

Electronique I

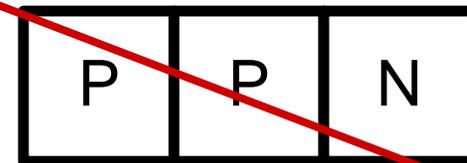
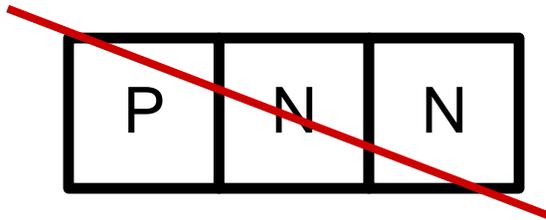
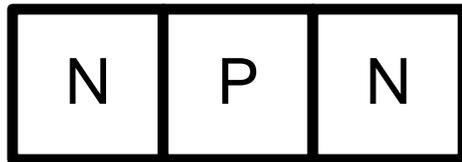
Introduction aux Transistors
Bipolaires

Mise en contexte

- On a commence par voir le silicium
- On a parle de dopage N et P
 - Fonctionalite limitee. Ca conduit bien ou mal...
- On a connecte N et P ensemble: diode
 - Parfois ca conduit (0.7v), parfois ca ne conduit pas
 - Interessant pour plusieurs applications
 - Probleme: Manque de controle de "l'exterieur"
- Ajoutons un bloc de silicium a la diode

Structure Physique

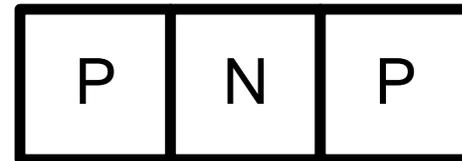
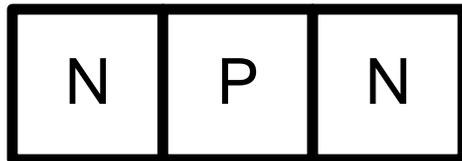
- On ajoute soit un N ou un P.
- Resultat:
 - 2 N et 1 P
 - 2 P et 1 N
- Voici les configurations possibles



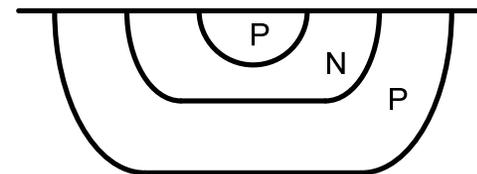
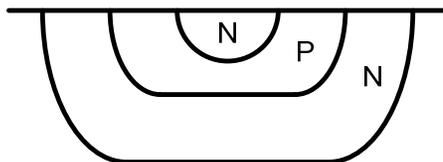
Meme chose qu'une diode PN

Structure Physique

- Il reste donc 2 configurations possibles:



- Les noms sont appropriées: NPN et PNP
- Les structures reelles ressemblent a ca:

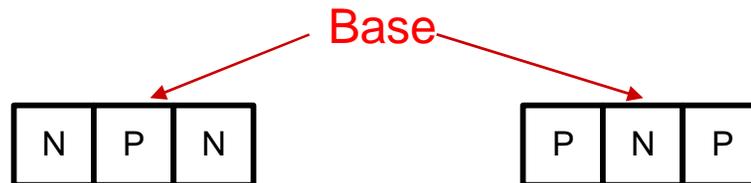


Structure Physique

- NPN: Transistor de type N

N	P	N
---	---	---
- PNP: Transistor de type P

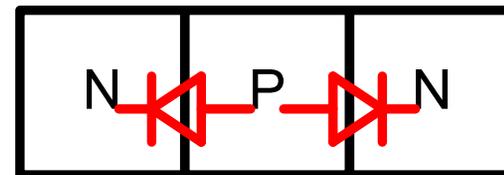
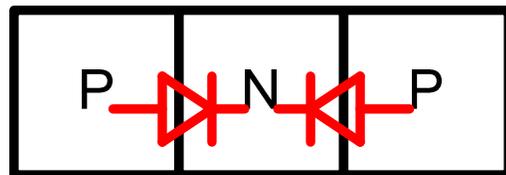
P	N	P
---	---	---
- Il y a 3 parties dans un transistor:
 - Collecteur
 - Emetteur
 - Base
- La base est la region du milieu



On distinguera les 2 autres apres...

Fonctionnement

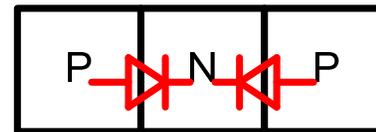
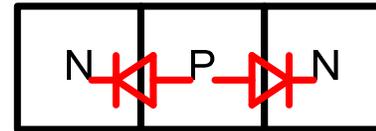
- Chaque groupe “PN” forme une diode
- Les transistors sont comme 2 diodes:



- On applique des tensions aux différents blocs
- Le fonctionnement sera comme le fonctionnement de 2 diodes dos-a-dos
- Il y a aussi interaction entre les 2 diodes

Fonctionnement

- Fonctionnement depend des 2 diodes:
 - Chaque diode peut conduire ou etre bloquee
- On peut “polariser” les diodes de 4 facons:
 - Bloque – Bloque
 - Bloque – Conduit
 - Conduit – Bloque
 - Conduit – Conduit
- Chaque “facon” correspond a une region d’operation

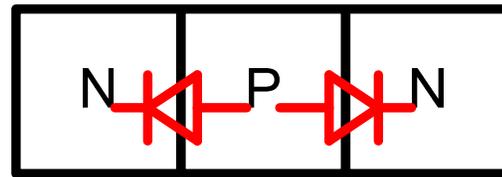


Survolons rapidement chacune de ces regions d’operation

Region “cut-off”

- **Cas #1: les 2 diodes sont bloquées**

- Il faut que $V_P < V_N + 0.7$ (pour NPN)
- Traduction: tension faible a la base vs region N

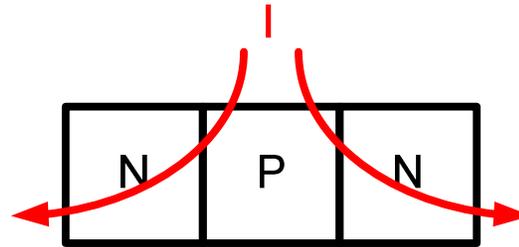


(pour NPN)

- Il n’y a AUCUN courant (sauf en conduction inverse... mais on ignore ce cas)
- On appelle ca la region **CUT-OFF**

Region de saturation

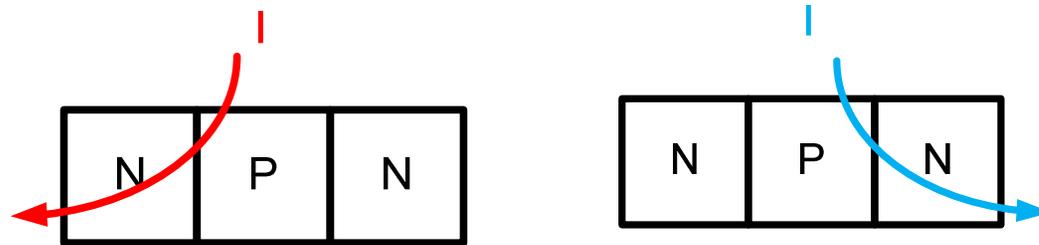
- **Cas #2: les 2 diodes conduisent**
 - V_p doit être plus grand que les 2 N de 0.7v
 - C'est plus ou moins vrai: on verra plus tard



