

CHAPITRE VIII b:

Introduction aux transistors et semi conducteurs

Dans ce chapitre, nous abordons la description d'éléments non-ohmiques, les semi-conducteurs, dont les exemples les plus notoires sont la diode et le transistor. Ce dernier est le composant de base des portes logiques qui peuplent les ordinateurs.

VIII.1. Structure cristalline

Il est important, pour la bonne compréhension du fonctionnement d'un transistor, de rappeler la structure d'un atome, déjà décrite au chapitre VII.4.2. Dans le cas du silicium et du germanium, éléments chimiques souvent utilisés pour la fabrication des transistors, la couche électronique externe (dite de valence) contient 4 électrons.

Les transistors et diodes sont fabriqués à partir de **cristaux** de germanium ou de silicium. Les cristaux se caractérisent par un arrangement régulier et répété des atomes dans l'espace (Fig.VIII.1). Pour le germanium (Ge) et pour le silicium (Si), chaque atome est lié à 4 atomes voisins, de telle façon que la distance entre 2 atomes voisins soit la même. Deux atomes voisins mettent chacun en commun l'un de leurs 4 électrons périphériques, de sorte que la liaison atomique est constituée de 2 électrons. La liaison ainsi réalisée entre atomes voisins est très solide, ce qui assure au cristal sa grande cohésion. Chaque électron de la couche externe participant à une liaison, aucun électron ne peut se déplacer librement dans le cristal, de sorte que le cristal de germanium est un mauvais conducteur.

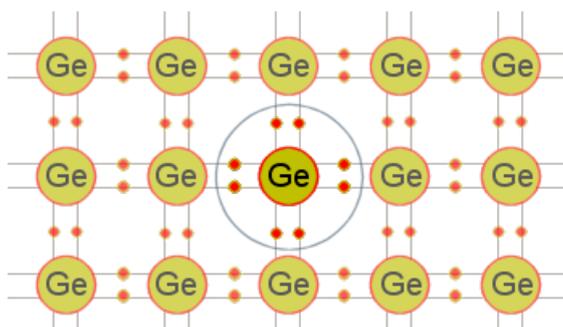


Figure VIII.1. Un réseau cristallin constitué d'atomes de germanium. Les grosses sphères représentent un atome, les petites sphères les électrons de valence et les « bras » qui les joignent les liens covalents. Une liaison atomique est constituée de 2 électrons mis en commun.

Crédit : <http://www.radartutorial.eu/21.semiconductors>

VIII.2. Le concept "Electron-Trou", les impuretés et la conductibilité électrique

Supposons que sous une influence extérieure (dont il n'est pas nécessaire de préciser l'origine à ce stade), un électron d'une liaison se soit libéré et devienne de la sorte un « électron libre ». Cet électron va circuler dans le cristal de manière désordonnée, en se heurtant aux atomes. Si l'on applique un champ électrique au cristal, le mouvement de cet électron libre va être dirigé par le champ électrique, vers sa polarité positive. Il y aura donc un phénomène de conduction électrique qui va s'installer au sein du cristal. Cet électron chassé de son emplacement initial laisse à sa place un espace vide, appelé **trou**. Ce trou crée une force électrostatique d'attraction pour les électrons voisins. Lorsque un électron voisin vient remplir ce trou, il laisse à son tour un trou à la place qu'il vient de quitter. On peut démontrer que le mouvement de ce trou est équivalent à celui d'une particule fictive, de même masse que l'électron, mais de charge positive. Ce trou n'est donc pas une nouvelle particule, mais bien une absence de charge négative associée à l'électron manquant. Ce trou se déplace et contribue ainsi à la circulation d'un courant dans le cristal, comme le ferait une particule de charge positive sous l'action d'un champ électrique. Ainsi, sous l'effet d'une influence extérieure, il peut se produire dans un cristal de Ge ou de Si, une **paire "électron/trou"** (e/t) qui participe au transport de l'électricité.

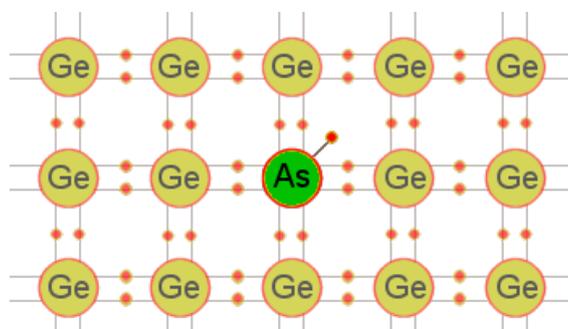
Cette création de paire e/t est d'autant plus facile que la température du cristal augmente. Elle peut également être due aux radiations lumineuses, sous la forme de photons venant heurter et rompre certaines des liaisons atomiques (c'est le principe des photodiodes).

Il convient de signaler en outre que chaque fois qu'un électron retombe dans un trou, il y a disparition du trou et restitution d'une nouvelle liaison.

A l'équilibre, il y a autant de génération que de recombinaison de paires électrons/trous.

Tout ce qui a été dit plus haut concerne un cristal parfaitement pur de Ge ou de Si. Or l'introduction d'impuretés dans le cristal, même en quantité infime, modifie énormément ses caractéristiques.

Les impuretés sont des atomes ayant soit 3 électrons sur la couche externe (indium...), appelés impuretés trivalentes, soit 5 électrons (arsenic...), appelés impuretés pentavalentes.



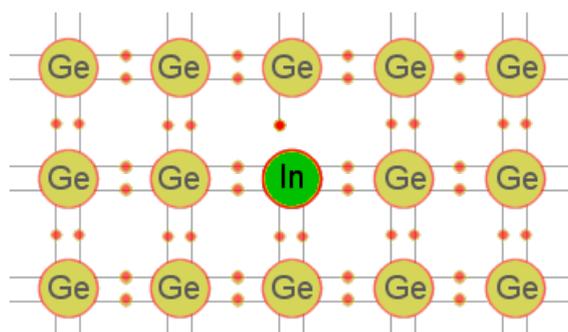


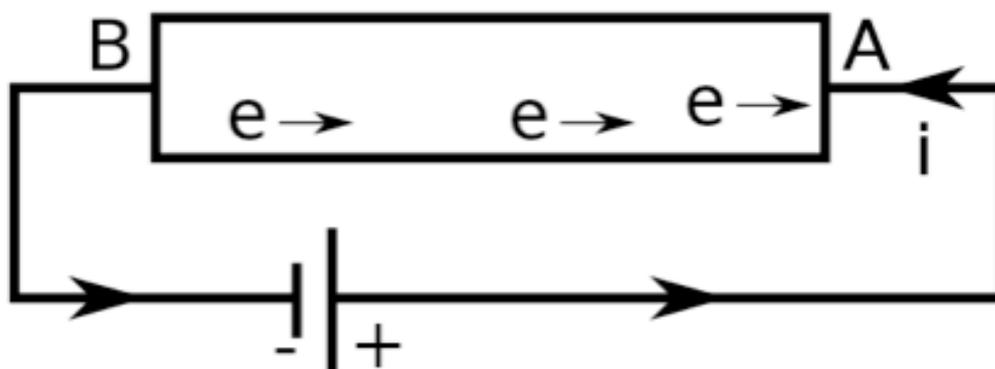
Figure VIII.2. Un réseau cristallin constitué d'atomes de germanium et contenant des impuretés trivalentes (indium, en bas) ou pentavalentes (arsenic, en haut).

Crédit : <http://www.radartutorial.eu/21.semiconductors>

Supposons que l'on introduise dans un cristal de germanium une faible quantité d'impuretés pentavalentes. Cet atome pentavalent va prendre la place d'un atome de Ge, et le cinquième électron reste libre (il n'est que faiblement lié au noyau de l'atome pentavalent ; Fig.VIII.2). Les impuretés pentavalentes sont aussi appelées impuretés de type « n », car elles introduisent un excès de charges négatives dans le cristal. On appellera donc de type « n » un cristal dont les impuretés sont pentavalentes.

