

Les inattendus du transistor

PIERRE AIGRAIN

Résultat espéré d'une coopération fructueuse entre trois physiciens émérites, le transistor a créé une industrie dont nul n'a prévu l'ampleur.

Avec la lampe électrique, le transistor est l'invention qui a le plus fort impact sur notre vie. Où que nous soyons dans un pays industrialisé, un transistor est à portée de vue, radio, montre, voiture, téléviseur : sur l'empire du transistor, le Soleil ne se couche jamais. Le chiffre d'affaires de l'industrie des semi-conducteurs est de 150 milliards de dollars, le PNB du Danemark. Il se fabrique 15 milliards de puces par an et deux millions de transistors par seconde. Le succès du transistor permet l'introduction de fonctions nouvelles dans les ordinateurs, fonctions qui expriment toutes les données qui « parlent » au cerveau.

La découverte du transistor a suivi un cheminement tortueux, mais pas tout à fait inattendu car, comme pour la lampe électrique, le but était défini ; elle est le fruit des travaux d'une équipe composée essentiellement de Shockley, Bardeen et Brattain. Ces chercheurs désiraient fabriquer des amplificateurs avec des semi-conducteurs. Ils réussirent, mais ce qu'ils découvrirent initialement n'était pas ce qu'ils cherchaient. Là réside l'inattendu.

LES SEMI-CONDUCTEURS, D'UTILES INCOMPRIS

Le mot semi-conducteur apparaît dans la littérature scientifique vers la fin du XIX^e siècle : il désigne certains corps aux propriétés intermédiaires entre les métaux et les isolants. La mystérieuse conductivité électrique de ces solides est extraordinairement variable en fonction de paramètres mal contrôlables.

On s'aperçoit parallèlement que la conductivité de certains semi-conducteurs augmente lorsqu'on les illumine. Tel est le cas, par exemple, du sélénium utilisé dans la confection des cellules photovoltaïques. On observe également que quand on établit un contact entre certains de ces semi-conducteurs et un métal,

un tel dispositif « redresse le courant ». En effet, quand le métal est porté à une tension positive par rapport au semi-conducteur sous-jacent, le courant passe très facilement ; quand la polarité est inversée, le courant ne passe plus.

L'industrie est opportuniste : elle n'attend pas de comprendre les finesses du fonctionnement des semi-conducteurs pour fabriquer des redresseurs au sélénium. Leur fabrication est empirique et relève de tours de mains difficilement reproductibles. Il n'empêche : pendant de longues années, ces dispositifs servent à redresser le courant alternatif que fournit l'EDF sur les prises de courant pour fabriquer le courant continu nécessaire au fonctionnement des tubes à vide.

Les électroniciens s'aperçoivent aussi qu'en utilisant une pointe métallique sur de nombreux corps semi-conducteurs, le courant alternatif est redressé, même à des fréquences très élevées. Ces dispositifs, constitués d'un morceau de galène (sulfure de plomb) sur lequel est appuyée une pointe, constituent les récepteurs des postes à galène.

Hélas pour le bon fonctionnement de tels détecteurs, la pointe est efficace à certains endroits et pas à d'autres, et l'on ignore pourquoi. On déplace la pointe un peu au hasard jusqu'à ce qu'on trouve un « point chaud », correspondant à une bonne écoute. À la moindre secousse, la pointe se déplace, bien entendu toujours dans le mauvais sens.

Vers 1939-1940 apparaissent les radars, où il faut, soit détecter, soit mélanger avec un oscillateur local, des signaux de fréquences très élevées : les tubes à vide ne suivent pas ces fréquences et les détecteurs à pointes sont alors indispensables. Pour une meilleure stabilité mécanique, on remplace le sulfure de plomb mou par un matériau dur, le silicium : ainsi naît l'industrie du silicium.

Deux petites découvertes précèdent celle du transistor : un chercheur améri-

cain de l'Université de Purdue, Saul Benzer, s'aperçoit qu'on peut fabriquer des redresseurs en utilisant non pas du silicium, assez difficile à manipuler (point de fusion très élevé, grande réactivité chimique qui rend les purifications difficiles), mais du germanium. De plus, S. Benzer stabilise la position de la pointe en procédant à une opération dite de formage, qui consiste à appliquer des chocs électriques pour souder la pointe.

Après cette brillante thèse, S. Benzer estime qu'il n'y a plus grand-chose à trouver dans les semi-conducteurs et se convertit à la biologie ; il est l'un des fondateurs de la biologie moléculaire.