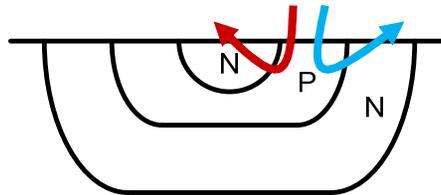
- On remarque que la base (milieu) fournit beaucoup de courant
- On appelle ça la region de **saturation**

Region active (ou inverse)

- Cas #3 et #4: 1 diode conduit et l'autre est bloquee



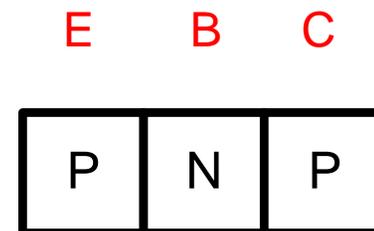
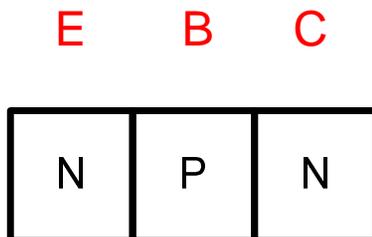
- Selon le cas, on va dire que c'est soit en region active ou soit en region inverse



Allons maintenant voir ces 2 regions en details...

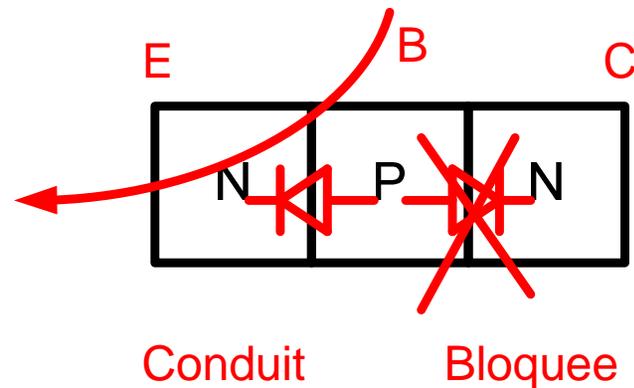
Region Active

- Commençons par assigner les noms aux parties du transistor.
 - On sait que le milieu c'est la base
 - On va dire que la gauche c'est l'émetteur
 - Donc, la droite, c'est le collecteur
- C'est notre convention... (ca va changer!)



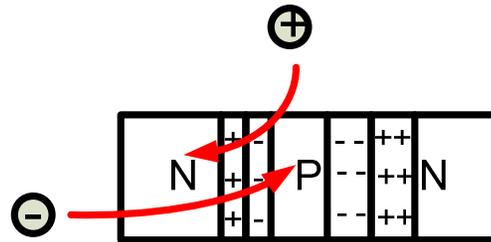
Region Active

- Pour la region active:
 - La jonction base-collecteur est bloquee
 - La jonction base-emetteur conduit
- Dans ce cas, le courant devrait circuler dans une des diodes
 - L'autre diode ne devrait pas avoir de courant

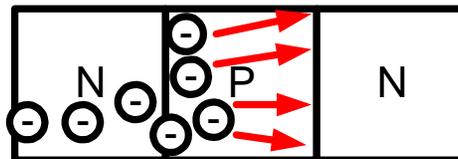


Region Active

- Reprenons ca avec plus de details:
 - Les trous vont de la base a l'emetteur
 - Les electrons vont de l'emetteur a la base

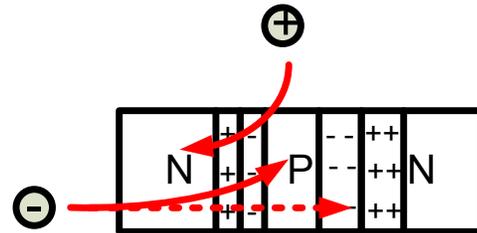


- Quand les charges arrivent, ils diffusent parce qu'ils sont minoritaires.
 - Concentrons-nous sur les electrons a la base...



Region Active

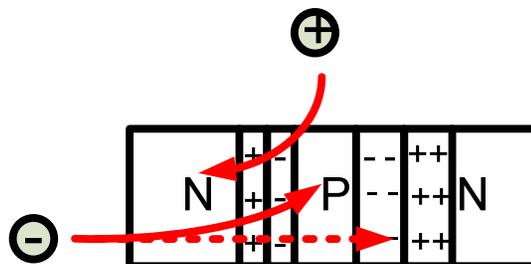
- La diffusion des electrons fait 2 choses:
 - Amene les electrons a la connexion de la base
 - Amene les electrons dans la zone charge-espace



- Le champ de la zone charge-espace les pousse vers le collecteur
 - Autrement dit, les electrons sont “collectes” (d’ou le nom) au collecteur

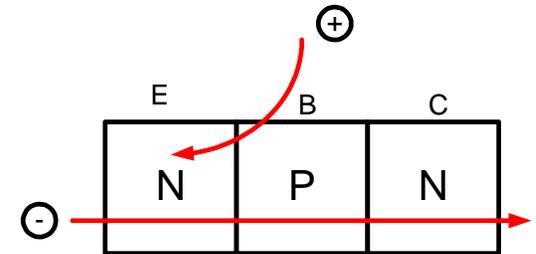
Region Active: sommaire

- La jonction BE conduit:
 - La base fournit un courant avec ses trous
 - L'émetteur fournit un courant avec électrons (MAIS!)
- Seulement une partie des électrons vont à la base
 - Les électrons de l'émetteur vont aussi AU COLLECTEUR (la plupart)

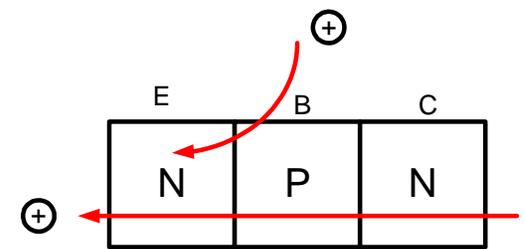


Region Active: resume

- Base:
 - Envoie des trous (+)
- Emetteur:
 - Envoie des electrons (-)
 - Recoit des trous (+)
- Collecteur
 - Recoit des electrons (-)
- On voit que l'emetteur a le plus de courant
 - $I_E = I_C + I_B$ (premiere equation importante des BJT)



Electrons a droite = trous a gauche



Retournons voir la structure physique des BJT

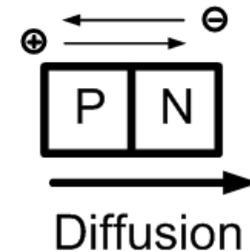
Retour sur la structure physique

- Le courant de base permet un courant emetteur-collecteur
- On aimerait exagerer ce phenomene:
 - On aimerait qu'un PETIT courant a la base cause un GROS courant emetteur-collecteur
 - Comment faire ca?
- Retournons ajouter de l'information sur les diodes...

