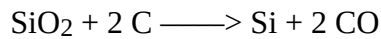


## SILICIUM 2014

**FABRICATION INDUSTRIELLE** : par métallurgie, selon la réaction :



La réduction de la silice a lieu dans un four électrique à arc (à [électrode de carbone](#)) à l'aide de coke de pétrole, de charbons bitumineux et de copeaux de bois. Le volume de CO formé est très important, plus de 5 000 m<sup>3</sup>/t de Si. En conséquence, la charge des fours doit être très poreuse pour évacuer ce gaz. La perméabilité est améliorée par ajout de copeaux de bois.

La cuve du four est animée d'un lent mouvement de rotation. La température est de l'ordre de 1700°C. La difficulté de la réduction est liée à la formation de SiC qu'il faut éviter.

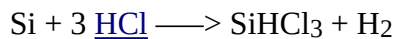
- Pour produire 1 t de Si, les consommations sont les suivantes (en kg) :

Quartz	: 2 900	Copeaux de bois	: 1 580
Coke de pétrole	: 740	Électrodes	: 150
Charbon bitumineux	: 590	Énergie	: 11 000 kWh

- Le silicium obtenu, de qualité métallurgique, a une teneur de 98 à 99 % de Si.

- Le silicium destiné à des applications en photovoltaïque ou en micro-électronique subit ensuite une purification poussée, pour atteindre une pureté supérieure à 99,9999 %.

**Élaboration du silicium de grande pureté** : le silicium de qualité métallurgique est transformé en trichlorosilane (SiHCl<sub>3</sub>). La réaction a lieu en lit fluidisé vers 300°C, en présence de catalyseur :



Le rendement est de 90 %.

SiHCl<sub>3</sub> (qui a une faible température d'ébullition :  $t_e = 31,8^\circ\text{C}$ ) est purifié par distillation fractionnée, il est plus volatil que les chlorures des principales impuretés. Après purification, la teneur en impuretés actives électriquement est inférieure à 1 ppb atomique.

Le trichlorosilane ou le silane (SiH<sub>4</sub>) est ensuite décomposé, en présence de [H<sub>2</sub>](#), à 1000-1100°C, selon le procédé Siemens, sur la surface d'un filament de silicium de pureté électronique, chauffé par effet Joule et placé sous une cloche en silice. Le réacteur peut mesurer jusqu'à 2 m de hauteur et contenir 6 résistances. La vitesse de dépôt est inférieure à 1 mm/h et le rendement est faible. On obtient du silicium polycristallin.

Le procédé, en lit fluidisé, utilisé par REC et SunEdison, consiste à réduire le trichlorosilane ou le silane sur des grains de silicium de qualité électronique, en suspension dans la phase gazeuse. Le silicium formé se dépose sur les grains en suspension qui grossissent. La consommation d'énergie par rapport au procédé Siemens est ainsi réduite de 80 à 90 %. Le silicium polycristallin obtenu est destiné aux applications photovoltaïques.

[Elkem Solar](#) produit du silicium polycristallin destiné à une application photovoltaïque à l'aide d'un procédé hydrométallurgique consommant 1/4 de l'énergie du procédé classique par la voie silane. L'usine, d'une capacité annuelle de production de 6 000 t, est située à Kristiansand, en Norvège.

**PRODUCTIONS** de silicium métallurgique, en 2012, en milliers de t. Monde, hors Etats-Unis : 280, Union européenne, en 2014 : 283.

Chine	1300, en 2014	Allemagne	87, en 2014
Norvège	455, en 2014	Espagne	62
États-Unis, capacités annuelles	150	Afrique du Sud	55
Brésil	133	Russie	52
France	130	Canada	35

Sources : USGS

La production des Etats-Unis, effectuée par deux sociétés, Globe Speciality Metal et Dow Corning, est confidentielle.

**Capacités mondiales de production de silicium polycristallin de grande pureté**, en 2012 : 280 000 t/an destinées à 93 % pour élaborer des cellules photovoltaïques et à 7 % à la microélectronique. En 2014, la production a été de 274 000 t et en 2013, la consommation, de 228 000 t.

