

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 apparaîtrait 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.

EFFICACITÉ, MORALE ET RÉCOMPENSE

Les industries qui ont réussi dans la fabrication du transistor ne sont pas celles qui confectionnaient des tubes à vide. Dans les années 1950, les entreprises d'électronique, celles qui utilisent les composants, se rendent compte que le transistor change leur vie, et elles créent une activité semi-conducteur. Dans certains cas, cette activité est confiée, presque naturellement, aux gens qui, dans les mêmes entreprises, faisaient des tubes à vide. Les résultats ne sont pas bons. En revanche, quand la fabrication est confiée à des unités nouvelles où des ingénieurs connaissent la physique des semi-conducteurs, les résultats sont meilleurs.

L'augmentation du nombre de transistor dans des circuits de plus en plus complexes amène une autre difficulté : le test. Comment savoir qu'une poussière ou une erreur de programmation ne s'est pas introduite ? Un mathématicien a vu, il y a deux ans, qu'une erreur s'était introduite dans le *Pentium*. Ce genre d'erreur est inévitable : si on voulait tester toutes les configurations possibles d'un microprocesseur, il faudrait plusieurs milliards d'années. Donc les circuits ne sont pas testés dans toutes les configurations.

On se demande toujours si les physiciens qui ont ainsi changé la face du monde ont été suffisamment récompensés : Bardeen a été le premier homme au monde à recevoir deux prix Nobel (associé à d'autres) dans la même discipline, la physique. Le prix Nobel est associé à une bonne somme d'argent, de l'ordre de quatre millions et demi de francs, et Bardeen a touché trois millions, ce qui est insuffisant pour le considérer comme un homme extraordinairement riche. C'est le prix d'un appartement modeste à Paris.

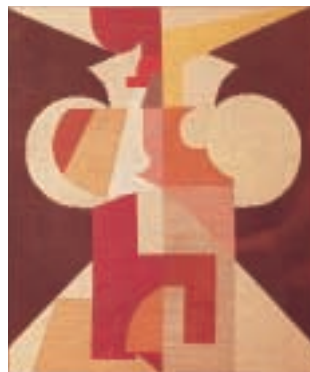
En revanche, le prestige des trois inventeurs a été immense : Bardeen a été nommé professeur dans une université où sa carrière fut brillante. Brattain est resté un chercheur heureux à la *Bell*, jusqu'à sa retraite. Shockley a essayé de se lancer dans l'industrie : il a créé une entreprise qui a été absorbée. Je ne crois pas que Shockley ait fait fortune. Comment déterminer la juste et morale récompense pécuniaire d'une telle invention ? Je ne sais, et je me demande si cela a tellement d'importance...

Pierre AIGRAIN est membre de l'Académie des sciences. Une retranscription de ce débat, enregistré avec Émile Noël au Palais de la Découverte, sera diffusée sur France Culture le 11 septembre à 9 heures.

SCIENCES D'AVENIR

PASCAL CHOSSAT

LES SYMÉTRIES BRISÉES



POUR LA
SCIENCE
DIFFUSION BELIN

LES SYMÉTRIES BRISÉES

Pascal Chossat

La symétrie, de simple conséquence des lois physiques, est devenue principe d'explication dans des domaines aussi divers que les transitions de phase ou la turbulence.

La théorie des brisures de symétrie rend compte de la diversité des phénomènes en s'attachant aux symétries perdues, «brisées», d'un état originel.

Elle donne une nouvelle compréhension de la genèse des formes dans la nature.

Voir bon de commande p. 98

POUR LA
SCIENCE
DIFFUSION BELIN