

Silicium 2023

Matières premières

La teneur de l'écorce terrestre est de 28 % en silicium (2^{ème} élément le plus abondant après l'[oxygène](#)).

Il est présent dans de nombreuses roches, sous forme de (en % de la masse de l'écorce terrestre) :

- Oxyde (12 %) : silice dont la principale forme naturelle est le quartz. Il est le constituant de nombreuses roches d'origine :
 - Animale ou végétale (SiO_2 étant apporté par la carapace ou le squelette d'organismes variés) donnant les radiolarites, les [diatomites](#), les spongolites.
 - Minérale : [sable](#), silex, meulière, calcédoine, agate, jaspe, onyx...
- Silicates ou aluminosilicates (constitués de tétraèdres $(\text{Si,Al})\text{O}_4$), qui forment des :
 - Feldspaths (60 %) par exemple l'orthose, $6\text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{K}_2\text{O}$, K^+ pouvant être remplacé par Na^+ ou Ca^{2+} dans d'autres feldspaths.
 - Pyroxènes et amphiboles (17 %) : silicates de Mg^{2+} , Fe^{2+} ou Ca^{2+} , par exemple : l'amiante ($2\text{SiO}_2, 3\text{MgO}, 2\text{H}_2\text{O}$ pour la chrysotile).
 - Micas (4 %) : par exemple la muscovite : $6\text{SiO}_2, 3\text{Al}_2\text{O}_3, \text{K}_2\text{O}, 2\text{H}_2\text{O}$.
- Autres minéraux : zéolites, kaolinite, [talc](#), vermiculites, olivines, grenats...

Voir également le chapitre [silices naturelles](#).

Mines de quartz :

L'élaboration du silicium nécessite l'utilisation d'une silice relativement pure obtenue dans des gisements de quartz ou de quartzite. Cette dernière, moins pure, est plutôt utilisée dans la fabrication de ferrosilicium. Toutefois, la société, [PCC Bakkisilicon](#), filiale du groupe allemand [PCC](#) exporte depuis sa carrière de Zagórze, en Pologne, de la quartzite pour son usine islandaise de production de silicium située à Húsavík.

Par ailleurs, le quartz utilisé doit être sous forme de gros morceaux de 10 à 150 mm et la présence de fines particules doit être évitée afin de ne pas perturber le fonctionnement du four de réduction.

Les principaux producteurs de silicium possèdent, en général, leurs propres mines de quartz.

Par exemple, [Ferroglobe](#) exploite des mines de quartz ou de quartzite, à ciel ouvert, qui fournissent 68 % de l'approvisionnement du groupe afin de produire du silicium mais aussi du ferrosilicium. En 2023, les productions sont les suivantes :

- En Espagne à :
 - Esmeralda avec 10 000 t de quartz,
 - Serrabal, avec 201 000 t,
 - Soria, avec 119 000 t.
- Aux États-Unis à Lowndesboro, dans l'Alabama, avec 140 500 t de quartzite.
- Au Canada, province du Québec, à Saint-Urbain, opérée par une tierce partie.
- En Afrique du Sud à :

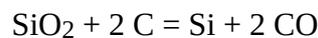
- Thaba Chueu, avec 592 000 t de quartzite,
- Mahale, avec 32 000 t,
- Fort Klipdam, avec 75 000 t.

[Elkem](#), exploite des mines de quartz pour sa production de silicium et de ferrosilicium :

- en Norvège, à Tana, au bord de la mer de Barents, avec 850 000 t/an de quartzite et Mårnes, avec 150 000 t/an de quartzite.
- en Espagne avec sa filiale [Erimisa](#) et ses exploitations minières à Begonte (Lugo), Frades (A Coruña), Castillo (Portevedra) et Bóveda del Río al Mar (Salamanca), avec une capacité de production de 740 000 t/an totalement exportée en Norvège et en Islande.

Fabrication industrielle

Par métallurgie, selon la réaction :



La réduction de la silice a lieu dans un four électrique à [électrodes de carbone](#) immergées préparées à l'aide de coke de pétrole et de charbons bitumineux. Le volume de CO formé est très important, plus de 5 000 m³/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 12 000 kWh

L'énergie électrique représente, en 2020, pour Ferroglobe, 27 % des coûts de production.