#### **Producteurs de silicium de qualité métallurgique :**

FerroAtlantica, possède des capacités de production de 298 000 t/an situées, en France, voir ci-dessous, en Espagne, à Sabón, en Galice (40 000 t/an), en Chine à Mangshi, dans le Yunnan (36 000 t/an), en Afrique du Sud, à Polokwane (55 000 t/an) et à Rand Carbide (12 000 t/an).

Elkem, filiale du groupe chinois Bluestar, produit en Norvège, à Salten (65 000 t/an), Thamshavn (40 000 t/an) et Bremanger (28 000 t/an).

Globe Speciality Metal, possède des capacités de production de 135 000 t/an, aux Etats-Unis, à Beverley, dans l'Ohio, avec 25 000 t/an, à Selma, dans l'Alabama, avec 24 000 t/an, Niagara Falls, dans l'Etat de New York, avec 27 000 t/an et Alloy, en Virginie Occidentale, avec 36 700 t/an, correspondant à 51 % de la joint venture formée avec Dow Corning et au Canada, à Becancourt, dans la province de Québec avec 23 000 t correspondant à 51 % de la joint venture formée avec Dow Corning. En 2015, regroupement des sociétés Globe et FerroAtlantica.

#### **Producteurs de silicium de grande pureté :**

Hemlock (Etats-Unis) : joint venture entre Dow Corning (Etats-Unis) 80,5 % et Shin-Etsu (Japon) 19,5 %. La production est réalisée aux Etats-Unis à Hemlock dans le Michigan. La capacité de production de silicium polycristallin est de 40 000 t/an.

GCL En-Polyergy Holdings, société chinoise, possède une capacité de production de 65 000 t/an.

Wacker (Allemagne) : produit, avec une capacité de 52 000 t/an, du silicium polycristallin de qualité électronique en Allemagne à Burghausen (32 000 t/an) et Nünchritz (15 000 t/an) et aux Etats-Unis à Charleston dans le Tennessee (20 000 t/an, à compter de mi-2015). Sa filiale Siltronic, détenue à 78 % produit des wafers pour des applications en microélectronique, en Allemagne à Burghausen et Freiberg, aux Etats-Unis à Portland dans l'Orégon et à Singapour.

OCI (Oriental Chemical Industries, Corée du Sud) : possède à Gunsan, en Corée du Sud, une capacité de production de 52 000 t/an.

LDK Solar produit du silicium polycristallin, en Chine, à Xinyu dans la province de Jiangxi, avec fin 2014, une capacité de production de 19 200 t/an.

RECSilicon : a produit, en 2014, 18 794 t de silicium de grande pureté dont 16 145 t en lit fluidisé et vendu 3 428 t de composés gazeux de grande pureté du silicium. La production a lieu aux Etats-Unis à Moses Lakes, dans l'état de Washington, pour le photovoltaïque et à Butte, dans le Montana pour l'électronique.

SunEdison produit du silicium polycristallin à Pasadena, Texas, aux Etats-Unis et à Ulsan, en Corée du Sud, en association avec Samsung Fine Chemicals, avec une capacité de production de 13 500 t/an.

Tokuyama, produit du silicium polycristallin à Tokuyama, au Japon, avec 6 200 t/an destinées à l'électronique et en Malaisie avec 13 500 t/an destinées au solaire.

### **Commerce international :**

En 2014, les importations des Etats-Unis ont été de 121 000 t, les exportations de 42 000 t.

En 2012, les exportations de la Chine ont été de 480 000 t, vers le Japon (25 %), la Corée du Sud (19 %) et la Thaïlande (7 %).

### **SITUATION FRANÇAISE :**

**Production**, en 2012, de 130 000 t.

**Producteurs** : la production française est assurée par Ferropem, filiale du groupe espagnol FerroAtlantica, avec des capacités de production de 155 000 t/an de silicium, dans les usines suivantes :

- Anglefort (01) : 38 000 t/an avec 2 fours de 33 MW.
- Château Feuillet (73) : 23 000 t/an avec 2 fours de 20 MW.
- Montricher (73) : 33 000 t/an, avec 2 fours de 17 MW et 1 de 25 MW.
- Les Clavaux (38) : 38 000 t/an avec 3 fours de 12, 26 et 28 MW.
- Laudun (30) : 23 000 t/an.