Plus la quantité d'impuretés augmente, plus la conduction électrique augmente, grâce à ces électrons excédentaires pratiquement libres (On néglige ici la formation naturelle de paires électrons/trous, qui est faible à température ambiante).

En appliquant une tension aux bornes d'un cristal n, les électrons libres sont attirés par l'électrode positive. Chaque fois qu'un électron quitte le barreau en A, un nouveau entre dans le cristal en B, ce qui permet le passage continu du courant (Fig.VIII.3).



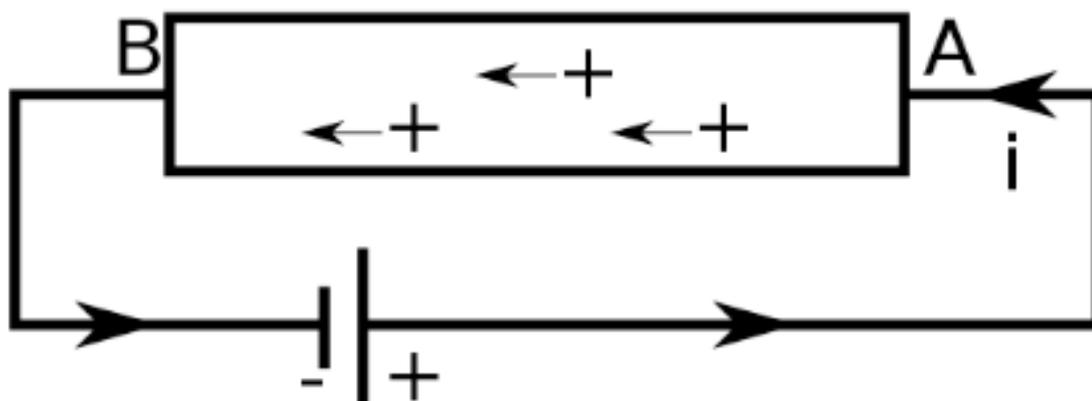


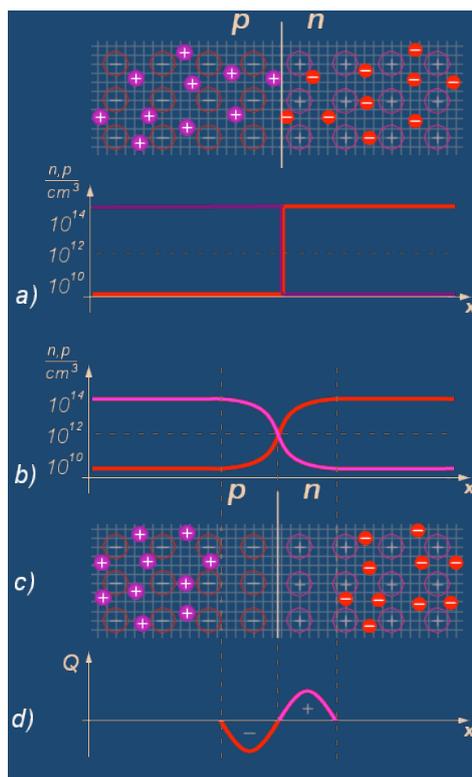
Figure VIII.3. Une tension est appliquée au cristal dopé n (en haut) et p (en bas). Un courant circule dans le circuit. Par convention, le sens du courant est opposé à celui des électrons.

Si des impuretés trivalentes (indium) sont placées dans le cristal de germanium, l'atome d'impureté prend la place d'un atome de Ge mais comme trois électrons seulement seront disponibles pour créer la liaison covalente avec les 4 atomes voisins de Ge, il y aura un électron manquant : on parle alors de la création d'un « trou » (Fig.VIII.2). Le cristal est alors du type p. Si comme précédemment, on applique une tension aux bornes du cristal p (Fig.VIII.3), les trous sont attirés par l'électrode négative, tandis qu'à l'extrémité B du barreau, un électron en provenance de la pile se combine avec le trou et un nouveau trou se crée à l'autre extrémité (A) car l'électron fourni en B par l'électrode négative de la pile doit être compensé par un électron arraché à l'extrémité A du barreau et se rendant vers l'électrode positive de la pile. Un courant apparaît donc également dans pareille circonstance.

VIII.3. La jonction pn

VIII.3.1. La barrière associée à la jonction p-n

Si on accole un semi-conducteur de type n avec un autre de type p, on obtient une **jonction pn**. Celle-ci constitue le fondement des composants électroniques tels que la diode et le transistor. Même si le semi-conducteur de type n a un surplus d'électrons de valence, il est cependant globalement neutre car les atomes donneurs deviennent positifs dès lors que leur électron excédentaire quitte la couche de valence (il y a alors un surplus de protons par rapport aux électrons restant dans l'atome). Par conséquent, pour chaque électron libre dans le matériau de type n, il y a un atome de charge positive pour le contrebalancer, de sorte que la charge totale est nulle. Le même raisonnement s'applique, *mutatis mutandis*, au semi-conducteur p (Figure VIII.4a).



$$\leftarrow \underline{E}$$

Figure VIII.4. Positions des charges dans une jonction pn. Sur le panneau d, les charges - + de part et d'autre de la jonction créent un champ électrique orienté de droite à gauche (n vers p), et empêchant tout mouvement supplémentaire spontané de charges au-travers de la jonction.

Les électrons et les trous peuvent donc se mouvoir librement dans le matériau car ils ne sont que faiblement liés aux atomes, tout en préservant la charge totale du matériau nulle.

À première vue, on pourrait penser que, en joignant un cristal de type p avec un autre de type n, tous les trous et tous les électrons libres devraient migrer spontanément d'un matériau à l'autre et s'annuler mutuellement, mais ce n'est pas le cas. Le processus se passe en deux étapes:

1. Les électrons venant du type n diffusent dans le type p près de la jonction, comblant les trous de covalence mais ce faisant, ils sont en surplus par rapport aux charges des noyaux atomiques des impuretés d'indium, ce qui crée des ions négatifs. De même, les trous migrent du semi-conducteur p vers le type n où ils équilibrent les liaisons covalentes, mais ce faisant, créent des ions positifs aux impuretés d'arsenic (Figure VIII.4.c). Ce transfert des trous et des électrons d'un matériau à l'autre réduit le nombre d'électrons libres jusqu'à une certaine distance de la jonction et cette zone est appelée la **région désertée, de déplétion ou de charge d'espace**.
2. Les ions positifs formés dans le matériau de type n et les ions négatifs dans le type p ne peuvent bouger, car ils sont fixés par le réseau cristallin. Une région de charges fixes s'établit donc de part et d'autre de la jonction (Fig. VIII.4.cd). La charge électrostatique à travers la jonction est de sens inverse au courant de recombinaison. La diffusion des électrons du type n et des trous du type p est donc ralentie par ce champ et cesse quand le champ devient égal à l'attraction de recombinaison à travers la barrière. Le champ

électrostatique créé par les ions positifs et négatifs est appelé la **barrière**. La diffusion et la formation de la barrière se font presque immédiatement dès que les matériaux p et n sont joints. A cette barrière est associé une différence de potentiel la caractérisant, selon

l'Eq. (VI.12) : $\Delta V = V(\mathbf{n}) - V(\mathbf{p}) = - \int_{\mathbf{p}}^{\mathbf{n}} \vec{E} \cdot d\vec{l} > 0$. Dans le cas de jonctions au silicium

dopé, cette différence de potentiel de barrière s'élève à 0.6 – 0.7V ; dans le cas de germanium dopé, elle s'élève à 0.25 – 0.3 V.

VIII.3.2. La jonction p-n, sens passant (ou polarisation directe)

Une tension électrique externe appliquée à une jonction pn est appelée polarisation. Si une pile est reliée à chaque extrémité de la jonction, avec sa borne positive connectée au cristal dopé p, on parle de "polarisation directe".