LE MODÈLE DE WILSON

Le fonctionnement des semi-conducteurs reste mystérieux. En 1934, un Britannique, Wilson, propose le premier modèle expliquant les propriétés électriques des semi-conducteurs. Un semi-conducteur est un solide cristallin, et les atomes sont fixés aux nœuds de la maille cristalline ; la conduction est le fait des électrons plus légers, plus mobiles. Toutefois, pour conduire le courant, ceux-ci doivent se déplacer sous l'action d'une différence de potentiel. Le modèle de Wilson décrit dans quelles conditions ils se déplacent, dans quelles conditions ils ne se déplacent pas.

La mécanique quantique stipule que les électrons des atomes occupent des niveaux d'énergie croissante et qu'il ne peut pas y avoir plus de deux électrons sur le même niveau d'énergie. Quand tous les états d'énergie disponibles sont remplis par les électrons, ceux-ci ne peuvent se déplacer, le corps ne conduit pas l'électricité : c'est un isolant. Dans certains semi-conducteurs, il existe une autre série de niveaux vides, séparés de la première série de niveaux pleins par une bande d'énergie interdite. Les électrons, sous l'effet de la température par exemple, peuvent sauter sur les niveaux vides et conduire le courant.

Le modèle de Wilson énonce simplement : « Il y a une bande, dite de valence, où les niveaux d'énergie sont pleins, il y a une bande, dite de conduction, où les niveaux d'énergie sont vides. Entre les deux, il y a une bande interdite ». On s'en remet à l'expérience pour déterminer les paramètres de ces bandes. Le modèle de Wilson est toujours valable. Bien sûr, on sait aujourd'hui déterminer les paramètres du solide qui fixent les énergies des bandes et l'on explique, grâce au modèle, les variations de la conductivité avec la température.

L'interprétation grossière de la conductivité constitue l'état de l'art dans les années 1940. Le transistor n'existe toujours pas, mais une idée pointe : il semble

possible d'insérer à volonté des électrons dans un semi-conducteur pour en moduler la conductivité. Pour ce faire, les physiciens pensent à appliquer un champ électrique perpendiculairement à la surface d'une couche mince de ce semi-conducteur. Dans un condensateur, les deux plaques sont à des potentiels électriques différents et se chargent par influence. Sur les deux faces du condensateur constitué par une plaque de semi-conducteur, des charges de signes opposés apparaîtront et, pensent nos trois physiciens, la conductivité de la zone où les charges électriques négatives se sont accumulées sera conductrice. On aurait ainsi le moyen de moduler la conductivité par un champ électrique appliqué, et cela constituerait un amplificateur. Shockley, Brattain et Bardeen travaillaient à la société *Bell System* sur ce projet, d'abord sans succès.

LA GLOIRE QUE FUT LA BELL SYSTEM

La *Bell System* était une société privée qui avait un monopole de l'État américain sur les systèmes de télécommunication. En échange de ce monopole, la *Bell* devait d'abord fournir un service de bonne qualité : elle s'acquitta de cette tâche. Les profits de la Société ne devaient pas dépasser un certain seuil, six pour cent des investissements. Cette règle était une prodigieuse incitation à investir dans la recherche. En un sens, la recherche ne leur coûtait rien et, par conséquent, ils en faisaient beaucoup.

Shockley tente de fabriquer ce que l'on appelle aujourd'hui des transistors à effet de champ avec une couche de germanium selon le principe du condensateur détaillé précédemment.

Cela ne marche pas. On appliquait une tension sur la plaque mince, mais elle ne modifiait pas la conductivité de la couche située en dessous. Bardeen, le théoricien du groupe, et Brattain, le physico-chimiste, suggèrent alors que la cause du non-

fonctionnement résulte des propriétés de l'interface. Cette interface n'est pas décrite par le modèle de Wilson. Des impuretés et des irrégularités de surface, pense avec raison Bardeen, piègent des électrons et expliquent l'inefficacité du dispositif.

Pour étudier le piégeage des électrons, ils décident de faire une expérience très simple qui consiste à mettre sur leur morceau de germanium deux pointes très près l'une de l'autre et, en appliquant une tension à l'une des pointes, à vérifier quelle est la variation du potentiel sur l'autre pointe.