Retour sur la structure physique

- Une diode en conduction est compose de 2 courants de diffusion:

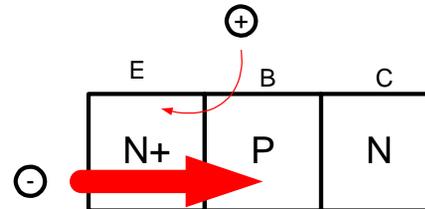
- Diffusion d'electrons N vers P
- Diffusion de trous P vers N



- Quand le dopage N et P sont egaux, les 2 courants de diffusion sont egaux
 - Si N est plus dope que P, le courant sera majoritairement des electrons
 - Si P est plus dope que N, le courant sera plus des trous

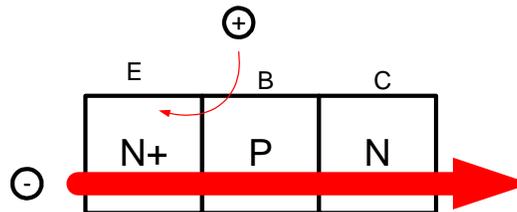
Retour sur la structure physique

- Alors, Si une diode avait:
 - Gros dopage N
 - Petit dopage P
- Le courant serait compose de beaucoup d'electrons et peu de trous
- Si l'emetteur etait dope fortement:
 - Un petit courant a la base (trous) amenerait un gros courant de l'emetteur



Retour sur la structure physique

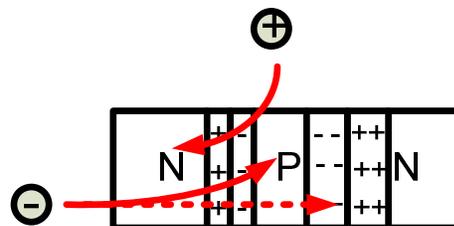
- Dans une diode, les electrons iraient tous dans l'anode (le P)
 - Ici, la diffusion a la base amene les electrons vers le collecteur
 - Rappel: c'est du a la region charge-espace
- **DONC!** Petit courant a la base controle un gros courant Emetteur-Collecteur



Il reste encore un autre detail...

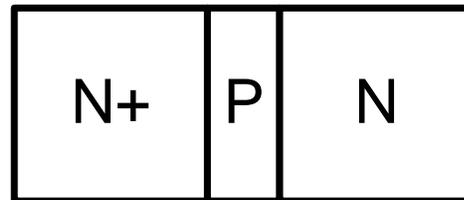
Retour sur la structure physique

- La jonction base-emetteur est en conduction:
 - La base fournit un petit courant de trous
 - L'emetteur fournit un gros courant d'electrons
- Les electrons diffusent a la base
 - Une partie se retrouve au collecteur
 - Une autre partie sort a la base
- Comment reduire la partie qui par a la base?

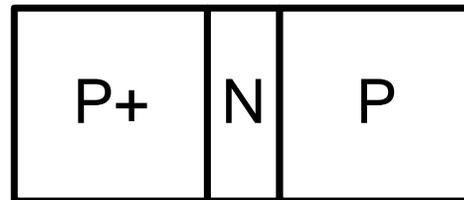


Retour sur la structure physique

- On pourrait amincir la base:
 - Plus d'électrons se retrouveraient au collecteur.



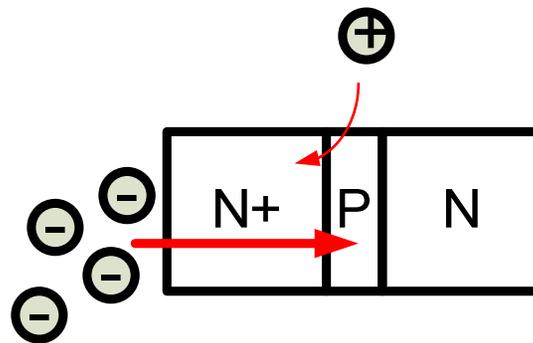
- Le meme raisonnement s'applique pour les PNP:



Revoyons ENCORE une fois comment le transistor fonctionne...

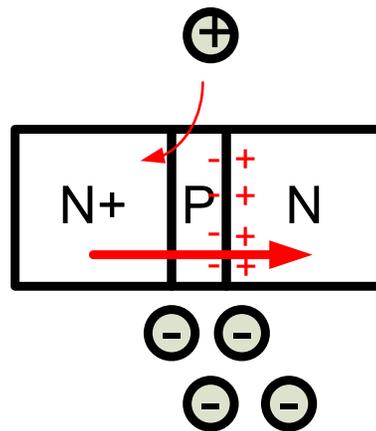
Region Active

- Les transistors ont 2 jonctions:
 - Jonction BE: en conduction
 - Jonction BC: bloque
- Jonction BE en conduction
 - P moins dope: envoie peu de trous
 - N bien dope: envoie beaucoup d'électrons



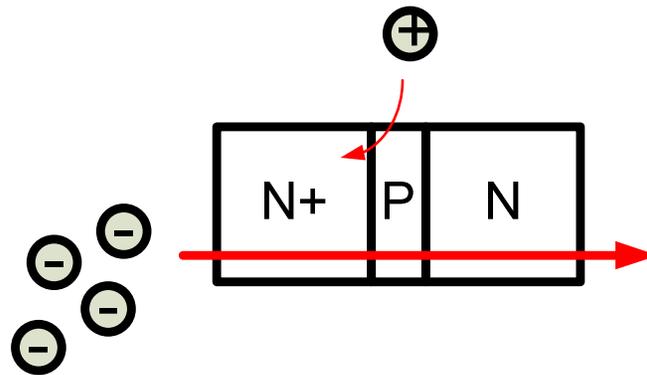
Region Active

- Electrons diffusent dans la base
 - Base mince: electrons passent dans jonction BC
 - Se retrouvent dans la region charge-espace
- Region charge-espace pousse les electrons vers le collecteur



Region Active

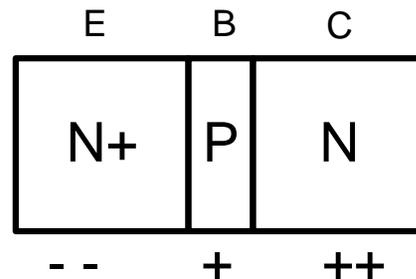
- Conclusion:
 - Petit courant dans la base controle gros courant entre emetteur-collecteur



Ca complete la region active... passons a la saturation

Region de saturation

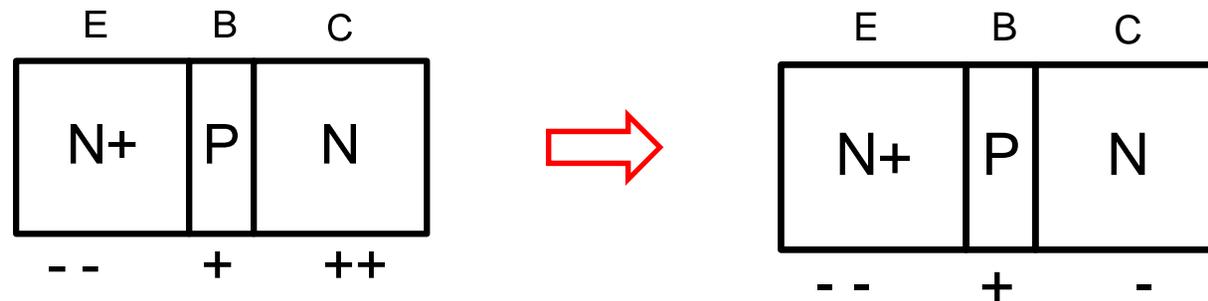
- En region active, on avait:
 - Jonction BE conduit: $V_B > V_E + 0.7$
 - Jonction BC bloquee: $V_B < V_C + 0.7$



- Pour s'amuser, **BAISSONS** la tension au collecteur

Region de saturation

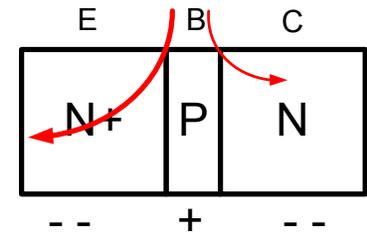
- En baissant V_C , on se rapproche du point de conduction de la diode BC
- Mettons-nous au point ou la jonction BC COMMENCE a conduire un peu



Que se passe-t-il?

