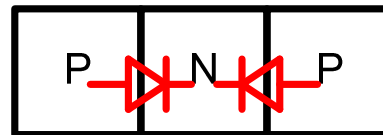
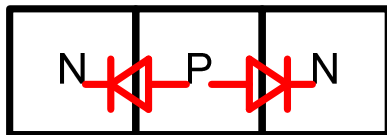


Électronique

Introduction aux transistors
bipolaires (suite)

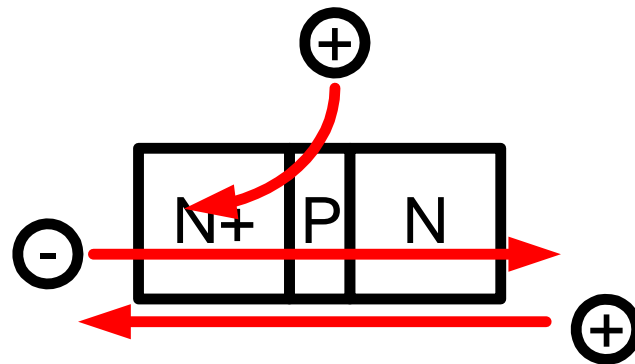
Rappel

- Structure à 3 blocs:
 - NPN: Transistor de type-N
 - PNP: Transistor de type-P
- Vu comme 2 diodes avec 4 modes:
 - BE-BC - Bloqué-Bloqué: Cut-off
 - BE-BC - Bloqué-Conduit: Active Inverse
 - BE-BC - Conduit-Bloqué: Active
 - BE-BC - Conduit-Conduit: Saturation



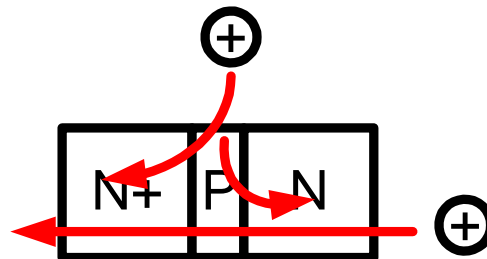
En région Active

- BE: Conduit, BC: Bloqué
 - B→E: Trous injectés dans base vers émetteur
 - E→B: Électrons vont de l'émetteur vers la base MAIS!
 - Électrons diffusent dans base et collectés par le champ de zone charge espace



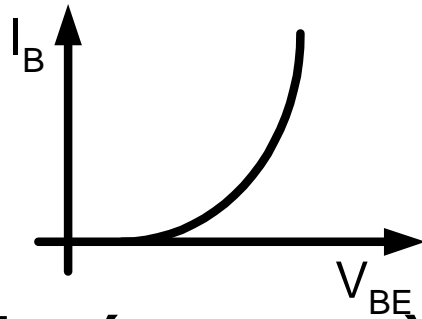
En saturation

- BE: Conduit, BC: Conduit (partiellement)
 - B→E: Trous injectés dans base vers émetteur
 - E→B: Électrons vont de l'émetteur vers la base
 - B→C: Électrons diffusent dans base et collectés par le champ de zone charge espace
 - B→C: Trous injectés dans base vers collecteur
- Les courants s'opposent
 - "Gain" résultant est moins élevé..

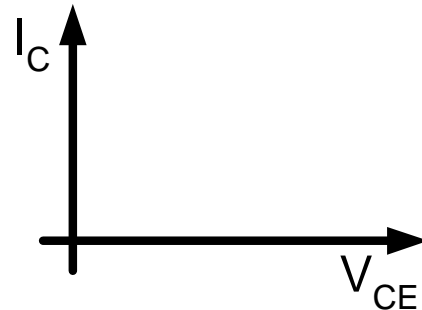


Relation VI du transistor

- On connaît bien le diagramme VI de la jonction BE:
 - Ça a un comportement de diode parce que BE est une diode en conduction:

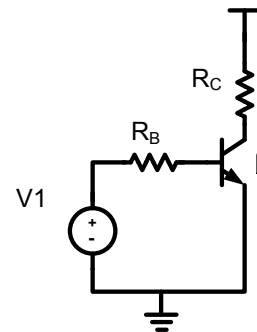
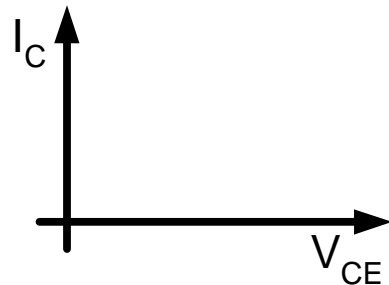


- On va aussi s'intéresser à une autre courbe



Relation VI du transistor

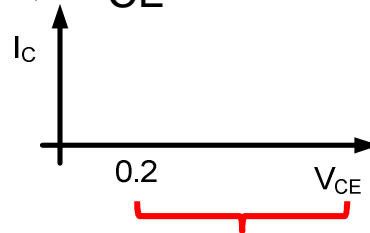
- Comment fonctionne cette courbe?
 - On considère que I_B est constant
 - Si, d'une certaine manière, on est capable de changer V_{CE} , comment changerait I_C ?



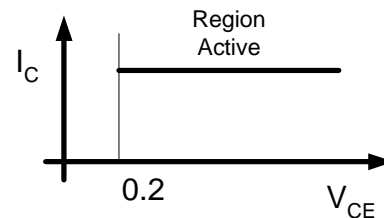
- On pourrait penser que R_C change...
 - Gros R_C fait que V_{CE} faible

Relation VI du transistor

- Quand V_C est élevé, la diode BC ne conduit pas:
 - On est en région active
 - Si V_C est élevé, V_{CE} sera élevé aussi ($V_{CE} > 0.2$)



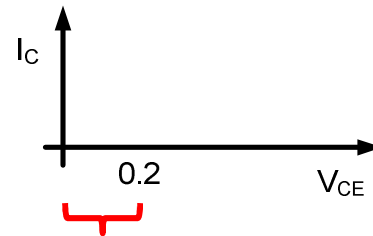
- I_C ne dépend que de I_B
- I_C ne dépend pas de V_{CE}



$$I_C = \beta I_B$$

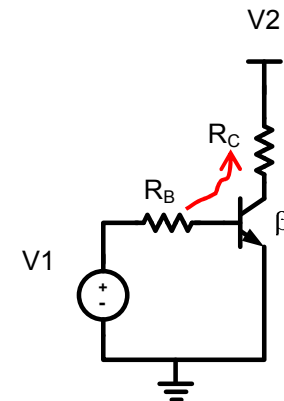
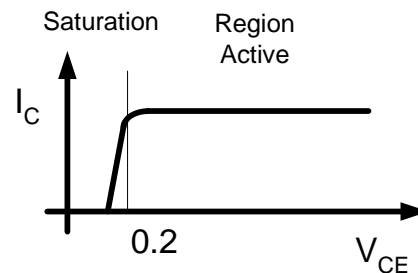
Relation VI du transistor

- Quand V_{CE} est faible, la diode BC conduit
 - On tombe en saturation
 - V_{CE} sature autour de 0.2v
 - Si R_C augmente beaucoup, V_{CE} diminue un peu



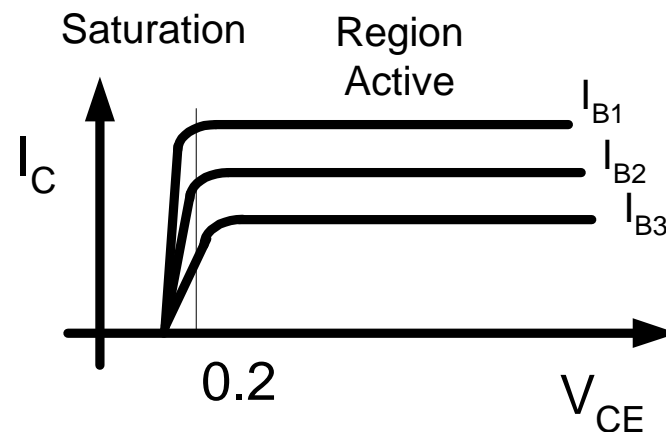
- $I_C = (V_{DC} - V_{CE}) / R_C \dots I_C$ baisse...

β_{EFF} diminue



Relation VI du transistor

- Pour des valeurs différentes de I_B , on a:



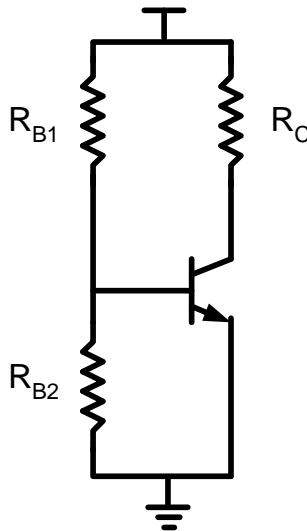
- En région active, le courant “sature”
 - Ne confondez pas ça avec la région saturation
 - “Saturation” vient du fait que V_{CE} sature à 0.2v

Exemple de conception #1

- Avec les connaissances acquises, on est en mesure de commencer à concevoir...
 - Nous avons les équations
 - Nous savons comment analyser
 - Il ne reste qu'à mettre le tout ensemble...
- La difficulté c'est toujours "par où commencer?"

Comment commencer?

- Imaginez qu'on veuille créer un amplificateur
 - On veut donc un transistor en région active
 - Comment créer ça?
- Vous avez trouvé ceci sur Google:



Comment commencer?

- On commence par regarder la fiche technique (“datasheet”) du transistor
- La spécification nous indique:
 - Tension/Courant/puissance maximale
 - Le gain (h_{fe} ou β)
 - Où se trouvent les pattes
 - etc.
- Donne parfois des exemples de montage (“Application notes”)

Allez TOUJOURS chercher la fiche technique

Comment commencer?

Un NPN populaire est le 2N2222

Identification des pattes

Caractéristiques

NPN switching transistors

2N2222; 2N2222A

FEATURES

- High current (max. 800 mA)
- Low voltage (max. 40 V).

APPLICATIONS

- Linear amplification and switching.

DESCRIPTION

NPN switching transistor in a TO-18 metal package. PNP complement: 2N2907A.

PINNING

PIN	DESCRIPTION
1	emitter
2	base
3	collector, connected to case

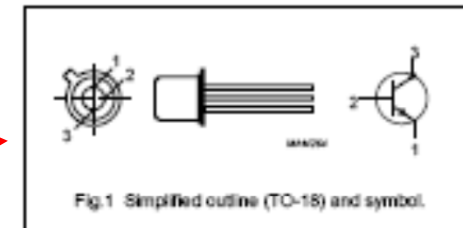


Fig.1 Simplified outline (TO-18) and symbol.

QUICK REFERENCE DATA

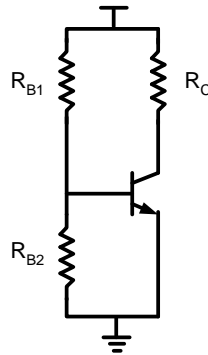
SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	MAX.	UNIT
V _{ceo}	collector-base voltage	open emitter	–	60	V
	2N2222 2N2222A		–	75	V
V _{ceo}	collector-emitter voltage	open base	–	30	V
	2N2222 2N2222A		–	40	V
I _c	collector current (DC)		–	800	mA
P _{tot}	total power dissipation	T _{amb} ≤ 25 °C	–	500	mW
h _{FE}	DC current gain	I _c = 10 mA; V _{CE} = 10 V	75	–	
f _T	transition frequency	I _c = 20 mA; V _{CE} = 20 V; f = 100 MHz	250	–	MHz
	2N2222 2N2222A		300	–	MHz
t _{off}	turn-off time	I _{Col} = 150 mA; I _{Bas} = 15 mA; I _{Col} = –15 mA	–	250	ns

Comment commencer?

