V_B = 0 + 0.7 = 0.7$$

- On peut trouver I_B

$$\frac{3 - 0.7}{200K} = 11.5 \mu A$$

- Avec β , on trouve I_C :

$$100(11.5 \mu A) = 1.15 mA$$



Exemple

- Avec I_C , on trouve V_C :

$$V_{DD} - I_C R_C = 5 - (1.15m)1K = 3.85$$

- Jonction BC: inverse.
- On ne nous demande pas de paramètres, donc il ne suffit que de:
 - Trouver V_C pour confirmer “région active”
 - Trouver I_C pour calculer les paramètres

Exemple

- On trouve les paramètres:

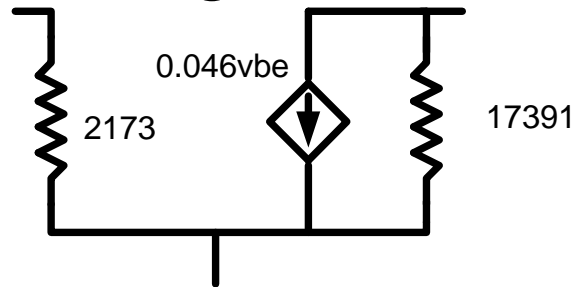
$$g_m = \frac{I_C}{V_T} = \frac{1.15}{25} = 0.046 \quad r_o = \frac{V_A}{I_C} = \frac{20V}{1.15mA} = 17391\Omega$$

- Le dernier paramètre dépend de notre modèle. On choisit le modèle π :

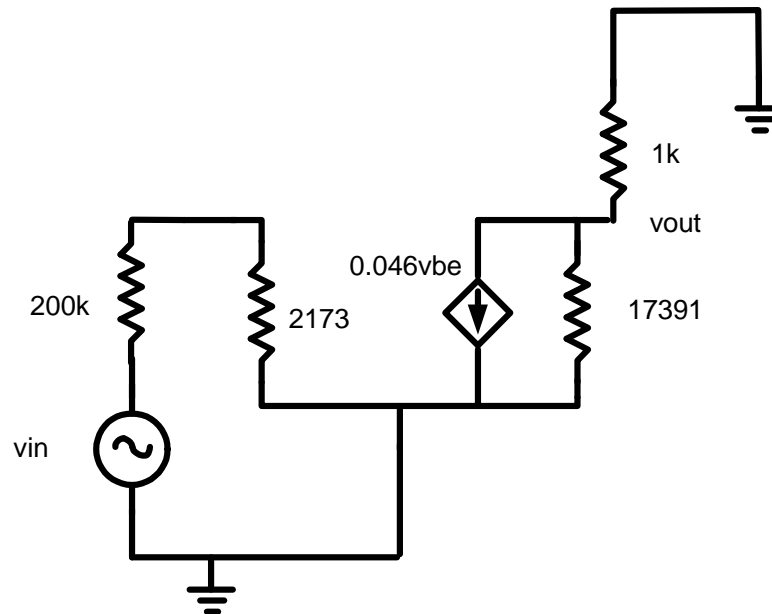
$$r_\pi = \frac{v_{be}}{i_b} = \frac{\beta}{g_m} = \frac{100}{0.046} = 2173\Omega$$

Exemple

- Le modèle petit signal ressemble à:



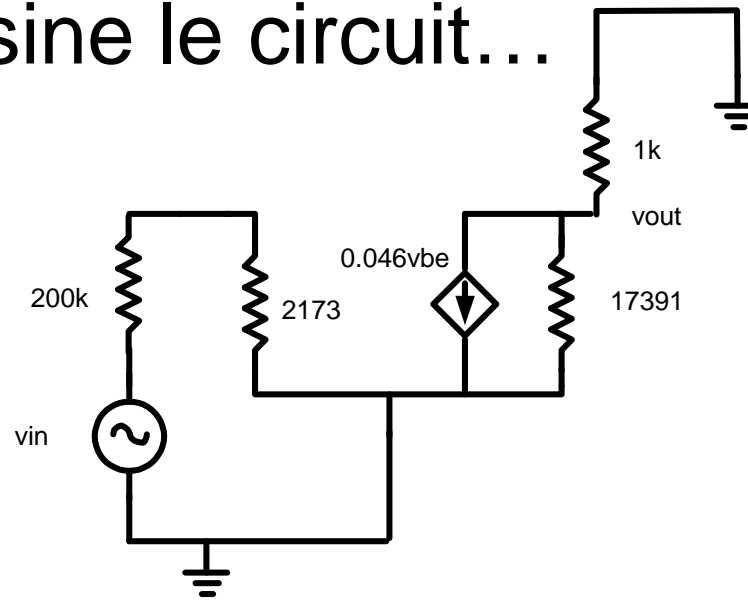
- Et le circuit substitué ressemble à:



