

Chapitre I

Introduction à la Microélectronique

1 LA MICROELECTRONIQUE

L'arrivée de la *microélectronique* a révolutionné le monde grâce aux innovations qu'elle a apportées dans des domaines tels que celui de l'électronique, de l'informatique, de la téléphonie et bien d'autres. Cette discipline a permis de miniaturiser des systèmes complexes, comme par exemple les ordinateurs. Un des premiers ordinateurs, pesait 30 tonnes, et avait des dimensions impressionnantes de 30m de longueur, 1m de largeur et 2,5m de hauteur. D'un point de vue performances, il ne faisait au plus que quelques dizaines d'instructions par seconde. Aujourd'hui un dispositif semi-conducteur de quelques millimètres carrés pesant quelques grammes, possède des performances de loin supérieures, qui sont de l'ordre de plusieurs milliards d'instructions par seconde. La microélectronique a ainsi permis de développer des produits de plus en plus performants, et de moins en moins chers. La clé de cette révolution est le *circuit intégré* (en abrégé *C.I*) appelé aussi la *puce* ou encore le *chip*.

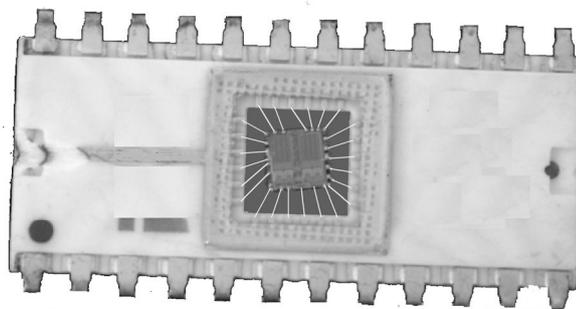


Figure 1.1 Un Circuit intégré au centre d'un boîtier

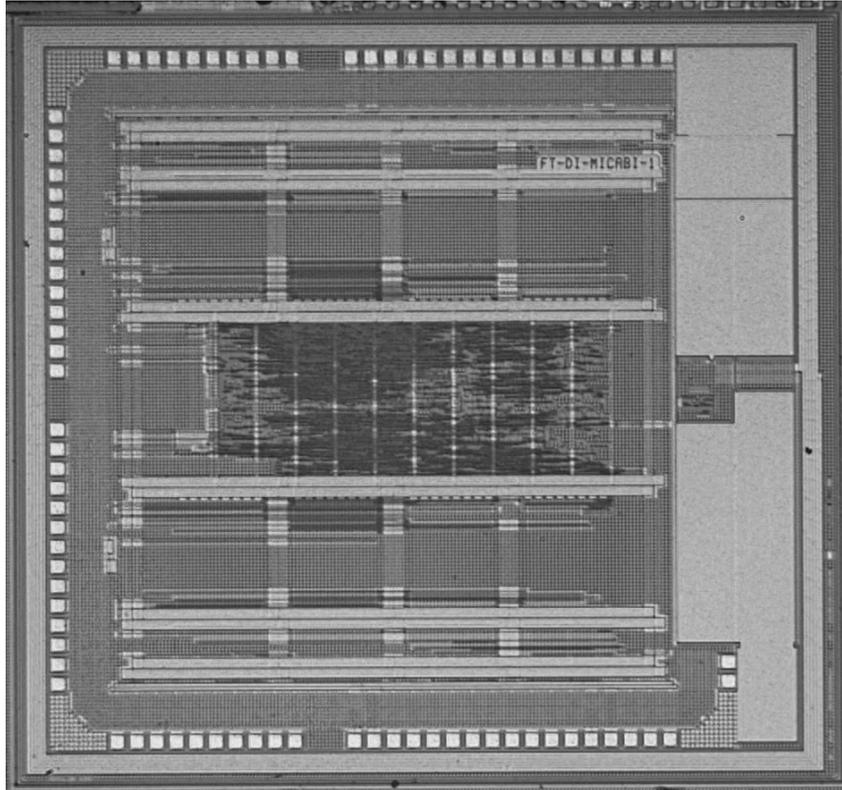


Figure 1.2 Un Circuit intégré, hors de son boîtier
(Layout fabriqué par le service CMP de Grenoble)