- Il y a plusieurs contraintes à respecter:
 - Puissance maximale
 - Courant maximal
 - Différences de potentiel maximal
 - Vitesse de commutation maximale
 - Gain
 - Etc.
- Selon les caractéristiques et nos besoins, on peut décider si c'est adéquat

Comment s'ajuster?

- Avec ces informations, on peut commencer à concevoir
- Il faut:
 - Déterminer une tension d'alimentation
 - Déterminer les valeurs de R_{B1} , R_{B2} et R_C
 - S'assurer qu'on est réellement en région active
- Retournons à la fiche technique...



Comment s'ajuster?

- Dans la spécification, on voit
 - $I_{C\text{MAX}}$ est de 800mA
- Donc, I_C ne doit pas dépasser 800mA
- On sait que $I_C = \beta I_B$ et donc I_B ne doit pas dépasser 8mA

QUICK REFERENCE DATA

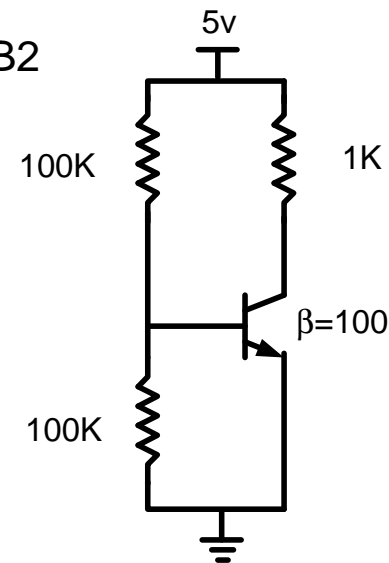
SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	MAX.	UNIT
V_{CBO}	collector-base voltage	open emitter			
	2N2222		–	60	V
	2N2222A		–	75	V
V_{CEO}	collector-emitter voltage	open base			
	2N2222		–	30	V
	2N2222A		–	40	V
I_C	collector current (DC)		–	800	mA
P_{tot}	total power dissipation	$T_{amb} = 25^\circ\text{C}$	–	500	mW
β_{DC}	DC current gain	$I_C = 10\text{ mA}$; $V_{CE} = 10\text{ V}$	75	–	
f_T	transition frequency	$I_C = 20\text{ mA}$; $V_{CE} = 20\text{ V}$; $f = 100\text{ MHz}$			
	2N2222		250	–	MHz
	2N2222A		300	–	MHz
t_{off}	turn-off time	$I_{CEsat} = 150\text{ mA}$; $I_{Bsat} = 15\text{ mA}$; $I_{Bcut} = -15\text{ mA}$	–	250	ns

Comment s'ajuster?

- La valeur de $I_{C\text{MAX}}$ nous donne aussi les contraintes sur V_{DC} et R_C
 - Si le transistor tombait en saturation, R_C devrait limiter I_C pour ne pas brûler le transistor
- Avec $V_{\text{DC}}=5\text{v}$: $I_C = \frac{V_C}{R_C} \Rightarrow R_C = \frac{V_C}{I_C}$
 - R_C ne devrait PAS être moins que $5/800\text{mA}=6.25\Omega$
- On apprendra que R_C détermine le gain
 - On veut une plus grosse valeur (gros gain): $1\text{K}\Omega$

Comment s'ajuster?

- On sait que $I_C = \beta I_B$
 - La résistance à la base devrait probablement être β fois plus gros qu'au collecteur
- Si R_C est 1K, R_B pourrait être 100 plus
 - On devrait commencer avec $R_B = 100K$
 - Même valeur pour les R_{B1} et R_{B2}
- On obtiendrait version 1.0:



Allons vérifier si c'est bon...

Comment s'ajuster?

- L'hypothèse est le transistor est en région active:

- $V_{BE}=0.7$ et donc, $V_B=0.7$

- On veut savoir si on est en région active

- Il faut vérifier V_C

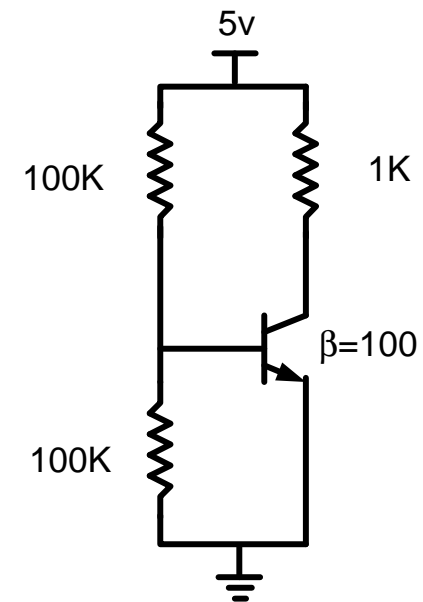
$$V_C = VDC - I_C R_C$$

- On connaît tout sauf I_C

- Pour le trouver, on utilise

$$I_C = \beta I_B$$

Mais on ne connaît pas I_B



Comment s'ajuster?

- Pour trouver I_B , on écrit l'équation de courant à la base:

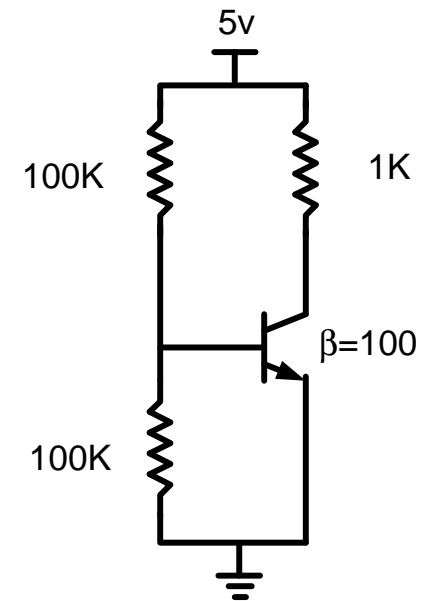
$$\frac{VDC - 0.7}{R_{B1}} = \frac{0.7}{R_{B2}} + I_B$$

- On isole I_B :

$$I_B = \frac{VDC}{R_{B1}} - \frac{0.7}{R_{B1}} - \frac{0.7}{R_{B2}} = 36\mu A$$

- Et on calcule V_C :

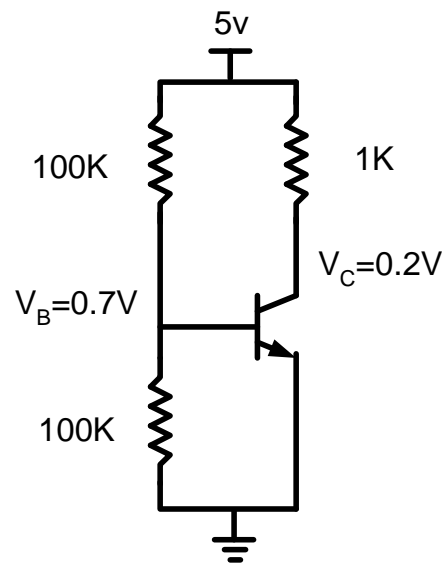
$$V_C = VDC - R_C \beta I_B = 1.4v$$



Ça correspond bien à la region active

Comment s'ajuster?

- Avec ces résultats théoriques, on va au laboratoire:
 - On prend des transistors et des résistances
 - On les connecte et on observe ceci...



Est-ce que tout est correct?

Comment s'ajuster?

- Important de savoir faire plusieurs choses:
 - Savoir qu'il y a un problème
 - Savoir identifier le problème
 - Savoir rectifier le problème
- Le 0.2v devrait nous dire que la jonction BC conduit (saturation – pas bon!)
- Si toutes les autres valeurs sont bonnes, il se PEUT que le β ne soit pas 100

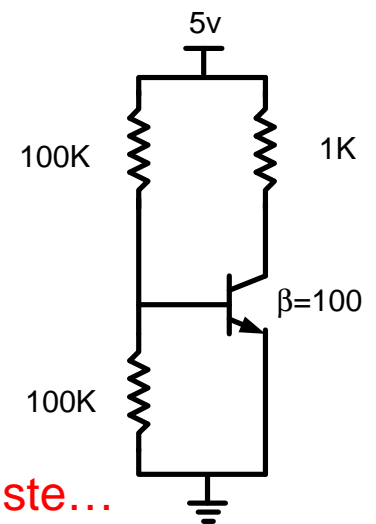
On sait que β dépend des dopants et n'est pas précis

On raisonne un peu...

- Est-ce que le β est plus grand ou plus petit que 100? (et pourquoi?)
- Comment faire pour le mettre en région active? Expliquez.

On raisonne un peu...

- Saturation causé par:
 - BC qui conduit
 - BC conduit quand V_C trop faible
 - V_C déterminé par $V_C = VDC - R_C \beta I_B$
- Il faut donc augmenter V_C en:
 - Augmentant VDC **Pas pratique**
 - Reduire R_C **Réduit le gain**
 - Reduire β **Pas pratique**
 - Reduire I_B **Meilleure solution de notre liste...**

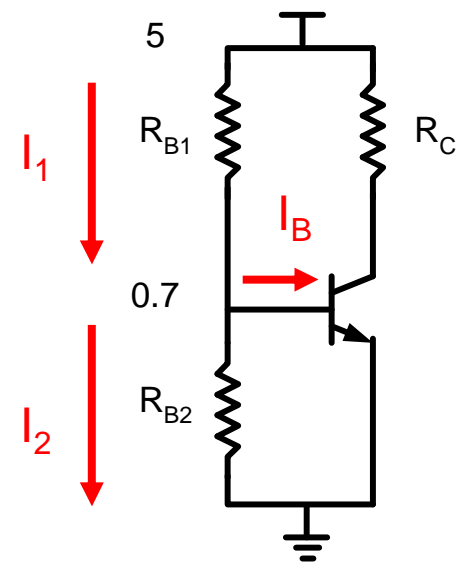


Comment s'ajuster?

- Maintenant, comment réduire I_B ?
- L'équation nous dit ceci:

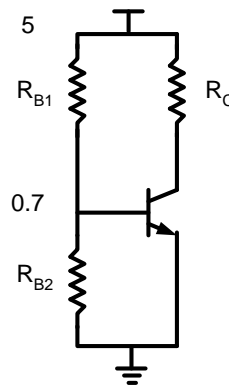
$$I_B = \frac{(VDC - 0.7)}{R_{B1}} - \frac{0.7}{R_{B2}}$$

- Pour réduire I_B , on a 2 options:
 - 1) Augmenter R_{B1} (baisser I_1)
 - 2) Réduire R_{B2} (augmenter I_2)



On déduit que...