La borne positive A connectée du côté p repousse les trous vers la jonction où ils neutralisent certains ions négatifs. Au même moment, la borne négative B du côté n repousse les électrons vers la barrière où ils neutralisent des ions positifs (Figure VIII.5). Comme il y a par conséquent moins d'atomes ionisés de part et d'autre de la jonction, la barrière s'affaiblit, ce qui permet à plus de charges libres de traverser la jonction. La même situation peut être décrite en terme de champ électrique imposé par la pile, qui s'oppose à celui de la barrière. Si le champ électrique de la pile devient plus grand que celui de la barrière, les électrons libres de la région n pourront être entraînés au-travers de la barrière, et un courant électrique pourra s'établir. En termes de différence de potentiel, le courant s'établira dès que la tension externe appliquée est supérieure à celle de la barrière, soit 0.6 V pour un semi-conducteur au silicium, et 0.25 V pour un semi-conducteur au germanium.

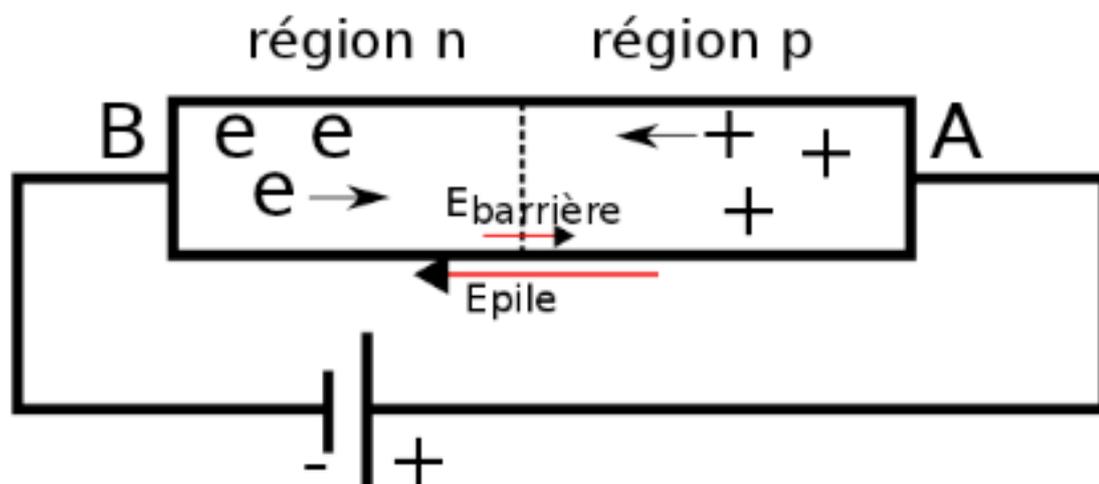


Figure VIII.5. Jonction pn polarisée dans le sens direct (passant).

Un courant électrique s'établit alors dans le semi-conducteur, puisque des électrons en provenance de la borne négative de la pile pénètrent dans le matériau de type n où ils se mêlent aux autres électrons déjà en marche vers la jonction. Puisque la barrière est affaiblie, ils passeront dans le matériau de type p, à travers la zone désertée. Les électrons perdent une partie de leur énergie cinétique en luttant contre la barrière et comblent des trous dans le matériau de type p. Des trous se reforment lorsque, à l'autre extrémité du semi-conducteur p, des électrons le quittent pour se diriger vers la borne positive de la pile. Un courant s'établit

ainsi dans le semi-conducteur.

Il est important de réaliser qu'en augmentant la tension de polarisation, le nombre d'électrons circulant dans le circuit et le semi-conducteur fait de même. Lorsque la tension atteint un niveau où la barrière devient presque inexistante, le courant devient énorme. Comme la chaleur dégagée est proportionnelle au courant, passé ce seuil, le semi-conducteur subit des dommages.

VIII.3.3. La jonction p-n, sens bloquant (ou polarisation inverse)

Si les bornes de la pile sont inversées, les électrons libres de la partie n, attirés par la borne positive de la pile (et inversement pour les trous de la partie p), augmentent donc la largeur de la barrière (Figure VIII.6). Ce renforcement de la barrière a pour effet d'empêcher tout passage de courant au-travers de celle-ci (à l'exception d'un très faible courant généré, non par la présence des impuretés, mais par l'arrachement d'électrons à leur bande de valence; à température ambiante normale, ce courant très faible peut être négligé).

C'est la **polarisation inverse**.

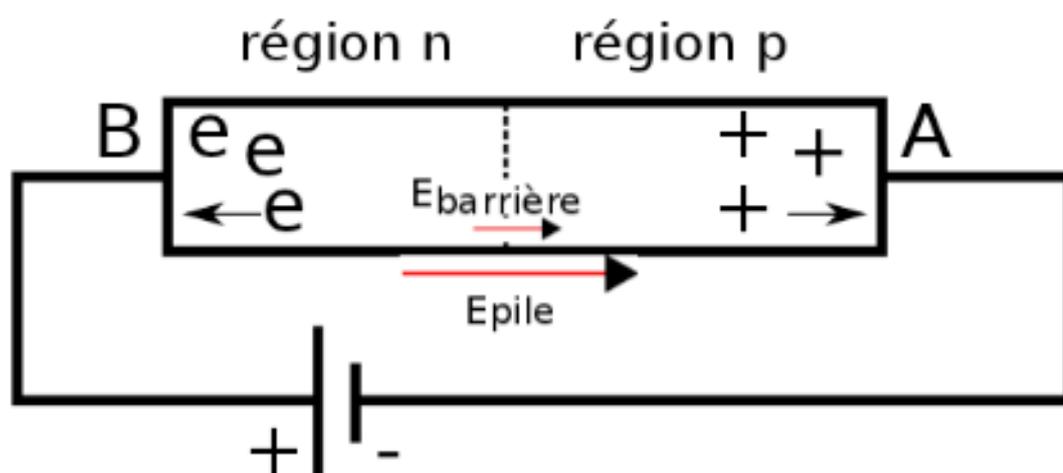


Figure VIII.6. Jonction pn polarisée dans le sens inverse (bloquant), pour lequel le champ électrique de la pile s'additionne à celui de la jonction, empêchant l'apparition de courant électrique.