Region de saturation

- La jonction BE conduit comme avant
 - Champ inverse BC est moins fort
 - Base fournit du courant a E et a C



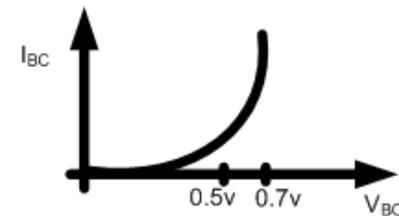
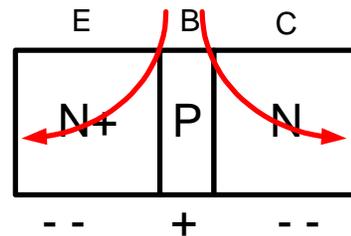
- Effet:
 - Courant a la base beaucoup plus elevee
 - Courant a l'emetteur reste a peu pres le meme
 - Courant a la base s'oppose au courant au collecteur

On voulait petit courant B qui controle gros courant EC

En saturation c'est moins efficace parce que I_B est plus gros...

Region de saturation

- Que se passe-t-il si V_C bassait encore?

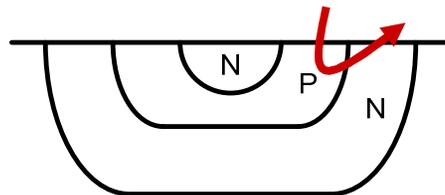


- Plus V_C baisse, plus le I_{BC} est grand
- Ca tendrait à augmenter V_C
- La tension BC se stabiliserait à une valeur donnée
- En pratique, on DIT que cette tension est $\sim 0.5v$
- C'est la tension quand la diode COMMENCE à conduire...

Passons maintenant à la dernière région d'opération

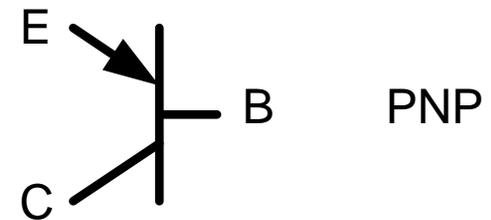
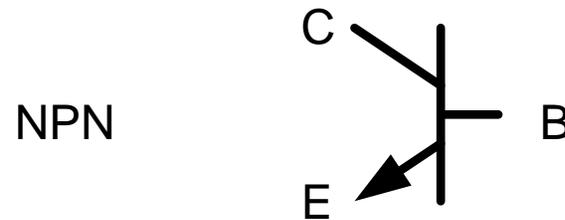
Region active inverse

- Si BE conduit et BC inverse, on est en region active
- Que se passe-t-il si c'est l'opposé?
 - BE en inverse et BC conduit
- Reponse: le transistor sera en region active "inverse"
 - Le fonctionnement ressemblera a la region active, mais moins efficace
 - Pas souvent utilise...



Representation du transistor

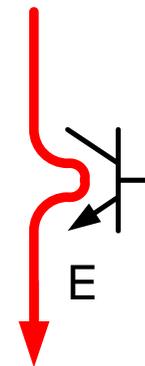
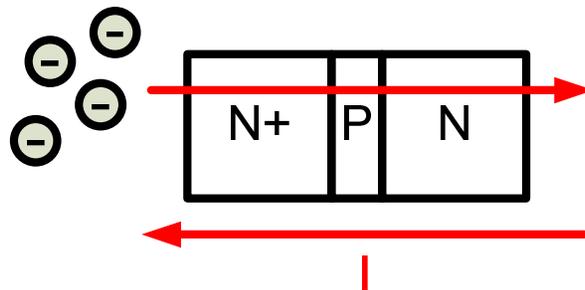
- On représente le transistor avec ces symboles:



- On identifie 3 pattes:
 - Collecteur
 - Emetteur
 - Base

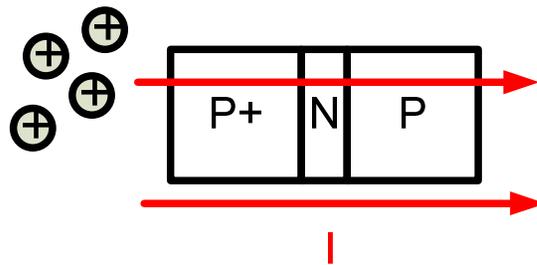
Représentation du transistor

- Emetteur: toujours la patte avec la fleche
 - Indique la direction du COURANT (trous)
- Pour NPN
 - Les electrons entrent a l'emetteur pour aller au collecteur
 - Donc, le courant sort de l'emetteur



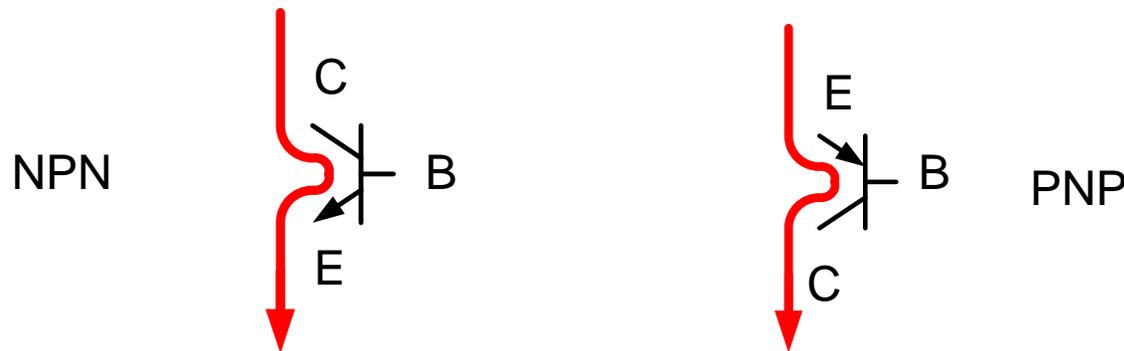
Representation du transistor

- Pour PNP:
 - Les trous entrent dans l'émetteur pour aller au collecteur
 - Donc, le courant entre par l'émetteur



Representation du transistor

- Dans ces diagrammes, on voit le courant circuler entre emetteur et collecteur:
 - L'emetteur a une fleche
 - Donc, l'autre patte avec le courant est le collecteur

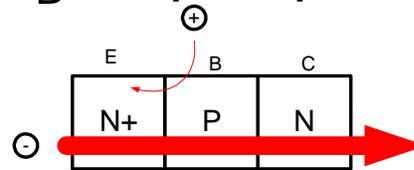


- La patte qui reste, c'est la base

Devenez confortables avec les diagrammes et les pattes...

Gain du transistor (β)

- L'idée de base derriere un transistor c'est:
 - Petit courant a la base pour controler un gros courant entre collecteur et emetteur
 - Comment petit est le courant a la base?
 - Comment gros est le courant au collecteur?
- On quantifie le ratio I_C/I_B avec un "gain"
 - I_B c'est l'entrée et I_C c'est la sortie
 - "Gros gain" = tres petit I_B et gros I_C
 - "Petit gain" = I_B un peu plus petit que I_C

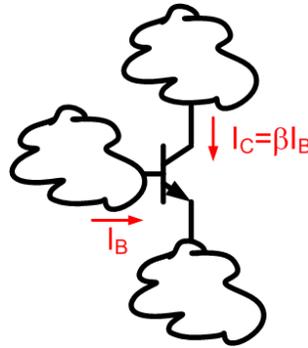


Gain du transistor (β)

- β ici represente le gain de COURANT maximal entre **base** et **collecteur**

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

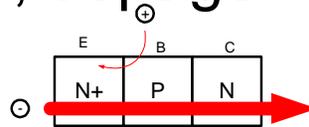
- Ex: si $\beta=100$, en entrant I_B , le courant I_C peut etre jusqu'a 100 fois plus gros.



