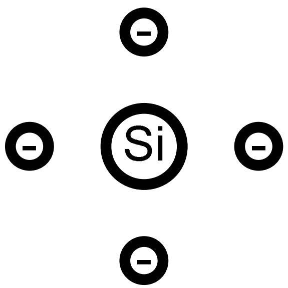
Cours 2

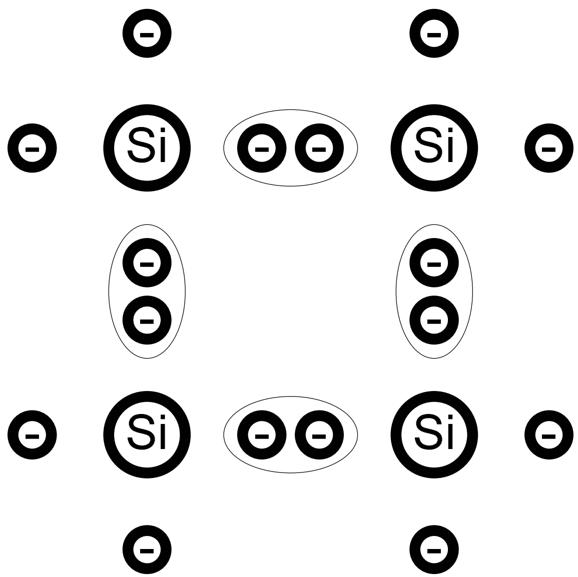
Transistors bipolaires

(Ch. 5 dans Sedra)

Silicium

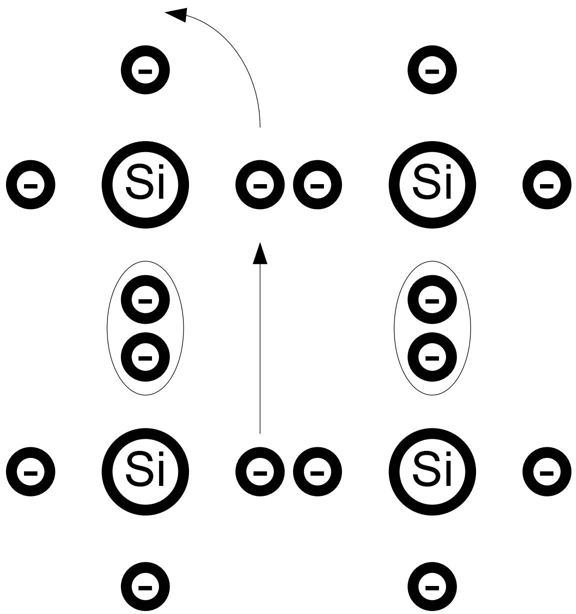
- Le silicium a 4 electrons de valence
- Forment un lien de valence avec atomes de silicium en partageant 2 electrons





Silicium

- Le cassage de liens et le deplacement d'electrons genere un courant
- Un electron qui se libere laisse un espace: ca s'appelle un trou

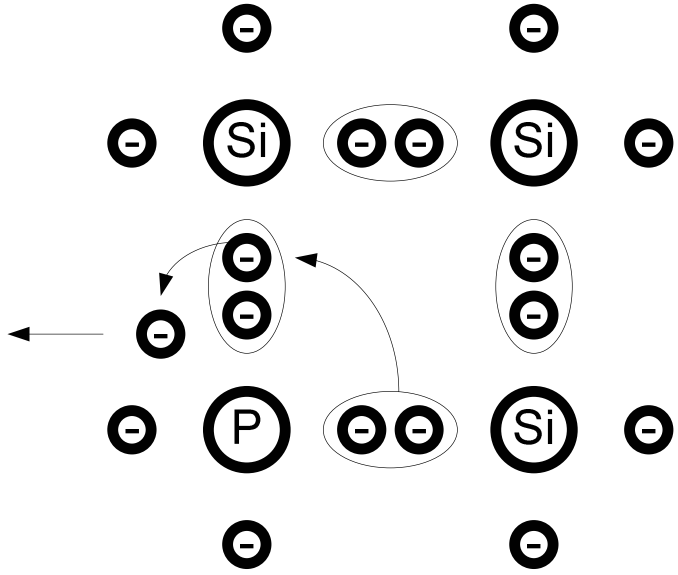


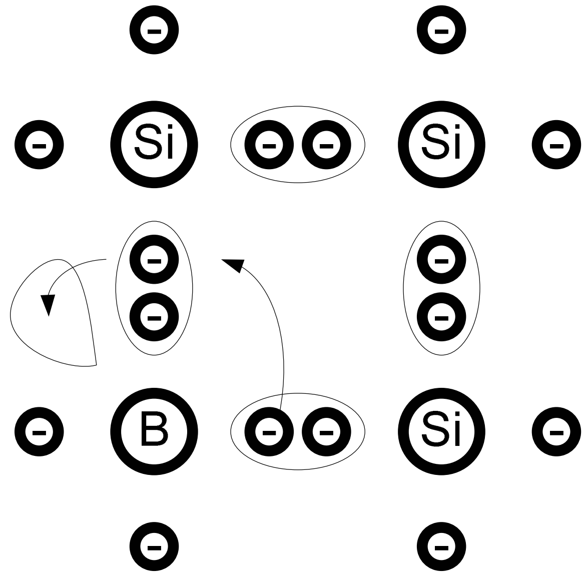
Dopage

- Courant: deplacement de charges
- Pour augmenter le courant, on augmente les charges
  - On ajoute des impuretes: dopage.
- Impuretes qui ajoutent des electrons: N
  - Ex: Phosphore
- Impuretes qui ajoutent des trous: P
  - Ex: Bore

Dopage

- Exemple de “dopage” type N et P

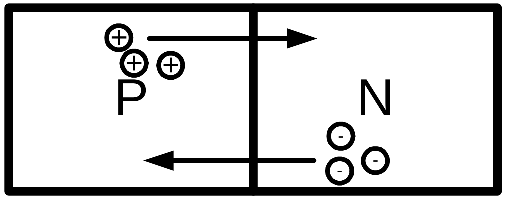


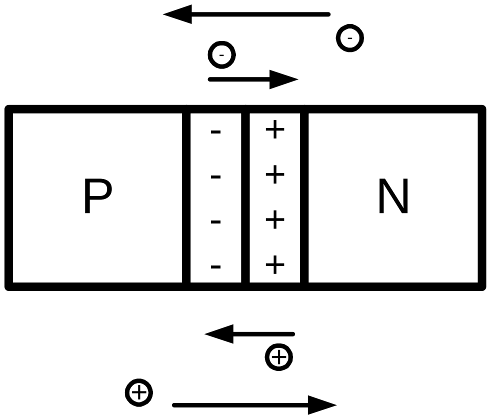


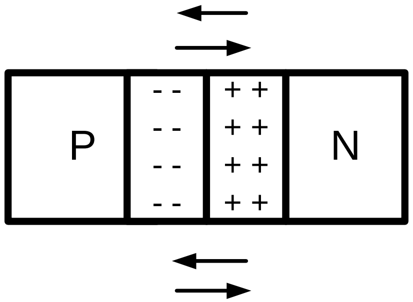
Combinons un bloc P et un bloc N

Diode PN

- Avant equilibre:
  - Trous diffusent vers N
  - Electrons diffusent vers P
- Charges se deplacent
  - Recombinaison cree des ions
  - Ions creent un champ
- Equilibre:

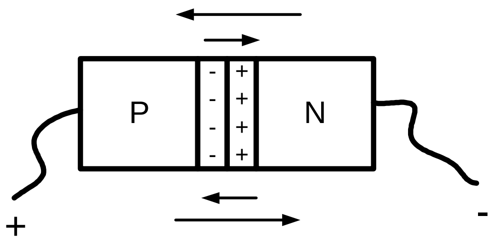






Diode PN

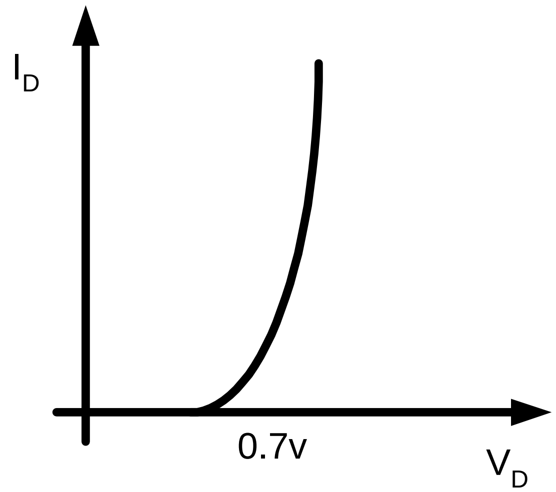
- Il y a 2 courants:
  - Un cause par la diffusion
  - Un cause par le champ interne
- En appliquant une tension + a P et – a N, on reduit le champ a l’interne
- Resultat:
  - Courant “interne” plus petit
  - Courant “externe” remporte



Diode PN

- Le courant augmente exponentiellement avec la tension appliquee:

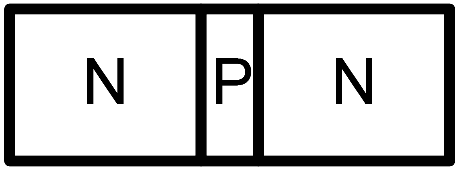
$$I_D = I_S\left(e^{V_D/kT} - 1\right) \cong I_S e^{V_D/kT}$$



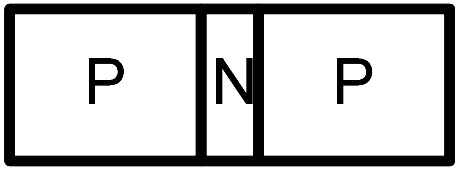
- Passons maintenant aux transistors bipolaires…

Transistor bipolaire

- 2 types de transistors

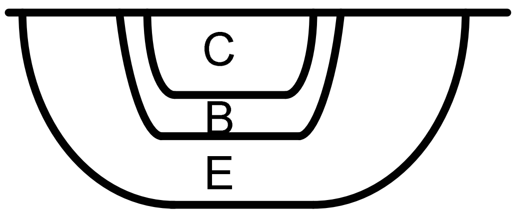


NPN



PNP

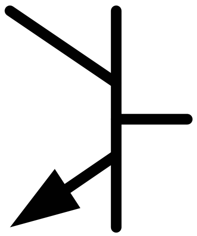
- On peut voir BJT comme etant 2 diodes dos-a-dos
- Structure physique reelle:



Transistor bipolaire

- Il y a 3 pattes:

Collecteur

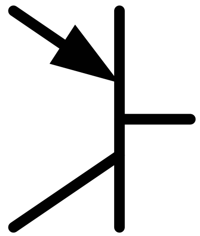


Base

Emetteur

NPN

Emetteur



Base

Collecteur

PNP

Pour identifier les pattes:

Base: Autre bord
Emetteur: avec fleche (direction du courant)
Collecteur: celui qui reste

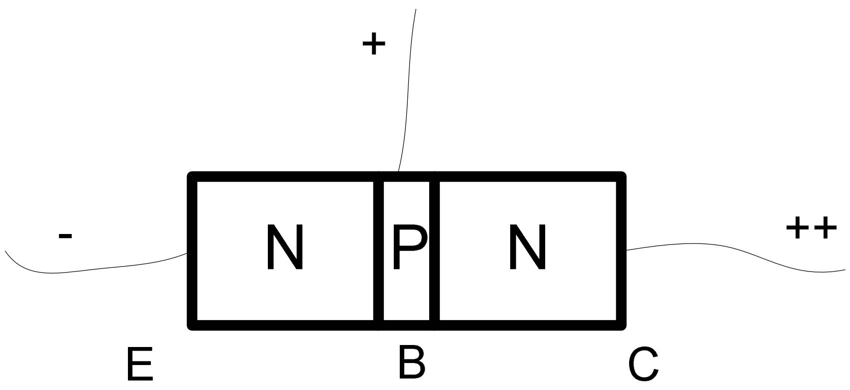
Transistor bipolaire

- Fonctionalite classifiee par les diodes
    - BE: Jonction Base Emetteur
    - BC: Jonction Base Collecteur

BE	BC	Mode
Inverse	Inverse	Cutoff
Inverse	Direct	Actif (inverse)
Direct	Inverse	Actif
Direct	Direct	Saturation