VIII.3.4. La diode

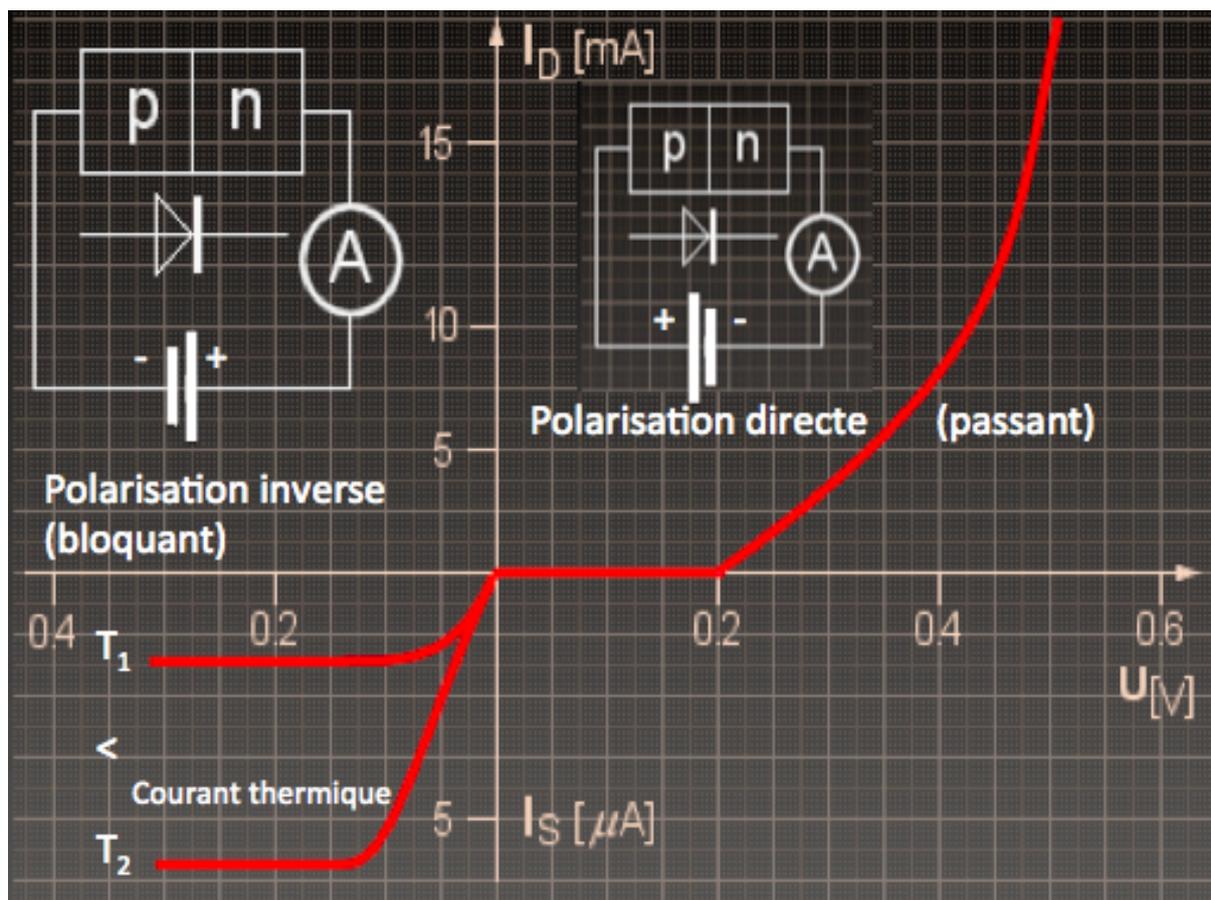


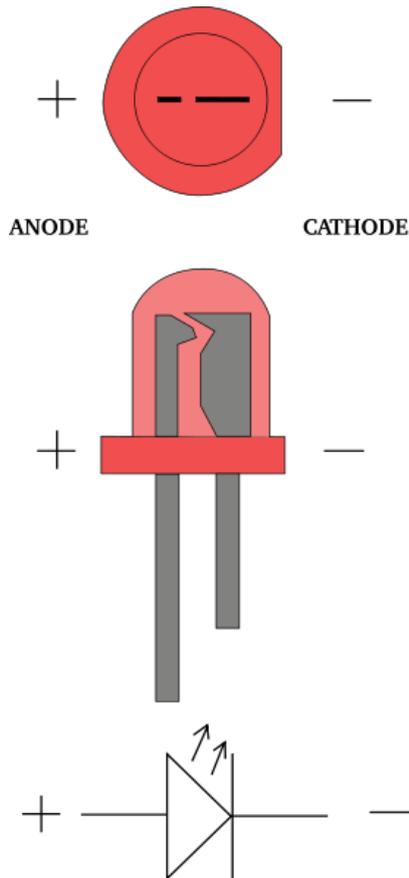
Figure VIII.7: Caractéristique tension - courant d'une diode au germanium.

En résumé, la jonction p-n possède donc la propriété essentielle de présenter une faible résistance au courant électrique dans un sens et une forte résistance dans l'autre sens. Une telle jonction pn est encore appelée **diode**. Une diode à jonction pn laisse donc facilement passer le courant en polarisation directe, au-delà d'une tension seuil qui correspond à un rétrécissement suffisant de la barrière. En polarisation inverse au contraire, le courant est, à toute fin utile, bloqué. La figure VIII.7 montre la caractéristique tension - courant d'une diode au germanium typique.

On remarque que lorsque la polarisation est directe (à droite), le courant augmente exponentiellement au-delà de la tension seuil. Par contre, le courant en polarisation inverse (à gauche) est 1 000 fois plus faible (remarquer l'échelle en microampères au lieu de milliampères), plafonne rapidement et dépend de la température ambiante.

La diode électroluminescente (LED = *Light emitting diode*) est un cas particulier de diode. La figure ci-dessous indique comment reconnaître la cathode de l'anode afin de la monter correctement (c'est-à-dire en polarisation directe ; voir Figure VIII.7 ci-dessus) dans un

circuit.



VIII.4. Le transistor

VIII.4.1. Principe de fonctionnement

Le transistor est formé par l'adjonction de deux jonctions pn, soit sous la forme npn, soit pnp (Figure VIII.8). Le principe d'opération du transistor sera décrit dans le cas du transistor npn. La distribution des charges libres en l'absence de champ électrique appliqué associé à une pile est présentée à la Figure VIII.9a. Il y a principalement des trous dans la région de la base, et

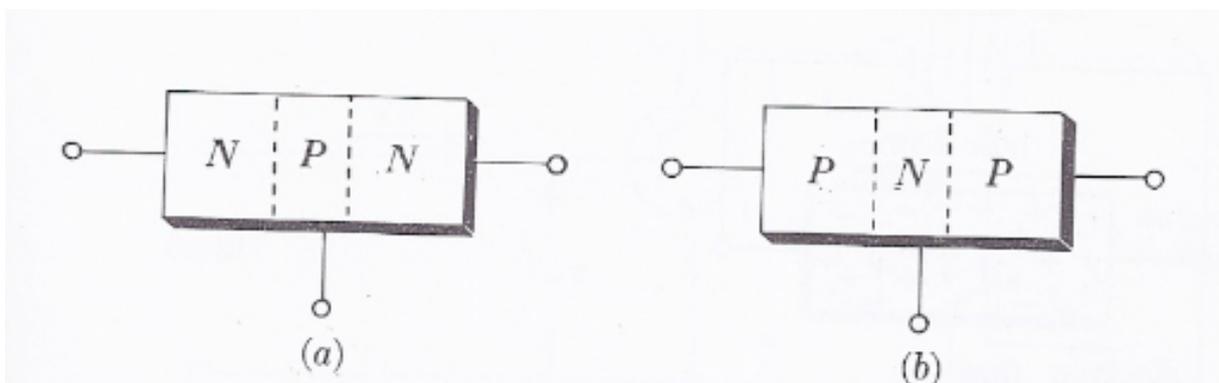


Figure VIII.8: Transistors npn (a) et pnp (b)