**Commerce extérieur** : en 2014.

Silicium d'une pureté inférieure à 99,99 % :

Exportations : confidentielles

Importations : 30 286 t à 45 % des Pays Bas, 27 % de Norvège, 5 % d'Allemagne.

Silicium d'une pureté supérieure à 99,99 % :

Exportations : 233 t vers le Royaume Uni à 79 %, l'Italie à 12 %, l'Espagne à 6 %.

Importations : 305 t d'Allemagne à 89 %, du Royaume Uni à 8 %.

### **UTILISATIONS :**

Utilisations : en % de la consommation mondiale, en 2014.

<u>Silicones</u>	50 %	Photovoltaïque	10 %
<u>Alliages d'aluminium</u>	40 %		

Source : Globe

**Silicones** ou polysiloxanes : polymères de formule  $[R_2SiO]_n$ , avec R, généralement un groupe méthyl mais aussi éthyl ou phényl. Elles se présentent sous 3 formes physiques : huiles (50 % des utilisations des silicones), [élastomères](#) (35 %) et résines. Elles existent sous forme de plus de 2000 produits.

- [Huiles silicones](#) : les huiles silicones sont des polymères linéaires pouvant présenter une longueur de chaîne de plus de 1 000 atomes de Si, en alternance avec des ponts oxygène. Utilisées, en particulier, dans le refroidissement et l'isolation des transformateurs. Elles sont également beaucoup utilisées dans les accessoires de câbles haute tension.
- [Élastomères silicones](#) : ils sont subdivisés en plusieurs catégories selon leur viscosité et leur mode de réticulation.
- [Résines siloxanes](#) : les résines siloxanes se distinguent par leur haute stabilité thermique, une propriété que l'on exploite dans l'isolation des grosses installations électriques.
- [Gels silicones](#) : les gels silicones peuvent remplacer les huiles ou les élastomères, suivant le type d'application. Par rapport aux huiles, ils réduisent le risque de fuites et comparés aux élastomères, ils remplissent parfaitement les cavités de géométrie complexe et adhèrent solidement aux parois intérieures des pièces.

**Propriétés** : elles possèdent une très grande stabilité thermique (de -100 à 300°C) et inertie chimique. Hydrophobes, organophobes, anti-adhérentes, tensioactives, lubrifiantes, isolants électriques, les élastomères silicones sont très résistants au rayonnement ultraviolet. Les propriétés mécaniques sont améliorées par des charges, par exemple de silice précipitée.

**Fabrication industrielle** : par action, vers 300°C, de composés organochlorés, principalement le [chlorure de méthyle](#) ( $CH_3Cl$ ), sur le silicium de qualité métallurgique, en présence de catalyseurs (dérivés de [cuivre](#)). Le principal composé fabriqué est le diméthylchlorosilane,  $(CH_3)_2SiCl_2$ , séparé par distillation, qui par hydrolyse donne le diméthylsilanediol,  $(CH_3)_2Si(OH)_2$ . L'élimination d'eau entre deux molécules conduit à la formation de chaînes de polysiloxanes (silicones).

**Production mondiale** : estimée, en 2012, à 1,7 million de t, avec 40 % des capacités installées en [Chine](#). En 2014, la production de l'Union européenne est de 1,227 million de t dont 466 231 t en Allemagne.

**Producteurs** :

[Dow Corning](#) (Etats-Unis), n° 1 mondial, c'est une joint venture 50/50 entre [Corning Incorporated](#) et [Dow Chemical Company](#). Possède des unités de production aux Etats-Unis, dans le Kentucky, à Carrollton et Elizabethtown, dans le Michigan à Auburn et Midland, en Caroline du Nord à Greenboro, dans l'Indiana à Kendallville, en Allemagne, à Wiesbaden, en Belgique à Seneffe, au Royaume Uni, à Barry dans le Pays de Galles, au Brésil à Campinas, au Japon en association avec [Toray](#), en Corée du Sud, en Chine à Zhangjiagang (joint venture avec Wacker).