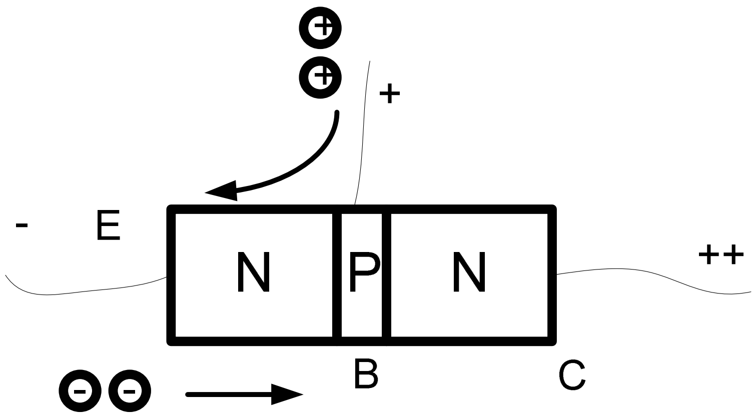
Transistor bipolaire

- En region active:
  - BE polarise en direct
  - BC polarise en inverse



Transistor bipolaire

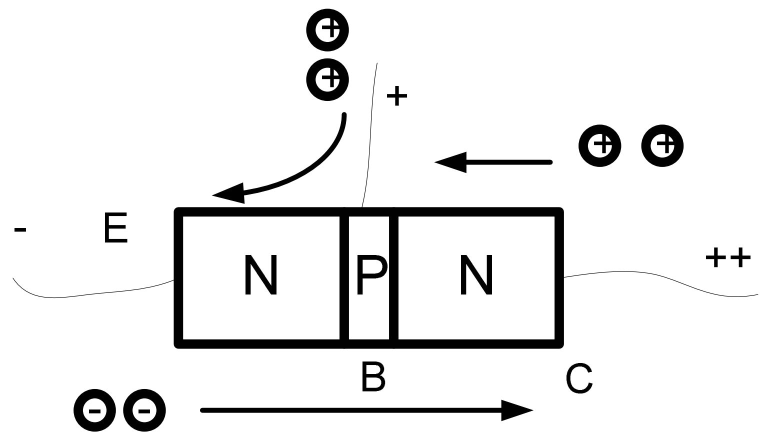
- BE polarise en direct, donc courant circule
- Charges + entrent par B et vont dans E
- Charges – attires par B



Dopage E eleve: **gros** flot d'electrons vs **petit** flot de trous

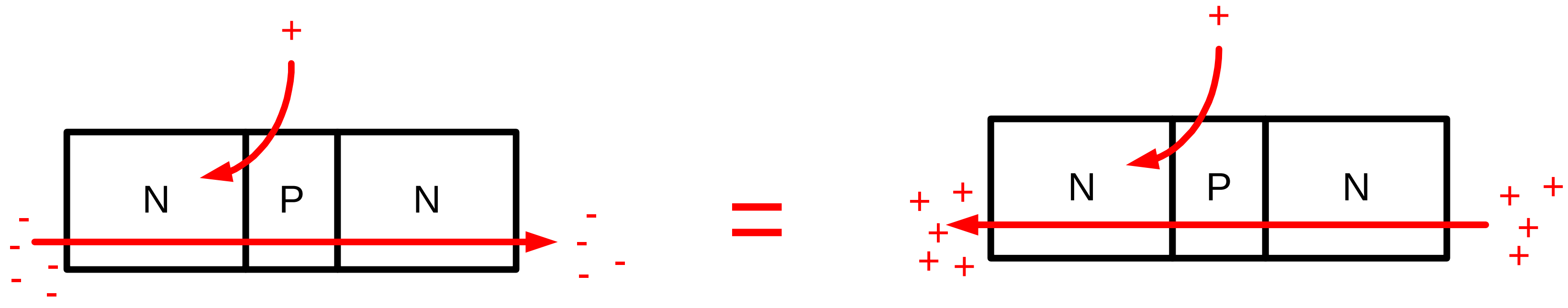
Transistor bipolaire

- La region P est faite tres mince
- Charges – est attire par B, mais aussi attirees par C (tension plus haute)
- Les charges – passent dans B et C



Polarisation

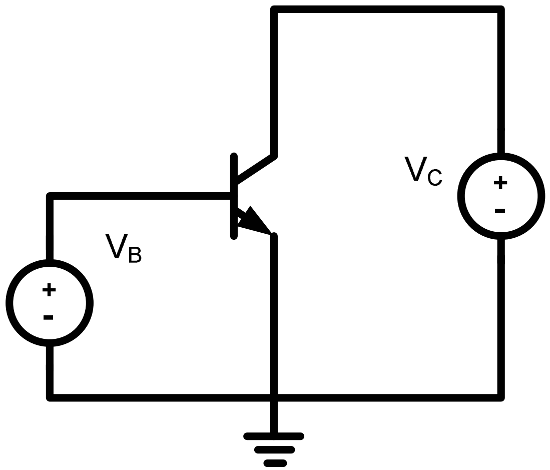
- Les charges (+) <u>entrent</u> dans B
- Les charges (+) <u>entrent</u> dans C
- Les charges (-) entrent dans E
  - Equivalent: (+) <u>**SORTENT**</u> de E



1re Equation: $I_C+I_B=I_E$

Polarisation

- On aimerait que BE direct et BC inverse
- Comment faire ca? La facon naïve:



- On deviendra plus elegant plus tard

Caracteristique des BJT

- Un petit I_B donne gros I_C
  - C'est une caracteristique importante des BJT
  - De combien est-ce que I_C est plus gros que I_B?
- Caracteristique des transistors: β.

$$\beta = \frac{I_C}{I_B}$$

Gain de courant
"emetteur commun"

- Certains utilisent α a la place:

$$\alpha = \frac{I_C}{I_E} = \frac{\beta}{\beta + 1}$$

Gain de courant
"base commune"

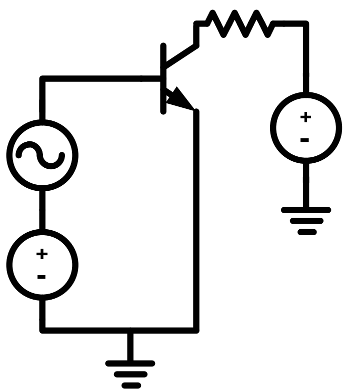
β aussi connu sous le nom h_{fe} dans plusieurs fiches techniques

Caracteristique des BJT

- En region active:
  - En augmentant I_B ca augmenterait I_C
  - En baissant I_B ca baisserait I_C
- Conclusion intermediaire importante:
  - Puisque I_C est β fois plus gros que I_B, I_C sera une version <u>amplifiee</u> de I_B
- Donc, signal V_B donne un courant I_B:
  - Le signal I_C, qui est proportionnel a I_B, varie en fonction de V_B (pas necessairement proportionnel)

Polarisation

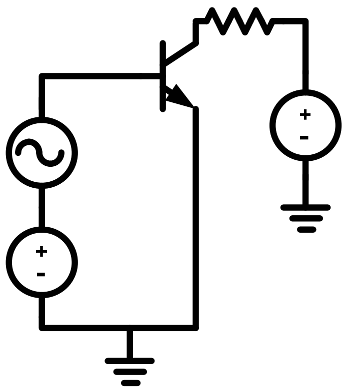
- On se repete:
  - Le signal V_B donne un courant I_B qui me donne I_C a cause du β.
- Parfois, on veut voltage en entrée (V_B) et voltage a la sortie (V_C):
  - On fait passer I_C par une resistance



V_C varie maintenant en fonction de V_B

Polarisation

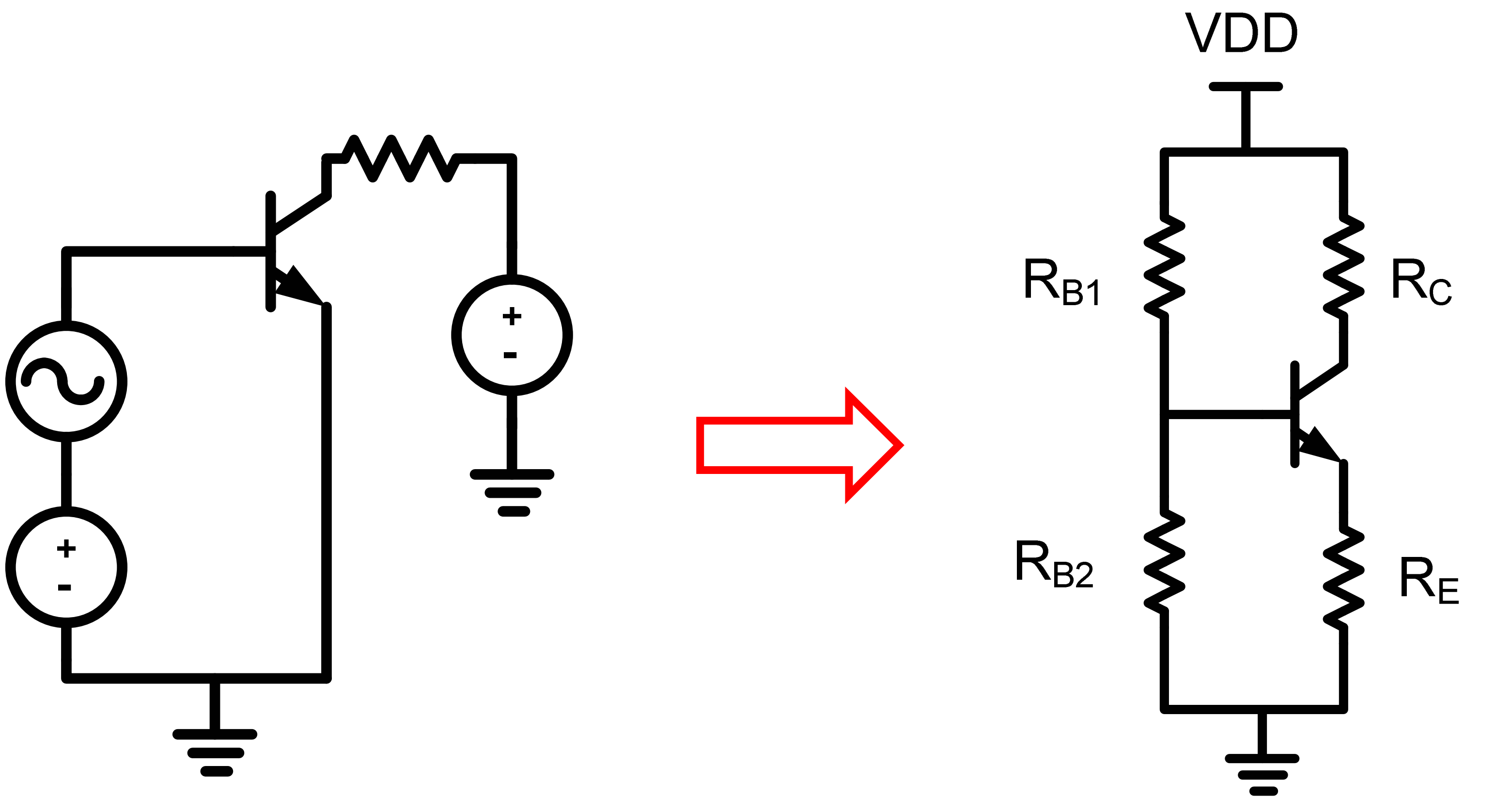
- En appliquant un signal V_B:
  - On obtient un courant I_B
  - I_B est copie a I_C qui est β fois plus gros
  - I_C est multplie par R pour donner V_C
- On pourrait donc s'attendre a ce qui V_C soit plus gros que V_B



Si l'entrée etait V_B et que la sortie etait V_C,
on pourrait dire que ce circuit est un amplificateur
(pas totalement vrai!)

