

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE  
جامعة عمّار ثليجي بالأغواط  
UNIVERSITÉ AMAR TELIDJI LAGHOUAT  
كلية العلوم  
FACULTÉ DES SCIENCES  
ميدان علوم المادة  
DÉPARTEMENT SCIENCES DE LA MATIÈRE



## *Mémoire de Master*

**Domaine :** Sciences de la matière

**Filière :** Physique appliquée

**Option:** Physique

**Par :**

**Mr ZAIDA Abdenour**

## THÈME

---

# **Les voies de purification du silicium métallurgique pour les applications photovoltaïques : méthode de solidification directionnelle**

---

*Soutenu publiquement devant le jury composé de :*

*Mr GUIBADJ Abdenacer*

*Mr TAOUTI Mohamed Benabdallah*

*Mr NOUIOUA Ismail*

*Mr NOURI Abdallah*

*Professeur*

*MCA*

*MAA*

*MCB*

*Président*

*Examineur*

*Examineur*

*Rapporteur*

*Année universitaire 2018 - 2019*

## Remerciements

Tout d'abord, je remercie le bon Dieu le tout puissant de m'avoir donné la force et le courage et la volonte de réaliser a bien ce modeste travail.

Je me ferais un agréable devoir de remercier mon encadreur, Dr NOURI Abdallah, pour son soutien et d'avoir dirigé ce travail et m'avoir fait bénéficier de son expérience et de ses précieux conseils.

Je tiens aussi à remercier les honorables membres de jury, le professeur GUIBADJ Abdenacer, Mr TAOUTI Mohamed Benabdallah et Mr NOUIOUA Ismaïl pour leurs acceptations de faire partit de mon jury de soutenance de mémoire de master.

Ce chapitre incontournable peut être l'occasion d'exprimer une gratitude sincère envers les personnes qui ont apporté une aide, une écoute ou simplement une chaleur gratuite et généreuse. À tous les responsables au département du physique qui ont mis à notre disposition tous les moyens nécessaires.

## Dédicaces

Je dédie cet événement marquant de ma vie à la mémoire de mon père décédé trop tôt. J'espère que, du monde qui est sien maintenant, il apprécie cet humble geste comme preuve de reconnaissance de la part d'un fils qui a toujours prié pour le salut de son âme. Puisse Dieu, le Tout-Puissant, l'avoir en sa sainte miséricorde !

À ma chère mère, aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien-être. Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés, le fruit de vos innombrables sacrifices, bien que je ne vous en acquitterai jamais assez. Puisse Dieu, le très haut, vous accorder santé, bonheur et longue vie et faire en sorte que je ne vous déçoive jamais.

Mes chers et adorables frères et sœurs en témoignage de mon affection fraternelle, de ma profonde tendresse et reconnaissance, je vous souhaite une vie pleine de bonheur et de succès et que Dieu, le tout puissant, vous protège et vous garde.

À ma chère fiancée, pour ton encouragement et ton soutien, ils étaient la bouffée d'oxygène qui me ressourçait dans les moments pénibles, de solitude et de souffrance, je te prie de trouver dans ce travail l'expression de mon estime et mon sincère attachement. Je prie Dieu le tout puissant pour qu'il te donne bonheur et prospérité.

Mes dédicaces s'étendent également à mes collègues membres du Groupe de physique appliquée de la Faculté de Sciences de la matière, surtout Mlle YOUSFI Aïcha pour toute l'aide qu'elle m'a apportée. Et tous les amis EL HOUARI Amine, KEZIOU Tawfiq, MEGAIZ Ahmed, HIZOUM Mustapha et les personnes pour tout ce qu'ils ont fait pour moi. Mes salutations les plus sincères

Je tiens à exprimer mes vives dédicaces envers mon encadreur Dr. NOURI Abdallah, pour sa disponibilité, son encadrement, sa confiance et les conseils qu'il m'a généreusement prodigués.

## Table des matières

**Remerciements**

**Dédicaces**

**Table des matières**

**Table des figures**

**Liste des tableaux**

**Liste des acronymes et des symboles**

**Introduction générale.....1**

**Chapitre I : analyse du contexte énergétique mondial.....3**

1.1. Introduction.....3

1.2. Types des énergies utilisées dans le monde.....3

1.3 Types des énergies solaires renouvelables.....6

1.4 L'énergie solaire photovoltaïque.....6

1.5. Conclusion.....7

**Chapitre II : technologies solaires photovoltaïques.....8**

2.1. Introduction.....8

2.2. Technologies utilisées pour la fabrication des wafers solaires.....9

2.2.1. Les technologies pour silicium en couches minces.....9

2.2.2. Les technologies pour silicium massif.....9

2.2.2.1. Le silicium monocristallin : le procédé de Czochralski.....10

2.2.2.2. Le silicium multi-cristallin : le procédé de solidification directionnelle.....10

2.3. Comparaison entre les technologies solaires photovoltaïques.....11

2.4. Conclusion.....12

**Chapitre III : production et purification du silicium métallurgique.....13**

3.1. Introduction.....13

3.2. Procédé de production de silicium métallurgique.....	13
3.3. Voies de purification du silicium métallurgique.....	14
3.3.1. La purification chimique par voie gazeuse.....	15
3.3.2. La purification chimique par attaque d'un acide liquide.....	15
3.3.3. La purification physico-chimique en phase liquide par affinage....	15
3.3.4. La purification physico-chimique en phase liquide par plasma réactif.....	15
3.3.5. La purification physico-chimique en phase liquide par laitier.....	16
3.3.6. La purification physico-chimique en phase liquide par ségrégation .....	16
3.4. Conclusion.....	16

**Chapitre IV : purification du silicium métallurgique par solidification directionnelle.....**

4.1. Introduction.....	17
4.2. Type des impuretés dans le silicium métallurgique.....	17
4.3. Effet des impuretés sur le rendement des cellules solaires.....	18
4.4. Principe de purification du silicium métallurgique par solidification directionnelle.....	19
4.5. Fours industriels de solidification directionnelle.....	20
4.6. Principales lois théoriques qui gèrent la solidification directionnelle.....	21
4.7. Équations de conservation.....	22
4.7.1. Bilans inter faciaux.....	24
4.7.2. Équilibre de solidification : coefficient de partage $k$ .....	24
4.7.3. Enthalpie de solidification.....	25
4.8. Ségrégation des impuretés : modèle de Scheil-Gulliver.....	26
4.9. Différente application du modèle de ségrégation de Scheil-Gulliver.....	27
4.9.1. Régime diffusif dans le liquide avec coefficient de partage $k$ .....	27