- Pour région active, on veut:
 - Petit I_B (Grande résistance R_{B1})
 - FAIRE ATTENTION au R_C (pas trop large)
- Pour saturation, on veut (le contraire):
 - Plus gros I_B (résistance R_B pour protéger)
 - Gros R_C pour grosse chute de tension
 - On fera attention pour la vitesse (constante de temps élevée)



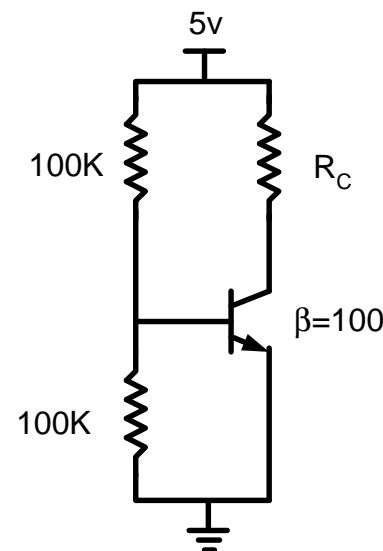
Exercice (seul)

- Vous allez voir (tantôt) que le gain est proportionnel à R_C
 - MAIS, un gros R_C peut envoyer notre transistor en saturation (gain diminue).
- Trouvez le R_C maximal pour être “sur le bord” de la saturation

Conditions requises:

$$I_C = \beta I_B$$

$$V_{CE} = 0.2$$



Exercice (seul)

- Il faut déterminer la condition pour être “sur le bord” de la saturation:
 - $V_{CE}=0.2\text{v}$ avec $\beta_{\text{eff}}=\beta$
- Pour que $V_{CE}=0.2$, il faut que $V_C=0.2$
- Sachant que:

$$V_C = VDC - R_C \beta I_B$$

$$I_B = \frac{VDC}{R_{B1}} - \frac{0.7}{R_{B1}} - \frac{0.7}{R_{B2}} = 36\mu\text{A}$$

Calculs précédents

- On peut trouver I_C et R_C

Exercice (seul)

- On met les chiffres dans l'équation:

$$V_C = VDC - R_C \beta I_B \quad \Rightarrow \quad 0.2 = 5 - R_C (3.6mA)$$

- Un peu d'arithmétique

$$4.8 = R_C (3.6mA)$$

- Et on isole R_C :

$$R_C = \frac{4.8}{3.6mA} = 1333$$

Est-ce que R_C doit être plus grand ou plus petit que cette valeur pour être en active?

Point de départ (pas toujours bon)

- Les courants:
 - Base: souvent de l'ordre du μA ou du mA
 - Collecteur: souvent de l'ordre des mA jusqu'aux dizaines de mA
- Les résistances:
 - Base: souvent des dizaines ou centaines de $\text{k}\Omega$
 - Collecteur: souvent des centaines Ω jusqu'à des dizaines de $\text{k}\Omega$
- Ça donne un bon point de départ...

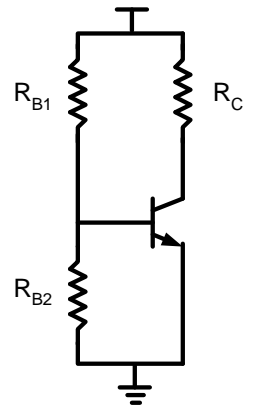
Exemple de Conception #2

- On aimerait concevoir un circuit qui allume une LED quand il fait noir:
 - L'intensité dépendra de la "quantité de noirceur"
 - Plus il fait noir, plus la LED allume intensément
- Vous avez en votre possession:
 - Des R de valeurs différentes
 - Un transistor NPN
 - Une photorésistance
 - Une LED

Avant de commencer, revoyons la photorésistance...

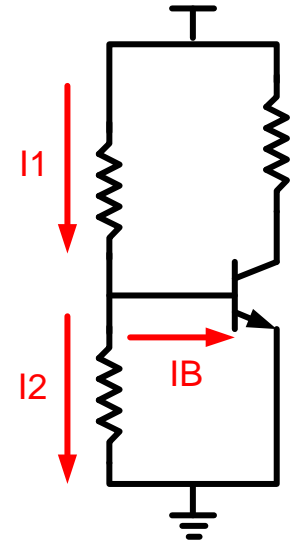
Exemple de Conception #2

- Une photorésistance c'est un élément qui:
 - A une faible résistance quand il y a présence de lumière
 - Une grosse résistance quand il y en a pas
- Dans notre cas particulier:
 - La résistance est de 1K avec la lumière
 - La résistance est de 10K sans lumière
- Inspirez-vous des schémas précédents pour pondre un circuit...



Exemple de Conception #2

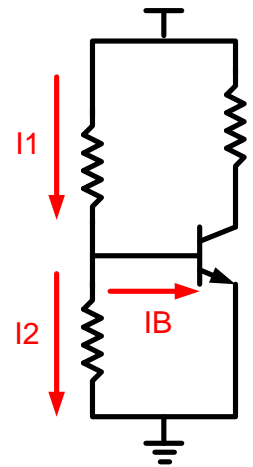
- Commençons avec ce circuit
 - Le courant I_1 sera séparé en 2 parties
 - I_2 passe par la résistance du bas
 - I_B entre dans la base



- Si I_B entre, un courant I_C circulera aussi
 - Ceci est vrai seulement quand $V_{BE} > 0.7$
(active ou saturation)

Exemple de Conception #2

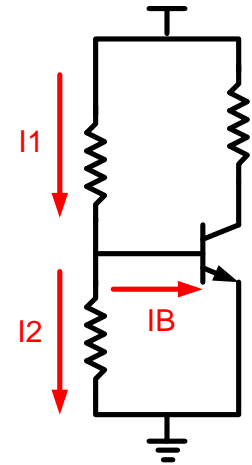
- Si $V_{BE} > 0.7$, il y a un courant I_C et I_E
 - Ces courants peuvent allumer une LED
- Si $V_{BE} < 0.7$, I_C et I_E seront nuls
 - La LED ne sera pas allumée
- Alors, quand il n'y a pas de lumière
 - On veut que $V_{BE} > 0.7$
- Quand il y a lumière
 - On veut que $V_{BE} < 0.7$



Le contrôle se fait par le circuit à la base...

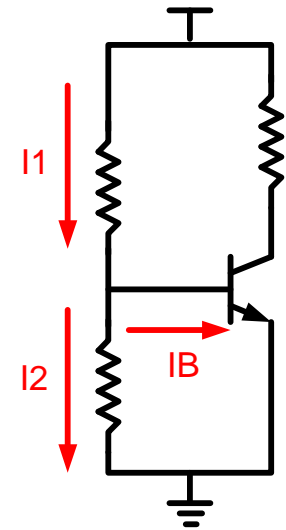
Exemple de Conception #2

- J'ai 2 options:
 - R1 peut être ma photodiode
 - R2 peut être ma photodiode
- Si R1 était ma photodiode
 - Avec lumière, R1 baisse et I1 augmente
 - V_{BE} augmente, donc LED s'allume
 - Sans lumière, R1 augmente et I1 baisse
 - V_{BE} baisse, donc LED s'éteint
- Je veux le contraire...



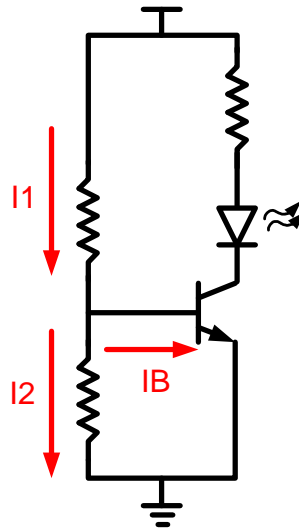
Exemple de Conception #2

- Si R2 était la photodiode, on aurait ceci
 - Avec la lumière, R2 baisse et V_{BE} baisse
 - Sans lumière, R2 monte et V_{BE} monte
- Si V_{BE} est assez grand:
 - I_B circulera
 - I_C circulera
- On pourra mettre une LED à la branche du collecteur



Exemple de Conception #2

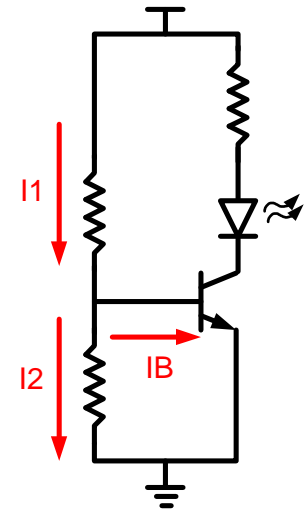
- Le circuit final sera:



- Avec les bonnes valeurs, ça fonctionnera
- Il est temps de passer aux maths...

Exemple de Conception #2

- Choisissons un $VDC = 9v$
 - On sait que $R2$ est $1K$ avec lumiere
 - On sait que $R2$ est $10K$ sans lumiere
- Sans lumière, il faut $I2 * R2 > 0.7v$
- Sans lumière, on a $R2 = 10K$
 - Il faut un courant minimal de $0.7/10K = 70\mu A$
 - Il faut donc que $I1$ soit plus que $70\mu A$



$$\frac{VDC - 0.7}{R1} > 70\mu A$$

$$\frac{VDC - 0.7}{70\mu A} > R1 = 133K$$

R1 doit être plus petit que 133K

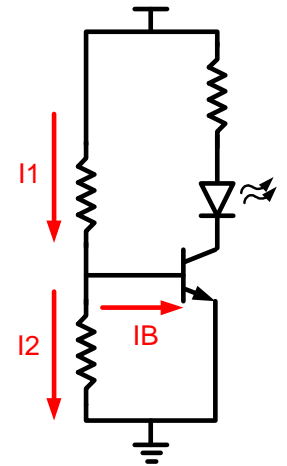
Exemple de Conception #2

- Avec lumière, il faut $I_2 \cdot R_2 < 0.7\text{V}$
- Avec lumière, on a $R_2 = 1\text{K}$
 - Il faut un courant maximal de $0.7/1\text{K} = 700\mu\text{A}$
 - Il faut donc que I_1 soit moins que $700\mu\text{A}$

$$\frac{VDC - 0.7}{R_1} < 700\mu\text{A} \quad \frac{VDC - 0.7}{700\mu\text{A}} < R_1 = 13.3\text{K}$$

- La condition pour R_1 est donc:

$$13.3\text{K} < R_1 < 133\text{K}$$



R_1 doit être plus grand que 13.3K

Exemple de Conception #2

- C'est quoi la contrainte sur R_C ?
 - Pas grand chose
- Si ça conduit, il y a un courant et c'est correct
 - On ne voudrait pas brûler la diode, alors on met une résistance
- Et c'est fini...

Exemple de Conception #3

- On aimerait concevoir un régulateur de tension
 - On a besoin d'une tension facilement changeable
 - Qui peut fournir presque la même tension peu importe le courant demandé
- Solution connues:
 - Diodes n'ont pas toutes les V_D ou V_Z requises
 - Diviseurs de tension ont la précision mais changent de tension avec le courant demandé...