[Momentive](#) (Etats-Unis), n°2 mondial : produit du siloxane aux Etats-Unis à Waterford (New York), en Allemagne à Leverkusen, au Japon à Ohta, en Chine à Jiande.

[Wacker](#) (Allemagne), n°3 mondial : possède des sites de production en Allemagne à Burghausen et Nünchritz, au Brésil à Jandira, en Chine à Zhangjiagang, en Inde à Kolkata, au Japon à Akeno en association avec [Asahi-Kasei](#), en Corée du Sud à Suwon, en Norvège à Holla, en République Tchèque à Plzen, aux Etats-Unis à Adrian (Michigan), Chino (Californie), North Canton (Ohio).

Bluestarsilicones (France/Chine) : filiale du groupe China National Bluestar Corporation, son siège social mondial est basé à Lyon. Produit en France, voir ci-dessous, aux Etats-Unis à York, en Caroline du Sud, en Italie à Caronno Pertusella, en Espagne à Santa Perpetua, au Brésil à Sao Paulo et en Chine à Shanghai.

Shin-Etsu (Japon) : produit au Japon, dans le complexe de Gunma, à Naoetsu et Takefu, au Etats-Unis à Akron dans l'Ohio, au Brésil à Sao Paulo, aux Pays Bas à Almere, en Corée du Sud, à Taïwan, en Thaïlande, en Chine.

Autres producteurs : Clariant (Etats-Unis), Evonik (Allemagne), JNC Corporation (Japon).

Situation française : production par Bluestar Silicones qui a repris, le 1<sup>er</sup> janvier 2007, l'activité silicones de Rhodia. La production de siloxanes est effectuée à Roussillon (38) et celle de polysiloxanes à Saint Fons (69) avec des capacités annuelles de 120 000 t/an.

Commerce extérieur :

- Exportations : confidentielles.
- Importations : 36 739 t d'Allemagne à 39 %, de Belgique à 21 %, du Royaume Uni à 11 %, des Pays Bas à 7 %.

Utilisations :

- Les consommations sont réalisées, en 2012, à 36 % en Chine, 23 % en Europe et 17 % aux Etats-Unis.

- Secteurs d'utilisation : en Europe, en 2014, sur une consommation de 500 000 t :

Construction	42 %	Electricité, électronique	6 %
Industries	19 %	Transports	6 %
Soins personnels	8 %		

Source : CES

Utilisations diverses : dans les bains d'huile (fluide caloporteur), la lubrification, dans les transformateurs (propriétés isolantes), dans les produits d'entretien (hydrophobie), comme agent de démoulage de plastiques et caoutchoucs (organophobie), en cosmétologie et en alimentation (inertie chimique et innocuité), en hydrofugation et comme mastic et colle dans le bâtiment, en imperméabilisation des tissus, comme anti-adhérent (ustensiles de cuisine), comme anti-mousse...

Quelques exemples d'utilisation :

- Mastic de scellement des 60 000 vitres de 1,8 m par 3,6 m de la Bibliothèque Nationale de France François Mitterrand.
- Recouvre le papier qui protège les adhésifs.
- Pour la consolidation et hydrofugation de l'Arc de Triomphe de Paris.
- Utilisées pour mouler la grotte de Tautavel (400 m<sup>2</sup>) afin de la reproduire en grandeur nature à quelques centaines de mètres : consommation de 2,4 t de silicones sur 3 mm d'épaisseur.
- L'implantation de prothèses mammaires en silicones est effectuée depuis 1965.
- Matériau des lentilles de contact.
- Les élastomères siliconés sont utilisés pour fabriquer des claviers (montre, calculatrice, orgues...).

- Utilisation de plus en plus fréquente dans l'alimentaire avec les moules à gâteaux, à tartes, les ustensiles de cuisine...

