

Méthodes de conception en électronique

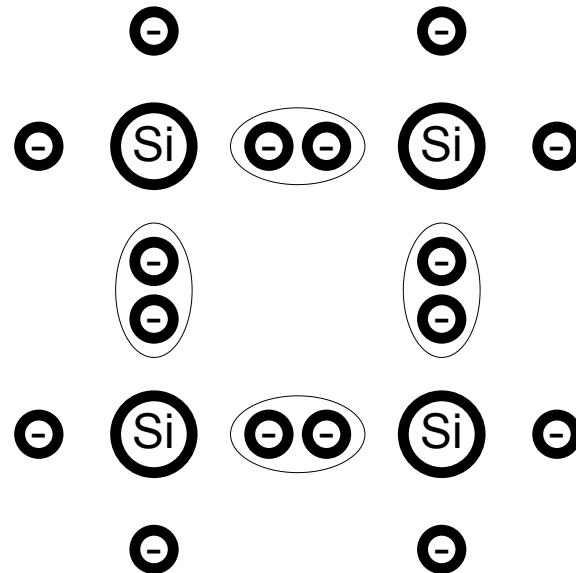
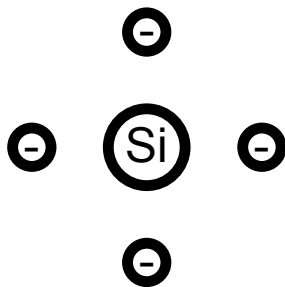
Cours 3

Électronique

- La presque totalité des circuits électroniques sont fabriqués de silicium...
 - Compose presque 30% de la croûte terrestre
 - Procédé de fabrication moins cher et bien développé
- Le silicium est un semi-conducteur:
 - Se situe quelque part entre conducteur et isolant
 - Si on lui fournit un peu d'énergie, les électrons vont conduire
- Allons revoir son comportement...

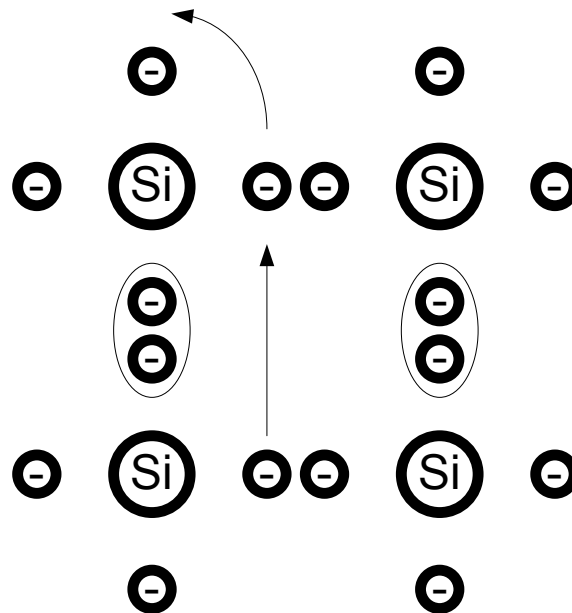
Rappel: silicium

- Le silicium a 4 électrons de valence
- Forment un lien de valence en partageant 2 électrons



Silicium

- Le bris de liens et le déplacement d'électrons génère un courant
- Un électron qui se libère laisse un espace: ça s'appelle un trou



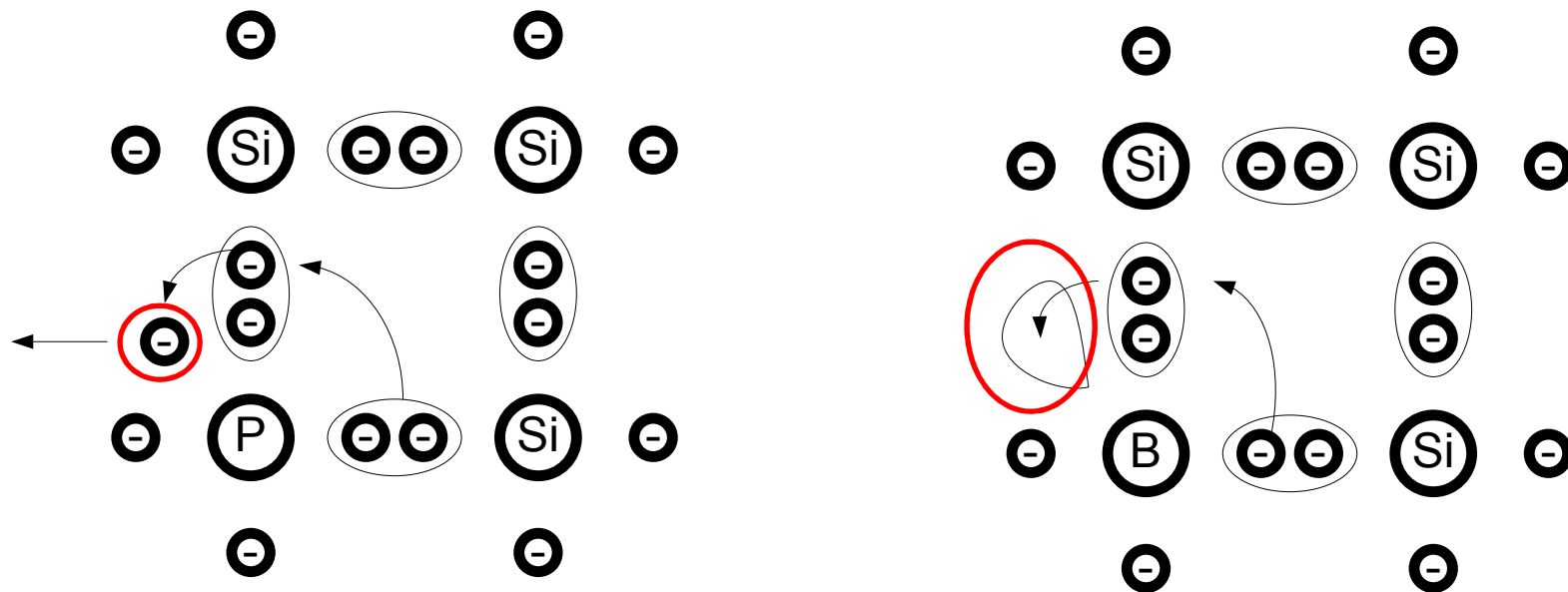
Dopage

- Courant: déplacement de charges
 - Pour améliorer le courant, on augmente les charges
 - On ajoute des impuretés: dopage.
 - Ça réduit la résistance du silicium
- Impuretés qui ajoutent des électrons: N
 - Ex: Phosphore
- Impuretés qui ajoutent des trous: P
 - Ex: Bore

Le dopage réduit la résistance du silicium

Dopage

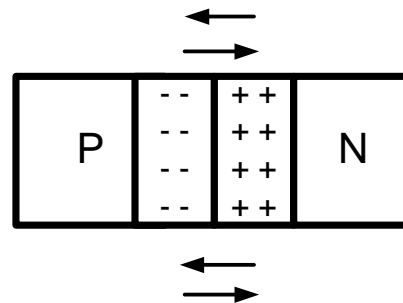
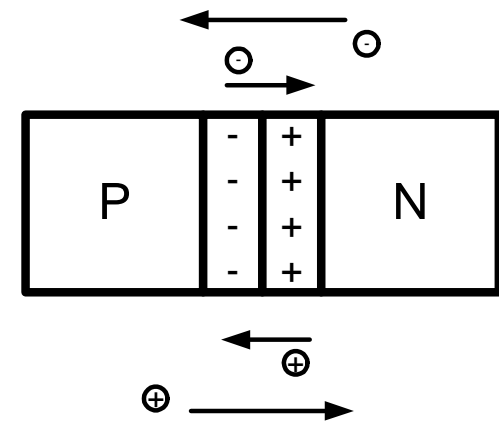
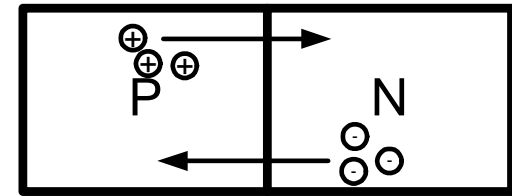
- Exemple de "dopage" type N et P