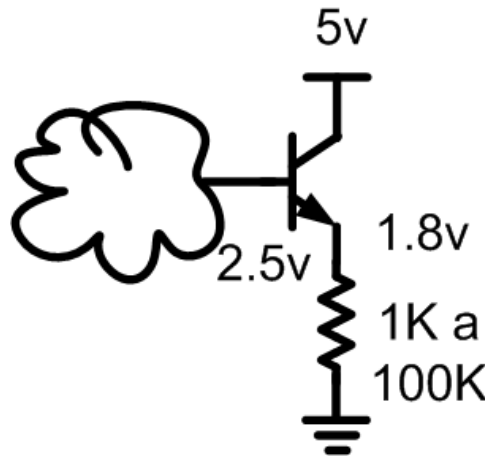
Comment faire?

Exemple de Conception #3

- Le transistor en région ACTIVE a une caractéristique intéressante:
 - I_C est indépendant de V_{CE}
 - En même temps, I_E est indépendant de V_{CE}
- De plus, V_E est égal à $V_B - 0.7v$
 - Donc, si on mettait $V_B = 4v$, V_E devrait être $3.3v$
 - Et il devrait être capable de fournir “n’importe quel” courant I_E
 - Ceci est vrai tant qu’il reste en région active

Exemple de Conception #3

- Prenons un cas plus explicite
 - On veut une tension de 1.8v avec $R=1K$ à $100K$



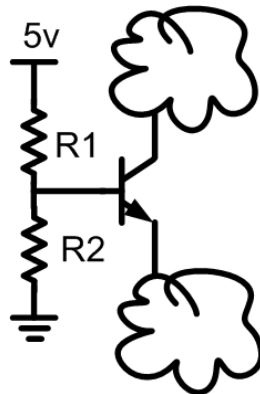
- Quoi mettre dans le nuage pour avoir 2.5v?

Exemple de Conception #3

- On sait qu'un diviseur de tension ressemble à ceci:



- Et on sait que ceci n'est pas un diviseur de tension:



À cause du courant
à la base

Exemple de Conception #3

- Si on décidait d'approximer le dernier circuit avec un diviseur de tension:
 - Ce serait faux et il y aura erreur
 - L'erreur dépend du courant
- Si le courant est
 - Nul: ce serait exactement un diviseur de tension
 - Faible: l'approximation serait presque bonne
 - Grand: l'approximation serait mauvaise

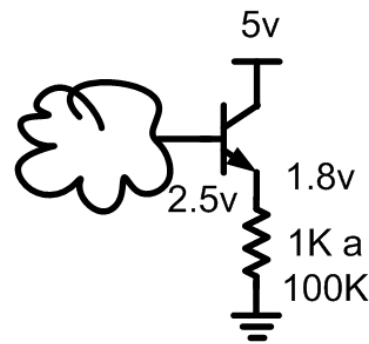
Note: Courant faible/grand par rapport au courant dans R1 et R2

Exemple de Conception #3

- Le courant I_B dépend du courant I_E
 - Le courant I_E dépend de la charge
- Si la charge était de 1K, il y aurait le plus gros courant I_E
 - Le courant I_B sera $(\beta+1)$ fois plus petit
- Pour avoir une approximation de diviseur de tension:
 - β doit être élevé
 - Le R_{B1} et R_{B2} doivent être petits

Exemple de Conception #3

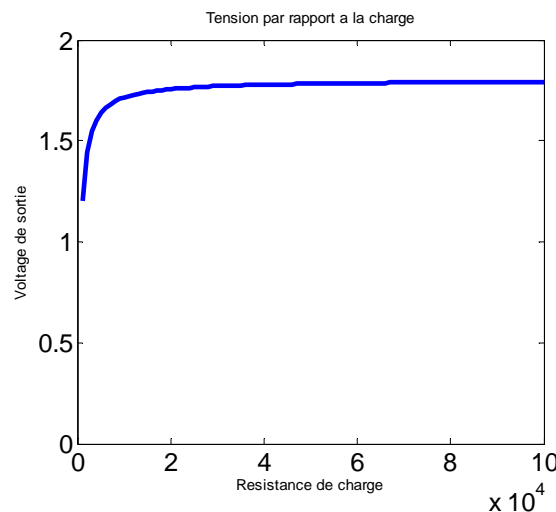
- Comme point de départ, on sait que V_B doit être 2.5v



- On approxime qu'avec un diviseur de tension, on peut l'obtenir
 - V_E sera donc 1.8v
 - Ceci doit être vrai avec une charge de 1K à 100K

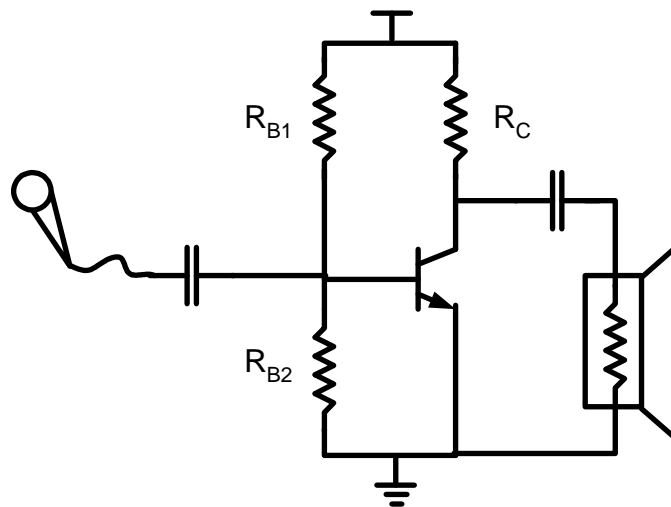
Exemple de Conception #3

- Devoir (suggéré, mais facultatif)
 - Faites l'analyse de V_E pour $R_{B1}=R_{B2}$ de 1K, 10K et 100K
 - Pour chacun des cas, trouvez V_E pour une charge de 1K et une charge de 100K.
- Essayez de tracer ça avec MATLAB



Application typique: Active

- Amplificateur de la voix
- On veut région active: Haut I_C/I_B
 - Ça implique souvent un haut GAIN V_C/V_B
- Condensateur en entrée/sortie: couplage
 - Niveaux DC pas toujours les mêmes (ex: $V_B=0.7$)



Application typique: Active

- Le courant dans la diode BE est:

$$I_B \cong I_S e^{V_{BE}/kT} \quad (\text{On neglige le "-1"})$$

- Le courant I_C est β fois plus que I_B :

$$I_C = \beta I_S e^{V_{BE}/kT} = I_0 e^{V_{BE}/kT}$$

- Si on varie V_{BE} un peu ($+v_{be}$),
 - I_C changera un peu ($+i_c$)

$$I_C + i_c = I_0 e^{(V_{BE} + v_{be})/kT}$$

“Un peu” = approximation petit-signal

Application typique: Active

- On sépare l'exponentielle:

$$I_C + i_c = \underbrace{I_0 e^{V_{BE}/kT}}_{I_C} e^{v_{be}/kT} \Rightarrow I_C + i_c = I_C e^{v_{be}/kT}$$

- Série de Taylor de $e^{v_{be}/kT}$ (2 éléments):

$$I_C + i_c = I_C \left(1 + \frac{v_{be}}{kT} \right)$$

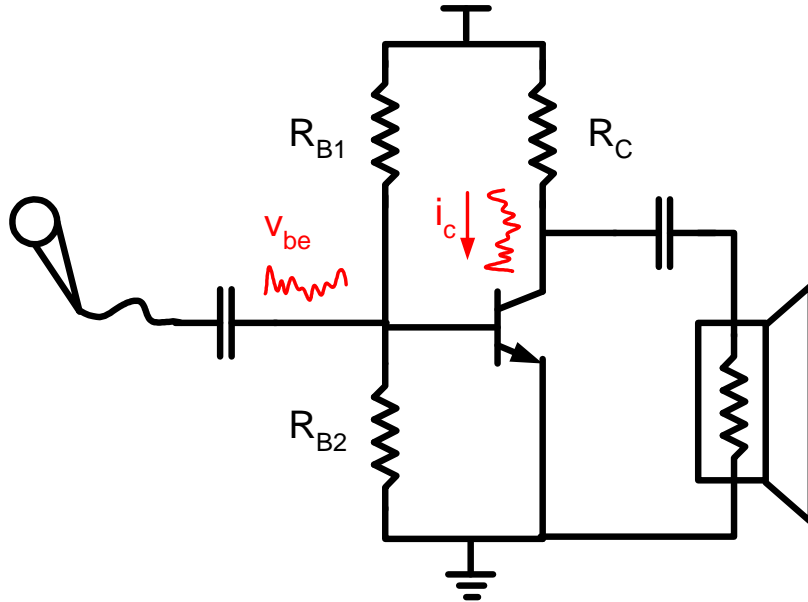
- On simplifie:

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

Variation de tension à la base donne une variation de courant proportionnelle ⁵¹

Application typique: Active

- Changement v_{be} cause changement i_c
- Changement i_c change v_c à cause de R_C
 - Donc, changement v_{be} donne changement v_c



$$v_c = i_c R_C = \left(\frac{I_C}{kT} \right) v_{be} R_C$$

Pas encore 100% vrai

Application typique: Active

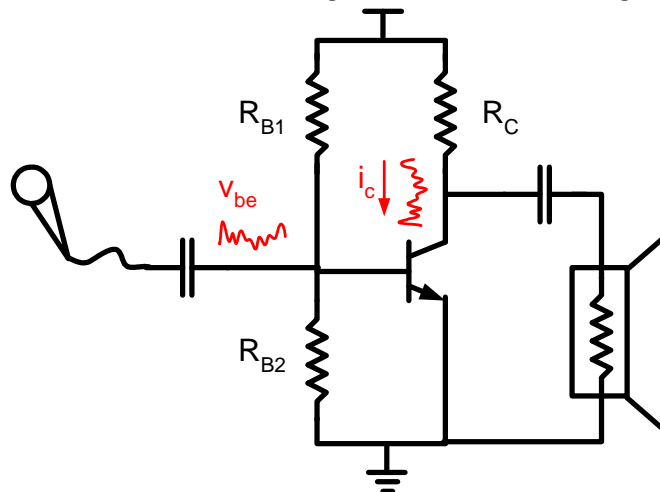
- Cas 1:

- Quand v_{be} AUGMENTE, i_c augmente
- Quand i_c augmente, v_c BAISSE

Gain négatif=
Changement en
direction opposée

- Cas 2:

- Quand v_{be} BAISSE, i_c baisse
- Quand i_c baisse, v_c AUGMENTE



$$v_c = -i_c R_C = -\left(\frac{I_C}{kT}\right) v_{be} R_C$$

$$GAIN = \frac{v_c}{v_{be}} = -\left(\frac{I_C}{kT}\right) R_C$$

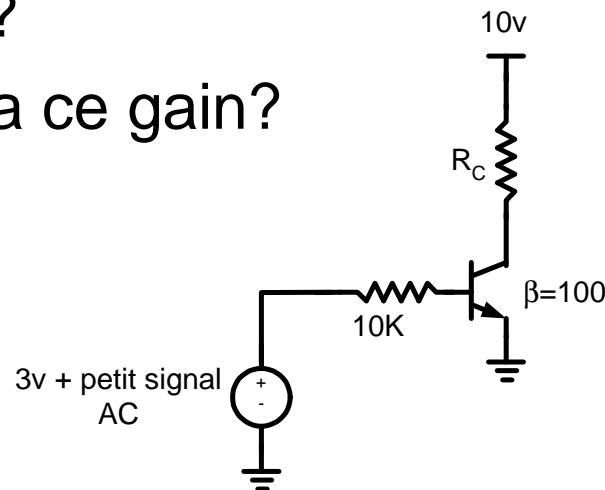
Attention: distinction à faire!