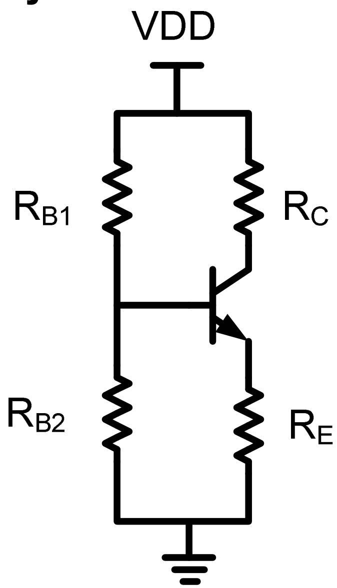
Polarisation

- Facon un peu plus elegante avec circuits:



Polarisation

- Il y a beaucoup de choses qui arrivent dans ce circuit.
  - Il y a R_{B1} et R_{B2} pour controler V_B
  - R_C transforme le courant en tension
  - R_E “ajuste” le courant (sera clair bientot)



En appliquant un signal AC a V_B,
on aurait une plus grosse version V_C

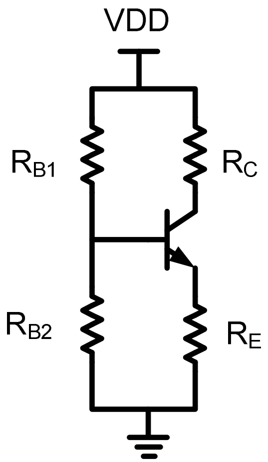
Polarisation

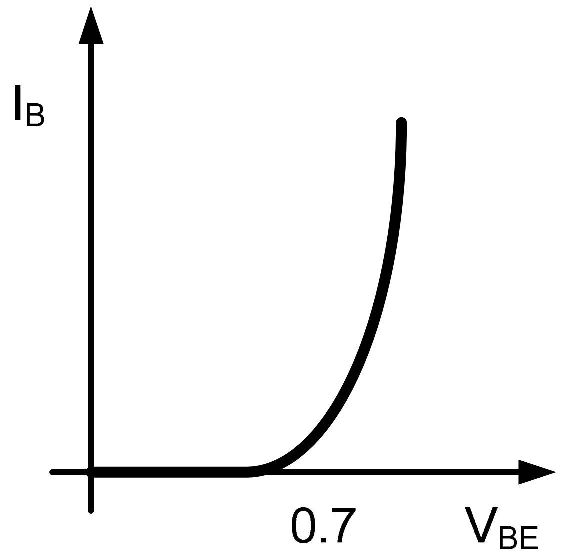
- Pour pouvoir creer un amplificateur il faut passer par 2 etapes:
  - Mettre le circuit en region active
  - Appliquer un signal a l’entrée
- Ca se dit aussi d’une autre facon:
  - Faire l’analyse DC
  - Faire l’analyse AC/petit-signal ← C’est quoi ca?!
- Commencons par l’analyse DC…

Commencons avec la jonction BE

Analyse DC

- Jonction BE est une diode
  - Avec moins que 0.7v, ca ne conduit pas
  - Apres 0.7v, ca peut fournir “n’importe” quel courant
  - C’est comme si c’etait un court-circuit a 0.7v
- On se fait une regle (en DC): si ca conduit, V_{BE}=0.7





Analyse DC

- On a assez de regles pour commencer l'analyse DC.
- Premiere liste d'equations:

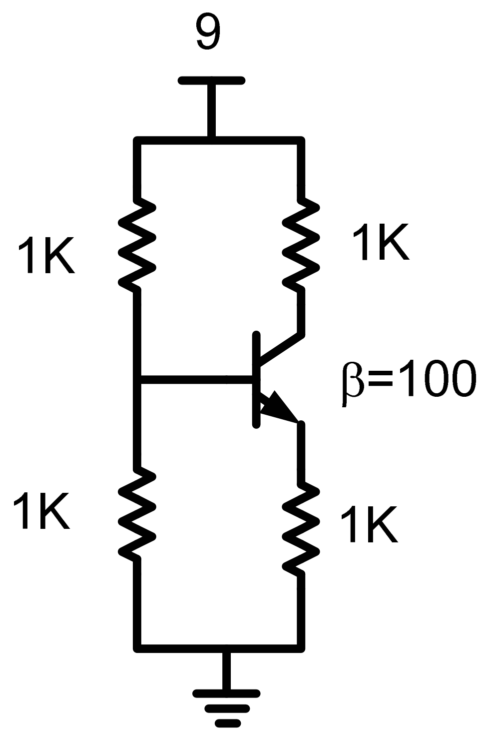
$$I_E = I_B + I_C$$

$$V_{BE} = 0.7$$

$$\beta = \frac{I_C}{I_B}$$

Exemple

- Faites l'analyse DC de ce circuit:
  - Trouvez I_B, I_C et I_E.
  - Trouvez V_B, V_C, V_E
  - Dans quelle region fonctionne ce transistor?



Exemple

- Le transistor peut operer dans 4 regions d'operation differentes:
    - Chaque region a ses propres equations
- On ne sait pas, a priori, dans quelle region le BJT se trouve
    - Il faut faire une hypothese, utiliser les equations associees a cette hypothese et verifier l'hypothese
- On va deviner qu'on est en region active..

Jonction BE: Conduit

Jonction BC: Bloque

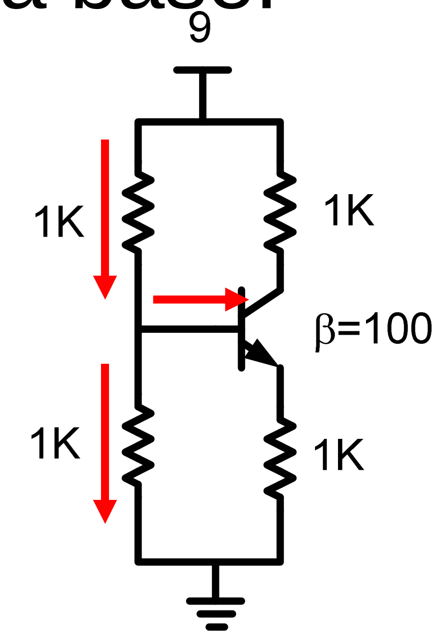
Exemple

- On ecrit l'equation de courant a la base:

$$\frac{VDD - V_B}{RB1} = I_B + \frac{V_B}{RB2}$$

- On isole V_B:

$$\frac{\frac{VDD}{RB1} - I_B}{\left(\frac{1}{RB2} + \frac{1}{RB1}\right)} = V_B$$



- 1 equation et 2 variables V_B et I_B

Il faut utiliser plus d'equations…

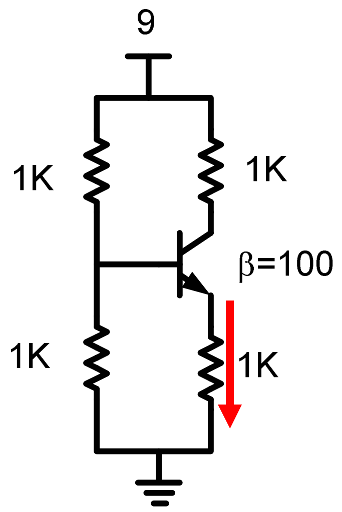
Exemple

- On ecrit une autre equation a l'emetteur:

$$V_E = I_E R_E$$

- On avait l'equation pour V_B et maintenant on a celle pour V_E
  - Or on sait que $V_{BE}=V_B-B_E=0.7$, donc:

$$V_{BE} = V_B - V_E = \frac{\frac{VDD}{RB1} - I_B}{\left(\frac{1}{RB2} + \frac{1}{RB1}\right)} - I_E R_E = 0.7$$



Exemple

- On recopie l'equation de tantot:

$$\frac{\frac{VDD}{RB1}-I_B}{\left(\frac{1}{RB2}+\frac{1}{RB1}\right)}-I_E R_E = 0.7$$

- On isole I_E:

$$\frac{\frac{\frac{VDD}{RB1}-I_B}{\left(\frac{1}{RB2}+\frac{1}{RB1}\right)}-0.7}{R_E} = I_E$$

- On est revenu avec 2 variables I_B et I_E:
  - Bonne nouvelle, il y a une relation qui les lie...

Exemple

- On utilise les equations suivantes:

$$I_E = I_B + I_C \qquad\qquad I_C = \beta I_B$$

- Pour trouver la relation entre I_B et I_E

$$I_E = (\beta + 1) I_B$$

- On se retrouve avec:

$$\frac{\dfrac{\dfrac{VDD}{RB1} - I_B}{\left(\dfrac{1}{RB2} + \dfrac{1}{RB1}\right)} - 0.7}{R_E} = (\beta + 1) I_B$$

Il faut maintenant isoler I_B

Exemple

- Etape intermediaire:

$$\frac{\frac{VDD}{RB1} - I_B}{\left(\frac{1}{RB2} + \frac{1}{RB1}\right)} - 0.7 = (\beta + 1) I_B R_E + \frac{I_B}{\left(\frac{1}{RB2} + \frac{1}{RB1}\right)}$$

- Resultat final:

$$I_B = \frac{\frac{\frac{VDD}{RB1}}{\left(\frac{1}{RB2} + \frac{1}{RB1}\right)} - 0.7}{(\beta + 1) R_E + \frac{1}{\left(\frac{1}{RB2} + \frac{1}{RB1}\right)}}$$

Tous ces symboles ont des valeurs connus

Exemple

- On substitue avec les chiffres…

$$I_B = \frac{3.8}{101500} = 37.4\mu A$$

$$V_E = 3.8V$$

$$I_C = \beta I_B = 3.74mA$$

$$V_B = 4.5V$$

$$I_E = I_C + I_B = 3.7774mA$$

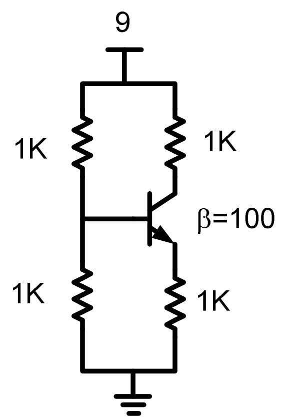
$$V_C = VDD - I_C R_C = 9 - 3.74 = 5.26V$$

- On verifie la region d'operation
  - EB: polarisation directe
  - CB: polarisation inverse
  - Region active

Ca confirme l'hypothese et on a fini…

Note importante

- Certains calculent V_B par diviseur de tension
  - C'est seulement une approximation
  - Ce n'est pas exacte puisqu'il existe un courant qui entre dans la base (I_B)
- Ne faites pas ca en examen!
  - Faites-le dans la vraie vie, parce que c'est rapide..



Dans notre exemple, ca donne 4.5v (comme un diviseur de tension): ce ne sera pas toujours le cas

Exemple (seul)

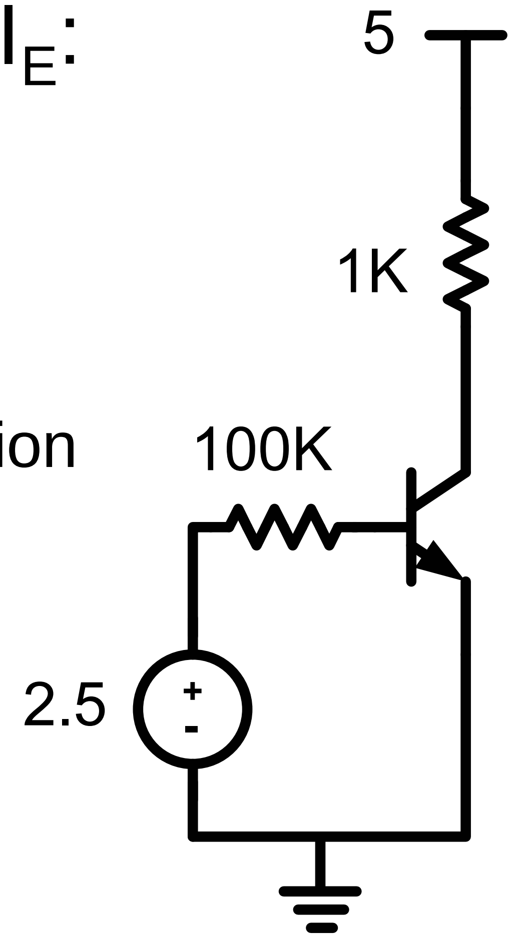
- Calculez V_B, V_C, V_E, I_C, I_B et I_E:
- Etapes suggerees:
  - Faire semblant que ca conduit

    $$V_{BE}=0.7$$

  - Faire semblant que c'est en region active

    $$I_C=\beta I_B$$

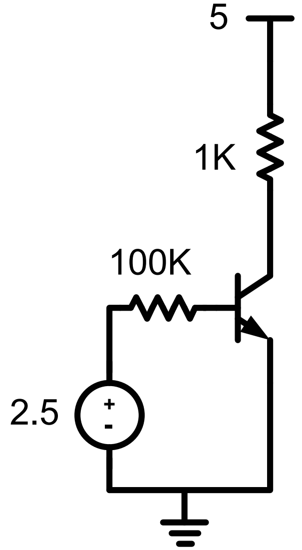
  - Confirmer les hypotheses



Exemple (seul)

- On fait l'hypothese que:
  - Le transistor fonctionne en region active
- On a V_{BE}=0.7
- Puisque V_E=0, la tension V_B=0.7
- Le courant

$$\frac{2.5-0.7}{100K}=18\mu A$$



Exemple (seul)