4.9.2. Régime convecto-diffusif dans le liquide avec coefficient de partage effectif $k_{\text{eff}}$ .....	28
4.10 Effet de la forme de l'interface solide / liquide sur la ségrégation.....	29
4.11. Conclusion.....	30
<b>YChapitre V : amélioration de four de solidification directionnelle par simulation numérique.....</b>	<b>31</b>
5.1. Introduction.....	31
5.2. Outil de calcul : logiciel COMSOL.....	31
5.3. Modelés de simulation.....	31
5.3.1. Description du choix de la géométrie.....	31
5.3.2. Description du modèle.....	32
5.4. Description de la géométrie du four et des résultats de simulation.....	32
5.4.1. Four avec la configuration de conception réel qui existe dans l'industrie.....	33
5.4.2. Four avec la configuration de la conception amélioré.....	35
5.5. Conclusion.....	37
<b>Conclusion générale et perspectives.....</b>	<b>38</b>
<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>39</b>
<b>YAnnexes :.....</b>	<b>i</b>
Annexe A :.....	ii
Annexe B :.....	iii
Annexe C :.....	iv
Annexe D :.....	v

**Resumes, Abstract, ملخص**



## Table des figures

1	Capacité, production et prix des modules photovoltaïques du silicium multi cristallin.	01
	Énergies globales avec estimation future par type de combustible : à gauche les parts	
1.1	de production par énergie primaire et à droite leurs consommations. En tonne d'équivalents pétrole (toe : tonne of oil équivalent).	03
1.2	Demande en énergie primaire par secteurs.	04
1.3	Développement annuel de la consommation mondiale de l'énergie entre 2011 et 2018. (1 Mtoe = 41.868 G Joules).	05
1.4	Croissance des énergies renouvelable par technologie et région entre 2017 et 2018.	05
2.1	Classification des principales technologies de cellules solaires photovoltaïques.	08
2.2	à gauche type MO-Si généré par le procédé Czochralski, et à droite type MC-Si généré par un procédé de solidification directionnelle.	09
2.3	Schéma du four de solidification directionnelle pour le silicium.	10
2.4	Chaine de fabrication du photovoltaïque : procédés de solidification directionnelle.	11
3.1	Schéma du four à arc submergé (SAF): (a) Le revêtement et la zone de versage avec les réactions chimiques [12]. (b) la structure du four avec les températures internes.	14
4.1	Effet des impuretés métalliques sur le rendement des cellules.	19
4.2	Principe de la méthode d'extraction de la chaleur localement en bas du creuset.	20
4.3	Fours de solidification industrielle dans le marché : (a) ECM, (b) GT Solar et (c) JYT.	21
4.4	Solidification directionnelle par vitesse de tirage.	21
4.5	Solidification directionnelle par vitesse de solidification.	22
4.6	Évolution des paramètres de contrôles d'un système de solidification directionnelle.	23
4.7	Représentation des profils de concentration le long d'un solide avec la loi de Scheil- Gulliver pour diverses valeurs du coefficient de partage k.	27
4.8	Géométrie avec les principaux paramètres.	29
5.1	Forme des lingots les briques de silicium métallurgique après purification et découpage	32
5.2	Schéma du four comme il existe dans l'industrie	33
5.3	Four réel avec une température de travail des éléments chauffants latéraux de 1600C. (a) : configuration thermique du silicium liquide, (b) : configuration thermique après la solidification.	34
5.4	Four réel avec une température de travail des éléments chauffants latéraux de 1650C. (a) : configuration thermique du silicium liquide, (b) configuration thermique après la solidification.	34
5.5	Schéma du four avec l'amélioration proposé par notre cas d'étude.	35

<b>5.6</b>	Four amélioré avec une température de travail de tous les éléments chauffant de 1600C. <b>(a)</b> : Configuration thermique du silicium liquide, <b>(b)</b> : Configuration après la solidification.	36
<b>5.7</b>	Four amélioré avec une température de travail des éléments chauffants latéraux de 1500C et de haut de 1600C. <b>(a)</b> : Configuration thermique du silicium liquide, <b>(b)</b> : Configuration après la solidification.	36
<b>B.1</b>	Rendements de conversion PV confirmés pour diverses technologies PV (NREL).	iii
<b>C.1</b>	Dimensions du four de solidification directionnelle utilisé pour la simulation numériques.	iv

## Liste des tableaux

<b>4.1</b>	Niveaux des impuretés dans les deux types silicium électroniques.	17
<b>4.2</b>	Niveaux des impuretés dans les différents types de silicium métallurgiques.	18
<b>4.3</b>	Les coefficients de ségrégations des différents éléments dans le silicium.	29
<b>C.1</b>	Exemple propriétés du graphite solide utilisé pour les éléments chauffants et le porte creuset d'après TOYO TANSO	v
<b>C.2</b>	Exemple des propriétés de fibre de graphite utilisé pour l'enceinte d'isolation thermique d'après TOYO TANSO.	vi
<b>C.3</b>	Exemple des propriétés du quartz utilisé pour les creusets de solidification d'après LABMODERNE.	vii

## Liste des acronymes et des symboles

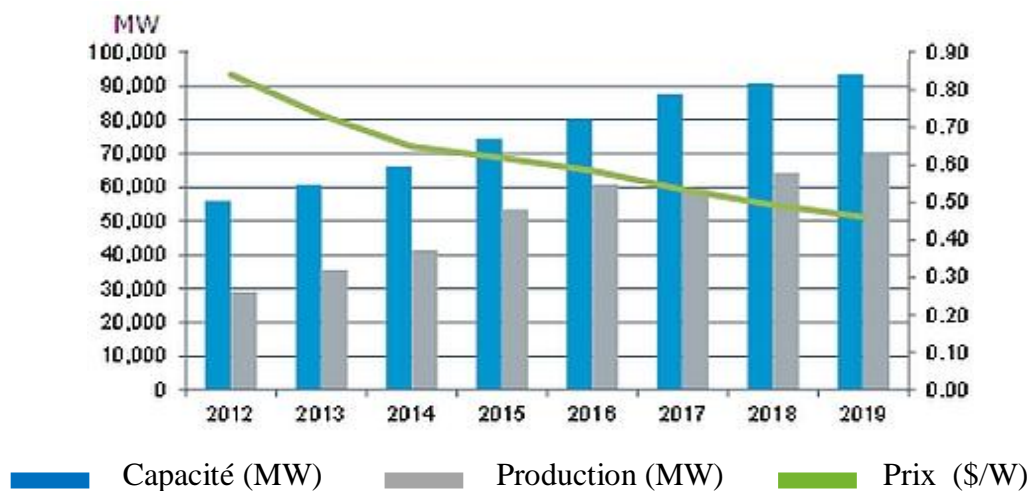
BP	British Petroleum
IHS	Information Handling Services
IEA	Agence Internationale de l'Énergie
NREL	National Renewable Energy Laboratory
ONU	Organisation des Nations Unies
OCDE	Organisation de Coopération et de Développement Economiques
CVD	Chemical Vapor Deposition
PV	Photovoltaïque
a-Si	silicium amorphe
CdTe	Tellure de Cadmium
CIGS	Cuivre Indium Gallium Sélénium
CIS	Cuivre Indium Sélénium,
EG-Si	Electronic Grade Silicon
MO-SI	Silicium Monocristallin
MC-SI	Silicium Multi Cristallin
MG-Si	Metallurgical Grade Silicon
SoG-Si	Solar Grade Silicon
UMG-Si	Up graded Metallurgical Silicon
ppb	Partie par billion
ppm	Partie par million
$C_0$	Concentration initiale
$C_L$	Concentration dans liquide
$C_S$	Concentration dans solide
$D_L$	Coefficient de diffusion de l'impureté
$e$	Épaisseur du creuset
$f$	Forme de l'interface
$f$	Fraction du silicium dans la phase solide
$G_L$	Gradients thermiques à l'interface dans le silicium liquide
$G_S$	Gradients thermiques à l'interface dans le silicium solide
$H$	Enthalpie totale de solidification
$H_S$	Enthalpie volumique de solide
$H_L$	Enthalpie volumique de liquide
$k$	Coefficient de partage (de ségrégation)
$k_{eff}$	Coefficient de partage effectif

