

MICHEL Guillaume  
PRIOU Roger  
TELLIER Kévin

# Transistors bipolaires (NPN)

**ESIEE**  

---

**PARIS**

<b>Introduction</b>	<b>2</b>
<b>Historique</b>	<b>2</b>
<b>Etat de l'art</b>	<b>6</b>
<b>Présentation du principe physique</b>	<b>10</b>
Rappels sur les semi-conducteurs	10
Différents types	10
Semi-conducteurs intrinsèques	10
Semi-conducteurs de type N	11
Semi-conducteurs de type P	11
Jonction PN	11
Transistors	13
Structure	13
Effet transistor	14
Description de phénomènes non idéaux	15
Effet Early	15
Effet Zener - effet tunnel	15
Familles de transistors, applications	15
Petit signaux	15
Puissance	15
Hyperfréquences	16
<b>Conclusion</b>	<b>16</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>17</b>

## Introduction

Le transistor bipolaire est un composant électronique permettant de commander un courant à partir d'un courant plus faible. Les transistors sont des composants utilisés dans des domaines très variés et ont une place encore très importante aujourd'hui dans l'ensemble des systèmes électroniques.

### I. Historique

En 1945, à la fin de la deuxième guerre mondiale, le premier ordinateur entièrement électronique, l'ENIAC<sup>1</sup> est mis au point aux Etats-Unis et est entièrement programmé par des jeunes femmes longtemps restées dans l'ombre du projet. Conçu pour être Turing-complet (capable de résoudre tout type de problème calculatoire), sa puissance de calcul permet de réaliser des calculs de trajectoires balistiques en 3 secondes contre 2,6 jours à la main. L'ENIAC était composé de tubes à vides, des composants électroniques au comportement similaire aux transistors.

Le principe du tube à vide est assez simple : un filament est chauffé par une source électrique dans un tube sous vide (ou dans un gaz), ce qui entraîne une émission d'électron vers une anode permettant ainsi la conduction du courant. Une grille pouvant être alimentée positivement ou négativement est placée entre les deux électrodes et permet de commander le passage du courant ou non dans le composant. Les tubes à vide ont été petit à petit remplacés dans la majorité des domaines par des transistors utilisant des semi-conducteurs, miniaturisables et plus fiables. On retrouve cependant encore des tubes à vide pour des applications en très haute fréquence ou à forte puissance (four à micro-ondes et amplificateurs de musique par exemple).

Le premier transistor bipolaire à jonction NPN fut mis au point par les laboratoires Bell par William Shockley, John Bardeen et Walter Brattain en 1947 aux Etats-Unis. Il fut présenté par William Shockley lors d'une conférence de presse le 5 juillet 1951.<sup>2</sup> Ce nouveau type de transistor résolut un certain nombre de problèmes présents sur le premier prototype. Ces chercheurs obtiendront le prix Nobel de physique en 1956 pour leur invention.



*Réplique du premier transistor*

Le transistor (ou transistron) fut mis au point en parallèle en France par la Compagnie des Freins et Signaux à Paris par les physiciens Allemands Herbert Mataré et Heinrich Welker. Une demande de brevet fut déposée en 1948, après les Américains. Le développement parallèle de cette même technologie ne semble être d'après les rapports des deux groupes de recherche, que le pur fruit du hasard<sup>3</sup>. Le transistron était considéré par la presse spécialisée comme plus fiable, cependant le contexte scientifique français de l'époque poussa le gouvernement français à prioriser les recherches dans le domaine nucléaire au détriment du transistron qui fut abandonné.

Pour mettre au point le transistor NPN, Shockley se basa sur les travaux de Russel Ohl, un ingénieur Américain sur les jonctions PN en 1940<sup>4</sup>. Ces recherches ne permirent pas directement de mettre au point un prototype fonctionnel. En effet, les semi-conducteurs utilisés n'étaient pas assez homogènes pour obtenir un fonctionnement normal du dispositif.

Les transistors reposent sur la propriété des semi-conducteurs à posséder une conductivité intermédiaire entre celle des métaux et des isolants. Ainsi en dopant le semi-conducteur avec des atomes de phosphore, il y a un électron de plus sur la bande de valence. De cette manière le cinquième électron de l'élément dopant n'étant pas un électron de liaison est très peu lié à l'atome et est susceptible d'être excité et de briser la liaison. Nous avons de cette manière une forte concentration d'électrons, c'est un dopage N (pour négatif). Les dopages P reprennent le même principe, le semi-conducteur étant dopé avec un élément possédant un électron de moins que le semi-conducteur (3 dans le cas du silicium) permettant l'apparition de trous dus à la forte probabilité de créer une double liaisons avec un électron libre lors de sa désexcitation.

Les premiers essais sur les dopages ont été réalisés avec du germanium, un semi-conducteur. L'homogénéité du dopage entre les deux zones N et P doit être

respectée pour obtenir un nombre équivalent de trous et d'électrons de l'élément introduit. Les minerais de semi-conducteurs sous leur forme brute ne sont jamais totalement purs et contiennent d'autres éléments parasites. Il est nécessaire d'extraire les impuretés pour introduire notre élément dopant. Lors des premiers essais sur les prototypes de transistor à jonction NP, le germanium, semi-conducteur utilisé pour l'expérience n'était pas assez pur pour rendre le composant fonctionnel. Ce fut une des barrières qu'ont dû franchir les chercheurs des laboratoires Bell avant d'obtenir un premier semi-conducteur bipolaire à jonction NP puis un sandwich NPN et PNP.

