

Les inconvénients lors de la production

Suite à nos interventions dans les différents quotidiens algériens sur les énergies renouvelables, nous avons déjà soulevé en bref les différents inconvénients du photovoltaïque. Dans cette nouvelle contribution, nous présentons en détail les risques technico-financiers en phase de production du silicium photovoltaïque dans une 1^{re} partie, et surtout en période d'exploitation d'une centrale photovoltaïque dans une 2^e et une 3^e partie dont la durée de vie est estimée entre 25 et 30 années qui n'est possible que si une surveillance et une maintenance rigoureuses sont assurées ; en plus du rendement des cellules en silicium qui ne cesse de s'amenuiser par vieillissement bien avant terme avec une perte de 1% environ par année. En plus de ces aléas, le rendement du silicium a montré ses limites, et les chercheurs se sont orientés vers d'autres matériaux dont les résultats scientifiques ne sont pas encore matures. Pour cela les énergies renouvelables ne sont pas liées uniquement au photovoltaïque dont les matériaux des cellules ne cesseront pas de se développer pour un meilleur rendement. Par contre les autres technologies (géothermie, éolien, thermodynamique hybride, biomasse, hydraulique, H₂), les moyens mis en œuvre ne changeront pas, seules les améliorations dans les mécanismes et les processus de production ont tendance à se développer.

Depuis plusieurs années, on ne cesse de mettre en évidence la richesse algérienne composée de soleil et de sable, «la silice SiO₂» devenu un slogan, donc l'énergie est à notre portée, continue d'être répété à tous les niveaux de la hiérarchie. On est convaincu que l'énergie solaire à travers le photovoltaïque nous rendrait indépendant énergiquement, alors que la réalité est tout autre, lorsqu'on approfondit scientifiquement ce pseudoslogan qui restera utopique et imaginaire comme celui du projet Desertec. Avant d'entamer l'aspect scientifique à l'échelle mondiale dans le domaine du photovoltaïque, il y a lieu de savoir que depuis pratiquement l'année 2000 et bien avant, des milliards de dollars sont déjà investis dans la recherche qui est suivie par la phase industrielle malgré les aléas techniques non divulgués. Pour amortir ces gros investissements, il est impératif de développer cette industrie photovoltaïque avec toutes les conséquences négatives que cela peut engendrer, en particulier lors de l'exploitation.

Le projet Desertec était déjà sur la table des négociations entre les deux pays, l'Algérie et l'Allemagne, alors que les résultats convainquants n'existaient pas encore. Je ne critique pas ce pays européen qui reçoit une proposition inattendue de l'Algérie qui était prête à payer le prix pour introduire cette nouvelle technologie pas encore mature. J'attire l'attention du grand public sur le fait que les labos de recherche en Algérie se sont déjà engagés dans ce domaine depuis plusieurs années et les aspects négatifs connus à travers les différentes thèses de doctorat, de magister et de master ; malheureusement, ces résultats restent au fond des tiroirs et on s'intéresse plutôt aux forums et aux workshops organisés par des lobbies ou le cartel photovoltaïque dont leur but est de proposer un produit excellent en apparence en faisant abstraction de tous les inconvénients.

Le forum d'octobre 2014 à Oran sur le gaz de schiste était excellent dans la mesure où les avis des scientifiques algériens étaient ignorés. C'est du passé, mais l'histoire peut nous inciter à réfléchir davantage avant de procéder à de gros investissements, alors qu'on est appelé à la rationalité aussi bien en période de vaches maigres qu'en période de vaches grasses. Nous avons déjà attiré l'attention des plus hautes autorités en 2015 sur l'impact financier et technologique du photovoltaïque. Nous présentons dans cette contribution tous les aspects technologiques en amont (carbo-réduction, purification, caractérisation du silicium, les différentes cellules photovoltaïques) et en aval les inconvénients lors de l'exploitation qui sont tellement nombreux de telle sorte qu'il est de notre devoir d'informer le grand public.