- Courant au collecteur en region active:

$$I_C = \beta_{\max} I_B = 1.8mA$$

- Et la tension au collecteur est:

$$V_C = VDD - I_C R_C = 5 - 1.8 = 3.2v$$

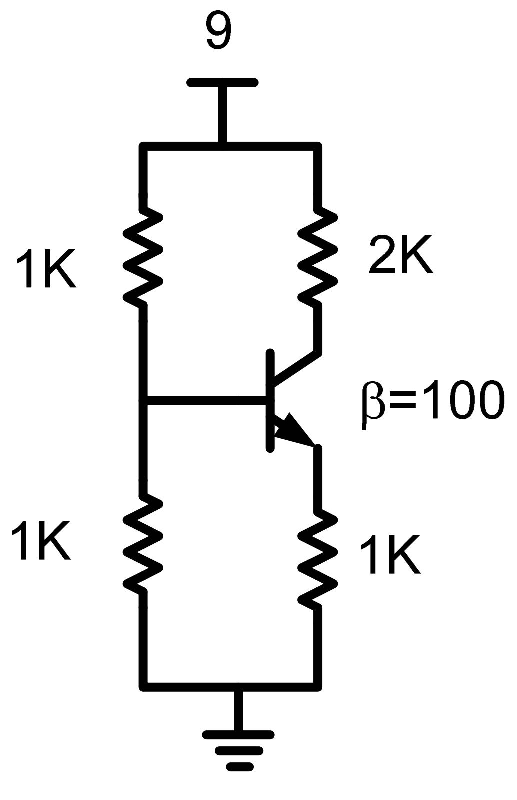
- Region active confirmee: diode BC inverse
- Finalement, il reste le courant a l'emetteur

$$I_E = I_B + I_C = 1.818mA$$

Et on a fini…

Saturation

- Analysons le premier circuit avec un petit changement:



On a augmente la resistance au collecteur

Saturation

- On remarque que l'analyse se fait de la meme facon jusqu'au calcul de V_C.
  - Hypothese de la region active
  - V_{BE}=0.7 et $I_C=\beta I_B$
  - On calcule I_B:

$$I_B = \frac{3.8}{101500} = 37.4\mu A$$

  - Et on calcule I_C:

$$I_C = \beta I_B = 3.74mA$$

Memes reponses que tantot

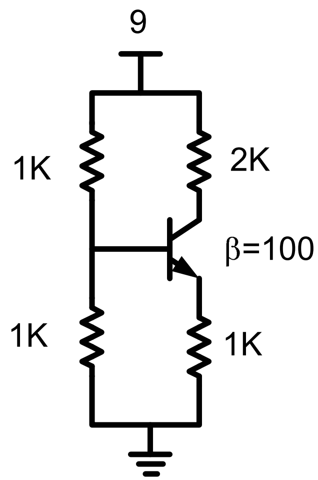
Il faut maintenant calculer V_C

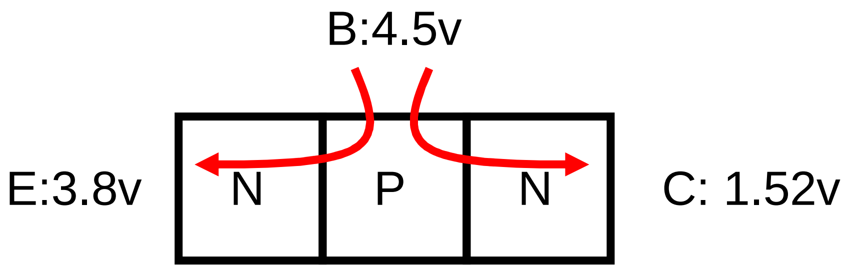
Saturation

- En calculant V_C, on voit le suivant:

$$V_C = VDD - I_C R_C = 9 - 7.48 = 1.52V$$

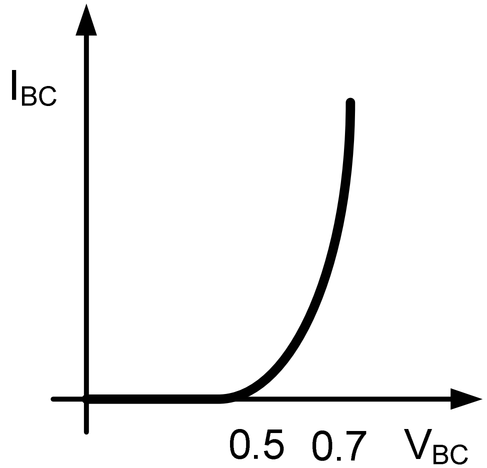
- Sachant que V_B est 4.5v, on se retrouve avec BC qui conduit
  - On n'est plus en active: <u>on est rendu en saturation</u>





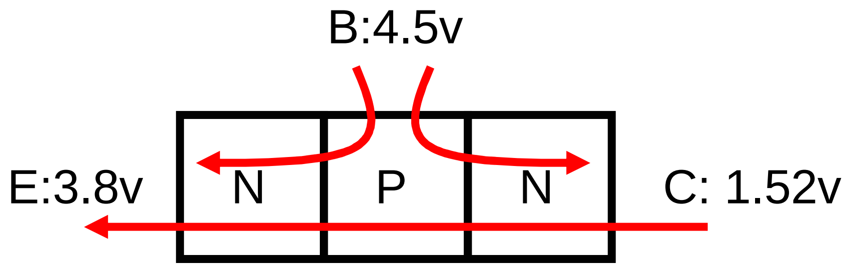
Saturation

- On est en saturation quand V_C est faible
  - Ca fait que la diode BC conduise (pas bon)
- Une diode conduit pleinement a 0.7v mais elle fourni deja un courant a 0.5v
  - 0.5v sera notre condition pour dire qu'on est en saturation

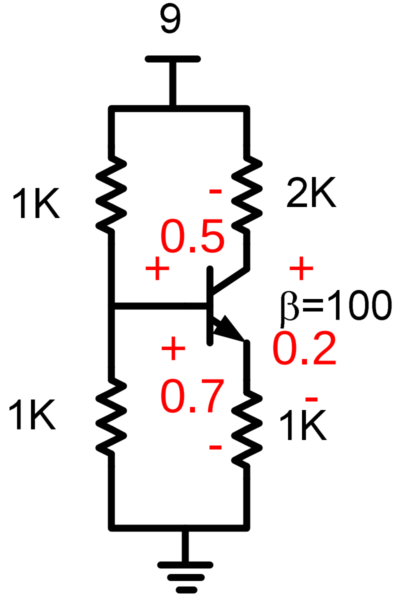


Saturation

- Saturation: Gros $I_C R_C$ fait baisser V_C
- V_C faible augmente I_{BC}
- I_{BC} va CONTRE I_C et le fait baisser



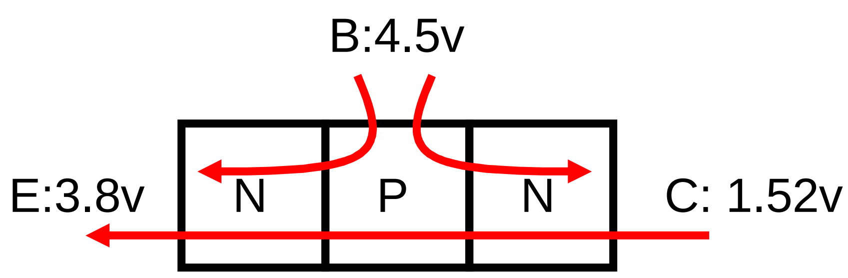
- Ca empeche V_C de trop baisser
  - Ca se stabilise quand V_{BC} autour de 0.5v
  - Autrement dit: V_{CE} autour de 0.2v



On dira que V_{CESAT}=0.2v

Saturation

- En saturation, on a un courant I_{BC}:
  - Le courant I_{BC} fait baisser I_C
  - Donc, en saturation, β diminue
  - On peut (doit) trouver la nouvelle valeur de β
- On devrait definir des nouveaux termes:
  - β_{max} pour la valeur de β specifie
  - β_{force} pour la valeur de β en saturation



Saturation

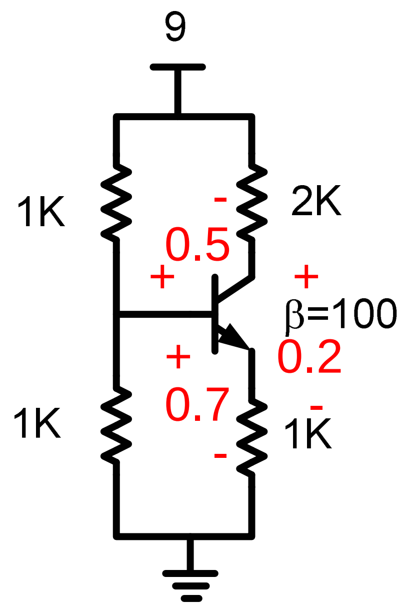
- On est maintenant bien equipe pour retourner au probleme
- On a dit que V_C allait etre 1.52v si on se trouvait en region active
- Le probleme c'est qu'avec 1.52v, on n'est plus en active: on est en saturation
  - $I_C=\beta_{max}I_B$ ne fonctionne plus
  - Il faut tout recommencer du debut avec la nouvelle hypothese!

Allons voir comment analyser des circuits en saturation…

Saturation

- On commence par dire que $V_{CE}=V_{CESAT}$
- Ca veut aussi dire que $V_C=V_B-0.5$

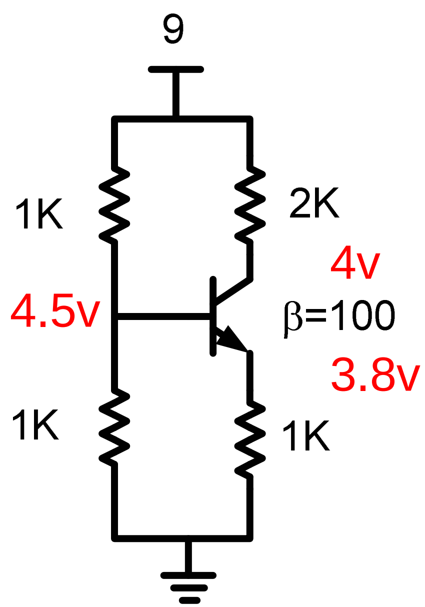
$$V_C = V_B - 0.5 = 4.5 - 0.5 = 4v$$



- Le courant I_C est donc:

$$I_C = \frac{VDD - V_C}{R_C} = \frac{9-4}{2K} = 2.5mA$$

Saturation



- Le courant I_E est:

$$I_E = \frac{V_E}{R_E} = \frac{3.8}{1K} = 3.8mA$$

- A partir de ca, on trouve I_B:

$$I_B = I_E - I_C = 3.8mA - 2.5mA = 1.3mA$$

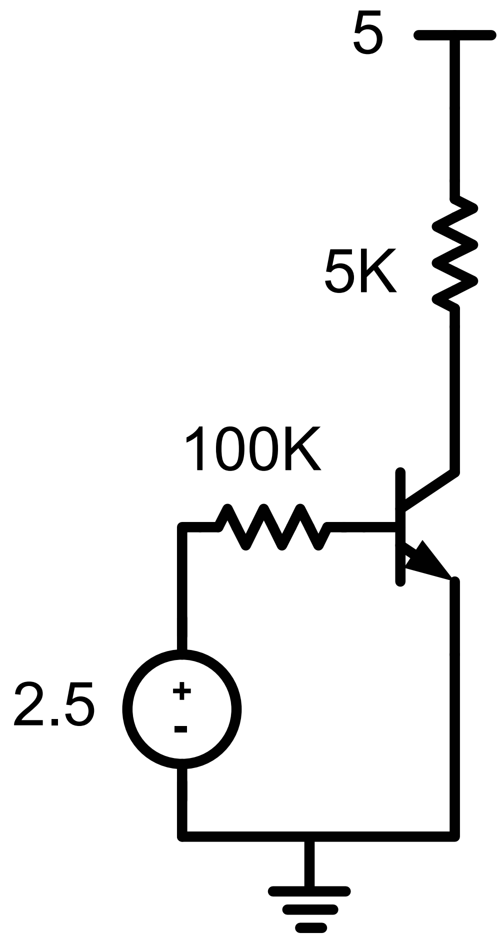
- Avec I_C et I_B, on trouve β_{force}:

$$\beta_{force} = \frac{I_C}{I_B} = \frac{2.5}{1.3} = 1.92$$

Le b maximal (en active) etait 100… en saturation (ici), on est tombe a 1.92

Exemple (seul)

- Etapes:
  - Faire semblant que ca conduit
  - Faire semblant que c'est en region active
  - Confirmer/infirmer l'hypothese
  - Si saturation, $V_{CE}=V_{CESAT}=0.2$
  - Calculer β_{force}



Exemple (seul)

