

TOUJOURS PLUS PETIT !

Un smartphone comporte des circuits intégrés qui sont composés de millions de transistors. Ces transistors sont capables de capter et de transformer les signaux électriques en chiffres, en lettres, en mots, en couleurs et en images. Pour en arriver là, il a fallu des années de recherche et de mises au point avec de nouvelles technologies où la chimie a joué un rôle important. Découvrons la saga du circuit intégré et du micro-processeur, du premier transistor à nos jours.

Le silicium, un cristal magique

La plupart des semi-conducteurs sont à base de silicium. Le cristal de silicium est de forme cubique avec la structure du diamant qui est une phase très dure du carbone.

Pour fabriquer des transistors, on utilise du silicium ultra-pur afin de pouvoir le doper avec des traces d'impuretés bien choisies qui lui donneront les propriétés électroniques d'un semi-conducteur (voir aussi le chapitre « Exploder un smartphone »).



Remarque

La réaction de réduction s'écrit :
 $\text{SiO}_2 + \text{C} \rightarrow \text{Si} + \text{CO}_2$;
 elle s'effectue à très haute température (plusieurs milliers de degrés).

La chimie du silicium

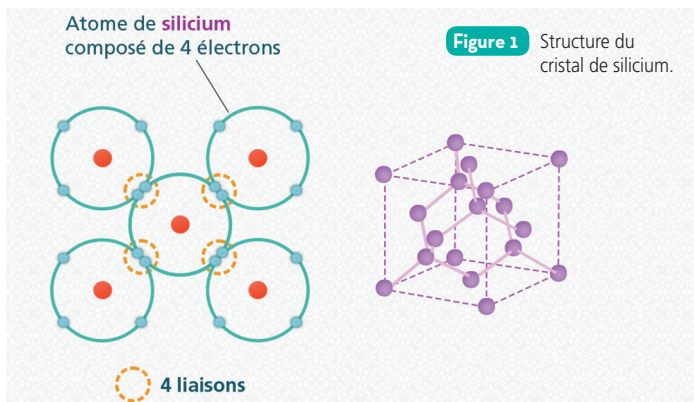
La matière première du silicium est la silice, c'est-à-dire du sable de formule SiO_2 .

Dans un grand creuset, on mélange le sable (SiO_2) avec du charbon (C) très pur et on chauffe l'ensemble grâce à des électrodes



L'atome de silicium

Dans ce cube, les atomes de silicium sont toujours entourés de quatre voisins et dessinent un magnifique réseau de tétraèdres. Comme le silicium a quatre électrons sur sa couche externe, il les échange avec ses voisins pour faire quatre liaisons bien fortes (*Figure 1*).



Les électrons externes (ou périphériques) sont les électrons les plus éloignés du noyau dans un atome.

en carbone qui font passer un très fort courant. Le silicium fondu s'écoule, il est purifié à l'oxygène qui brûle ses impuretés. Après solidification sous forme de lingots ou de petites billes, on dispose d'un silicium pur à 99 %. Cependant, pour obtenir la qualité électronique ultra-pure à 99,999 999 %, il faut passer par des dérivés chlorés tels que le trichlorosilane (SiHCl_3) ou le tétrachlorosilane (SiCl_4) qui sont liquides et peuvent être purifiés par distillation.

Après décomposition des chlorures à une température d'environ 900 °C, le silicium est très pur mais on doit encore lui faire subir une transformation : la cristallisation. On plonge dans un bain de silicium fondu à 1 500 °C (sur la *Figure 2*) ① un germe cristallisé d'où on tire, progressivement, un monocristal ② que l'on refroidit en l'étirant ③. On obtient alors un monocristal de silicium qui peut atteindre plusieurs dizaines de centimètres de diamètre.

La **distillation** permet de séparer plusieurs liquides qui ont des points d'ébullition différents (exemple l'eau et l'alcool pour faire le cognac à partir du vin, à consommer avec modération).