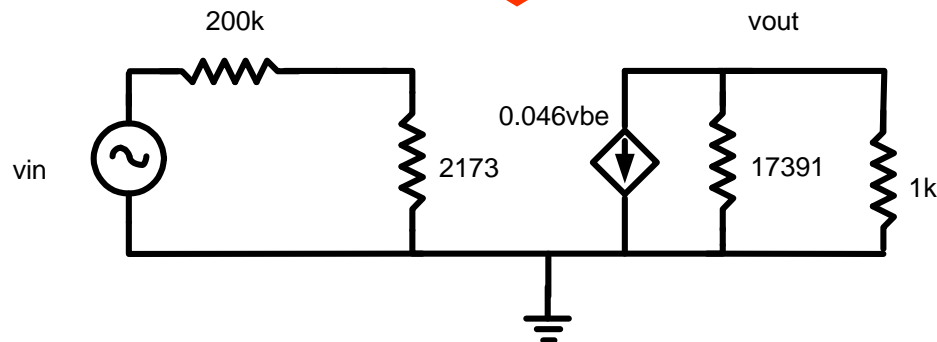
Exemple

- On redessine le circuit...

Avant

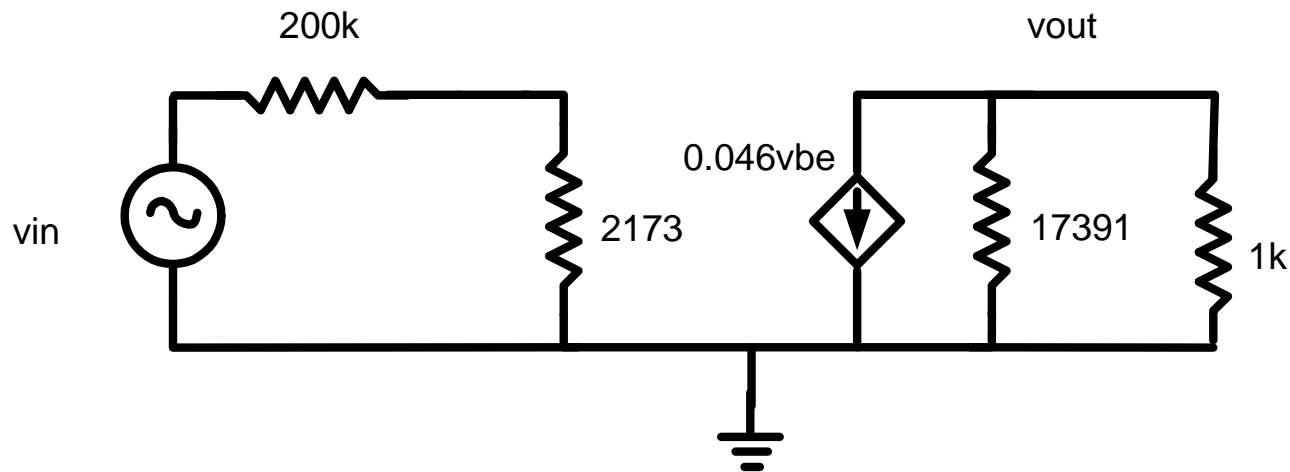


Après



Exemple

- Il ne reste qu'à trouver v_{out}/v_{in}
 - On manipule:



- L'équation pour trouver v_{out} est:

$$v_{out} = -i_{out}(r_o \parallel R_C)$$

Pourquoi "négatif"? Regardez la direction du courant...

Exemple

- On remplace par des chiffres:

$$v_{out} = -0.046v_{be} (17391 \parallel 1K)$$

- Il nous manque v_{be} . Diviseur de tension:

$$v_{be} = v_{in} \frac{2173}{2173 + 200000} = 0.01v_{in}$$

- On substitue et v_{out} devient:

$$v_{out} = -0.046(0.01v_{in})(17391 \parallel 1K)$$

Exemple

- Après manipulations, on obtient ceci

$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = -0.434$$

- On note plusieurs choses:
 - Avec $R_B:200K$ et $R_C=1K$: région active
 - En appliquant un signal, sortie 0.43 fois plus “gros”
 - Note: le gain est négatif

Exemple: Conclusions

- “R source” élevé et r_{in} non-infini.