Il a fallu attendre 1950 et la mise au point d'un procédé de purification du germanium par le chimiste Gordon Teal pour rendre les semi-conducteurs plus homogènes et la création de jonction PN puis NPN<sup>5</sup>.

Le germanium sera par la suite remplacé par le silicium dans la grande majorité des transistors, hormis dans le domaine de la musique afin de réaliser des pédales d'effet fuzz pour des guitares électriques, dans le but d'obtenir une sonorité particulière. Le silicium a été préféré au germanium pour sa plus grande tolérance à la chaleur. Le point de fusion du silicium se situe à 1414°C alors que le point de fusion du germanium se situe à 938,25°C. Cette meilleure tolérance conjuguée à l'abondance du silicium lui a permis de devenir le semi-conducteur le plus utilisé dans l'industrie des transistors. En effet, le silicium est le deuxième élément le plus présent en terme de quantité sur Terre.

Le transistor mit cependant un certain temps avant de conquérir le marché public avec des applications comme le poste de radio portable qui fut très populaire auprès des foyers, ce qui permit la démocratisation de la radio personnelle, puis par la suite de la télévision à transistor<sup>6</sup>.

Cependant, le domaine dans lequel le transistor aura le plus d'impact est la microélectronique et l'informatique avec la création de calculateurs à transistors puis de microprocesseurs. Le premier ordinateur à transistor fonctionnel fut le TRADIC construit par les laboratoires Bell, mis en service en 1954. Le premier microprocesseur (Intel 4004) fut inventé en 1971 par la société américaine Intel aujourd'hui leader du marché. Ce fut le premier composant électronique à regrouper sur un même circuit électronique l'ensemble des composants d'un processeur.

Le Intel 4004 était composé de 2300 transistors avec une finesse de gravure de 10µm.<sup>7</sup> Sa puissance de calcul est comparable à l'ENIAC qui lui occupait 167m<sup>2</sup> pour un poids total de 30 tonnes contre une taille d'une pièce de monnaie pour le Intel 4004. Cette miniaturisation phénoménale est rendue possible grâce aux transistors bipolaires qui le composent.

Comme pour l'ENIAC, le transistor avait avant tout des applications militaires dans cette période de guerre froide, aussi bien technologique que idéologique, entre les Etats-Unis et l'URSS. L'URSS fut d'abord réticente au traitement électronique de l'information, Staline la considérait comme : "fausse science au service de l'impérialisme"<sup>8</sup>. Cependant, l'académie des sciences d'Ukraine mettra au point une calculatrice électronique en 1950.

Le premier ordinateur à transistor soviétique, le BESM-4<sup>9</sup> ne fut mis au point qu'en 1964, dix ans après le premier modèle à transistor américain. le BESM-4 sera amélioré au fil des années et utilisé dans la gestion de l'économie nationale. Les Etats-Unis ont pu parvenir à des avancées scientifiques rapides notamment grâce à l'opération paperclip, visant à la récupération d'éminents scientifiques du régime nazi à la fin de la seconde guerre mondiale. Le retard soviétique dans le domaine de la micro-électronique, conjugué au manque d'intérêt initial par les autorités soviétiques, a conduit à un retard important de l'URSS.

Occidentaux	Soviétiques	Retard
IBM 650 1954 <sup>12</sup>	URAL 1 1955 <sup>12</sup>	1 an
IBM 702	URAL 4	7 ans <sup>12</sup>
IBM 1620	NAIRI 1	4 ans <sup>12</sup>
IBM 7094	BESM 6	4 ans <sup>12</sup>
GE 400 1965 <sup>13</sup>	MINSK 32 1969 <sup>12,3</sup>	4 ans

*fig1. Comparaison des meilleurs ordinateurs américains et soviétiques<sup>10</sup>*

Les ordinateurs et supercalculateurs américains resteront supérieurs à leurs équivalents soviétiques et profiteront de la démocratisation de l'informatique personnelle pour asseoir leur supériorité dans le domaine au niveau mondial. L'informatique aura une place prépondérante dans l'économie et la recherche américaine.

## II. Etat de l'art

L'une des applications de bases du transistor est la commutation, cela permet de contrôler le flux électrique d'une partie d'un circuit électrique comme un interrupteur ON/OFF classique. Pour ce faire il faut faire varier la tension apportée à la base du transistor et ainsi se situer dans une région différente du diagramme ci-après. Dans ce diagramme on peut voir les zones de saturation et de coupure avec lesquelles on va jouer pour mimer un interrupteur.