Un circuit intégré se présente vu de l'extérieur sous la forme d'un *boîtier* qui possède des *broches* pour communiquer (voir la figure 1.1). A l'intérieur du boîtier on trouve le circuit intégré proprement dit, qui est constitué d'une pastille de silicium (voir figure 1.2). Un C.I se caractérise par son degré d'*intégration*. On distingue les circuits:

- SSI (small scale integration), à faible échelle d'intégration
- MSI (medium scale integration), à moyenne échelle d'intégration
- LSI (large scale integration), à grande échelle d'intégration
- VLSI (very large scale integration), à très grande échelle d'intégration
- et ULSI (ultra large scale integration), à ultra grande échelle d'intégration

1.1 Description d'un circuit intégré

Un C.I est constitué d'un morceau de silicium monocristallin (voir figure 1.3) qui a la forme d'un parallélépipède. Ce dernier mesure quelques millimètres de côté, avec une hauteur qui est de l'ordre de quelques centaines de microns (millièmes de millimètres). On distingue à la périphérie du circuit les *plots* d'entrées/sorties qui servent à connecter le circuit aux broches du boîtier. A l'intérieur on distingue des *blocs* où l'information est traitée ou stockée (portes logiques, multiplieurs, UAL, mémoires...). Ces blocs sont reliés entre eux par des pistes d'interconnexion pour échanger l'information. Les blocs sont formés essentiellement de rectangles de

différents matériaux qui se chevauchent pour former des assemblages de *transistors* (voir figure 1.4).

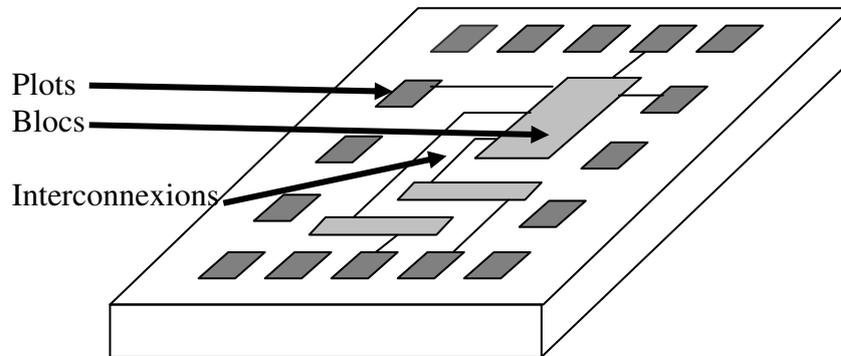


Figure 1.3 Représentation d'un circuit intégré hors du boîtier

En coupe, on distingue au microscope la superposition de plusieurs couches différentes: principalement de *semi-conducteur* et de métal, séparées par des couches d'isolant ou d'oxyde (voir figure 1.5).

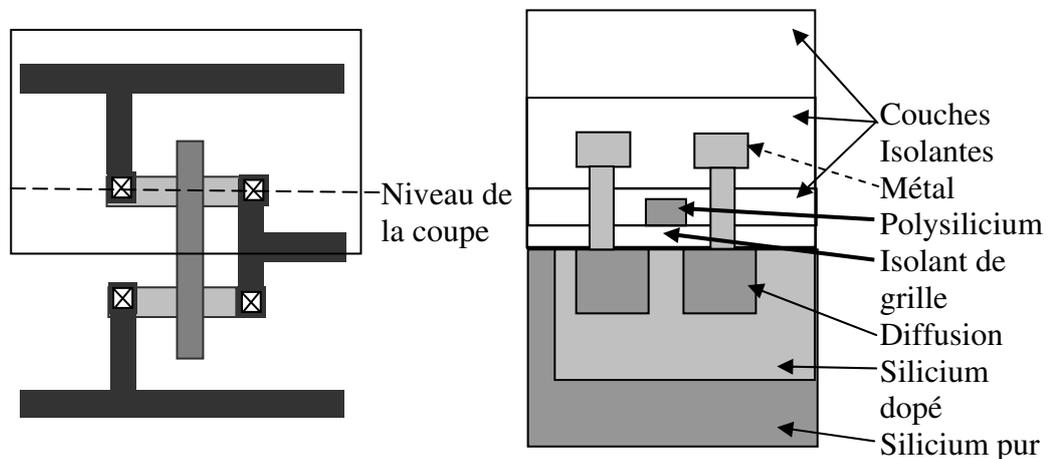


Figure 1.4 Exemple de bloc fonctionnel **Figure 1.5** Exemple de coupe

1.2 Evolution des circuits intégrés

Avec le temps, les techniques de fabrication ont évolué et ont permis d'améliorer la précision des dispositifs utilisés. En conséquence, la taille des transistors fabriqués a baissé progressivement (voir figure 1.6) pour atteindre très vite des dimensions microscopiques. A titre indicatif, sur un cheveu qui a approximativement un

diamètre de 100 microns, on peut mettre actuellement plus de 1000 transistors l'un à côté de l'autre.