L'importante consommation électrique a déterminé, en grande partie, l'implantation des usines de production, en Norvège avec son hydroélectricité et plus récemment, en Islande, avec sa géothermie. En France, Ferroglobe possède ses propres installations hydroélectriques avec, en 2021, une puissance de 18,9 MW.

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

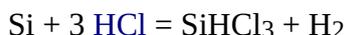
Le silicium étant obtenu selon les méthodes d'élaboration des ferroalliages il est souvent assimilé à un ferroalliage.

Coproduction : la production de silicium engendre la coproduction de fumée de silice (ou microsiline), voir le chapitre [silices synthétiques](#).

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_3). La réaction a lieu en lit fluidisé vers 300°C , en présence de catalyseur :



Le rendement est de 90 %.

Une réaction du même type peut être réalisée avec du dihydrogène pour donner du silane (SiH_4).

SiHCl_3 (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_4) peut ensuite être décomposé, en présence de H_2 , à $1000\text{-}1100^\circ\text{C}$, selon le procédé CVD (Chemical Vapor Deposition) 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.

Un autre procédé, en lit fluidisé (FBR), 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.

Différentes qualités de silicium de grande pureté :

- Grade solaire pour cellules multicristallines : de 99,99999 % (7 N) à 8 N,
- Grade solaire pour cellules monocristallines : de 9 N à 10 N,
- Grade électronique pour semi-conducteurs : de 10 N à 11 N.

Productions

Production de silicium métallurgique

En 2023, en milliers de t, sur un total mondial de 3,8 millions de t.

Chine	3 000	Allemagne	60
Brésil	200	Russie	50
Norvège	140	Islande	50
États-Unis, estimation	135	Australie	50
France	90	Canada	30

Source : USGS

La production de l'Union européenne, en 2020, est de 104 241 t.

La production chinoise est réalisée dans la province du Xinjiang avec 1 million de t, celle du Yunnan avec 480 000 t, celle du Sichuan avec 340 000 t.

Les capacités mondiales de production sont d'environ 6 millions de t/an, soit le double de la production annuelle.

Commerce international du silicium d'une pureté inférieure à 99,99 % :

Principaux pays exportateurs, en 2023, sur un total de 1,292 million de t.

en tonnes

Chine	566 822	Australie	32 937
Norvège	221 805	Malaisie	32 593
Brésil	183 863	Islande	24 850
France	66 878	Allemagne	15 437
Canada	37 330	Pays Bas	14 004

Source : ITC

Les exportations chinoises sont destinées à 18 % au Japon, 14 % à la Corée du Sud, 12 % à l'Inde, 8 % à la Malaisie.

Principaux pays importateurs, en 2023, sur un total de 1,247 million de t.

en tonnes

Allemagne	233 809	Malaisie	64 034
Japon	157 952	Italie	50 686
États-Unis	102 277	Émirats Arabes Unis	47 781
Corée du Sud	84 753	Royaume Uni	45 972
Inde	83 245	Thaïlande	42 202

Source : ITC

Les importations allemandes proviennent à 55 % de Norvège, 16 % de France, 14 % du Brésil, 5 % du Canada.

Producteurs de silicium de qualité métallurgique : en dehors des producteurs chinois.

en milliers de t/an de capacité de production

Ferroglobe , en 2023	328	Rusal (Russie), en 2023	69
Elkem , en 2021	215	Liasa (Brésil), en 2018	60
Dow , en 2018	207	Wacker (Allemagne), en 2018	53
Rima (Brésil), en 2018	96	Simcoa (Australie), en 2021	52

Sources : *Ferroglobe et rapports des sociétés*

- [Hoshine Silicon](#), groupe chinois est le n°1 mondial, avec une capacité de production de 800 000 t/an, dans la région autonome du Xinjiang.
- [Ferroglobe](#), issu de la fusion, en 2015, de FerroAtlantica et de Globe Speciality Metal, possède, en 2023, des capacités de production de 328 160 t/an situées :
 - en Europe, avec un total de 184 000 t/an, en France, voir ci-dessous et en Espagne, à Sabón, en Galice avec 43 000 t/an,
 - en Amérique du Nord, avec un total de 93 160 t/an, aux États-Unis à Beverley, dans l'Ohio, à Selma, dans l'Alabama 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 Afrique du Sud avec 51 000 t/an.