Combinons un bloc P et un bloc N

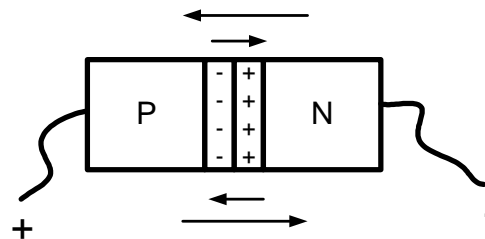
Diode PN

- Avant équilibre:
 - Trous diffusent vers N
 - Électrons diffusent vers P
- Charges se déplacent
 - Recombinaison crée des ions
 - Ions créent un champ
- Équilibre:



Diode PN

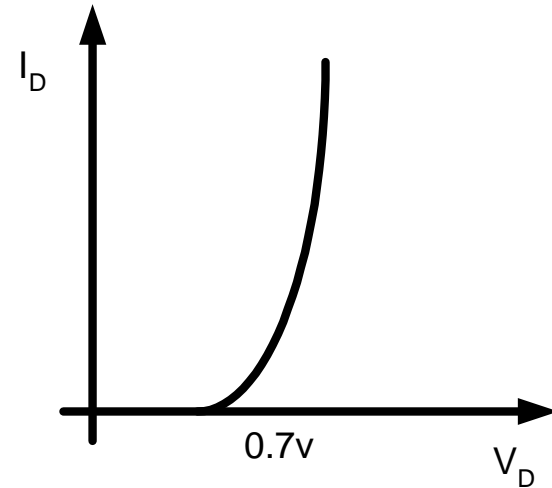
- Il y a 2 courants:
 - Un causé par la diffusion
 - Un causé par le champ interne
- En appliquant une V_+ à P et V_- à N, on réduit le champ à l'interne
- Résultat:
 - Courant "interne" plus petit
 - Courant "externe" remporte



Diode PN

- Le courant augmente exponentiellement avec la tension appliquée:

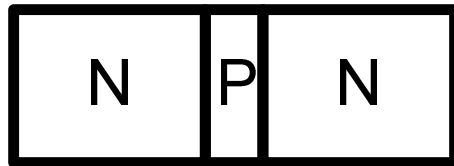
$$I_D \cong I_S e^{V_D/kT}$$



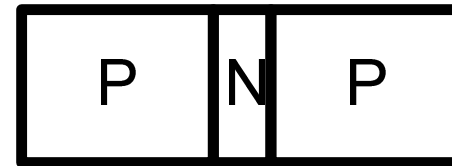
- Passons maintenant aux transistors bipolaires...

Transistor bipolaire

- 2 types de transistors

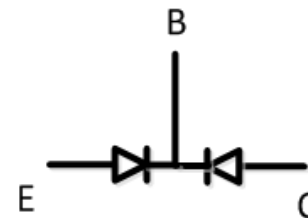
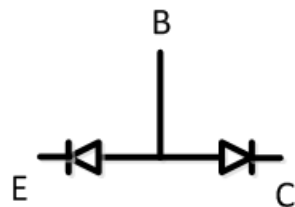


NPN

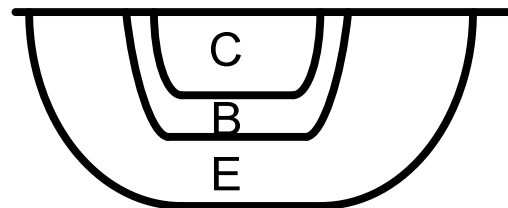


PNP

- On peut voir BJT comme 2 diodes dos-à-dos

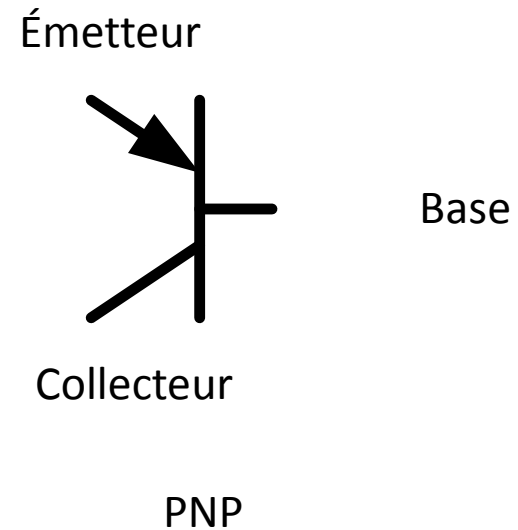
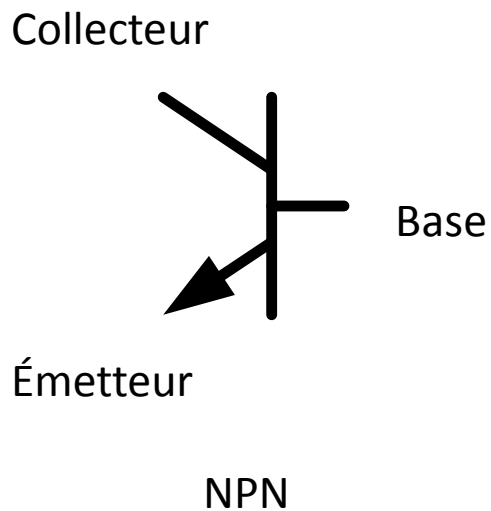


- Structure physique réelle:



Transistor bipolaire

- Il y a 3 pattes:



Pour identifier les pattes:

Base: Autre bord

Émetteur: avec flèche (direction du courant)

Collecteur: celle qui reste

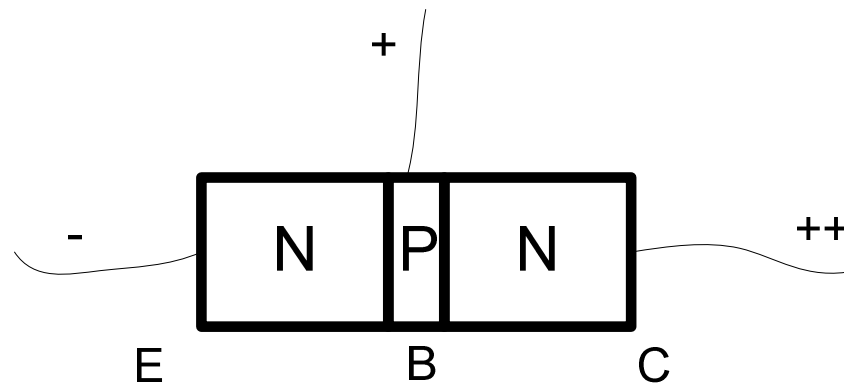
Transistor bipolaire

- Fonctionnalités classifiées par les diodes
 - BE: Jonction Base-Émetteur
 - BC: Jonction Base-Collecteur

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

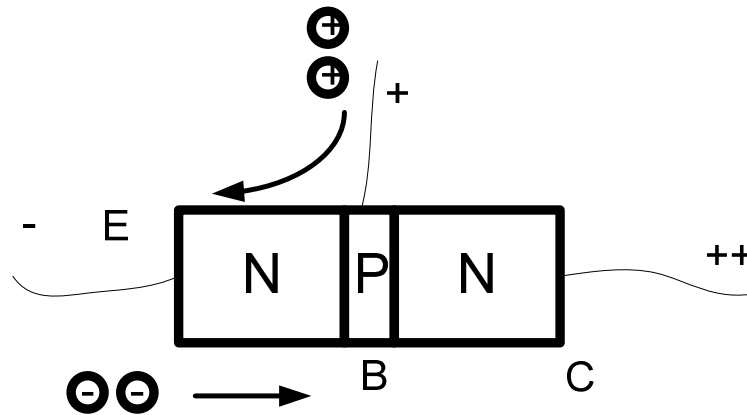
Transistor bipolaire

- En région active:
 - BE polarisé en direct (conduit)
 - BC polarisé en inverse (conduit pas)



Transistor bipolaire

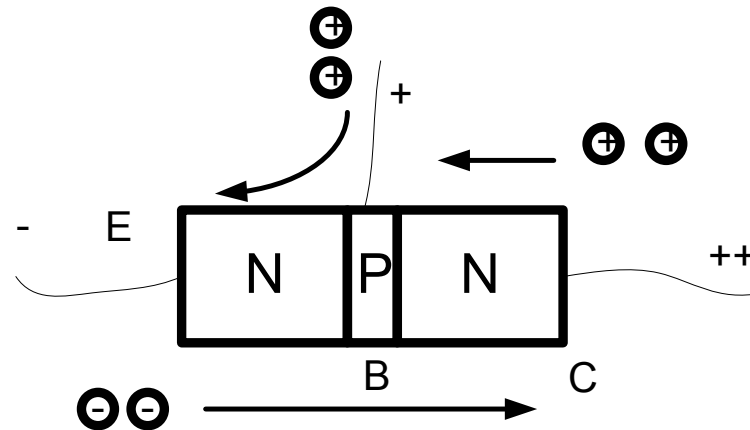
- BE polarisé en direct, donc courant circule
 - Charges + entrent par B et vont dans E
 - Charges – attirés par B