- Le mot « gain » est très général et représente plusieurs choses:
 - Le gain du transistor, c'est son β ou h_{fe}
 - On peut aussi parler du gain de l'amplificateur
- Le gain du transistor $\beta = I_C / I_B$ est constant en région active
- Le gain de l'amplificateur est

$$GAIN = \frac{v_c}{v_{be}} = - \left(\frac{I_C}{kT} \right) R_C$$

Exemple (seul)

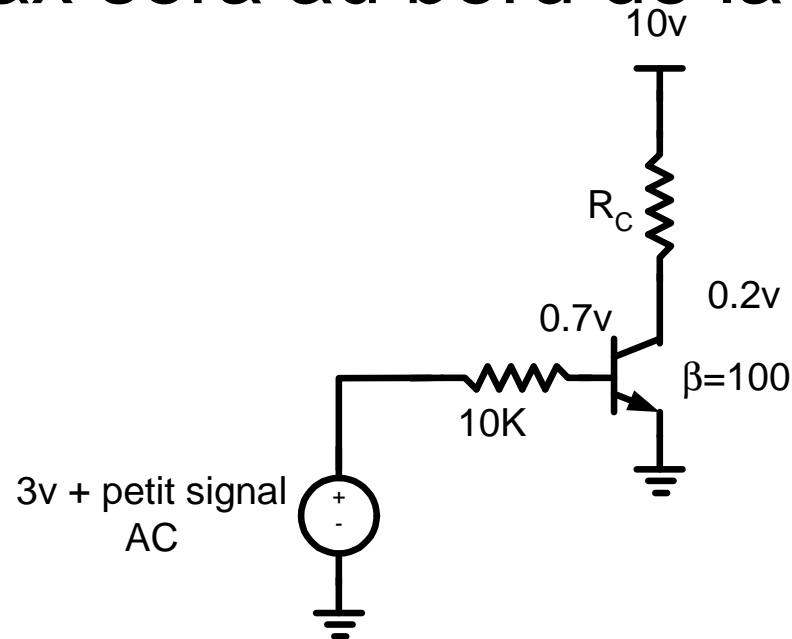
- Considérez ce circuit:
 - Quelle est la valeur de R_C qui me donnera le gain maximal?
 - Quel sera ce gain?



- Indices:
 - Gain max: “sur le bord de la saturation”
 - Gain = $-I_C/kT \cdot R_C$ (avec $kT=26mV$)

Exemple (seul)

- On sait que R_C est proportionnel au gain
- On va vouloir R_C très grand
- Mais, R_C trop grand \rightarrow saturation
- R_C max sera au bord de la saturation



Exemple (seul)

- On trouve I_B et I_C :

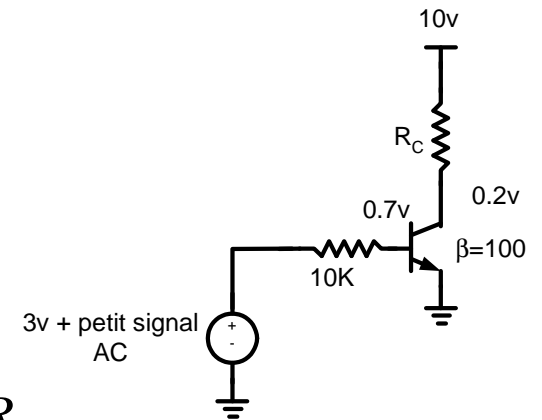
$$I_B = \frac{3 - 0.7}{10K} = 0.23mA \quad I_C = \beta I_B = 23mA$$

- Avec I_C , on trouve R_C :

$$V_C = VDC - I_C R_C \quad 0.2 = 10 - (23mA)R_C$$

- On isole R_C :

$$R_C = \frac{9.8}{23mA} = 426\Omega$$



Exemple (seul)

- Le gain est donné par

$$GAIN = \frac{v_c}{v_{be}} = -\left(\frac{I_C}{kT}\right)R_C$$

- À la température de la pièce, $kT \sim 26mV$

$$GAIN = -\left(\frac{23mA}{26mV}\right)R_C = 377$$

Note: kT est parfois appelé V_T (thermique)

Commutation

- Un transistor peut amplifier des signaux
- Il peut aussi servir de commutateur
 - Soit ça conduit, soit ça ne conduit pas

- Quand ça ne conduit pas, on veut 0 courant



- Quand ça conduit, on veut:
 - Courant élevé
 - Chute de tension faible (idéalement nulle)



Commutation

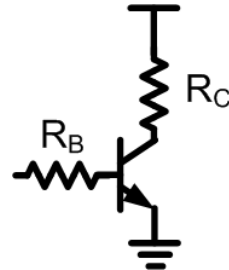
- Si le transistor était un commutateur, le courant pourrait circuler entre C et E



- La chute de tension devrait être petite
 - V_{CE} devrait être faible
- Ça semble indiquer qu'on devrait fonctionner en saturation quand ça conduit
 - Et en cut-off, sinon

Commutation

- Pour être en saturation, on a besoin que la jonction BC conduise:
 - Pour ça, V_C doit être faible



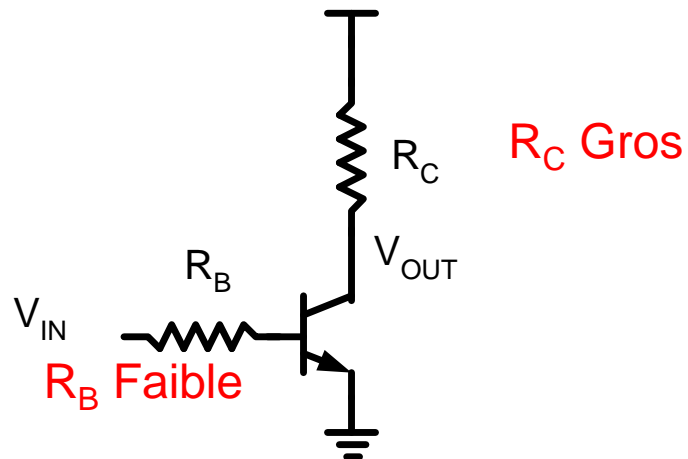
$$V_C = V_{DC} - R_C \beta I_B$$

- Comment rendre V_C faible?
 - Augmenter R_C
 - Baisser R_B (augmenter I_B)

Ces caractéristiques vont nous garantir d'être en saturation quand on conduit

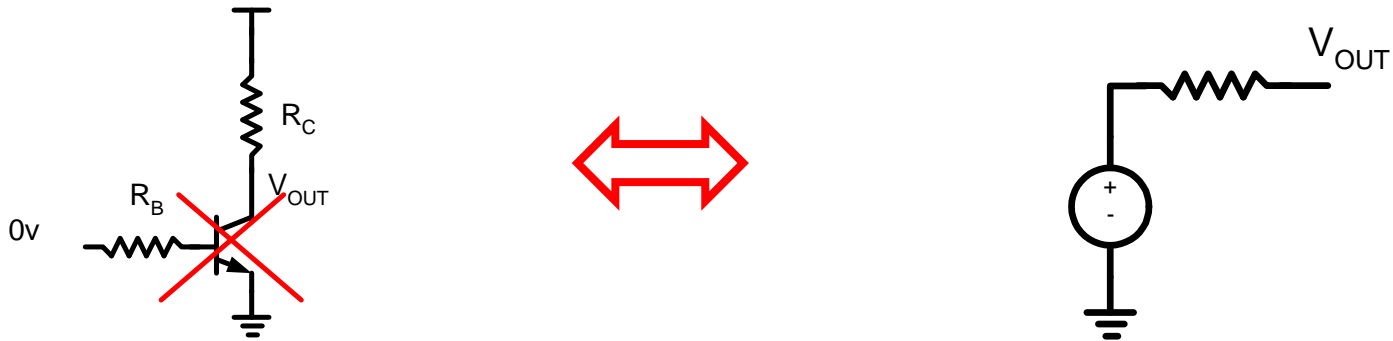
Application typique: Inverseur

- On utilise le transistor en commutation dans les portes logiques
 - Dans les systèmes numériques, il faut pouvoir faire des opérations telles que ET, OU, NON, etc.
 - On est capable d'en fabriquer avec des transistors
- Considérez ce circuit



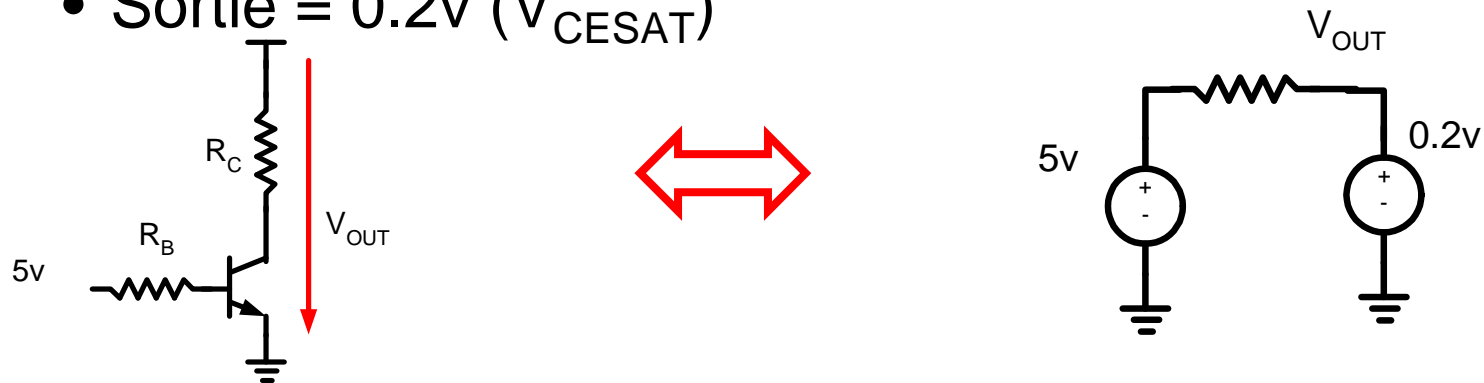
Application typique: Inverseur

- Si l'entrée est 0v, sortie = VDC (ex: 5v)



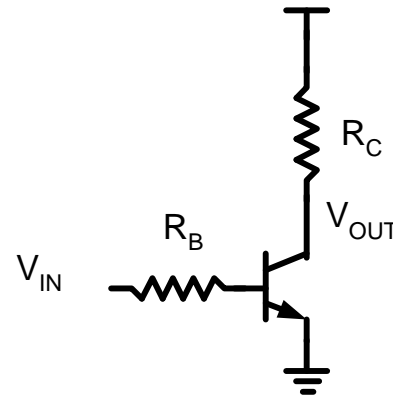
- Si l'entrée est 5v, je serais en saturation

- Sortie = 0.2v (V_{CESAT})



