

De la diode de Fleming au transistor Des postes TSF au téléphone portable



KAMIL FADEL

*Chef du département de physique
au Palais de la découverte*

Aujourd'hui, un petit poste de radio, parfois appelé abusivement « transistor », peut facilement se glisser dans une poche de chemise ; pourtant c'était loin d'être le cas avec les premiers postes, de grosses caisses d'un demi-mètre de côté ! Leurs grandes dimensions étaient principalement dues à un composant essentiel, la triode, nécessaire à l'amplification du signal capté par l'antenne réceptrice. Son équivalent moderne et miniaturisé à l'extrême est désormais le transistor que l'on trouve dans tout dispositif électronique. Alors que l'on place aujourd'hui des millions de transistors sur une puce d'un centimètre carré, la triode était de la taille d'une lampe ! Et pour cause... il s'agit quasiment d'une lampe ! L'histoire de la triode débute d'ailleurs avec Edison.



La lampe d'Edison et la valve de Fleming

En 1883, Thomas Alva Edison (1847-1931) remarque que la paroi intérieure de ses lampes noircissait progressivement. Il pense que le dépôt noir provient de la lente évaporation du filament. Comme le noircissement provient plus particulièrement de la partie du filament relié à la borne négative de la pile, il insère dans l'ampoule une plaque métallique qu'il relie, grâce à un fil électrique, à la borne positive de la batterie qui alimentait la lampe, cherchant sans doute à collecter le dépôt noir sur la plaque. Surprise : il collecte un courant dans ce fil, alors que la plaque n'était pas reliée au filament de la lampe ! Mieux : si la plaque est reliée à la borne négative de la batterie, aucun courant ne passe plus dans le fil. Edison dépose à tout hasard un brevet en 1884, et annonce dans le texte du brevet : « J'ai trouvé que ce courant est proportionnel au degré d'incandescence du conducteur ou à la puissance éclairante de la lampe. »

Autrement dit, plus le filament est chaud, et plus le courant collecté au niveau de la plaque est intense.

Quelques années plus tard, lorsque l'on montre que le courant électrique dans un fil consiste en un déplacement d'électrons, particules portant une charge électrique négative, le Britannique John Ambrose Fleming (1849-1945), à qui l'on doit la fameuse règle « des trois doigts » en électromagnétisme, parvient à rendre compte de l'étrange phénomène baptisé « effet Edison ». Selon lui, des électrons

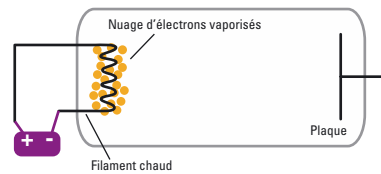


FIGURE 1A

La diode de Fleming non branchée : on observe un nuage d'électrons vaporisés au voisinage du filament chaud.

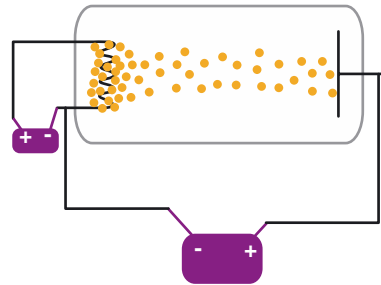


FIGURE 2B

La diode branchée à une source de tension, la plaque à l'anode, le filament à la cathode, le courant passe.

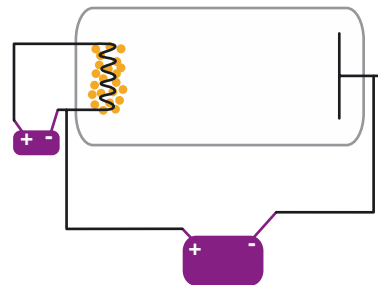


FIGURE 1C

La source de tension est branchée à la diode mais avec une polarité inverse : le courant ne passe pas.

