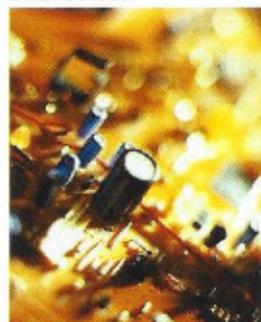




L'électronique

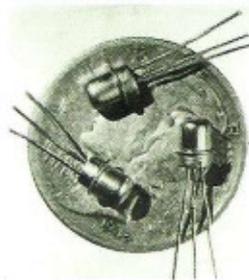
LE SIÈCLE DE L'ÉLECTRON



L'étude du courant électrique pendant tout le ^{XX} siècle n'exigeait aucune connaissance relative à la nature intime du courant lui-même. À partir de la fin du ^{XX} siècle, on commence à comprendre que le courant dans un fil est une circulation d'électrons, et cela ouvre l'ère de l'électron, ou plutôt l'ère de la technique qui maîtrise l'électron et commande son déplacement dans les circuits. Cette technique, c'est l'électronique. Aujourd'hui, tandis que l'électronique de faible puissance est dominée par les semi-conducteurs avec les transistors microscopiques souvent rassemblés par millions sur des puces, l'électronique de haute puissance n'est possible que grâce aux « tubes électroniques » de grandes dimensions. Ce sont des tubes qui ont permis l'essor de l'électronique au début du ^{XX} siècle.

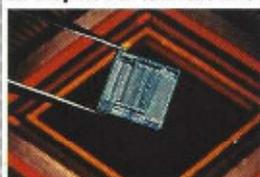
L'ÈRE DES TUBES

Personne n'ignore que la vie moderne ne serait pas ce qu'elle est sans l'électronique : plus de radio, ni de téléviseur, pas d'ordinateur, ni de calculette, pas de téléphone portable, pas de carte bancaire, pas de montre à quartz, pas d'appareil photo, pas de micro-ondes, pas de laser... On pourrait multiplier les exemples. La vie moderne est étroitement dépendante de l'électronique. La pièce maîtresse dans tous les dispositifs cités est le



transistor. Il s'agit du composant par excellence de l'électronique

grand public. Il possède dans les circuits un rôle d'amplificateur mais aussi de commutateur. Dans ce second rôle, il laisse passer un courant ou l'en empêche en fonction d'une commande (électrique) qui lui est imposée. C'est la raison pour laquelle ce composant possède 3 pattes : tandis que le courant entre par l'une et sort par l'autre, la troisième patte est celle grâce à laquelle on commande, autorisant le passage ou non du courant. Le transistor peut également jouer un troisième rôle, celui d'oscillateur faisant en sorte que le courant change sans cesse de sens. L'ancêtre du transistor était la lampe triode ou triode de De Forest, inventée vers 1906. Un autre composant important de l'électronique moderne est la diode dont le rôle consiste à bloquer le passage du courant dans un sens, mais le laisser circuler dans l'autre. Son ancêtre était la lampe diode ou diode de Fleming inventée en 1904. Alors que les lampes diodes et triodes étaient toutes deux des pièces de la taille d'une lampe, aujourd'hui, on arrive à placer des centaines de milliers de transistors sur une **puce** d'un centimètre carré !



Cette miniaturisation explique l'encombrement beaucoup plus faible de nos postes de radio et de nos téléviseurs par rapport aux premiers modèles qui étaient d'imposants meubles, bien lourds. Il faut cependant savoir que les transistors ne supportent pas des courants électriques intenses. Aussi, s'ils ont remplacé les anciennes lampes et leurs nombreuses variantes que l'on regroupe sous le terme de tubes électroniques, ces derniers sont indispensables, encore de nos jours, lorsqu'on a affaire à des courants intenses. Ces tubes sont parfois vides mais peuvent également contenir des gaz. De manière générale, de nos jours, les tubes à vide et les tubes à gaz ne sont plus employés dans les circuits où les courants mis en jeu sont de faible intensité : on leur préfère les transistors ; en revanche, on les utilise toujours lorsque l'intensité ou les puissances sont élevées. Typiquement, alors que dans un téléviseur on emploie des transistors, la station émettrice, elle, emploie des tubes électroniques.