- Avec r_{in} infini, on aurait $v_{be} = v_{in}$

$$v_{be} = 0.01v_{in}$$

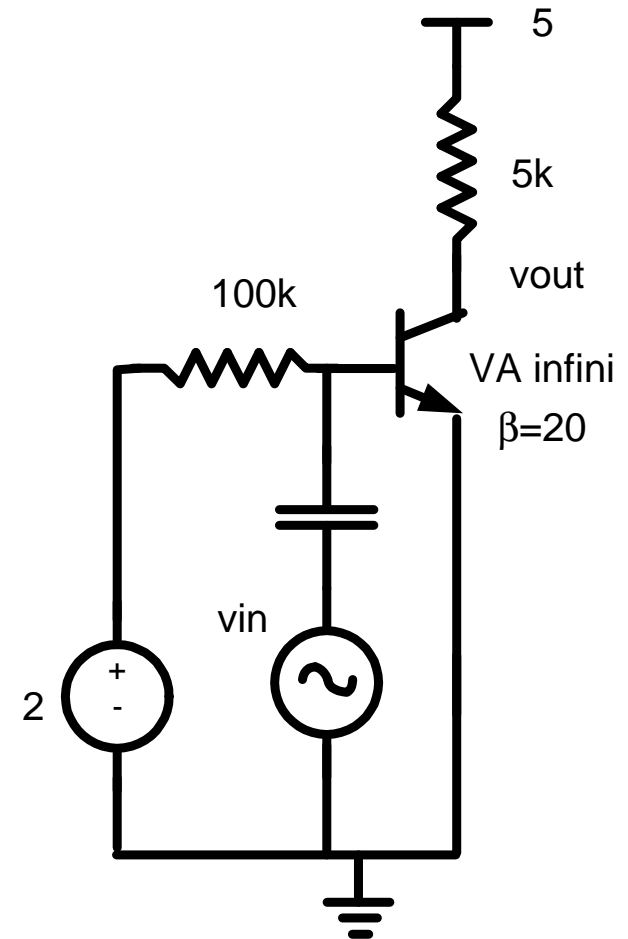
- Pour sortie en tension, on veut $r_o=0$.
- Pour sortie en courant, on veut $r_o \rightarrow \infty$

- La parenthèse donnerait 1K plutôt que 945

$$v_{out} = -0.046v_{be} (17391 \parallel 1K)$$

Exemple (seul)

- Exemple
 - Trouvez v_{out}/v_{in}
- Note:
 - Gros condensateur
 - Filtre passe-haut
 - En analyse DC: circuit ouvert
 - En analyse AC: court-circuit



Exemple (seul)

- V_B se trouve facilement:

$$V_B = 0 + 0.7 = 0.7$$

- On utilise ça pour trouver I_B :

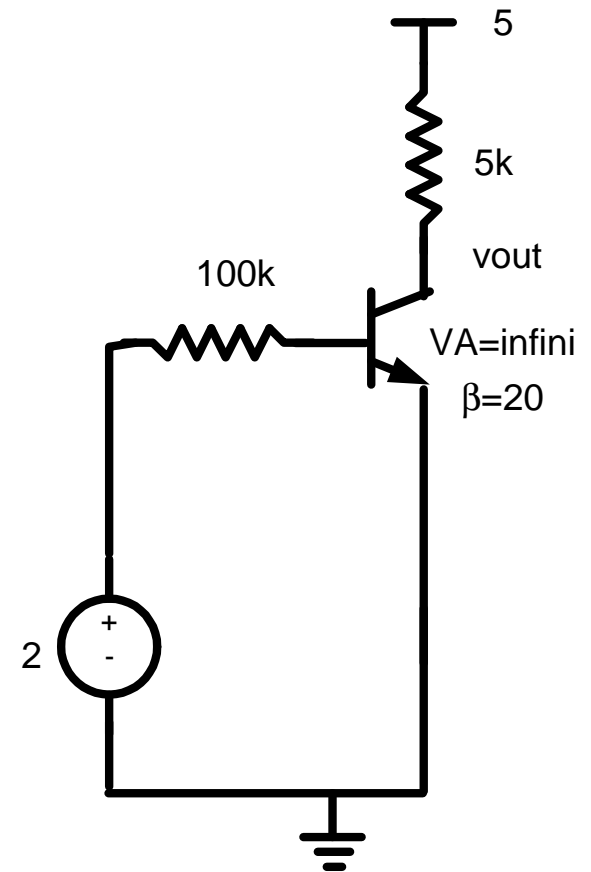
$$I_B = \frac{2 - 0.7}{100K} = 13\mu A$$