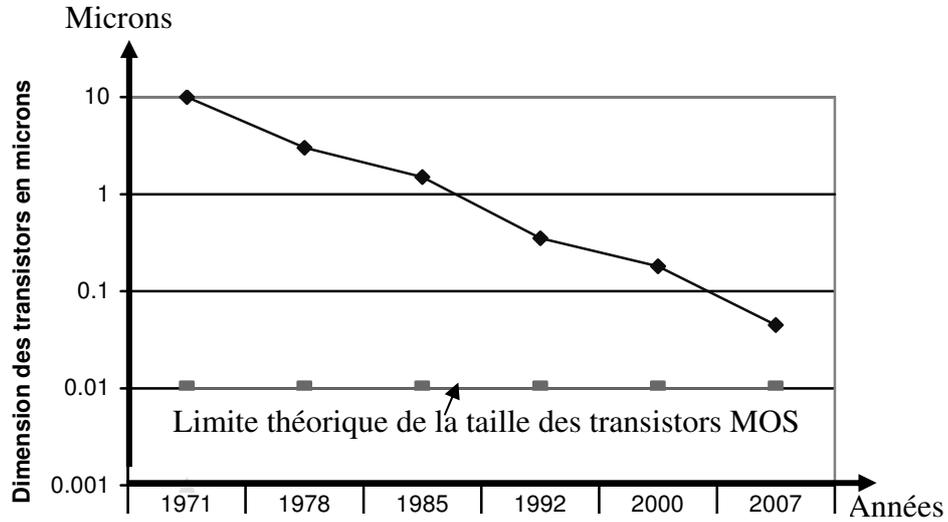


Figure 1.6 Evolution de la taille des transistors de microprocesseurs

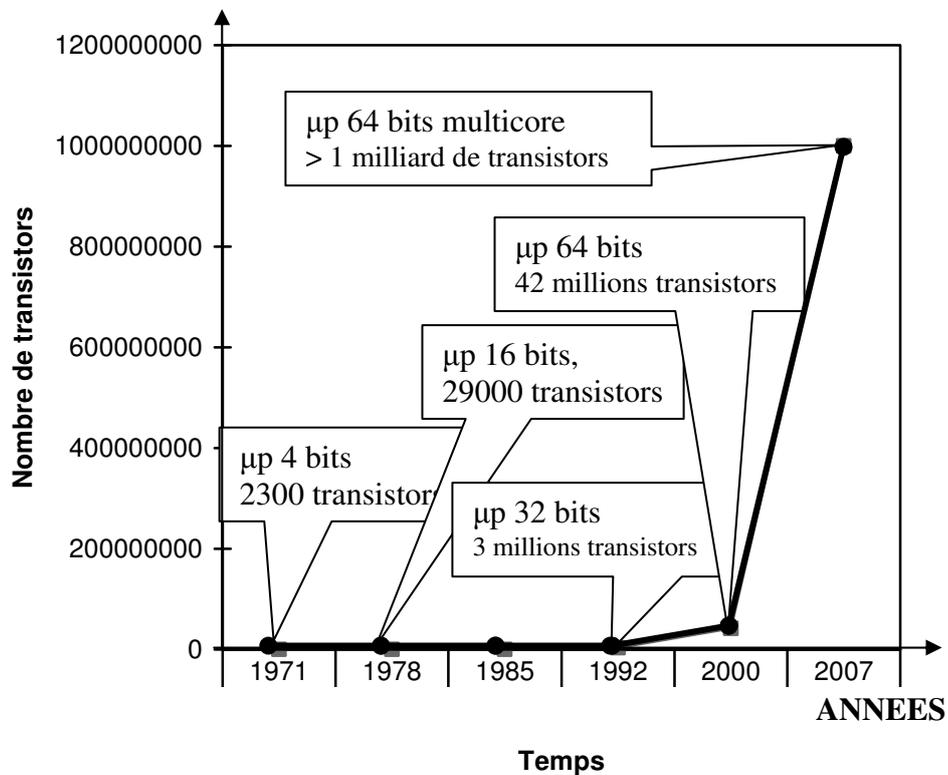


Figure 1.7 Evolution du nombre de transistors des microprocesseurs

D'autre part, plus la taille des transistors était petite et plus il était possible d'en mettre sur une puce, un nombre de plus en plus grand. On a d'ailleurs constaté que le nombre de transistors des C.I doublait approximativement toutes les 1,5 années (Loi de Moore). Ce qui implique une évolution exponentielle du nombre de transistors avec le temps, comme on peut le voir dans la courbe de la figure 1.7. Cette évolution a abouti à l'avènement de puces avec un niveau d'intégration de l'ordre du milliard de transistors.

De même, plus le nombre de transistors mis dans une puce augmentait, plus le nombre de fonctions intégrées augmentait aussi. En conséquence avec le temps, les C.I devenaient de plus en plus sophistiqués. Au départ les C.I consistaient en de simples portes logiques ou bascules. Puis à partir des années 70 des petits *microprocesseurs* à 4 bits sont apparus ainsi que de petites *mémoires* de quelques KOctets. Cette tendance s'est confirmée avec l'avènement des premiers microprocesseurs 8 et 16 bits et des mémoires de moyenne capacité. Enfin les microprocesseurs de 32 et de 64 bits utilisés avec des mémoires de grandes capacités, ont révolutionné le monde de par leurs applications scientifiques et domestiques. Aujourd'hui ces progrès permettent d'obtenir des produits impensables il y a seulement de cela quelques années, et tout laisse à croire que nous ne sommes pas au bout de nos surprises.

2 MINIATURISATION

