

I- Introduction

Les pays industrialisés ainsi que toute la communauté internationale, sont actuellement confrontés à deux problèmes largement reconnus à travers le monde :

- La raréfaction des ressources primaires d'énergie d'origine fossile
- Et le réchauffement de la planète par effet de serre.

La réponse à ces deux problèmes est un véritable défi qui nécessite d'agir en parallèle sur le développement des sources d'énergie renouvelables, sur la réduction de la production de CO₂ et des autres gaz à effet de serre, et enfin, sur le contrôle de la consommation énergétique mondiale.

Le soleil qui est une source quasiment inépuisable d'énergie envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 8400 fois la consommation énergétique de l'humanité. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré (kWc/m²) répartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge.

Le solaire photovoltaïque (PV) est une source intermittente d'électricité nécessitant un moyen de stockage ou une liaison avec le réseau électrique. Cette source est limitée actuellement par son coût, et son rendement relativement faible.

Réduire les coûts et augmenter les performances, tel est donc le cahier des charges pour rendre le solaire photovoltaïque compétitif. Actuellement la filière assure moins de 1% de la production d'électricité mondiale. Cependant des progrès technologiques récents, ainsi que l'augmentation du coût du pétrole et du gaz rendent de plus en plus attractive la filière solaire photovoltaïque, avec l'espoir de disposer, dans les prochaines années, d'une énergie électrique PV à un coût équivalent à celui du réseau électrique, au moins dans les régions très ensoleillées.

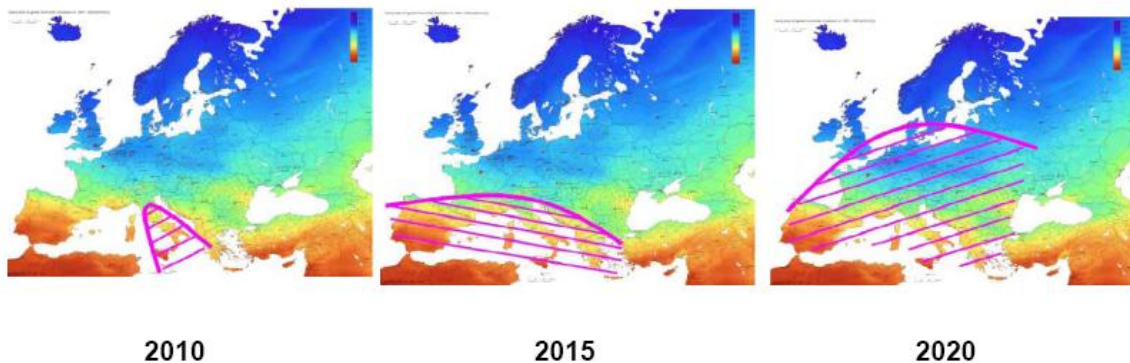


Fig. II. 1 : Coût de l'électricité PV en Europe comparé à l'électricité réseau en 2010 et perspective pour 2015 et 2020. Les hachures indiquent la zone de compétitivité du PV. Source EPLA, d'après [59]

II- Position de l'industrie photovoltaïque sur l'axe mondial de la production de l'énergie

Face aux prévisions d'épuisement inévitable des ressources mondiales en énergie fossile et face aux multiples crises d'énergie, la science s'est intéressée naturellement aux ressources renouvelables et notamment vers la plus ancienne, le soleil. Cette source d'énergie qui déverse chaque jour l'équivalent de 100 000 milliards de TEP (tonnes équivalent pétrole) sur la terre. Cette valeur est à comparer aux 8,2 milliards de TEP que représente la consommation annuelle mondiale en énergie primaire (2007). [53]