Application typique: Inverseur

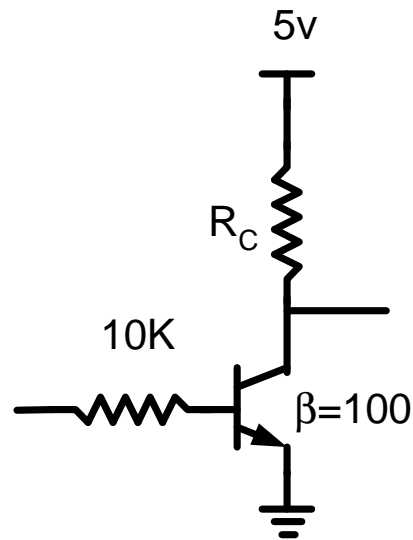
- Jouons à un jeu:
 - $V_{OUT} > 2.5v \rightarrow '1'$
 - $V_{OUT} < 2.5v \rightarrow '0'$



- Le circuit fonctionnerait comme ceci:
 - Entrée 0v ('0') \rightarrow sortie 5v ('1')
 - Entrée 5v ('1') \rightarrow sortie 0.2v ('0')
- C'est une "inversion" ou un "NON" logique
 - Une des fonctions de base de la logique

Exercice (seul)

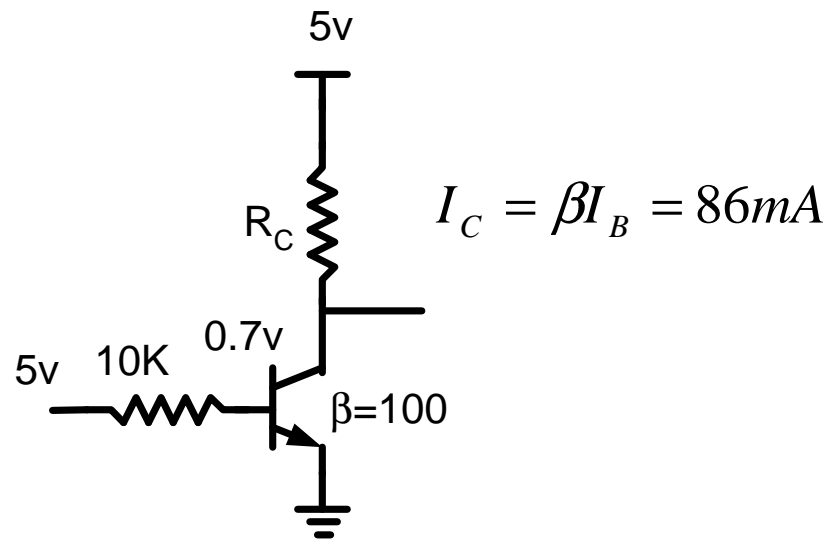
- Considérez l'inverseur suivant:
 - L'entrée sera soit 0v ou soit 5v
 - Trouvez R_C minimal pour fonctionner en saturation



Exercice (seul)

- Quand l'entrée est à 0v, il n'y a pas grand chose à faire...
 - Transistor en cut-off, la sortie sera à 5v
- Quand l'entrée est à 5v, on analyse:

$$I_B = \frac{5 - 0.7}{10K} = 0.43mA$$



Exercice (seul)

- On utilise l'équation de V_C :

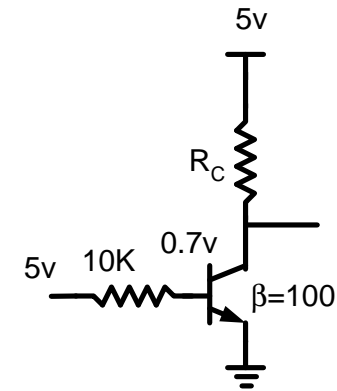
$$V_C = VDC - I_C R_C$$

- On entre les chiffres:

$$V_C = 0.2 = 5 - (86mA)R_C$$

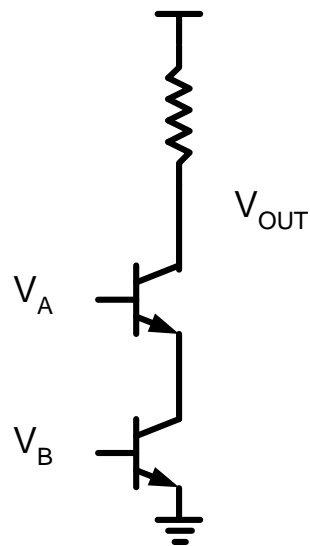
- On isole R_C :

$$R_C = \frac{4.8}{86mA} = 56\Omega$$

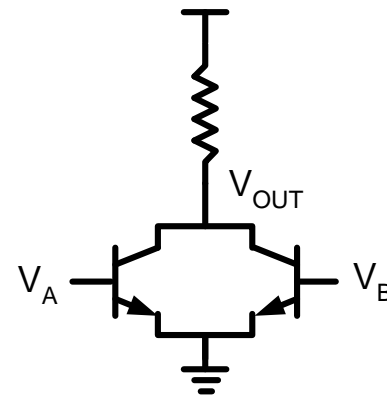


Portes logiques plus complexes

- On peut aussi faire d'autres portes logiques en utilisant les transistors
 - Voici les portes NON-ET et NON-OU:



NON-ET (NAND)



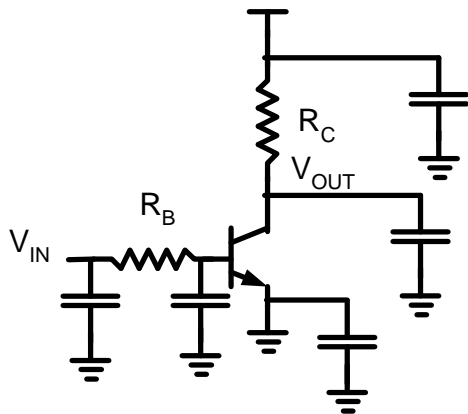
NON-OU (NOR)

Concept de temps

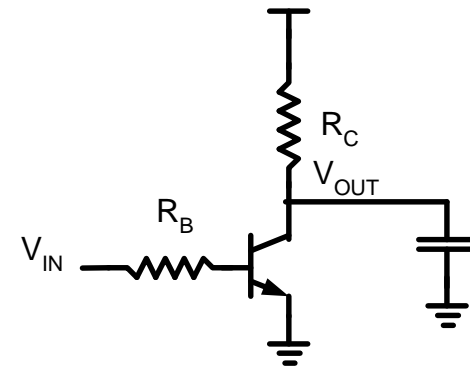
- Compliquons les choses un peu plus...
- On sait que rien n'est infiniment vite
 - Les transistors ne sont pas une exception
- Cependant, aucune de nos équations ne nous l'indique
 - Pourquoi?
- Parce que notre modèle est incomplet...

Concept de temps

- N'importe quel bout de métal aura une capacité
 - Les plaquettes de prototypage en ont aussi
 - La capacité varie selon la taille du métal
 - C'est ce qu'on appelle une capacité PARASITE
- En réalité, on aurait ce circuit

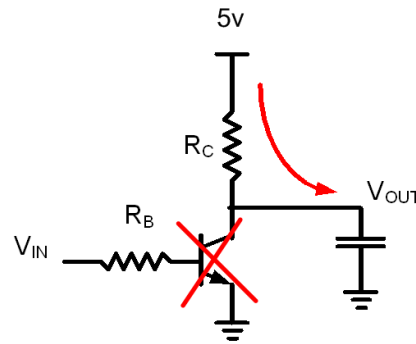


Trop de détails
inutiles

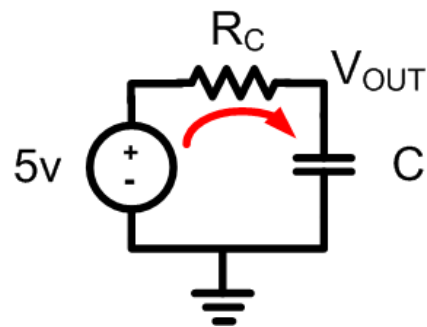


Concept de temps

- Quand l'entrée est 0v, le circuit devient:



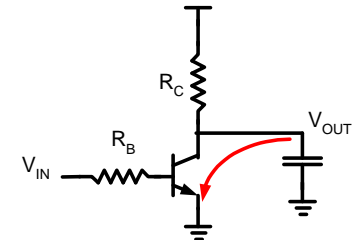
- La source charge la capacité par la résistance R_C



Concept de temps

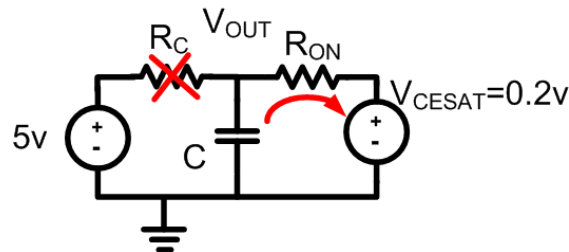
- Quand l'entrée est à 5v, le transistor est en saturation:

- Le transistor décharge la capacité
- 5v charge la capacité mais c'est lent puisque $R_C \gg$



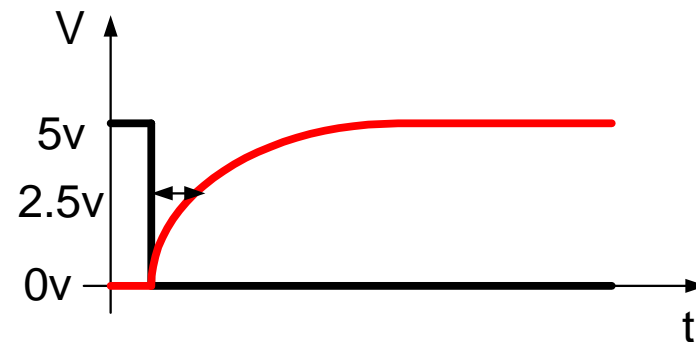
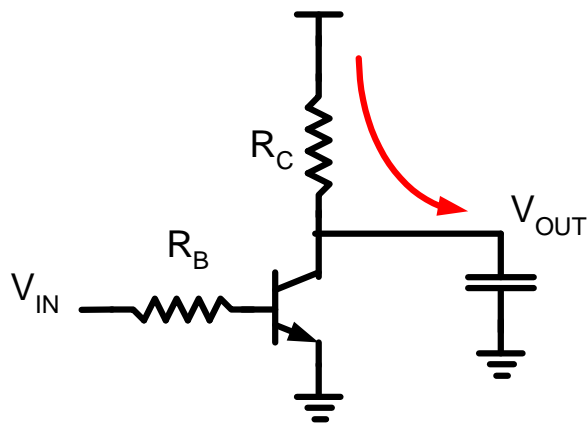
- On pourrait calculer le courant mais c'est trop compliqué:

- On approxime le courant avec une résistance R_{ON}
- L'effet de R_C devient négligeable...