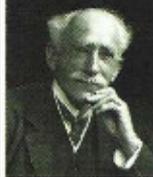
PRINCIPE DE LA DIODE DE FLEMING

Au voisinage d'un filament métallique chaud parcouru par un

courant on observe un « nuage » d'électrons « vaporisés » : c'est ce que l'on appelle l'émission thermoionique ou effet Edison, car c'est Edison qui découvre ce phénomène en 1883. Si en face de ce filament on place une plaque métallique, et que l'on relie les deux bornes négative et positive d'une source de tension (une pile par exemple) au filament et à la plaque respectivement, on observe le passage d'un courant électrique : attirés par la plaque positive, les électrons (négatifs) vaporisés se précipitent vers elle, engendrant un courant. Si le filament appelé cathode et la plaque appelée anode sont placés dans une ampoule où règne un vide poussé, on obtient la **lampe diode** dite de Fleming, du



nom de l'Américain **John Ambrose Fleming** (1849-1945) qui la met au point en



1904. C'est le plus simple des tubes électroniques. Comme les électrons « libres » ne sont présents qu'au voisinage du filament, aucun courant ne peut circuler si l'on relie la borne positive du générateur au

filament et sa borne négative à la plaque. C'est la raison pour laquelle une lampe diode ne laisse passer le courant que dans un sens, de la plaque vers le filament, compte tenu de la convention habituelle du sens du courant dans un circuit (du + au -). Si l'on applique aux deux bornes d'une diode une tension alternative, le courant ne circulera que la moitié du temps, uniquement durant les demi-périodes où la plaque est positive : la diode fonctionne donc comme un redresseur de courant.

LA TRIODE DE DE FOREST

Si entre l'anode et la cathode d'une diode de Fleming, on dispose un réseau de fils métalliques à mailles assez lâches — appelée grille de commande — dont on peut modifier le potentiel (voltage) par rapport à la cathode, on obtient ce que l'on appelle une lampe triode. C'est l'Américain **Lee De Forest** (1875-1961) qui la



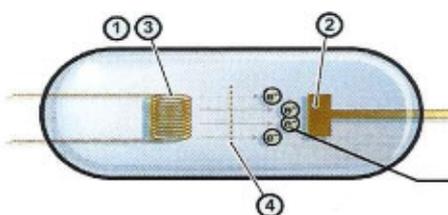
met au point en 1906 pour améliorer les performances de la diode de Fleming. Dans une triode, que De Forest appelle Audion, lorsque la grille est rendue positive par rapport à la cathode, elle attire vers elle les électrons émis qui continuent leur course à travers elle vers l'anode ; mais si la grille est rendue suffisamment négative, les électrons sont refoulés vers la cathode et

aucun courant ne circule dans la triode. Ainsi la grille permet de commander l'intensité du courant électrique, voire de le bloquer. En fait, une faible variation du potentiel de la grille suffit à provoquer une importante modification du courant obtenu à l'anode : la **triode** agit

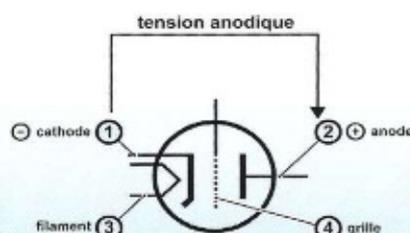


donc comme un amplificateur. Ainsi, non seulement elle est capable de redresser un courant alternatif, comme la diode, mais elle est aussi capable de l'amplifier. En plaçant plusieurs triodes les unes derrière les autres, en cascade, de sorte que chaque triode soit alimentée par la sortie de la précédente on peut obtenir une très forte amplification. De Forest prend conscience de cela en 1912. Mais germe alors une nouvelle idée : plutôt que d'employer plusieurs triodes en cascade, on pourrait n'en employer qu'une seule, en « bouclant » une triode sur elle-même, c'est-à-dire en faisant commander le potentiel de la grille par le courant amplifié de sortie. Or, dans une telle situation, bouclée sur elle-même, la triode peut se comporter comme un oscillateur : c'est ce que découvre De Forest. Ce phénomène est tout à fait analogue à l'effet Larsen en acoustique (ou à l'émission laser en lumière) où le son émis par un haut-parleur est capté par un microphone

Les triodes

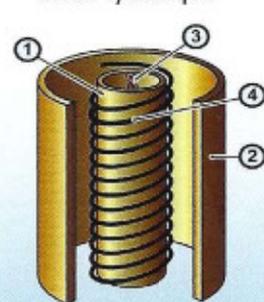


Triode de De Forest



Symbole de la triode

Triode cylindrique



Dates clés

1884



Premières lampes à incandescence. Edison.