**Alliages d'aluminium** : voir le chapitre [aluminium](#).

Élaborés en fonderie (par exemple : A-S7G, A-S7U3). Ils contiennent de 2 à 18 % de Si. La très grande majorité de ces alliages présente une composition eutectique (12,7 % de silicium) ou proche. L'ajout de silicium à l'aluminium augmente la coulabilité mais réduit l'usinabilité.

Utilisations pour fabriquer des jantes automobiles (alliage à 7 % de Si), des culasses (5 % Si), des pistons (18 % Si).

### **Photovoltaïque :**

L'[énergie](#) solaire totale reçue par la terre est de  $1\,575\,10^6$  TWh/an à 35 % réfléchis, 18 % absorbés par l'atmosphère et 47 % absorbés par le sol. Le soleil, dans les conditions maximales d'ensoleillement, donne  $1\text{ kW/m}^2$ . Le rendement de conversion des cellules commercialisées est compris entre 15 et 20 % pour le silicium monocristallin (le rendement de 20 % a été dépassé pour des modules commercialisés), 13 à 15 % pour le silicium polycristallin, 5 à 13 % pour le silicium amorphe. Un rendement de 43,5 % a été obtenu, en laboratoire, pour une cellule à triple jonction.

500 000 km<sup>2</sup> (environ 2 % de la surface des déserts terriens) couverts de cellules photovoltaïques pourraient, après [électrolyse de l'eau](#) donner une production de [dihydrogène](#) correspondant à la consommation annuelle mondiale de combustibles fossiles. Pour produire toute l'[électricité](#) consommée aux États-Unis, il faudrait couvrir 34 000 km<sup>2</sup> (0,37 % de la superficie du pays) de cellules photovoltaïques.

Une cellule photovoltaïque est une diode de grande surface (en général de 100 mm de côtés pour les cellules en silicium cristallin) et de faible épaisseur (150 à 300 micromètres pour le silicium cristallin et quelques micromètres pour le silicium amorphe), en silicium dopé différemment (n et p) sur chaque face. La tension délivrée par une cellule est de quelques dixièmes de volt.

Les cellules en silicium monocristallin (mono-Si), polycristallin ou multicristallin (poly-Si) ou silicium amorphe (a-Si) sont montées en série pour donner des modules qui délivrent des puissances comprises, le plus souvent, entre 150 et 250 Wc (le Watt-crête est la puissance obtenue dans des conditions standards d'ensoleillement : éclairement de  $1\text{ kW/m}^2$ , température de cellule de 25°C, ...). Un ensemble de modules forme un champ photovoltaïque. Les cellules sont protégées de l'humidité par encapsulation généralement dans un polymère EVA (éthylène-vinyl-acétate) et sont placées entre une plaque avant, en [verre](#), et une plaque arrière, en verre ou en polymère. En 2013, les cellules sont à 90 % à base de silicium dont 55 % en silicium polycristallin, les technologies en couches minces représentent une part de 10 %.

Cellules en silicium multicristallin : utilisées pour des applications de puissance (de 100 W à plusieurs MW). La société [Photowatt](#), filiale de EDF ENR, à Bourgoin Jallieu (38) utilise pour élaborer ses cellules, les rebuts de fabrication (queues et têtes de lingots) de silicium monocristallin employé en électronique ou du silicium polycristallin. La fusion de ces chutes et leur cristallisation colonnaire en gros grains (procédé "Polix") donne des lingots (54 cm x 54 cm x 22 cm), pesant 150

kg qui sont découpés, par une scie à fil, en plaques (10 cm x 10 cm) de 180 micromètres d'épaisseur.