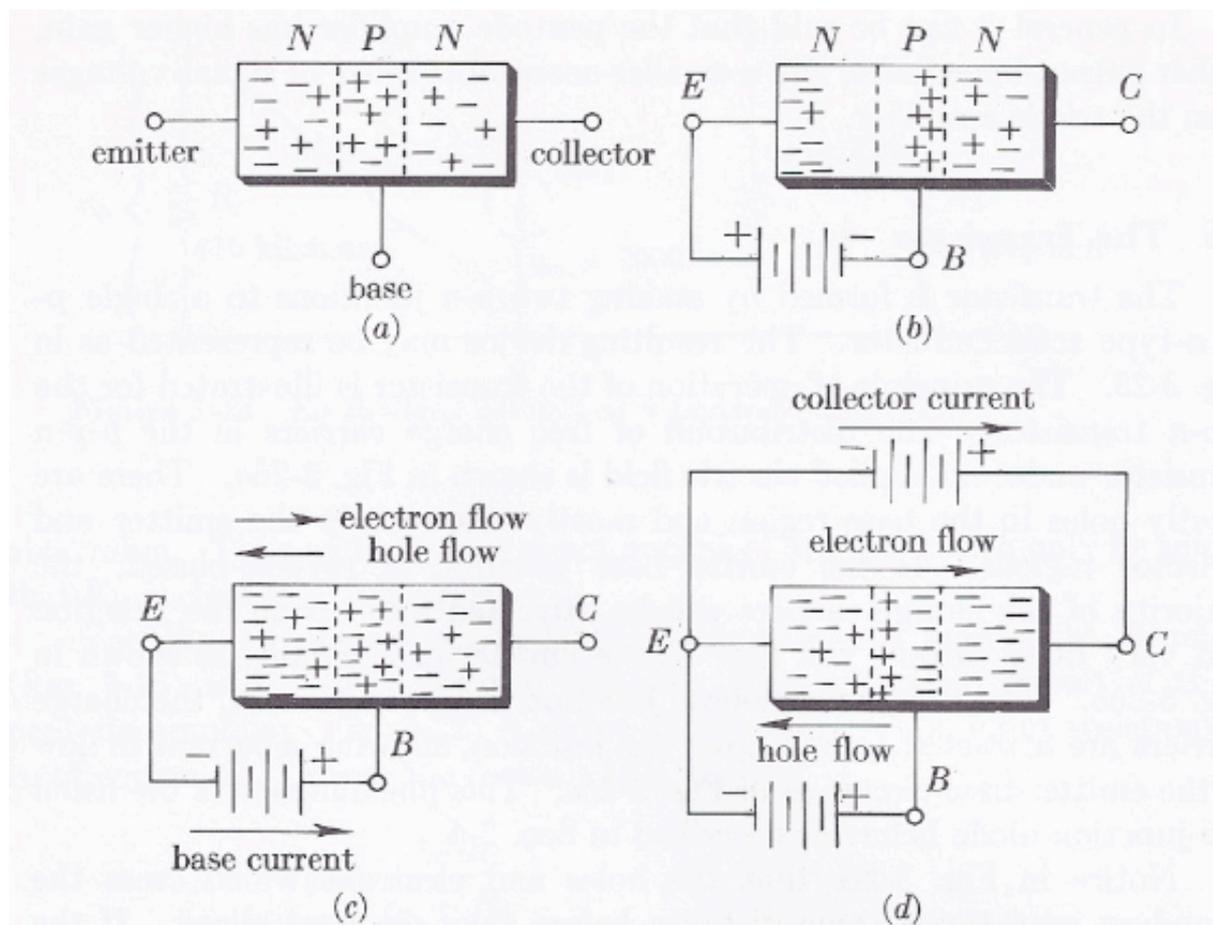


Figure VIII.9: Représentation schématique du fonctionnement d'un transistor npn : (a) pas de potentiel appliqué ; (b) jonction base -- émetteur en polarisation inverse ; (c) jonction base -- émetteur en polarisation directe ; (d) potentiel appliqué au collecteur.

principalement des électrons dans les régions appelées « collecteur » et « émetteur ». Lorsque la jonction émetteur – base est polarisée en sens inverse, la majorité des charges libres s'éloignent de la jonction, et très peu de courant peut circuler dans le circuit émetteur – base (Figure VIII.9b). Si au contraire, la jonction émetteur – base est polarisée dans le sens direct, les charges libres sont poussées vers la jonction et la traversent, permettant le passage du courant dans le circuit émetteur – base (Figure VIII.9c), comme dans le cas d'une simple diode. Il convient de noter que les électrons qui traversent la jonction parcourent une certaine distance avant d'être neutralisés par la formation d'une liaison covalente. Si la couche p associée à la base est faite très mince, certains électrons peuvent traverser totalement la zone p avant d'être neutralisés. Ces électrons peuvent être collectés en appliquant un potentiel positif à la borne C (appelée « collecteur ») de la Figure VIII.9d (aussi Fig. VIII.13). Un courant circule alors entre l'émetteur E et le collecteur C. En pratique, la petite épaisseur de la zone p associée à la base est telle que plus de 90% des électrons traversant la jonction émetteur – base sont collectés en C. Le potentiel appliqué entre l'émetteur et la base contrôle le nombre d'électrons qui entrent dans la région p, et contrôle donc le courant au collecteur.

L'opération du transistor pnp (Figure VIII.10) est similaire à celle du npn, si ce n'est que les polarités appliquées à la base et à l'émetteur sont inversées. Cette fois ce sont les trous qui transfèrent la charge au-travers de la région n associée à la base.

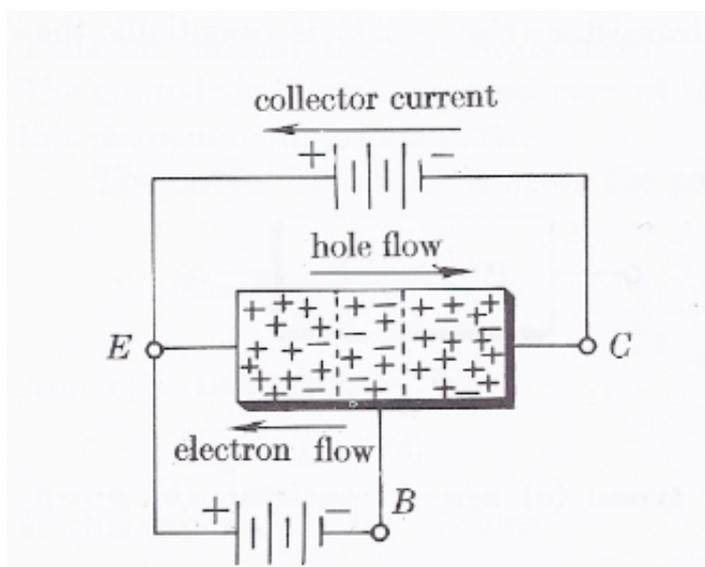


Figure VIII.10: Représentation schématique du fonctionnement d'un transistor pnp

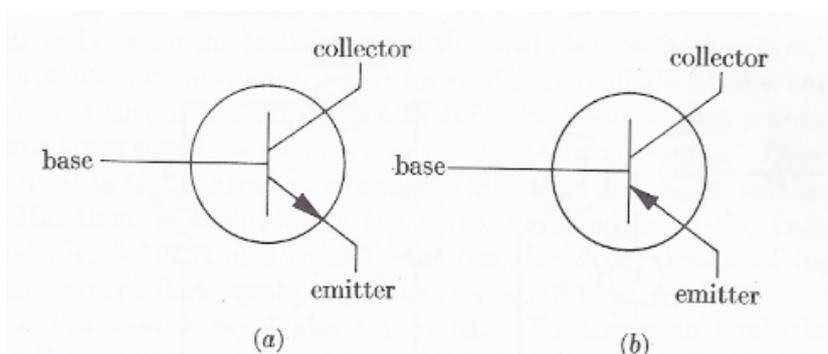


Figure VIII.11: Représentation symbolique d'un transistor npn (a) et pnp (b). Noter que la flèche à l'émetteur pointe dans la direction du flot des charges positives, selon la convention habituelle en électricité.

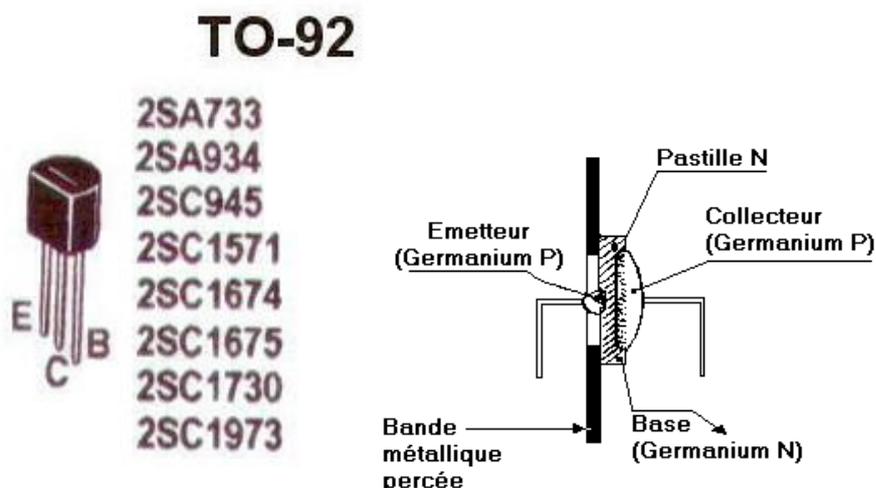


Figure VIII.12: Gauche : Exemple de boîtier de transistor (type TO-92), avec broches émetteur (E), collecteur (C) et base (B) identifiées. Droite : Structure interne d'un transistor

VIII.4.2. Utilisation du transistor

L'effet transistor a été découvert en 1947 par les américains John Bardeen, Walter Brattain et William Shockley, ce qui leur valut le prix Nobel en 1956. La première radio à transistors a été construite par Norman Krim en 1954. Son succès fut tel qu'on appela "transistors" les radios elles-mêmes. Le premier circuit intégré fut conçu par Jack Kilby en 1958, invention pour laquelle il reçut le prix Nobel en 2000.