TOUJOURS L'INATTENDU ARRIVE

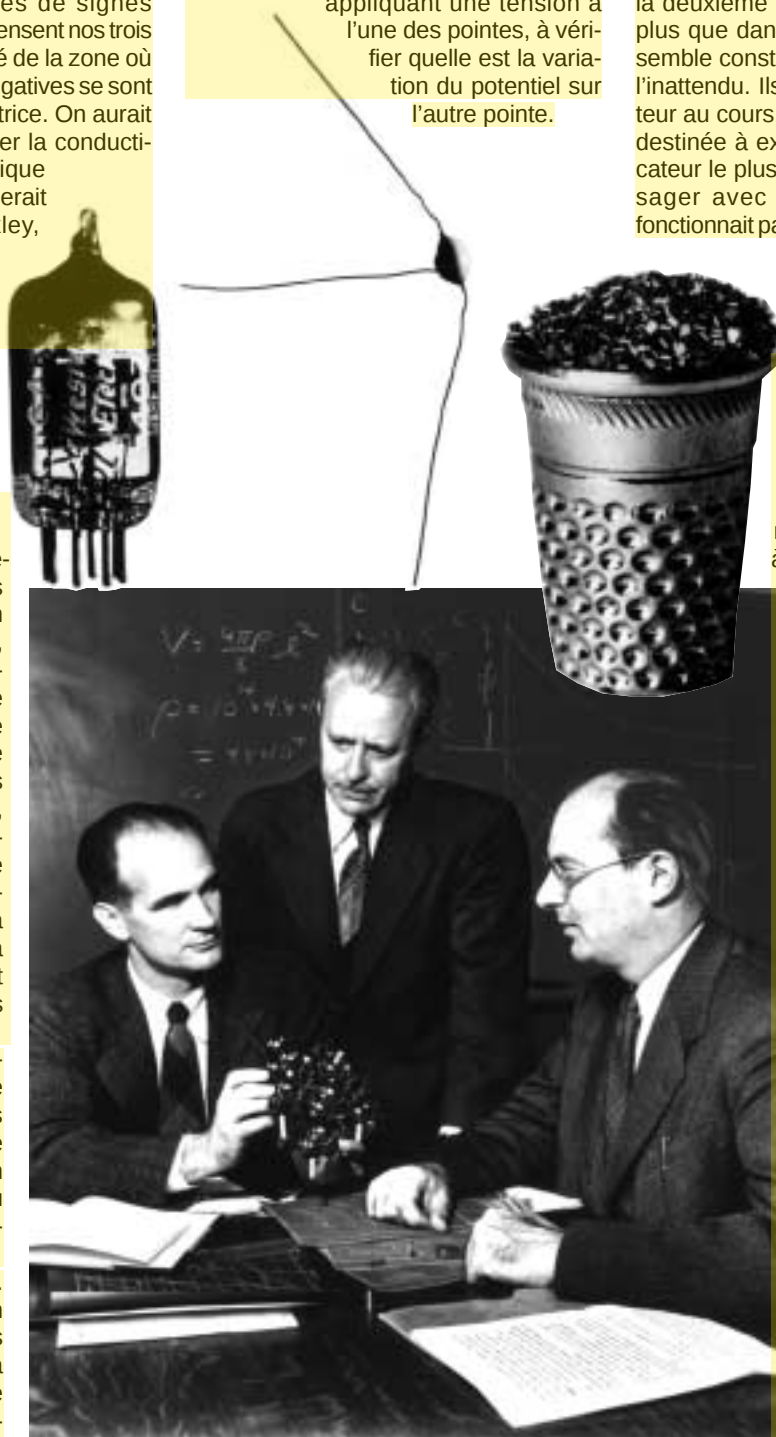
L'expérience donne un résultat imprévu. Leur morceau de germanium est dopé de manière à conduire par électron, c'est-à-dire de type *n*, *n* pour négatif. Quand ils appliquent une tension positive, même faible, sur une des pointes et sur l'autre pointe une tension négative, donc bloquante, le courant se met à passer dans la deuxième pointe. Il en passe même plus que dans la première : aussi l'ensemble constitue un amplificateur. Voilà l'inattendu. Ils découvrent un amplificateur au cours d'une expérience qui était destinée à expliquer pourquoi l'amplificateur le plus simple qu'on puisse envisager avec un semi-conducteur ne fonctionnait pas. Le transistor était conçu.

