

Électronique

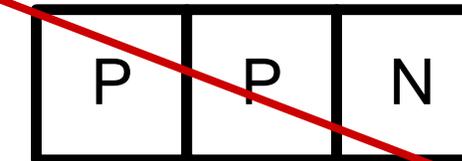
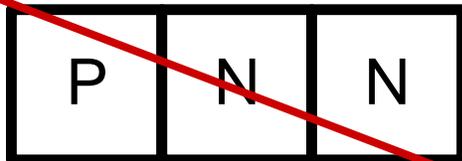
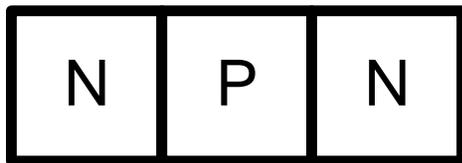
Introduction aux Transistors Bipolaires

Mise en contexte

- Première étape: le silicium
- Deuxième étape: Dopage N et P
 - Fonctionnalité limitée. Ça conduit bien ou mal...
- Troisième étape: Bloc de N et P: diode
 - Parfois ça conduit (0.7v), parfois ça ne conduit pas
 - Intéressant pour plusieurs applications
 - Problème: Manque de contrôle de "l'extérieur"
- Ajoutons un bloc de silicium à la diode

Structure Physique

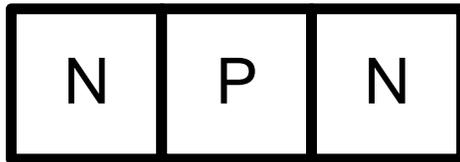
- Ajoutons soit un N ou un P.
- Résultat:
 - 2 N et 1 P
 - 2 P et 1 N
- Voici les configurations possibles



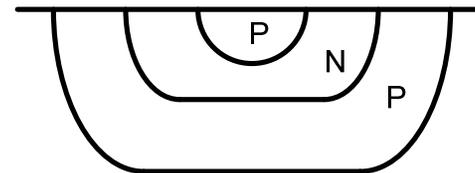
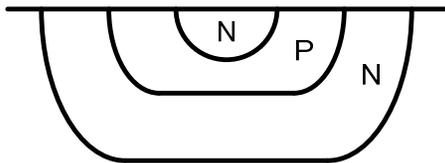
Identique à une diode PN

Structure Physique

- Il reste donc 2 configurations possibles:



- Les noms sont appropriées: NPN et PNP
- Les structures réelles ressemblent à ceci:

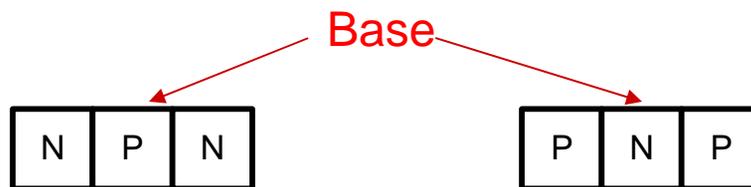


Structure Physique

- NPN: Transistor de type N

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

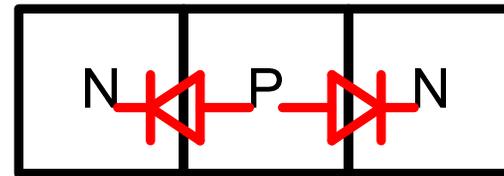
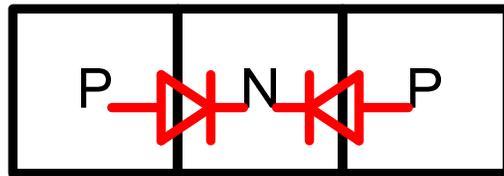
P	N	P
---	---	---
- Il y a 3 parties dans un transistor:
 - Collecteur
 - Émetteur
 - Base
- La base est la région du milieu



On distinguera les 2 autres par la suite...

Fonctionnement

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

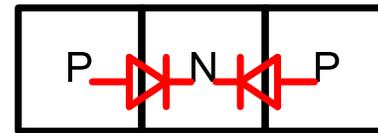
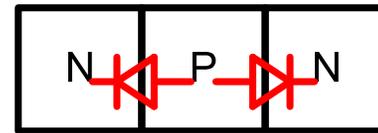


- On applique des tensions aux différents blocs
- Le fonctionnement sera semblable au fonctionnement de 2 diodes dos-à-dos
- Il y a aussi interaction entre les 2 diodes

Fonctionnement

- Fonctionnement dépend des 2 diodes:
 - Chaque diode peut conduire ou être bloquée
- On peut “polariser” les diodes de 4 façons:

- Bloqué – Bloqué
- Bloqué – Conduit
- Conduit – Bloqué
- Conduit – Conduit



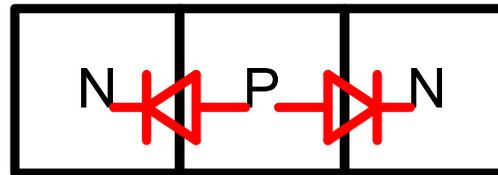
- Chaque “façon” correspond à une région d’opération

Survolons rapidement chacune de ces régions d’opération

Région “cut-off”

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

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



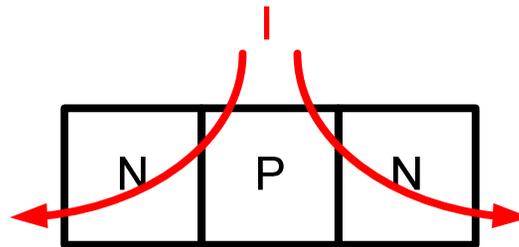
(pour NPN)

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

Région de saturation

- **Cas #2: les 2 diodes conduisent**

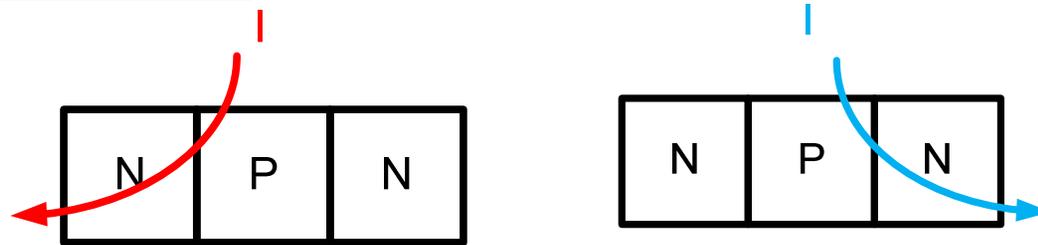
- V_p doit être plus grand que les 2 N de 0.7v
- C'est plus ou moins vrai: on verra plus tard



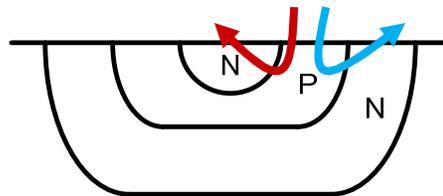
- On remarque que la base (milieu) fournit beaucoup de courant
- On appelle ça la region de **saturation**

Région active (ou inverse)

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



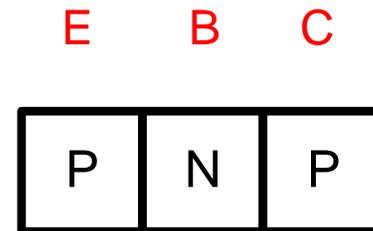
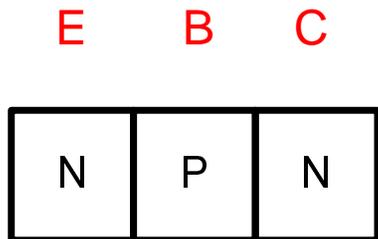
- Selon le cas, on va dire que c'est soit en région **active** ou soit en région **inverse**



Allons maintenant voir ces 2 régions en détails...

