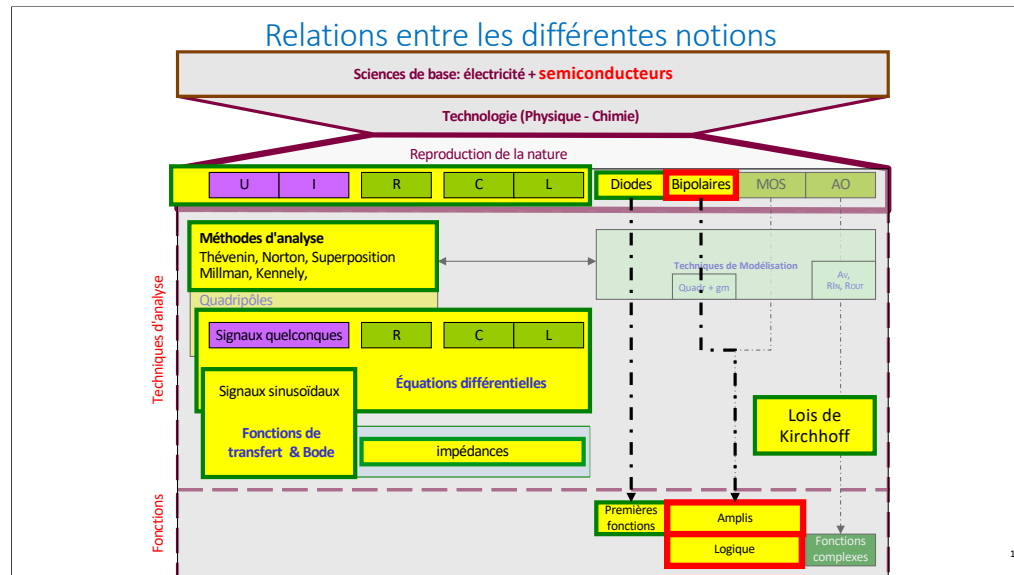




Avec les transistors nous abordons la partie la plus intéressante de l'électronique. Nous pourrions dire que l'électronique commencerait avec ce chapitre. Les transistors ont évolué au rythme effréné de la technologie contribuant à l'augmentation croissante des fonctionnalités (de natures analogiques ou logiques) disponibles et à l'amélioration de leurs performances.

Après avoir introduit les grands domaines d'application, nous présenterons les 2 principales familles de transistors et les caractéristiques qui les distinguent. L'étude proposée dans ce chapitre est consacrée au transistor bipolaire (le MOS sera vu prochainement). Sans aller dans les détails, nous évoquerons la structure physique du **dispositif** bipolaire, puis nous mettrons en évidence les principaux phénomènes macroscopiques du transistor sans les expliquer. Une explication digne de ce nom supposerait une formation sur la physique du semi-conducteur qu'il est impossible de développer dans le cadre de ce cours.

Les Transistors

Chapitre de base (fondamental)

- A quoi cela sert-il??? *Partout!!!*
- A quoi cela ressemble-t-il??? *Physiquement, schématiquement*
- Comment cela marche-t-il??? *Rappels diodes*
 - Observer
 - Expliquer
 - Physique des semi-conducteurs
 - Formalisation (Développements analytiques)
Trop compliqué ==> Analyse intuitive
 - Modélisation *Inspiration diodes*
 - Exploiter *Logique, analogique*

2

Comme la diode, le transistor est un composant non linéaire. Nous suivrons une méthodologie similaire pour l'analyser:

- Observation
- Explication
- Exploitation

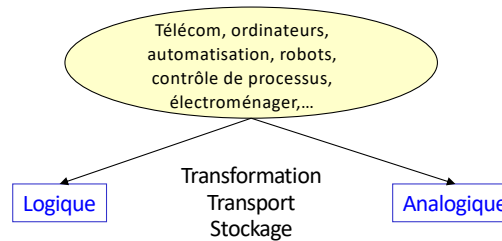
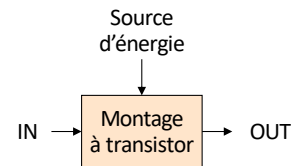
Les lois mises en jeu sont aussi compliquées que pour la diode supposant une phase de modélisation qui nous permettra de prédire approximativement le comportement des montages qui incluent des transistors.

Les Transistors

Préambule

Dispositifs à semi-conducteur.

Éléments actifs, capables d'amplifier un signal.



3

Jusqu'à présent, nous avons analysé des éléments passifs qui ne pouvaient que dissiper de l'énergie. Le transistor est un élément actif capable d'amplifier un signal. Bien entendu si l'on admet que « *rien ne se perd et rien ne se crée* », cette amplification du signal d'entrée suppose que le transistor puise une quantité d'énergie dans une source afin de la restituer dans le signal amplifié et préserver la quantité d'énergie globale:

$$\text{Energie Produite} = E_{IN} + E_{SOURCE} = E_{OUT} + E_{FONCTION}$$

$E_{FONCTION}$ étant la quantité d'énergie consommée par les différents éléments du circuit en fonctionnement.