1 - Carbo-réduction :

Depuis quelques années, en tant que métallurgiste tout en étant attentif au pseudoslogan sus-cité, j'avais commencé à m'intéresser à l'aspect élaboration de la silice et à la purification du silicium. Bien sûr, avant l'opération sidérurgique, il existe différentes opérations d'enrichissement du minerai. Le principe du traitement de la silice «SiO₂» est identique à celui de l'hématite «Fe₂O₃», sauf que la silice nécessite un four à arc électrique pour atteindre la température de 2000°C supérieure à celle de l'hématite dont la réaction exothermique, accompagnée du vent chaud, est suffisante pour atteindre 1350°C pour réduire cet oxyde de fer. Dans le cas de la silice, le réfractaire du four est de type acide et la réaction de celui-ci est plus fréquente que dans le cas du haut fourneau. Le produit du silicium ainsi obtenu par carbo-réduction est à 98 ou 99%, c'est-à-dire par l'introduction du carbone sous forme de coke, qui permet d'extraire l'oxygène de la silice sous forme de gaz CO très pollueur de l'atmosphère en plus de son impact sur l'effet de serre. Le bon choix du minerai de la silice (SiO₂) a une grande importance, c'est-à-dire la nécessité de l'absence des éléments du groupe III (Al, Ti, B, ...) car leur extraction lors de l'opération ultérieure de purification par la méthode physique reste impossible. Dans le cas où ces éléments du groupe III existent même à l'état de traces dans le silicium métallurgique, on est obligé de recourir à la purification par voie chimique, «méthode de Siemens». La capacité de production de ce haut fourneau de carbo-réduction de la silice en silicium métallurgique contenant 1 à 2% d'impureté est si importante qu'elle doit alimenter plusieurs pays. Donc, il faut confirmer une exportation sûre. Ce silicium impur transformé en poudre peut être associé à un taux de fer qui devient ferro-silicium utilisé en sidérurgie dans les convertisseurs d'acier pour décarburer la fonte ou bien comme éléments d'addition pour certains aciers ou fontes grises. Une autre partie de ce silicium métallurgique serait destinée à la purification pour l'obtention d'un silicium pur à 99,9999% destiné aux cellules photovoltaïques.

2 - Purification par voie chimique (Siemens)⁽¹⁾:

Dans le cas où les éléments du 3^e groupe (Al, Ti, B...) existent dans le minerai de silice, la carbo-réduction est

insuffisante pour réduire ces éléments et la méthode physique décrite ci-dessus ne peut les éliminer. Ainsi, on est contraint d'effectuer une purification par voie chimique à partir du silicium métallurgique. L'attaque consiste à faire réagir le silicium métallurgique avec de l'acide chlorhydrique (HCl) pour obtenir le trichlorosilane (SiHCl₃) et de tétrachlorure de silicium (SiCl₄) accompagné d'un dégagement d'hydrogène (H₂).

Le trichlorosilane purifié est ensuite réduit pour redonner du silicium dans un réacteur à 1100°C avec des dégagements d'hydrogène. En dehors de l'acide chlorhydrique, différents acides peuvent être également utilisés tels que les acides sulfurique, nitrique et fluorhydrique.

3 - Purification par plasma inductif et brassage des forces électromagnétiques :

Le brassage électromagnétique permet un renouvellement du silicium à la surface et la volatilisation des impuretés présentes dans le bain de silicium liquide à 1700°C doivent diffuser au voisinage de la surface libre du silicium liquide pour réagir avec les espèces réactives provenant du plasma (O⁻, H⁺, et OH⁻). L'induction de ces ions favorise également le transfert des impuretés du bain vers la surface et homogénéise la température du silicium liquide dans le bain (CNRS d'après Garnier et Trassy en 1999). Pour cela, il existe de nombreux paramètres à optimiser, entre autres le mode d'injection des gaz réactifs. Ce procédé de purification comporte de nombreux paramètres liés au plasma (puissance, débit des gaz réactifs, position de l'injecteur, la distance torche-bain liquide) et au silicium (vitesse de brassage, température).