Qu'est-ce qui determine le β ?

Gain du transistor (β)

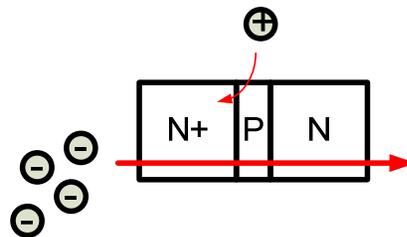
- Le courant d'une diode depend du dopage P et N
 - Dans les transistors, c'est different
- I_B depend seulement du dopage de B
 - Pas le dopage E parce que les electrons ne vont pas dans B
- I_E depend du dopage dans B et dans E:
 - Habituellement, dopage E est beaucoup plus grand et donc, dopage B devient negligeeable...



Il reste a considerer I_C ...

Gain du transistor (β)

- I_C depend **SEULEMENT** du dopage E
 - I_C c'est les electrons de E qui diffusent dans B
- Conclusion intermediaire interessante:
 - SI I_B negligeable vs I_E
 - ET SI aucune recombinaison dans B
 - $I_C = I_E$



Gain du transistor (β)

- On resume:

- I_B depend dopage B
- I_C depend dopage E

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} \propto \frac{\text{Dopage E}}{\text{Dopage B}}$$

- On sait que le dopage est imprecis
- On va conclure que β est imprecis
 - Ex: Meme si la boite dit $\beta=200$, I_C/I_B ne sera pas toujours 200
 - Ca varie d'un transistor a l'autre
 - Ca varie meme avec la temperature

Passons maintenant aux mathematiques...

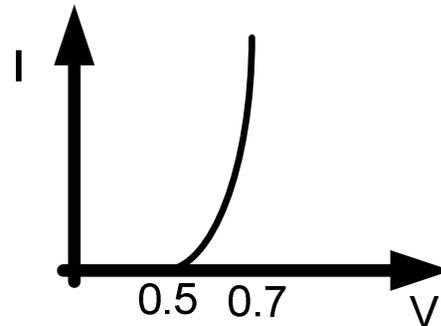
Analyses mathematiques

- Les diodes sont des elements non-lineaires:
 - Difficile de faire l'analyse de facon classique
 - Il fallait modeliser ("faire semblant")
- Transistors plus difficiles a analyser que les diodes
 - On n'etait pas capable d'analyser avec diodes, on ne sera pas plus capable ici
 - Il faudra encore modeliser

Retournons voir les diodes...

Analyses mathematiques

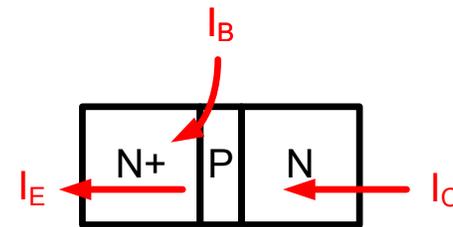
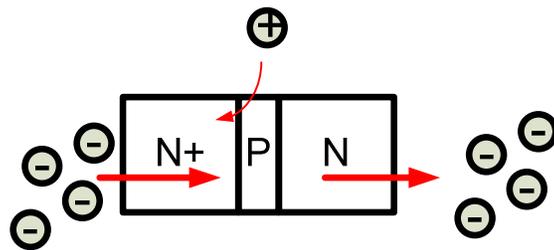
- Premiere chose a savoir (approximation):
 - Diode conduit PLEINEMENT a 0,7v
 - Diode COMMENCE a conduire a 0.5v
- On va utiliser le modele ON-OFF avec chute de 0.7v
 - Mais on va aussi se rappeler que ca commence a conduire vers 0.5v



Analyses mathematiques

- Deuxieme chose a savoir:
 - 1) Trous dans base VONT vers l'emetteur
 - 2) Electrons dans emetteur VONT au collecteur

Equivalent 2) Trous vont du collecteur a l'emetteur



$$I_E = I_B + I_C$$

On avait déjà vu ca ...

Analyses mathematiques

- Troisieme chose a savoir
 - Il y a un lien entre le courant des 3 pattes

- On sait que

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

- Sachant que $I_E = I_B + I_C$, on substitue I_C :

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

- Certains aiment utiliser α :

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

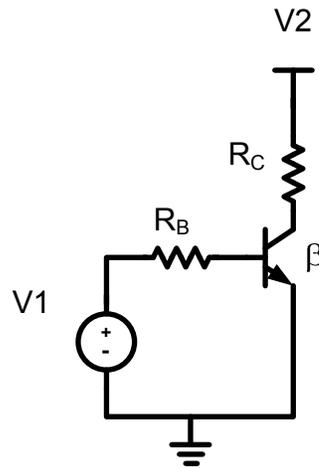
Analyses mathematiques

- Quatrieme chose a savoir: l'analyse n'est pas lineaire et peut etre iterative
- Rappel: Avec diode,
 - On fait l'hypothese de conduction (ou non)
 - On analyse
 - On verifie
- Ici, on a 2 diodes PAR TRANSISTOR (4 hypothese possibles):
 - On fait l'hypothese sur la region d'operation

Il ne faut surtout pas oublier de verifier l'hypothese!

Exemple

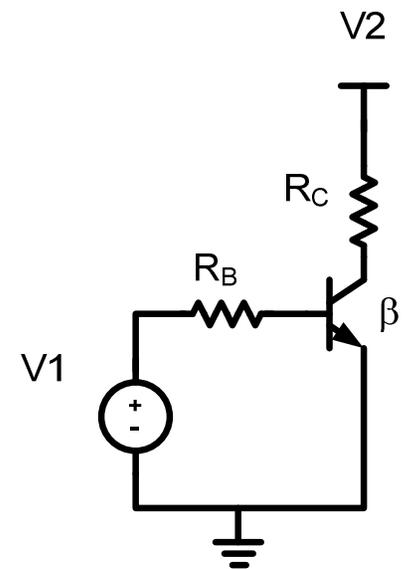
- Trouvez les courants I_B , I_C et I_E si le transistor est en region active



Exemple

- Le probleme nous dit que le transistor est en region active (pas besoin d'hypothese):
 - Transistor est en region active
 - BE: Conduit
 - BC: Ne conduit pas
- Si le transistor conduit, $V_{BE}=0.7v$
 - Donc, $V_B=0.7v$
- Le courant dans la base sera:

$$I_B = \frac{V1 - V_B}{R_B} \quad \Rightarrow \quad I_B = \frac{V1 - 0.7}{R_B}$$



Ce sont tous des parametres connus...