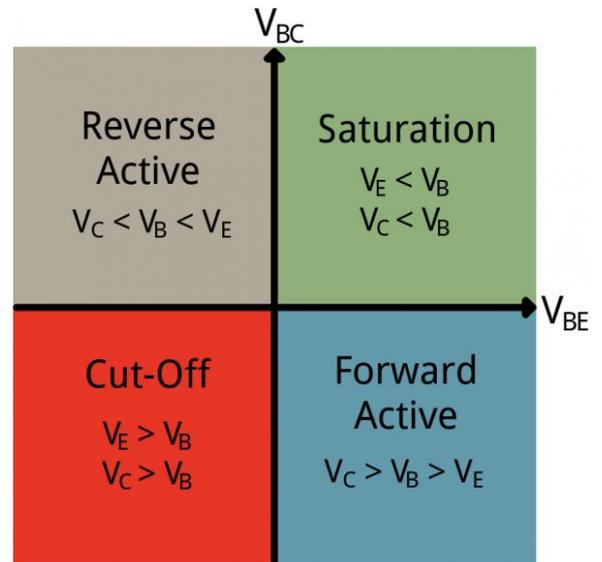


fig.2 mode de fonctionnement d'un transistor

Le fait d'utiliser le transistor comme un commutateur est une brique fondamentale dans la création de portes logiques qui permettent de fabriquer des micro-processeur, microcontrôleurs ou encore d'autres circuits intégrés.

Dans le circuit simple proposé ici, on fait l'analogie entre un circuit utilisant un interrupteur classique (à droite) et un autre utilisant un transistor (à gauche). Dans le cas de droite l'interrupteur nécessite une intervention manuelle d'un actionneur pour pouvoir être mis en position ON ou OFF. D'un autre côté le circuit de gauche peut être assimilé à celui de droite en

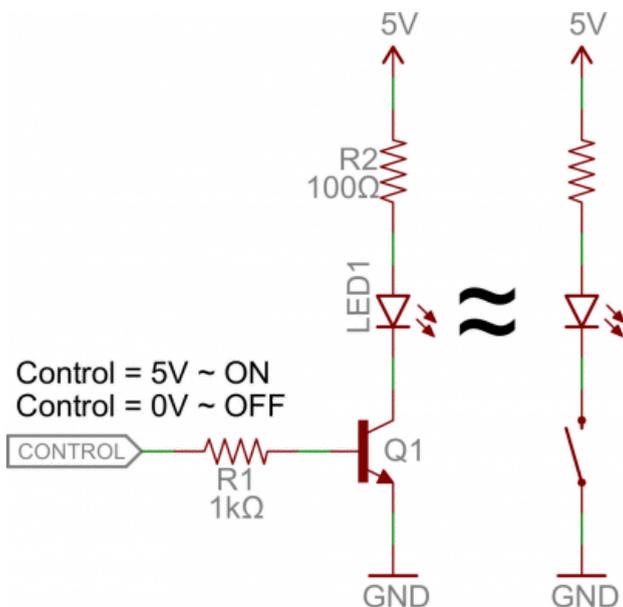


fig.3 schéma électrique d'un circuit utilisant le transistor comme interrupteur

position ON quand la tension à la base est supérieure à 0,6 Volt car dans ce cas là le transistor se met à saturer et est semblable à un court-circuit entre le collecteur et l'émetteur. Inversement quand la tension fournie à la base est inférieure à 0,6 Volt le

transistor est dans la région de coupure donc semblable à un circuit ouvert, ainsi le circuit dans ce cas équivaut à celui de droite en position OFF.

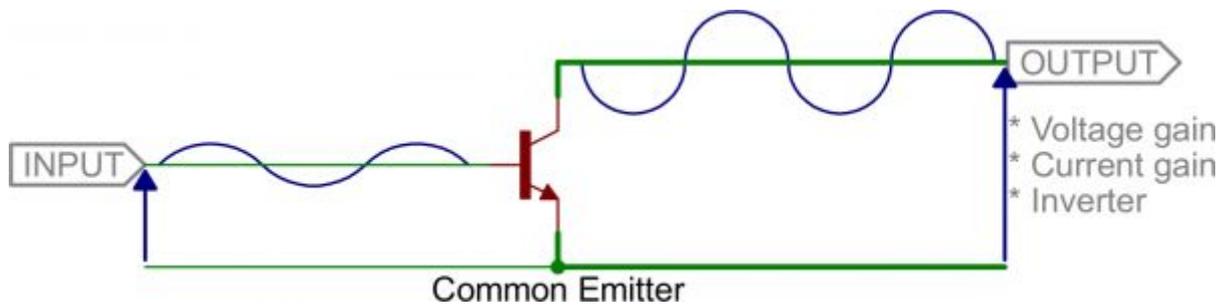


fig.4 principe d'amplification

Ensuite nous allons expliquer l'une des applications les plus puissantes du transistor est l'amplification.

Le principe de l'amplification est simple, il permet d'augmenter un signal d'entrée, cette augmentation peut être au niveau du courant ou encore du voltage.

Les trois amplificateurs de bases sont :

- Émetteur commun
- Collecteur commun
- Base commune

Pour chacun des amplificateurs l'un des trois nœuds est relié à une tension commune, qui est dans la majorité des cas la « terre » tandis que les deux autres nœuds correspondent à l'entrée pour l'un et la sortie pour l'autre.

Cependant chacun de ces amplificateurs possède ses avantages et ses inconvénients et il faut donc utiliser le bon amplificateur en fonction de l'utilisation que l'on veut en faire comme le montre ce tableau récapitulatif ci-dessous.

	Émetteur commun	Collecteur commun	Base commune
Gain Voltage	++	+	+++
Gain Courant	++	+++	+
Impédance d'entrée	++	+++	+
Impédance de sortie	++	+	+++

Les composants électroniques tendent à être de plus en plus petits ainsi, le composant lui-même doit supporter un environnement plus sévère et de lourdes contraintes (haute tension, haute température, miniaturisation).