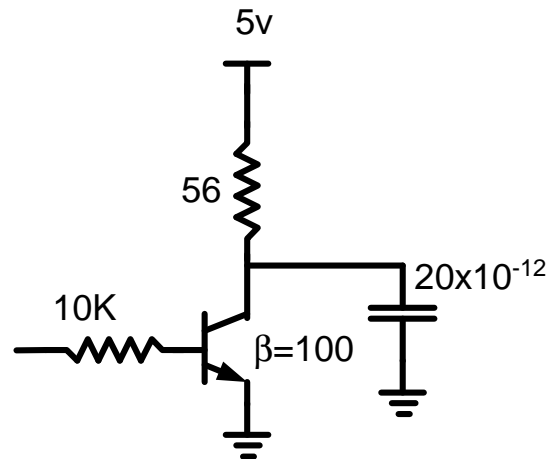
Concept de temps

- But: mesurer temps de transition
 - “J’applique ‘0’ à l’entrée.. Quand est-ce que j’aurais ‘1’ à la sortie?”
- Détermine la vitesse maximale à laquelle mon système peut fonctionner



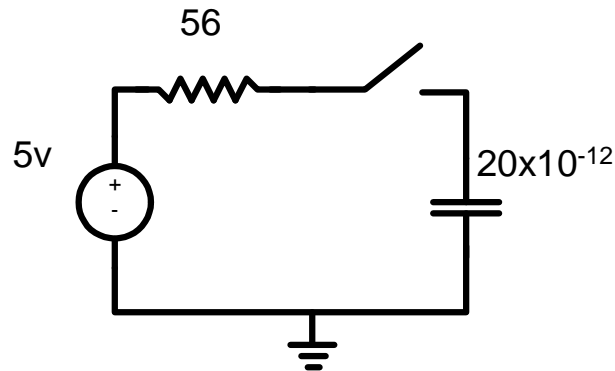
Exercice

- Trouvez le temps de transition de montée à la sortie:
 - SUPPOSEZ que la tension était initialement 0v
 - Mesurez le temps entre 0v et 2.5v
 - La sortie est connectée à une capacité de 20pF
 - L'entrée est une chute de 5v a 0v



Exercice

- On commence par redessiner le circuit



- Je trouve l'équation de $V_{OUT}(t)$

$$v_{out}(t) = VDC(1 - e^{-t/RC})$$

- On met les chiffres:

$$v_{out}(t) = 5(1 - e^{-t/56 \cdot 20 \times 10^{-12}})$$

Exercice

- On cherche le temps (t) requis pour aller jusqu'à 2.5v
 - Traduction: on veut isoler t dans ceci:

$$2.5 = 5 \left(1 - e^{-t / 56 \cdot 20 \times 10^{-12}} \right)$$

- On manipule un peu:

$$1 - \frac{2.5}{5} = e^{-t / 56 \cdot 20 \times 10^{-12}}$$

Il faut maintenant enlever l'exponentielle

Exercice

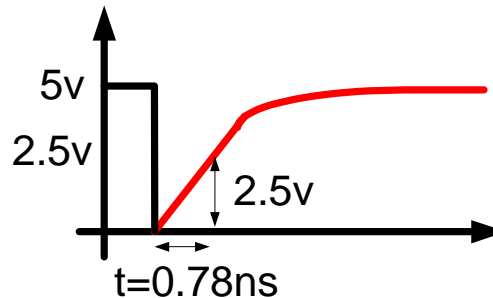
- On prend le log naturel des 2 bords:

$$\ln\left(\frac{1}{2}\right) = -\frac{t}{56 \cdot 20 \times 10^{-12}}$$

- On isole t:

$$t = -56 \cdot 20 \times 10^{-12} \ln\left(\frac{1}{2}\right) = 0.78 \text{ ns}$$

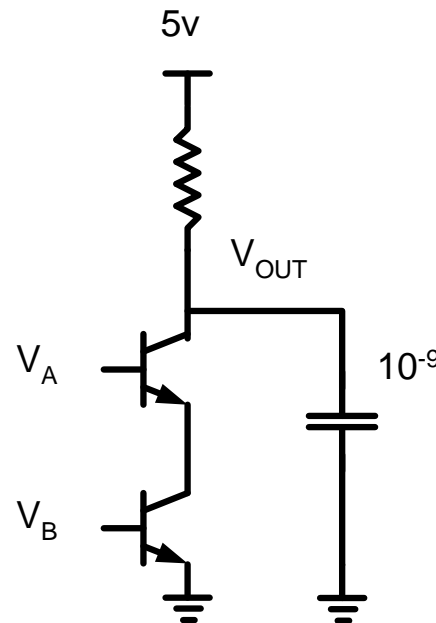
- On trouve que le DÉLAI est de 0.78ns



Exercice (seul)

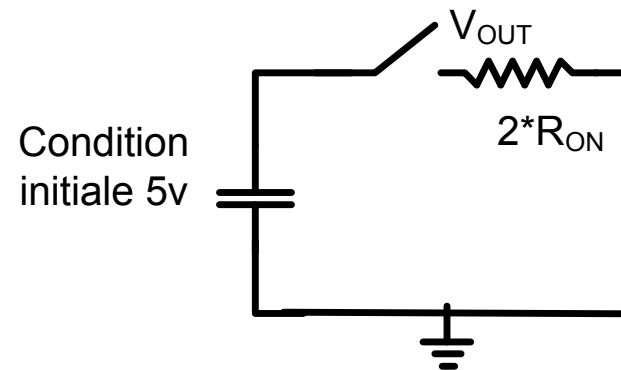
- Trouvez le temps de DESCENTE:
 - Considérez que chaque $R_{ON}=20\Omega$
 - Considérez que $R_C \gg R_{ON}$ et R_C est négligeable quand les transistors conduisent
 - Considérez que $V_{CESAT}=0v$

V_A et V_B changent de 0 a 5v en même temps



Exercice (seul)

- On modélise le circuit:



- On trouve $V_{OUT}(t)$

$$v_{out}(t) = V(0)e^{-t/RC}$$

- On entre les chiffres:

$$v_{out}(t) = 5e^{-t/40 \times 10^{-9}}$$

Exercice (seul)

- Quand est-ce que la tension chute à 2.5v?

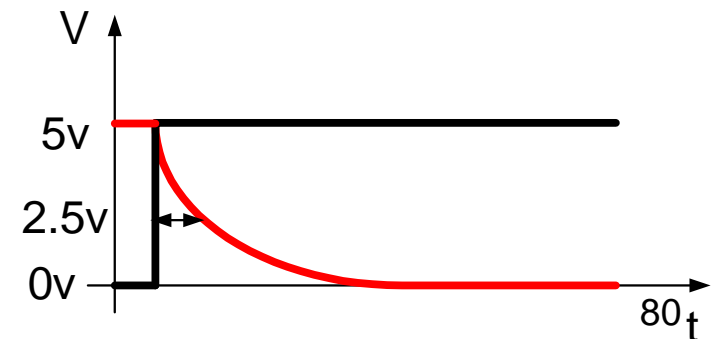
$$2.5 = 5e^{-t/40 \times 10^{-9}}$$

- On manipule pour isoler t:

$$\ln\left(\frac{2.5}{5}\right) = -\frac{t}{40 \times 10^{-9}}$$

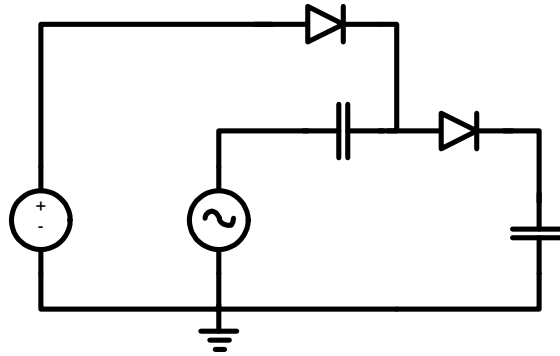
- On isole t:

$$t = -40 \times 10^{-9} \ln\left(\frac{2.5}{5}\right) = 27.7 \text{ ns}$$



Application: Pompe à charge

- Avec les diodes, on a parlé des pompes à charge
 - Le but est de générer une tension plus élevée que l'alimentation

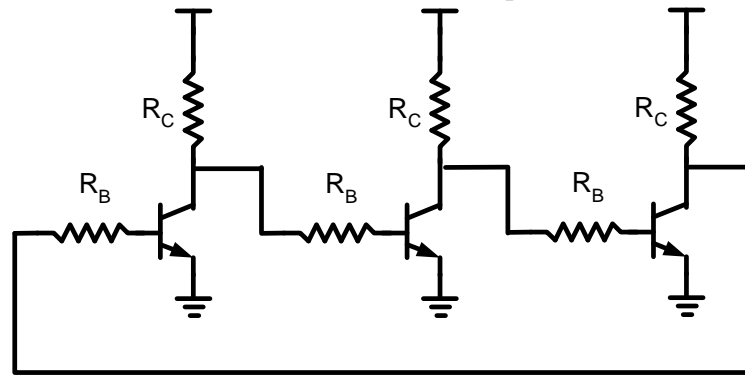


- Problème: On a besoin d'un "oscillateur"

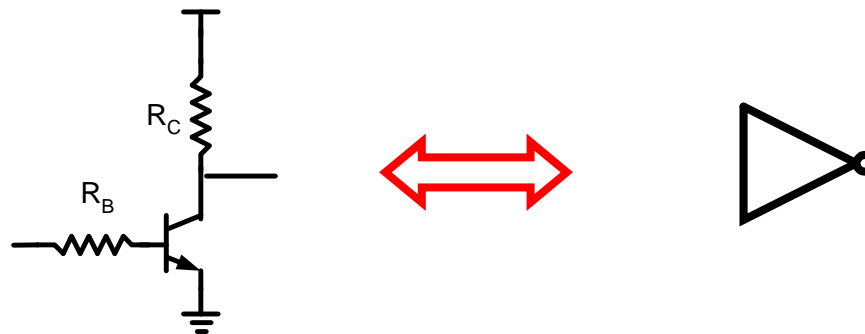
Oscillateur = source sinusoïdale...