1904

Lampe diode de Fleming.

1906

De Forest introduit la grille et crée la triode.

1948

Invention du transistor par Bardeen, Shockley et Brattain.

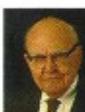
1956

Prix Nobel de physique pour les inventeurs du transistor.

1959

Premier circuit intégré inventé par J. Kilby.

2000



Prix Nobel de physique attribué à J. Kilby.

En 2003, sur un micro-processeur



55 millions

Les transistors les plus nombreux

puis ré-émis amplifié par le haut-parleur et ainsi de suite : grâce à la rétroaction et l'amplification on obtient un sifflement à une fréquence bien précise, pour une certaine distance microphone haut-parleur. Ainsi, la fonction « oscillateur » de la triode est en fait intimement liée à sa fonction amplificatrice, l'idée de base consistant à injecter dans l'entrée une partie du signal amplifié de sortie. Sous certaines conditions, l'amplification se trouve augmentée et, par un phénomène « de boucle », peut tendre vers l'infini. Le montage devient alors « instable » et produit des oscillations : on obtient ainsi un oscillateur électrique, à la base



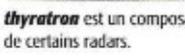
de l'émission radio et de la radiocommunication.

TÉTRODE ET PENTODE...

Sans entrer dans les détails, disons simplement que de même que l'ajout d'une nouvelle électrode à la diode a permis d'améliorer les performances de celle-ci, la tétrade à quatre électrodes est une triode améliorée, et la pentode est une tétrade améliorée... et ainsi de suite on peut montrer jusqu'à six, sept, huit... électrodes.

TUBES À GAZ

Les tubes à gaz ou tubes ioniques sont des tubes électroniques qui enferment un gaz, contrairement aux tubes vus précédemment. L'emploi des tubes à vide est limité par le fait qu'ils ne peuvent être le siège de courants très intenses, les électrons émis par la cathode chaude n'étant pas assez nombreux. Dans les tubes à gaz en revanche, les électrons émis par la cathode entrent en collision avec les atomes du gaz, leur arrachant des électrons et créant des ions positifs. Les électrons et les ions ainsi créés se dirigent vers les électrodes et contribuent à élever l'intensité du courant à des valeurs bien plus importantes que dans les tubes à vide, de l'ordre de 1 000 ampères par anode ! La triode à gaz, par exemple, appelée



thyratron est un composant important de certains radars.

TUBES HYPERFRÉQUENCE : GÉNÉRALITÉS

Nous l'avons vu, la triode et ses variantes améliorées permettent d'obtenir des courants oscillants (alternatifs). D'où leur grande utilité dans la radiocommunication, surtout à l'émission où les puissances mises en jeu sont importantes. Cependant, les tubes à vides et à gaz ne sont plus vraiment efficaces et ne peuvent pas remplir leur rôle correctement dès lors que la fréquence d'oscillation du

courant alternatif devient trop importante et dépasse 1 Gigahertz (le courant change de sens un milliard de fois par seconde). En effet, pour diverses raisons techniques, à mesure que la fréquence augmente, la puissance de ce genre d'oscillateur diminue, si bien que l'on ne peut pas avoir avec les tubes classiques un émetteur hyperfréquence très puissant. Voilà pourquoi on a recours à ce que l'on appelle des tubes hyperfréquence. Il en existe principalement deux sortes : les magnétrons et les klystrons, conçus en 1924 et en 1939 respectivement. Dans la mesure où le fonctionnement du klystron est assez complexe, mais aussi parce que nous sommes nombreux à posséder chez nous un magnétron sans le savoir, nous allons expliquer le fonctionnement de ce dernier dispositif.