- I_C c'est βI_B

$$I_C = 260\mu A$$

- Et on trouve V_C

$$V_C = 5 - (5K)260\mu A = 3.7$$



Région active confirmée!

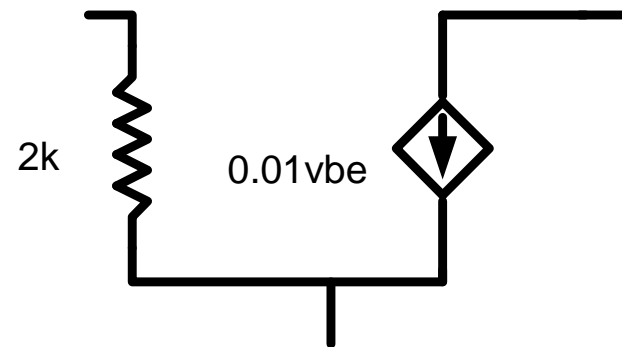
Exemple (seul)

- On doit toujours calculer g_m et r_o :

$$g_m = \frac{I_C}{V_T} = \frac{260\mu A}{25mV} = 0.01 \qquad r_o = \frac{V_A}{I_C} = \infty \quad \text{Circuit Ouvert}$$

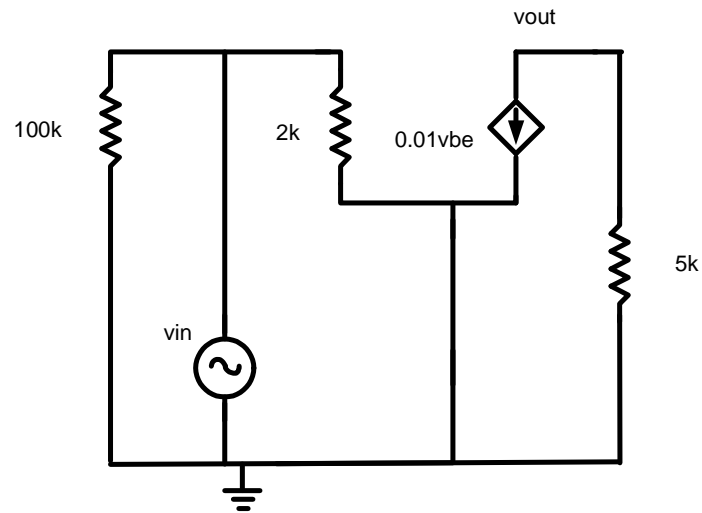
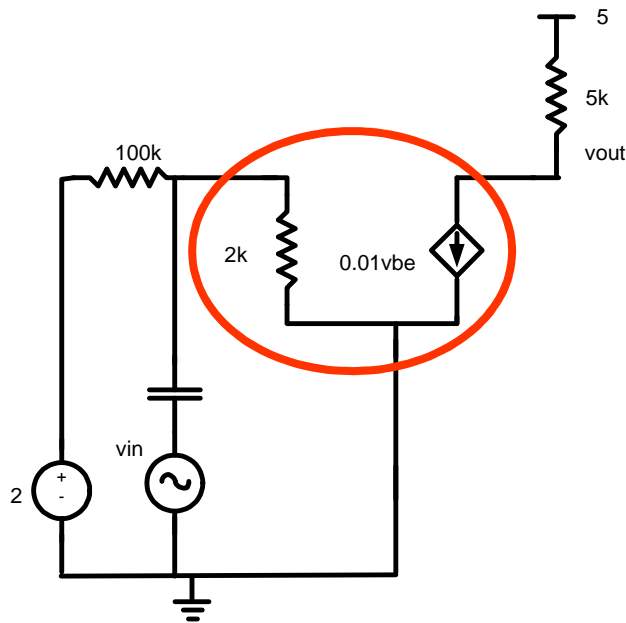
- Le paramètre restant dépend du modèle
- On choisit π :

$$r_\pi = \frac{\beta}{g_m} = \frac{20}{0.01} = 2000$$



Exemple (seul)