$K_S$	Conductivité thermique dans le solide
$K_L$	Conductivité thermique dans le liquide
$L$	Chaleur latente de fusion par unité de volume
$n$	Normale en un point de l'interface
$R$	Diamètre du lingot
$T_C$	Température chaude
$T_f$	Température de fusion du silicium
$T_F$	Température froide
$T_{eq}$	Température de l'interface à l'équilibre thermodynamique
$T_L$	Température dans liquide
$T_S$	Température dans solide
$V$	Vitesse de solidification et de tirage et de l'interface
$V_M^S$	Volume molaire du solide
$\delta=D_L/V$	Couche limite de diffusion
$\Delta H_F$	Enthalpie de fusion par mole
$\phi$	Grandeur considérée (T ou C) prise au niveau de l'interface solide liquide du silicium

## Introduction générale

Au point de vue quantité d'énergie, l'énergie solaire répandue sur la terre est largement supérieure aux besoins énergétiques annuels de toute la population. De nos jours, cette énergie est inexploitée malgré le développement soutenu des technologies des énergies solaires photovoltaïques et thermiques. Pour les énergies photovoltaïques, plusieurs matériaux semi-conducteurs sont utilisés, le plus important est le silicium (Si), elle passe par des procédés de purification, qui prennent une très grande place dans l'industrie solaire photovoltaïque. Ils subviennent aux besoins de matière première grâce aux nouvelles techniques qui tiennent compte des aspects financiers et de contrôle de qualité.

Dans la dernière décennie, les énergies renouvelables ont vu une très grande croissance, l'énergie éolienne et l'énergie solaire photovoltaïque sont les plus fortes, environ 30% de croissance en moyenne par an sur les dix dernières années. L'avantage du photovoltaïque est la conversion directe du rayonnement solaire en électricité exploitable, son principal inconvénient est son coût de fabrication. Sous cette contrainte, actuellement cette industrie est soutenue par des politiques nationales, qui permettent la réduction à la dépendance énergétique et la réduction des émissions de gaz à effet de serre. La figure suivante représente le développement de la production, la capacité et les coûts des modules solaires depuis 2012, d'après Information Handling Services (IHS) [1].



**Figure 1 :** Capacité, production et prix des modules photovoltaïques du silicium multi cristallin.

D'après la figure, la production suit la capacité. Cette augmentation influence la concurrence, les prix moyens des modules solaires ont baissé d'environ 9% par an.

Les critères de pureté du silicium pour l'industrie solaire sont devenus moins contraignants que pour l'industrie électronique, une pénurie en silicium c'est déclenché dans le marché du silicium, conséquence plusieurs études ont été lancées dans le but de créer une nouvelle voie de production de silicium de qualité solaire, en simplifiant le procédé de distillation en phase gazeuse, ou en purifiant le silicium à l'aide de techniques métallurgiques pour diminuer les temps et les coûts de production. Les deux producteurs les plus impliqués dans cette thématique en Europe sont le norvégien Elkem Solar et le groupe espagnol Ferroglobe.

**Objectifs de la mémoire :** L'étude porte essentiellement sur l'amélioration du procédé de purification du silicium métallurgique par voie de solidification directionnelle en utilisant le principe physicochimique de la ségrégation des impuretés au cours de changement de phase du silicium. Pour réaliser cette tâche, nous avons travaillé sur les paramètres de contrôle de la méthode de purification ainsi que les fours des producteurs de silicium industriels spécialisés. Les plus importants fabricants sont : le fabricant américain GT Solar, le fabricant français ECM et le fabricant chinois JYT. Plusieurs types de four existent selon la conception du système de chauffage mais leurs principe de base est le même. Ces conceptions peuvent influencer la qualité de produit final.

**Organisation du manuscrit :** Le manuscrit s'articule sur la voie de purification du silicium par solidification directionnelle pour l'industrie photovoltaïque. Ainsi, après avoir présenté dans la première partie une introduction générale dans lequel s'inscrit le travail, nous présentons dans le premier et le deuxième chapitres une analyse sur les énergies renouvelables et les matériaux utilisés dans l'industrie photovoltaïques. Le troisième chapitre nous présentons les procédés de production et de purification qui sont utilisés à nos jours pour le silicium métallurgique. Le quatrième et le cinquième chapitres sont dédiés au procédé de purification par solidification directionnel : la conception des fours industriels, le principe de purification par solidification directionnelle, la théorie qui contrôle la méthode de purification et la modélisation numérique d'amélioration future des fours de production avec le logiciel multiphasique COMSOL.

Nous terminerons avec une conclusion générale des travaux réalisés avec les perspectives futures de conception de four industriel de procédé de purifications du silicium métallurgique. Quelques annexes sont présentées en fin du mémoire pour le complément d'information.

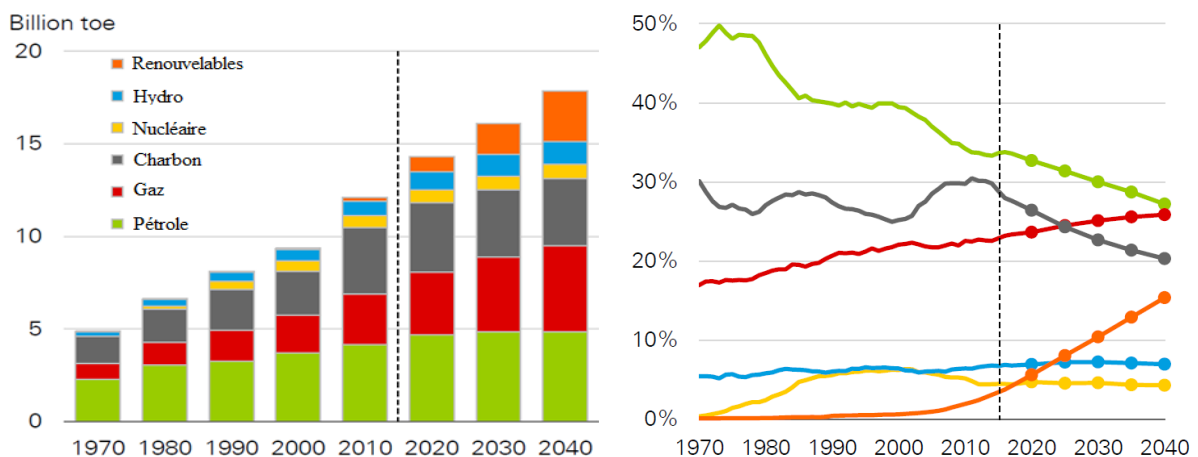
## Chapitre I : analyse du contexte énergétique mondial

### 1.1. Introduction

La consommation de l'énergie est le principal indice de développement économique, les énergies renouvelables font l'objet d'importantes recherches d'amélioration pour augmenter leurs efficacités dans le but de préserver l'avenir économique et environnemental d'une part, et d'autre part pour subvenir aux besoins énergétiques à l'échelle mondiale. Ces recherches s'expliquent par le fait que les énergies renouvelables sont en relation avec la météo et les saisons, leurs coûts de production sont plus élevés que celui des énergies fossiles (pétrole, gaz et charbon). Pour inciter les industriels à faire des recherches de développement, plusieurs politiques gouvernementales en faveur des énergies renouvelables ont vu le jour. L'inflation des prix du pétrole, l'épuisement des ressources d'énergie fossile, l'évolution démographique et le réchauffement climatique ont conduit à la forte croissance de ces énergies. Leurs développements futurs constituent les défis majeurs de la gestion énergétique de demain.