Cellules en couches minces : en silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H), élaborées en couches minces sous vide. Des plaques de verre sont recouvertes d'oxyde d'étain (transparent et conducteur), puis de silicium obtenu par décomposition de silane (SiH<sub>4</sub>), en plasma, par décharge électrique radiofréquence, et enfin d'aluminium pour former l'électrode arrière. Le silicium est d'abord dopé au phosphore en introduisant de la phosphine (PH<sub>3</sub>) puis au bore en introduisant du diborane (B<sub>2</sub>H<sub>6</sub>). Le silicium contient de 2 à 10 % de H<sub>2</sub>. L'épaisseur de silicium est inférieure au micromètre. Le rendement de conversion initial de ces cellules est de 8 à 10 %, mais au cours du temps, une perte de rendement de 15 à 20 % se produit. Toutefois, ces cellules, contrairement au silicium cristallisé, fonctionnent sous très faible éclaircissement (10 lux).

Les cellules de petite surface (quelques cm<sup>2</sup>) sont surtout destinées à l'alimentation des montres et calculettes (100 millions de calculatrices, dans le monde, ainsi équipées). Les modules de plus grande surface (quelques 10<sup>3</sup> cm<sup>2</sup>) sont plutôt employés sur des toitures industrielles.

Air Liquide est un important fournisseur mondial de silane utilisé dans l'élaboration de couches minces mais aussi de silicium épitaxié sur des wafers. Les limites actuelles de purification sont de 10 ppta (10 atomes étrangers pour 1 trillion de molécules, 10.10<sup>-6</sup> ppm).

- Autres technologies, sans silicium : tellurure de cadmium, CIS (cuivre-indium-sélénium), CIGS (cuivre-indium-gallium-sélénium).

Installation de modules, en 2014, en MWc. Monde : 45 600.

Chine	13 100	Allemagne	1 900
Japon	9 500	France	1 100
États-Unis	7 000	Reste de l'Europe	6 000

Source : Wacker

En 2014, l'installation mondiale cumulée de modules représente 180 GWc.

Producteurs principaux de modules photovoltaïques, en MWc, en 2014.

Entreprises	Pays	Production
<u>Trina Solar</u>	Chine	3 660
<u>Yingli Green Energy</u>	Chine	3 361
<u>Canadian Solar</u>	Chine, Canada	3 105
<u>Jinko Solar</u>	Chine	2 944
<u>JA Solar</u>	Chine	2 407
<u>Renesola</u>	Chine	1 970
<u>Sharp</u>	Japon	1 900

<a href="#">Motech Industries</a>	Taïwan	1 632
<a href="#">First Solar</a>	Etats-Unis	1 500
<a href="#">SunPower</a>	Etats-Unis	1 254

Source : EurObserver

[SunPower](#) est détenu à 60 % par le groupe français [Total](#).

- Situation française :

- [Photowatt](#) à Bourgoin-Jallieu (38) a produit, en 2010, 600 t de silicium multicristallin et 70 MWc de modules en silicium multicristallin.

- [Emix](#), filiale du groupe [FerroAtlantica](#), à St Maurice-La Souterraine (36), produit 300 t/an de silicium multicristallin à l'aide d'un procédé de tirage continu d'un lingot de silicium à partir d'un creuset froid électromagnétique.

- [Free Energy Europe](#), produit, à Lens (62) des cellules en silicium amorphe.

- [Solems](#) à Palaiseau (91) : production de petits modules de silicium amorphe pour applications en micropuissance.

Utilisations : en France, les installations sont principalement reliées au réseau électriques. Sur une puissance totale installée, fin 2014, de 5,6 GWc, les installations hors réseau ne représentent que 11 MWc.

- L'équipement de résidences individuelles (< 9 kWc) représente 92 % des installations et 18 % de la puissance installée.

- L'équipement de bâtiments tertiaires, industriels ou ruraux (entre 9 et 250 kWc) représente 7,4 % des installations et 39 % de la puissance installée.

- Les centrales au sol (> 250 kWc) représentent 0,3 % des installations et 41 % de la puissance installée.

**Électronique** : dans ce secteur d'utilisation, il est nécessaire de fabriquer du silicium monocristallin (afin d'éviter de réduire la mobilité des porteurs de charges par la présence d'imperfections - joints de grains, dislocations... - dans le potentiel périodique du réseau cristallin) et de très haute pureté (qualité électronique) : moins de 1 atome étranger (en particulier d'éléments dopants) pour  $10^{10}$  atomes de Si. Toutefois les teneurs en [carbone](#) et [oxygène](#) sont plus élevées : de l'ordre de 0,1 à 1 atome pour  $10^5$  atomes de Si.