Après avoir constaté l'impact de la miniaturisation d'une façon intuitive, on peut le vérifier mathématiquement à travers des équations (qui seront démontrées dans le chapitre VI). Soient L et W la longueur et la largeur respectives d'un circuit intégré initial et S ($S > 1$) un rapport de miniaturisation. Soient L' et W' la longueur et la largeur respective du circuit intégré après miniaturisation, tels que :

Grandeurs de départ :

- Longueur L
- Largeur W

Grandeurs après miniaturisation :

$$L' = \frac{L}{S}$$

$$W' = \frac{W}{S}$$

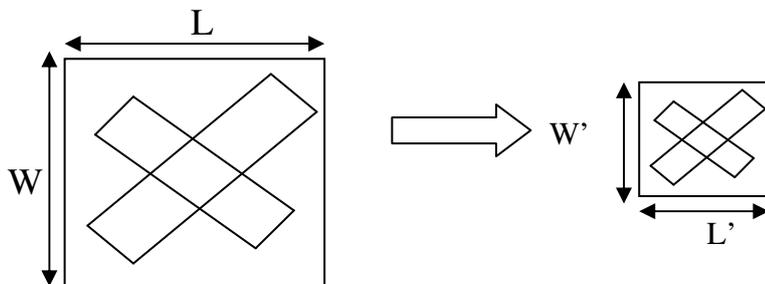


Figure 1.8 Illustration du processus de miniaturisation

On a alors :

- Vitesse F $F' = F \cdot S^2$
- Puissance P $P' = \frac{P}{S}$

Les équations ci-dessus indiquent qu'après la miniaturisation d'un circuit avec un facteur de miniaturisation S , la fréquence de l'horloge est accélérée avec un facteur S^2 , tandis que la consommation d'énergie est divisée par S .

Par exemple : si $S=2$, cela veut dire qu'en réduisant la taille d'un circuit de moitié, sa consommation d'énergie diminue de moitié tandis que sa fréquence d'horloge est multipliée par 4.

Comme on peut le constater, il est intéressant de miniaturiser au maximum tant que cela est possible techniquement et économiquement, bien sûr. Cette course à la miniaturisation a eu comme conséquence notamment une augmentation constante de la vitesse de fonctionnement des circuits en général et des microprocesseurs en particulier. Toutefois le phénomène de la chaleur dégagée a pris une telle ampleur ces dernières années que cela a eu pour effet de limiter la vitesse d'horloge des dernières générations de microprocesseurs par rapport aux prévisions annoncées par les constructeurs.