- Les etapes sont les memes jusqu'au point ou on trouve V_C.
- Cette fois-ci, on trouve VC

$$V_C = VDD - I_C R_C = 5 - 9 = -4$$

- Ca a l'air d'etre en saturation.
- On reprend l'analyse avec V_{CE}=V_{CESAT}
- Donc, V_C=0.2

Exemple (seul)

- Courant I_C:

$$I_C = \frac{VDD - V_C}{R_C} = \frac{5 - 0.2}{5K} = 0.96mA$$

- Dans ce cas-ci I_B ne change pas:

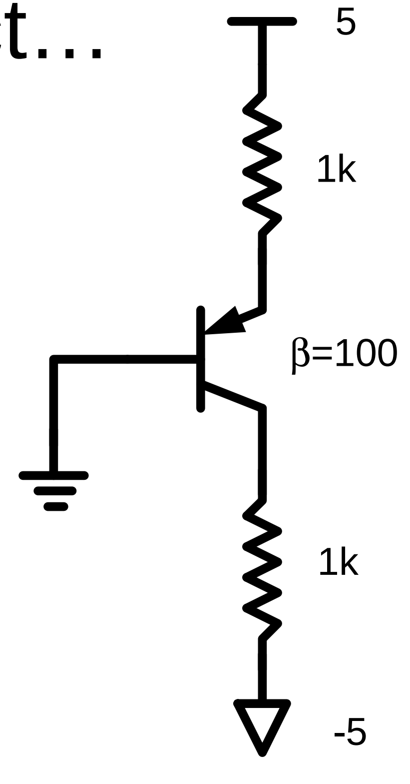
$$\frac{2.5 - 0.7}{100K} = 18\mu A$$

- Et β_{force} est:

$$\beta_{force} = \frac{I_C}{I_B} = \frac{0.96mA}{18\mu A} = 53.3$$

PNP

- On a vu l'analyse avec NPN
- Faites l'analyse DC avec PNP pour voir si tout est correct…

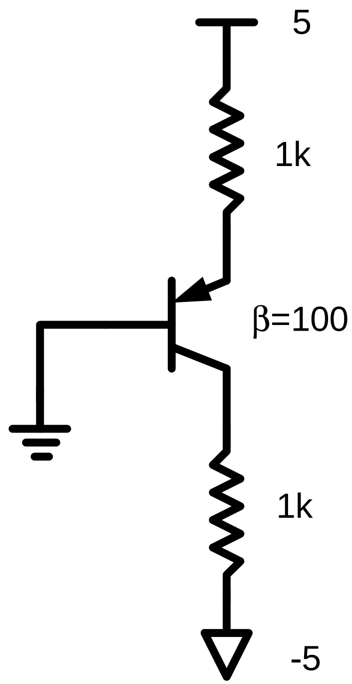


PNP

- L'analyse commence de la meme facon:
  - Hypothese: region active
- But: trouver V_C

$$V_C = V_{CC} - I_C R_C$$

- Il nous manque I_C
  - Mais on sait que $I_C = \beta I_B$
- I_B n'est pas facile a trouver
  - Essayons I_E



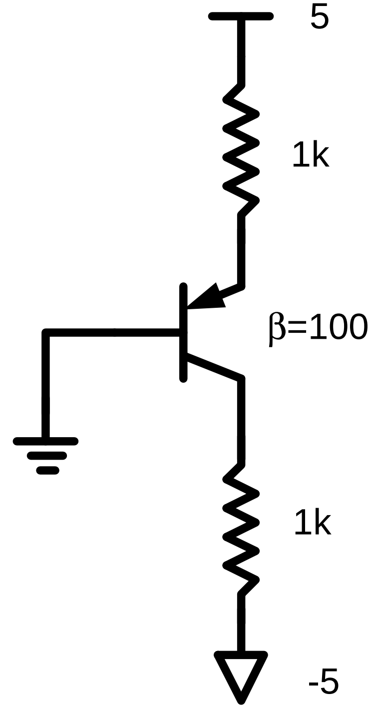
PNP

- Le courant I_E est donne par:

$$I_E = \frac{5 - V_E}{R_E}$$

- Avec $|V_{BE}|$=0.7, on trouve

$$V_E = 0 + 0.7 \quad \Rightarrow \quad I_E = \frac{5 - 0.7}{R_E}$$



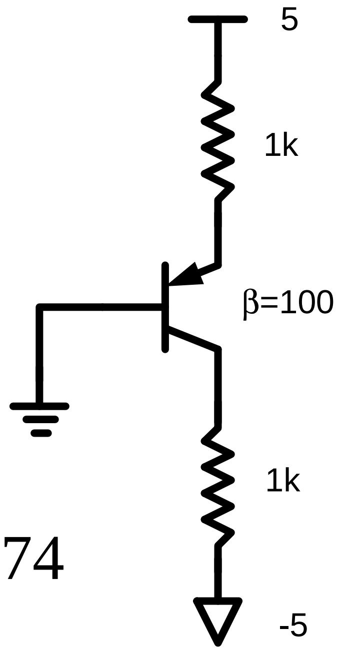
- On sait que I_C et I_E sont lies par β

$$I_C = \left(\frac{\beta}{\beta + 1}\right) I_E = \frac{\beta}{(\beta + 1)} \frac{(5 - 0.7)}{R_E}$$

PNP

- Finalement, on trouve V_C:

$$V_C = -5 + R_C I_C = \frac{R_C \beta (5 - V_E)}{(\beta + 1) R_E}$$



- On met les chiffres:

$$V_C = -5 + \frac{1K \cdot 100(4.3)}{(101)1K} = -5 + \frac{100(4.3)}{(101)} = -0.74$$

- Tout est coherent: on est en region active

Passons maintenant a l'analyse AC

Analyse AC

- Nous savons comment se comportent les transistors en DC
  - Le but: mettre le transistor en region “active”
- Passons maintenant a l’analyse AC
  - Comment se comporte mon transistor (en region active) face a un sinus en entrée?
- Pour analyser ca, revenons aux equations de base…

Analyse AC

- Courant dans jonction PN augmente exponentiellement avec la tension

$$I_D = I_S\left(e^{V_D/kT} - 1\right)$$

- Nos BJTs sont composes de diodes PN.
  - I_B sera donc donne par:

$$I_B = I_S e^{V_{BE}/kT} = I_S e^{V_{BE}/V_T}$$

- V_T=kT: Boltzmann * Temperature absolue
  - A la temperature de la piece, V_T=kT=25mV

I_S est un parametre de la technologie utilisee

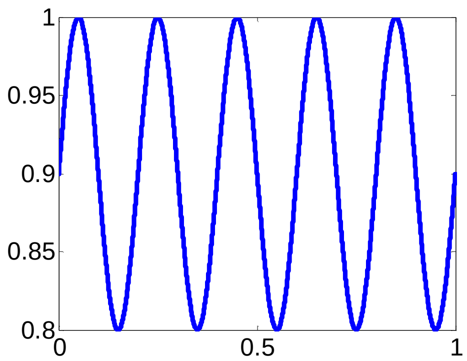
Analyse AC: Gros signal

- Sachant que I_C est βI_B, on trouve I_C:

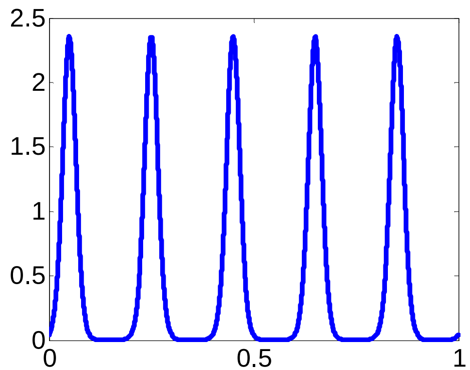
$$I_B = I_S e^{V_{BE}/V_T} \Longrightarrow I_C = \beta\left(I_S e^{V_{BE}/V_T}\right)$$

- On a donc une relation entre I_C et V_{BE}
  - Si on mettait un sinus de 0.1v a V_{BE}, quelle serait la valeur de V_C ?

    (V_C est proportionnel a I_C)



Entree

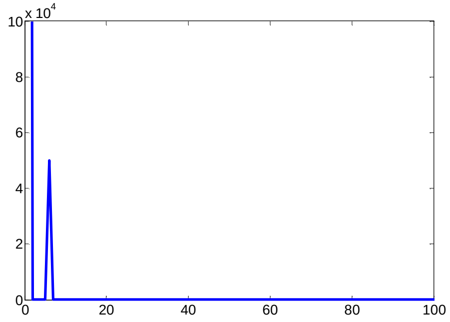


Sortie

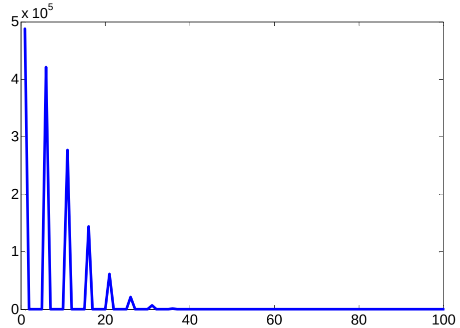
Plus gros, mais pas tres “sinus”!

Analyse AC: Gros signal

- Analysons le spectre frequentiel:



Entree



Sortie

- Les frequences en sortie et en entrée ne sont pas les memes!
  - Mon systeme est non-lineaire
  - Ca aurait du etre evident: c'est un exponentielle

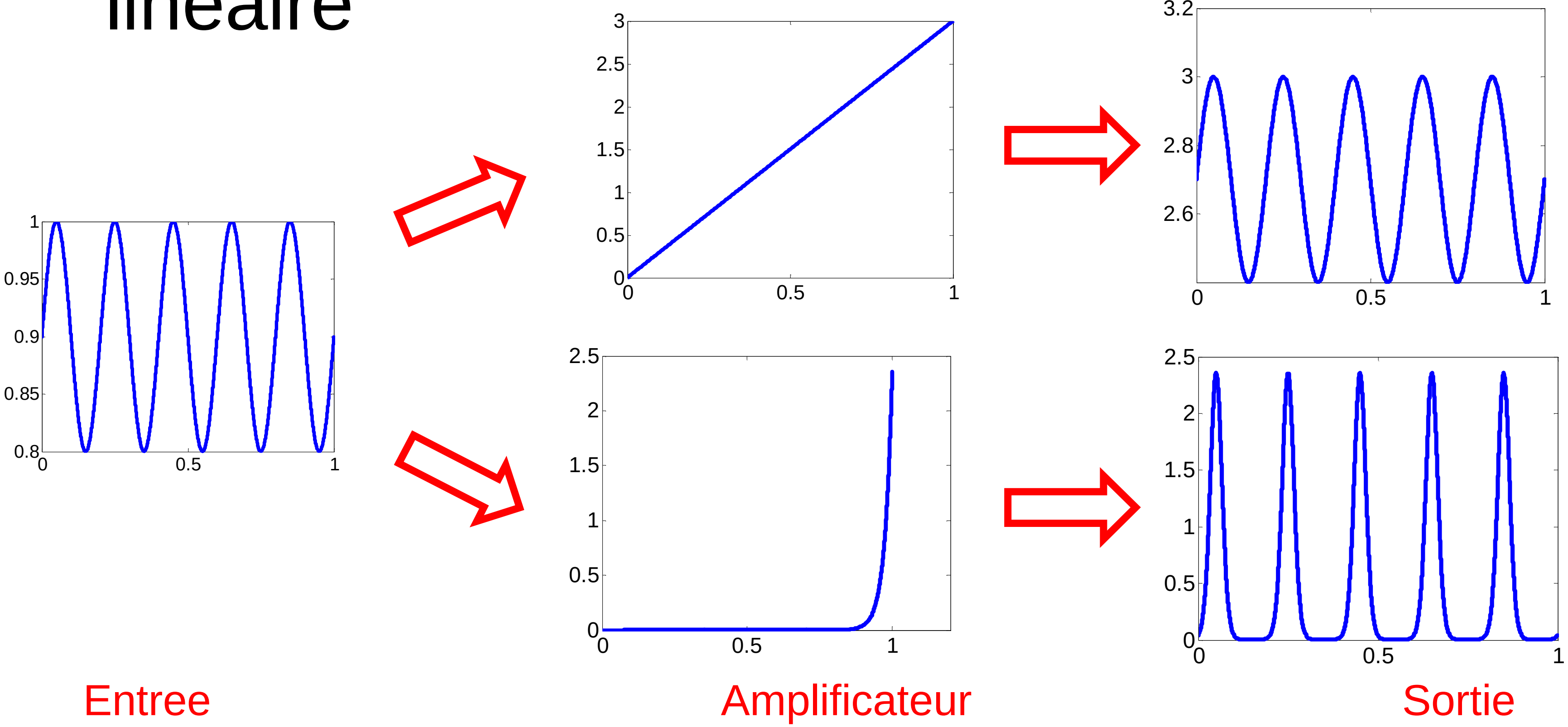
$$I_C = \beta\left(I_S e^{V_{BE}/V_T}\right)$$