Dopage E élevé: **gros** flot d'électrons vs **petit** flot de trous

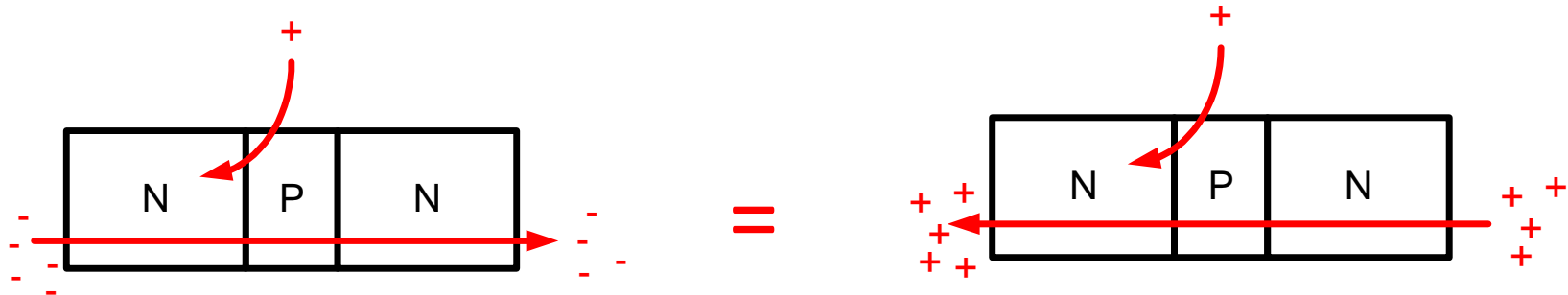
Transistor bipolaire

- La région P est faite très mince
- Charges – attirées par B, mais aussi attirées par C (tension plus haute)
- Les charges – passent dans C (plus que B)



Polarisation

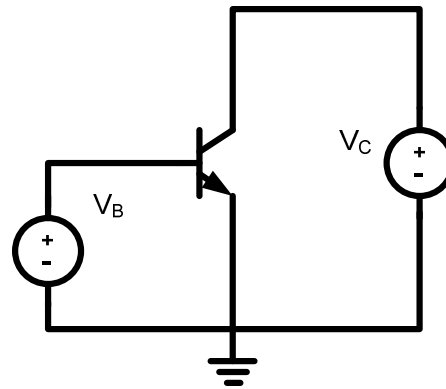
- Les charges (+) entrent dans B
- Les charges (+) entrent dans C
- Les charges (-) entrent dans E
 - Équivalent: (+) SORTENT de E



1^{re} Équation: $I_C + I_B = I_E$

Polarisation

- On aimerait BE direct et BC inverse
- Comment faire ça? La façon naïve:



Ne faites pas ça!

- On deviendra plus élégant plus tard

Caractéristique des BJT

- Un petit I_B donne gros I_C
 - C'est une caractéristique importante des BJT
 - De combien est-ce que I_C est plus gros que I_B ?
- Caractéristique des transistors: β (ou h_{fe})

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

Gain de courant
"émetteur commun"

- Certains utilisent α à la place:

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

Gain de courant
"base commune"

Caractéristique des BJT

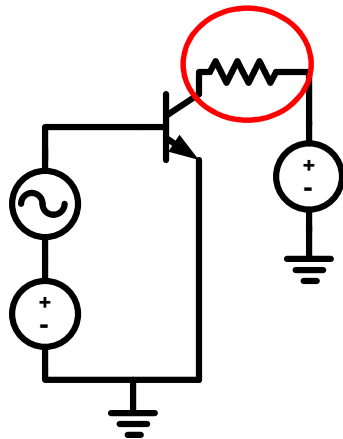
- En région active:
 - En augmentant I_B ça augmenterait I_C
 - En baissant I_B ça baisserait I_C
- Conclusion intermédiaire importante:
 - I_C est β fois plus gros que I_B
 - I_C est donc une version amplifiée de I_B
- V_B génère I_B qui est proportionnel à I_C
 - Le signal I_C varie donc en fonction de V_B (pas nécessairement proportionnel)

$$I_C = I_B \beta$$

$$V_B \rightarrow I_B \rightarrow I_C$$

Polarisation

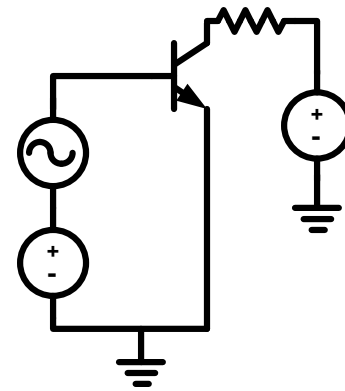
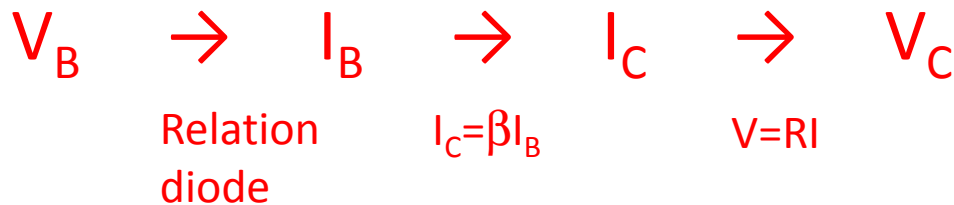
- On se répète:
 - Le signal V_B donne un courant I_B qui, à son tour, me donne I_C (βI_B)
- Parfois, on veut un voltage sortie (V_C):
 - On fait passer I_C par une résistance



Avant: I_C varie en fonction de V_B
Maintenant: V_C varie en fonction de V_B

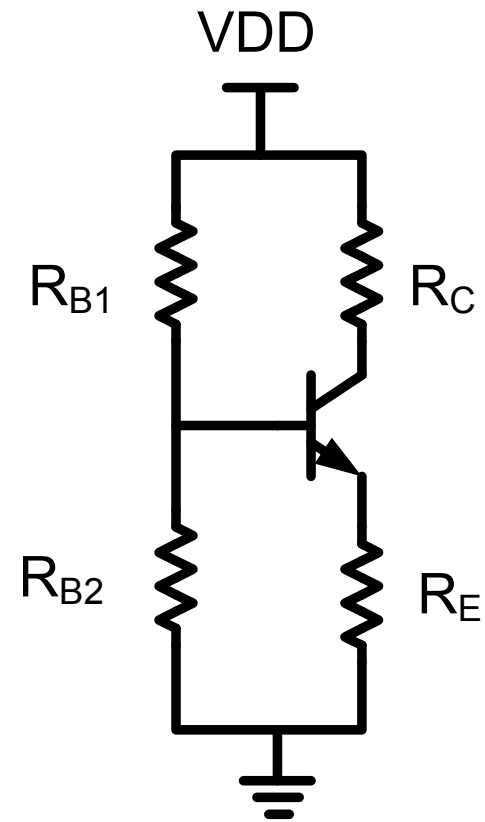
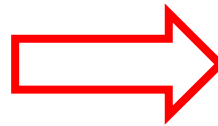
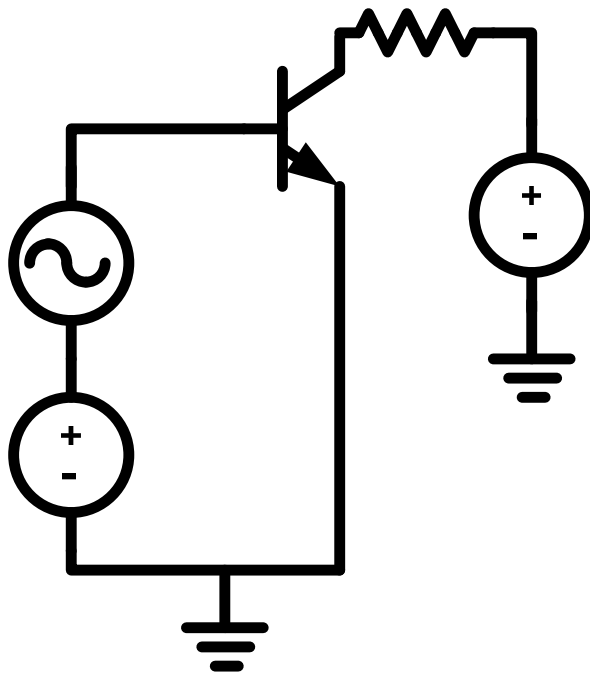
Polarisation