### 1.2. Types des énergies utilisées dans le monde

Actuellement, la part des énergies fossiles représente environ 81% de l'énergie total, elle connaîtra une légère diminution dans un avenir proche comme le montre la figure 1.1 d'après le rapport de British Petroleum (BP) « BP Energy Outlook 2019 » [2].



**Figure 1.1 :** Énergies globales avec estimation future par type de combustible : à gauche les parts de production par énergie primaire et à droite leurs consommations. En tonne d'équivalents pétrole (toe : tonne of oil équivalent) [2].

En 2050, la population mondiale est estimée à 9 milliards d'habitants selon l'organisation des nations unies (ONU). De plus, la démographie de la Chine, de l'Inde et du Brésil fait que la zone hors organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) abritera environ 85% des habitants de la planète. Ces estimations montrent l'importance de la question énergétique à long terme. Cependant, la réserve des énergies fossiles est limitée et leur utilisation entraîne le rejet des gaz carboniques dans l'atmosphère, car il accélère le phénomène d'effet de serre. De plus, les stocks d'uranium pour la production d'énergie d'origine nucléaire sont eux aussi limités et la gestion des déchets reste un problème major. Sans oublier, le développement économique inconscient qui a suscité des effets irréversibles, l'Agence internationale de l'énergie (IEA) a publié une croissance de la consommation mondiale d'énergie de 2,3% pour l'année 2018. Cette croissance est principalement liée à un développement économique très soutenu et une grande demande d'énergie par les besoins en chauffage et en climatisation [3]. Dans ce contexte complexe, il est urgent de développer les énergies renouvelables. La figure suivante donne une idée sur la distribution de la consommation de l'énergie par secteur dans le monde :

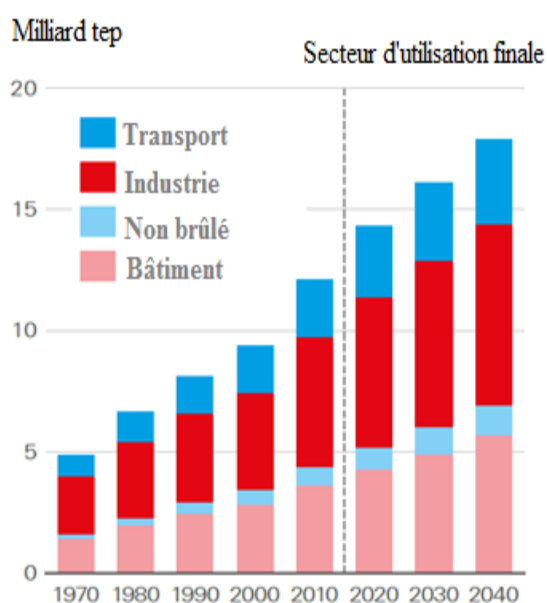
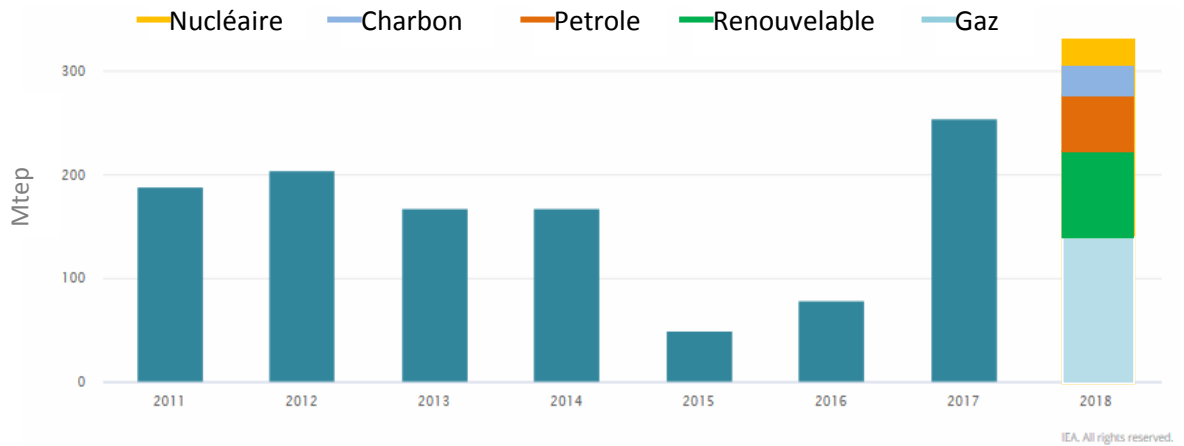


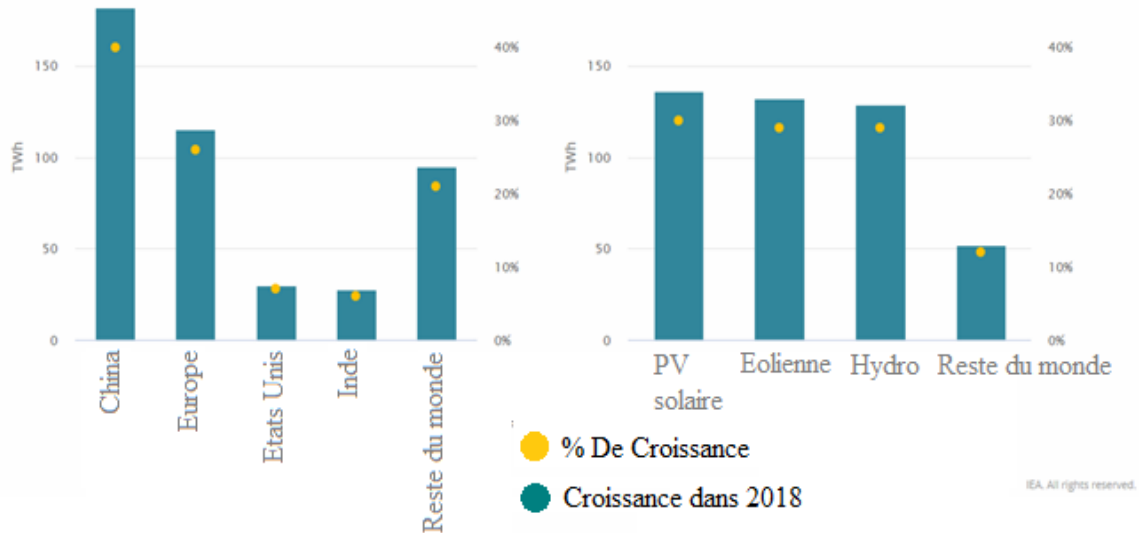
Figure 1.2 : Demande en énergie primaire par secteurs [2].