Exemple

- Puisque β est donne, on peut trouver I_C :

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} \quad \Rightarrow \quad I_C = \beta I_B \quad \Rightarrow \quad I_C = \beta \left(\frac{V_{1-0.7}}{R_B} \right)$$

- On connait aussi une relation pour I_E :

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

- On peut donc trouver I_E :

$$I_E = (\beta + 1) I_B = (\beta + 1) \frac{V_{1-0.7}}{R_B}$$

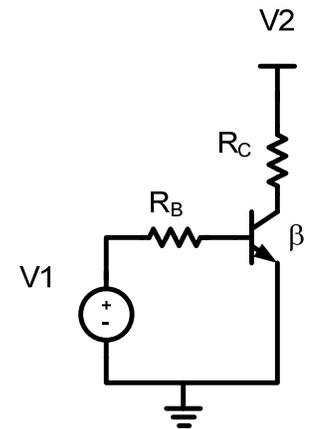
Remarque

- Chose interessante a remarquer:
 - Aucun courant ne depend de R_C ou de V_2
- Quand on est en region **active**, on ne depend pas du circuit au collecteur
 - Les courants sont determines par la base et l'emetteur
 - Les courants sont lies par le β

$$I_C = \beta \frac{V_1 - 0.7}{R_B}$$

$$I_B = \frac{V_1 - 0.7}{R_B}$$

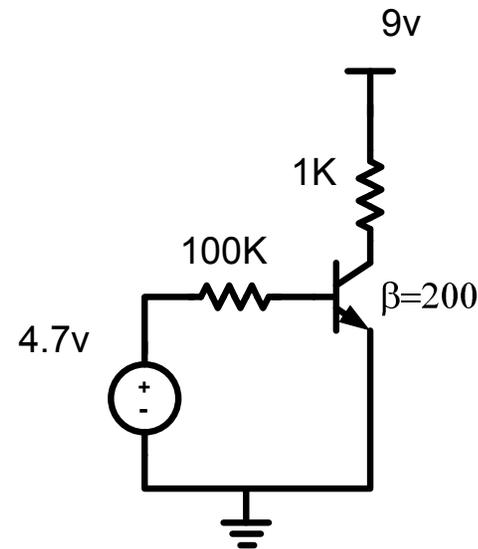
$$I_E = (\beta + 1) \frac{V_1 - 0.7}{R_B}$$



Exemple (seul)

- Trouvez I_C , I_E et I_B
- Verifiez que c'est la bonne region d'operation (en regardant V_B , V_C et V_E)

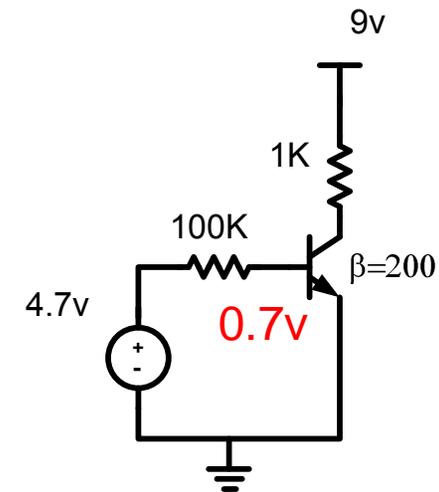
1. Commencez avec l'hypothese
2. Determinez I_B , I_C , I_E , V_B , V_C et V_E
3. Verifiez l'hypothese



Exemple (seul)

- Hypothese: region active
 - La diode BE conduit: V_B est 0.7
- On trouve I_B :

$$I_B = \frac{4.7 - 0.7}{100K} = 40\mu A$$



- Avec β , on trouve facilement I_C et I_E

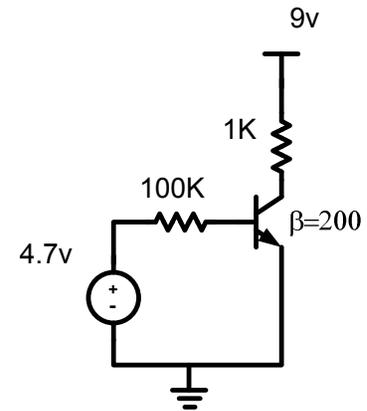
$$I_C = \beta I_B = 8mA$$

$$I_E = (\beta + 1)I_B = 8.04mA$$

Exemple (seul)

- Allons verifier que c'est en region active:
 - $V_{BE}=0.7$
 - $V_{BC} < 0.5$
- On ne peut pas verifier $V_{BE}=0.7$ puisqu'on l'a impose...
- Allons voir V_{BC} :
 - Pour ca, il faut trouver V_C :

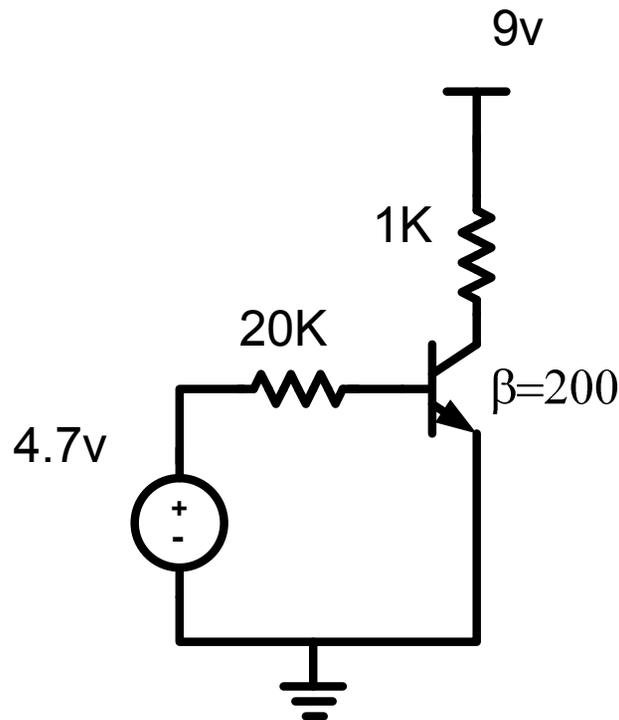
$$V_C = V_{DD} - R_C I_C = 9 - 8 = 1v$$



Avec $V_B=0.7v$, V_{BC} ne conduit pas: c'est verifie!

Exemple

- Trouvez I_C , I_E et I_B
- Verifiez que c'est la bonne region d'operation (en regardant V_B , V_C et V_E)



Exemple

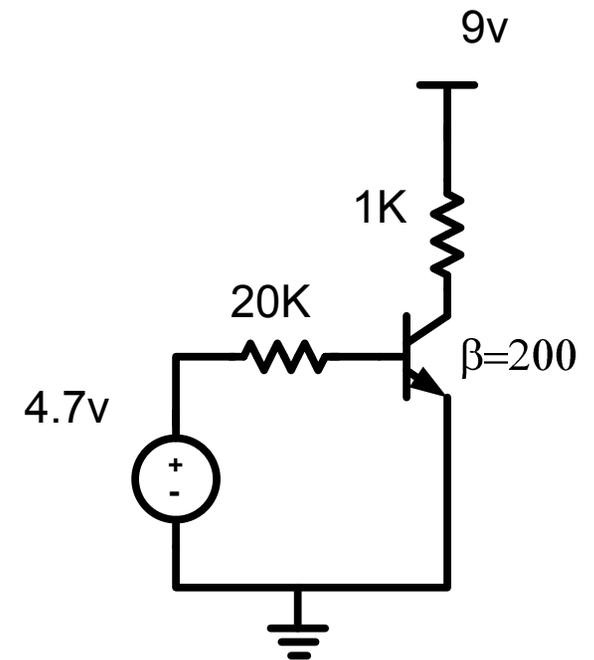
- Hypothese: region active
- Si BE conduit, $V_B=0.7$
- On trouve I_B :

$$I_B = \frac{4.7 - 0.7}{20K} = 0.2mA$$

- On trouve I_E et I_C avec β :

$$I_E = (\beta + 1)I_B = 40.2mA$$

$$I_C = \beta I_B = 40mA$$



Exemple

- Allons calculer les tensions pour vérifier l'hypothèse
- Trouvons V_C :