3 INTERET DES CIRCUITS INTEGRES

Les efforts faits pour fabriquer des circuits intégrés de plus en plus miniaturisés sont motivés essentiellement par les avantages qu'offrent en contre partie ces circuits. On peut citer notamment :

1 Un plus petit nombre de composants dans un système électronique, ce qui implique :

- Des dimensions plus petites des systèmes,
- Des systèmes plus légers,
- Une production en série plus simple,
- Une réduction de la fréquence des pannes,
- Une maintenance plus simple,
- Des coûts plus faibles.

Les avantages des dimensions et du poids réduits sont particulièrement appréciés dans les systèmes embarqués tels que les satellites, les avions, les dispositifs de télécommunication, où le poids et l'espace occupé sont des facteurs cruciaux.

2 Les performances des systèmes sont améliorées grâce à:

- Une plus grande vitesse de fonctionnement,
- Une consommation de puissance plus faible.

L'avantage d'une plus grande vitesse des circuits est notamment apprécié dans les applications en temps réel où la puissance de calcul est indispensable. De plus, la consommation d'énergie est cruciale pour les applications embarquées, car elle conditionne l'autonomie et le poids des batteries. La consommation d'énergie influe aussi sur la quantité de chaleur dissipée par les circuits. La chaleur dissipée peut même compromettre le fonctionnement normal des circuits, ce qui peut nécessiter des dispositifs de refroidissement.

3 Une meilleure protection et confidentialité des systèmes contre le piratage.

Les avantages cités précédemment justifient amplement l'immense effort de recherche et les investissements colossaux qui ont été nécessaires pour arriver aux résultats de la miniaturisation qu'on connaît aujourd'hui.

4 REALISATION DES CIRCUITS INTEGRES

La question qui se pose naturellement est comment concevoir et fabriquer des circuits microscopiques ? La réponse à cette question est l'objet de ce paragraphe. On distingue généralement deux grands domaines d'activités liées à la réalisation des circuits intégrés :

- **La fabrication :** Pour la fabrication, l'intérêt se porte sur les problèmes liés aux semi-conducteurs, tels que la fiabilité, les matériaux utilisés, les rendements de fabrication des C.I. Cette activité nécessite des équipements lourds et chers et se fait dans des usines spécialisées appelées *salles blanches* ou *fonderies*.
- **La conception :** Ici, l'intérêt se porte sur les problèmes d'architecture et de logique liés au fonctionnement des circuits. Cette activité se fait essentiellement sur un ordinateur en utilisant un logiciel de CAO (*Conception Assistée par Ordinateur*).

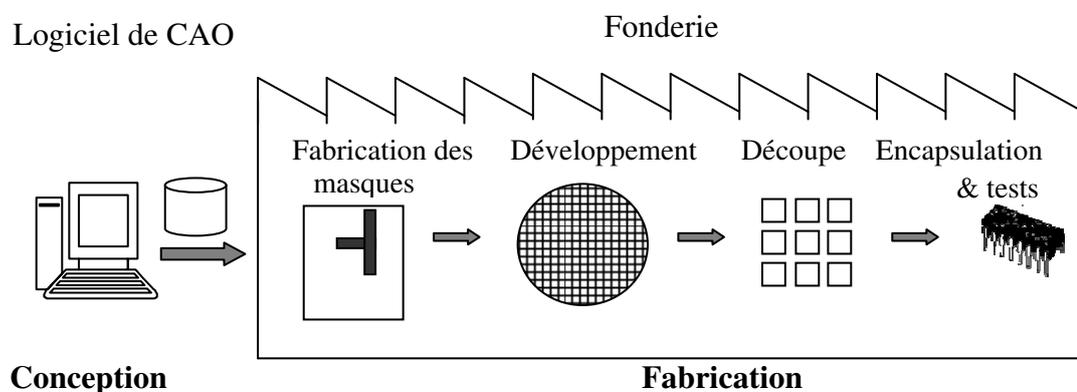


Figure 1.9 Processus de conception et de fabrication

4.1 La fabrication

La possibilité de concevoir et de fabriquer des circuits intégrés a longtemps été le privilège des grandes entreprises et des institutions de recherche. Cependant, à partir du début des années 80, la situation a commencé à changer et la conception des C.I est devenue progressivement à la portée d'institutions plus modestes, et ce pour les raisons suivantes :

- La réduction des coûts de fabrication due à l'évolution de la technologie de fabrication a permis d'augmenter l'intégration tout en améliorant la fiabilité des circuits intégrés.
- La possibilité de faire fabriquer des C.I par des fournisseurs ou fondeurs, sans avoir à acheter des équipements de fabrication qui sont très chers.