Avec le développement de nouvelles technologies comme les ordinateurs quantiques, les supports d'information quantiques, appelés qubits, doivent respecter différentes règles définies par la physique quantique.

Les scientifiques peuvent utiliser de nombreux types de particules quantiques comme qubits, même les photons qui composent la lumière. Les photons ont pour particularité de pouvoir transmettre l'information plus rapidement sur de longues distances et sont compatibles avec les puces fabriquées. Cependant, créer un transistor quantique déclenché par la lumière a été un défi car cela nécessite que les photons interagissent les uns avec les autres, ce qui ne se produit généralement pas tout seul.

Des chercheurs de l'école de génie A. James Clark de l'Université du Maryland et du Joint Quantum Institute (JQI)<sup>11</sup> ont utilisé une mémoire quantique pour faire interagir les photons, créant ainsi le premier transistor à photon unique constitué d'un semi-conducteur. Leur création a pour particularité d'être considérablement compacte. Environ un million de ces nouveaux transistors pourraient tenir dans un seul grain de sel. Il est également rapide et capable de traiter 10 milliards de qubits photoniques par seconde.

L'avenir du transistor est désormais tourné vers la mécanique quantique, en effet selon la loi de Moore ci-dessous le nombre de transistors nécessaire à construire des microprocesseurs, circuits intégrés...double tous les deux ans. Néanmoins depuis peu une limite de coût de production, de chaleur dissipée par les appareils mais surtout l'entrée dans la mécanique quantique du fait de la petitesse des transistors.

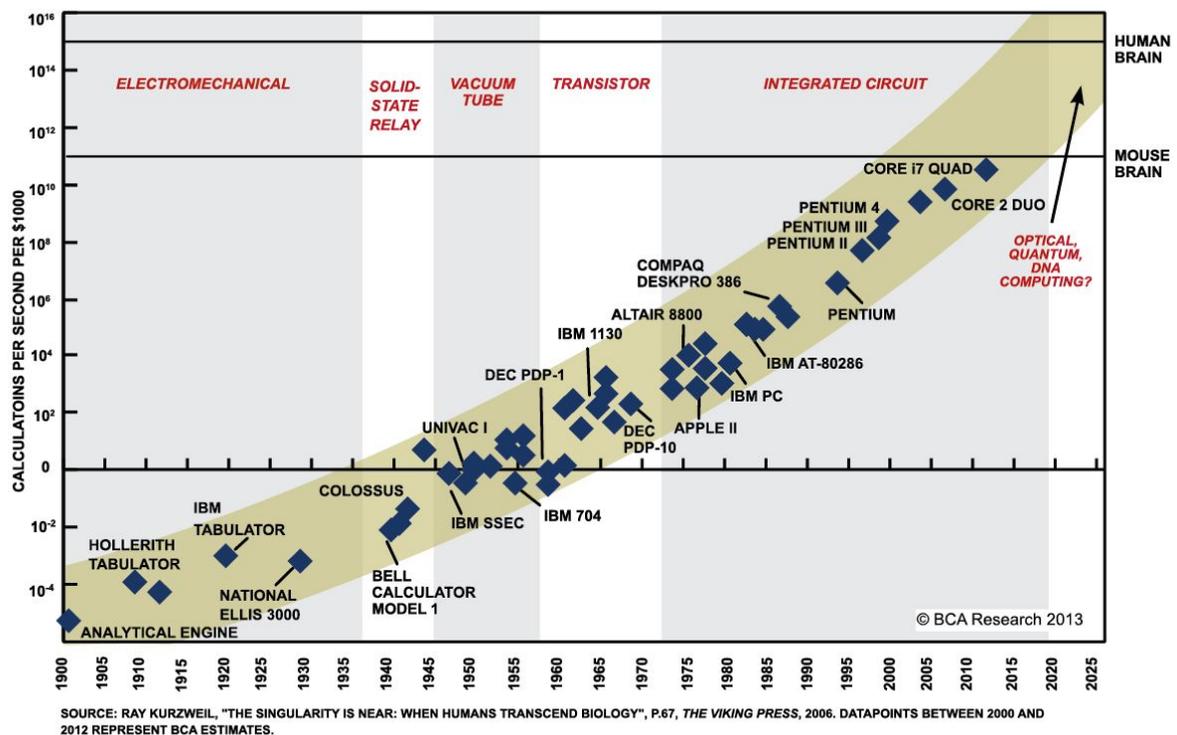
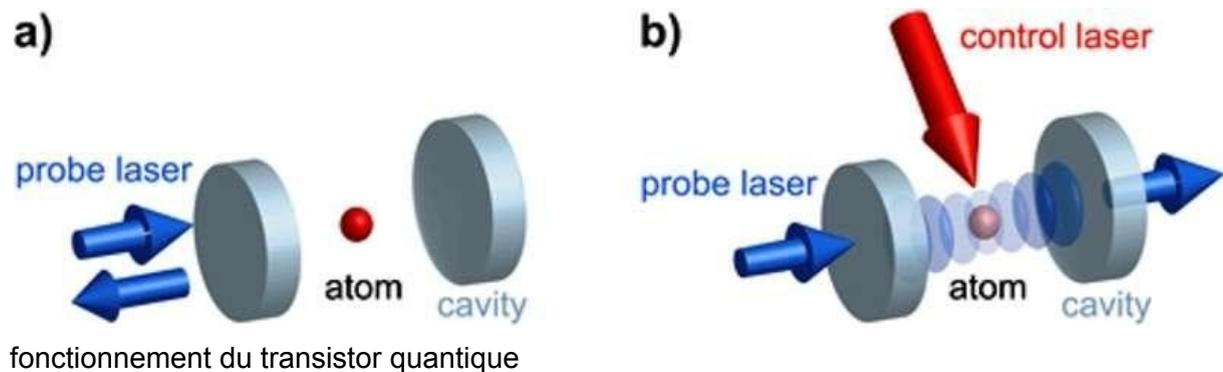