Application: Pompe à charge

- Avec les inverseurs, on peut faire un oscillateur:

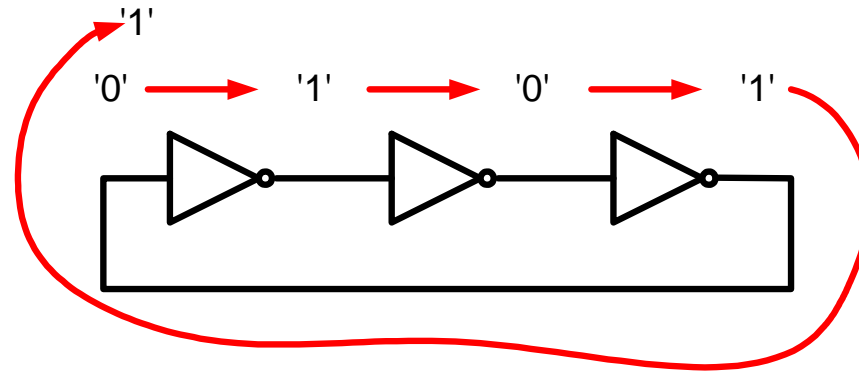


- On va faire abstraction des détails:
 - On va cacher les choses qui nous font peur



Application: Pompe à charge

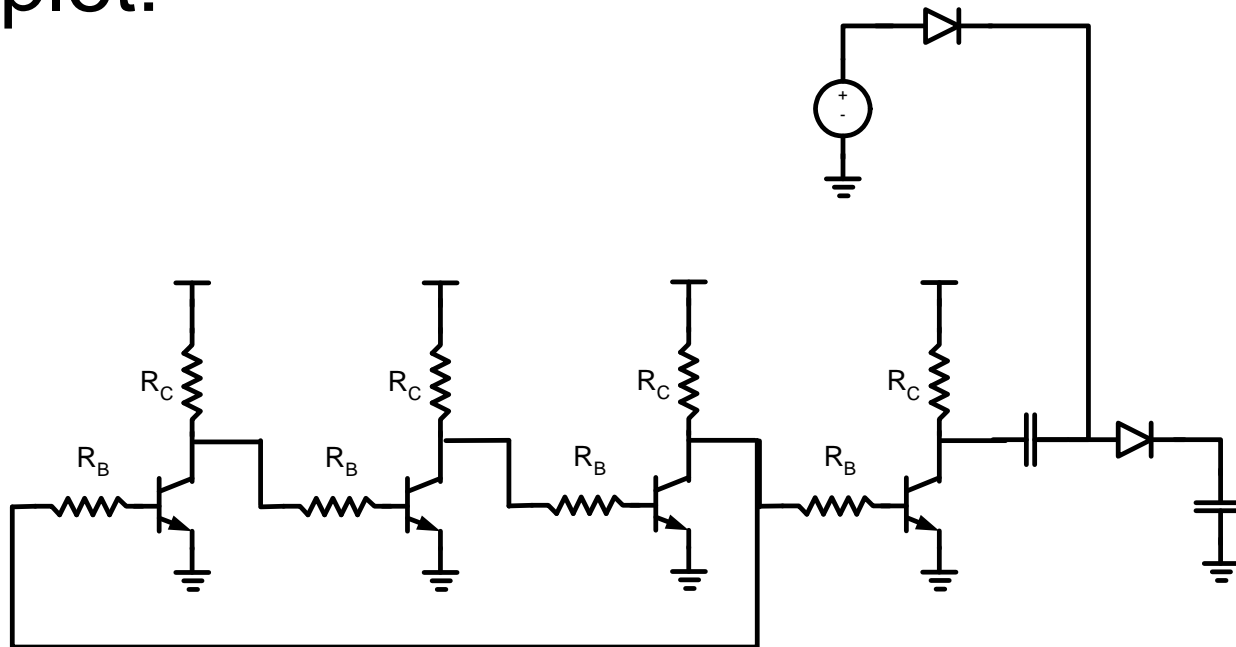
- On suit le fonctionnement “à haut niveau d’abstraction”:



- Vitesse dépend de:
 - Délai dans chaque inverseur
 - Le nombre d'inverseurs (nombre impair!)

Application: Pompe à charge

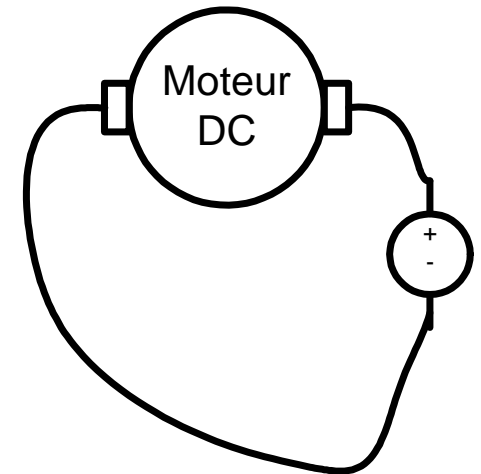
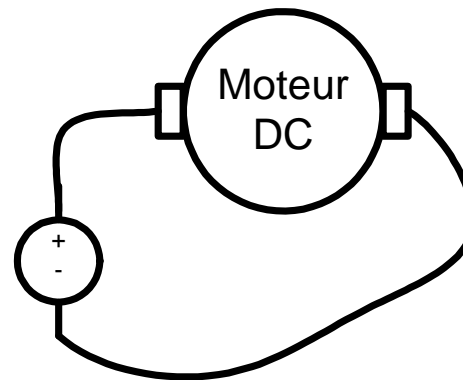
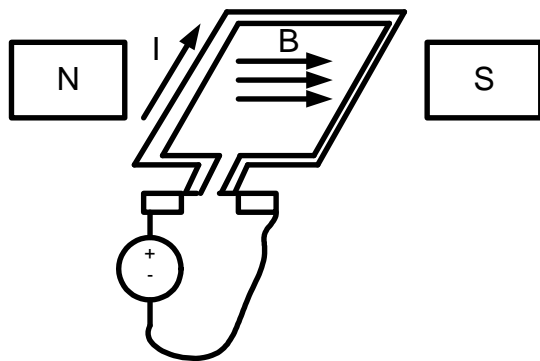
- Pour compléter le lien, voici le diagramme complet:



Non, pas nécessaire pour l'examen

Application: Pont en H

- Un moteur DC est un moteur qui est facile à contrôler:
 - Avec une tension positive, il tourne d'un bord
 - Avec une tension negative, il tourne de l'autre



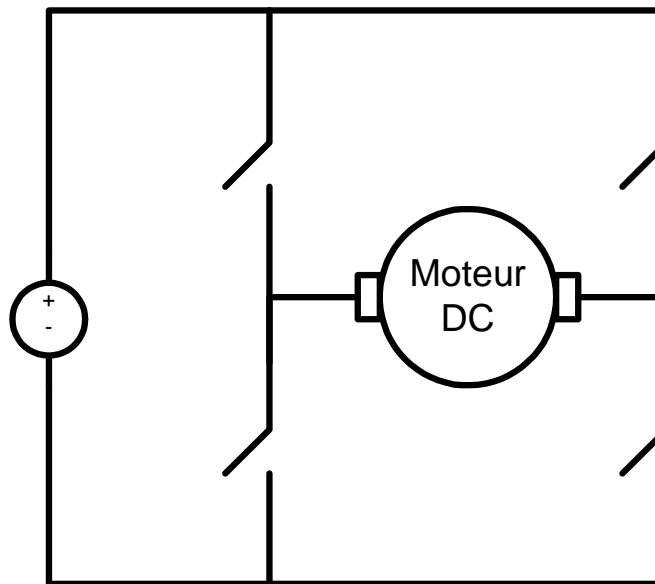
Allez voir le cours d'électromagnétisme

Application: Pont en H

- Problème: imaginez un robot qui fonctionne de cette manière
 - Pour qu'il avance, je dois connecter d'une façon
 - Pour qu'il recule, je dois refaire les connexions
- On aimerait contrôler la direction du moteur sans déconnecter
 - Un pont en H

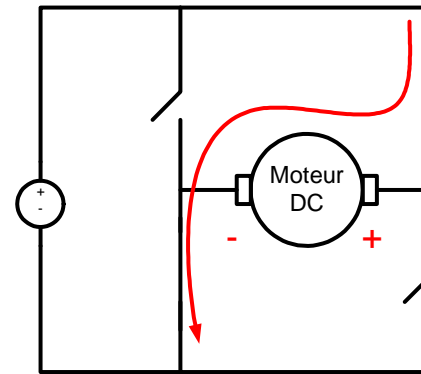
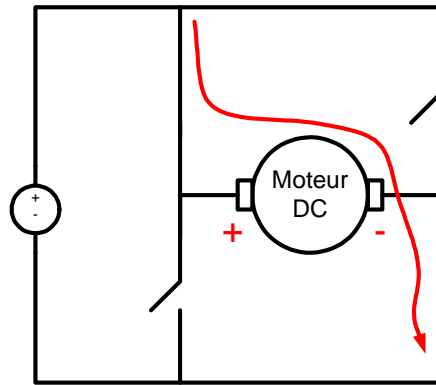
Application: Pont en H

- La structure générale ressemble à:
 - Source
 - Commutateurs
 - Moteur

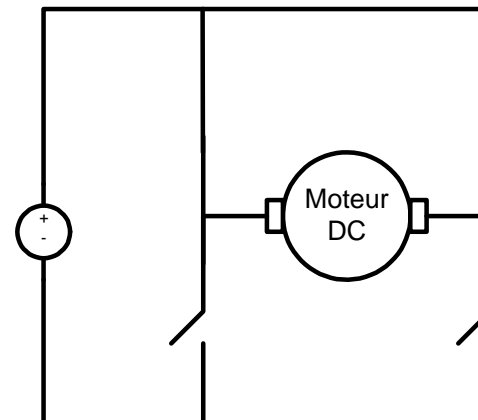
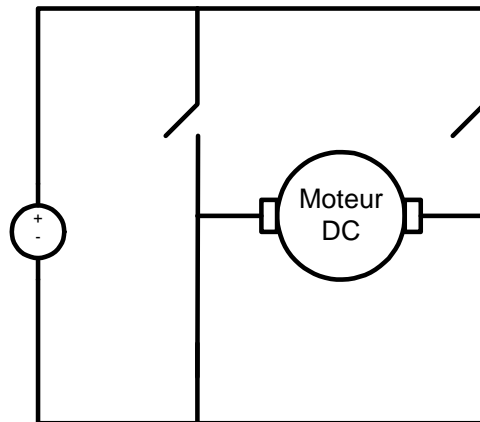


Application: Pont en H

- Pour tourner dans une direction ou l'autre:

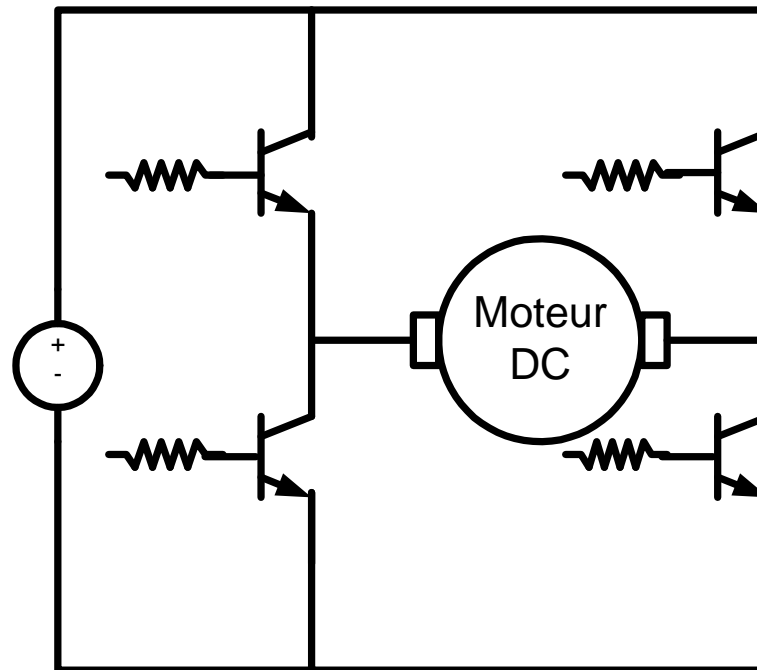


- Pour arrêter:



Application: Pont en H

- Nous savons comment faire des commutateurs:



Il manque quelque chose!

Application: Pont en H

- **Électromagnétisme:**
 - Un courant dans un champ magnétique crée une force (le moteur qui tourne)
 - Un mouvement dans un champ peut générer un courant
- Quand on enlève le courant, le moteur continue à tourner un peu (inertie)
- Ceci va générer un courant qui peut être mauvais pour les transistors

Application: Pont en H

- On aurait un design final qui ressemble à