s'échappent, s'évaporent du filament lorsqu'il est porté à incandescence : c'est l'émission thermoïonique. Si, dit Fleming, en face de ce filament chaud on place une plaque métallique, et que l'on relie les deux bornes négative et positive d'un générateur de tension au filament et à la plaque respectivement, le passage d'un courant électrique est observé. En effet, attirés par la plaque positive, les électrons vaporisés se précipitent vers elle, engendrant un courant dans le circuit constitué par le générateur et les deux électrodes que forment le filament (cathode) et la plaque (anode). Ce courant est désigné par « courant plaque ». Si, en revanche, la plaque est négative, les électrons ne peuvent pas l'atteindre puisqu'ils sont alors repoussés (fig. 1). Cette explication, Fleming la trouve en 1896. Trois années plus tard, il est embauché par la compagnie Marconi où il se trouve confronté à un épineux problème relatif à la détection des courants alternatifs de haute fréquence (changeant de sens très fréquemment).

Fleming dépose alors en 1904 le brevet d'un composant électronique qu'il baptise « valve » : il dispose une mince feuille cylindrique en métal, assurant le rôle de la plaque, autour du filament d'une lampe qu'il vide partiellement de son air. Il montre ensuite que s'il relie ce dispositif à une source qui délivre une tension alternative plutôt que de la relier à une batterie, comme l'avait fait Edison, alors un « courant plaque » est uniquement collecté pendant les demi-périodes où le cylindre est positif : le « courant plaque » passe, ne passe pas, passe, ne passe pas... Il passe seulement durant les demi-périodes où le potentiel de la plaque est positif par rapport à celui du filament. Autrement dit, ce dispositif qui comporte deux électrodes, le filament chaud et le cylindre, appelé pour cette raison « diode », est capable de « redresser » un courant alternatif, c'est-à-dire de ne laisser passer le courant que dans un sens, pas dans l'autre.

Voici ce qu'écrivit Fleming : « J'ai découvert

que si deux conducteurs sont enfermés dans un récipient dans lequel on a fait un bon vide, l'un des conducteurs étant chauffé à haute température, l'espace entre le conducteur chaud et le conducteur froid possède une conductivité électrique unilatérale et l'électricité négative peut passer du conducteur chaud au conducteur froid, mais non en sens inverse... »

Fiche technique de la diode

En général, le filament est coiffé d'une gaine métallique, laquelle joue le véritable rôle d'émetteur d'électrons (la cathode), le filament constituant simplement un élément chauffant. La surface de cette gaine est souvent recouverte d'oxyde de baryum ou de strontium dont la présence augmente le pouvoir émissif. Quant à l'anode, elle est souvent en nickel, en molybdène ou en fer, parfois en cuivre. Sa forme plate ou cylindrique s'adapte à la géométrie de la lampe. Le choc des électrons contre elle produit de la chaleur qui doit être évacuée. L'intensité du courant qui traverse la diode augmente avec la température de la cathode et la différence de potentiel anode-cathode. Pour une même température, l'intensité I est proportionnelle à la différence de potentiel V portée à la puissance $3/2$: $I = P V^{3/2}$; où P est une constante appelée *pervéance* qui dépend de la géométrie des électrodes. Cette relation est appelée formule de Child-Langmuir. Elle n'est valable que jusqu'à une certaine valeur de tension au-delà de laquelle le courant n'augmente plus, car alors tous les électrons émis par la cathode atteignent l'anode : on dit que le courant de saturation est atteint. Dans la pratique, on évite de faire fonctionner la diode en régime saturé, en particulier dans le cas des cathodes à oxydes, lesquelles se détériorent rapidement suite à l'arrachement de la couche d'oxyde par le champ électrique.