fig.5 loi de moore

Effectivement, les transistors actuels mesurent à peine plus de 10 nanomètres pour les plus petits, soit à peine plus de 100 fois la taille d'un atome.

Pour pallier à ce problème plusieurs solutions sont proposées, parmi les plus sérieuses on retrouve un changement de matériau en remplaçant le silicium par la molybdénite. En effet, les chercheurs<sup>12</sup> ont pu montrer que dans un feuillet de seulement 0,65 nanomètre de molybdénite, les électrons se déplacent aussi aisément que dans une couche de 2 nanomètres de silicium. Ils en ont conclu que les transistors constitués de molybdénite sont 100.000 fois moins consommateur d'énergie que ceux en silicium.

L'autre solution est d'utiliser le déplacement d'UN seul atome argent entre deux couches de métal à l'aide d'impulsion permettant ainsi de fermer ou d'ouvrir le commutateur. Les avantages de dispositif sont multiples, puisqu'il peut, contrairement à beaucoup de dispositifs utilisant la mécanique quantique, fonctionner à température ambiante et non à des températures proches du zéro absolu. De plus la consommation nécessaire à l'impulsion est très peu coûteuse en énergie électrique.



Dans la même idée que l'innovation précédente, les chercheurs ont voulu utiliser les propriétés optiques pour créer un transistor de la taille d'un atome, permettant donc de pallier aux problèmes actuels des transistors cités précédemment.

Le schéma ci-dessus montre le dispositif mis en place par les chercheurs<sup>13</sup> montre deux cavités (ici les cylindres gris) donc l'opacité peut être contrôlée, au milieu desquelles un atome de rubidium est disposé. Cet atome va, lorsqu'il va être exposé à un laser émettant perpendiculairement au dispositif, rendre les cavités transparentes. Il en découle que le rayon initial situé à l'extérieur des cavités va pouvoir être transmis de l'autre côté du dispositif par contrôle lumineux (laser).

On peut rapidement faire l'analogie de ce dispositif avec le transistor composé d'une base, d'un émetteur et du collecteur. Effectivement, ici l'émetteur est le rayon initial, la base est le laser arrivant perpendiculairement au système et pointant vers l'atome et enfin le collecteur est le rayon potentiel qui peut arriver de l'autre côté du système. De plus le contrôle des effets d'un transistor par variation de tension à la base est semblable ici avec un contrôle du système par le rayon perpendiculaire. Ainsi on peut facilement exploiter ce dispositif pour en faire une nouvelle génération de transistor.

### III. Présentation du principe physique

#### 1. Rappels sur les semi-conducteurs

##### 1.1. Différents types

##### 1.1.1. Semi-conducteurs intrinsèques

Le silicium intrinsèque est, sans impuretés électriquement actives, un mauvais conducteur du courant électrique. Pour rendre conducteur le silicium, il est

nécessaire d'y introduire des impuretés (dopage), ce qui augmente le nombre d'électrons libres et réduit sa résistivité.

En désignant par  $n_i$  et  $p_i$  ( $n_i = p_i$ ) les concentrations respectives des électrons et des trous à l'équilibre, on démontre que:

$$n_i p_i = n_i^2 \sqrt{N_c N_v} \exp\left(\frac{-E_g}{2k_B T}\right)$$

avec:

$N_c, N_v$  densité d'états électroniques dans les bandes (respectivement) de conduction et de valence.

### 1.1.2. Semi-conducteurs de type N

On confère le caractère N au silicium en introduisant dans son réseau cristallin des atomes dits donneurs de la colonne V du tableau de Mendeleïev: phosphore, arsenic ou antimoine.