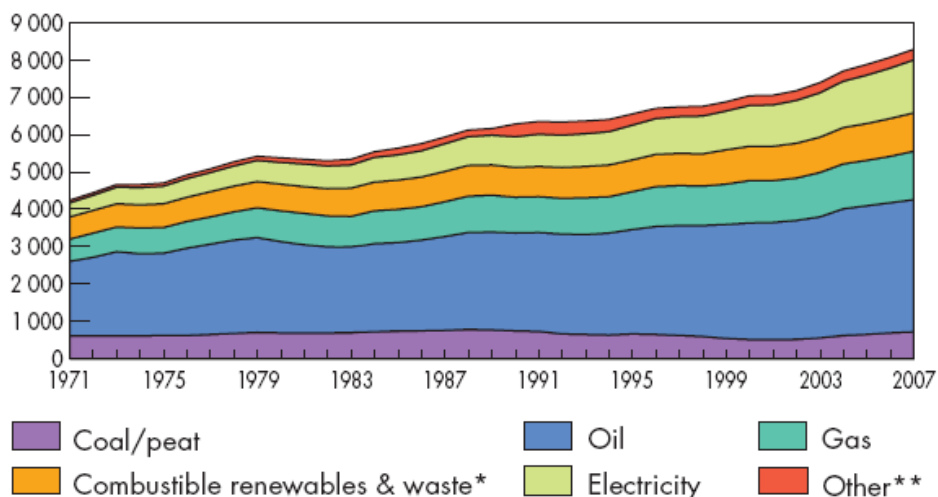


Fig. II.2 : Evolution de la consommation annuelle en énergie en Millions de TEP. (source AIE)[53]

Une alternative de transformation de l'énergie solaire en électricité est connue sous le nom de « l'effet photovoltaïque ».

Néanmoins sa contribution globale dans la production d'électricité reste faible, 0,12% de la production mondiale d'électricité, mais dans l'hypothèse d'une croissance annuelle de 25-30%, l'industrie photovoltaïque contribuerait mieux dans l'avenir aux besoins mondiaux en électricité.

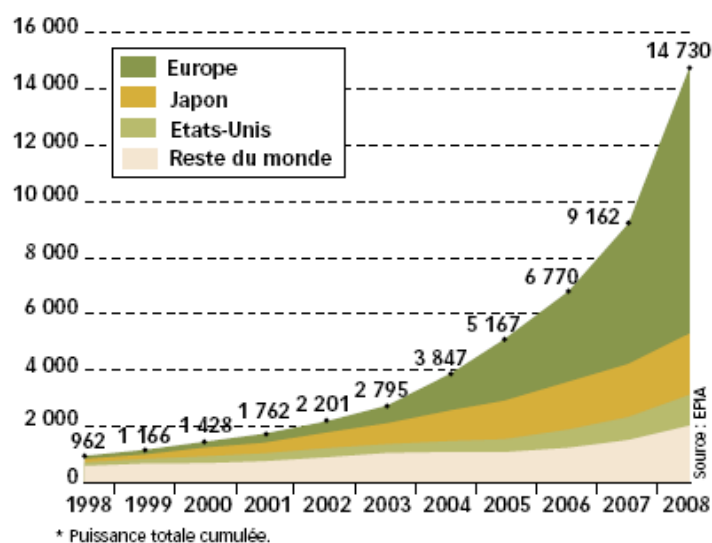


Fig. II.3 : Evolution du parc photovoltaïque mondial, en mégawatts [54]

A l'échelle mondiale, selon une étude conduite par l'Association européenne des industriels du photovoltaïque (EPIA), l'électricité solaire pourrait occuper une place non négligeable vers 2030.

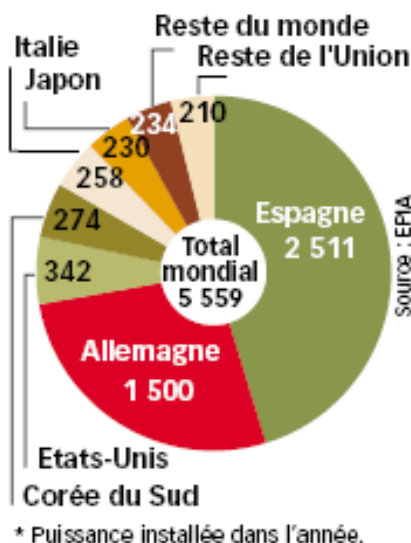


Fig. II.4 : Répartition du marché mondial du photovoltaïque en 2008 (MW) [54]

II-1. Place des cellules solaires photovoltaïques à base de silicium cristallin

La réalisation de cellules photovoltaïques à base de silicium cristallin reste toujours la filière la plus avancée sur le plan technologique et industriel.

Les cellules organiques présentent des coûts plus faibles, mais leurs rendements sont les plus faibles et surtout leur stabilité dans le temps est à l'heure actuelle insuffisante (durée de vie de 1000 à 5000 h).