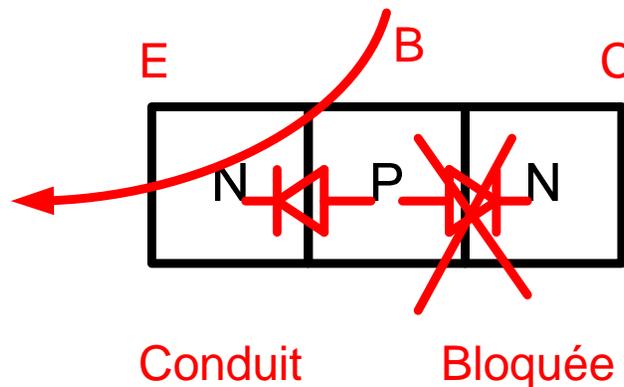
Région Active

- 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... (ça va changer!)



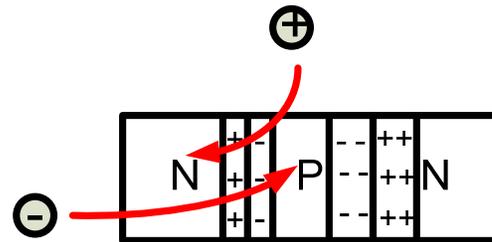
Région Active

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

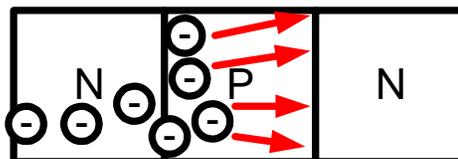


Région Active

- Reprenons ça avec plus de détails:
 - Les trous vont de la base à l'émetteur
 - Les électrons vont de l'émetteur à la base

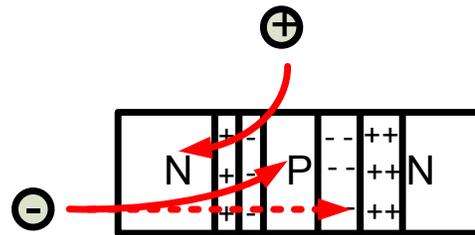


- Quand les charges arrivent, ils diffusent parce qu'ils sont minoritaires.
 - Concentrons-nous sur les électrons à la base...



Région Active

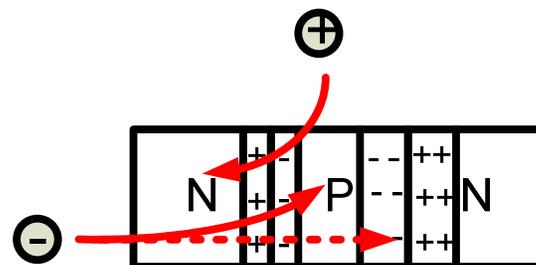
- La diffusion des électrons fait 2 choses:
 - Amène les électrons à la connexion de la base
 - Amène les électrons dans la zone charge-espace



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

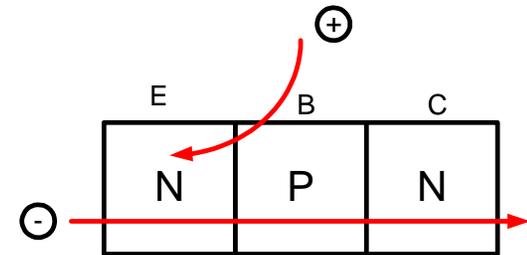
Région Active: sommaire

- 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)

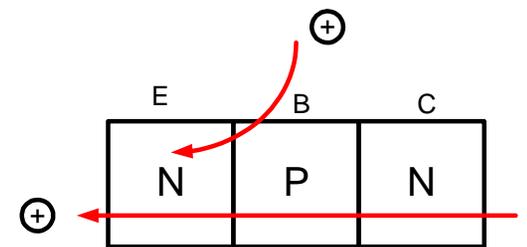


Région Active: résumé

- Base:
 - Envoie des trous (+)
- Émetteur:
 - Envoie des électrons (-)
 - Reçoit des trous (+)
- Collecteur
 - Reçoit des électrons (-)
- On voit que l'émetteur a le plus de courant
 - $I_E = I_C + I_B$ (première équation importante des BJT)



Électrons à droite = trous à gauche



Retournons voir la structure physique des BJT

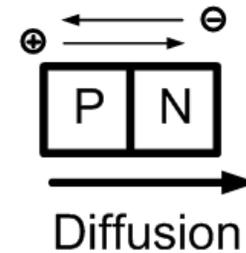
Retour sur la structure physique

- Le courant de base permet un courant émetteur-collecteur
- On aimerait exagérer ce phénomène:
 - On aimerait qu'un PETIT courant à la base cause un GROS courant émetteur-collecteur
 - Comment faire ça?
- Retournons ajouter de l'information sur les diodes...

Retour sur la structure physique

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

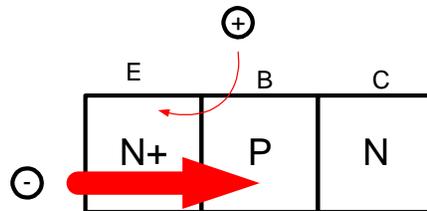
- Diffusion d'électrons N vers P
- Diffusion de trous P vers N



- Quand le dopage N et P sont égaux, les 2 courants de diffusion sont égaux
 - Si N est plus dopé que P, le courant sera majoritairement des électrons
 - Si P est plus dopé que N, le courant sera plus des trous

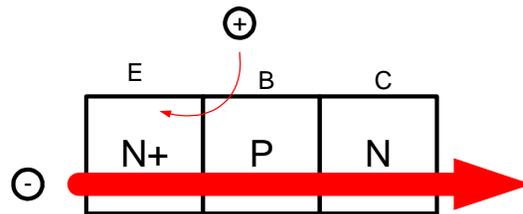
Retour sur la structure physique

- Alors, SI une diode avait:
 - Gros dopage N
 - Petit dopage P
- Le courant serait composé de beaucoup d'électrons et peu de trous
- Si l'émetteur était dopé fortement:
 - Un petit courant à la base (trous) amènerait un gros courant de l'émetteur



Retour sur la structure physique

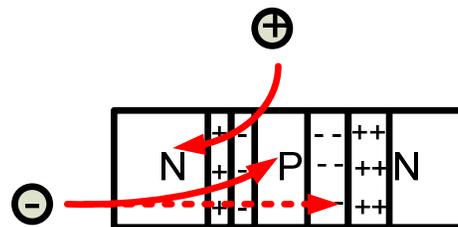
- Dans une diode, les électrons iraient tous dans l'anode (le P)
 - Ici, la diffusion à la base amène les électrons vers le collecteur
 - Rappel: c'est dû à la région charge-espace
- **DONC!** Petit courant à la base contrôle un gros courant Émetteur-Collecteur



Il reste encore un autre détail...