Un circuit amplificateur simple utilisant un transistor est représenté sur la Figure VIII.13. Un élément clé pour la compréhension de ce circuit est le fait que le courant de base I_B est toujours faible par rapport au courant I_C (avec $I_B / I_C \sim 1\% = 1/G$, où G est le gain en courant du transistor, noté β sur la Fig. VIII.13), mais il lui est *proportionnel* ; c'est pourquoi le courant de collecteur I_C peut être vu comme une amplification du courant I_B entrant à la base. En corollaire, la tension de sortie V_{CE} peut être vue comme amplifiant la tension d'entrée V_{BE} . Remarquons que le gain G d'un transistor est une grandeur déterminée par le constructeur et dépendant du mode de fabrication. L'intérêt d'un transistor est donc qu'il suffit d'un très faible courant de base pour "ouvrir" le transistor, qui peut se comparer à un interrupteur/amplificateur.

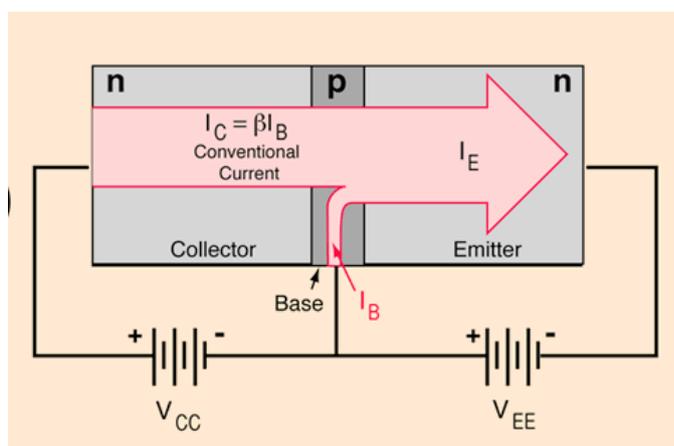


Fig. VIII.13. Le transistor en tant qu'amplificateur de courant.

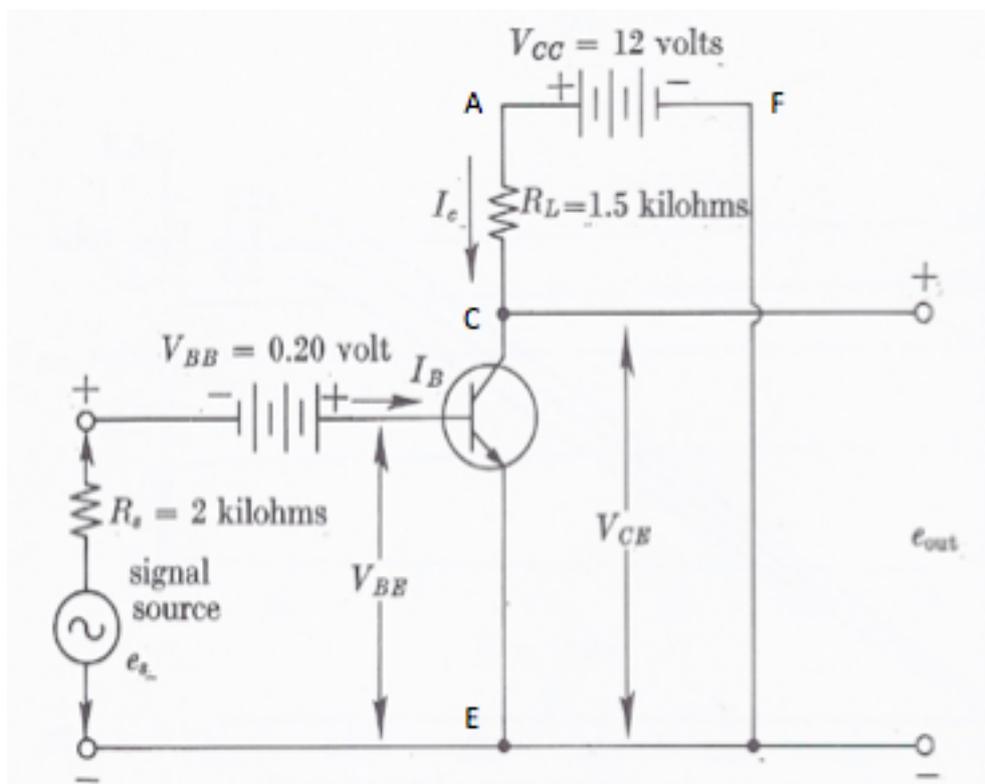


Figure VIII.14: Montage du transistor en tant qu'amplificateur

Le gain d'un transistor peut se déduire des courbes caractéristiques du transistor (Figure VIII.15). A partir de ces courbes, on peut calculer le point de fonctionnement d'un transistor, c'est-à-dire la résistance de charge R_L nécessaire à son bon fonctionnement. Le calcul de la droite de charge est très simple, puisqu'il suffit de déterminer ses deux intersections avec les axes. En effet, dans la boucle de circuit $ACEF$ traversant la résistance R_L , le transistor, et la source de tension V_{CC} , la somme des différences de potentiel doit être nulle (cela sera démontré au chapitre suivant dans le cadre des lois de Kirchhoff) :

$$V_{AC} + V_{CE} + V_{EF} + V_{FA} = 0, \text{ soit en appliquant la loi d'Ohm } R_L I_C + V_{CE} + 0 - V_{CC} = 0,$$

$$\text{ou encore } R_L I_C + V_{CE}(I_C) = V_{CC}. \quad (\text{VIIIa.1})$$

Cette relation doit être satisfaite quel que soit le courant I_C entrant dans le collecteur du transistor, liée à la tension V_{CE} via la caractéristique du transistor (Fig. VIII.15). Si le transistor est bloqué, $I_C = 0$, et dans ces conditions, l'Eq. (VIIIa.1) prévoit $V_{CE}(I_C) = V_{CC}$. Cette condition fournit donc le point d'intersection de la droite dite « de charge » avec l'axe des abscisses (Fig. VIII.16). Au contraire, si nous supposons $V_{CE} = 0$, l'Eq. (VIIIa.1) prédit

$$I_C = V_{CC} / R_L, \text{ soit l'intersection de la droite de charge avec l'axe des ordonnées } (V_{CE} = 0).$$

La relation (VIIIa.1) peut être vue comme l'équation d'une droite liant I_C et V_{CE} , et dont on connaît les deux points d'intersection avec les axes. Une nouvelle contrainte est fournie par les courbes caractéristiques du transistor qui fournissent la relation $V_{CE} = V_{CE}(I_C, I_B)$. Le

point de fonctionnement du transistor est donc finalement totalement défini par les deux relations

$$V_{CC} = R_L I_C + V_{CE} \quad \text{et} \quad V_{CE} = V_{CE}(I_C, I_B),$$

ce qui, graphiquement, revient à trouver l'intersection de la droite de charge avec les courbes caractéristiques du transistor (Fig. VIII.16).