Les capacités de production de Ferroglobe peuvent évoluer en fonction de la demande, avec un maximum, en 2020, de 416 750 t/an. En 2020, des fours de production ont été arrêtés, en Afrique du Sud, en Chine, aux États-Unis, à Selma et Beverley, en France, à Château Feuillet et Laudun. En 2023, la production a été de 194 385 t destinées, en part de revenus, en 2021, à 45 % à l'industrie de l'aluminium, à 43 % à celle des silicones et à 10 % à celle des panneaux photovoltaïques.

- La capacité de production de [Dow](#) (États-Unis), est en 2018, de 207 000 t/an. La production est auto-consommée pour produire des silicones.
- [Elkem](#), filiale du groupe chinois [Bluestar](#), avec une capacité de production de 215 000 t/an, en Norvège, à Salten (75 000 t/an), Thamshavn (45 000 t/an) et Bremanger (40 000 t/an) ainsi qu'en Chine à Lanzhou. (55 000 t/an). En 2019, la production a été de 240 000 t.
- [Rima](#), produit du silicium au Brésil, dans l'État du Minas Gerais, et détient une participation dans [Mississippi Silicon](#) qui exploite une usine à Burnsville, aux États-Unis, avec une capacité de production de 36 000 t/an.
- En 2023, la production de [Rusal](#) a été de 50 900 t. Les unités de production sont situées à Shelekhov, dans la région d'Irkutsk, avec 42 000 t/an et à Kamensk-Uralsky, dans la région de Sverdlovsk, avec 27 000 t/an.
- [Liasa](#) exploite, au Brésil, une usine à Pirapora dans l'État du Minas Gerais.
- [Wacker](#), produit du silicium de qualité métallurgique à Holla en Norvège, destiné à produire des silicones et du silicium polycristallin de qualité électronique.
- [Simcoa](#), Silicon Metal Company of Australia, filiale du groupe japonais [Shin Etsu Chemicals](#), possède une usine, à Kemerton, au sud-ouest de l'Australie de l'Ouest, avec une capacité de 52 000 t/an.
- [PCC Bakkisilicon](#) produit du silicium dans son usine de Húsavík, en Islande, avec une capacité de production de 32 000 t/an.

Capacités mondiales de production de silicium polycristallin de grande pureté, en 2021 : 750 000 t/an destinées à 80 % pour élaborer des cellules photovoltaïques et à 20 % à la microélectronique. En 2018, la capacité chinoise de production est de 388 000 t/an et la production de 259 000 t.

Commerce international du silicium d'une pureté supérieure à 99,99 % :

Principaux pays exportateurs, en 2023, sur un total de 145 092 t.

en tonnes			
Allemagne	55 203	Japon	6 386
États-Unis	38 710	Taipei chinois	4 041
Malaisie	26 261	Corée du Sud	1 931
Chine	9 249	Hong Kong	1 438

Source : ITC

Les exportations allemandes sont destinées à 58 % à la Chine, 23 % au Vietnam, 5 % au Japon.

Principaux pays importateurs, en 2023, sur un total mondial de 150 058 t.

en tonnes			
Chine	63 428	République tchèque	2 908
Vietnam	38 747	Allemagne	2 356
Japon	15 479	Singapour	2 356

Taipei chinois	9 963	Malaisie	1 801
Corée du Sud	4 536	Russie	1 527

Source : ITC

Les importations chinoises proviennent à 56 % d'Allemagne, 36 % de Malaisie.

Producteurs de silicium polycristallin de grande pureté : capacités de production, en 2020, sur un total de 510 000 t/an.

en tonnes/an

Tongwei (Chine)	96 000	Xinte/TBEA (Chine)	80 000
GCL (Chine)	90 000	East Hope (Chine)	80 000
Wacker (Allemagne)	84 000	OCI (Corée du Sud)	36 000
Daqo (Chine)	80 000	Hemlock (États-Unis)	36 000

Source : [Bernreuter Research](#)