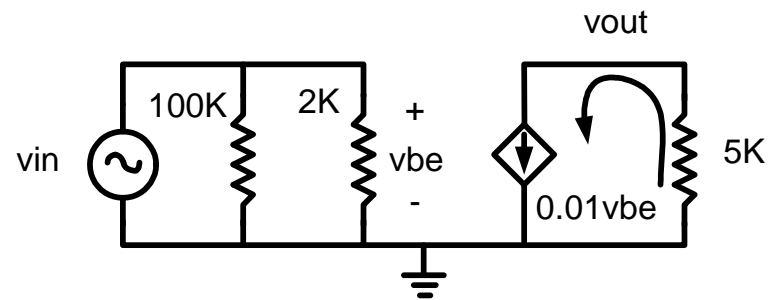
- Analyse AC:
 - On substitue le transistor
 - On remet source AC (condensateur court-circuit)
 - On enlève la source DC



Exemple (seul)

- La résistance 100K n'affecte pas l'analyse

- $v_{out} = -i_{out} * 5K$
- $i_{out} = 0.01 * v_{be}$
- $v_{be} = v_{in}$



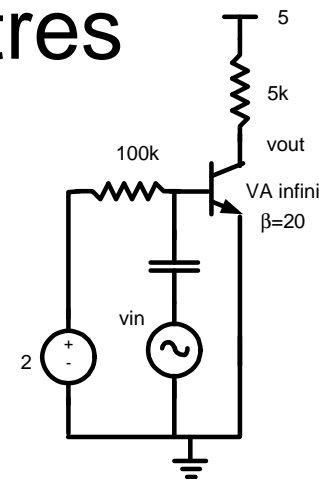
- On combine le tout:

- $v_{out} = -(0.01)(5k)v_{in} = -50v_{in}$

- Remarque: gain = $-g_m R_C$

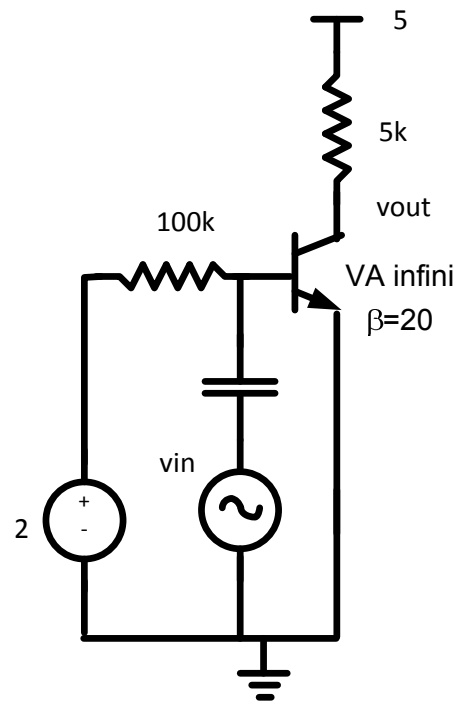
Exemple: Conclusions

- R_B est nécessaire pour limiter I_B
 - R_B réduit le gain en faisant que $v_{be} \ll v_{in}$
- C donne un point d'accès (un "bypass")
 - Avec C , polarisation encore la même
 - Avec C , signal ne "voit" plus le R_B
- On peut s'en servir dans d'autres situations aussi.