Le point de fonctionnement du transistor dépend donc de l'intensité du courant de base I_B , lui-même fonction principalement de V_{BB} et R_S (e_S , la tension du signal d'entrée à amplifier, est supposée beaucoup plus faible que V_{BB} afin de ne pas déplacer trop le point de fonctionnement). Si $V_{BB} = 0.2 \text{ V}$ et $R_S = 2 \text{ k}\Omega$, alors $I_B = 0.2 / 2000 = 10^{-4} \text{ A} = 100 \mu\text{A}$.

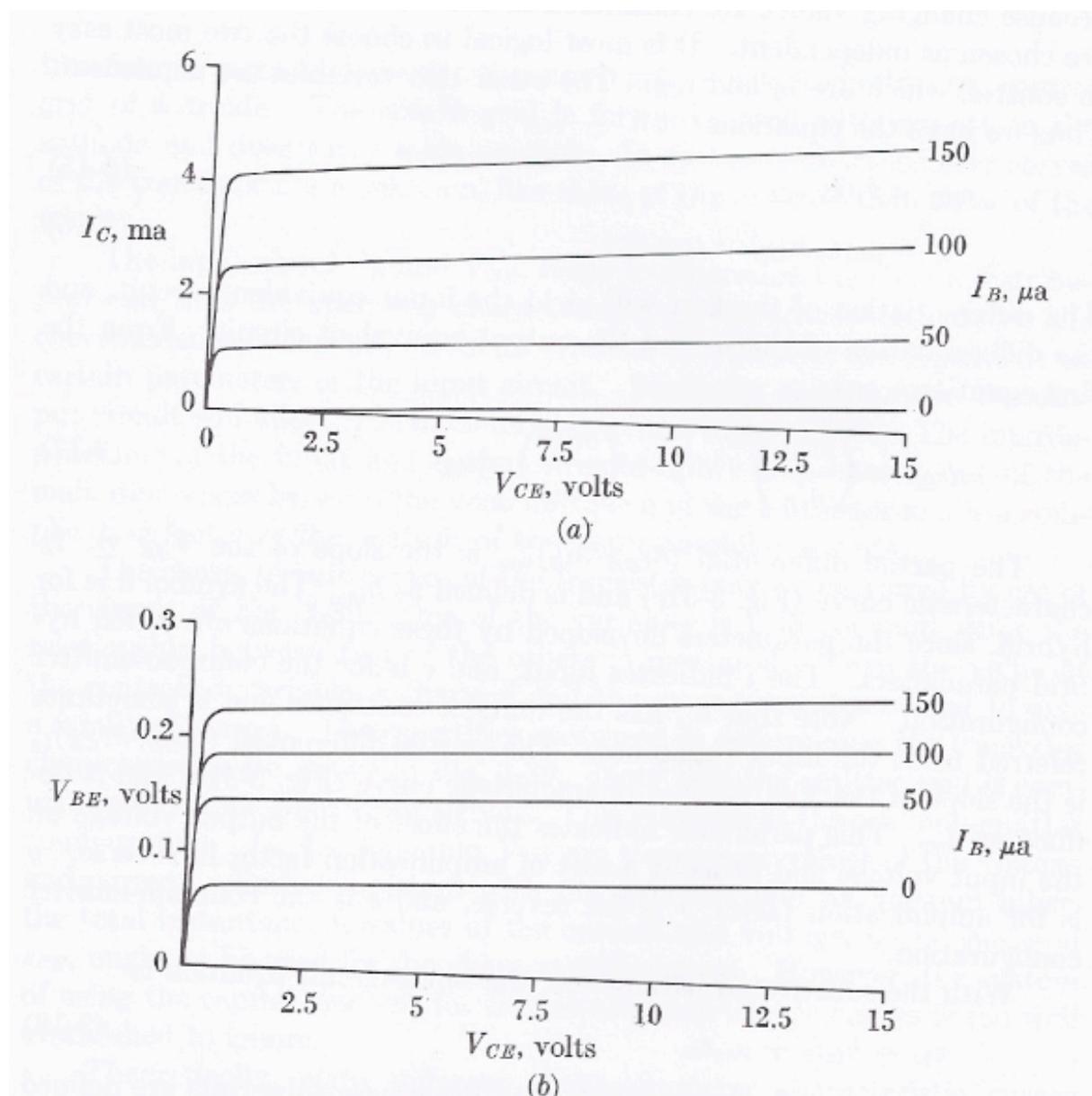


Figure VIII.15: Courbes caractéristiques du transistor. Pour un catalogue exhaustif, voir le site <http://www.datasheetcatalog.com/>

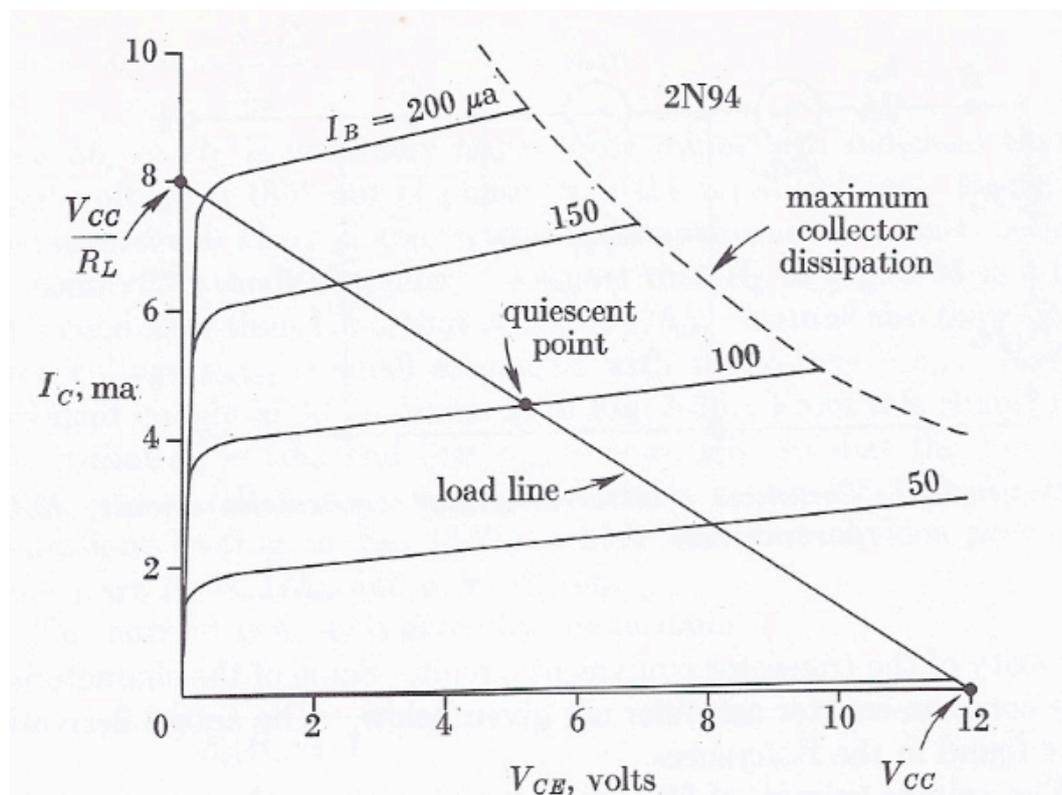


Figure VIII.16: Calcul du point de fonctionnement d'un transistor, basé sur ses courbes caractéristiques

VIII.5.3. Le transistor comme élément de base de portes logiques

Les transistors sont les éléments constitutifs des ordinateurs via les portes logiques que les transistors permettent de bâtir. La Figure VIII.17 est un exemple de porte ET construite à partir de deux transistors npn. Les deux entrées logiques (0/1) sont situées en A et B (logique positive, c'est-à-dire que le niveau logique 1 correspond à une tension positive, et le niveau 0 à une tension nulle), tandis que le niveau logique de sortie est fixé par la tension au point *Out*, selon les mêmes critères que pour les niveaux d'entrée.