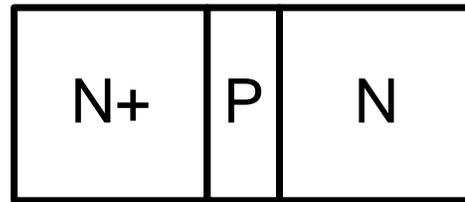
Retour sur la structure physique

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

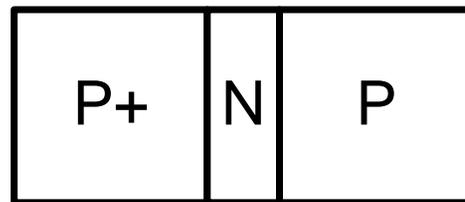


Retour sur la structure physique

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



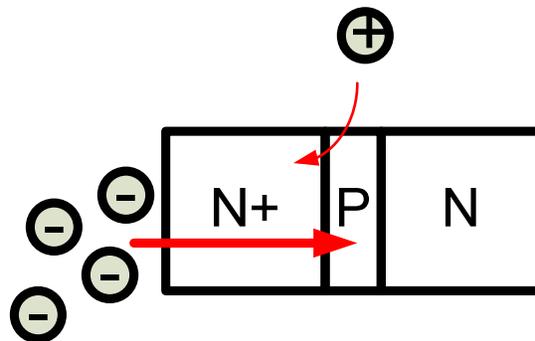
- Le même raisonnement s'applique pour les PNP:



Revoyons ENCORE une fois comment le transistor fonctionne...

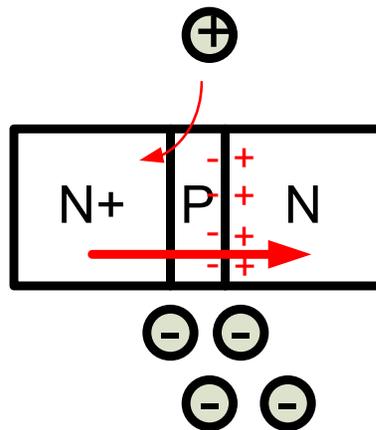
Région Active

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



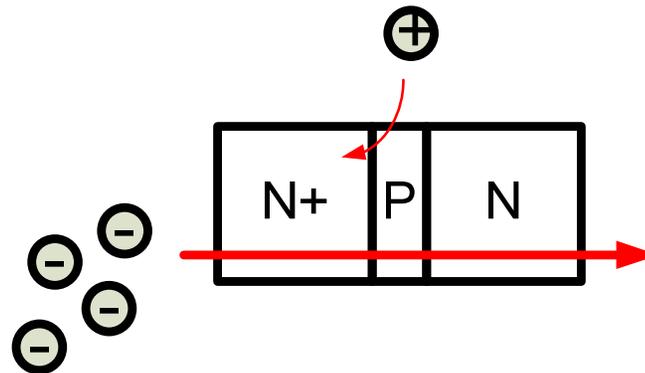
Région Active

- 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



Région Active

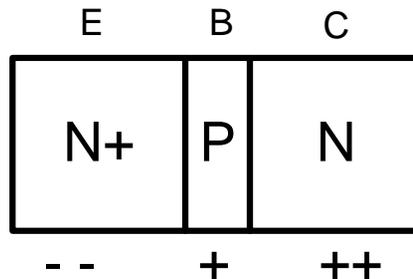
- Conclusion:
 - Petit courant dans la base controle gros courant entre emetteur-collecteur



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

Région de saturation

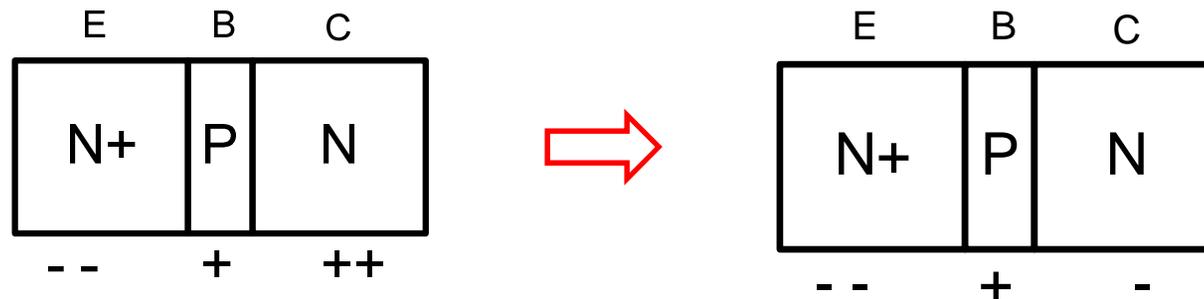
- En region active, on avait:
 - Jonction BE conduit: $V_B > V_E + 0.7$
 - Jonction BC bloquee: $V_B < V_C + 0.7$



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

Région de saturation

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

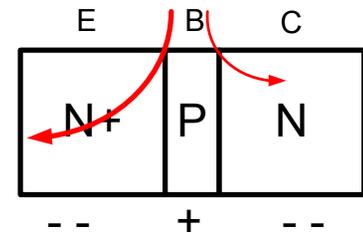


Que se passe-t-il?

Région de saturation

- La jonction BE conduit comme avant

- Champ inverse BC est moins fort
- Base fournit du courant a E et a C



- Effet:

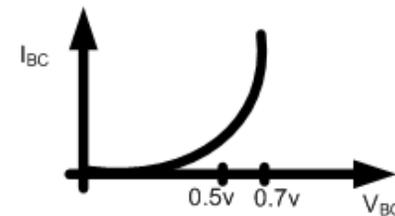
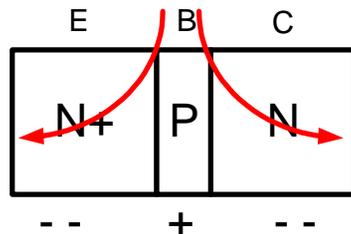
- Courant a la base beaucoup plus elevee
- Courant a l'emetteur reste a peu pres le meme
- Courant a la base s'oppose au courant au collecteur

On voulait petit courant B qui controle gros courant EC

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

Région de saturation

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

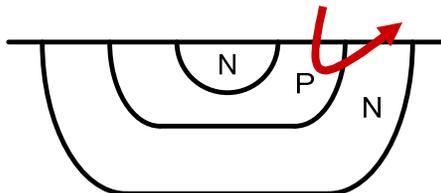


- Plus V_C baisse, plus le I_{BC} est grand
- Ca tendrait à augmenter V_C
- La tension BC se stabiliserait à une valeur donnée
- En pratique, on dit que cette tension est $\sim 0.5\text{v}$
- C'est la tension quand la diode COMMENCE à conduire...