Les domaines d'application du transistor sont innombrables (TV, HiFi, PC, automatisation, contrôle, robots, télécom,...). Dans tous ces domaines nous trouvons des circuits de natures logiques ou analogiques avec des fonctionnalités spécifiques:

Analogiques:

- 1) Fonctions linéaires pour transformer correctement les signaux (redressement, modulation, fonctions analytiques, expressions mathématiques)
- 2) L'amplification qui est une fonction linéaire particulière permettant d'exploiter de faibles signaux
- 3) Production de puissance pour véhiculer loin, rapidement des signaux ou convertir ces signaux sous une autre forme d'énergie.

Logiques:

- 1) Circuits combinatoires à l'origine des blocs de transformation et de calculs (numériques ou booléens)
- 2) Circuits séquentiels à l'origine des automates permettant d'exploiter la notion d'état et d'implémenter de véritables algorithmes sur silicium
- 3) La mémorisation volatile ou pas des données et des programmes.

Deux familles de transistors

- le transistor *MOS*, ou MOS-FET
- le transistor *BIPOLAIRE* ou B.J.T. (électrons et trous).

Il y a encore quelques années

Bipolaire: le plus connu et le plus utilisé

MOS: Technologie difficile à maîtriser

Aujourd'hui

MOS supplante Bipolaire dans beaucoup de domaines

Bipolaire résiste pour des applications spécifiques

Mais aussi → BiCMOS

4

Nous pouvons considérer qu'il y a deux grandes familles de transistors:

- Le MOS ou MOSFET (transistor à effet de champ, Field Effect Transistor)

- Le bipolaire ou BJT (Bipolar Junction Transistor). « bipolaire » car on exploite les 2 types de polarités, le + (véhiculé par une particule virtuelle appelée trou ou absence d'électrons), et le – (véhiculé par les électrons)

Il y a une génération, le bipolaire était le plus connu et le plus utilisé, alors que les deux familles étaient quasi contemporaines. Le MOS ne présentait pas les performances d'aujourd'hui et le dispositif MOS était mal maîtrisé.

Aujourd'hui le MOS a supplanté le bipolaire dans la majorité des domaines malgré l'avantage du bipolaire pour certaines caractéristiques, en particulier la transconductance que nous verrons ultérieurement.

La technologie qui aujourd'hui permet de mieux exploiter les performances des deux familles est le BiCMOS qui intègre les deux types de transistor, Bi comme bipolaire et CMOS

Le transistor bipolaire

Description

Bipolaire plus avantageux que MOS pour applications exigeant:

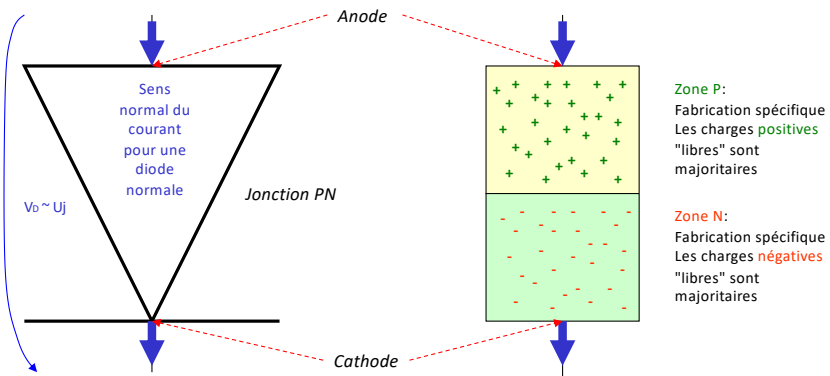
- Des **courants élevés** (étages de sortie)
- Circuits logiques **ultra rapides**
- Un **gain en tension élevé**
- Un **faible "bruit"** (préamplis Hi-Fi)
- La réalisation de **fonctions linéaires à hautes performances**
- Un **bon équilibrage entre les "tensions de seuil"** des composants.