Les couches minces présentent le net avantage d'utiliser très peu de matériau. Mais pour obtenir des rendements intéressants les matériaux utilisés sont du CIS, CIGS, CdTe or la disponibilité des matières premières et les contraintes environnementales liées à la toxicité de certains des matériaux risquent de limiter leur expansion.

Les couches minces à base de silicium amorphe semblent une technologie prometteuse car elles bénéficient, encore plus que les autres technologies, des avancées de la microélectronique. Certaines centrales photovoltaïques sont réalisées avec cette technologie car le coût du watt installé est un des plus faibles sur le marché. Mais les rendements de conversion de ces cellules restent actuellement nettement inférieurs au silicium cristallin.

Le silicium cristallin reste donc, le matériau principal du photovoltaïque, malgré les innovations attendues dans les technologies couches minces. En effet l'absorption optique du silicium permet une exploitation satisfaisante du spectre du soleil. Le silicium est aussi un élément abondant sur terre et sans doute le mieux connu des scientifiques suite aux recherches sur les technologies de fabrication pour l'industrie du semiconducteur.

Les recherches de développements dans le domaine du photovoltaïque sont basées essentiellement d'une part sur le développement de nouveaux procédés de croissance de silicium, de réduction des épaisseurs et d'autre part, sur l'amélioration des dispositifs.

II-2. La demande mondiale en silicium de qualité photovoltaïque

La croissance continue et soutenue de l'industrie photovoltaïque impose une production plus importante de silicium de qualité photovoltaïque. Actuellement la demande en silicium pour l'industrie photovoltaïque est quasiment équivalente à la demande de l'industrie électronique. Il est donc impossible de fonctionner comme le début des années 2000, où l'industrie photovoltaïque utilisait les rebuts de l'industrie électroniques (« scraps »).

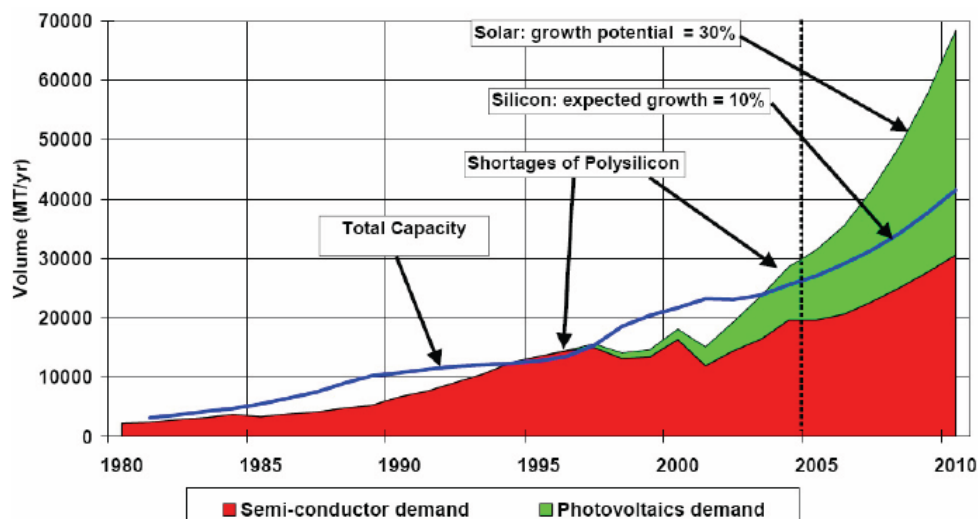


Fig. II.5 : Evolution de la production et de la demande en silicium [56]

III- Que ce que le silicium de qualité solaire ?

On différencie le silicium de qualité solaire du silicium de qualité électronique car celui-ci tolère une quantité plus élevée d'impuretés. Il n'existe cependant pas de réelle norme décrivant les spécifications du silicium de qualité solaire.

L'obtention du silicium arrive en fin d'un processus de raffinage que l'on peut séparer en deux grandes étapes :

- La transformation du quartz en silicium de grade métallurgique
- La deuxième transformation est une purification du silicium métallurgique en silicium de grade solaire.