Analyse AC: Gros signal

- Amplificateur qui deforme le signal a l'entrée: pas tres utile!
- Peut-on quand meme s'en servir?
    - Oui!
- Technique typique:
    - Linearisation (faire semblant que c'est lineaire)
- Allons voir ce que ca veut dire…

Analyse AC: Gros signal

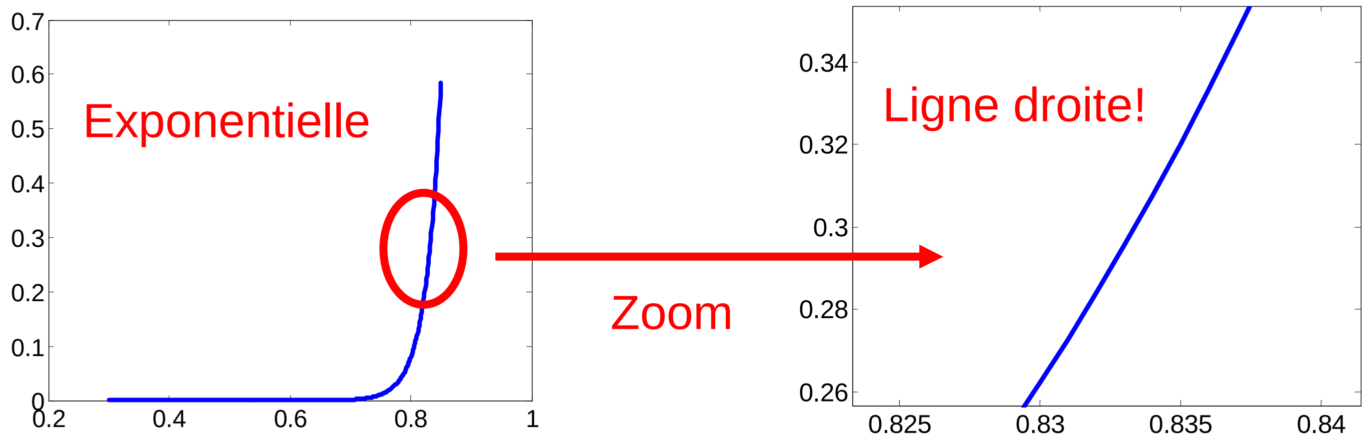
- Un amplificateur devrait avoir une relation lineaire



Pour amplifier on a besoin "d'une ligne droite" (gain = pente)

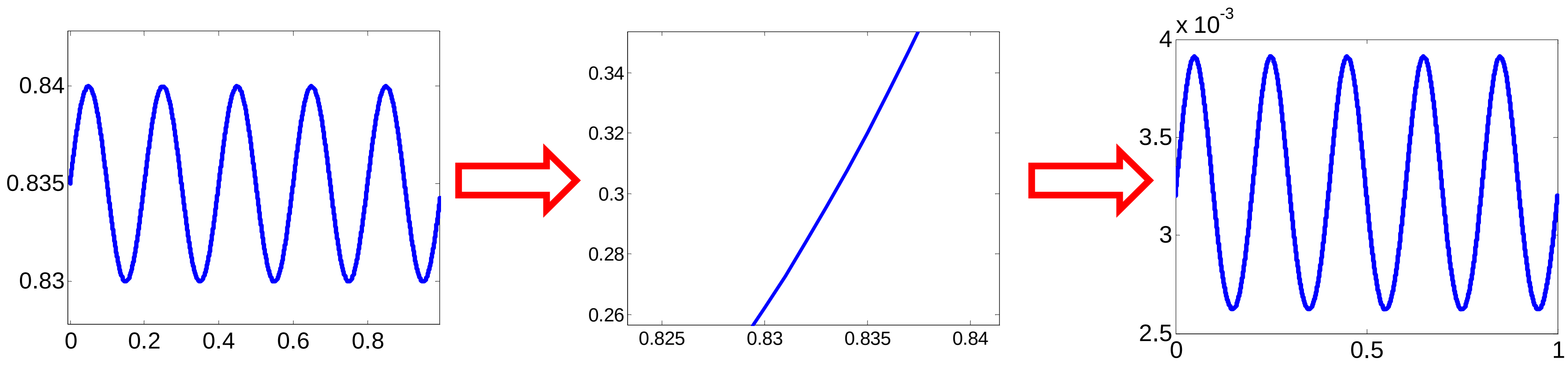
Analyse AC: Petit signal

- Cependant, j'ai une exponentielle…
  - Comment "transformer" une exponentielle en ligne droite?!
- Solution
  - En "zoomant" assez, ca deviendrait lineaire



Analyse AC: Petit signal

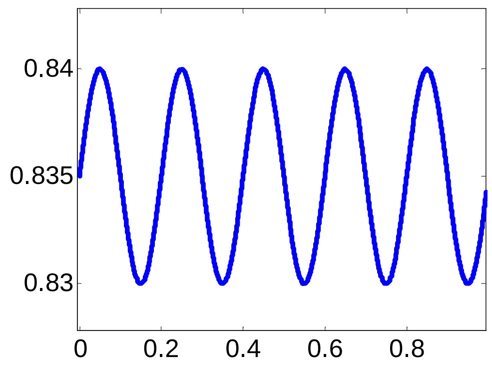
- Dans mon exemple:
    - Si mon entrée etait entre 0.83v et 0.84v, j'aurais un systeme lineaire.
    - C'est-a-dire: si mon entrée est un sinus entre 0.83v et 0.84v, sortie sera un beau sinus…



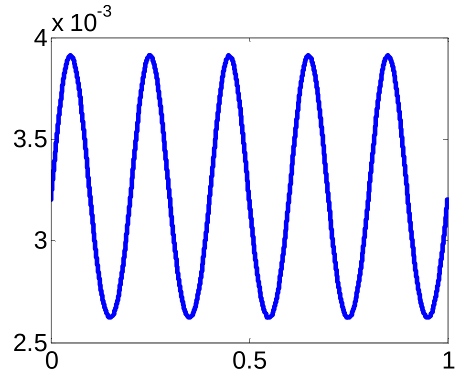
Entree Amplificateur Sortie

Analyse AC: Petit signal

- L'entrée a 2 parties:
  - La partie DC: 0.835v
  - Le partie AC: le sinus de 0.005v



- La sortie a 2 parties:
  - La partie DC: ~3.25mA
  - La partie AC: le sinus de ~0.6mA



On passera ce courant par une resistance pour le transformer en voltage

Analyse AC: Petit signal

- Traduisons tout ca en maths…
- On connait le lien entre V_{BE} et I_C:

$$I_C \cong \beta\left(I_S e^{V_{BE}/V_T}\right)$$

- Maintenant, a la place d'avoir V_{BE} (DC) a l'entrée, on va avoir $V_{BE}+v_{be}$ (DC+AC)
- Le courant de sortie aura aussi DC+AC:

$$I_C + i_C = I_S e^{(V_{BE}+v_{be})/V_T}$$

Equation pas tres interessante… manipulons la un peu

Analyse AC: Petit signal

- On separe l'exponentielle en 2 sections:

$$I_C + i_C = I_S e^{V_{BE}/V_T} e^{v_{be}/V_T}$$

- Or, on sait que la partie a gauche est egale a I_C:

$$I_C + i_C = \underbrace{I_S e^{V_{BE}/V_T}}_{I_C} e^{v_{be}/V_T} \Rightarrow \quad I_C + i_C = \underbrace{I_C} e^{v_{be}/V_T}$$

- On laisse ca de cote pour ouvrir une petite parenthese...

Analyse AC: Petit signal

- On sait qu'une fonction peut etre representee par une serie de Taylor
- On prend par exemple:

$$\sin(x) = x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} + \ldots \qquad \cos(x) = 1 - \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} + \ldots \qquad e^x = 1 + \frac{x}{1!} + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \ldots$$

- Plus que x est gros, plus de termes sont requis pour etre precis
    - Plus x est petit, moins de termes sont requis…

Analyse AC: Petit signal

- Revenons a l'equation de tantot:

$$I_C + i_C = I_C e^{v_{be}/V_T}$$

- Remplacons l'exponentielle par sa serie de Taylor:

$$e^x = 1 + \frac{x}{1!} + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \ldots \Rightarrow e^{v_{be}/V_T} = 1 + \frac{(v_{be}/V_T)}{1!} + \frac{(v_{be}/V_T)^2}{2!} + \frac{(v_{be}/V_T)^3}{3!} + \ldots$$

- Notre equation deviendrait:

$$I_C + i_C = I_C \underbrace{\left(1 + (v_{be}/V_T) + \frac{(v_{be}/V_T)^2}{2!} + \frac{(v_{be}/V_T)^3}{3!} + \ldots\right)}$$

Analyse AC: Petit signal

- Si x est <u>assez</u> petit, pourrait ne garder que les 2 premiers termes de la serie
  - Donc, si v_{be}/V_T est assez petit, on peut remplacer l'exponentielle par $1+(v_{be}/V_T)$

$$I_C + i_C = I_C\left(1+\frac{v_{be}}{V_T}\right)$$

- On entre I_C dans la parenthese:

$$\underline{I_C} + i_C = \underline{I_C} + I_C\frac{v_{be}}{V_T}$$

Les I_C s'annulent

Analyse AC: Petit signal

- On recopie l'equation ici:

Si v_{be} est petit, i_c sera petit

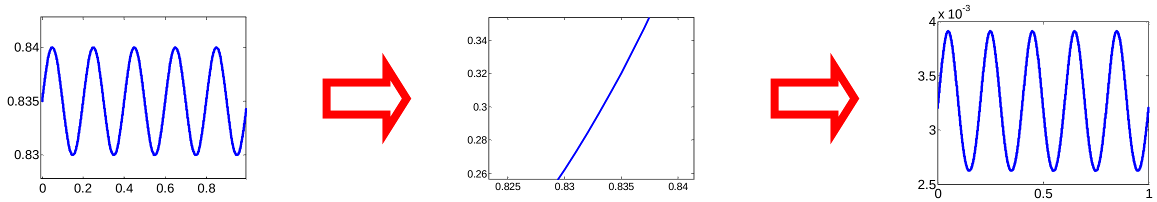
$$i_C = v_{be}\left(\frac{I_C}{V_T}\right)$$

Et si i_c est petit, I_C/V_T sera une "constante"

- Pour conformer aux regles du monde, on va donner un nom a I_C/V_T:

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

Transconductance



v_{be} g_m i_c

Analyse AC: Resume

- BJT est non-lineaire (exponentielle)
    - Pour amplifier il faut etre lineaire
- Si on “zoom” assez dans une fonction exponentielle, ca “devient” lineaire
- Pour “zoomer” il faut:
    - Appliquer un TRES PETIT signal
- i_c sera alors proportionnel a v_{be} (non-deforme)

Selon la place ou on zoom, on aura g_m different…

Analyse AC: Resume

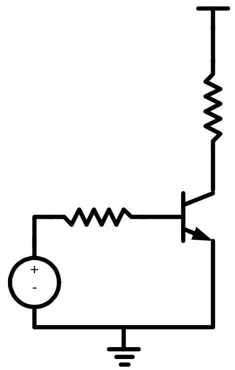
- On a un signal v_{be} qu'on veut amplifier
- On choisit le gain (gros $g_m \rightarrow$ gros gain)
- On s'arrange pour avoir le I_C necessaire:

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

- On s'assure d'etre dans la region active
- Maintenant, on peut amplifier:
  - On superpose le signal v_{be} sur V_{BE}:
  - A la sortie on aura le signal i_c superpose sur I_C

Probleme typique…

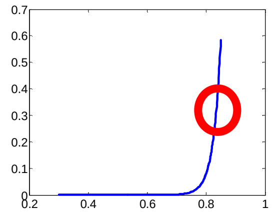
- Question typique: Trouvez le “gain”.



- On fait l’analyse DC pour trouver les tensions et courants “approximatifs”
  - On a besoin de V_C et V_{BE} pour savoir si on est dans la bonne region d’operation.