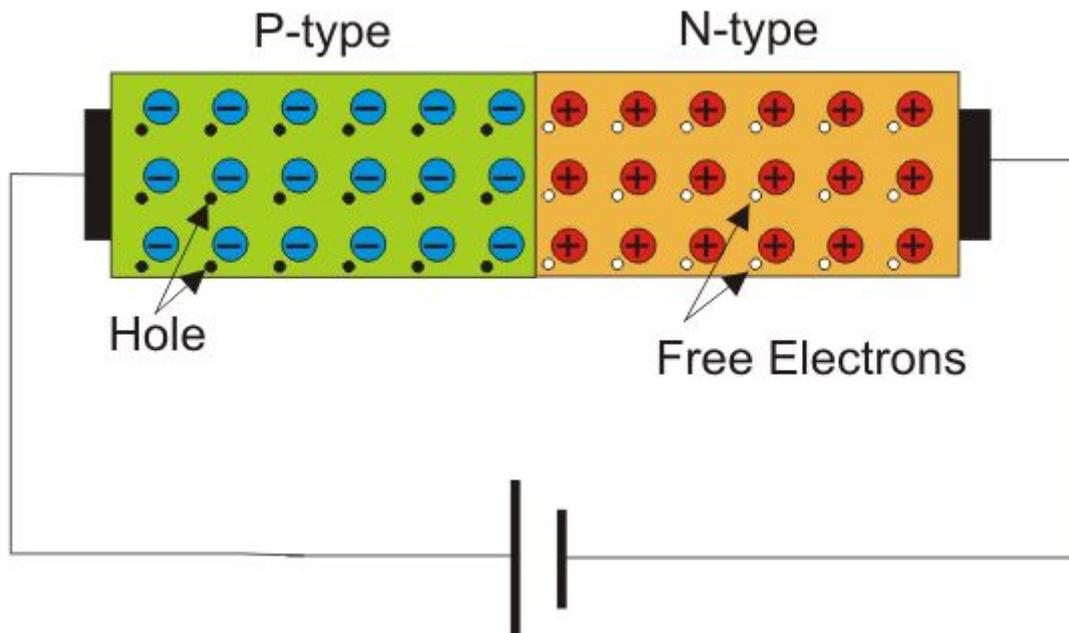
Cela permet de rendre libre un des cinq électrons appartenant à la couche de valence du silicium. A température ambiante, la presque totalité des atomes donneurs cèdent un électron, ils s'ionisent donc et prennent une charge positive égale à  $1.602 \cdot 10^{-19}$  C.

### 1.1.3. Semi-conducteurs de type P

L'introduction d'atomes de la colonne III du tableau de Mendeleïev confère le type P au silicium. On utilise presque exclusivement le bore, cet atome est dit accepteur et, comme sa bande de valence ne possède que 3 électrons pour assurer ses liaisons avec le silicium, il s'ionise négativement en captant un électron qui provient de la bande de valence du silicium. La capture de cet électron va créer un trou positif dans la bande de valence. Tout se passe alors comme si la conduction se faisait avec des charges positives. On a donc une conduction par trous.

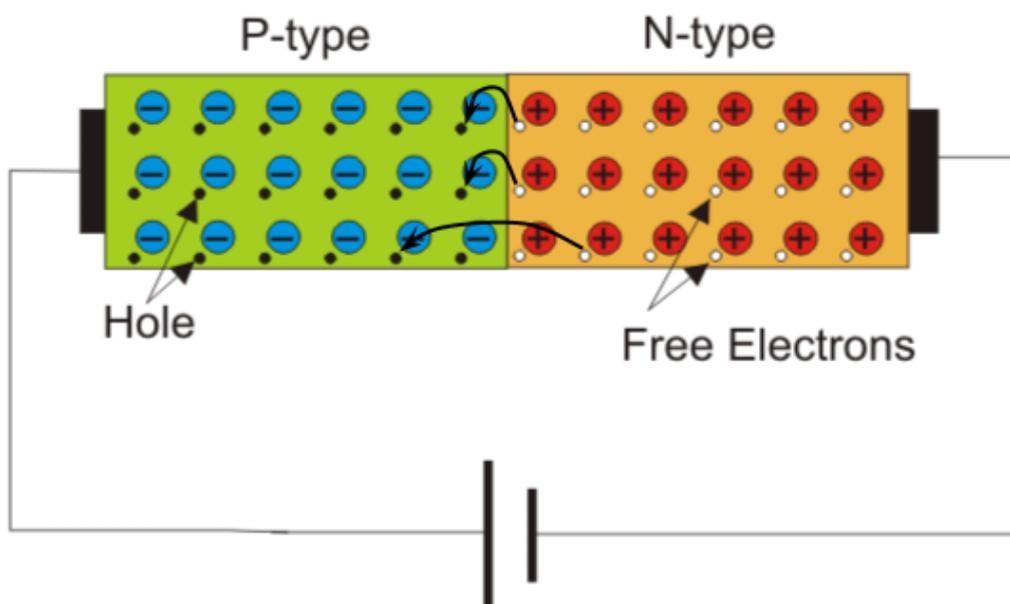
## 1.2. Jonction PN

Une jonction PN est la zone du silicium dans laquelle on passe d'une conductivité du type N à celle du type P. Lorsque la jonction est non polarisée, les électrons de la région N où ils sont majoritaires, vont diffuser vers la région P où ils sont minoritaire.



*fig.2 Schéma d'une jonction PN avant diffusion des électrons*

Les électrons passant de la zone N vers la zone P vont se recombinier avec les trous présents du côté P. De part et d'autre de la jonction vont apparaître des zones non neutres: l'une comprenant des impuretés ionisées positivement ( zone N) l'autre des impuretés ionisées négativement.



*fig.3 Schéma d'une jonction PN, diffusion des électrons*

Il se crée alors une zone dépourvue de porteurs mobiles de part et d'autre de la jonction, appelée zone de déplétion ou zone de charge d'espace. Ainsi, sous l'effet des charges positives et négatives, un champ électrique naît. Il est de sens opposé à la diffusion des porteurs de charges. A l'équilibre, le courant résultant au niveau de la jonction est donc nul.