Passons maintenant à la dernière région d'opération

Région 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...



Représentation du transistor

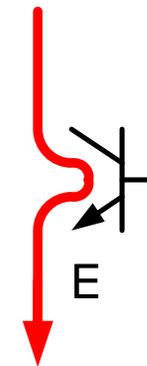
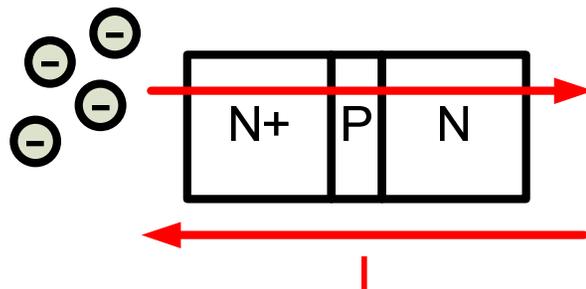
- On représente le transistor avec ces symboles:



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

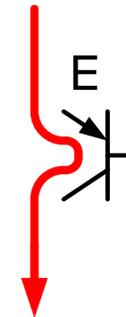
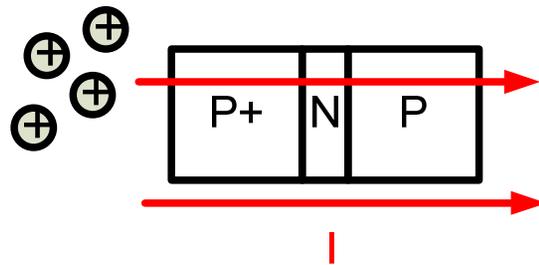
Représentation du transistor

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



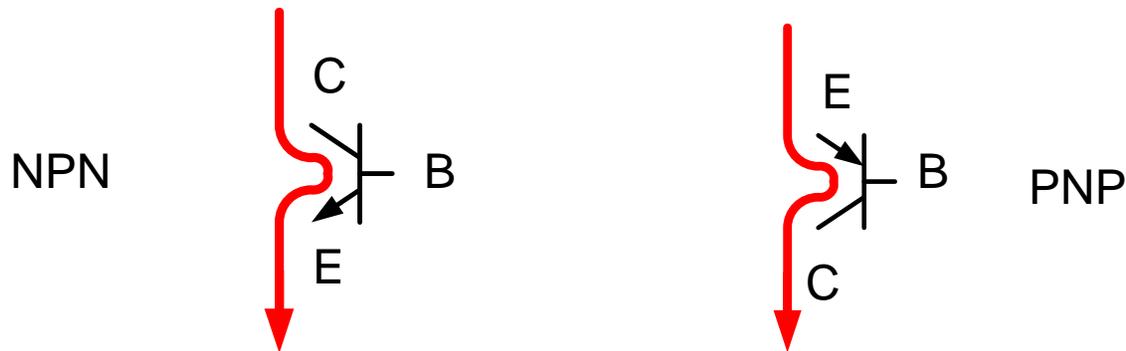
Représentation du transistor

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



Représentation du transistor

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

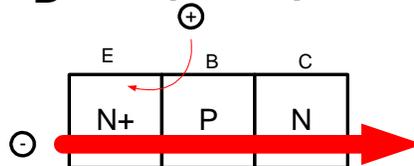


- La patte qui reste, c'est la base

Devenez confortables avec les diagrammes et les pattes...

Gain du transistor (β)

- L'idée de base derrière un transistor c'est:
 - Petit courant à la base pour contrôler un gros courant entre collecteur et émetteur
 - Comment petit est le courant à 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" = très petit I_B et gros I_C
 - "Petit gain" = I_B un peu plus petit que I_C

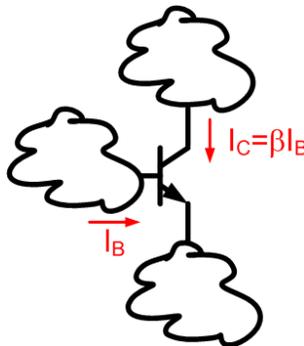


Gain du transistor (β)

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

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

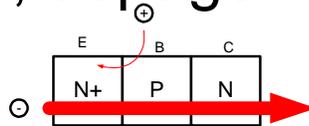
- Ex: si $\beta=100$, en entrant I_B , le courant I_C peut être jusqu'à 100 fois plus gros.



Qu'est-ce qui détermine le β ?

Gain du transistor (β)

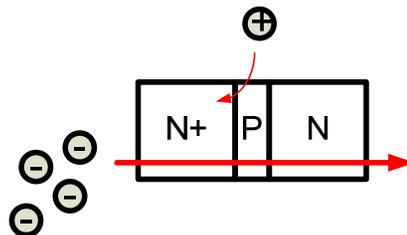
- Le courant d'une diode dépend du dopage P et N
 - Dans les transistors, c'est différent
- I_B dépend seulement du dopage de B
 - Pas le dopage E parce que les électrons ne vont pas dans B
- I_E dépend du dopage dans B et dans E:
 - Habituellement, dopage E est beaucoup plus grand et donc, dopage B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



Il reste à considérer I_C ...

Gain du transistor (β)

- I_C dépend SEULEMENT du dopage E
 - I_C c'est les électrons de E qui diffusent dans B
- Conclusion intermédiaire intéressante:
 - SI I_B négligeable vs I_E
 - ET SI aucune recombinaison dans B
 - $I_C = I_E$



Gain du transistor (β)

- On résume:

- I_B dépend dopage B
- I_C dépend dopage E

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

- On sait que le dopage est imprécis
- On va conclure que β est imprécis
 - Ex: Même si la boîte dit $\beta=200$, I_C/I_B ne sera pas toujours 200
 - Ça varie d'un transistor à l'autre
 - Ça varie même avec la température

Passons maintenant aux mathématiques...

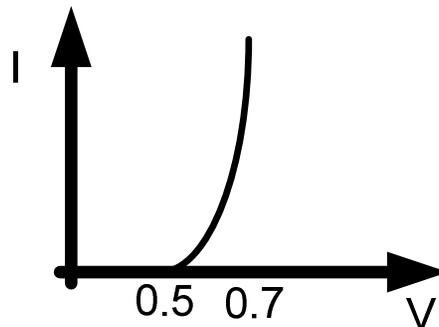
Analyses mathématiques

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

Retournons voir les diodes...

Analyses mathématiques

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



Analyses mathématiques

- Deuxième chose à savoir:
 - 1) Trous dans base VONT vers l'émetteur
 - 2) Électrons dans émetteur VONT au collecteur

Équivalent 2) Trous vont du collecteur à l'émetteur



$$I_E = I_B + I_C$$

On avait déjà vu ça ...