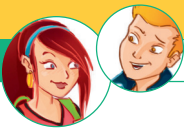
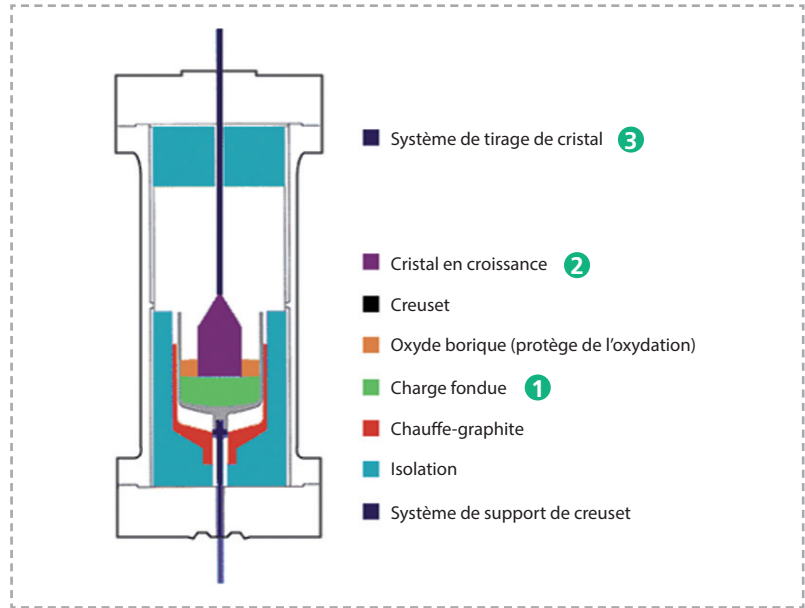


Figure 2

Système utilisé pour obtenir un monocristal de silicium.



Le monocristal est ensuite découpé en très fines galettes de 0,2 mm avec une scie circulaire diamantée. La galette est alors polie avec du carbure de silicium (SiC) puis avec un mélange de fluorure d'hydrogène (HF) et d'acide nitrique (NO_3H) en finition. Après rinçage, les « wafers » sont prêts pour l'implantation de transistors et de circuits intégrés.



Un **wafer** est un disque fin de silicium ultra pur poli et nettoyé sur lequel vont être implantés les millions de transistors.

Le silicium semi-conducteur

On a vu dans la structure du cristal de silicium qu'il était composé de tétraèdres d'atomes de silicium très liés et bien stables ; chaque atome de Si échange avec ses voisins silicium ses quatre électrons. Si dans ce silicium ultra-pur, on introduit des traces d'impuretés, suivant leurs structures électroniques, elles vont changer ses propriétés électriques.



Si on remplace un atome de silicium Si par un atome de phosphore P (cinq électrons périphériques), ce dernier va échanger quatre électrons avec ses quatre voisins mais il en restera un de trop qui sera libre et pourra sauter le gap d'énergie entre la bande de valence et la bande de conduction. Si les porteurs de charges sont les électrons (charges négatives), on parlera d'un semi-conducteur de type N (*Figure 3*).

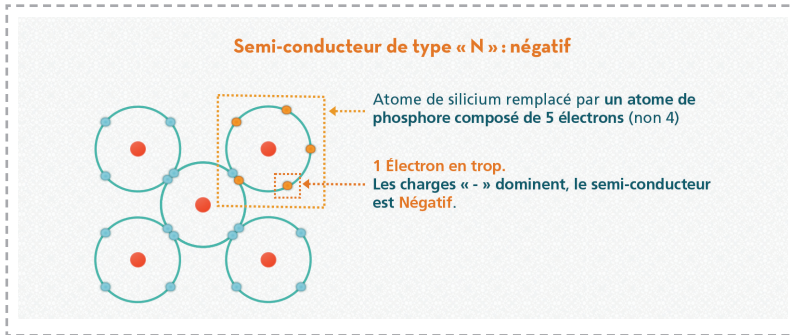


Figure 3

Effet sur les propriétés électriques du cristal de silicium, de l'introduction d'un atome de phosphore.



Si on remplace un atome de silicium par un atome de gallium qui n'a que trois électrons sur sa couche externe, nous sommes dans le cas contraire et il va manquer un électron. Ce manque est un « trou » qu'il va falloir compenser par une charge positive (+) dominante : on parle alors de semi-conducteur de type P (*Figure 4*).

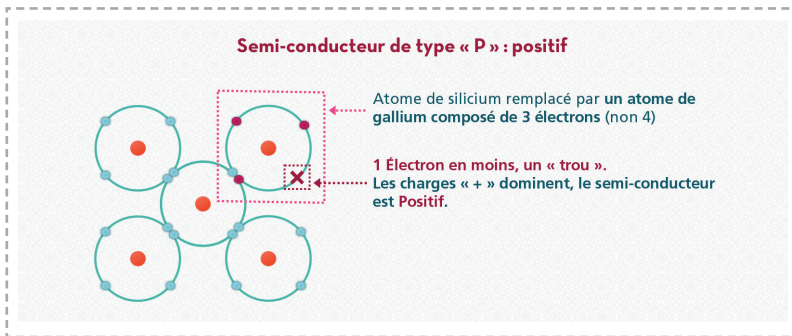


Figure 4

Effet sur les propriétés électriques du cristal de silicium, de l'introduction d'un atome de gallium.