SMALL IS BEAUTIFUL

Il est déjà petit : les deux pointes sont placées aussi près que possible l'une de l'autre, à une dizaine de micromètres, pour que les électrons n'aient pas trop de chemin à parcourir et pour que le dispositif amplifie les hautes fréquences. Des ouvriers très habiles arrivent à placer deux pointes côte à côte avec cette précision. Grâce aux techniques de formage par choc électrique de Benzer, le dispositif est relativement stable et résiste très bien aux vibrations.

Il est cependant très sensible aux variations d'ambiance, qui amènent différentes impuretés ; il y en a toujours dans l'air, aussi faut-il que ces transistors soient encapsulés dans des boîtes de trois millimètres de côté. J'en avais un, mais justement à cause de sa petite taille, je l'ai perdu.

En 50 ans, les progrès de la miniaturisation sont spectaculaires tout comme l'accroissement du nombre de transistors fabriqués annuellement, il croît, encore aujourd'hui, de 50 à 100 pour cent. Aujourd'hui il se



Les trois inventeurs du transistor, de gauche à droite, Shockley, Brattain et Bardeen. En haut, le premier transistor utilisable et commercialisé. Dans le bas, à droite, 56 000 transistors fabriqués à partir de barres de silicium utilisés dans les premiers ordinateurs d'IBM.

fabrique chaque année plus de transistors qu'il n'y a de neurones dans un cerveau humain.

D'où l'idée qui se fait jour de fabriquer un cerveau artificiel. On ne va cependant pas aussi vite qu'une règle de trois pourrait nous inciter à croire : dans le cerveau humain, chaque neurone est connecté à une dizaine de milliers d'autres neurones, et cela on ne sait pas le faire. On ne sait pas réaliser les interconnexions et même si c'était possible, la puissance de sortie d'un élément n'est pas suffisante pour en commander 10 000 autres.

Revenons à notre histoire. L'explication du fonctionnement du transistor à pointe est donnée assez rapidement par nos triumvirs, sous la forme d'une double jonction positive-négative. Une nouvelle méthode de fabrication, pas très commode, est mise en place et permet les premières applications pratiques, notamment les dispositifs d'aide à la surdité. L'histoire s'accélère avec une nouvelle technique découverte peu après par les gens de la Société *Fairchild*, la technique de photolithographie, utilisant non plus le germanium, mais le silicium. Les chercheurs de *Fairchild* inventent une méthode qui permettait de réaliser des structures, toutes celles qu'on voulait *pn*, *ppn*, etc., par ces techniques de photolithographie, et ils abaissent les dimensions critiques à une dizaine de micromètres.

Aujourd'hui on sait descendre en fabrication de grande série à des transistors de 0,35 micromètre de côté, en laboratoire 0,15 micromètre. Cette invention va permettre l'apparition d'une autre technologie qui est le circuit intégré où l'on fabrique, en une seule opération, des circuits comportant un très grand nombre de transistors interconnectés. Les microprocesseurs, qui sont un type de circuit intégré et qui réalisent les fonctions logiques à l'intérieur d'un micro-ordinateur, contiennent cinq millions de transistors sur un petit morceau de silicium.

Je signale qu'on les fabrique sur des plaques de silicium de 30 centimètres de diamètre, alors que le circuit lui-même fait moins d'un centimètre de côté. Vous pouvez donc en élaborer plusieurs centaines sur une seule plaque. Une seule plaque, plusieurs centaines de circuits contenant chacun cinq millions de transistors, au total un demi-milliard de transistors par plaque de silicium !

On va un peu plus loin encore pour des circuits plus simples dans leur conception que sont les mémoires. Une mémoire, c'est un moyen d'utiliser des transistors. Les circuits actuels contiennent 256 millions de transistors, mais dans une structure beaucoup plus simple que les microprocesseurs.

LA PRISE DE CONSCIENCE DU FUTUR DU TRANSISTOR

Initialement le principal intérêt des transistors est leur faible consommation d'énergie et, par conséquent, leur disponibilité immédiate : les utilisateurs ne sont plus pénalisés par le temps de chauffage de la cathode des tubes à vide.