- [Tongwei](#), filiale du groupe Sichuan Yongxiang, en Chine, produit du silicium de grande pureté à Leshan, dans la province du Sichuan, avec une capacité de production de 50 000 t/an portée à 85 000 t/an en 2021, à Baotou, en Mongolie Intérieure, avec une capacité de 30 000 t/an et construit une usine de 40 000 t/an à Baoshan, dans le Yunnan.
- [GCL En-Polyergy Holdings](#), société chinoise, possède une capacité de production de 75 000 t/an de silicium de grande pureté à Xuzhou ainsi qu'au Xinjiang. En 2021, la production a été de 47 610 t à Xuzhou et de 56 896 t au Xinjiang.
- [Wacker](#) (Allemagne) : produit, avec une capacité de 80 000 t/an, du silicium polycristallin de grande pureté en Allemagne à Burghausen (32 000 t/an) et Nünchritz (15 000 t/an) et aux États-Unis à Charleston dans le Tennessee (20 000 t/an). Sa filiale [Siltronic](#), détenue à 30,8 % produit des wafers pour des applications en microélectronique, en Allemagne à Burghausen et Freiberg, aux États-Unis à Portland dans l'Oregon et à Singapour.
- [Daqo](#), produit du silicium de grande pureté, en Chine, à Shihezi, dans la province du Xinjiang, avec une capacité de production qui doit atteindre 105 000 t/an début 2022. En 2021, la production est de 86 587 t.
- [OCI](#) (Oriental Chemical Industries, Corée du Sud) : possédait à Gunsan, en Corée du Sud, une capacité de production de 52 000 t/an qui a été réduite à 4 000 t/an. A construit, en Malaisie, à Samalaju, une usine de production de 35 000 t/an.
- [Hemlock](#) (États-Unis) : joint venture entre [Corning](#) (États-Unis) et [Shin-Etsu](#) (Japon). La production est réalisée aux États-Unis à Hemlock dans le Michigan. La capacité de production de silicium polycristallin est de 40 000 t/an.
- [RECSilicon](#) (Norvège) : a produit, en 2021, 1 225 t de silicium de grande pureté et a vendu 3 078 t de composés gazeux de grande pureté du silicium. La production avait lieu aux États-Unis à Moses Lakes, dans l'État de Washington, pour le photovoltaïque et à Butte, dans le Montana pour l'électronique. En mai 2019, la production de l'usine de Moses Lake a cessé et se poursuit à Butte pour le silicium destiné à des application en microélectronique. Une joint venture a commencé à produire, avec une participation de RECSilicon de 15 %, en 2018, en Chine, à Yulin, dans la province de Shaanxi, avec une capacité de production de 20 000 t/an.

Situation française

Production, en 2015, de 100 000 t.

Producteurs : la production française est assurée par [FerroGlobe](#), avec des capacités de production de 141 000 t/an de silicium, dans les usines suivantes :

- Anglefort (01) : 38 000 t/an avec 2 fours de 33 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.

Les usines française de production sont issues de la filiale Pechiney Electrométallurgie du groupe Pechiney et de son démantèlement, en 2005, après son achat par Alcan, en 2003.

Commerce extérieur : en 2023.

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

- Exportations : 66 878 t vers l'Allemagne à 59 %, la Malaisie à 14 %, l'Italie à 9 %, les Pays Bas à 8 %.
- Importations : 29 838 t à 70 % de Norvège, 15 % des Pays Bas, 5 % d'Allemagne.

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

- Exportations : 98 t vers l'Allemagne à 67 %, la Norvège à 23 %, la Turquie à 5 %.
- Importations : 265 t de Norvège à 71 %, d'Allemagne à 10 %, de Suisse à 9 %, du Japon à 5 %.

Utilisations

Consommations : en 2021, 2,827 millions de t de silicium de qualité métallurgique. En 2019, la demande chinoise a été de 1,092 million de t.

En 2019, la demande de silicium polycristallin de qualité électronique a été de 447 000 t, dont 410 000 t destinées à l'élaboration de cellules photovoltaïques et 37 000 t destinées à l'industrie des semi-conducteurs.

Secteurs d'utilisation du silicium

En 2019, dans le monde.

Alliages d'aluminium	43 %	Photovoltaïque	18 %
Silicones	37 %	Électronique	1 %

Source : BRGM

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

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.

Ils sont utilisés, en particulier, pour fabriquer des jantes automobiles (alliage à 7 % de Si), des culasses (5 % Si), des pistons (18 % Si).

[Silicones](#) : voir ce chapitre.

Photovoltaïque : voir également le chapitre [énergie](#).

L'[énergie](#) solaire totale reçue par la terre est de $1\,575 \cdot 10^6$ 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 kW/m^2 . Le rendement de conversion des cellules, en laboratoire, est de 26,7 % pour le silicium monocristallin, 24,4 % pour le silicium polycristallin, 23,4 % pour les couches minces CIGS, 23,7 % pour les perovskites, 21,0 % pour les couches minces en Cd-Te. Un rendement de 47,1 % a été obtenu, en laboratoire, pour une cellule à triple jonction.