Diode et valve, des applications se dessinent

A peine le brevet de la diode venait-il d'être déposé que la compagnie Marconi l'achète et en fait sa propriété. Pourquoi Guglielmo Marconi⁽¹⁾ (1874-1937) s'intéresse-t-il à cette invention ? Parce que, pour transmettre le code morse des messages télégraphiques par voie hertzienne, les impulsions électromagnétiques de durées plus ou moins courtes émises par l'antenne émettrice TSF (télégraphie sans fil) donnaient naissance dans l'antenne réceptrice à des courants alternatifs de plus ou moins longues durées, mais toujours de haute fréquence, que l'on devait détecter. Or, la détection d'un courant haute fréquence n'était pas simple car, en raison de son inertie mécanique, l'aiguille d'un appareil de mesure ne peut effectuer un grand nombre d'allers-retours par seconde : en présence d'un courant haute fréquence, elle reste immobile, et les signaux demeurent de ce fait non détectés. Le problème ne se pose plus si le courant est redressé. Citons encore un extrait du brevet de Fleming relatif à sa diode : « Cette invention se rapporte à un dispositif qui convertit le courant alternatif (et en particulier de haute fréquence) en courant continu que l'on peut mesurer avec des instruments pour courant continu [...] alors que cela est impossible avec le courant alternatif qui exige des appareils conçus spécialement, lesquels n'existent pas pour la haute fréquence. »

Autrement dit, grâce à la valve de Fleming, on pouvait désormais détecter aisément les ondes TSF en mettant en évidence les courants hautes fréquences qu'elles faisaient apparaître dans l'antenne réceptrice.

Signalons cependant qu'avant l'invention de la valve de Fleming, on employait un autre



© Maxime Gendre

FIGURE 2

De gauche à droite : une triode (1920), une pentode (1970) et une double diode (1950).

La taille des tubes électroniques était en constante décroissance jusqu'à la fin des années 1970 ou les plus petits tubes étaient aussi gros qu'un cube de 3 mm de côté.

dispositif pour détecter les courants haute fréquence : « le radioconducteur » ou « tube à limaille » d'Édouard Branly (se reporter à l'encadré le radioconducteur de Branly), encore appelé « cohéreur ».

De Forest et sa triode

Dans le but d'améliorer les performances de la diode, l'Américain Lee De Forest (1873-1961) invente un nouveau dispositif qu'il appelle *Audion* et le brevète en 1907 : il place entre le filament chaud, émetteur d'électrons ou cathode, et la plaque collectrice d'électrons ou anode, un réseau de fils métalliques à mailles assez lâches (fig. 2). Quel est le rôle de cette grille ? De Forest montre que lorsque cette dernière est rendue positive par rapport à la cathode, elle attire vers elle les

(1) Marconi partage le prix Nobel de physique en 1909 avec Ferdinand Braun pour leurs travaux dans le domaine de la TSF.

Le radioconducteur de Branly

Dès la fin des années 1830, certains physiciens avaient mené des recherches sur la résistance des contacts électriques dits « imparfaits », comme par exemple celle de limailles, de poudres, de grenailles ou de fragments métalliques... contenus dans des tubes. On avait observé que de tels tubes, appelés « tubes à limaille », se comportent comme de très mauvais conducteurs de l'électricité, voire comme des isolants, lorsqu'on tente d'y faire circuler un courant continu. Mais qu'en revanche, ils deviennent des conducteurs relativement bons si le courant provient d'une décharge oscillante, comme si, sous l'action de cette-dernière les particules métalliques s'aggloméraient, augmentant leur cohésion et améliorant ainsi la conduction électrique. Chose remarquable que l'on avait également constatée : la bonne conduction cessait si le tube subissait un léger choc ; la résistance reprenait alors sa valeur initiale. L'ère de la TSF débute en 1890 avec une célèbre expérience que réalise Édouard Branly (1844-1940) : il monte en série une pile, un tube à limaille et un galvanomètre. L'aiguille de ce dernier était au zéro de la graduation traduisant la très grande résistance électrique du circuit (due au tube à limaille). Le physicien français observe qu'il suffit de faire éclater une étincelle à l'aide d'une machine électrostatique

placée vingt-cinq mètres plus loin pour que l'aiguille du galvanomètre accuse une déviation : la limaille devient alors subitement conductrice ! Le tube à limaille, que Branly appelle « radioconducteur », permettait donc de détecter à distance une étincelle, grâce à la fermeture de son circuit situé 25 mètres plus loin, et cela manifestement sous l'action locale (au niveau du tube) du champ électromagnétique oscillant de l'onde émise par la décharge électrique ! L'extraordinaire découverte de Branly fait alors naître l'espoir de l'ouverture d'une nouvelle ère pour l'homme : celle de la communication sans fil. Citons Branly en 1913 : « [...] l'étincelle électrique de décharge d'une bouteille de Leyde⁽²⁾, qui donne le rayonnement électrique du poste d'émission de la télégraphie sans fil, existait pour nous depuis plusieurs siècles avant Feddersen, Maxwell, Hertz, mais un organe de réception sensible à ce rayonnement manquait : le tube à limaille a joué le rôle de cet organe comme l'aurait fait un œil électrique. » La diode de Fleming allait détrôner le tube à limaille.