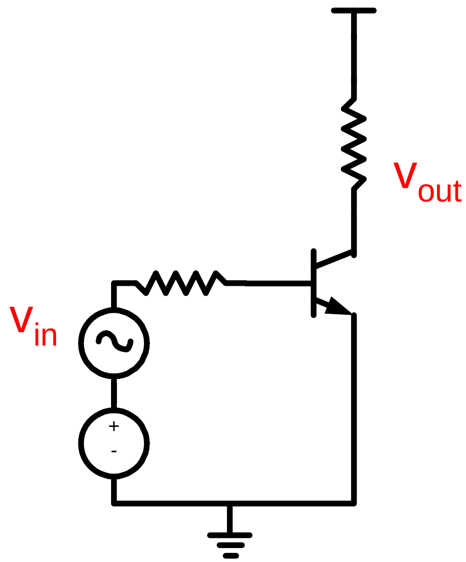
Probleme typique…

- On a besoin de I_C pour faire l'analyse petit signal
  - Avec I_C, on trouve g_m.



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

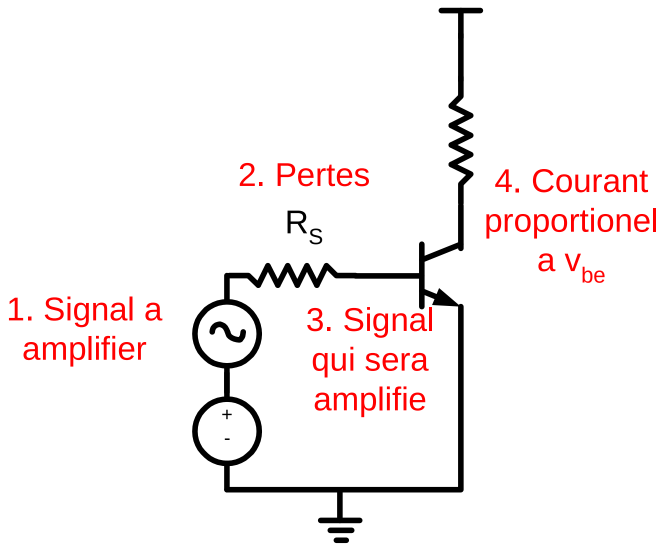
- Si on appliquait un v_{be}, on pourrait trouver le changement de i_c



Examinons le comportement de ces circuits en detail

Probleme typique…

- Le courant i_c est donne par $g_m v_{be}$.
- Cependant, on ne connait pas la valeur de v_{be}.
    - On ne connait que le signal applique v_s
    - Quelle est la relation entre v_s et v_{be}?



$$\underbrace{v_s - i_b R_S}_{\text{Perte}} = v_{be}$$

C'est un bon debut… mais c'est quoi i_b?

Analyse AC: Petit signal

- Je sais que

$$i_b = \frac{i_c}{\beta}$$

- Je sais aussi que

$$i_c = g_m v_{be}$$

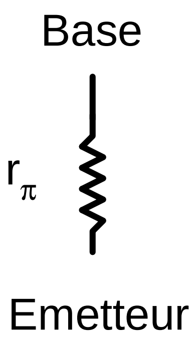
- En mettant la 2e equation dans la 1re…

$$i_b = \left(\frac{g_m}{\beta}\right) v_{be} \quad \Rightarrow \quad i_b \left(\frac{\beta}{g_m}\right) = v_{be} \quad \Leftrightarrow \quad I \cdot R = V$$

Le courant est relie a la tension par une constante… c'est la loi d'ohm!

Analyse AC: Petit signal

- Conclusion intermediaire interessante:
  - La base du transistor se comporte comme une resistance (en analyse petit signal)
  - On peut modeliser ("faire semblant que") la jonction base-emetteur avec r_π



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

Pourquoi est-ce que c'est interessant?

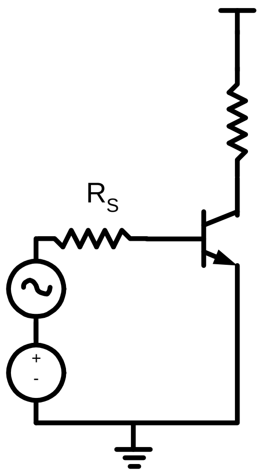
Analyse AC: Petit signal

- On disait que v_s et v_{be} sont relies par:

$$v_s - i_b R_B = v_{be}$$

- On sait maintenant que

$$i_b = \left(\frac{v_{be}}{r_\pi}\right)$$



- En substituant, on obtient ceci:

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

Analyse AC: Petit signal

- On amene v_{be} a droite et on le factorise

$$v_s = v_{be}\left[1+\left(\frac{R_S}{r_\pi}\right)\right]$$

- Et on isole v_{be}:

$$v_{be} = \frac{v_s}{1+\left(\frac{R_S}{r_\pi}\right)}$$

- Ca se re-ecrit comme ceci:

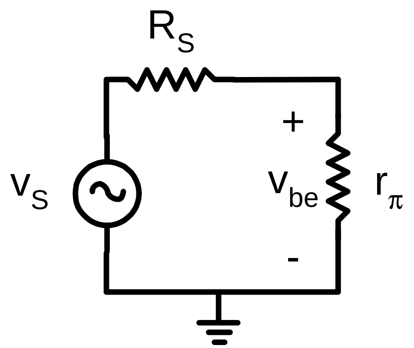
$$v_{be} = v_s\left[\frac{1}{\left(\frac{r_\pi}{r_\pi}\right)+\frac{R_S}{r_\pi}}\right] = v_s\left(\frac{r_\pi}{r_\pi + R_S}\right)$$

Ca rappelle
des souvenirs?

Analyse AC: Petit signal

- Cette equation est un diviseur de tension:

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



- Pour trouver v_{be} a partir de v_s, on n'a besoin que de calculer r_π
  - Le reste est simple…

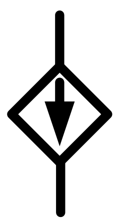
Ca ne s'applique QUE pour l'analyse petit-signal

Analyse AC: Petit signal

- On est capable de trouver v_{be} a partir de v_s
- Une fois qu'on connait v_{be}, on trouve i_c:

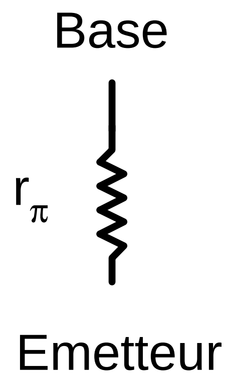
$$i_c = g_m v_{be}$$ (en petit signal)

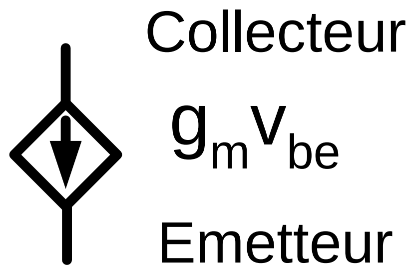
- Alors le courant i_c est comme une source de courant qui DEPEND de v_{be}
  - On peut modeliser la jonction collecteur-emetteur comme une source dependante



Modele petit signal (π)

- Voici ce qu'on a trouve:
  - BE se comporte comme une resistance
  - CE se comporte comme une source dependante

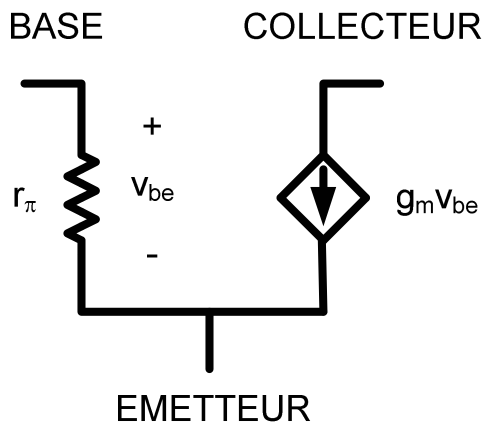




- On pourrait s'amuser a connecter ces 2 composantes ensemble

Modele petit signal (π)

- En faisant la connexion, on se retrouve avec:



- On appelle ca le modele en π
  - Quand on fait une analyse petit-signal, on peut substituer notre transistor par ca

Ok, prenons un peu de recul… c'est quoi le but de tout ca?

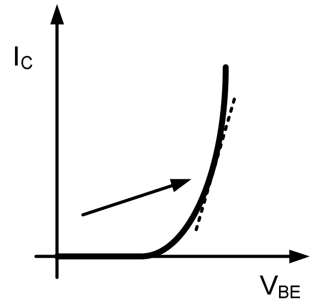
Etapes d'une analyse

- On veut analyser les circuits avec BJT
- On commence par faire analyse DC
  - On s'assure d'etre en region active
  - On trouve V_C, V_E, V_B, I_C, I_E et I_B.
- L'analyse DC est maintenant completee…

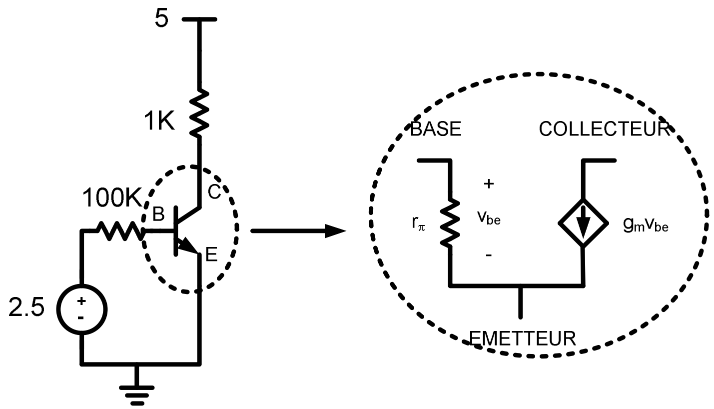
On passe a l'analyse AC (petit-signal)

Etapes d'une analyse

- En utilisant I_C, on trouve g_m et r_π



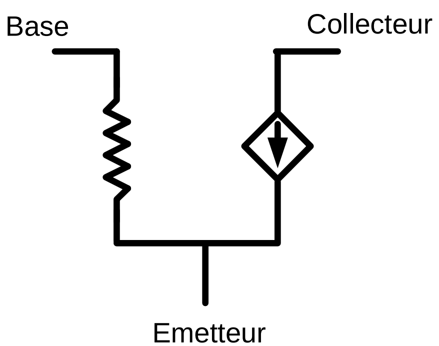
- On REMPLACE le transistor par le modele petit signal en π
- On analyse le circuit resultant
  - Cette derniere partie s'appelle l'analyse petit signal (AC)

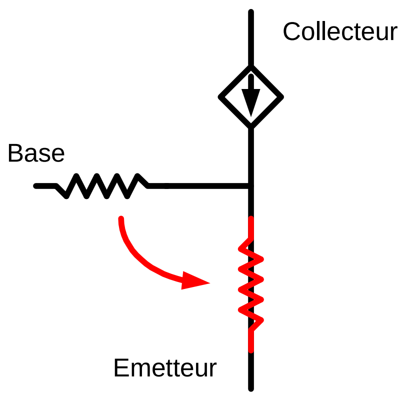


Modele petit signal (T)

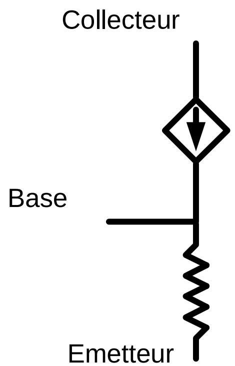
- Certains aiment le modele π tandis que d'autres preferent le modele en T
  - Les 2 modeles sont equivalents
  - Certaines analyses sont plus simples avec un modele particulier
- La difference est l'emplacement du r_π

Modele π





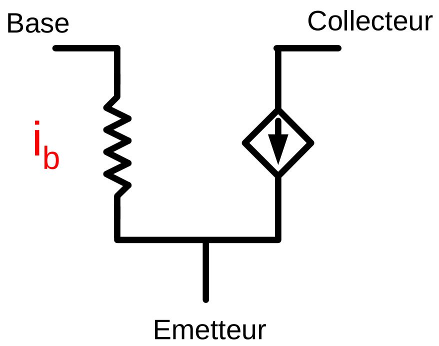
Modele T



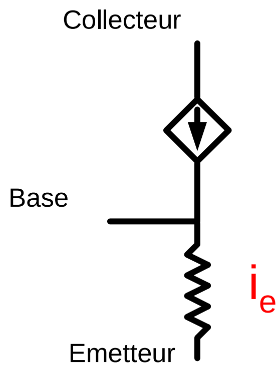
Modele petit signal (T)

- La resistance est encore entre base et emetteur
  - C'est le courant dans la resistance qui est differente
  - Sachant que v_{be} doit etre le meme, on peut ecrire l'equation suivante: $v_{be} = i_e r_e = i_b r_\pi$

Modele π



Modele T



Modele petit signal (T)