Comme le montre la figure 1.2, les deux secteurs les plus importants en consommation d'énergie sont le secteur industriel et le secteur du bâtiment. La figure 1.3 représente la consommation mondiale de l'énergie en tonne d'équivalent pétrole entre 2011 et 2018, comme on peut le voir, la consommation entre 2017 et 2018 a augmenté de 74 Mtoe, équivalente à 29% d'augmentation.



**Figure 1.3:**Développement annuel de la consommation mondiale de l'énergie entre 2011 et 2018. (1 Mtoe = 41.868 G Joules) [3].

La bonne nouvelle est que, pour l'année 2018, 25% de la consommation mondiale est d'origine renouvelable. Cette énergie renouvelable est représentée par secteur technologique et région dans la figure suivante :



**Figure 1.4 :** Croissance des énergies renouvelable par technologie et région entre 2017 et 2018 [3]

D'après la figure 1.4, l'énergie solaire photovoltaïque, hydroélectrique et éolienne ont représenté chacun environ un tiers de la croissance des énergies renouvelables, ils ont été à l'origine de près de 45% de l'augmentation mondiale de la production d'électricité. Un autre point, la Chine a produit plus de 40% de croissance en électricité à partir d'énergies renouvelables, suivie par l'Europe avec une production de 25%. Les États-Unis et l'Inde

réunis, ils ont contribué à une hauteur de 13%. De même, pour le reste du monde avec une croissance rapide et égale à 21%.

Pour la production d'électricité du secteur du solaire photovoltaïque a connu une année record avec une croissance de 31%. Depuis 2015, les ajouts annuels de capacité photovoltaïque ont doublé. Cette évolution est la suite des nouvelles politiques gouvernementales qui visent une expansion de l'énergie solaire.

### 1.3. Types des énergies solaires renouvelables

Le soleil est la source d'énergie la plus abondante sur la terre. Pour exploiter cette énergie solaire, on utilise deux types de capteurs solaires :

- *Les capteurs solaires photovoltaïques* : permettant une conversion directe de l'énergie des rayons solaire en énergie électrique.
- *Les capteurs solaires thermiques* : permettant soit la production de la chaleur à partir de l'énergie solaire, soit une conversion indirecte de l'énergie solaire en électricité.

### 1.4. L'énergie solaire photovoltaïque

Ohl et coll. en 1941 ont publié un travail sur la première cellule solaire au silicium. Puis en 1954, Chapin et coll. confirme leurs travaux sur les cellules solaires au silicium avec une efficacité d'environ 4,5% [4]. C'était à l'époque de la quête de l'espace, il a fallu trouver un moyen d'alimenter en énergies électriques les satellites de façon autonome. Cette énergie est due au phénomène physique connu sous le nom de transformation photovoltaïque. Ce phénomène transforme une partie de l'énergie du rayonnement solaire a une énergie électrique, en utilisons un matériau semi-conducteur, comme le silicium. Physiquement, un photon de lumière incidente permet de mettre en mouvement un électron dans le réseau cristallin du semi-conducteur, produisant ainsi un courant électrique. Depuis, le marché photovoltaïque a commencé de se construire jusqu'au choc pétrolier de 1973, quia incité plusieurs pays de s'intéresser à cette source d'énergies renouvelables pour les applications terrestres. Ainsi, le développement de l'industrie du photovoltaïque a commencé au début des années 80 et elle a connu une croissance en recherche et développement assez rapide dans les années 90, croissance qui s'est maintenue depuis.

D'après BP Renewable Energy [5], les nouvelles installations photovoltaïques ont dépassé les 97 GW en 2017. Cette addition porte la capacité de production mondiale d'énergie solaire photovoltaïque à environ 400 GW. Soit une augmentation de 32% par rapport à l'année 2016. La Chine est en tête en termes de capacité installée cumulée (130 GW), avec un tiers du total mondial. Les États-Unis (51 GW) et le Japon (49 GW) occupent les deuxième et troisième places, tandis que l'Allemagne (42 GW) occupe le quatrième rang.

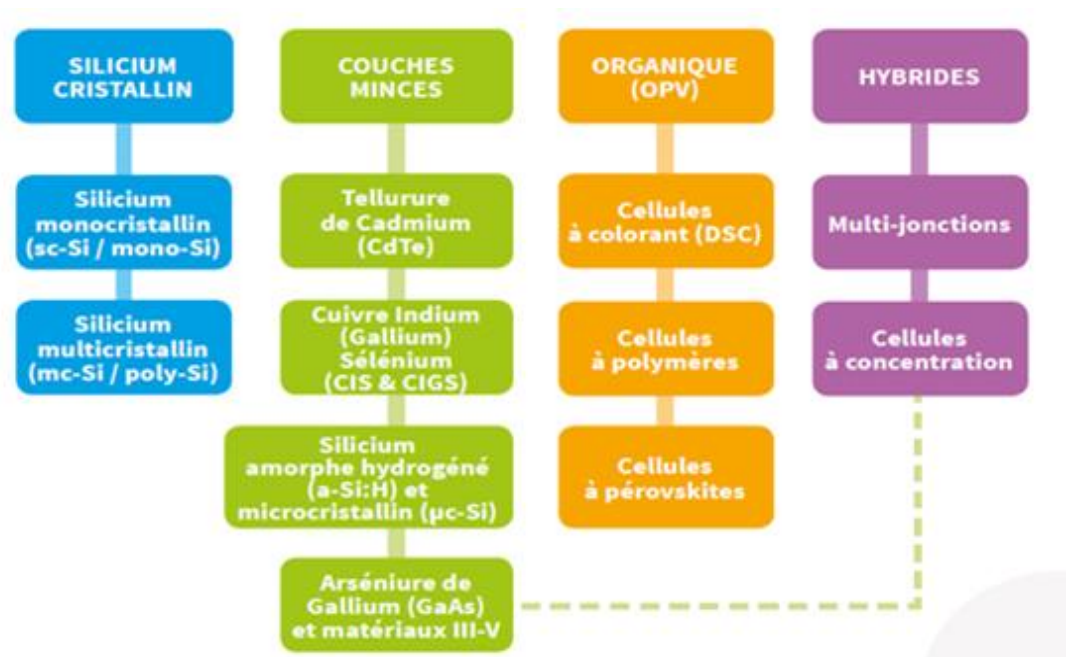
### **1.5. Conclusion**

Il est clair qu'avec le développement économique et démographique l'évolution de la production et la consommation de l'énergie fossile va atteindre ces limites pour subvenir à cette grande demande. Les énergies renouvelables ont le potentiel d'alléger cette demande d'énergies. Vu l'intérêt primordial de cette source d'énergie, il faut utiliser et développer les technologies des sources des énergies renouvelables et inépuisable pour qu'elle soit accessible à tout.