(2) Il s'agit de l'ancêtre du condensateur : deux parties métalliques (ici les faces intérieure et extérieure d'une bouteille) séparées par un isolant (ici la paroi en verre de la bouteille)

électrons émis, lesquels continuent alors leur course à travers elle vers l'anode ; si en revanche la grille est rendue suffisamment négative, les électrons sont refoulés vers la cathode et le courant plaque s'annule. Autrement dit, en réglant le *potentiel électrique* – communément appelé voltage – de la grille, on commande l'intensité du courant plaque. Par rapport à la diode, ce nouveau dis-

positif à trois électrodes que l'on appelle triode présente notamment l'avantage suivant : là où, dans une diode, il n'y aurait pas de courant, une triode laisse passer un courant d'intensité appréciable si le potentiel de grille est convenable. En effet, dans une triode, 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 en mesure de redresser un courant alternatif, comme la diode, mais elle est en outre capable de l'amplifier. En fait, la grille de commande d'une triode agit comme l'anode d'une diode, à cela près que le système de contrôle du courant électronique au moyen de la grille de commande est beaucoup plus efficace et précis que par la méthode employée par Fleming dans la diode et qui consistait à chauffer plus ou moins la cathode (voir précédemment l'extrait du brevet d'Edison).

En plaçant plusieurs triodes les unes derrière les autres, en cascade, de sorte que chaque triode soit alimentée par la sortie de la précédente, De Forest montre en 1912 qu'il est possible d'obtenir une très forte amplification. A partir de là, une nouvelle idée germe dans l'esprit de l'Américain : plutôt que d'employer plusieurs triodes, on pourrait peut-être n'en employer qu'une seule, en « bouclant » une triode sur elle-même. Autrement dit, en faisant commander le potentiel de la grille de la triode par le courant amplifié de sortie de sa propre anode ! Or, dans une telle situation, bouclée sur elle-même, la triode peut se comporter comme un oscillateur électrique, c'est-à-dire comme un générateur d'un courant alternatif de haute fréquence : 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 puis réémis 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 entre le microphone et le 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. Si l'injection se fait au bon moment (accord de phase), à travers un circuit résonant, 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 à la fréquence de résonance du circuit résonant.

Cela était tout à fait intéressant, car jusqu'à cette date, on ne savait pas produire une onde électromagnétique de haute fréquence de manière entretenue, mais seulement par impulsion, à l'aide d'étincelles (se reporter à l'encadré sur la production des ondes).

La triode marque ainsi une véritable révolution technologique dans le domaine de la radiocommunication, tant au niveau du récepteur, grâce à ses fonctions amplificatrice et redresseuse, que de l'émetteur, grâce à son pouvoir auto-oscillant.

En 1913, Irving Langmuir⁽³⁾ (1881-1957) apporte quelques perfectionnements techniques à la triode de De Forest, notamment en proposant de réduire la pression du gaz dans la lampe à une valeur très faible. Lorsque la Première Guerre mondiale éclate, une mission d'officiers français part aux États-Unis pour se renseigner sur la fabrication des triodes selon les suggestions de Langmuir. En effet, la communication radio revêtait une importance capitale sur les fronts... C'est ainsi qu'à leur retour, l'usine de fabrication de lampes d'éclairage *Fotos-Grammont* à Lyon, fermée à l'époque, fut réhabilitée puis adaptée à la fabrication des lampes triodes, dont les premières sortirent de l'usine en janvier 1915. Ces triodes, appelées « loupiotes », alimentèrent rapidement toutes les armées alliées. A titre de comparaison, les triodes allemandes étaient plus lourdes et plus encombrantes.