Les échanges électrons/trous à travers un gap d'énergie produisent un courant si on vient perturber l'équilibre du semi-conducteur.

Le transistor comme interrupteur ?

Vous avez sûrement vu des régiments d'hirondelles bien serrées sur des fils électriques. Imaginons deux populations sur deux fils séparés de 20 centimètres (*Figure 5*).

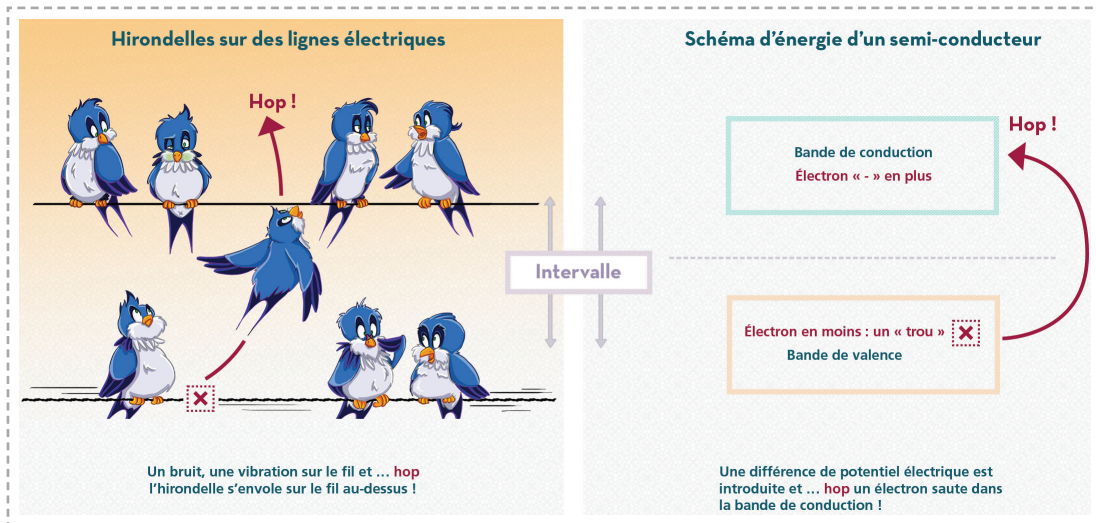


Figure 5

Analogie entre des électrons dans un semi-conducteur et des hirondelles sur des lignes électriques.

Brusquement, l'une dérangée par un bruit, une vibration, s'envole. Elle bat des ailes et dépense donc de l'énergie pour gagner le fil du haut. Sur ce dernier, dans la rangée, il y a une hirondelle de trop et dans la rangée du bas, il y a donc un trou. Ce trou peut être comblé par les hirondelles du bas qui se déplacent mais aussi par une hirondelle du haut qui se sent trop serrée. Dans les deux cas, il y a eu transport et déplacement d'hirondelles.

Si on remplace les hirondelles par des électrons, on retrouve le schéma d'énergie d'un semi-conducteur. Entre la bande de valence du bas et la bande de conduction du haut, il y a un saut d'énergie le « gap » ou intervalle. Pour faire sauter un électron du bas vers le haut, il faut lui fournir de l'énergie par une différence de potentiel par exemple. Si le potentiel est insuffisant, l'électron ne pourra pas sauter, et c'est seulement si le potentiel est plus grand que le gap (un volt pour le silicium) que l'électron sautera en créant par son départ un trou dans la bande de valence.

Le transistor fonctionne comme un interrupteur (*Figure 6*).