- En appliquant un signal V_B :
 - On obtient un courant I_B
 - I_B est copié à I_C (β fois plus gros)
 - I_C est multiplié par R pour donner V_C
- On pourrait donc s'attendre à ce que V_C soit plus gros que V_B



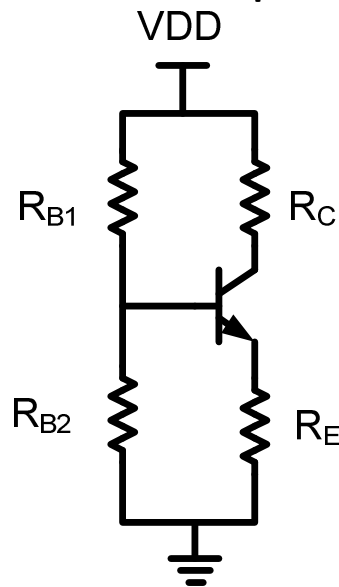
Polarisation

- Façon un peu plus élégante de polariser avec un circuit:



Polarisation

- Il y a beaucoup de choses qui arrivent dans ce circuit.
 - Il y a R_{B1} et R_{B2} pour contrôler V_B et I_B
 - R_C transforme le courant I_C en V_C
 - R_E réduit la dépendance sur β (prochain cours)



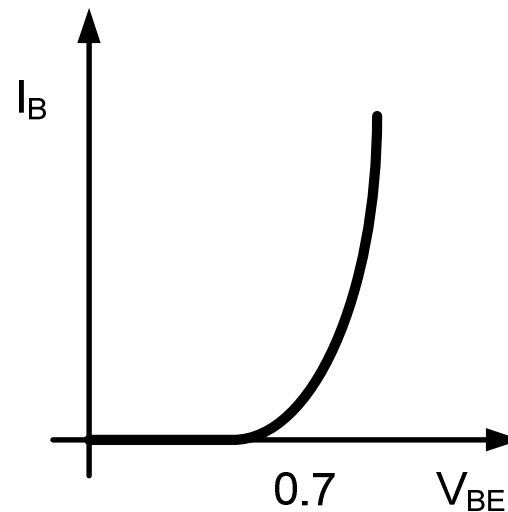
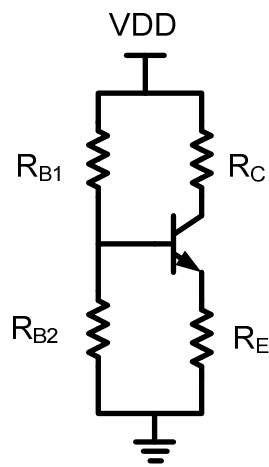
En appliquant un signal AC à V_B ,
on aurait une plus grosse version (V_C)

Polarisation

- Pour créer un amplificateur il faut 2 étapes:
 - 1) Mettre le circuit en région active
 - 2) Appliquer un signal à l'entrée
- Ça se dit aussi d'une autre façon:
 - 1) Faire l'analyse DC
 - 2) Faire l'analyse AC/petit-signal
- Commençons par l'analyse DC...

Analyse DC

- Jonction BE est une diode
 - Avec moins que 0.7v, ça ne conduit pas
 - Après 0.7v, ça devient un court-circuit où la tension est toujours à 0.7v
- Règle (en DC): si ça conduit, $V_{BE}=0.7$



Analyse DC

- On a assez de règles pour commencer l'analyse DC.
- Première liste d'équations:

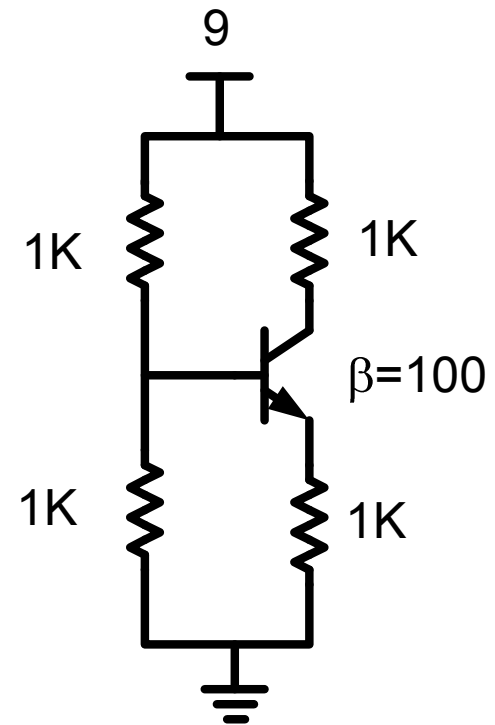
$$I_E = I_B + I_C$$

$$V_{BE} = 0.7$$

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

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 région fonctionne ce transistor?



Exemple

- Le transistor peut opérer dans 4 régions:
 - Chaque région a ses propres équations
- Dans quelle région se trouve le BJT?
 - Il faut faire une hypothèse
 - Utiliser les équations associées à cette hypothèse
 - Vérifier l'hypothèse
- On commence par deviner qu'on est en région active..

BE: Conduit

BC: Bloqué

Exemple

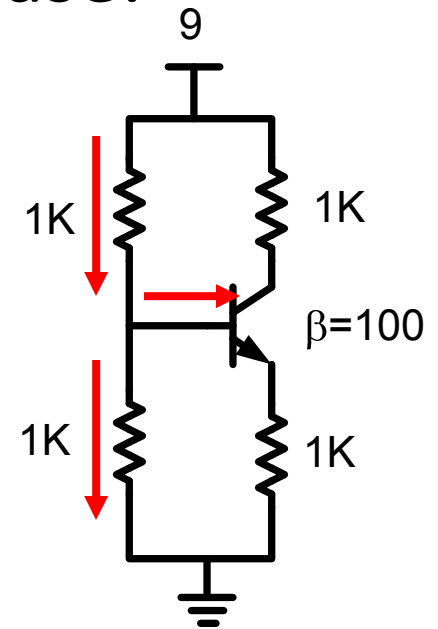
- On écrit l'équation de courant à la base:

$$\frac{9 - V_B}{1K} = I_B + \frac{V_B}{1K}$$

- On isole V_B :

$$V_B = \frac{9 - I_B 1K}{2}$$

- 1 équation et 2 variables V_B et I_B



Il faut utiliser plus d'équations...

Exemple

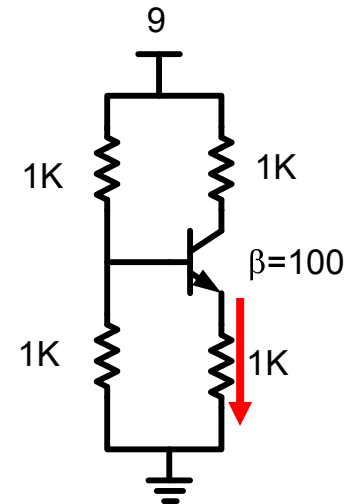
- On écrit une autre équation à l'émetteur:

$$V_E = I_E 1K$$

- On n'est pas plus avancé! 2 équations 4 variables!

- MAIS... on sait que $V_{BE} = V_B - V_E = 0.7$

$$V_{BE} = V_B - V_E = \frac{9 - I_B 1K}{2} - I_E 1K = 0.7$$



Exemple

- On recopie l'équation de tantôt:

$$\frac{9 - I_B 1K}{2} - I_E 1K = 0.7$$

- On isole I_E :

$$\frac{9 - I_B 1K}{2K} - \frac{1.4}{2K} = I_E$$

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

Exemple

- On utilise les équations suivantes:

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

- Pour trouver la relation entre I_B et I_E

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

- On se retrouve avec:

$$\frac{9 - I_B 1K}{2K} - \frac{1.4}{2K} = I_B (\beta + 1)$$

Il faut maintenant
isoler I_B

Exemple

- Étape intermédiaire:

$$7.6 - I_B 1K = 2K \cdot I_B (\beta + 1)$$

- Autre étape intermédiaire

$$7.6 = I_B (203K)$$

- Résultat final:

$$I_B = \frac{7.6}{203K} \cong 37.44 \mu A$$

Exemple

- Dans ce cas, les autres courants sont:

$$I_C = \beta I_B = 3.74mA \quad I_E = (\beta + 1)I_B = 3.78mA$$

- Et les tensions sont:

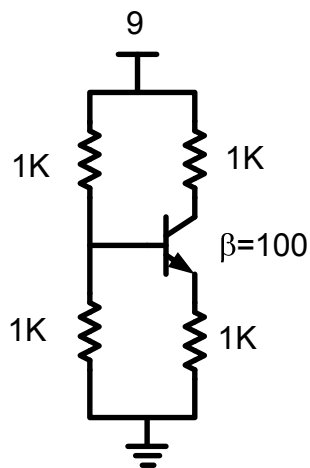
$$V_C = 9 - 3.74 = 5.26v \quad V_B = V_E + 0.7 = 4.48v \quad V_E = 3.78v$$

- On vérifie:
 - BE conduit
 - BC bloqué

Ça confirme l'hypothèse et on a terminé...