4 - Solidification du silicium métallurgique purifié⁽²⁾:

Une fois la purification chimique du silicium assurée pour augmenter le rendement, la purification structurale est également exigée qui consiste à réduire au minimum les dislocations et les macles provoquées lors du refroidissement. Après la purification chimique, le silicium subira une solidification contrôlée du silicium liquide purifié est versé dans un creuset de cristallisation anisotropique, les parois latérales sont opaques, alors que le fond est transparent pour permettre l'extraction de la chaleur par radiations infrarouges. Ainsi, l'obtention du silicium poly-cristallin s'effectue dans un creuset, généralement en silice, couvert sur ses parois internes par une couche en nitrure de silicium qui est un agent permettant de faciliter le démoulage du lingot de silicium. Le creuset chargé en silicium liquide est placé dans un four de fusion, puis porté à 1430°C. Compte tenu du temps de cycle nécessaire à la cristallisation, de l'ordre de 60 heures, les fabricants ont multiplié le nombre de creusets et augmenté la section de base du creuset pour réduire la cinétique de refroidissement. La majorité des creusets contiennent 300 à 450 kg de silicium.

5 - Caractérisation du silicium purifié :

Les plaquettes de silicium polycristallin issues de lingots présentent une bonne qualité cristallographique, des grains de 4 à 5 mm de diamètre et une faible densité de dislocations. Dans la

Par Salhi Essaid
Professeur d'université, ancien
de l'Ecole nationale polytechnique
email : essaidssalhi@yahoo.fr



partie analyse chimique, les différentes techniques d'analyses employées nous permettent de caractériser le silicium et d'évaluer une possible ségrégation des impuretés aux joints de grains. La caractérisation du silicium purifié par les procédés tels que l'analyse chimique et électrique donne des résultats qui permettront d'évaluer la qualité photovoltaïque du matériau. Vu que la carbo-réduction a lieu avec le carbone, sa concentration dans le silicium purifié est de l'ordre de quelques centaines de microgrammes/gramme.

6 - Silicium monocristallin :

Une partie du silicium polycristallin sera destiné à la production de silicium monocristallin par le procédé Czochralski qui est une technique très complexe. L'opération doit donc se dérouler dans une enceinte hermétiquement close, d'une propreté «chirurgicale», et dans une atmosphère neutre ou sous vide. Autour de l'enceinte isolante en quartz est placé l'inducteur d'un générateur de haute fréquence qui permet de porter le matériau à la température de fusion de 1500°C. Le silicium se refroidit et se cristallise. Les détails du procédé sont indiqués à la référence⁽³⁾.

7 - Silicium amorphe hydrogéné :

Comme son nom l'indique, le silicium amorphe hydrogéné est composé d'atomes de silicium qui sont en configuration désordonnée, loin de tous les réseaux de Bravais. Le silicium amorphe hydrogéné a été déjà initié en 1969 où il a connu un regain d'intérêt par rapport au silicium amorphe non hydrogéné. De plus, il a été démontré qu'introduire de l'hydrogène dans le matériau permet d'y intégrer efficacement des atomes dopants, indispensables aux applications photovoltaïques. Le procédé de fabrication consiste en l'introduction de l'H₂ qui entre en liaison avec le silicium pour donner le silane (SiH₄). Les détails du procédé sont indiqués à la référence⁽⁴⁾.

Après avoir considéré les cellules photovoltaïques de silicium de 1^{re} génération, nous décrivons les matériaux de 2^e et de 3^e génération.

8 - Les cellules de 2^e génération :

On appelle les cellules de 2^e génération les cellules à couches minces réalisées avec du silicium mais en couches extrêmement fines. Elles peuvent aussi être réalisées avec autre chose que du silicium, du tellure de cadmium. On sait actuellement produire des cellules à nanostructures qui ne dépassent pas les quelque centaines de microns d'épaisseur.