5

Le bipolaire présente des avantages spécifiques:

- Possibilité de produire des courants élevés grâce à sa transconductance. Cette caractéristique est très utile pour réaliser des étages de sortie qui doivent piloter des signaux rapides et sur de longues lignes, ou simplement générer de la puissance (pour la HiFi par exemple).
- Pour aller plus vite il faut plus d'énergie et donc pomper plus de courant (comme dans une voiture, on accélère en pompant plus d'essence et donc plus d'énergie).
- En logique, certains circuits ultrarapides exploitent (exemple: l'ECL) la faculté du bipolaire à piloter beaucoup de courant.
- Un gain en tension élevé est nécessaire pour exploiter de faibles signaux. C'est un peu le corollaire du courant.
- Le « faible bruit ». Le bruit trouve des sources diverses liées à la construction du dispositif, à son usage et à son environnement. Dans le cas du MOS, les sources de bruit sont plus nombreuses.
- Certaines fonctions linéaires (modulation par exemple) ont besoin de circuits performants (vitesse, peu de bruit,...)
- Le bipolaire comme la diode au silicium fonctionne à partir d'une tension de l'ordre de $U_j = 0.7V$ contrairement au MOS qui présente une dispersion de valeurs pouvant aller typiquement de $-2V$ à $+2V$.

Parenthèse diode



6

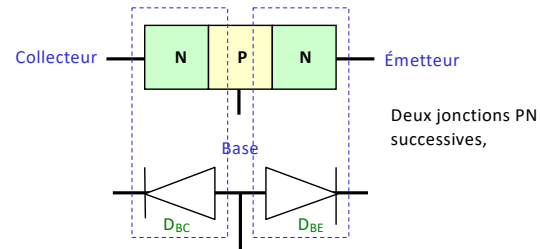
Cette petite parenthèse nous amène à observer l'aspect structurel (physique) d'une diode.

Sans rentrer dans les détails de la physique des semi-conducteurs, on peut considérer qu'une diode est réalisée à partir de l'association de deux zones notées P et N. Ces deux zones sont fabriquées au sein d'un même cristal de Silicium, mais selon des procédés de transformation différents appelés **dopage**.

L'association s'appelle une jonction et permet d'obtenir le comportement de la diode étudiée lors d'une session antérieure. Il faut évidemment connecter les deux zones avec l'extérieur. La connection de la zone P s'appelle l'**anode** et celle de la zone N s'appelle la **cathode**.

Structure d'un bipolaire

Un seul cristal de silicium - Succession de 3 zones, dopées différemment



Un contact électrique est établi vers chacune des zones:

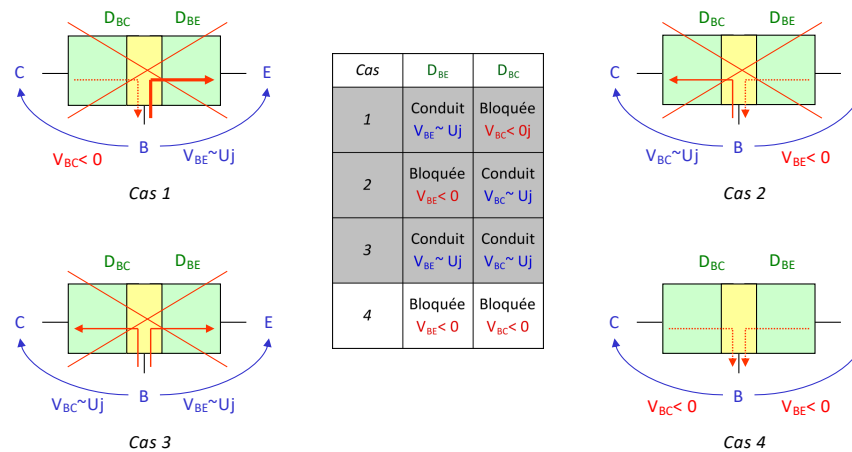
- *émetteur, base et collecteur.*

7

Comme la diode, le bipolaire est réalisé à partir d'un seul cristal de silicium mais ayant subi des transformations localisées dans trois zones (ces transformations sont aussi appelées dopage). La structure globale peut être assimilée à un « sandwich », et les trois zones distinctes (N, P et N) sont connectées vers l'extérieur. Ces trois connexions ont des rôles spécifiques et seront appelées respectivement Emetteur, Base et Collecteur.

On note que chaque couple (NP) et (PN) correspond à une jonction qui est la structure de base pour réaliser une diode. On constate qu'un transistor NPN formerait l'équivalent de deux diodes tête-bêche.

Vision de deux diodes tête-bêche



8

Les explications qui suivent ne traduisent pas le comportement complet du transistor, mais en partie seulement. Cela permet néanmoins d'adopter une vision intuitive et de mettre en évidence par la suite le comportement spécifique du transistor.