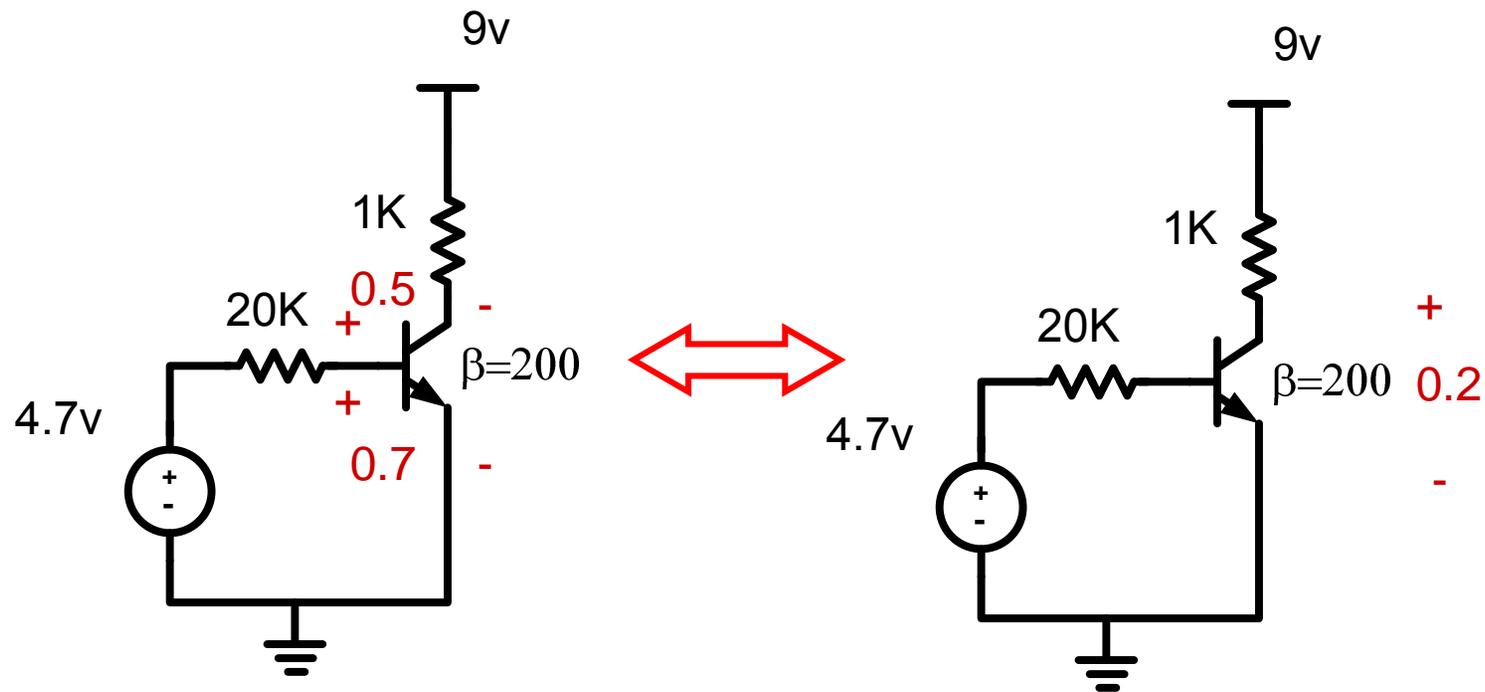
$$V_C = V_{DD} - R_C I_C = 9 - 40 = -31$$

- Si V_C était -31v, la jonction BC conduirait
- On serait en saturation... il y a donc une contradiction:
 - Mon hypothèse disait que je suis en région active

On recommence le tout du début...

Exemple - Explications

- Il faut recommencer dans la saturation:
 - Jonction BE conduit pleinement (0.7v)
 - Jonction BC COMMENCE a conduire (0.5v)



Exemple

- Maintenant, on connaît V_C .
- On trouve I_C :

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

- On remplace par les chiffres:

$$0.2 = 9 - I_C 1K$$

- On isole I_C :

$$8.8mA = I_C$$

Exemple

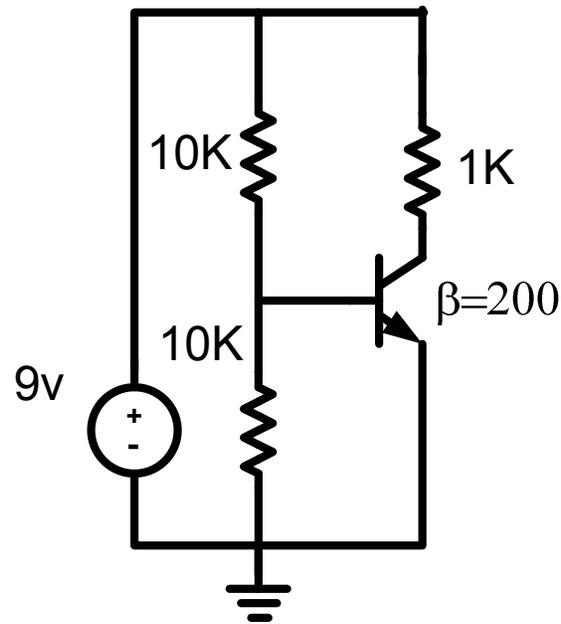
- Faisons un calcul rapide:

$$\frac{I_C}{I_B} = \frac{8.8mA}{0.76mA} = 11.6$$

- I_C/I_B n'est pas égal à β (200)
- Ce nouveau I_C/I_B , on l'appelle le β effectif (β_{EFF})
- Donc, en saturation, le gain baisse...

Exemple (seul)

- Trouvez I_C , I_E et I_B
- Verifiez que c'est la bonne region d'operation (en regardant V_B , V_C et V_E)



Exemple (seul)

- Hypothese: region active
- Equation de noeuds a la base:

$$\frac{9-0.7}{10K} = \frac{0.7}{10K} + I_B$$

- J'isole I_B : $I_B = \frac{7.6}{10K} = 760\mu A$

- Je calcule I_C avec β :

$$I_C = \beta I_B = 760\mu A \cdot 200 = 152mA$$

Exemple (seul)