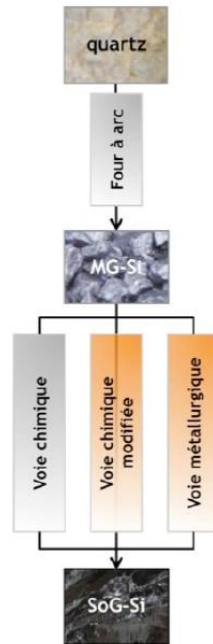
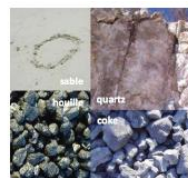


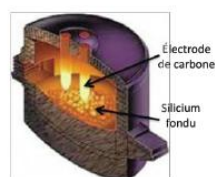
Fig. II.6 : Route traditionnelle du raffinage du silicium [72]

III-1. Elaboration du silicium métallurgique

Le silicium métallurgique (MG-Si) résulte de la transformation de la silice dont on a extrait l'oxygène. La silice est réduite par le carbone à 1700°C. La pureté finale du silicium de qualité métallurgique est de 98 à 99%.



Matières premières



Four à arc



Silicium métal en fusion



Silicium métallurgique

Fig. II.7 : Elaboration du silicium métallurgique

III-2. Du silicium métallurgique au silicium solaire

Le silicium solaire 'solar graded' (SoG-Si), ou silicium polycristallin (poly-Si) plus connu dans la filière électronique, est obtenu par la purification du silicium métallurgique et servira à la confection des lingots de silicium.

Il existe différents procédés de production de silicium de qualité solaire que l'on peut classer en deux grandes familles : la voie chimique et la voie métallurgique.

Actuellement, la voie chimique occupe la quasi-totalité du marché avec deux procédés majoritaires à partir de trichlorosilane (75%) et de monosilane (25%). Elle nécessite une plus grande consommation d'énergie que la voie métallurgique, et présente l'inconvénient de la dangerosité liée à l'utilisation de produits chlorés.

III-3. Voie chimique : procédé Siemens

Cette famille de procédés est basée sur la forte attraction de l'atome de silicium Si pour les ions chlorures Cl.

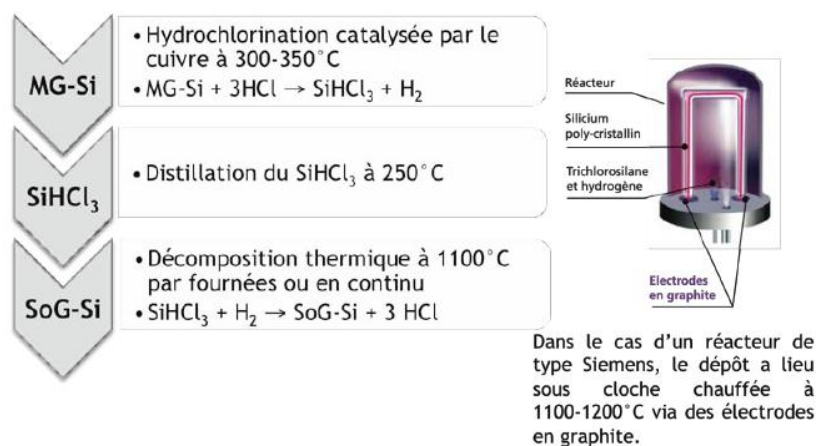


Fig. II.8 : Procédé Siemens [72]

III-4. Voie métallurgique : procédé Elkem

Il consiste en un traitement du silicium métallurgique par un laitier de silicate de calcium à haute température suivi d'un lessivage chimique à basse température. Les impuretés résiduelles sont collectées sur le dessus du lingot obtenu après une solidification directionnelle.



Fig. II.9 : Procédé Elkem [72]

VI- Schéma général de la fabrication des cellules au silicium cristallin

Une cellule solaire photovoltaïque peut être schématisée d'une façon simplifiée comme suit :

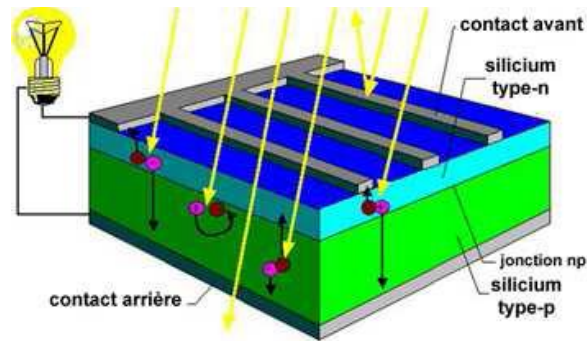


Fig. II.10 : Schématisation simplifiée d'une cellule solaire classique (Source : CNRS) [62]

La couche supérieure de la cellule est composée de silicium dopé phosphore. Dans cette couche, il existe une quantité d'électrons libres supérieure à une couche de silicium pur, d'où l'appellation de dopage N, comme négatif (charge de l'électron). La couche inférieure est composée de silicium dopé P. Cette couche possèdera donc en moyenne une quantité d'électrons libres inférieure à une couche de silicium pur.