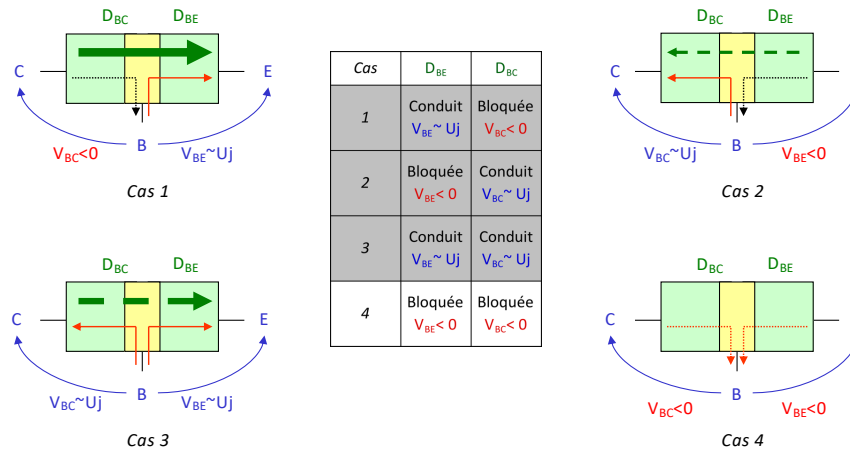
Nous partons de l'hypothèse que le transistor est connecté à un environnement. Il y a donc des éléments (Résistance et/ou source) connectés respectivement à la base, au collecteur et à l'émetteur.

Si l'on assimile un transistor bipolaire à deux diodes tête-bêches (**je le répète, c'est faux**), alors le comportement des deux diodes se décline en 4 situations présentées dans le tableau. En effet l'état d'une diode dépend de la tension aux bornes de la branche dans laquelle elle est placée. L'état de D_{BE} dépend de la tension V_1 et l'état de D_{BC} dépend de la tension V_2 .

Il y a donc bien 4 situations:

- D_{BE} bloquée et D_{BC} bloquée
- D_{BE} conduit et D_{BC} bloquée
- D_{BE} bloquée et D_{BC} conduit
- D_{BE} conduit et D_{BC} conduit

Observation des modes de fonctionnement



9

L'image d'un bipolaire équivalent à deux diodes tête-bèches doit être nuancée, car si l'on met bien quatre cas en évidence, le comportement complet ne sera pas toujours identique à celui de deux diodes, mais spécifique à un transistor. Nous verrons par la suite qu'un transistor peut jouer le rôle de deux diodes, mais avec deux diodes, il est impossible de réaliser un transistor.

1er cas: Imaginons que $V_{BC} < U_j$ (la diode D_{BC} est bloquée) et $V_{BE} \sim U_j$ (la diode D_{BE} est passante).

On observe naturellement un courant entre la base et l'émetteur de faible valeur. **Sous l'effet transistor**, on observe un courant beaucoup plus élevé entre C et E, contraire à ce que nous avions imaginé avec deux diodes tête-bèches.

Remarque: Dans la réalité, la condition pour D_{BC} est $V_{BC} < 0$, car si $V_{BC} > 0$ ce phénomène est déjà différent

2ème cas: Imaginons que $V_{BC} \sim U_j$ (la diode D_{BC} est passante) et $V_{BE} < U_j$ (la diode D_{BE} est bloquée). Apparemment, c'est le contraire du cas 1 qui devrait se produire. En fait le courant entre E et C est beaucoup plus faible. Les performances sont dégradées.

Remarque: Dans la réalité, la condition pour D_{BE} est $V_{BE} < 0$, car si $V_{BE} > 0$ ce phénomène est différent

3ème cas: Imaginons que $V_{BC} \sim U_j$ (la diode D_{BC} est passante) et $V_{BE} > 0$ (la diode D_{BE} est aussi passante). Les deux diodes doivent conduire. Mais que ce passe-t-il réellement entre C et E. Chaque diode qui conduit implique un courant entre C et E, respectivement entre E et C. En fait le phénomène mis en évidence dans le cas 1 est beaucoup plus significatif que dans le cas 2. Le courant CE obtenu est cependant moins important que dans le cas 1.

4ème cas: Imaginons que $V_{BC} < U_j$ (la diode D_{BC} est bloquée) et $V_{BE} < U_j$ (la diode D_{BE} est aussi bloquée).

Les deux diodes sont bloquées et on ne voit pas de courant entre C et E. Comme pour la diode simple, on observe de très faibles courants (courant de « porteurs minoritaires ») de l'ordre de 10^{-10} A à 10^{-20} selon les transistors et leurs polarisations.

Remarque: Dans la réalité, la condition pour D_{BE} est $V_{BE} < 0$, et la condition pour D_{BC} est

$$V_{BC} < 0$$

Résumé des modes de fonctionnement

MODE	JONCTION	JONCTION	UTILISATION
	EB	BC	
ACTIF DIRECT			
MODE	DIRECT	INVERSE	CIRCUITS
NORMAL			LINEAIRES
ACTIF			PERFORMANCES
INVERSE	INVERSE	DIRECT	DEGRADEES
SATURE	DIRECT	DIRECT	LOGIQUE
BLOQUE	INVERSE	INVERSE	LOGIQUE

10

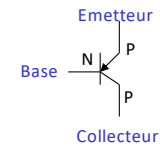
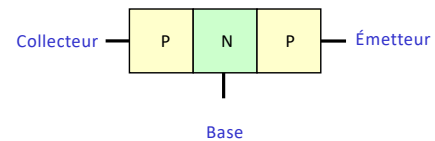
Le tableau suivant, résume les 4 cas que nous avons observés précédemment.