## Chapitre II : technologies solaires photovoltaïques

### 2.1. Introduction

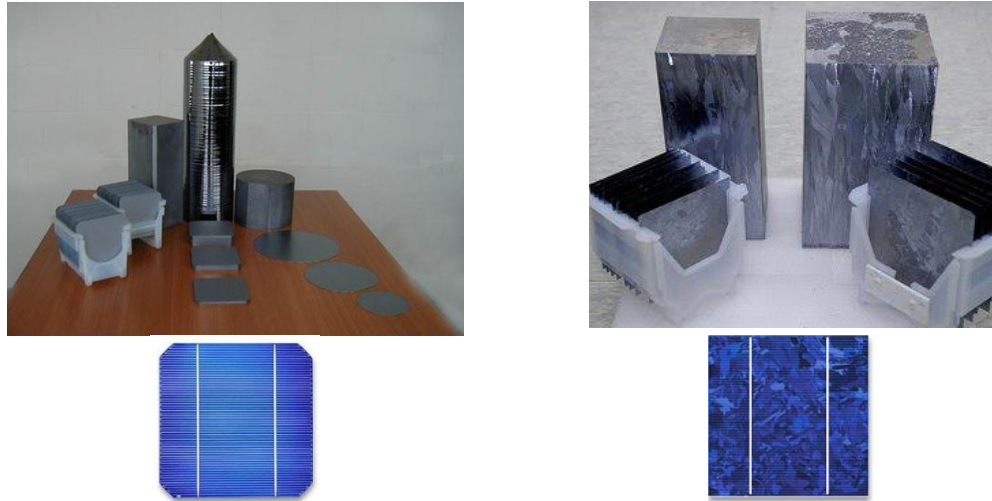
La figure suivante résume les différentes technologies existantes dans la fabrication des cellules photovoltaïques [7] (plus de détails dans l'annexe A):



**Figure 2.1:** Classification des principales technologies de cellules solaires photovoltaïques.

À nos jours, les technologies les plus utilisées sont celle du silicium. Donc, les cellules qui existent dans le marché sont obtenues à partir d'un seul cristal (cellules mono cristallines, MO-Si) ou à partir de plusieurs cristaux (cellules multi cristallines, MC-Si) figure 2.2.

Le silicium est un semi-conducteur extrêmement abondant sur la terre. Il est stable est non toxique et il possède un oxyde naturel ( $\text{SiO}_2$ ). Il présente d'excellentes propriétés électroniques et il peut être dopé facilement (avec le phosphore ou le bore). Côté efficacité, la fabrication des cellules c'est bien développées pour améliorer les rendements des cellules. La figure suivante représente des photos des deux types de silicium MO-Si et MC-Si :



**Figure 2.2 :** à gauche type MO-Si généré par le procédé Czochralski, et à droite type MC-Si généré par un procédé de solidification directionnelle [8,9].

## 2.2. Technologies utilisées pour la fabrication des wafers solaires

Il existe plusieurs technologies de fabrication de wafers en silicium, on peut les classer en deux catégories : les technologies pour couches minces et les technologies de silicium massif.

### 2.2.1. Les technologies pour silicium en couches minces

Dans la filière des couches minces, on peut trouver des wafers de cellules à base de silicium amorphe (a-Si). Ces cellules sont produites par dépôt en phase vapeur CVD (Chemical Vapor Deposition). Cette méthode présente l'intérêt d'avoir un coût de fabrication plus faible que le silicium cristallin, elle peut être déposée sur des substrats, rigide ou flexible. Son inconvénient est que son efficacité est plus faible que celle du silicium cristallin. D'autres types de couches minces existent avec d'autres matériaux comme le CdTe et le CuInSe<sub>2</sub> (CIS). Leur efficacité est inférieure à celle des cellules à base de silicium. De plus, le CdTe pose des problèmes de sécurité liés à sa toxicité et nécessite des mesures particulières pour le recyclage du Cadmium et du Tellure.

### 2.2.2. Les technologies pour le silicium massif

Ils sont obtenus par cristallisation. Dans l'industrie, les deux types de wafers les plus utilisés sont les wafers en MO-Si et les wafers en MC-Si. La différence entre les deux types de matériaux se situe dans la technique de production.

### 2.2.2.1. Le silicium monocristallin: le procédé de Czochralski

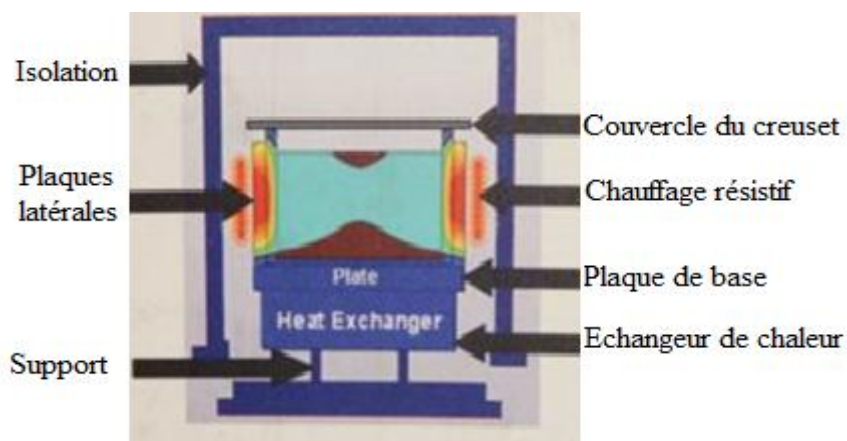
Cette technique de cristallisation se distingue par le grand rendement de conversion des cellules solaires, mais leur coût de fabrication est très élevé. Le matériau élaboré est porté à la fusion dans un creuset de quartz maintenu liquide à l'aide d'éléments chauffants. On y plonge un germe monocristallin. Le liquide remonte le long du germe, le silicium se solidifie sur ce germe selon la même orientation cristallographique. On tire lentement le germe vers le haut, avec un mouvement de rotation, en contrôlant avec attention la température et la vitesse qui est de l'ordre du millimètre par heure.

### 2.2.2.2. Le silicium multi-cristallin : le procédé de solidification directionnelle

La majeure partie de la production des wafers à base de silicium massif est d'origine MC-Si. Le procédé utilisé est le procédé de solidification directionnelle en creuset, il peut se faire de plusieurs manières:

- *La première* : Le creuset avec le silicium liquide se déplace dans un four de solidification à gradient de température contrôlé.
- *La deuxième* : Le creuset avec le silicium liquide est fixe et on établit un gradient de température entre le haut et le bas du creuset.

La figure suivante représente un schéma du four de solidification directionnel utilisé dans la production des lingots MC-Si.