Le silicium est un semi-conducteur intrinsèque dont la largeur de bande interdite est de 1,12 eV et la résistivité de  $2\,000\ \Omega\cdot\text{m}$  ( $1,7\cdot 10^{-3}\ \Omega\cdot\text{m}$  pour le cuivre,  $10^{13}\ \Omega\cdot\text{m}$  pour le diamant).

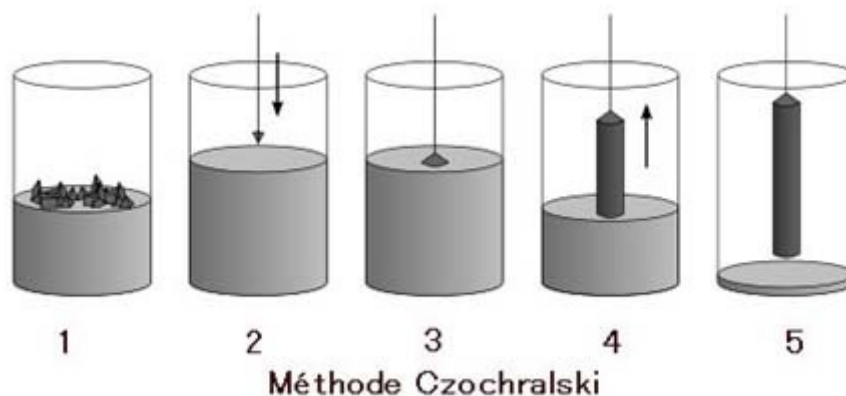
- de type n : avec ajout de P, As, Sb (1 atome pour  $10^5$  à  $10^8$  atomes de Si).

- de type p : avec ajout de B, [Al](#), In.



Une tranche de silicium de 150 mm de diamètre permet de produire 75 puces de 16 mégabits. Actuellement des tranches de 200 mm et 300 mm sont commercialisées. Ces dernières peuvent contenir 375 puces de 16 mégabits.

Élaboration de Si monocristallin : surtout selon la méthode de Czochralski (silicium CZ, concerne environ 80 % de la production) dans un four sous atmosphère d'[argon](#), à 1450°C. Un germe de Si monocristallin (dont l'axe vertical est en général la direction cristallographique <100>) est plongé dans du silicium liquide, maintenu dans un creuset en silice, puis tiré lentement (de 0,4 à 3 mm/min.). Lors du tirage, le creuset et le cristal, en cours de formation, sont animés d'un mouvement de rotation en sens inverse, à la vitesse de quelques tours/min. L'opération dure environ 30 h pour obtenir des cylindres (lingots) de 30 à 100 kg, jusqu'à 2 m de hauteur, les diamètres varient de 200 mm à 300 mm. Les éléments dopants sont introduits dans le bain de fusion sous forme de Si fortement dopé. Les lingots de silicium sont ensuite découpés en plaquettes (wafers) de 1 à 2 mm d'épaisseur (en moyenne 300 plaquettes par lingot). Les circuits intégrés utilisent, à 95 %, le silicium CZ.



- La technique de la zone fondue flottante (silicium FZ, concerne environ 20 % de la production) permet d'obtenir des cristaux de très haute pureté qui faiblement dopés donnent des résistivités plus élevées et sont plutôt utilisés pour les composants discrets. L'avantage de cette technique, plus longue et plus chère à mettre en œuvre, est d'éviter la contamination du silicium par un creuset. Le silicium est chauffé par induction, sous argon. La vitesse de déplacement de la zone fondue est de l'ordre de 1 mm/min.

- Du silicium monocristallin est également préparé, en couches minces (moins de 10 micromètres d'épaisseur), par croissance épitaxiale, couche par couche, par décomposition de  $\text{SiH}_4$ .