Analyses mathématiques

- Troisième chose à 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 :

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

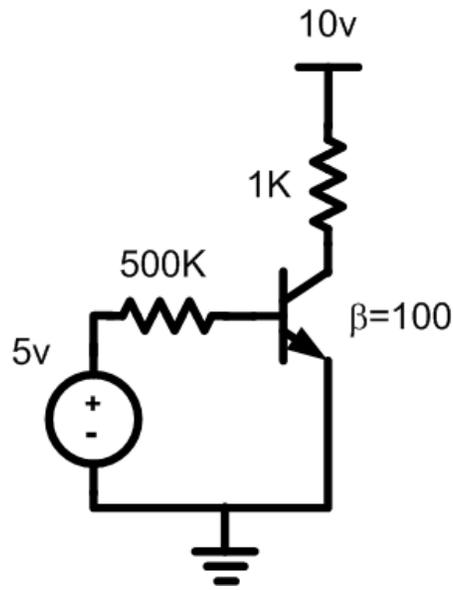
Analyses mathématiques

- Quatrième chose à savoir: l'analyse n'est pas linéaire et peut être itérative
- Rappel: Avec diode,
 - On fait l'hypothèse de conduction (ou non)
 - On analyse
 - On vérifie
- Ici, on a 2 diodes PAR TRANSISTOR (4 hypothèses possibles):
 - On fait l'hypothèse sur la région d'opération

Il ne faut surtout pas oublier de vérifier l'hypothèse!

Exemple

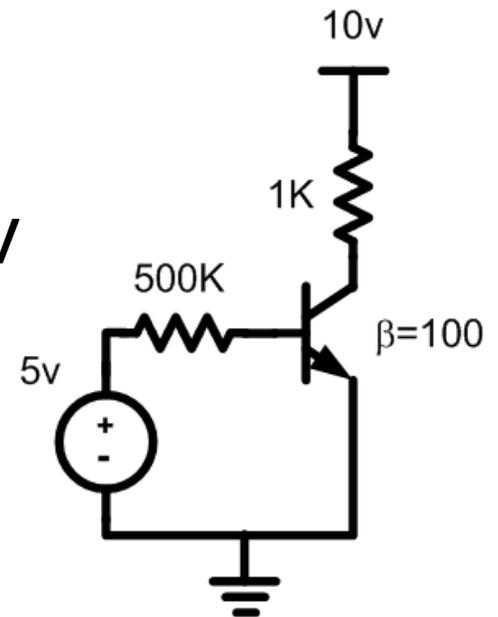
- Trouvez les courants I_B , I_C et I_E
- Vérifiez que c'est la bonne région d'opération (en regardant V_B , V_C et V_E)



Exemple

- On commence toujours avec l'hypothèse:
 - Transistor est en région active (on devine)
 - 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:

$$I_B = \frac{5 - 0.7}{500K} = 8.6\mu A$$



Exemple

- Puisque β est donné, on peut trouver I_C :

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} \quad \Rightarrow \quad I_C = \beta I_B \quad \Rightarrow \quad I_C = 100 \cdot 8.6 \mu\text{A} = 0.86 \text{mA}$$

- On connaît aussi une relation pour I_E :

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

- On peut donc trouver I_E :

$$I_E = 101 \cdot 8.6 \mu\text{A} = 0.8686 \text{mA}$$

Exemple

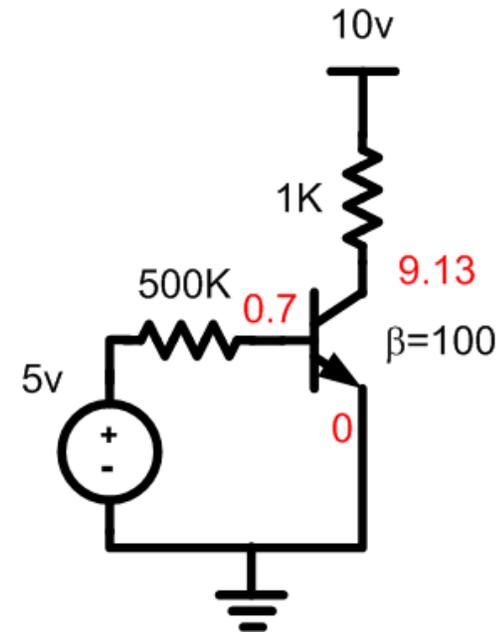
- Il faut maintenant vérifier l'hypothèse:
 - Est-ce que BC est réellement bloqué?

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

- Avec des chiffres:

$$V_C = 10 - 0.8686 = 9.1314$$

- La jonction BC est bloquée:
 - Hypothèse confirmée



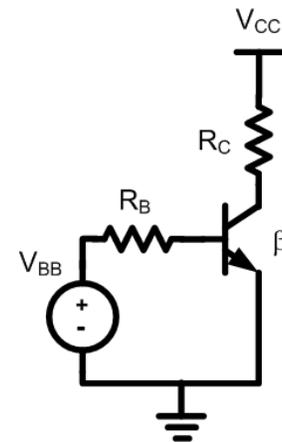
Remarque

- Chose intéressante à remarquer:
 - Aucun courant ne dépend de R_C ou de V_{CC}
- Quand on est en région **active**, on ne dépend pas du circuit au collecteur
 - Les courants sont déterminés par la base et l'émetteur
 - Les courants sont liés par le β

$$I_B = \frac{V_{BB} - 0.7}{R_B}$$

$$I_C = \beta I_B$$

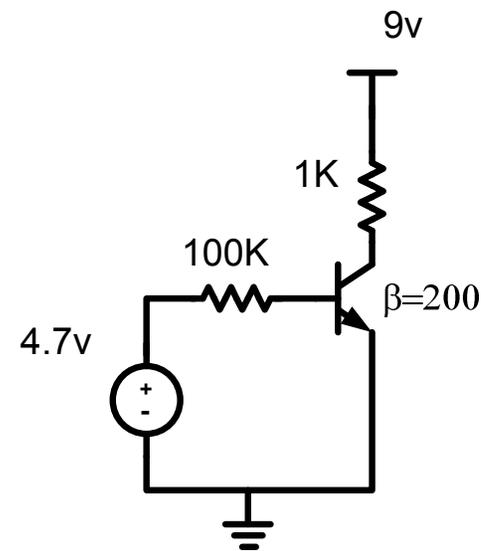
$$I_E = (\beta + 1)I_B$$



Exemple (seul)

- Trouvez I_C , I_E et I_B
- Vérifiez que c'est la bonne région d'opération (en regardant V_B , V_C et V_E)