- le premier cas est exploité en analogique pour les circuits linéaires (amplification par exemple). C'est dans ce mode que nous allons travailler dans la suite de ce chapitre.
- le second cas n'est quasiment jamais exploité ni en analogique ni en logique.
- les deux derniers sont utilisés en logique pour réaliser le "0" et le "1"

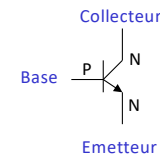
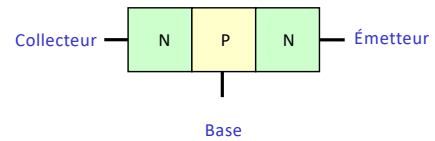
Deux types de transistors bipolaires

Transistor NPN plus courant que PNP (raisons technologiques).

TRANSISTOR PNP



TRANSISTOR NPN



11

Deux types de « **sandwiches** » sont réalisables respectivement les NPN et les PNP. Par la suite, nous travaillerons avec des symboles plus simples à exploiter. Ces symboles se différencient par une flèche.

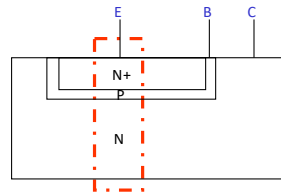
Pour le PNP, la flèche va de l'émetteur P vers la base N. Le collecteur étant la troisième connexion.

Pour le NPN, la flèche va de la base P vers l'émetteur N. Le collecteur étant la troisième connexion.

A noter que le NPN à construction identique est plus performant (plus rapide) que le PNP à cause de la nature des porteurs qui se manifestent. Ils sont majoritairement des électrons dans le NPN, alors que les trous sont majoritaires dans le PNP. La « **mobilité** » des électrons est quasi 2 fois supérieure à celle des trous.

Remarques

Structure réelle d'un transistor bipolaire

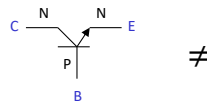


- L'émetteur est impérativement plus dopé que la base: **Détermine le gain en courant du transistor.**
- La base est une région extrêmement mince: **Détermine les propriétés du transistor.**
- Le collecteur est faiblement dopé: **Permet au transistor de supporter des tensions élevées.**

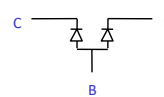
Bipolaire n'est pas un dispositif symétrique:

- Rôles de l'émetteur et du collecteur non réversibles: Différence avec source et drain d'un transistor MOS

Impossible de réaliser un transistor avec 2 diodes discrètes



≠



- Critère de la base très mince non respecté
- Cependant: chaque jonction du transistor bipolaire = excellente diode.

12

Quelques remarques:

- Les trois zones du transistor sont accessibles en surface, et correspondent à un empilement en profondeur (trois couches intégrées).

Chaque zone présente des caractéristiques particulières.

- L'émetteur qui est beaucoup plus dopé que la base. Le rapport entre les deux dopages détermine le gain en courant du transistor. Ce gain sera appelé par la suite le β du transistor.
- La base: C'est une région extrêmement mince qui détermine les propriétés du transistor. Des phénomènes de **génération – recombinaison** et de **durée de vie** de porteurs libres, sont à l'origine de ces propriétés (le cours sur les semi-conducteurs est nécessaire. La génération représente un électron qui quitte son orbitale pour se « balader » librement dans le cristal en laissant un trou à la place qu'il occupait originellement. La recombinaison représente le phénomène qui se produit. La durée de vie représente le temps moyen entre le moment où la génération a eu lieu et la recombinaison.
- Le collecteur: il est faiblement dopé et permet aux transistors de supporter des tensions élevées. Nous n'exploiterons pas le bipolaire dans une configuration avec des tensions élevées.

- le bipolaire n'est pas un dispositif symétrique comme l'observation du dopage des trois couches l'a montré précédemment. En effet, l'émetteur et le collecteur n'ont pas de rôles réversibles contrairement au transistor MOS (voir prochainement).

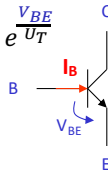
- Nous avons évoqué deux diodes dans l'analyse du bipolaire. Il est vrai qu'un transistor bipolaire pourrait jouer le rôle de deux diodes tête-bêche (voir avec le TTL en logique), mais en revanche, l'assemblage de deux diodes tête-bêche ne peut en aucun cas réaliser un transistor à cause de plusieurs contraintes, en

particulier la finesse de la base qui ne serait plus obtenue.