Pour appliquer une tension, on se sert de trois électrodes sur un silicium dopé P (P comme positif). Par les électrodes (source et drain), on instille des charges négatives N. Au repos, aucun courant ne passe entre les électrodes (*Figure 6A*). Si on applique une tension suffisante sur la grille, la polarité du silicium (+) est inversée et devient (-) et le courant circule alors entre la source et le drain. On est donc passé

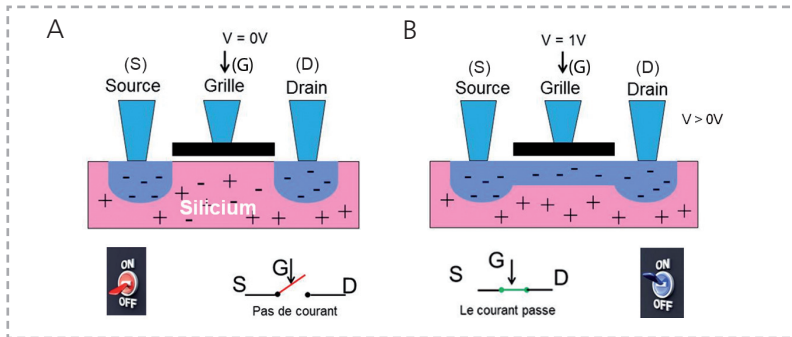


Figure 6

Schéma de fonctionnement d'un transistor sans courant (A) et avec courant (B).
Source : ST Microelectronics

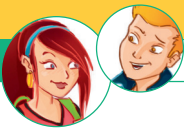
d'une configuration « pas de courant ou très faible courant (OFF) » à une « configuration courant qui passe (ON) » (Figure 6B). On peut affecter des chiffres à ces situations : 0 à OFF et 1 à ON. On vient de fabriquer une première mémoire électronique.

Les fabrications de transistors sont de deux types. À haute performance, pour les microprocesseurs, le courant est de quelques centaines de microampères (ON # 10^{-3} ampère). En ce qui concerne les transistors basse consommation, pour les téléphones portables, les smartphones et les lecteurs mp3, le courant est plus faible (ON # 10^{-6} ampère) et (OFF # 10^{-9} ampère), ce qui minimise la consommation et sauvegarde l'autonomie des objets nomades.

Du transistor à la puce intelligente

Quand on démonte un smartphone, son « cerveau » se présente sous la forme d'un boîtier de un à deux centimètres de côté avec sur chacun de ses quatre côtés une multitude de pattes de connexion (Figure 7A). Si on ouvre le boîtier, on découvre « la puce » qui renferme toutes les fonctions électroniques reliées à l'ensemble du smartphone par ses connexions (Figure 7B).

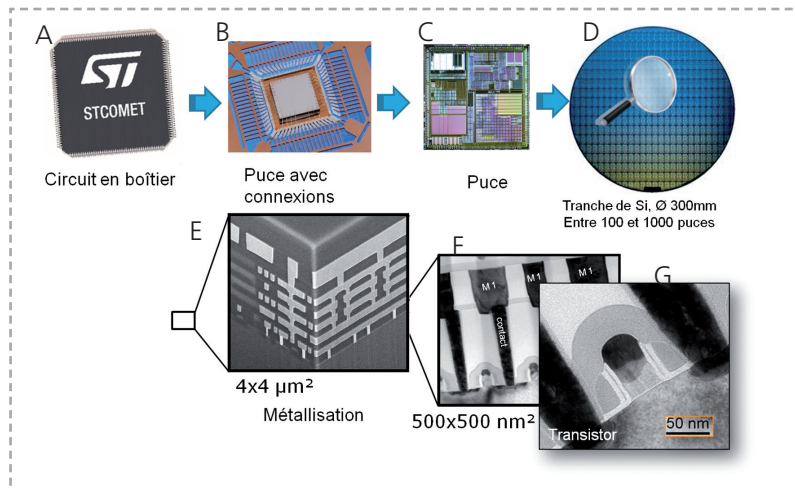
En détachant les connexions, la puce apparaît. C'est un support de silicium qui a été détaché du « wafer » que nous avons vu précédemment.



Au microscope électronique, on peut encore décortiquer et examiner l'intérieur de la puce de quelques mm² et tout d'abord les bandes en couches très minces de métal, qui par une interconnexion en trois dimensions, relie entre eux les transistors (*Figure 7E*).

Figure 7

Du circuit au transistor : le circuit en boîtier (A) ; la puce avec connexions (B) ; la puce (C) ; la plaquette de silicium 300 mm (D) ; la métallisation ou « back-end » (E) ; zoom sur la métallisation (F) ; zoom sur un transistor (G).
Source : ST Microelectronics.



Remarque

Un cheveu a une épaisseur moyenne de 50 microns (un micromètre = 10⁻⁶ m), c'est dire que le transistor est 1 000 fois plus fin.