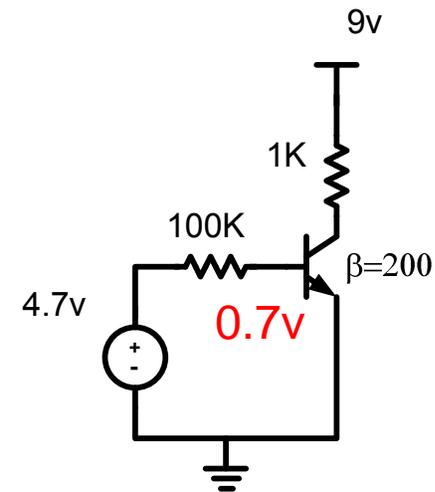
1. Commencez avec l'hypothèse
2. Déterminez I_B , I_C , I_E , V_B , V_C et V_E
3. Vérifiez l'hypothèse



Exemple (seul)

- Hypothèse: région 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

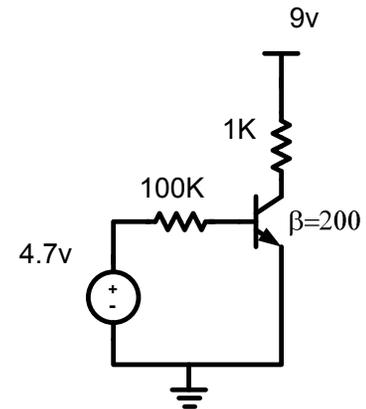
$$I_C = \beta I_B = 8mA$$

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

Exemple (seul)

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

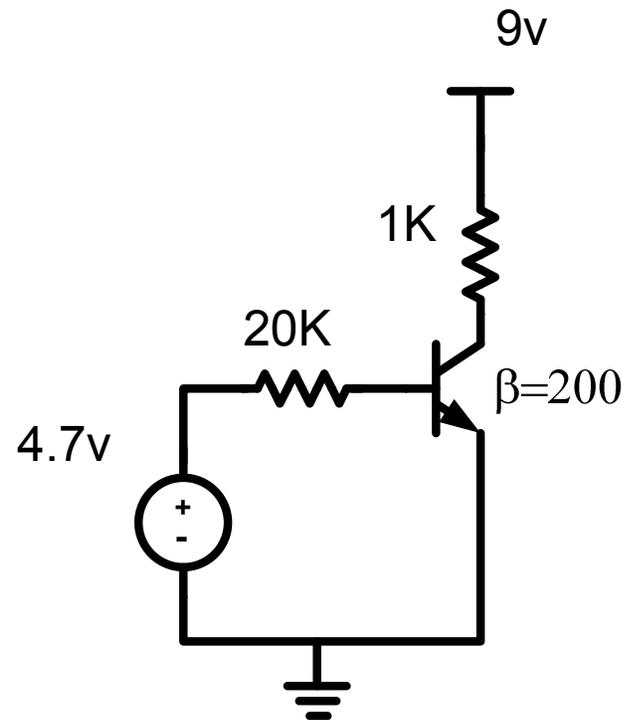
$$V_C = V_{DD} - R_C I_C = 9 - 8 = 1\text{v}$$



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

Exemple

- Trouvez I_C , I_E et I_B
- Vérifiez que c'est la bonne région d'opération (en regardant V_B , V_C et V_E)



Exemple

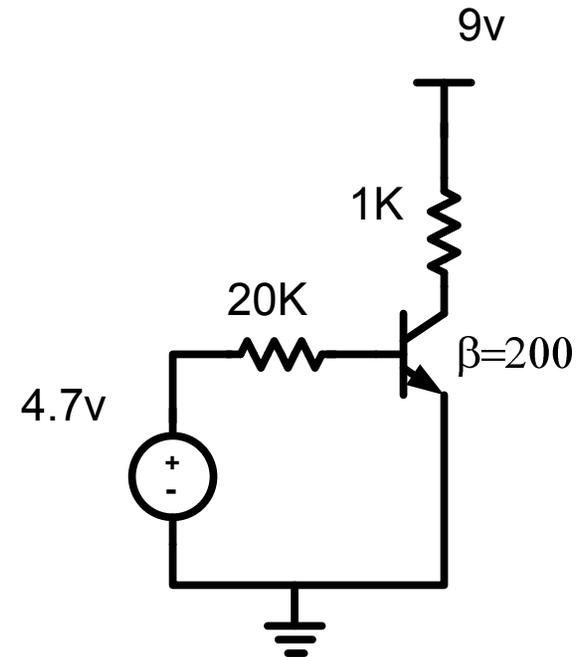
- Hypothèse: région active
- BE conduit: $V_B=0.7$
- On trouve I_B :

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

- On trouve I_E et I_C avec β :

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

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



Exemple

- Vérifions l'hypothèse
- Trouvons V_C :

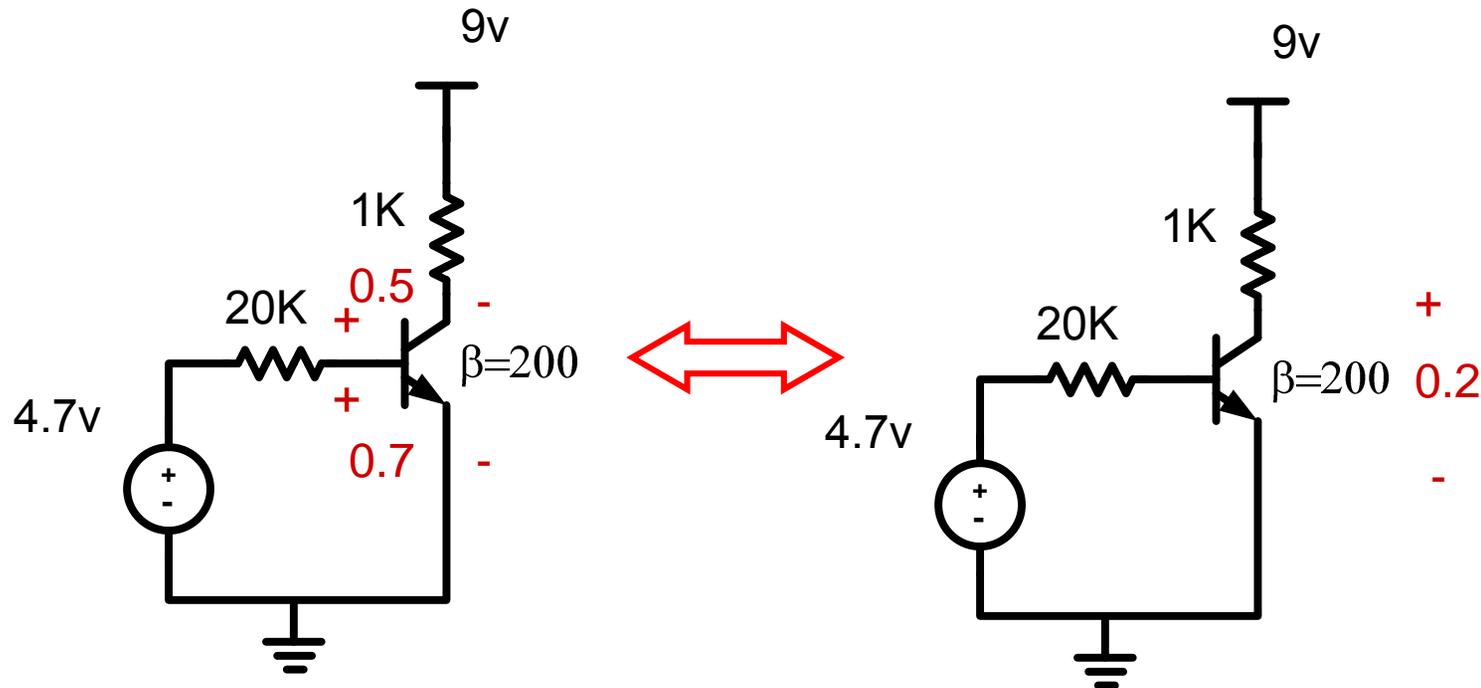
$$V_C = V_{CC} - R_C I_C = 9 - 40 = -31$$