- On sait que i_e est β+1 fois plus gros que i_b

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

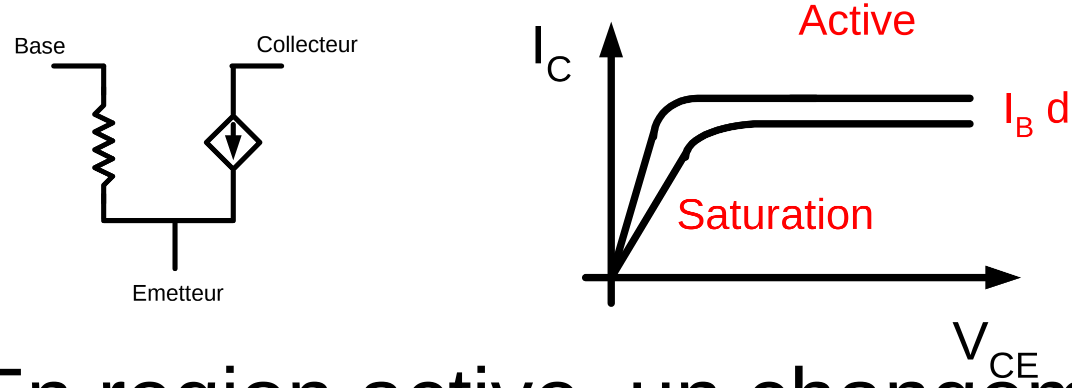
- Les i_b s'annulent et on isole r_e:

$$r_e = \frac{v_{be}}{i_e} = \frac{r_\pi}{(\beta+1)} = \frac{\beta}{(\beta+1) g_m} = \frac{\alpha}{g_m}$$

Il reste un detail…

Resistance de sortie

- En region active, on sait que $i_c = \beta i_b$
  - On voit donc que i_c ne depend PAS de v_{ce}
- On peut dessiner la courbe I_C-V_{CE}:

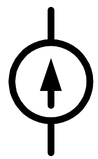


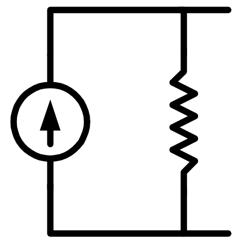
$i_c=\beta i_b$

- En region active, un changement de V_{CE} ne change rien au courant I_C

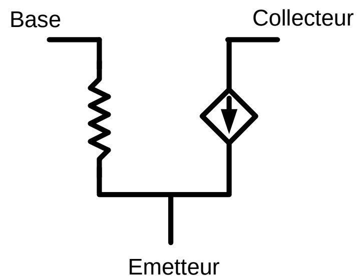
Resistance de sortie

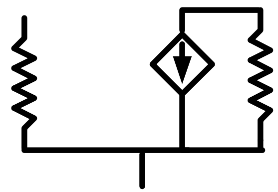
- Dans la vraie vie, on sait qu’une source de courant a une resistance de sortie:
  - Sinon, en le connectant a rien (R infini), on aura une tension infinie…





- La meme chose s’applique a notre modele

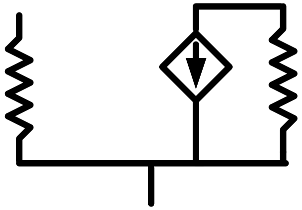


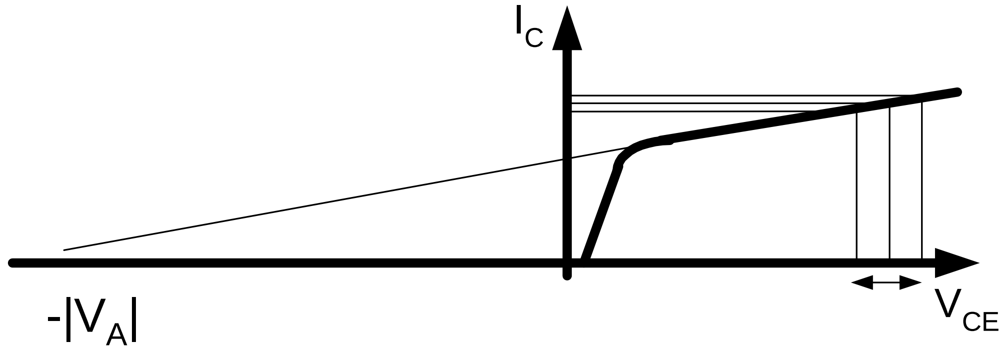


v_{ce} va commencer a affecter le courant i_c

Resistance de sortie

- Plus v_{ce} est eleve, plus ca augmente le courant i_c





- Pour caracteriser cette dependance, on utilise V_A, la tension de Early:
  - La tension ou l'extrapolation de la courbe croise 0.

V_A est un parametre connu et fourni

Resistance de sortie

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

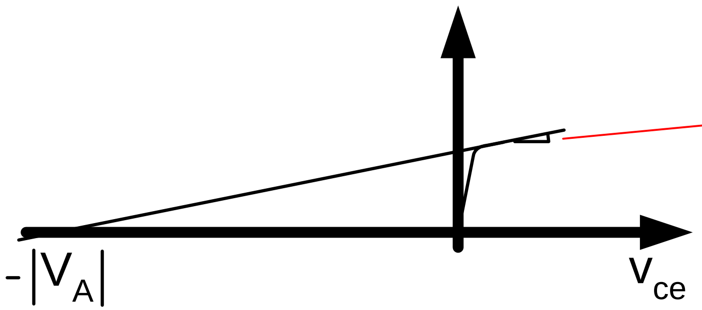
$$r_o = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{\Delta v_{ce}}{\Delta i_c}$$

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

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

Resistance de sortie

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



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

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

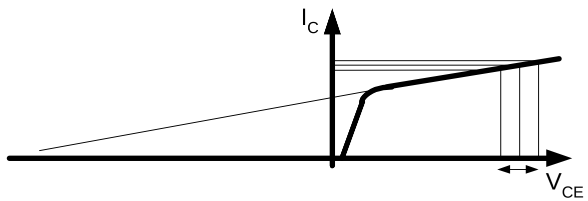
$$r_o = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{V_{CE} - \left(-\left|V_A\right|\right)}{I_C - 0} \cong \frac{\left|V_A\right|}{I_C}$$

V_A est typiquement beaucoup plus grand que V_{CE}

Resistance de sortie

- On est donc capable de calculer r_o a partir de I_C et V_A

$$r_o = \frac{|V_A|}{I_C}$$



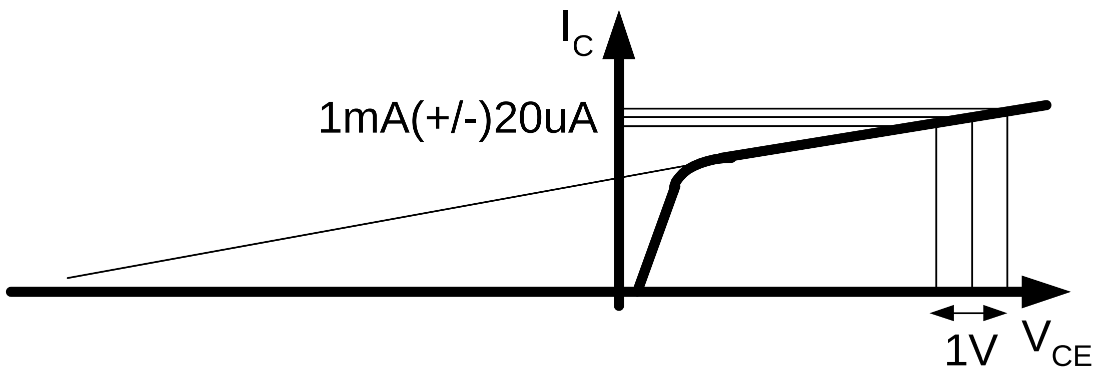
- Il faut faire attention. r_o est un parametre petit-signal valide en analyse AC
  - r_o n'est pas une vraie resistance (V/I)
  - r_o est une resistance du type AC: $\Delta V/\Delta I$

r_o se preoccupe des **variations** et non des valeurs stables

Resistance de sortie

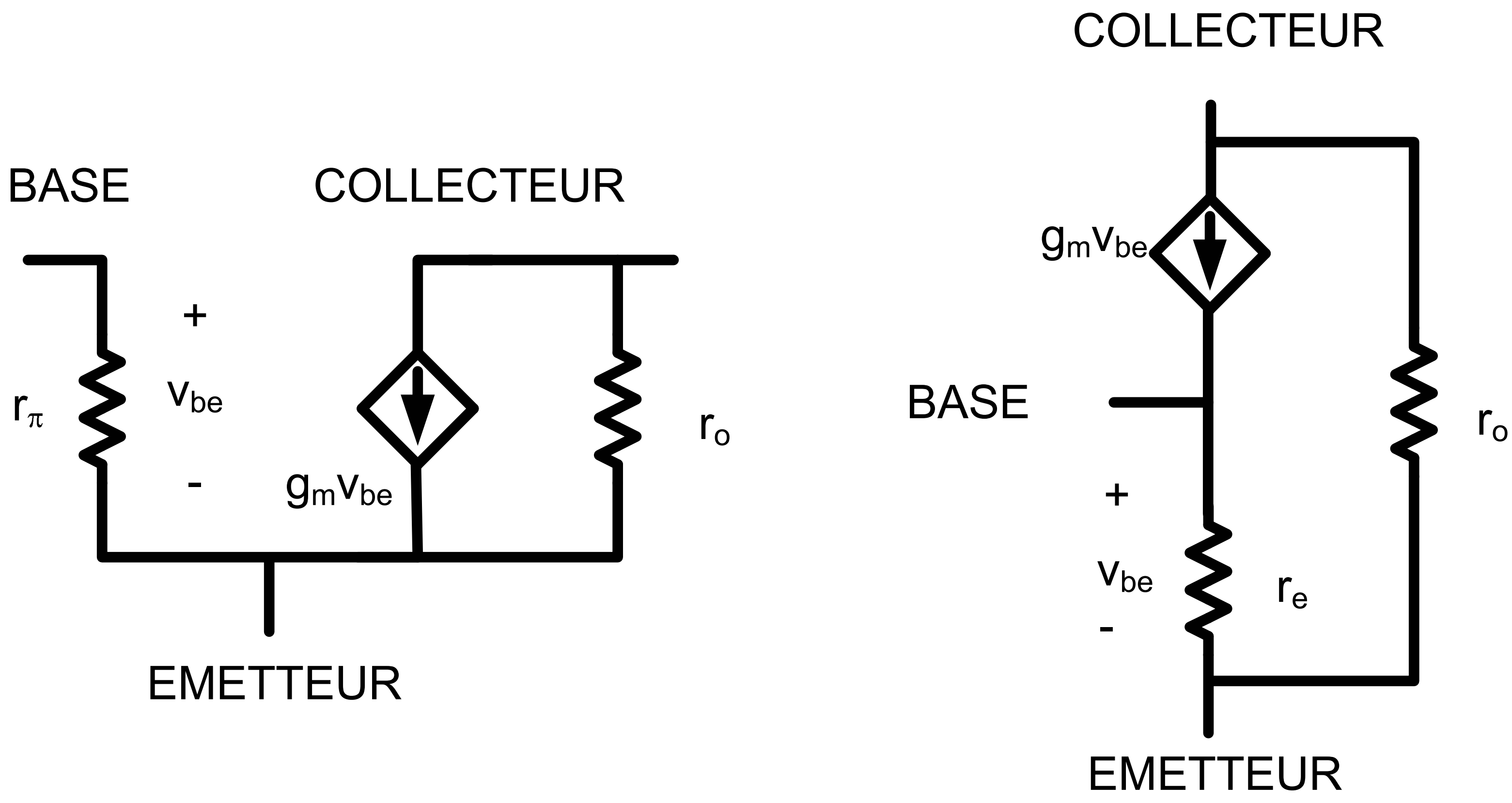
- Imaginez qu'on ait un BJT avec V_A=50 et on l'a polarise pour que I_C soit 1mA.
- Si la tension de sortie v_{ce} changeit de 1V, de combien changera le i_c?

$$r_o = \frac{V_A}{I_C} = \frac{50}{1m} = 50K \qquad r_o = \frac{\Delta V}{\Delta I} \Rightarrow \Delta I = \frac{1}{50K} = 20\mu A$$



Resistance de sortie

- La resistance de sortie se place entre collecteur-emetteur dans les 2 modeles:



Exemple

- Exemple: Calcul de parametre
- Apres analyse DC, on voit que:

I_C=1mA (calcule)

V_A=50V (fourni)

β=100 (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: $$r_o = \frac{50V}{1mA} = 50000\Omega$$