**Figure 2.3** : Schéma du four de solidification directionnelle pour le silicium.

Cette méthode présente l'intérêt d'intégrer le phénomène physico chimique de ségrégation des impuretés, qui conduit à une accumulation de la plupart des impuretés

métalliques en haut du lingot solidifié (partie généralement enlevée). La figure 2.4 donne une idée sur la chaîne de production de type MC-Si. Sur la figure, En commençant par la matière première, un silicium de qualité contrôlée, on produit des lingots de forme différente, selon les fours utilisés (de G4 présenté dans la figure avec 4 x 4 bricks jusqu'au G8). Puis les bricks, de forme standard, sont découpés en wafers (des tranches) avec une scie à fil de diamant, ces tranches sont traitées pour fabriquer les cellules photovoltaïques.

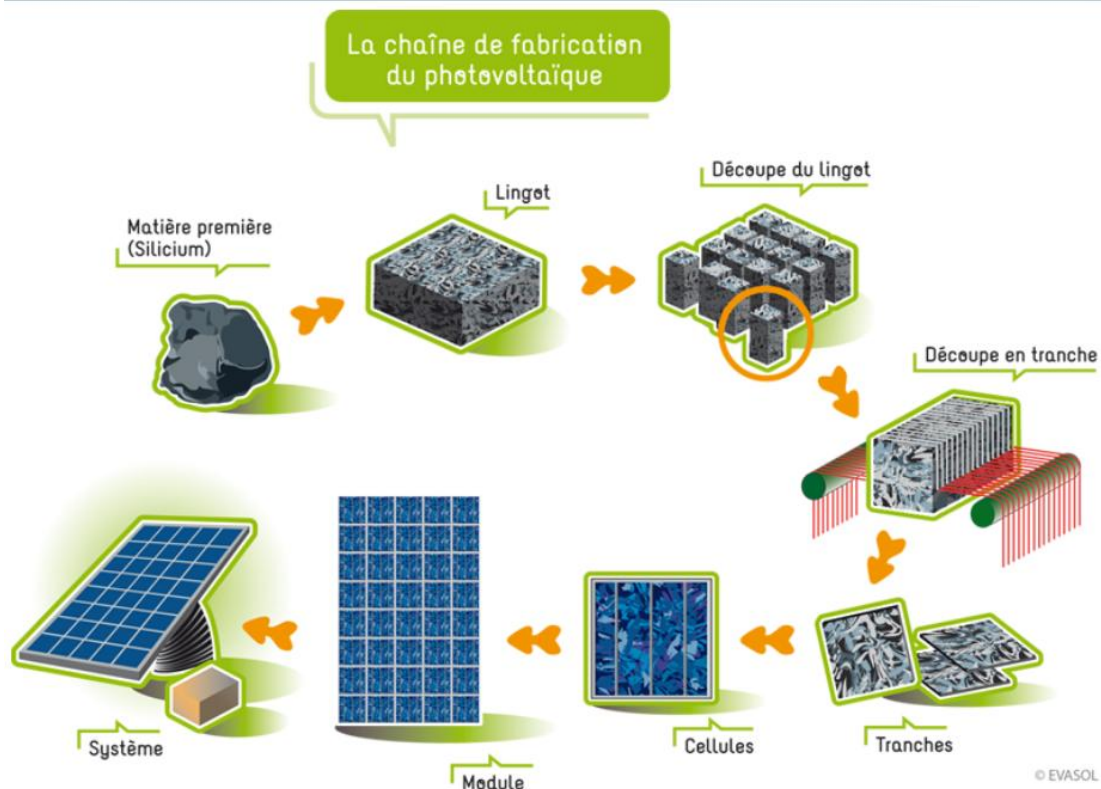


Figure 2.4: Chaîne de fabrication du photovoltaïque : procédés de solidification directionnelle [10].

### 2.3. Comparaison entre les technologies solaires photovoltaïques

Il est possible de trouver des travaux sur les cellules organiques qui fonctionnent sur le principe des cellules à colorant avec différents matériaux (cellules à colorant, à polymères ou à pérovskites). Avec des rendements de l'ordre de 3 à 5 %. En plus d'un rendement très bas, leur point faible est leur durée de vie limitée. Enfin, les cellules hybrides rassemblent les cellules mettant en présence des technologies de natures différentes pour atteindre des rendements optimisés, comme est le cas de système de multi jonctions sur Silicium. L'organisme américain National Renewable Energy Laboratory (NREL) [10] a classé les rendements des modules photovoltaïques par rapport à la technologie utilisée dans la

fabrication dans le monde dans la figure B.1 de l'annexe B. D'après l'analyse de NREL, les modules de silicium sont les plus intéressants dans la production d'électricité puisqu'il rassemble les trois éléments essentiels : le rendement, la durée de vie et les coûts de production. Avec cette technologie, le photovoltaïque apparaît comme une technologie de source d'énergie prometteuse disponible en grande quantité. Le coût de l'énergie solaire diminue, et elle devient de plus en plus compétitive. Dans cette optique, la garantie de l'approvisionnement en matières premières comme le silicium est indispensable.

## **2.4. Conclusion**

Il est clair qu'à nos jours, la technologie du silicium est la plus efficace, car elle propose un bon compromis entre: le rendement de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique, qui est très intéressant, la durée de vie des panneaux solaires, qui dépasse les 25 ans, et finalement les coûts de production qui commence à être abordable. Cette avantage, nous insiste à développer et promouvoir les technologies qui utilisent le silicium comme matière première.

## Chapitre III : production et purification du silicium métallurgique

### 3.1. Introduction

Le silicium existe en grande quantité à la surface de la Terre. Il est le deuxième élément le plus fréquent de la croûte terrestre avec 28%. Sa température de fusion est égale à 1414°C. Dans la nature, il peut être sous forme de silicates, zircon, jade, mica, quartz, etc. l'existence des impuretés lui donne des couleurs différentes. Il est possible d'obtenir différentes qualités (grade) de silicium :