Note importante

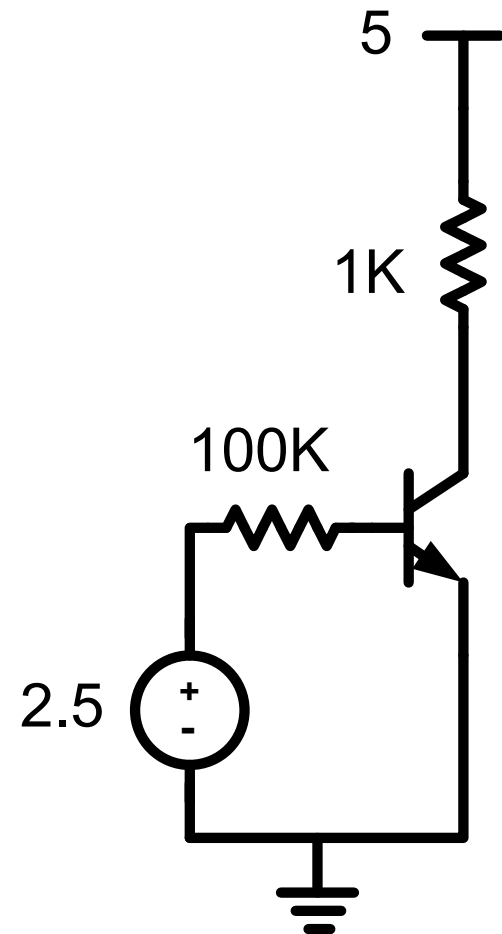
- Certains calculent V_B par diviseur de tension
 - C'est une approximation
 - Il existe un courant qui entre dans la base (I_B)
- Si vous le faites, assurez-vous que vous en avez le droit (I_B doit être très faible)



Dans notre exemple, ça donne 4.48v (diviseur de tension donne 4.5): ce ne sera pas toujours aussi proche

Exemple (seul)

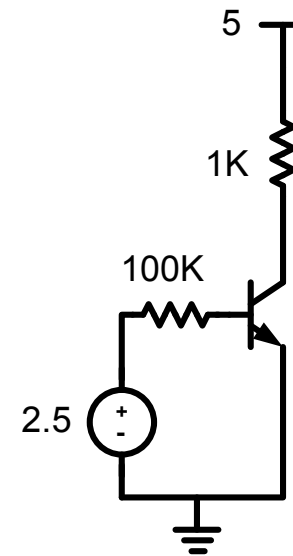
- Calculez V_B , V_C , V_E , I_C , I_B et I_E :
- Étapes suggérées:
 - Faire semblant que ça conduit
$$V_{BE}=0.7$$
 - Faire semblant que c'est en région active
$$I_C=\beta I_B$$
 - Confirmer les hypothèses en vérifiant V_C



Exemple (seul)

- On fait l'hypothèse que:
 - Le transistor fonctionne en région 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 région active:

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

- Et la tension au collecteur est:

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

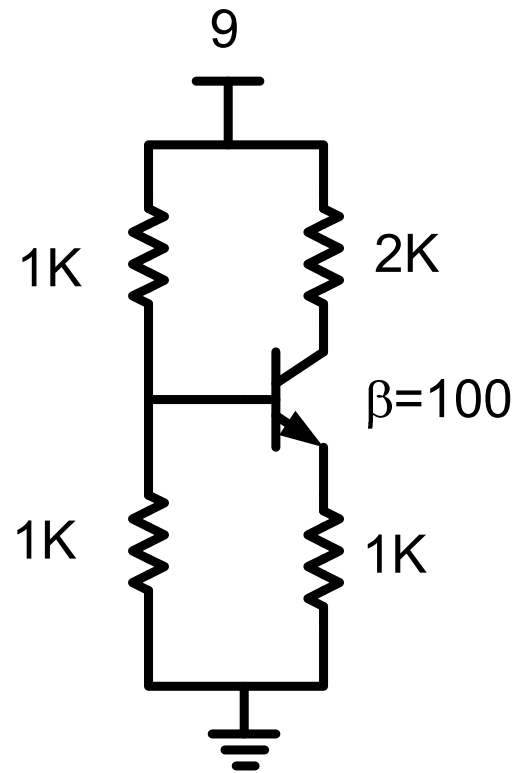
- Région active confirmée: diode BC inverse
- Finalement, il reste le courant a l'émetteur

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

Et on a fini...

Saturation

- Analysons le premier circuit avec un petit changement:



On a augmenté la résistance au collecteur

Saturation

- On remarque que l'analyse se fait de la même façon jusqu'au calcul de V_C .

- Hypothèse 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 :

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

Mêmes réponses
que tantôt

Il faut maintenant calculer V_C

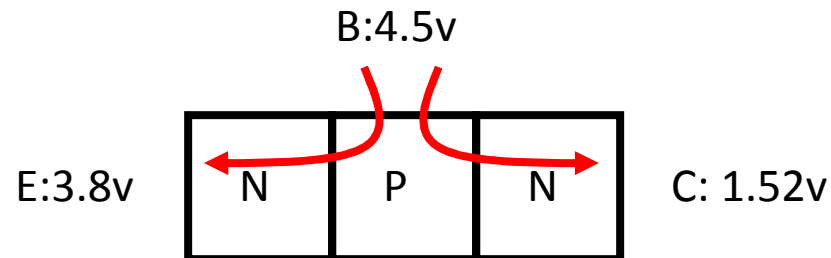
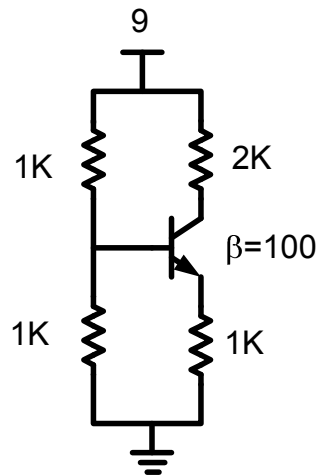
Saturation

- En calculant V_C , on voit le suivant:

$$V_C = V_{DD} - I_C R_C = 9 - 7.48 = 1.52V$$

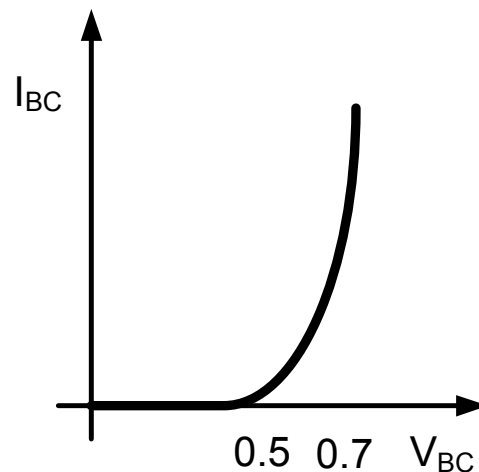
- Sachant que V_B est 4.5v, on se retrouve avec BC qui conduit