Dans un contexte global, le processus du silicium vers le module solaire suit le chemin général suivant :

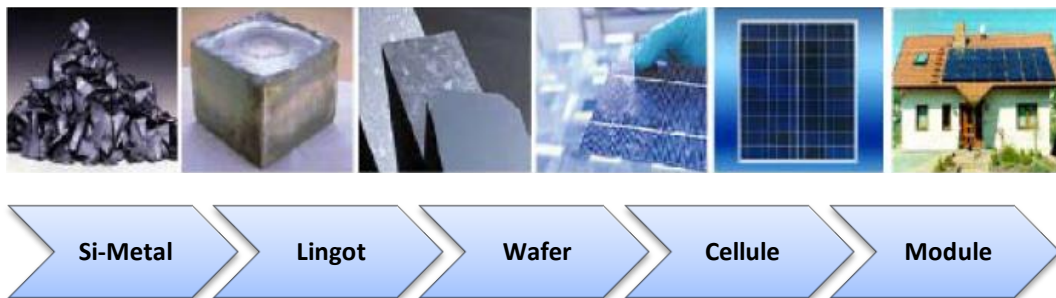


Fig. II.11 : Du silicium à la cellule solaire (schéma général)

Et en séparant les étapes :

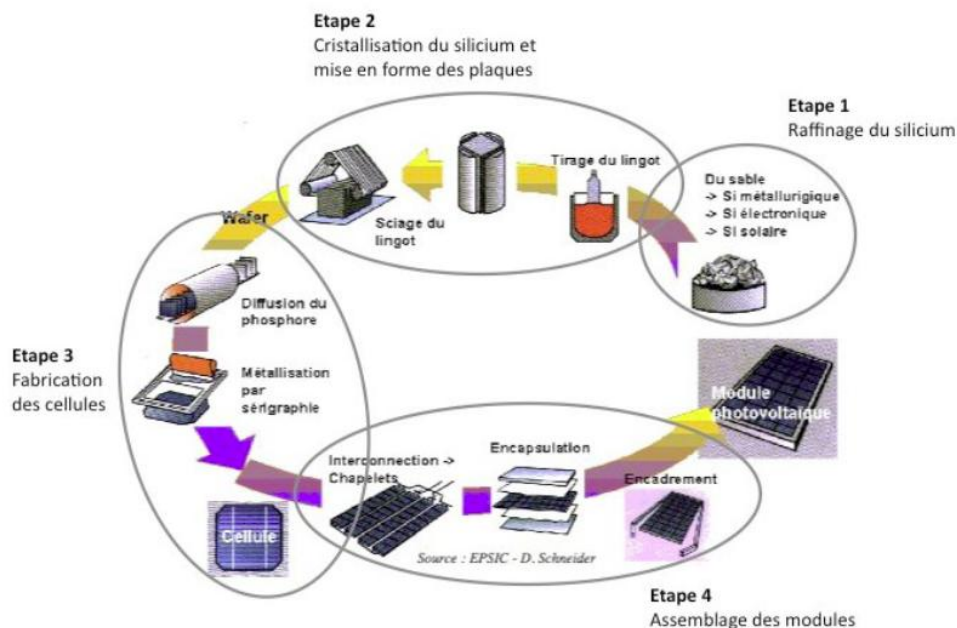


Fig.II.12 : Schéma simplifié du processus de fabrication de cellules solaires. [72]

V- Processus de fabrication d'une cellule solaire photovoltaïque

Dans une production courante, les étapes de fabrication suivantes sont classiquement effectuées : [65], [15]

V-1. Elimination des dégâts de découpe

On commence par enlever par attaque chimique plusieurs dizaines de microns de chaque côté du substrat. Ce décapage s'effectue dans une solution aqueuse à 20-30% de soude ou de potasse caustique, à une température de l'ordre de 90°C.

V-2. Texturation de la surface

L'opération de texturation vise à développer en surface un relief micrométrique (typiquement de 4 à 10 μm), permettant des réflexions multiples.