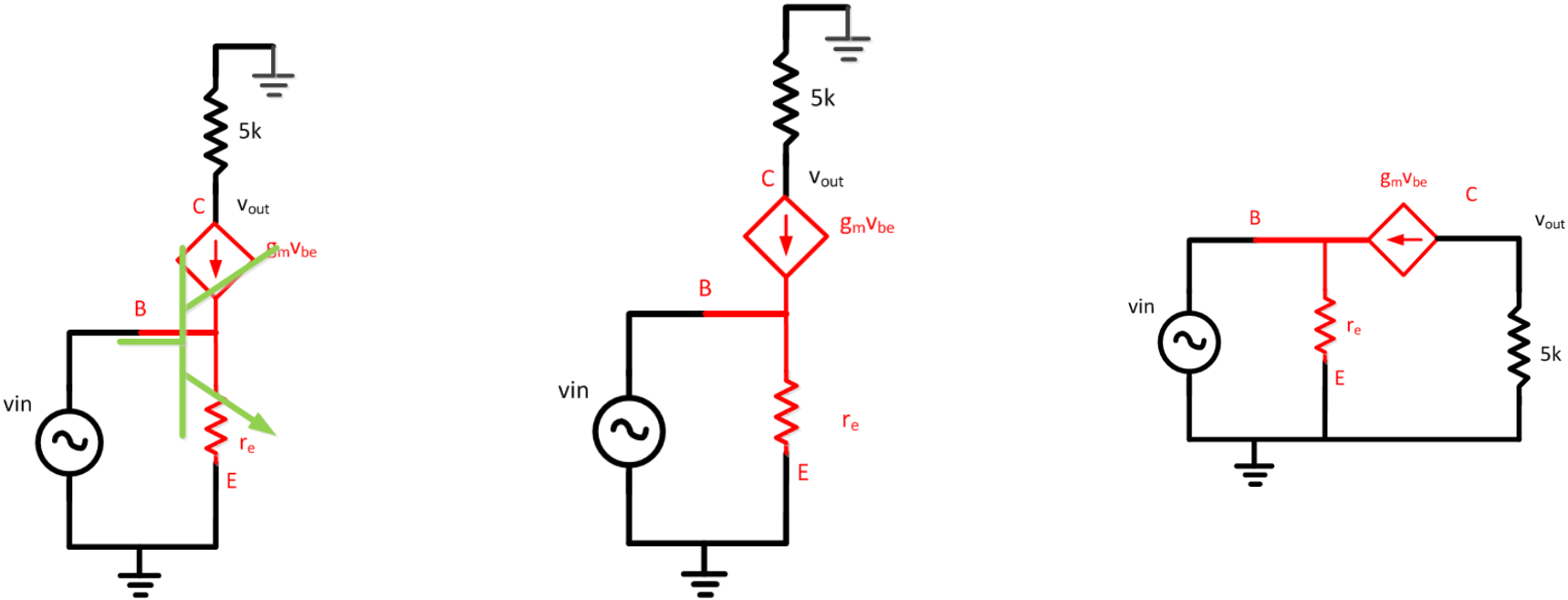


Exemple (seul)

- Reprenez l'exemple précédent avec le modèle en T



Exemple (seul)



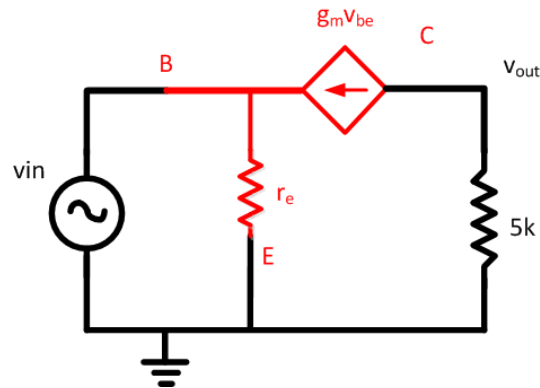
Exemple (seul)

- Pour trouver la sortie, on commence là:

$$v_{out} = -i_{out} R_C \quad v_{out} = -g_m v_{be} R_C$$

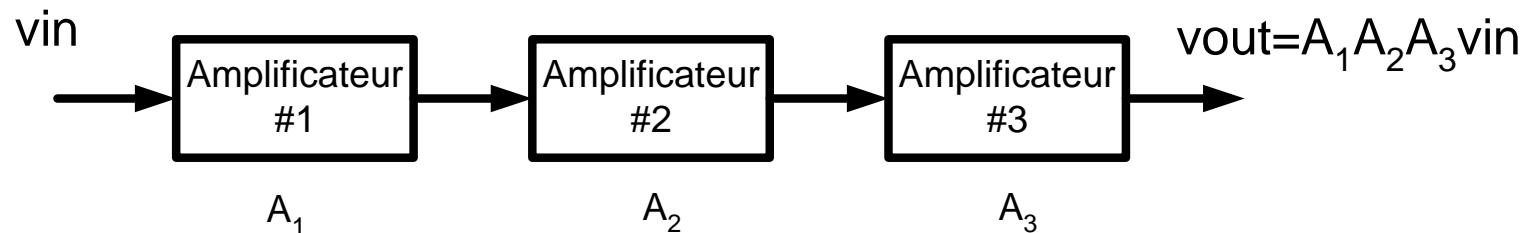
- Sachant que $v_{be} = v_{in}$, on obtient le gain:

$$v_{out} = -g_m v_{in} R_C \quad \frac{v_{out}}{v_{in}} = -g_m R_C = -0.01 \cdot 5K = -50$$