L'intérêt du circuit intégré, qui apparaît dans les années 1970, n'a pas été compris aussi vite. Il n'a gagné la partie que parce qu'il est fondé sur l'idée initiale de Shockley : un amplificateur composé de silicium, d'une couche d'isolant et d'une électrode métallique ou quasi métallique. Une particularité du silicium a été mise à profit : il s'oxyde très facilement, et la couche d'oxyde obtenue en surface est de la silice, un des meilleurs isolants connus ; de plus, cette silice, quand on travaille bien, ne crée pas d'états de surface, pas de piège : les électrons sont mobiles à l'interface. Les transistors à effets de champ, transistors que l'on appelle MOS, métal-oxyde-semi-conducteur, conquièrent le marché.

De plus, les circuits intégrés se perfectionnent parce qu'ils permettent leur propre fabrication... Tant que des circuits intégrés ne comportent que 1 000, à la limite 10 000 transistors, une équipe de quelques personnes peut concevoir le circuit, c'est-à-dire déterminer quel transistor mettre là, quel transistor mettre ailleurs, et comment il faut les interconnecter. Cela prend beaucoup de temps, mais en travaillant un an sur le problème, les ingénieurs peuvent concevoir, «à la main», un circuit intégré comportant jusqu'à une dizaine de milliers de transistors, avec ses interconnexions.

Pour aller plus loin, une seule méthode : la conception assistée par ordinateur. Ainsi performances des ordinateurs et complexité des circuits intégrés avancent de pair. Symbiose totale et cercle vertueux : tout nouvel ordinateur utilisant la dernière génération de circuits intégrés permet de concevoir la génération suivante. Cela continue aujourd'hui.

LES FACTEURS LIMITANT LA PUISSANCE DE CALCUL

Le premier facteur limitant est la vitesse de déplacement des électrons : plus la distance qu'ils doivent parcourir est grande, moins le transistor est rapide. Pour augmenter la rapidité, il faut diminuer les dimensions. Les limitations les plus sérieuses sont de deux types. La première est l'évacuation de la chaleur. Quand vous divisez par deux les dimensions d'un transistor, vous réduisez la chaleur produite d'un facteur 2, mais vous avez réduit sa surface d'un facteur 4 et,

par conséquent, la quantité de chaleur est doublée par unité de surface. On a de plus en plus de difficulté à retirer cette chaleur. N'essayez pas de mettre le doigt sur le *Pentium* de votre micro-ordinateur, vous vous brûleriez.

Signalons un inattendu heureux qui pourrait résoudre le problème de l'évacuation de la chaleur : la possibilité de réaliser facilement et à moindre coût des couches de diamant polycristallin. Pour cela, on utilise un plasma dans lequel il y a du méthane, de l'hydrogène et un peu d'oxygène : alors que les chercheurs qui ont fait l'expérience s'attendaient probablement à fabriquer du graphite, ils ont vu se constituer une couche de diamant. Le diamant est un semi-conducteur, mais avant qu'on l'utilise en tant que tel, il faudrait surmonter nombre de difficultés ; en revanche, c'est le corps qui conduit le mieux la chaleur de tous les corps connus. Le diamant est dix fois plus conducteur de la chaleur que le cuivre et, à ce titre, il offre des possibilités qui n'ont pas, jusqu'à présent, été utilisées.

Une deuxième limite résulte des interconnexions métalliques entre transistors qui ne peuvent avoir de dimensions supérieures à celles du transistor. Les densités de courant dans ces conducteurs sont très supérieures à celles qui passent dans un fil électrique alimentant un four de ménagère, et un phénomène perturbateur, l'électromigration, pénalise le passage du courant. Tout se passe comme si les électrons, en déplaçant, augmentaient la résistivité des fils. Actuellement on utilise du tungstène, métal assez peu sensible à l'électromigration, mais non sans mal : le dépôt en couche mince photolithographique de tungstène est plus difficile que le dépôt de conducteurs plus courants.

Un autre handicap est purement économique : pour construire une usine de fabrication de transistors de 0,35 micromètre, il faut investir 1,5 milliard de dollars. La disponibilité des capitaux n'est pas infinie.

À de telles tailles, il faut lutter contre l'invisible : quand vous manipulez des circuits par des méthodes photolithographiques, avec des largeurs de traits de 0,35 micromètre, une poussière de la taille d'un virus se traduit, lors de la photolithographie, par une petite tache noire qui coupe une connexion. Par conséquent, toutes les manipulations sont automatisées : la présence d'un être humain dans les parties de lignes de fabrication où se déroulent les opérations les plus critiques augmente les taux de poussière. Les usines de fabrication de transistors sont plus stériles que celles qui sont utilisées par les biologistes. On comprend que ces usines soient extrêmement coûteuses.