À l'échelle inférieure, apparaissent les transistors proprement dits, avec la métallisation qui permet les contacts entre le silicium et les électrodes que nous venons de voir, la source, le drain et la grille (*Figure 7F et 7G*).

À ce niveau, on voit que le transistor n'est pas plus grand que 50 nm (nm = nanomètre ou 10⁻⁹ m).

On peut en placer des millions et même des milliards par cm². Aujourd'hui, dans un smartphone, il y a plus de puissance de traitement informatique que celle regroupant tous les ordinateurs de la NASA, qui en 1969, ont porté les spationautes sur la Lune.

Pour accomplir cette performance technologique des appareils grand public, il faut au moins deux centaines d'opérations physico-chimiques qui doivent toutes se pratiquer en salle blanche (ateliers sans aucune poussière), quasi toutes automatisées, avec quantité de composés chimiques : acides, solvants, polymères, gaz, tous extrêmement purs.

La loi de Moore

C'est le physicien W.B. Shockley qui, en 1947, a découvert le phénomène du transistor sur un montage un peu « bidouillé » d'un cristal de silicium. Puis la société américaine TEXAS Instrument sortit un premier circuit élémentaire (un transistor – une résistance – une capacité) dans les années 1960. Les premiers vrais microcircuits et processeurs sont apparus dans les années 1970. Le premier de TEXAS comportait 2 000 transistors ; alors que le Pentium 4, 27 ans plus tard, en contenait 50 millions.

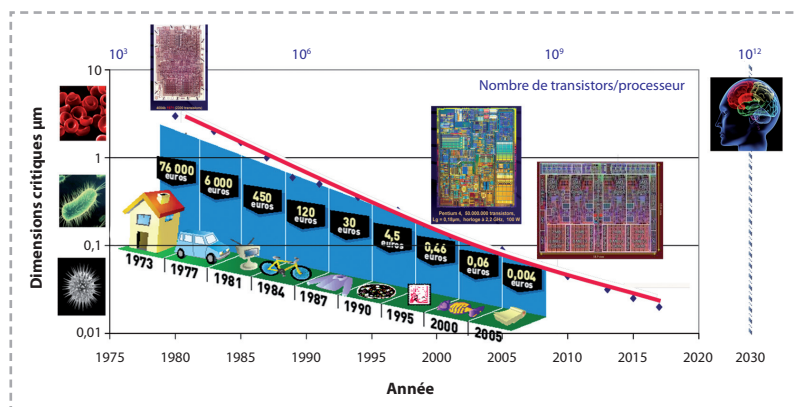


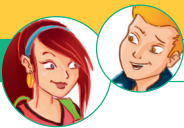
Figure 8

En 1973, fabriquer un million de transistors coûtait 74 000 euros alors qu'actuellement le coût est inférieur à 0,01 euro !

Actuellement, les derniers micro-processeurs d'Intel atteignent deux milliards de transistors. En une quarantaine d'années, on a pu réduire la taille des transistors de quelques microns (la taille d'un globule rouge) à quelques dizaines de nanomètres (la taille d'un virus). C'est ce qui permet d'obtenir des tablettes et des smartphones assez puissants et capables comme un ordinateur de surfer sur Internet. Cette miniaturisation s'est accompagnée d'une production de masse qui a permis une réduction drastique des coûts (Figure 8).

Gordon Moore, docteur en chimie et fondateur de la société Intel, avait prédit, dès 1965, que le nombre de transistors que l'on pouvait graver sur support de silicium allait doubler tous les ans. Baptisée « loi de Moore », cette prédiction a été revue en 1975 (doublement tous les deux ans) et à nouveau en 2010 (doublement tous les trois ans).

Elle débute avec 16 000 transistors en 1975 pour atteindre 256 millions en 2000 et quatre milliards en 2015. Ceci a été obtenu en passant d'une



technologie de limite de gravure de 120 nm à 32 nm et un nombre d'opérations nécessaires à la fabrication de la puce passant de 180 à 280.

Cette course à la miniaturisation conduit à la généralisation de toute la microélectronique à l'informatique, à la robotique, à la communication, aux objets connectés, qui ont permis des progrès immenses en productivité. Ces avancées doivent beaucoup à la physico-chimie de la gravure, c'est la lithographie.