V-3. Formation de l'émetteur

La jonction p-n est formée par diffusion de phosphore. L'épaisseur de l'émetteur est le résultat d'un compromis entre :

- le fait qu'il doit être assez mince pour laisser la lumière pénétrer jusqu'à la jonction,
- le fait qu'il doit être assez épais pour que l'on puisse y attacher les contacts métalliques.

V-4. Couche antireflet

La surface du silicium cristallin est réfléchissante, on peut réduire la réflexion en déposant à la surface des cellules une couche transparente ayant un indice de réfraction moyen situé entre celui du verre d'encapsulation et celui du silicium. La couche antireflet est souvent constituée d'un nitrure de silicium, qui peut être déposée par différentes techniques. Cette couche peut aussi être constituée d'un oxyde de silicium.

V-5. Pose des contacts métalliques

Les contacts métalliques permettent la circulation du courant. Ils sont déposés par différentes méthodes de métallisation dont principalement la sérigraphie.

V-6. Co-firing

La cuisson simultanée des contacts (co-firing) permet de combiner la formation des contacts avant (à travers le SiN) et arrière (BSF). Elle se fait par cuisson rapide sous air à environ 800°C pendant quelques secondes. [15]

V-7. Ouverture de la jonction

Les plaquettes sont superposées les unes sur les autres et gravées latéralement par plasma ($\text{CF}_4 + \text{O}_2 - 15 \text{ min} - \approx 100^\circ\text{C}$). L'émetteur n'est ainsi plus en contact avec la face arrière de la cellule. La technique du laser est aussi de plus en plus utilisée.

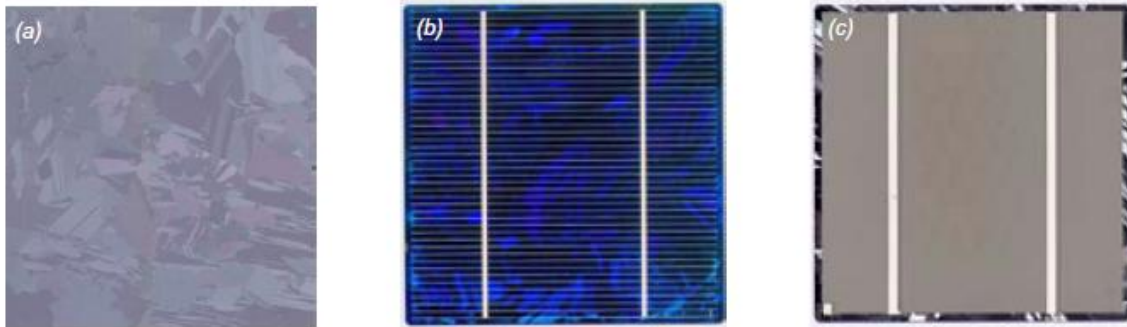


Fig.II.13 : (a) Substrat de silicium multi-cristallin ; (b) Face avant d'une cellule photovoltaïque ;
(c) Face arrière d'une cellule photovoltaïque [15]

VI- Conclusion

Sur la base d'un besoin de 15 tonnes/MW, l'industrie photovoltaïque consommerait chaque année environ 40000 tonnes de silicium pour produire 5GW de panneaux photovoltaïques dont 90% à base de silicium. La production de silicium au niveau mondial a été d'environ 5 millions de tonnes en 2007 : la part de l'industrie photovoltaïque représente donc un peu moins de 1% de la production mondiale. [72]

L'obtention de ce matériau arrive en fin d'un processus de raffinage que l'on a pu séparer en deux grandes étapes :

- La transformation du quartz en silicium de grade métallurgique à une pureté de l'ordre de 98 à 99%.
- La deuxième transformation est une purification du silicium métallurgique en silicium de grade solaire, d'une pureté de 99,9999%.

La route traditionnelle, héritée de l'électronique, utilise des réacteurs chimiques pour synthétiser le silicium polycristallin. De toute la chaîne de production des modules photovoltaïques, c'est l'étape la plus consommatrice en énergie.

En raison du coût de cette étape et du fait qu'une pureté moindre peut-être tolérée, des techniques pour produire le silicium solaire à partir de nouveaux procédés chimiques mais aussi métallurgiques sont explorées.

C'est l'axe de recherche pour réduire les coûts et rendre ainsi l'électricité photovoltaïque compétitive.