- Si V_C était -31v, la jonction BC conduirait
- On serait en saturation... il y a 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 à conduire (0.5v)



Exemple

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

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

- On remplace par les chiffres:

$$0.2 = 9 - I_C 1K$$

- On isole I_C :

$$8.8mA = I_C$$

Exemple

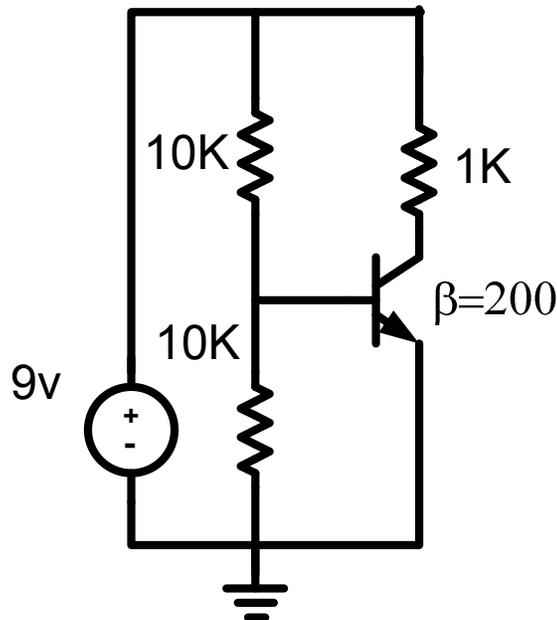
- Faisons un calcul rapide:

$$\frac{I_C}{I_B} = \frac{8.8mA}{0.2mA} = 44$$

- I_C/I_B n'est pas égal a 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
- Vérifiez que c'est la bonne région d'opération (en regardant V_B , V_C et V_E)



Exemple (seul)

- Hypothèse: région active
- Équation de noeuds à 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)

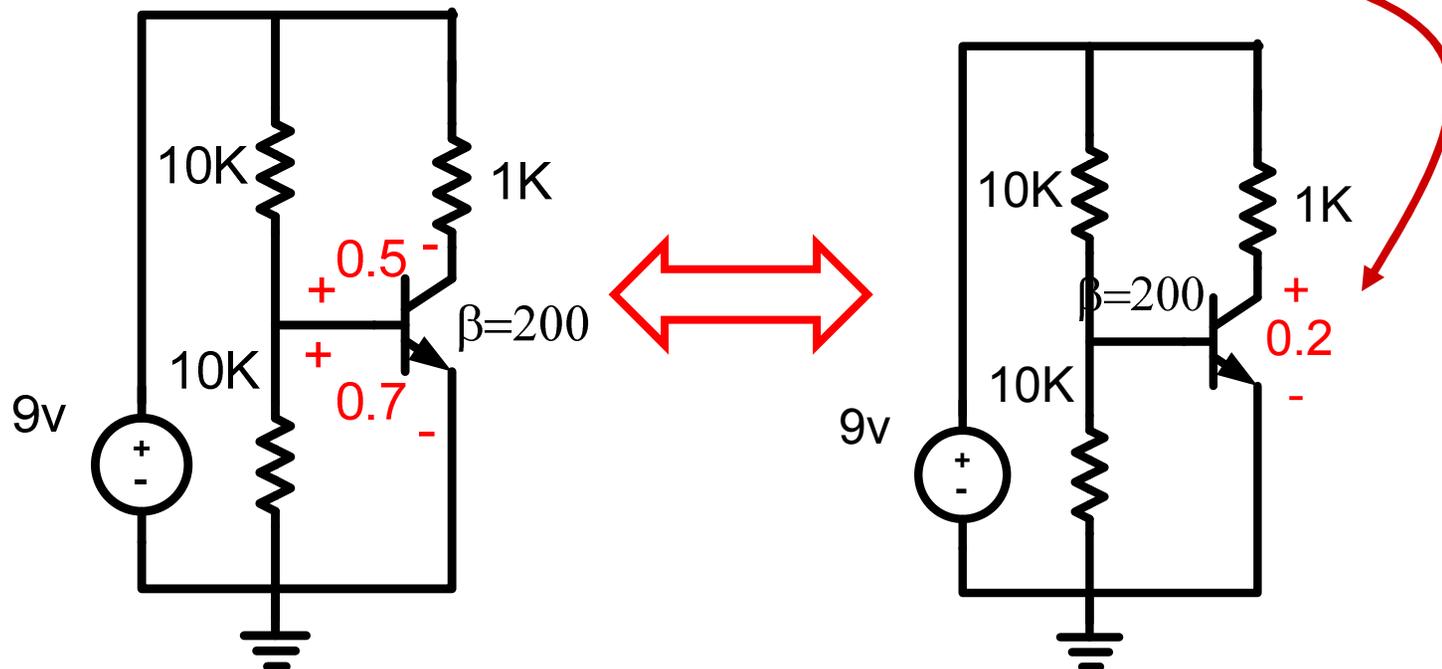
- À la place de perdre mon temps avec I_E , je vérifie V_C :

$$V_C = V_{CC} - I_C R_C = 9 - 152 = -143v$$

- 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 à conduire (0.5v)
 - Certains appellent ça: $V_{CESAT}=0.2v$



Exemple (seul)

- Avec V_C , on calcule I_C :

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

- 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 à la base et on lit le courant au collecteur
 - Le courant au collecteur ressemble à celui à la base mais β fois plus gros

Pourquoi β est important

- Pour ce cas, on veut un gros gain
- Vous allez voir (systèmes asservis) qu'on veut souvent avoir un gain infini:
 - En boucle fermée, on peut “échanger” ce gain contre d'autres bonnes choses
- Dans ces cas, on veut un GAIN I_C/I_B élevé.
- Dans ces cas, on veut être en région active

Quand β n'est pas important

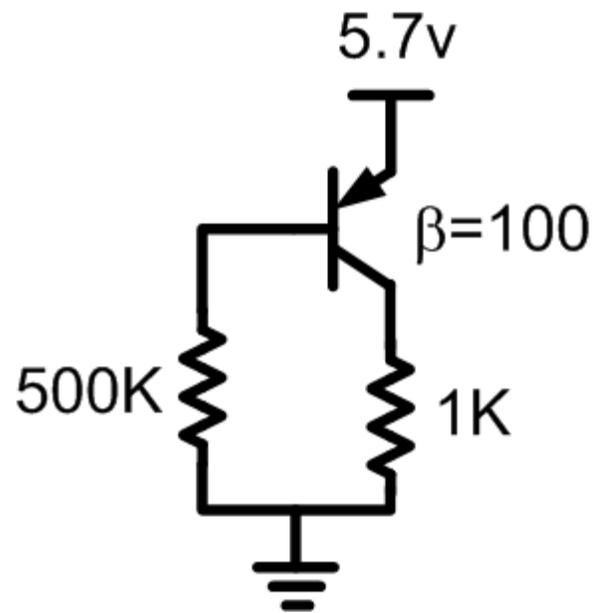
- Dans d'autres cas, on ne s'intéresse pas au lien entre I_C et I_B .
- On veut simplement faire passer (ou bloquer) un gros courant
- On pense par exemple à un interrupteur
- Deuxième exemple: les portes logiques
- Dans ces cas, on veut être en saturation

Les autres régions?