La Lithographie



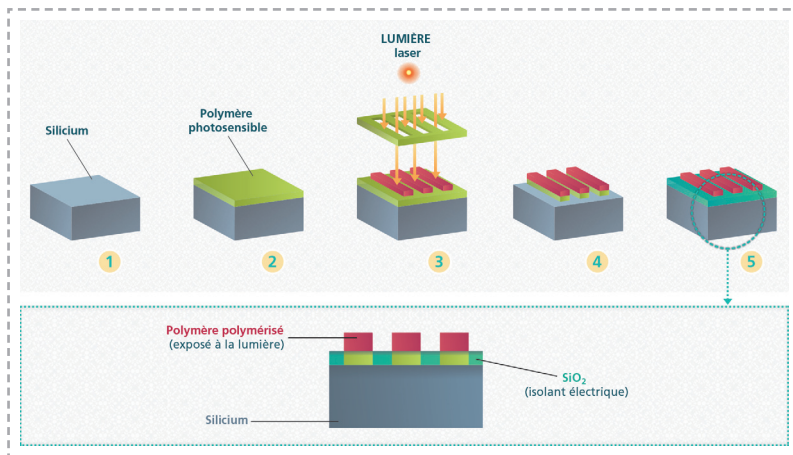
Un polymère photosensible est un composant qui se polymérise uniquement dans les zones qui sont exposées à la lumière.

La lithographie est une technique qui ressemble à la photographie argentique. Les zones exposées à la lumière développent une réaction chimique qui fait qu'elles se différencient ensuite, lors de l'attaque par un solvant chimique, soluble ou insoluble. Ici, on utilise un rayonnement optique, une lumière si possible d'une très faible longueur d'onde fournie par un laser ou un rayonnement X. Cette lumière passe à travers un « masque » où des trous ont été dessinés en liaison avec la structure et l'arrangement des zones du processeur. On revêt le silicium d'un polymère photosensible (*Figure 9*).

On dissout le polymère non polymérisé par un solvant sur les zones non exposées. Puis par un procédé d'oxydation à l'oxygène, on développe sur ces zones une couche de dioxyde de silicium (SiO_2) qui est un isolant électrique.

Figure 9

La lithographie réalisée grâce à la lumière d'un laser.





Avec un nouveau masque, on renouvelle l'opération pour obtenir des zones de silicium qui pourront être exposées à un gaz contenant un dérivé phosphoré pour doper, par recuite, ces zones.

On renouvelle ces opérations : dépôt, illumination, dissolution, isolation électrique, traitement thermique, dopages, métallisation, gravures... sur le substrat de départ.

Pour mettre en œuvre ces différentes opérations, divers réactifs (HF, NO_3H , NH_4OH), solvants organiques, gaz neutres et gaz chargés en dérivés phosphorés ou du gallium sont utilisés. Le point essentiel est que tous ces réactifs doivent être d'une grande pureté « électronique » et exempts de poussières.

Ils sont préparés par des branches spécialisées de l'industrie chimique. Tout au long de la fabrication et de ces opérations, des contrôles dimensionnels très stricts sont réalisés. L'un des objectifs principaux est, par exemple, de respecter l'isolation électrique entre les différents transistors individuels séparés par quelques dizaines de nanomètres (nm). Quand on place un milliard de transistors sur environ 1 cm^2 , il faut aussi tenir compte de l'échauffement possible de quelques dizaines de degrés d'un transistor à l'état passant (courant ON) sur son voisin à l'état bloqué (courant OFF).

Quand un milliard de transistors doivent être interconnectés, on imagine la complexité du plan en 3D qui doit être suivi et des opérations en salle blanche avant l'encapsulation de la puce.



Remarque

De même, pour la métallisation, dans les années 1970, on empilait deux niveaux de couches de transistors, les pattes métalliques passant d'un niveau à l'autre. Actuellement, le nombre de couches est passé de 3-4 à 13 étages qui exigent des « ascenseurs », des « escaliers » des « autoroutes » métallisés à l'intérieur du circuit intégré pour que les électrons et le signal puissent circuler.

Conclusion

La fabrication des circuits intégrés et des micro-processeurs a atteint une maturité technologique formidable grâce à des investissements des grands groupes américains, japonais, coréens, franco-italiens (ST Microélectronique) et une recherche de pointe. Dans nos smartphones, on pourrait stocker plus de 100 dictionnaires ! un dictionnaire représente environ dix mégaoctets, ce qui correspond à peu près à 1 mm^2 du cœur de la puce soit une tête d'épingle.