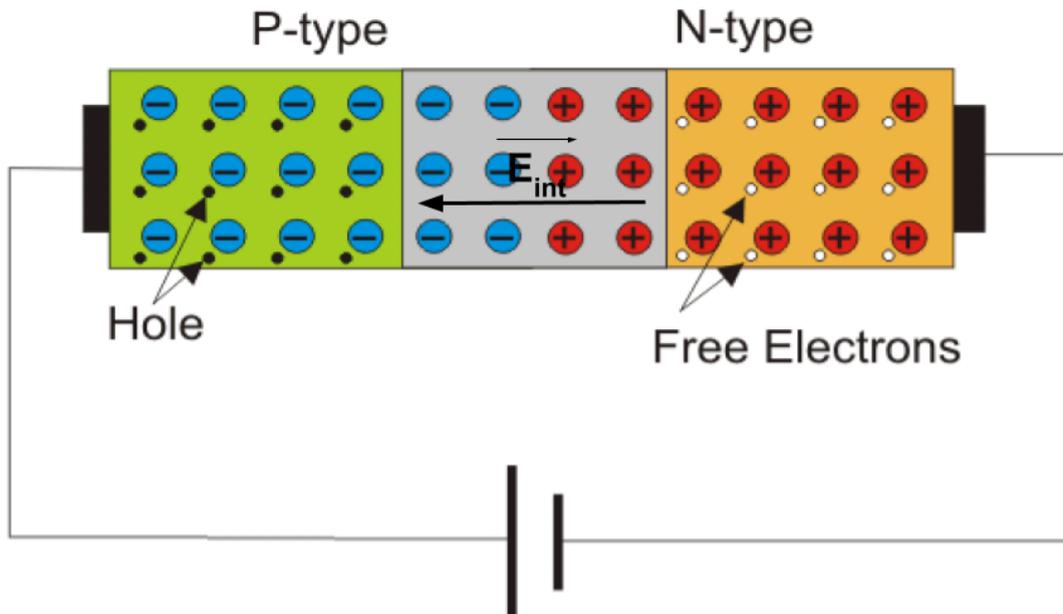


fig.4 Schéma d'une jonction PN à l'équilibre, absence de polarisation<sup>14</sup>

## 2. Transistors

### 2.1. Structure

On obtient un transistor de type NPN en réunissant les anodes de deux diodes à jonction pourvu que la zone de type P commune aux deux anodes soit très mince. En inversant les connexions des deux diodes on obtient un transistor PNP.

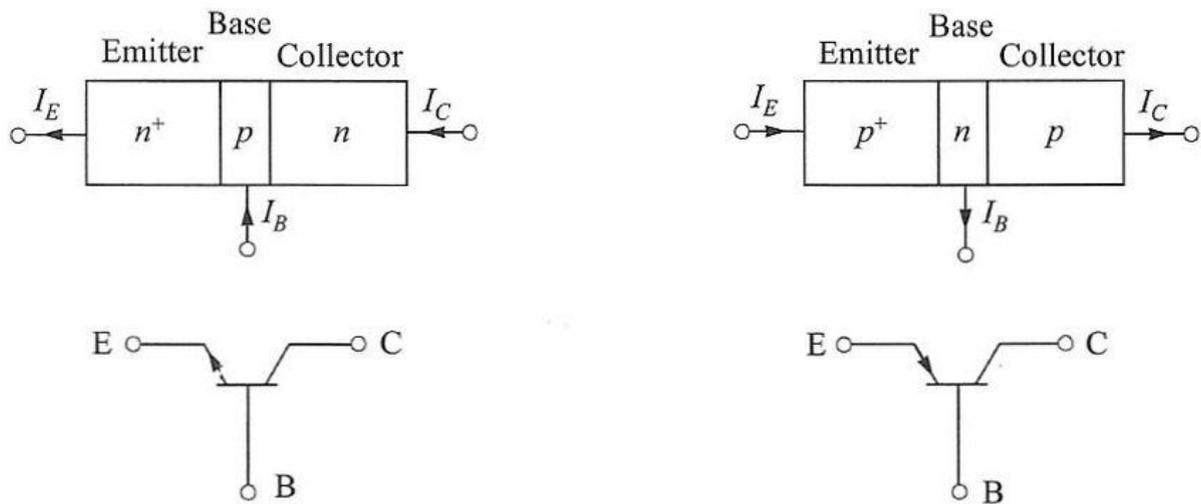


fig.5 Schéma de transistor NPN et PNP: structure et symbole<sup>15</sup>

## 2.2. Effet transistor

En polarisant le transistor, la présence d'un champ électrostatique élevé va accélérer les électrons, seuls les trous qui se sont recombinaés avec les électrons et les trous injectés dans l'émetteur constituent le courant de base. La quasi totalité du courant émis par l'émetteur du transistor est absorbé par le collecteur.

## 2.3. Description de phénomènes non idéaux

### 2.3.1. Effet Early

Les variations de la tension de la jonction base-collecteur provoquent un élargissement ou un rétrécissement de la zone de charge d'espace se traduisant par une modulation de l'épaisseur de la base du transistor.<sup>16</sup> Ce qui a pour effet de notamment faire varier le courant de saturation ainsi que de changer le gain en courant dans le transistor.