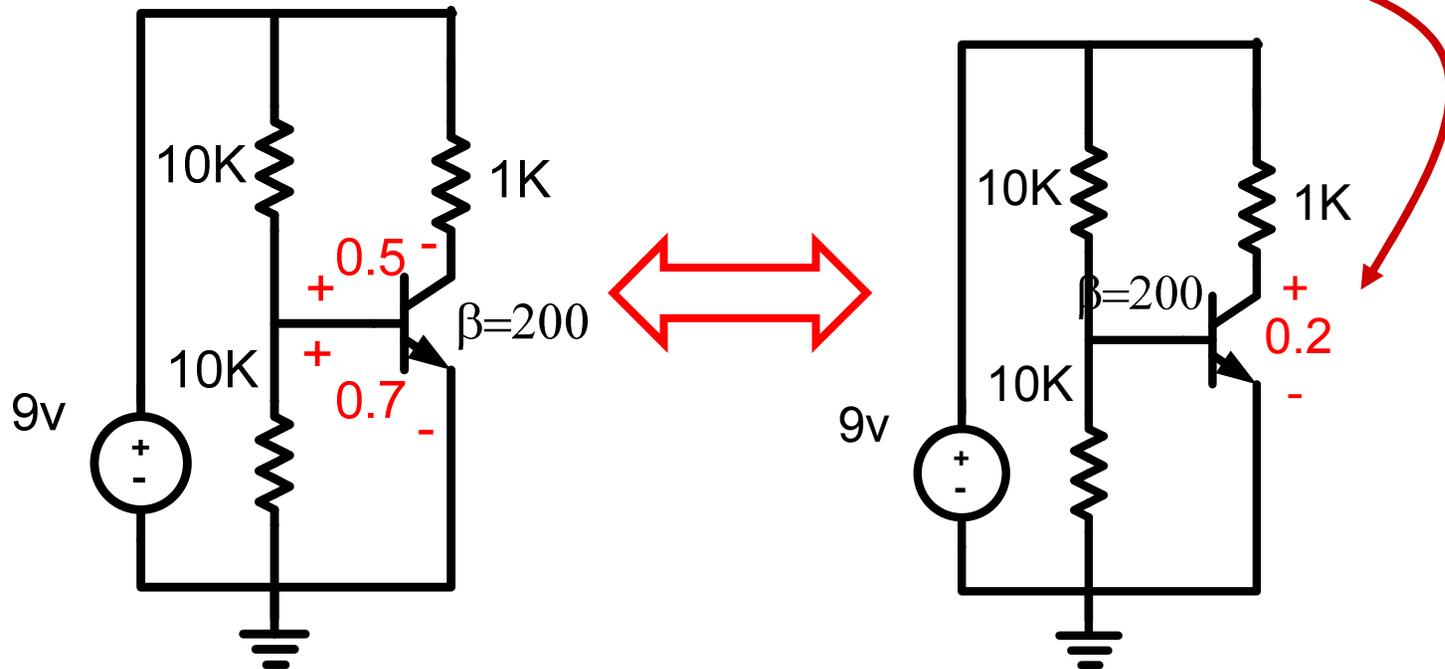
- A la place de perdre mon temps avec I_E , je vérifie V_C :

$$V_C = V_{DD} - I_C R_C = 9 - 152 = -143\text{v}$$

- Je vois déjà que mon hypothèse était fausse
- Re commençons avec la saturation

Exemple (seul) - Explications

- En saturation
 - Une diode conduit pleinement (0.7v)
 - L'autre COMMENCE a conduire (0.5v)
 - Certains appellent ca: $V_{CESAT}=0.2v$



Exemple (seul)

- Avec V_C , on calcule I_C :

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

- On remplace avec des chiffres et on isole:

$$I_C = \frac{8.8}{1K} = 8.8mA$$

- On calcule β_{EFF} :

$$\frac{I_C}{I_B} = \frac{8.8mA}{0.76mA} = 11.6$$

Le gain a chute de beaucoup

Pourquoi β est important

- Une des applications des transistors c'est l'amplification.
- On veut prendre un signal faible et le rendre fort
- Cas simple:
 - On connecte un micro a la base et on lit le courant au collecteur
 - Le courant au collecteur ressemble a celui a la base mais β fois plus gros

Pourquoi β est important

- Pour ce cas, on veut un gros gain
- Vous allez voir (systemes asservis) qu'on veut souvent avoir un gain infini:
 - En boucle fermee, on peut "echanger" ce gain contre d'autres bonnes choses
- Dans ces cas, on veut un GAIN I_C/I_B eleve.
- Dans ces cas, on veut etre en region active

Quand β n'est pas important

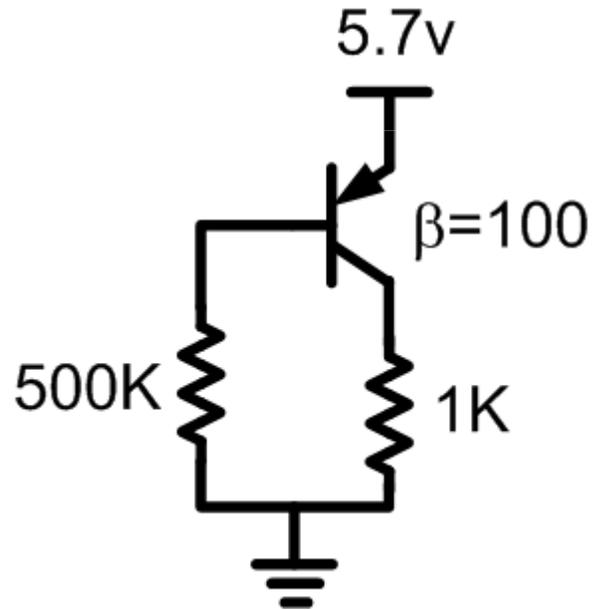
- Dans d'autres cas, on ne s'intéresse pas au lien entre I_C et I_B .
- On veut simplement faire passer (ou bloquer) un gros courant
- On pense par exemple à un interrupteur
- Deuxième exemple: les portes logiques
- Dans ces cas, on veut être en saturation

Les autres regions?

- Quand est-ce qu'on veut etre en inverse?
- Reponse: Pas souvent
 - Le transistor n'est pas fait pour operer dans cette region.
- Quand est-ce qu'on veut etre en cutoff?
- Quand on opere en interrupteur, on est soit "ON" (saturation) ou "OFF" (cut-off)
- Meme chose pour les portes logiques.

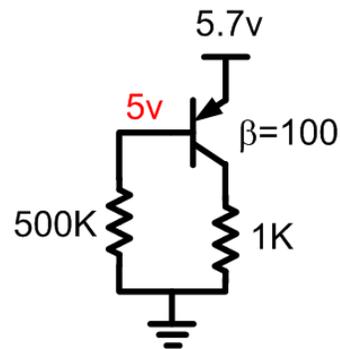
Exemple (seul)

- Trouvez V_B , V_C , V_E , I_B , I_C et I_E pour le circuit suivant:



Exemple (seul)

- Hypothese:
 - La resistance a la base est faible: petit courant a la base
 - La resistance au collecteur est faible: tension V_C faible
 - Ca semble donner une indication que c'est en region active



BE conduit (chute de 0.7v)
BC bloque

Exemple (seul)

- Le courant qui sort de la base est:

$$I_B = \frac{5-0}{500K} = 10\mu A$$

- En region active, le gain est maximal:

$$I_C = \beta I_B = 1mA$$

- La tension a V_C est de 1v:
 - Jonction BE conduit
 - Jonction BC bloque

Hypothese verifiee... (il faut faire le reste des calculs)

Exemple (seul)

- Les reponses sont:
 - La tension a V_E est de 5.7v (donne)
 - La tension a V_B est de 5v (“calcule”)
 - La tension a V_C est de 1v (calcule)
 - Le courant I_B est de 10 μ A (calcule)
 - Le courant I_C est de 1mA (calcule)
 - Le courant I_E est de 1.01mA (calcule)

Resume

- Pour NPN:
 - J'ai besoin d'un courant qui ENTRE dans la base
 - Ce courant va donner 0.7v de V_{BE}
 - En region active, j'ai $I_C = \beta I_B$
 - En saturation, j'ai $V_{CE} = V_{CESAT}$
- Pour PNP
 - J'ai besoin d'un courant qui SORT de la base
 - Ce courant va donner 0.7 de V_{EB}
 - En region active, j'ai $I_C = \beta I_B$
 - En saturation, j'ai $V_{EC} = V_{CESAT}$

Questions

- Est-ce que ces circuits vont fonctionner?