- On n'est plus en active: on est rendu en saturation



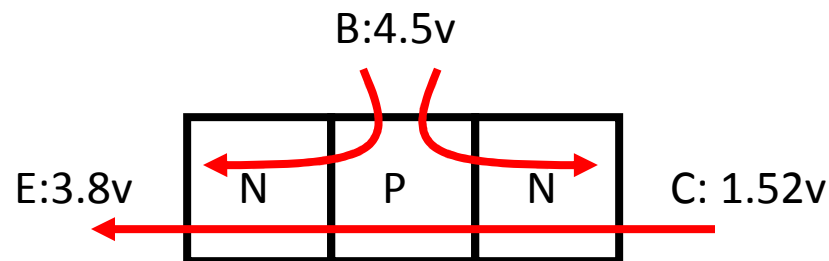
Saturation

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



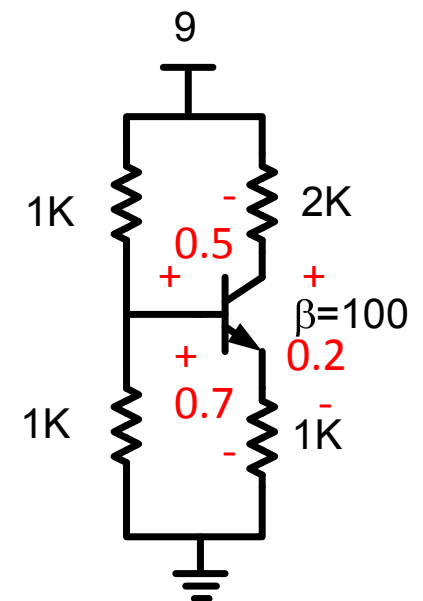
Saturation

- 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



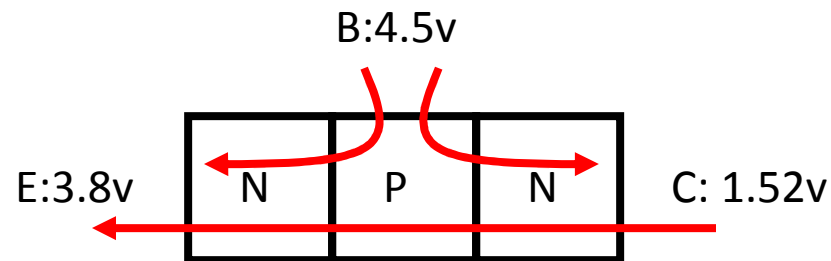
- Ça empêche V_C de trop baisser
 - Ça se stabilise quand V_{BC} autour de 0.5v
 - Autrement dit: V_{CE} autour de 0.2v

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 définir des nouveaux termes:
 - β_{max} pour la valeur de β spécifiée
 - β_{force} pour la valeur de β en saturation



Saturation

- On est maintenant bien équipé pour retourner au problème
- On a dit que V_C allait être 1.52v si on se trouvait en région active
- Le problème 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 début avec la nouvelle hypothèse!

Allons voir comment analyser des circuits en saturation...

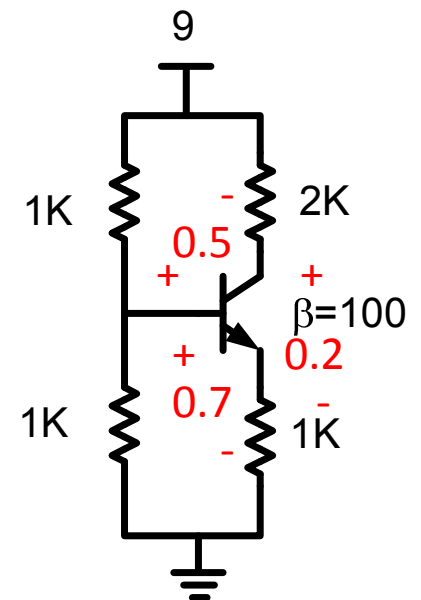
Saturation

- On commence par dire que $V_{CE} = V_{CESAT}$
- Ça 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:

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



Saturation

- Le courant I_E est:

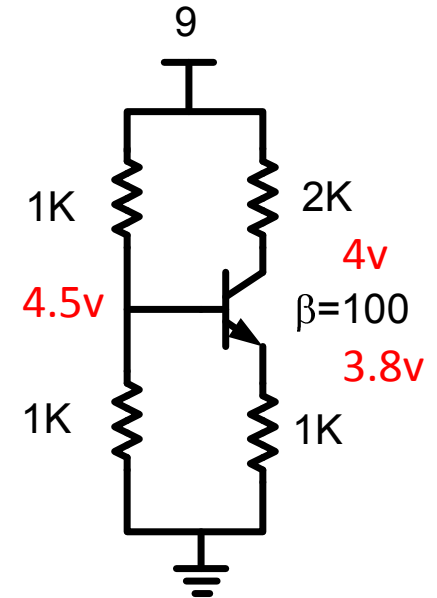
$$I_E = \frac{V_E}{R_E} = \frac{3.8}{1K} = 3.8mA$$

- À partir de ça, 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} :

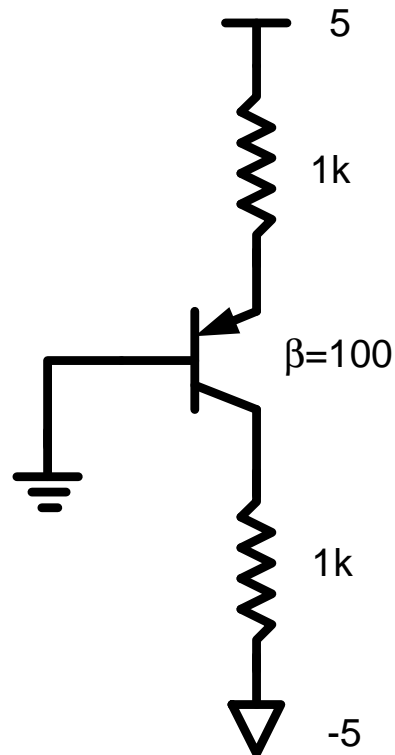
$$\beta_{force} = \frac{I_C}{I_B} = \frac{2.5}{1.3} = 1.92$$



Mais on ne s'attardera pas à étudier la saturation plus en détails..

Exemple (seul)

- Faites l'analyse DC avec ce circuit composé d'un transistor PNP
 - Trouvez les voltages et les courants différents



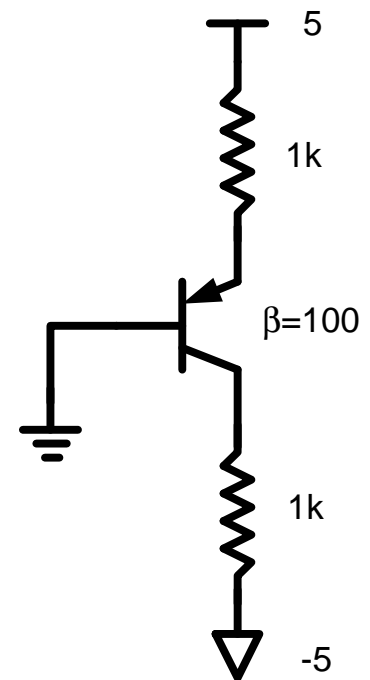
Exemple (seul)

- L'analyse commence de la même façon:
 - Hypothèse: région 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 à trouver
 - Essayons I_E



Exemple (seul)

- Le courant I_E est donné par:

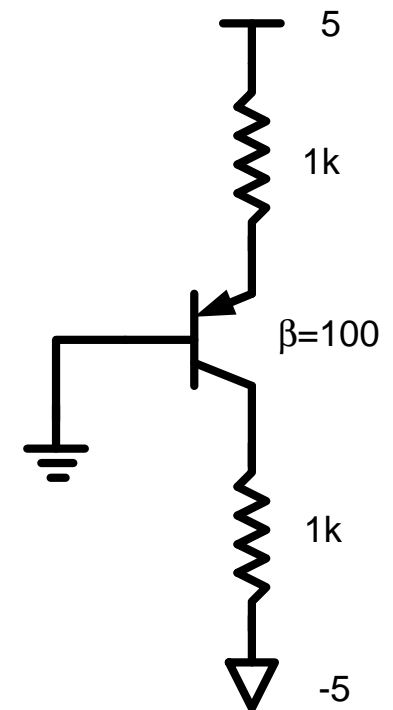
$$I_E = \frac{5 - V_E}{R_E}$$

- 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 liés par β

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



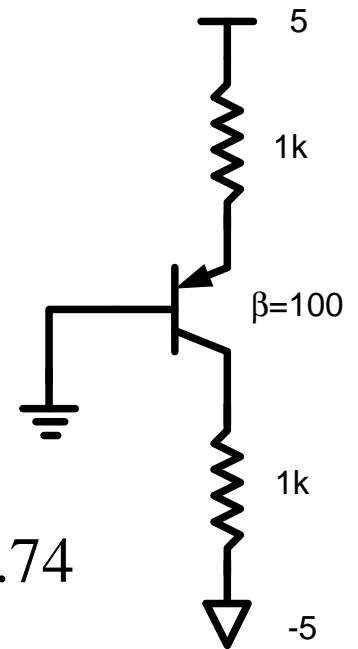
Exemple (seul)

- 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 cohérent: on est en région active

Passons maintenant à l'analyse AC

Analyse AC

- Nous savons comment se comportent les transistors en DC
 - Le but: mettre le transistor en région “active”
- Passons maintenant à l'analyse AC
 - Comment se comporte mon transistor (en région active) lorsque V_B change un peu?
- Pour analyser ça, revenons aux équations de base...