(3) Langmuir reçoit le prix Nobel de chimie en 1932 pour ses découvertes et recherches relatives à la chimie des surfaces.

La production des ondes électromagnétiques

Depuis les expériences de Heinrich Hertz (1857-1894) à la fin des années 1870 et pendant presque trente ans, le seul moyen dont on disposait pour produire un courant alternatif de haute fréquence responsable de l'émission d'une onde électromagnétique de même fréquence était la décharge électrique. L'un des inconvénients de cette méthode était qu'en raison de sa très courte durée, l'onde émise était en fait un train d'onde possédant peu d'énergie. Aussi, on cherchait à mettre au point une technique de production d'ondes entretenues. La solution qui s'est naturellement présentée à l'esprit consistait à essayer d'adapter les alternateurs industriels employés pour la production de courant à 50 Hz à la production d'oscillations hautes fréquences. Grâce à d'ingénieuses astuces, à partir de 1907, on est progressivement parvenu à des fréquences aussi élevées que 100 kHz de manière stable avec des machines tournant à plusieurs milliers de tours par minute, mais cela exigeait d'énormes installations peu pratiques dont le coût était élevé. On émettait donc à des longueurs d'onde dites myriamétriques de 10 km, 15 km, 20 km, voire davantage, et les stations émettrices étaient

très encombrantes. En effet, non seulement il fallait une « usine » d'alternateurs pour produire le courant alternatif, mais l'émission des ondes produites exigeait également des antennes de grandes dimensions. D'énormes monuments en fait. Citons l'exemple typique de l'antenne de Sainte-Assise à 40 km de Paris construite en 1921⁽⁴⁾ : elle était alimentée par quatre alternateurs délivrant une puissance totale de 1,5 MW ! Quant à l'antenne elle-même, elle était composée de deux rangées de huit pylônes de 250 mètres de haut, écartés deux à deux de 400 mètres ! Les nappes de fils qui reliaient les pylônes couvraient une surface de 2,8 km de long sur 400 m de large, soit plus de 110 hectares ! Avec l'arrivée de la triode, la production de courants et d'ondes électromagnétiques de haute fréquence devint un jeu d'enfant... et surtout la taille des émetteurs se réduisit.

(4) Signalons que cette antenne est toujours en service, propriété de la Marine nationale (depuis 1998) qui l'emploie pour la communication avec les forces sous-marines.

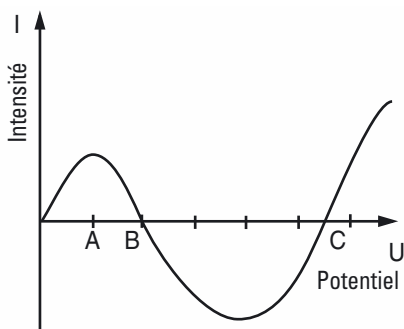


FIGURE 3
Variation de l'intensité du courant plaque en fonction du potentiel de la grille.

Fiche technique de la triode

On peut considérer que l'intensité I du courant électrique dans une triode varie comme dans une diode dont le potentiel de l'anode serait une « combinaison » des potentiels de grille V_g et d'anode V_a de la triode considérée. Cela est confirmé par l'expérience, au moins en première approximation. D'où l'expression : $I = P (V_g + V_a/K)^{3/2}$; K , appelé *coefficient d'amplification*, dépend de la géométrie des électrodes. Cette expression n'est valable que pour les valeurs de tensions situées dans la région principale d'utilisation de la triode. L'intensité du courant de sortie dans une

Les semi-conducteurs

On donne le nom de semi-conducteur à des matériaux non métalliques dont la résistivité électrique se situe entre $10^{-4} \Omega$ (ohm-mètre) et $10^7 \Omega$, c'est-à-dire entre celles des métaux (typiquement $10^{-8} \Omega$) et celles des isolants ($10^{12} \Omega$), la frontière entre ces trois variétés de matériaux n'étant pas très nette. Le silicium et le germanium en sont de bons exemples. Contrairement à ce qui se passe dans un isolant, dans un bon conducteur, chaque atome laisse grossièrement un de ses électrons libre de 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 deux 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'accolement 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 sera alors forcément 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. Et en fait, il n'est pas trop exagéré de dire qu'un transistor est une triode à semi-conducteur, dans la mesure où il agit comme un interrupteur et comme un amplificateur. Signalons pour finir que s'il est vrai que la diode semi-conductrice et le transistor sont les versions modernes de la diode de Fleming et de la triode de De Forest, cependant, on ne peut les utiliser que dans des dispositifs dont la puissance électrique est faible, sous peine de les griller.