- Quand est-ce qu'on veut être en inverse?
 - Commutation analogique
 - Exemple d'application: échantillonneur
- Quand est-ce qu'on veut être en cutoff?
- Quand on opère en interrupteur, on est soit "ON" (saturation) ou "OFF" (cut-off)
- Même chose pour les portes logiques.

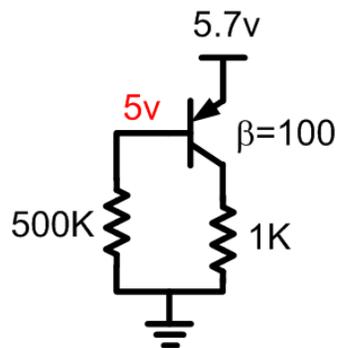
Exemple (seul)

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



Exemple (seul)

- Hypothèse:
 - La résistance à la base est faible: petit courant à la base
 - La résistance au collecteur est faible: tension V_C faible
 - Ça semble donner une indication que c'est en région active



BE conduit (chute de 0.7v)
BC bloqué

Exemple (seul)

- Le courant qui sort de la base est:

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

- En région active, le gain est maximal:

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

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

Hypothèse vérifiée... (il faut faire le reste des calculs)

Exemple (seul)

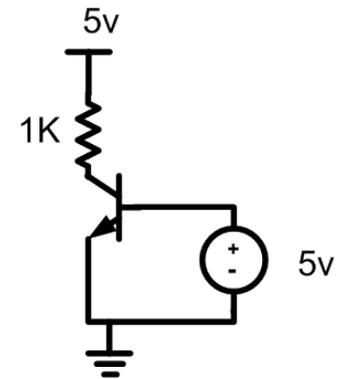
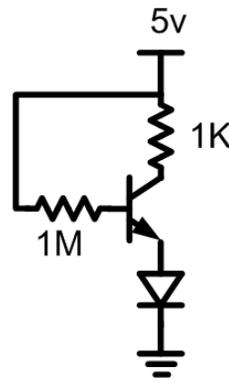
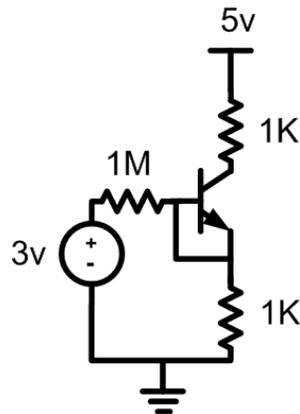
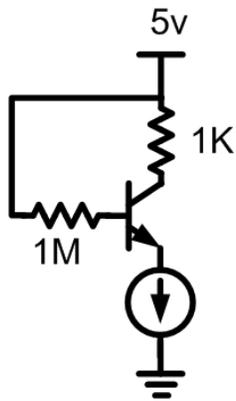
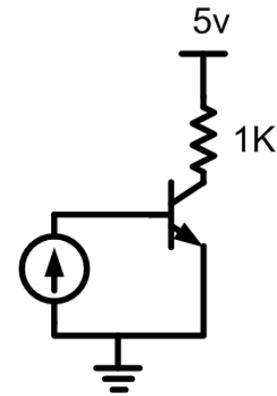
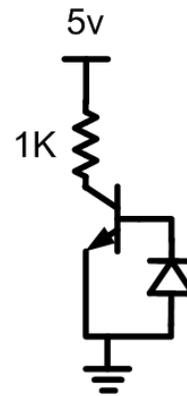
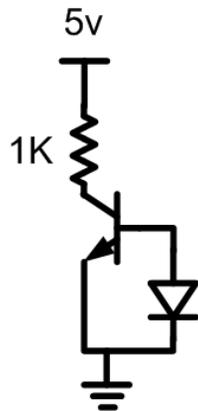
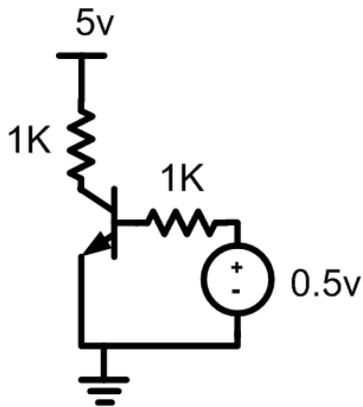
- Les réponses sont:
 - La tension à V_E est de 5.7v (donné)
 - La tension à V_B est de 5v (“calculé”)
 - La tension à V_C est de 1v (calculé)
 - Le courant I_B est de 10 μ A (calculé)
 - Le courant I_C est de 1mA (calculé)
 - Le courant I_E est de 1.01mA (calculé)

Résumé

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

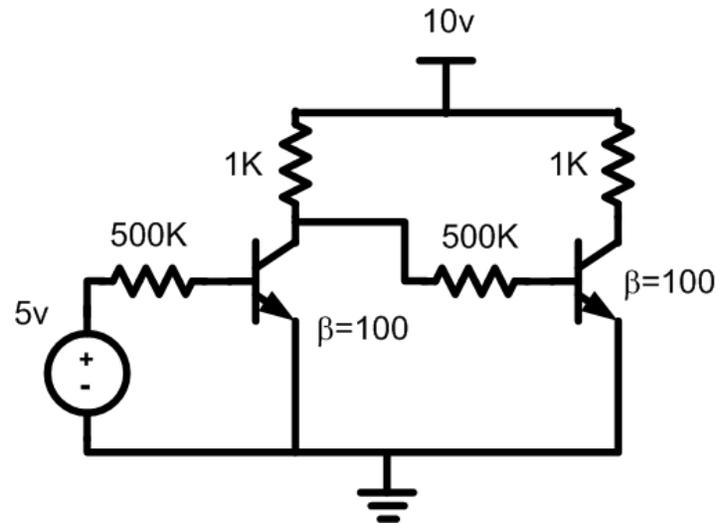
Questions

- Est-ce que ces circuits vont fonctionner?



Questions

- Trouvez la tension V_C du transistor de droite:



Indice: 2 équations à 2 variables...