### 2.3.2. Effet Zener - effet tunnel

De manière générale, le terme «tunnel quantique»<sup>17</sup> est utilisé pour décrire un phénomène dans lequel les électrons traversent une frontière diélectrique sur la base d'un modèle de probabilité. Il est admis que les électrons à effet tunnel se comportent comme une onde plutôt que comme une particule. L'effet tunnel quantique s'est révélé très prometteur pour un certain nombre de composants électroniques tels que les dispositifs à transistors. Les caractéristiques importantes de tels dispositifs sont: une amélioration spectaculaire des vitesses de commutation ; résistance négative lors de la transition de l'état désactivé à l'état activé; résistance exceptionnellement faible; bonne cohérence entre les pièces; etc. Ces propriétés rendent le transistor à effet tunnel quantique particulièrement bien adapté à une variété d'applications à puissance relativement élevée telles que les circuits radiofréquences et les commandes de moteur à courant continu.

## 2.4. Familles de transistors, applications

Les applications des transistors seuls sont rares, ils sont la plupart du temps associés à des circuits intégrés.

Les circuits intégrés ne peuvent pas toujours assurer les performances demandées pour une application donnée, et les composants discrets comme le transistor se révèlent indispensables.

3 grandes familles

- petit signaux
- puissance
- hyperfréquences

### 2.4.1. Petit signaux

Applications:

- Préamplification basse fréquences (radio, télévision)
- Amplification fréquence intermédiaire (radio, télévision)
- Commutation
- Balayage (télévision)

### 2.4.2. Puissance

Application:

- Étages de commande et de sortie (radio, télévision)
- Convertisseurs
- Régulateurs
- Commutation de puissance

#### 2.4.3. Hyperfréquences

##### Applications:

- Oscillateurs VHF-UHF
- Amplificateurs large bande (jusqu'à 12 GHz)
- Amplificateurs d'antenne (de 40 à 860 MHz)
- Commande de moniteurs de haute résolution
- Oscilloscopes

## Conclusion

Les progrès technologiques en microélectronique ont donné naissance à des composants de plus en plus rapides. Leur intégration dans des circuits intégrés très denses est un travail d'équipe qui demande rigueur et créativité. Les progrès dans la mécanique quantique permettent la réduction de la taille des circuits électroniques tout en améliorant les performances de ces derniers.

## Bibliographie

1. *The first electronic computer*, Alice R. Burks, Arthur W. Burks
2. *Bell Labs announces junction transistor, July 5, 1951*, Suzanne Deffree, July 05, 2018  
<https://www.edn.com/electronics-blogs/edn-moments/4376734/Bell-Labs-announces-junction-transistor--July-5-1951>
3. *How Europe Missed The Transistor*  
<https://spectrum.ieee.org/tech-history/silicon-revolution/how-europe-missed-the-transistor>
4. *The origins of the pn junction*, IEEE Spectrum Juin 1997
5. Teal, Gordon K. "Methods of Producing Semiconductive Bodies," U. S. Patent 2,727,840
6. *Éléments pour une histoire du public des postes à transistors en France*, Elvina Fesneau, Dans Le Temps des médias, 2004  
<https://www.cairn.info/revue-le-temps-des-medias-2004-2-page-118.htm#>
7. *Intel mcs4 micro computer set*  
[http://datasheets.chipdb.org/Intel/MCS-4/datashts/MCS4\\_Data\\_Sheet\\_Nov71.pdf](http://datasheets.chipdb.org/Intel/MCS-4/datashts/MCS4_Data_Sheet_Nov71.pdf)
8. D. Brand, *L'Union Soviétique, France*, Sirey, 1984, p.20
9. "BESM computer." *The Great Soviet Encyclopedia*, 3rd Edition. 1970-1979. The Gale Group, Inc. 25 Feb. 2019
10. *Les ordinateurs soviétiques, Histoire obligée de trois décennies*, Yves LOGE (Ingénieur CNAM) p. 60
11. *Semiconductor Quantum Transistor Opens Door for Photon-Based Computing* [https://research.umd.edu/news/news\\_story.php?id=11495](https://research.umd.edu/news/news_story.php?id=11495)
12. *Le transistor du futur sera-t-il en molybdène ?*  
<https://www.futura-sciences.com/sciences/actualites/physique-transistor-futur-sera-t-il-molybdene-27681/>

13. *Un nouveau transistor quantique... avec un seul atome !*

<https://www.futura-sciences.com/sciences/actualites/physique-nouveau-transistor-quantique-seul-atome-23944/>

14. *Forward and Reverse Bias of PN Junction*

<https://www.electrical4u.com/pn-junction/>

15. [https://www.researchgate.net/figure/Symbols-and-nomenclatures-of-a-n-p-n-transistor-and-b-p-n-p-transistor-I-E-I-B-and\\_fig3\\_259283223](https://www.researchgate.net/figure/Symbols-and-nomenclatures-of-a-n-p-n-transistor-and-b-p-n-p-transistor-I-E-I-B-and_fig3_259283223)

16. *Transistors bipolaires intégrés*

<https://www-techniques-ingenieur-fr.revproxy.esiee.fr/base-documentaire/tiae-a-archives-electronique/download/e2427/1/transistors-bipolaires-integres.html>

17. *Quantum tunneling transistor*

<https://patents.google.com/patent/US6710368B2/en>