La Figure VIII.18 présente par ailleurs un inverseur, une porte NAND (NON-ET) et NOR (NON-OU), construits à partir de transistors npn. Dans ce cas, le niveau 1 du signal binaire correspond à une tension positive. Le signal d'entrée est appliqué soit sur la borne V_{in} , soit sur les bornes V_1 et V_2 . Les tables de vérité de ces portes et leur symbole de porte logique sont représentés à la Figure VIII.19.

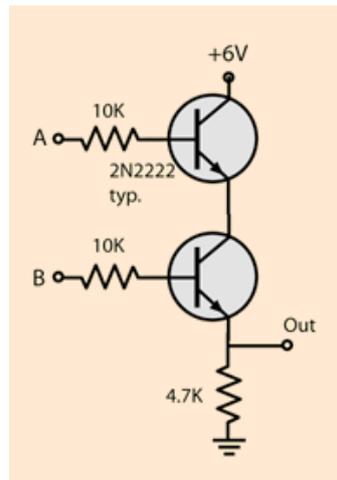


Figure VIII.17: Une porte ET construite sur deux transistors npn.

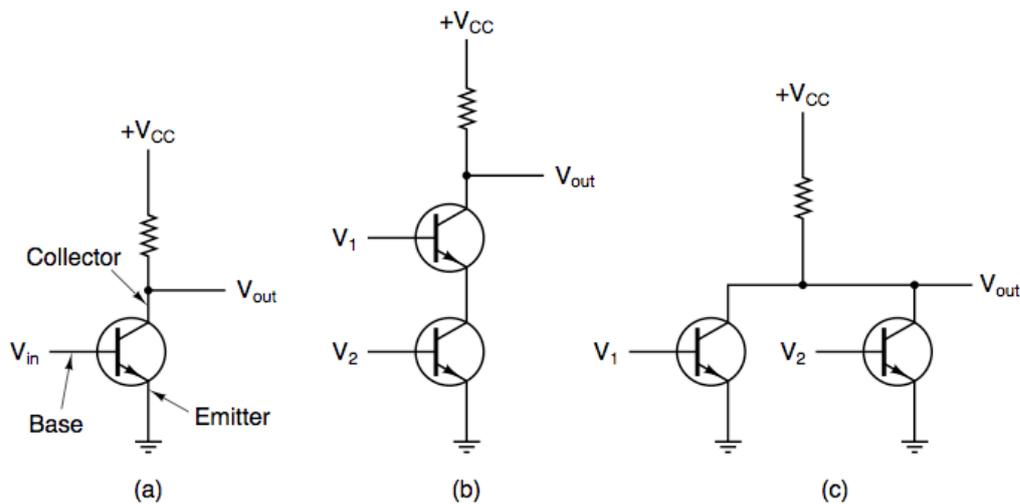


Figure VIII.18: (a) Un inverseur, (b) une porte NAND (NON-ET), et (c) NOR (NON-OU) construits au moyen de transistors npn.

Crédit: Andrew Tanenbaum, Structured Computer Organization, Prentice Hall.

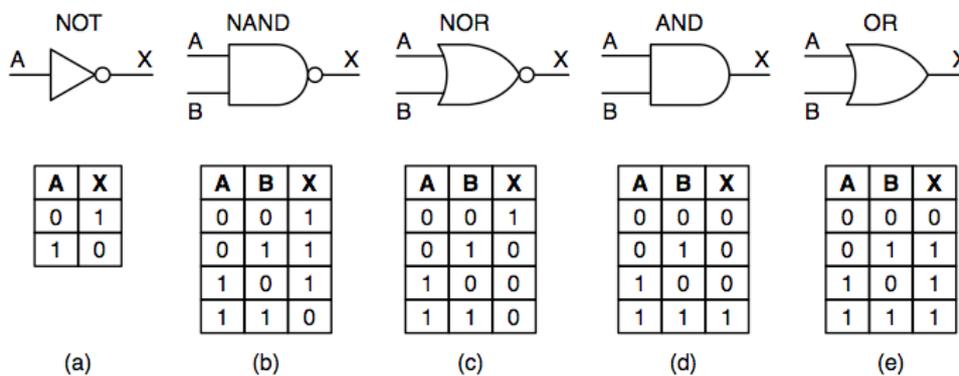


Figure VIII.19: Tables de vérité et symboles des 5 portes logiques.

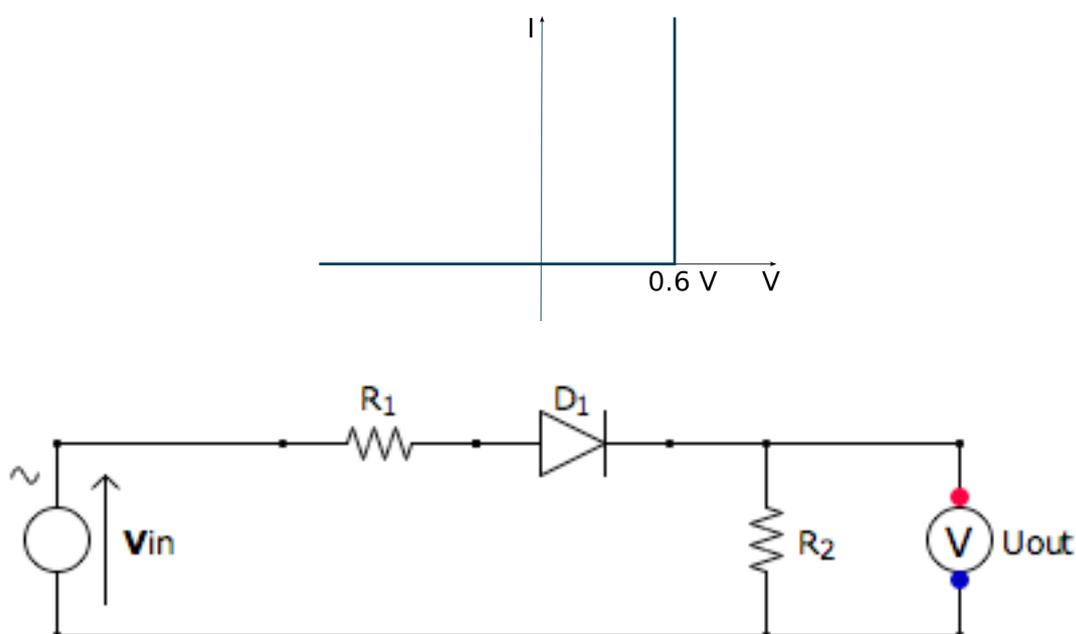
Crédit: Andrew Tanenbaum, Structured Computer Organization, Prentice Hall.

EXERCICES.

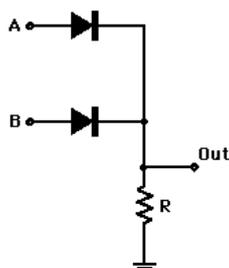
VIII.1 Quel est le gain du transistor dont les caractéristiques sont représentées sur la Figure VIII.15 ?

VIII.2 Calculer la droite de charge du transistor dans le montage de la Figure VIII.14 en utilisant les caractéristiques de la figure VIII.15.

VIII.3 Le circuit ci-dessous reçoit à l'entrée V_{in} un signal sinusoïdal alternatif avec des alternances positives et négatives d'amplitude $\pm 5V$. Dessiner la tension de sortie U_{out} mesurée par le voltmètre en adoptant $R_1 = R_2 = 100 \Omega$, et en adoptant la caractéristique suivante pour la diode :



VIII.4 A supposer que le niveau logique 1 soit une tension positive de 2V, et le niveau 0 une tension nulle, quelle porte logique le circuit ci-dessous représente-t-il, dont les entrées sont les bornes A et B ? La borne « terre » ⏏ est à 0 V.



VIII.5 Vérifier que les portes représentées à la Figure VIII.18 sont un inverseur (a), une porte NAND (c), et une porte NOR (c).