triode varie d'une manière très particulière en fonction du potentiel de la grille (fig. 3). De zéro à une certaine valeur A de ce potentiel, supposé ici positif, elle augmente proportionnellement à ce dernier. Si l'on fait croître le potentiel au-delà de A, l'intensité se met à chuter ! La raison est que le choc des électrons cathodiques sur l'anode lui arrache des électrons dits secondaires, dont certains se précipitent vers la grille : ce courant secondaire en sens opposé au courant primaire, réduit l'intensité de ce dernier. Pour une certaine valeur B du potentiel, le nombre d'électrons secondaires allant de l'anode vers la grille devient

égal au nombre d'électrons cathodiques qui atteignent l'anode : l'intensité s'annule donc en B ! Si l'on continue d'augmenter le potentiel, on observe une intensité négative, car l'intensité du courant secondaire devient supérieure à celle du courant primaire, chaque électron cathodique arrachant à l'anode plusieurs électrons qui atteignent la grille. Si l'on augmente encore le potentiel, l'intensité primaire croît plus vite que l'intensité secondaire et la situation finit par s'inverser en C, l'intensité redevenant positive au-delà d'une certaine valeur C du potentiel.

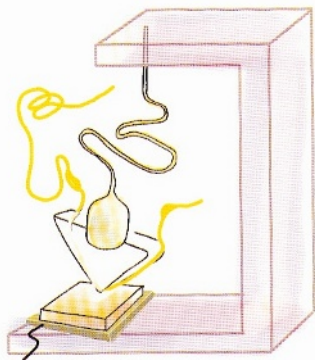


FIGURE 4

Voici à quoi ressemblait le premier transistor. A l'extrémité inférieure du triangle, Walter Brattain colle une petite feuille d'or qu'il sépare en deux en la coupant à l'aide d'une lame de rasoir. La pointe avec ses deux contacts en or s'appuie sur un cristal de germanium dopé qui repose sur une base métallique dont on pouvait régler le potentiel.

(Dessin Jean-Jacques Bonnet. Exposition Physique de pointe, Palais de la découverte.)

Une diode d'un nouveau genre

En 1874 l'Allemand Karl Ferdinand Braun⁽¹⁾ (1850-1918) annonce avoir observé une chose curieuse : la jonction formée par le contact d'une pointe métallique avec un sulfure métallique présente une résistance électrique différente selon qu'elle est traversée par le courant dans le sens pointe-sulfure ou sulfure-pointe. Il en est de même avec certains oxydes. Dans certains cas, la jonction (contact) ne laisse circuler le courant que dans un sens, pas dans l'autre ! Bien que n'étant pas un oxyde, ni un sulfure, le carbure de silicium ou carborundum (SiC) présentait cette même propriété de pouvoir « redresser » un courant alternatif. Le redressement étant fort utile pour la détection d'une onde électromagnétique, notamment en TSF, l'étude des dispositifs redresseurs suscitait un grand intérêt chez les scientifiques et techniciens au début du XX^e siècle. En 1900, les Français Tissot et Pellin préconisent l'emploi de la galène, ou sulfure de plomb (PbS), même si personne ne comprend son étrange comportement, ni d'ailleurs celui du sulfure de cuivre, du sulfure de fer, de l'oxyde de cuivre, du silicium, du carborundum... La plupart des cristaux jouissant de cette curieuse propriété sont des composés, mais quelques-uns, comme le silicium et le germanium, sont des éléments. En 1914, G.-E. Petit et Léon Bouthillon pressentent les fondements sur les-

quels la solution de cette énigme devait s'appuyer. Ils se demandent s'il ne faut pas voir dans ce phénomène « ...une simple manifestation du mode suivant lequel les électrons passent d'un corps dans un autre. »

Et en effet, toute la physique des semi-conducteurs qui régit notamment le fonctionnement des « diodes à jonction » et des transistors repose sur cette remarque (se reporter à l'encadré sur les semi-conducteurs).