Analyse AC

- Courant dans une diode augmente exponentiellement avec la tension

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

Le -1 est négligeable

- Nos BJTs sont composés de diodes.
 - I_B sera donc donné par:

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

- $V_T = kT$: Boltzmann * Température absolue
 - À la température de la pièce, $V_T = kT = 25\text{mV}$

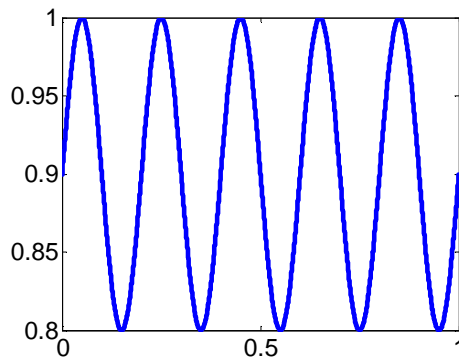
I_S est un paramètre de la technologie utilisée

Analyse AC: Gros signal

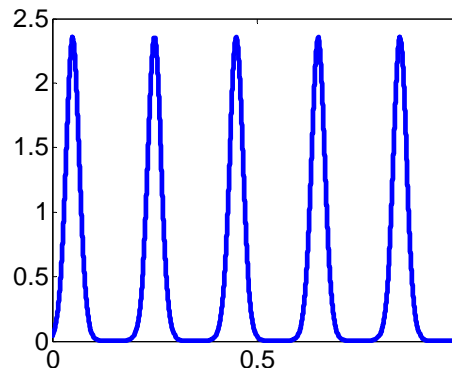
- Sachant que I_C est βI_B , on trouve I_C :

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

- 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

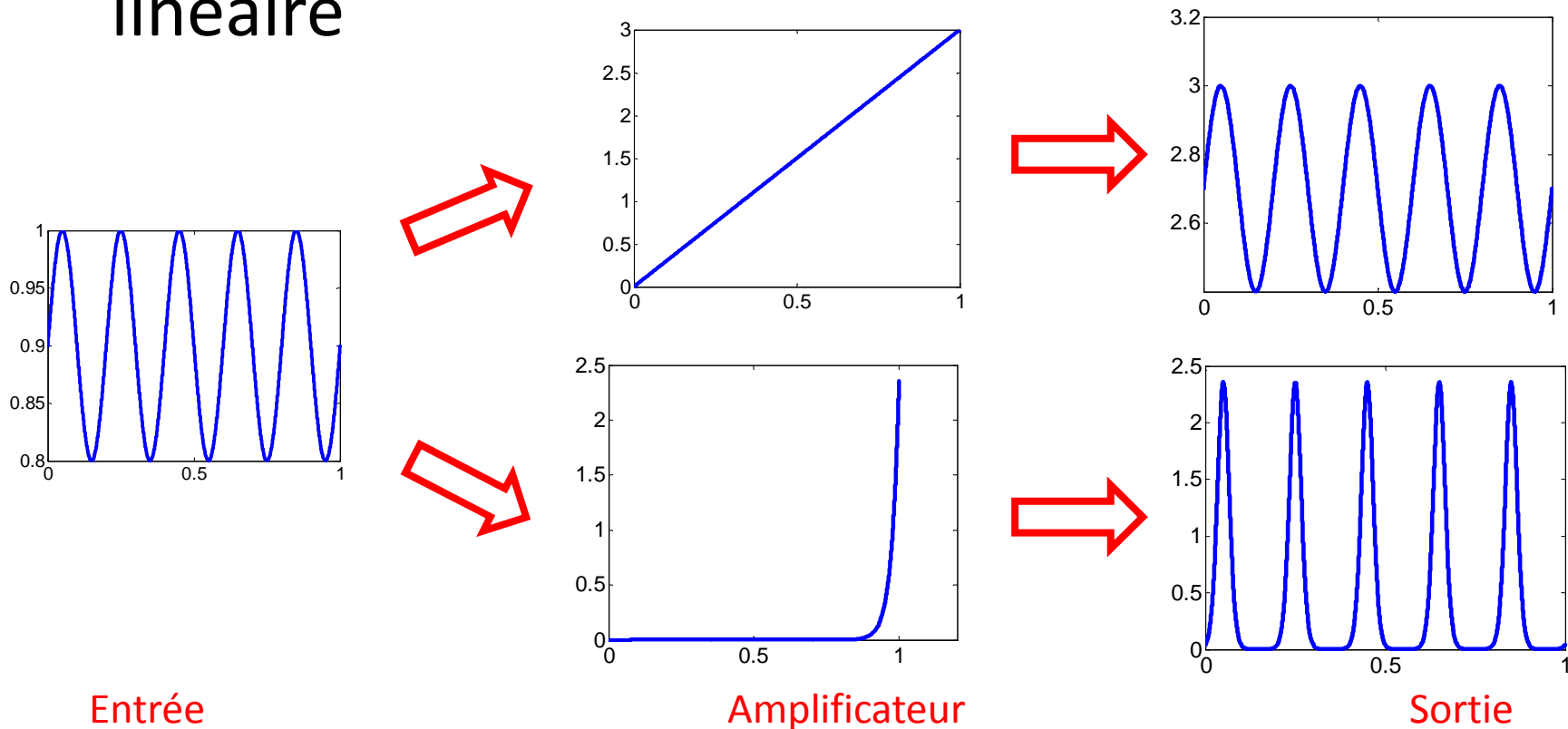


Sortie

Plus gros, mais pas tres "sinus"!

Analyse AC: Gros signal

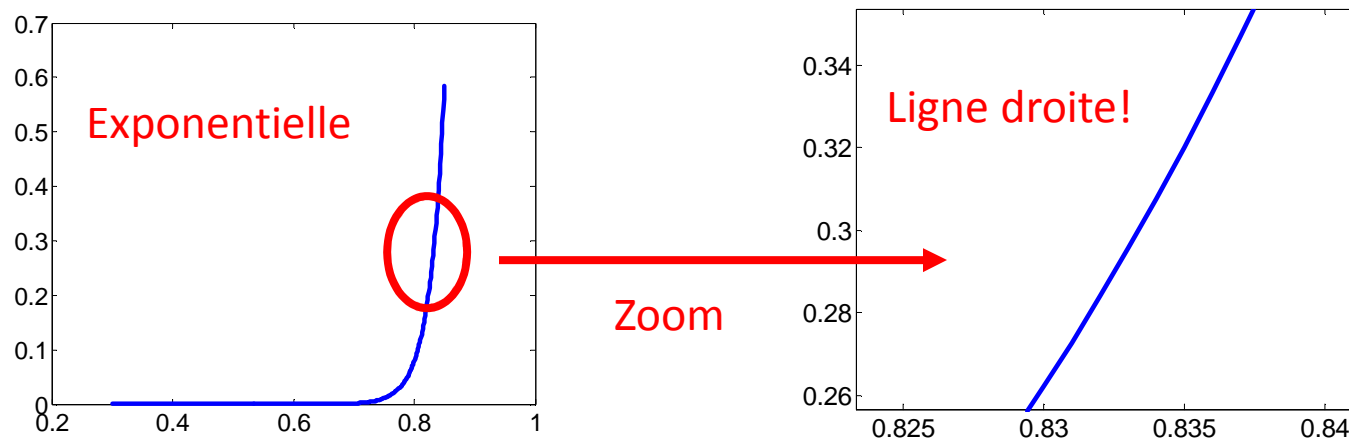
- Un amplificateur devrait avoir une relation linéaire



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

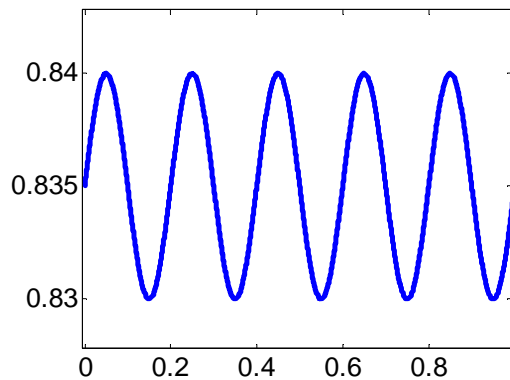
Analyse AC: Petit signal

- Cependant, j'ai une exponentielle...
 - Comment "transformer" une exponentielle en ligne droite?!
- Solution
 - En "zoomant" assez, ça deviendrait droit