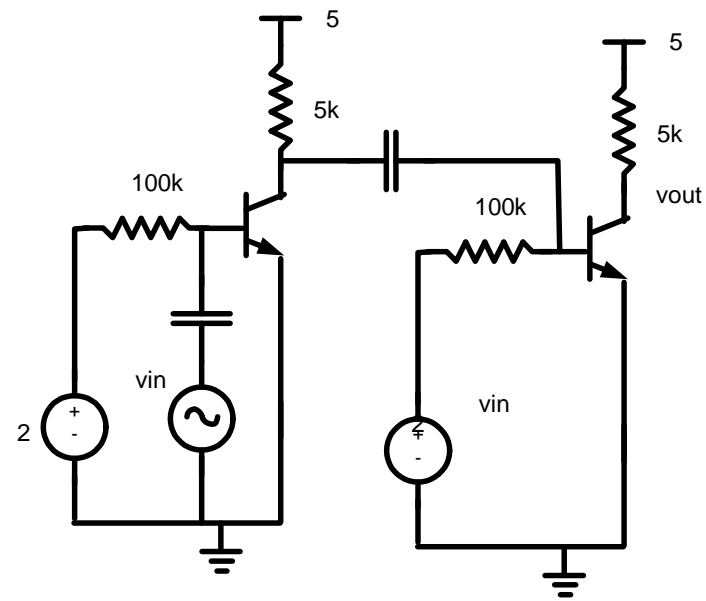
Condensateur

- Couplage capacitif pour isoler DC du AC
- Ex: imaginez notre circuit precedent qui a un gain de $|50|$.
- Certains applications veulent gain > 1000
 - Rappel: idéalement, on veut gain infini...
- Solution possible:
 - Plusieurs amplificateurs en “cascade”



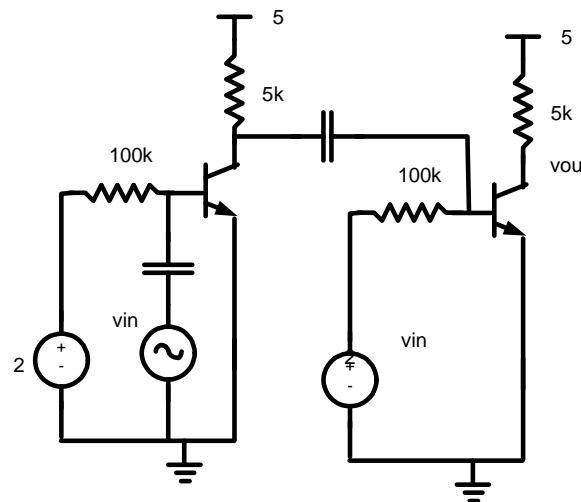
Condensateur

- Pour connecter on utilise condensateur
- Pourquoi pas connexion directe?
 - V_{sortie} et V_{base} ne sont pas les mêmes
- Dans notre cas:
 - $V_C: 3.7\text{v}$
 - $V_B: 0.7\text{v}$
- C laisse passer signal
 - Mais bloque DC



Condensateur

- Il faut noter que le gain ne sera par exactement le produit des deux gains:
 - Le gain du premier amplificateur est réduit puisque R_C sera réduit
 - Le gain du deuxième amplificateur est réduit puisque la résistance de source est augmentée



Rappel

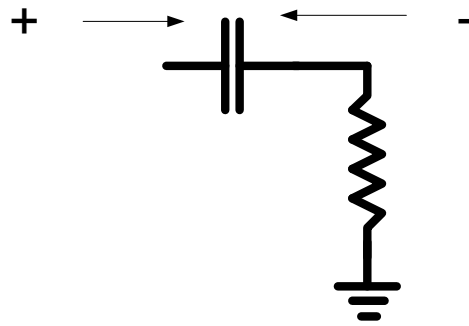
- Pourquoi un condensateur fait ça?
 - Imaginez un condensateur qui a des charges
 - Charges + d'un bord attire charge - de l'autre