Ne laissant circuler le courant que dans un sens, la galène, le carborundum... agissaient comme une lampe diode de Fleming. A ce titre, ils constituaient les versions semi-conductrices, et beaucoup plus petite de celle-là. Or, la triode de De Forest, très largement employée à partir de 1914 pour sa fonction amplificatrice dans divers dispositifs électroniques, notamment dans les postes de radio, était lente, fragile et consommait trop d'électricité. Aussi, c'est très naturellement que l'on chercha à la remplacer, à son tour, par sa version semi-conductrice. Mais cela ne devint envisageable qu'avec la naissance de la physique quantique à partir du milieu des années 1920.

Ainsi, l'Allemand Julius Lilienfeld (1881-1963) dépose dès 1926 un brevet pour un tel dispositif, mais ne parvient jamais à le mettre au point. En 1938, son compatriote Robert Pohl (1884-1976) invente un amplificateur à base de sel : cela fonctionnait mais n'était d'aucune utilité car trop lent. A partir du début

des années 1940, l'Américain William Shockley (1910-1989) se penche sur ce même problème. Finalement, c'est avec deux de ses collègues, John Bardeen (1908-1991), théoricien, et Walter Brattain (1902-1987), praticien, qu'il parvient enfin à mettre au point le dispositif imaginé par Lilienfeld plus de vingt ans avant ! C'était le 23 décembre 1947. Six jours avant, les trois physiciens avaient eu l'idée de placer deux pointes métalliques à très petite distance l'une de l'autre sur un cristal de germanium dopé, lui-même reposant sur une « base » métallique (fig. 4). Le 23 décembre, 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 de l'intensité très importante, donc amplifiée, au niveau de l'autre pointe : l'effet amplificateur était bien là. La triode semi-conductrice venait de naître ! En 1949, John Pierce baptise cette nouvelle invention *transistor* (de *transfer* et *resistor*, car il y a transfert d'un signal électrique à travers une résistance) et, en 1956, Bardeen, Brattain et Shockley se voient décerner le prix Nobel de physique pour « leurs recherches sur les semi-conducteurs et leur découverte de l'effet transistor ».

Au cours des années 1950, grâce aux efforts des ingénieurs Jack Kilby⁽⁵⁾ et Robert Noyce, l'un des fondateurs de Intel en 1968 et mort en 1990, le transistor est miniaturisé à l'extrême et les premières « puces électroniques » voient le jour en 1959. Aujourd'hui, plusieurs millions, voire plusieurs dizaines de millions

de transistors peuvent être assemblés sur une surface de l'ordre d'un centimètre carré ! Mais cette miniaturisation ne peut guère se poursuivre beaucoup plus loin, car la limite physique de compaction est presque atteinte : la taille des transistors flirte avec celle des atomes... Toujours est-il que c'est grâce à la miniaturisation des lampes électroniques mises au point il y a cent ans que nous pouvons aujourd'hui mettre dans nos poches téléphones, récepteurs radio, téléviseurs...

De plus, il convient d'insister sur un point : les lampes électroniques ne sont pas mortes. Lorsque la puissance électrique mise en jeu est importante, par exemple dans un émetteur de radio-télévision, on a toujours recours aux vieilles lampes, ou plus précisément à leurs versions modernes : pentodes, octodes, klystron, magnétron, tubes à ondes progressives...

K. F.



Biologiste de formation, **Kamil Fadel** a poursuivi ses études en physico-chimie, puis en histoire des sciences. Entré au Palais de la découverte en 1989, il est actuellement chef du département de physique. Par ailleurs, il est président d'Objectif Science, une association qui sélectionne et prépare des jeunes de 15 à 20 ans à des concours scientifiques internationaux.
www.objectif-science.org

(5) Prix Nobel de physique en 2000 pour « sa contribution à l'invention du circuit intégré ».