Modèle élémentaire du bipolaire

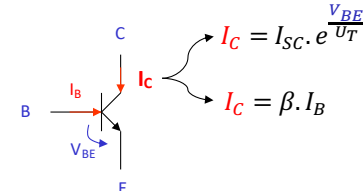
Source de courant commandée

Comportement de la diode D_{BE}

$$I_B = I_{SB} \cdot e^{\frac{V_{BE}}{U_T}}$$


Observation du courant I_C

$$I_C = I_{SC} \cdot e^{\frac{V_{BE}}{U_T}}$$

$$I_C = \beta \cdot I_B$$


Conséquences: Deux notions fondamentales



Bipolaire = **source de courant** (courant de collecteur)

- commandée par un faible **courant** (courant de base).
- commandée par une **tension** (tension base - émetteur)

13

Nous partons toujours du principe que le transistor est dans le mode normal de fonctionnement.

Si nous considérons la diode D_{BE} , le comportement de son courant I_B est conforme aux prévisions décrites par une loi exponentielle en fonction de V_{BE} .

Si nous analysons le courant I_C , nous observerons qu'il aussi exponentiel en fonction de V_{BE} . Mais les valeurs de I_C sont beaucoup plus élevées que I_B . Entre I_B et I_C (pour un même V_{BE}) il y a un facteur qui, en première approximation, semble constant.

Ces deux observations complémentaires indiquent que le courant I_C du transistor bipolaire est contrôlé par la diode D_{BE} .

Nous savons qu'il existe une relation entre le courant d'une diode et la tension à ses bornes (via une loi exponentielle). Cela signifie qu'en ayant une grandeur nous avons l'autre et réciproquement.

En d'autres termes, sachant que la diode D_{BE} contrôle le courant I_C , nous pouvons dire que le courant I_C est soit contrôlé en tension (V_{BE} de la diode D_{BE}) soit en courant (I_B de la diode D_{BE}).

Nous verrons que le courant I_C obtenu permet d'assimiler le transistor à une source de courant commandée (commandée par une tension ou un courant).

Remarques sur la source de courant I_C

Source de courant => mode normal d'utilisation

- $V_{BC} < 0$ et $V_{BE} > 0$
- Courant de base de valeur $\ll$ courant de collecteur

Relation entre I_C et I_B : le gain en courant β du transistor.

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} \quad \text{avec } \beta = \text{quelques dizaines à quelques centaines}$$

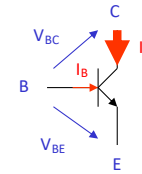
Gain du Bipolaire: Bip. idéal: gain en courant infini, ou courant de base nul.

Les gains en courant des PNP $\ll$ à ceux des NPN.

Sens des courants: Celui de la flèche identifiant l'émetteur. Indique si I_B est entrant ou sortant

Relation entre les 3 courants $I_E = I_C + I_B \sim I_C$

Relation entre I_C et V_{BE} $I_C = I_{SC} \cdot e^{\frac{V_{BE}}{U_T}}$ I_S courant inverse de saturation. fA à pA.
Quand NPN conduit, V_{BE} est positive; $U_j = 0.7V$.



14

Ce type de contrôle est utilisable lorsque le transistor est dans le mode normal de fonctionnement ($V_{BE} > 0$, $V_{BC} < 0$).

Un faible courant injecté dans la base du transistor se traduit par un courant I_C (entre collecteur et émetteur) beaucoup plus élevé. Lorsque le courant I_B est connu, il est possible de prévoir le courant I_C que l'on va obtenir, car il existe un facteur de proportionnalité appelé β .

Selon la construction du bipolaire, le β peut varier de quelques dizaines à plusieurs centaines.

Ce facteur β n'est malheureusement pas stable. Le constructeur nous donne sa valeur typique. En fonction de la température, cette valeur peut évoluer de manière très significative.

Quelques remarques complémentaires:

- le β d'un PNP est inférieur à celui d'un NPN. Nous reparlerons de la mobilité des porteurs pour justifier cette situation.

Dans les exercices, on prendra souvent β infini, non pas pour générer un courant I_C infini, mais pour pouvoir négliger I_B dans les calculs.

- Le sens du courant I_C est identifié à partir de la flèche entrante (NPN) ou sortante (PNP) de l'émetteur.
- Il est possible d'appliquer les lois de Kirschhoff, en particulier la loi des nœuds. Le transistor bipolaire ayant 3 nœuds (B, C et E), alors si l'on connaît les courants circulant dans deux nœuds, celui du troisième est donc facile à déduire et alors $I_E = I_C + I_B$.