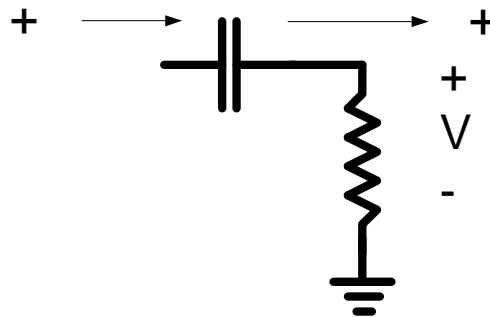
- Aucun courant ne circule: $V=RI=0$

Rappel

- Quand (+) arrivent, (-) sont attirés



- C'est COMME si (+) étaient repoussés



Rappel

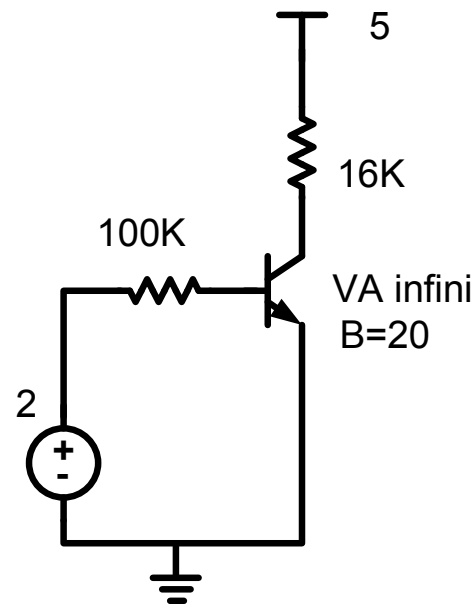
- On a un signal qui passe quand le courant CHANGE
- Si courant change assez vite, c'est COMME si on avait court-circuit
- Pour DC, ce sera toujours circuit ouvert.
- DONC:
 - DC ne passe pas
 - Signal passe

Changement de région

- Amplificateurs peuvent avoir grands gains
- Si c'est trop gros, ça cause des problèmes
 - v_{be} vs. i_c ne sera plus linéaire (distortion)
 - Ça pourrait sortir de la région active
- Solutions:
 - Ajuster la valeur des paramètres

Changement de région

- On a vu que le gain du circuit précédent était $-g_m R_C$
- On augmente R_C pour augmenter le gain.



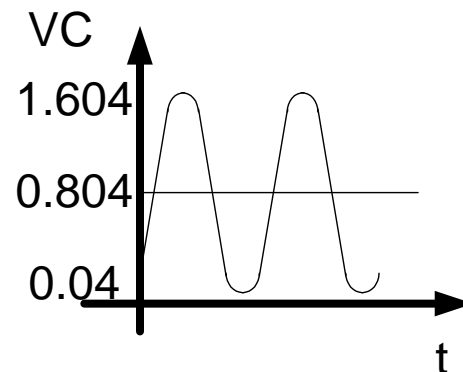
Changement de région

- Dans ce cas-ci, on se retrouverait avec gain= $-g_m R_C = -160$
- Est-ce qu'il y a un problème?
 - Peut-être.
- Imaginez une onde sinusoïdale de 5mV à l'entrée.
 - La sortie serait $5\text{mv} * 160 = 800\text{mV}$

Allons voir son impact...

Changement de région

- Retournons à l'analyse DC
 - $I_C = 260\mu\text{A}$
 - $V_C = 5 - (260\mu\text{A} * 16000) = 0.84$
- On est encore polarisé en inverse
- Avec un signal de 800mV à la sortie, V_C ira de 0.04v a 1.64v



Durant une partie du cycle, transistor sera en saturation.

Exercice de dérivation

- Pour le plus gros signal de sortie, il faut que V_C soit au milieu de V_{MIN} et V_{MAX}
 - Dans le cas que le circuit soit alimenté par V_{CC} et la masse, V_C devrait être $V_{CC}/2$.
- Quel serait le gain dans ce cas?
 - Ce gain devrait s'exprimer seulement en termes de V_{CC}
 - Voici quelques équations utiles:

$$\text{gain} = -g_m R_C$$

$$V_C = V_{CC}/2$$

$$g_m = I_C/25\text{mV}$$