500 000 km² (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 km² (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. Une cellule photovoltaïque consomme au mieux 2,5 g de silicium par Watt-crête produit.

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 : éclaircissement de 1 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.

- 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 (SiH₄), 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 (PH₃) puis au [bore](#) en introduisant du diborane (B₂H₆). Le silicium contient de 2 à 10 % de [H₂](#). 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 cm²) 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 10³ cm²) 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, 10.10⁻⁶ ppm).

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

En 2021, sur un total mondial de 190 GWc produits, le silicium monocristallin représente 160 GWc, le silicium multicristallin 20 GWc, les couches minces 10 GWc (dont couches minces Cd-Te, 8,5 GWc, couches minces CIGS, 1,6 GWc et couches minces de silicium amorphe, 0,2 GWc).

Installation de modules, en 2019. Monde : 110 000 MWc, Union européenne : 15 635 MWc.

en MWc

Chine	30 100	Australie	4 100
États-Unis	13 300	Ukraine	3 900
Inde	7 700	Espagne	3 900
Japon	7 000	Allemagne	3 900
Vietnam	5 600	Pays Bas	2 400

Source : *EurObser'ER*

En 2021, l'installation mondiale cumulée de modules représente 850 GWc dont 164,9 GWc, dans l'Union européenne.

En 2021, dans le monde, la production d'électricité d'origine photovoltaïque a été de 1 032,5 TWh soit 3,6 % de la production totale, dans l'Union européenne, elle a été de 160,4 TWh soit 5,5 % de la production totale.

Producteurs fournisseurs de modules photovoltaïques, en 2019.

en MWc de livraisons

Entreprise	Pays	Production
Jinko Solar	Chine	14 300
JA Solar	Chine	10 300
Trina Solar	Chine	9 700
Longi Solar	Chine	9 000
Canadian Solar	Chine/Canada	8 600
Hanwha Q Cells	Corée du Sud	7 300
Risen Energy	Chine	7 000
First Solar	États-Unis	5 400
GCL-SI	Chine	4 800
Shunfeng Photovoltaic	Chine	4 000

Source : *EurObser'ER*

[SunPower](#), aux États-Unis, qui possède une capacité de production de 2 400 MWc, est détenu à 60 % par le groupe français [TotalEnergies](#).

Situation française :

- [Photowatt](#), filiale de EDF ENR, à Bourgoin-Jallieu (38) possède, en 2021, une capacité de production de 200 MWc de modules en silicium multicristallin. A installé depuis son origine un total de 600 MWc soit 4 millions de modules.
- [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. En 2021, la puissance installée a été de 2 792 MWc, la production, de 15,092 TWh et la puissance totale cumulée installée de 14 780 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.

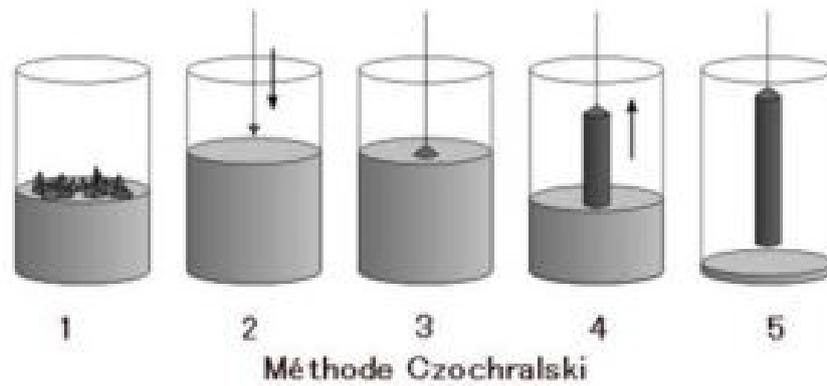
Électronique : dans ce secteur d'utilisation, il est nécessaire de fabriquer du silicium monocristallin (afin d'éviter de réduire la mobilité des porteurs de charges par la présence d'imperfections – joints de grains, dislocations... – dans le potentiel périodique du réseau cristallin) et de très haute 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 W.m ($1,7 \cdot 10^{-3}$ W.m pour le cuivre, 10^{13} W.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](#).

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 SiH_4 .