4.1.1 Principe de fabrication photo lithographique

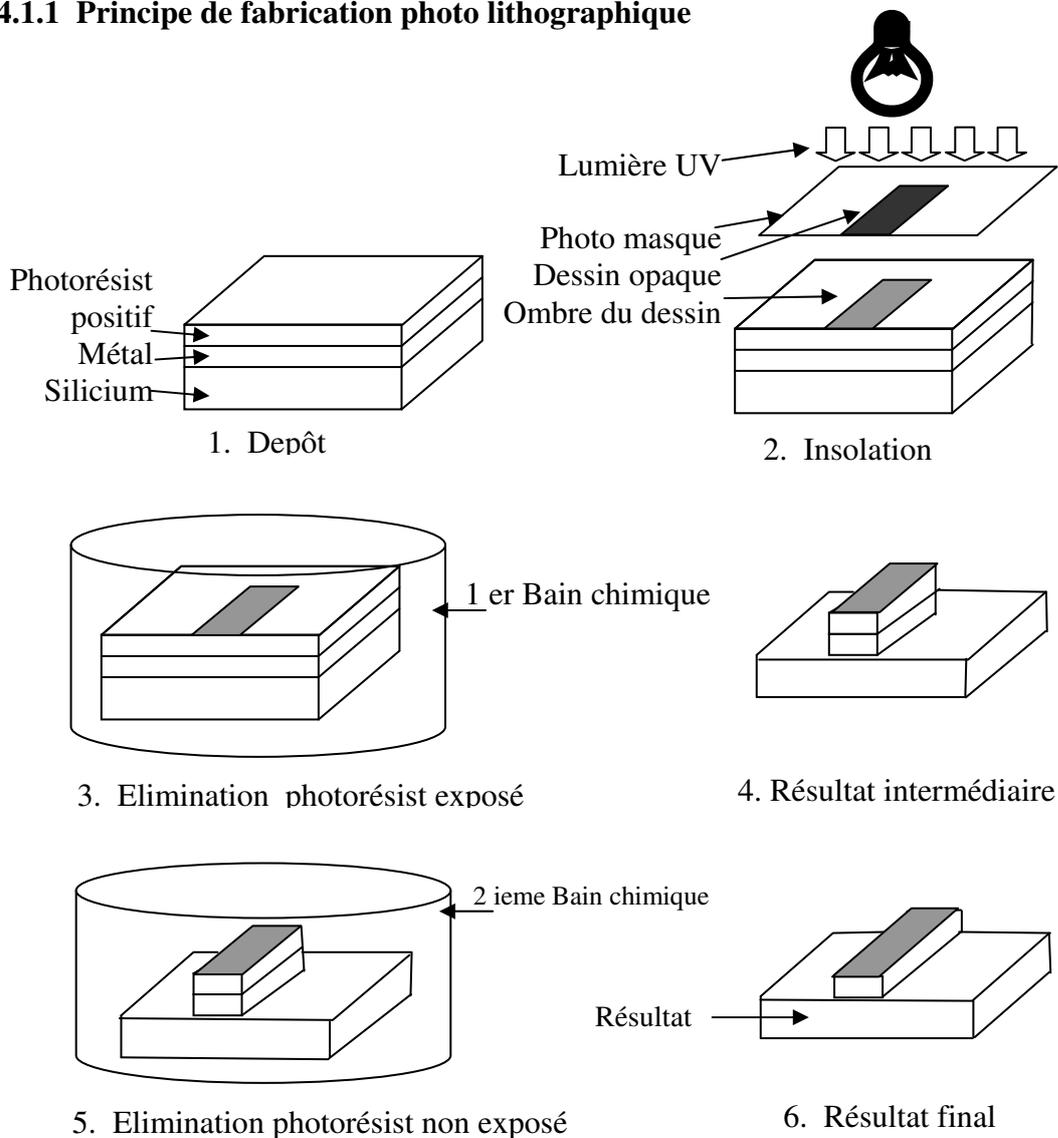


Figure 1.10 Exemple de traitement lithographique