LE MAGNÉTRON : UN TUBE HYPERFRÉQUENCE

Où trouve-t-on chez soi un magnétron ? Réponse : dans un micro-ondes ! Les



micro-ondes sont émises grâce à un émetteur (tout à fait analogue à ceux employés dans certains radars) dont la puissance est de l'ordre de 1 000 W et la fréquence d'environ 1 GHz. Remarquons ici que l'onde émise par un téléphone portable possède à peu près la même fréquence, mais pas du tout la même puissance : comme oscillateur, dans le portable, il y a un circuit à transistor, et non un magnétron, auquel cas le cerveau cuirait comme le poulet dans le four... Le magnétron est la source hyperfréquence de puissance la plus répandue à l'heure actuelle. Fondamentalement, il est formé de deux électrodes : une cathode émissive de forme cylindrique et une anode également cylindrique qui l'entoure. L'émission des électrons se fait donc selon les rayons du cylindre. Grâce à un champ magnétique (issu d'un aimant ou d'un courant électrique) parallèle à l'axe du cylindre, on incurve la trajectoire des électrons qui décrivent alors des arcs de cercle avant d'atteindre l'anode. Pour une certaine valeur du champ, appelé champ de blocage, les électrons n'atteignent plus l'anode, car le rayon du cercle qu'ils décrivent devient inférieur à la distance cathode-anode. Il s'agit là du magnétron le plus simple, appelé magnétron à anode continue, car l'anode cylindrique est en un seul morceau. Si en revanche elle est formée de deux demi-cylindres, on obtient un magnétron à anode divisée, ou magnétron à fentes, deux fentes parallèles à l'axe du cylindre séparant les deux anodes entre lesquelles il devient possible d'appliquer une différence de potentiel. Si l'on applique entre les deux anodes une différence de potentiel alternative, par exemple en branchant les anodes aux bornes d'un circuit oscillant, le mouvement des électrons émis par la cathode se complique : tandis que certains sont

accélérés, d'autres sont ralentis, en fonction de la différence de potentiel entre les anodes à un instant donné et de la position d'un électron dans le champ créé. La théorie du mouvement des électrons, ralentis ou accélérés, est d'une grande complexité. Toujours est-il qu'en raison de ces accélérations et décélérations, les électrons se rassemblent par paquets et sur leur trajet circulaire, à leur passage au voisinage des anodes, ils leur cèdent de l'énergie. Ainsi le magnétron fournit de l'énergie au circuit oscillant. Cela entretient donc les oscillations, et il y a émission d'une onde électromagnétique de fréquence égale à la fréquence de rotation des électrons. Dans la pratique, il n'y a pas deux fentes mais plusieurs paires : le principe reste le même ; cela complique davantage la chose mais permet d'augmenter la fréquence.

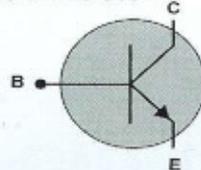
NAISSANCE DE L'ÉLECTRONIQUE À SEMI-CONDUCTEUR

Au début du ^{xx} siècle, on savait qu'une jonction (un contact) formée par une pointe métallique reposant sur un morceau de galène (sulfure de plomb, PbS) agit comme une diode de Fleming : elle ne laisse passer le courant que dans un sens. On ne peut expliquer ce phénomène qu'à l'aide de la théorie moderne de la conduction électrique dans les solides, laquelle repose sur la physique quantique. En effet, toute la physique des semi-conducteurs qui régit notamment le fonctionnement des « diodes à jonction » et des transistors repose sur le mode suivant lequel les électrons passent d'un corps dans un autre, d'un atome à un autre. On donne le nom de semi-conducteur à des matériaux non métalliques dont la résistivité électrique se situe entre $10^4 \Omega\text{m}$ et $10^7 \Omega\text{m}$, c'est à dire entre celles des métaux (typiquement $10^{-3} \Omega\text{m}$) et celles des isolants ($10^9 \Omega\text{m}$), la frontière entre ces trois variétés de matériaux n'étant pas très nette. Le silicium et le germanium

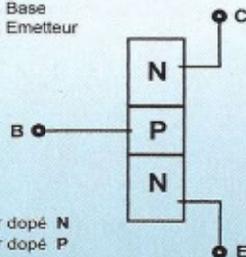


en sont de bons exemples. Certaines jonctions agissant comme la diode de Fleming, c'est très naturellement que l'on cherche à remplacer la triode de De Forest, à son tour, par sa version semi-conductrice. Mais cela ne devient envisageable qu'avec la naissance de la physique quantique à partir du milieu des années 1920. Ainsi, l'Allemand Julius Lilienfeld dépose dès 1926 un brevet pour un tel dispositif, mais ne parvient jamais à le mettre au point. L'Américain William Shockley (1910-1989) et deux de ses collègues, John Bardeen (1908-1991), théoricien, et Walter Brattain (1902-1987), praticien, parviennent enfin au but le 23 décembre 1947. En plaçant deux pointes métalliques à très petite distance l'une de l'autre sur un cristal de germanium dopé (voir plus loin), lui-même reposant sur une « base »