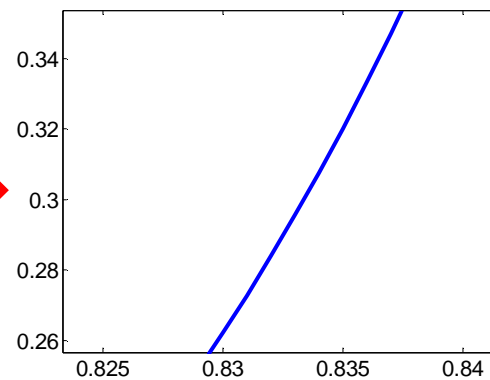


Analyse AC: Petit signal

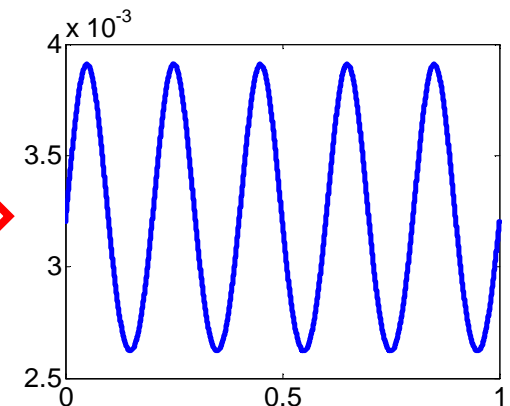
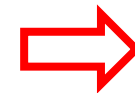
- Dans mon exemple:
 - Si mon entrée était entre 0.83v et 0.84v, j'aurais un système linéaire.
 - C'est-à-dire: si mon entrée est un sinus entre 0.83v et 0.84v, sortie sera un beau sinus...



Entrée



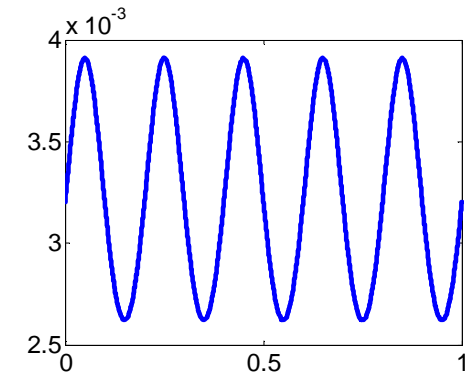
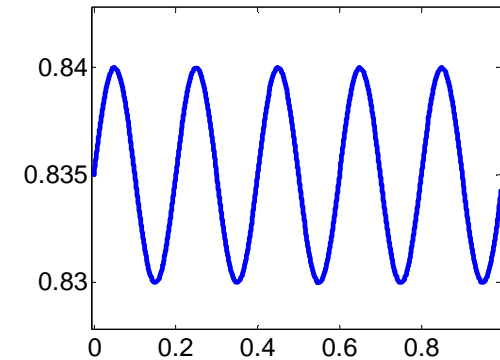
Amplificateur



Sortie

Analyse AC: Petit signal

- L'entrée comporte 2 parties:
 - La partie DC: 0.835v (V_{BE})
 - La partie AC: le sinus de 0.005v (v_{be})
- La sortie comporte 2 parties:
 - La partie DC: $\sim 3.25\text{mA}$ (I_C)
 - La partie AC: le sinus de $\sim 0.6\text{mA}$ (i_c)



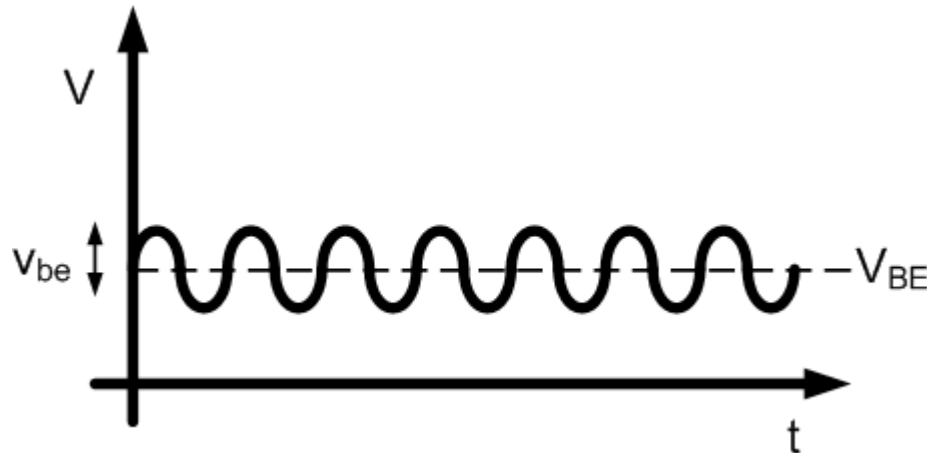
On passera ce courant par une résistance pour le transformer en voltage

Analyse AC: Petit signal

- Traduisons tout ça en maths...
- On connaît le lien entre V_{BE} et I_C :

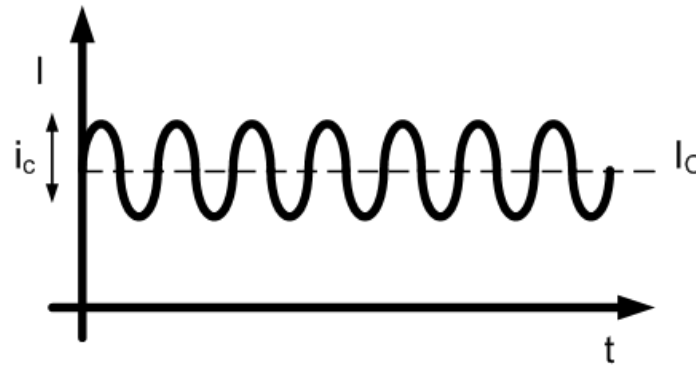
$$I_C \cong \beta \left(I_S e^{V_{BE}/V_T} \right)$$

- Maintenant, à la place d'avoir V_{BE} (DC) à l'entrée, on va avoir $V_{BE} + v_{be}$ (DC+AC)



Analyse AC: Petit signal

- Le courant de sortie aura aussi DC+AC:



- Donc, cette relation $I_C \cong \beta(I_S e^{V_{BE}/V_T})$ devient celle-ci:

$$\underbrace{I_C + i_c} = I_S e^{\underbrace{(V_{BE} + v_{be})}_{\text{}}/V_T}$$

Équation pas très intéressante... manipulons la un peu

Analyse AC: Petit signal

- On sépare 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 à gauche est égale à I_C :

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

- On laisse ça de côté pour ouvrir une petite parenthèse...

Analyse AC: Petit signal

- On sait qu'une fonction peut être représentée par une série de Taylor
- On prend par exemple:

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

- Plus x est petit, moins de termes sont requis...

Analyse AC: Petit signal

- Revenons à l'équation de tantôt:

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

- Remplaçons l'exponentielle par sa série de Taylor:

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

- Notre équation deviendrait:

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

Analyse AC: Petit signal

- **Si x est assez petit**, on pourrait ne garder que les 2 premiers termes de la série
 - 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 distribue I_C dans la parenthèse:

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

Les I_C s'annulent

Analyse AC: Petit signal

- On recopie l'équation ici:

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

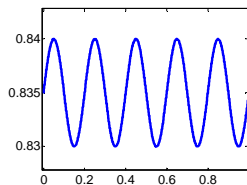
Si v_{be} est petit, i_c sera petit

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

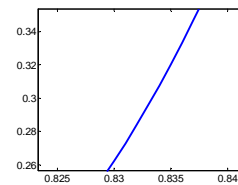
- On va donner un nom à I_C/V_T :

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

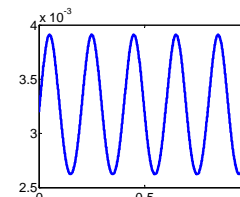
Transconductance



v_{be}



g_m



i_c

Analyse AC: Résumé

- BJT est non-linéaire (exponentielle)
 - Pour amplifier il faut être linéaire
- Si on “zoom” assez, ça “devient” linéaire
 - Il faut savoir OÙ on “zoom”
 - Et appliquer un TRÈS PETIT signal
- i_c sera alors proportionnel à v_{be} (non-deformé)
- L'entrée aura une moyenne DC de 0.7 (V_{BE})
 - La courant en sortie aura une moyenne de I_C

DC

AC