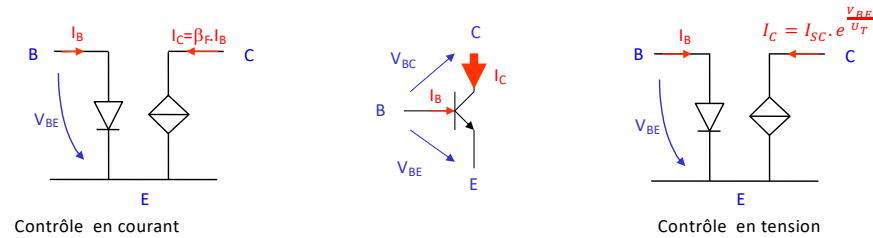
Comme I_B est négligeable devant I_C , il est possible de considérer $I_E = I_C$.

- Nous avons vu qu'il est possible de contrôler le courant I_C à partir de la tension V_{BE} . Intuitivement, nous dirions que si $I_C = \beta I_B$ et $I_B = I_{SB} \exp(V_{BE}/U_T)$ (comportement d'une diode), alors $I_C = \beta \cdot I_{SB} \exp(V_{BE}/U_T)$ ou $I_C = I_{SC} \exp(V_{BE}/U_T)$

Le courant I_S est très faible et le courant I_C devient significatif lorsque $V_{BE} \sim U_j = 0.7V$

Modèles de base (DC) si mode normal de fonctionnement

Grands signaux



Remarques:

- Ne jamais introduire l'approximation $V_{BE} \sim U_j = 0.7V$ dans la relation exponentielle entre I_C et V_{BE} car: **Erreurs monstrueuses!**
- Autre modèle: **Ebers et Moll** (même pour d'autres modes de fonctionnement du Bipolaire)

15

Les deux modèles proposés mettent en évidence un comportement de diode entre la base et l'émetteur et celui d'une source de courant commandée entre le collecteur et l'émetteur.

On note que ces deux modèles ne sont pas vraiment exploités car ils n'apportent pas de simplification à nos calculs (les équations resteront les mêmes).

Comme dans la diode, il est impossible d'exploiter le modèle U_j avec la loi exponentielle. Nous obtiendrions des erreurs monstrueuses.

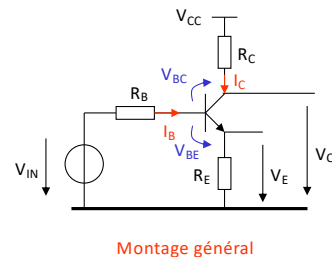
Remarque: La jonction base-collecteur ne contrôle pas I_C puisque la diode BC est bloquée. Il faut pour cela imposer $V_{CB} > 0$.

Un modèle mathématique existe, celui d'Ebers et Mol exploitant l'effet des deux jonctions (BE et BC), permettant ainsi de généraliser le comportement du transistor (les 4 cas étudiés précédemment).

Exercices Méthodologie

Deux types d'exercices :

1. Exprimer puis calculer I_B , I_C , I_E , V_B , V_E , V_C
2. Tracer des courbes : Par exemple $V_E = f(V_{IN})$, $V_C = f(V_{IN})$



Hypothèse 1: Le bipolaire est dans le mode linéaire

1. Vérifier si le transistor conduit : $V_{IN} > U_j$, sinon bloqué!!!
2. Vérifier s'il n'y a pas une grandeur dont la valeur est déjà connue.
Exemple: Si la résistance R_E n'existe pas, alors $V_E = 0$.
3. Calculer le paramètre le plus simple (a) ou poser une équation simple (b)
Exemple a: Si la résistance R_E n'existe pas, alors $V_B = 0$.
Exemple b: Si la résistance R_E existe, alors $R_B \cdot I_B + U_j + R_E \cdot I_E = V_{IN}$, et $I_E \approx I_C \approx \beta \cdot I_B$
4. A la fin des calculs, vérifier que $V_{BC} < 0$, sinon transistor saturé

Hypothèse 2: Le bipolaire est dans le mode saturé

1. Vérifier si le transistor conduit : $V_{IN} > U_j$
2. Vérifier s'il n'y a pas une grandeur dont la valeur est déjà connue.
Exemple: Si la résistance R_E n'existe pas, alors $V_E = 0$.
3. En mode saturé, $V_{CE} \approx$ quelques dizaines de mV. On pose $V_E \approx V_C$
4. Calculer le paramètre le plus simple (a) ou poser une équation simple (b)
Exemple a: Si la résistance R_E n'existe pas, alors $V_B = 0$ et $V_C \approx 0$
Exemple b: Si la résistance R_E existe, alors $R_C \cdot I_C + V_{CE} = V_{CC}$, avec $V_{CE} \approx I_C = \beta \cdot I_B$