Le transistor



C : Collecteur
B : Base
E : Emetteur



N : Semi-conducteur dopé N
P : Semi-conducteur dopé P

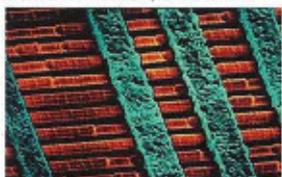
métallique, ils montrent que le courant circulant entre l'une des pointes et la base pouvait être fortement influencé par celui circulant entre l'autre pointe et la base. Dans certaines conditions, une toute petite variation de l'intensité du courant au niveau d'une des pointes se traduisait par une variation très importante, donc amplifiée, de l'intensité au niveau de l'autre pointe : l'effet amplificateur était bien là. La triode semi-conductrice venait de naître ! En 1949 John Pierce baptise l'invention « transistor », de *transfer* et *resistor*, car il y a transfert d'un signal électrique à travers une résistance. En 1956 John Bardeen, Walter Brattain et William Shockley se voient



décerner le prix Nobel de physique pour leurs recherches sur les semi-conducteurs et leur découverte de l'effet transistor.

LE TRANSISTOR

Contrairement à ce qui se passe dans un isolant, dans un bon conducteur, chaque atome laisse grossièrement un de ses électrons libre se mouvoir d'un atome à un autre. Dans les semi-conducteurs, il n'y a pas vraiment d'électrons « libres ». Cependant, l'énergie d'agitation thermique permet parfois de libérer des électrons. On augmente la conductivité des semi-conducteurs en les « dopant ». Cela consiste à introduire des impuretés dans le réseau cristallin : des atomes étrangers ayant tendance à céder ou au contraire à prendre un électron aux atomes du semi-conducteur. On parle alors respectivement de cristal dopé N ou P. Si l'on crée une jonction donneur-preneur que l'on nomme « N-P » avec de tels **cristaux**, le courant ne



pourra passer que si le cristal donneur est relié à la borne négative de la pile et le cristal P preneur à la borne positive. On obtient ainsi une « diode à

jonction ». Le « transistor à jonctions », quant à lui, est formé de deux jonctions donneur-preneur créées par l'accrolement de trois cristaux dopés, l'un d'eux étant pris en sandwich entre les deux autres. On obtient ainsi un transistor N-P-N ou P-N-P. Aucun courant ne peut passer si l'on branche les deux bornes d'une pile aux deux régions extrêmes du transistor, car l'une des jonctions est alors nécessairement mal polarisée. Cependant, en agissant sur le potentiel de la zone centrale, il devient possible de commander le passage du courant, de manière analogue au rôle joué par la grille dans une triode. Voilà pourquoi il n'est pas exagéré de dire qu'un transistor est une triode à semi-conducteur. Il existe plusieurs sortes de transistors, notamment le bipolaire, celui à effet de champ, et le transistor MOS. Leur principe de fonctionnement est grossièrement le même.

PUCES ÉLECTRONIQUES

L'une des grandes révolutions technologiques en électronique depuis l'invention du transistor est celle des circuits dit « intégrés » ou puces électroniques. L'idée de rassembler plusieurs transistors sur une petite



surface apparaît au cours des années 1950 notamment dans l'esprit de l'Américain Jack Kilby. La réalisation était cependant difficile. Mais cela devient possible dès 1959, grâce à Robert Noyce, ingénieur chez Fairchild, mort en 1990, grâce au procédé dit « Planar » qu'il met au point et qui permet de réaliser des circuits très compacts ou « puces ». L'invention de la puce conduit à l'essor de la microélectronique. Jack Kilby a reçu le prix Nobel de physique en 2000. Aujourd'hui, plusieurs millions, voire plusieurs dizaines de millions de transistors peuvent être assemblés sur une surface de l'ordre de un centimètre carré ! Mais cette **miniaturisation** ne peut guère se poursuivre beaucoup plus loin, car la limite physique de l'intégration est presque atteinte : la taille des transistors flirte avec celle des atomes...