16

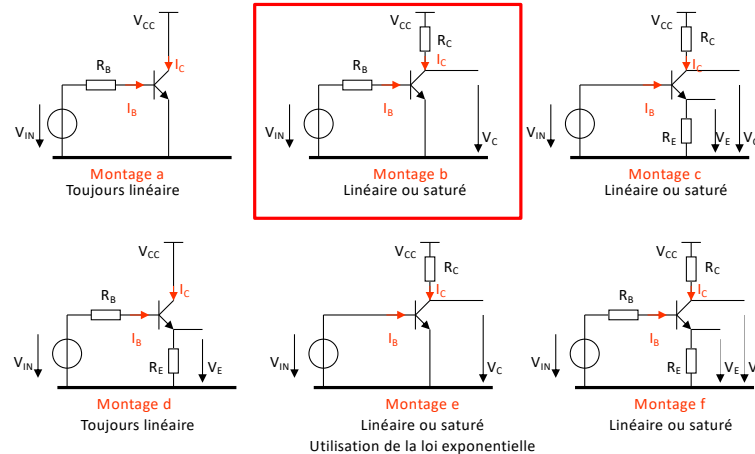
Dans les exercices de base, le transistor est supposé dans le mode linéaire, ce qui permet d'exploiter le modèle du mode actif direct ou linéaire. Il est conseillé d'exploiter une recette de cuisine décomposée en 5 étapes :

1. La première étape doit permettre de vérifier que le transistor n'est pas bloqué. On vérifie pour cela que $V_{IN} > U_j$
2. La seconde étape doit permettre de calculer I_B . La loi d'ohm et le modèle de la diode D_{BE} permettent généralement de calculer simplement cette valeur. Lorsque R_E existe, le calcul est moins trivial car I_B et I_C sont linéairement dépendants et traversent R_E . Dans les étapes 2 et 3 sont développées en même temps (voir exercice spécifique)
3. La troisième étape exploite généralement la loi fondamentale $I_C = \beta \cdot I_B$
4. A partir du courant I_C il est possible de calculer, par la simple loi d'ohm, les tensions $V_C = V_{CC} - R_C \cdot I_C$ et $V_E = R_E \cdot I_C$ (si R_E existe)
5. Lorsque V_C est calculée, il faut vérifier que le transistor est bien dans le mode linéaire. Si $V_B < V_C$, c'est le cas et l'hypothèse de départ est correcte. Dans le cas contraire, le transistor est dans le mode saturé et les calculs des étapes

précédentes sont faux.

Exercices typiques

Le cas où les transistors sont bloqués n'est pas analysé



17

Les cas analysés sont innombrables et permettent d'exploiter la recette de cuisine proposée précédemment.

L'état des transistors dépend de l'ensemble des paramètres suivants:

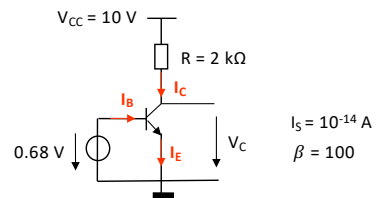
- Valeurs des résistances
- Valeurs des tensions V_{IN} et V_{CC}
- Valeur du β du transistor

Selon les montages, le transistor peut être toujours linéaire (c'est le cas des montages **a**, et **d**

Dans les montages **b**, **c** et **f**, le transistor peut être linéaire ou saturé.

Le montage **e** est particulier car sa résolution nécessite l'exploitation de la loi exponentielle.

Exercice 1



1. Calculer les courants de collecteur, de base et d'émetteur, ainsi que le potentiel V_C du collecteur.

$$V_{BE} = 0.68\text{ V} \quad I_C = I_S e^{\frac{V_{BE}}{U_T}} \quad \text{Avec } I_S = 10^{-14}\text{ A}, U_T = 26\text{ mV},$$

2. Calculer V_{CB} et vérifier que le transistor est en mode normal de fonctionnement.

18

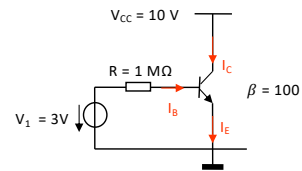
Ici la tension V_{BE} est donnée avec précision. La loi exponentielle est donc possible à utiliser.

Une fois I_C calculé, il est possible d'en déduire:

$$I_B = I_C / \beta \quad \text{et} \quad V_C = V_{CC} - R \cdot I_C$$

La loi qui a été exploitée supposait que le transistor était en mode normal de fonctionnement, ce qui est vérifiable si $V_C > V_B$.

Exercice 2



1/ Calculer les courants de collecteur, de base et d'émetteur.

$$V_1 = R \cdot I_B + V_{BE}$$

2/ Calculer V_{BE} et V_{CB} .

19

Ne connaissant pas la tension V_{BE} avec précision, il est néanmoins possible d'utiliser le modèle $V_{BE} = U_j = 0.7V$ avec la loi d'ohm.

En effet posons $I_B = (V_1 - U_j)/R$

Une fois I_B calculé, $I_C = \beta I_B$

Sur une simple observation du circuit, il est possible d'affirmer que le transistor est dans le mode normal de fonctionnement

$V_C = 10V$, $V_E = 0V$ et $V_B = 0.7V$