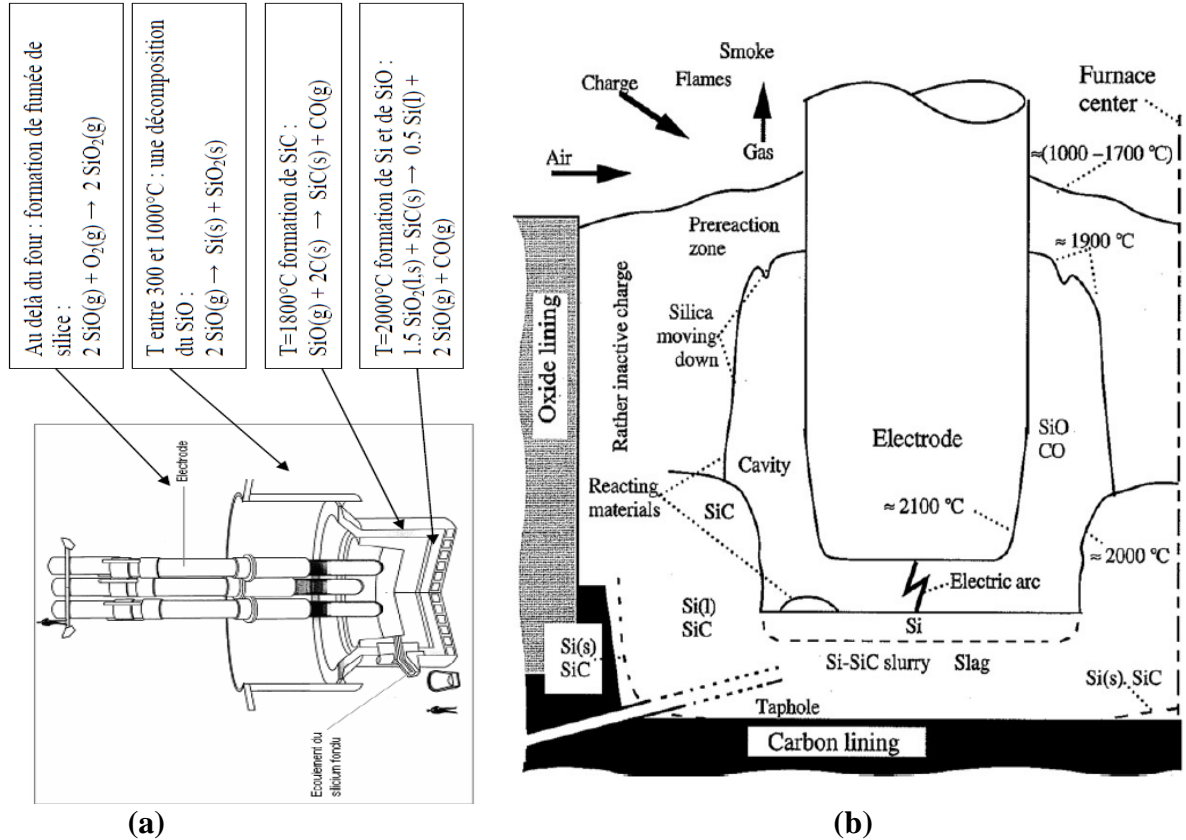
- Le plus bas en qualité est le silicium métallurgique : Metallurgical Grade Silicon (MG-Si),
- Le deuxième silicium est un silicium métallurgique amélioré : Upgraded Metallurgical Silicon, (UMG-Si),
- Le troisième est un silicium de qualité solaire : Solar Grade Silicon, (SoG-Si) pour les applications photovoltaïques,
- Le quatrième est un silicium très pur de qualité électronique (semi-conducteur) : Electronic Grade Silicon, EG-Si.

### 3.2. Procédé de production de silicium métallurgique

La première étape dans la production du silicium est la réduction carbothermique (figure 3.1) du quartz ( $\text{SiO}_2$ ) par le carbone en utilisant un grand four à arc. La température nécessaire pour la réduction de l'oxygène du quartz est très élevée, elle ne peut être réalisée que par un arc électrique généré par les trois électrodes en graphite, l'équivalent d'une énergie de fonctionnement égale à 24 MW. Pratiquement, la production d'une tonne de silicium métallurgique nécessite l'apport de [12] :

- 2500 kg de quartz,
- 800 kg de charbon de bois avec 200 kg de coke de pétrole et 1200 kg de bois,
- 90 kg d'électrodes en graphites,
- 11 000 kWh.

La réaction de ces matériaux génère des réactions chimiques très complexes dans le four à arc. Dans la figure 3.1, on distingue différentes zones de températures, dans chacune de ces zones se produit une réaction chimique différente.



**Figure 3.1 :** Schéma du four à arc submergé (SAF): (a) Le revêtement et la zone de versage avec les réactions chimiques [12]. (b) la structure du four avec les températures internes [13].

Comme on peut le voir dans la suite des réactions chimiques, la formation de silicium passe par la formation d'un composé intermédiaire gazeux le SiO. Après un temps de réaction, le silicium liquide est coulé dans une poche de traitement ou de transport pour les autres étapes de purification et de production.

### 3.3. Voies de purification du silicium métallurgique

Après avoir coulé le silicium dans les poches, plusieurs étapes de purification sont utilisées, elles peuvent être chimiques ou physiques. Chaque méthode est efficace pour des types d'impuretés bien spécifiques. L'origine de ces impuretés vient de la matière première, des électrodes en graphite et des murs du four. L'atmosphère de l'usine peut éventuellement contaminer le silicium. Plusieurs méthodes sont utilisées pour éliminer ces impuretés. Les méthodes les plus importantes industriellement sont :

### 3.3.1. La purification chimique par voie gazeuse

Comme le procédé de SIEMENS, cette purification consiste à transformer le silicium en un composé plus malléable, en général du Trichlorosilane ( $\text{HSiCl}_3$ ), pour le purifier. Le Trichlorosilane est alors réduit par du dihydrogène pour obtenir du silicium pur. Il est possible de répéter cette opération de purification plusieurs fois pour obtenir plusieurs niveaux de qualité. Le silicium obtenu est appelé EG-Si. Il est généralement destiné à l'industrie électronique. Cette méthode est très couteuse, et elle génère des déchets très toxiques.

### 3.3.2. La purification chimique par attaque d'un acide liquide

C'est une méthode très intéressante, moins couteuse dans la réalisation, car elle donne un bon rendement. On utilise des acides pour éliminer des impuretés dans le silicium métallurgique solide. Elle est sélective, elle ne permet pas d'enlever les impuretés dissoutes en grande quantité à l'intérieur du silicium solide et entre les joints des grains comme le bore et le phosphore. C'est une méthode de traitement de purification surfacique.

### 3.3.3. La purification physico-chimique en phase liquide par affinage

C'est un affinage à l'air ou à l'oxygène. Cette purification est réalisée juste après la coule du silicium liquide du four à arc, elle est utilisée pour éliminer des impuretés courantes telles que l'aluminium et le calcium. Ces impuretés en réagissant avec l'oxygène, ils forment un laitier contenant de l'alumine, de la chaux et de la silice. Ce laitier a une densité plus faible que le silicium liquide, donc il surnage et il est facile à éliminer.

### 3.3.4. La purification physico-chimique en phase liquide par plasma réactif

C'est une méthode qui est utilisée avec la phase liquide de silicium, il faut fondre le silicium pour appliquer le procédé plasma. Elle est très efficace pour le bore et le phosphore, mais elle demande des coûts très élevés.

### 3.3.5. La purification physico-chimique en phase liquide par laitier

Il faut avoir un silicium liquide pour appliquer cette méthode. Elle est utilisée dans l'industrie métallurgique on ajoutant des oxydes sous forme de laitier : comme le  $\text{SiO}_2$ , le  $\text{CaO}$ , le  $\text{MgO}$  etc. Elle ne demande pas beaucoup d'investissement, elle est efficace quand on a des niveaux haut a moyens en impuretés, mais son inconvénient est la lenteur des échanges physicochimiques entre le silicium liquide et le laitier liquide.

### 3.3.6. La purification physico-chimique en phase liquide par ségrégation

La méthode de ségrégation consiste à réaliser une solidification dirigée du silicium liquide en utilisant un four de solidification. C'est une méthode qui demande des fours de fusion et de solidifications bien spécifiques pour appliquer le modèle physicochimique de ségrégation des impuretés au cours de la solidification du silicium. La plupart des fours de solidification sont composés de deux zones de températures différentes permettant de contrôler le gradient de température « le gradient thermique ». Ils sont connus sous le nom fours de solidification directionnelle de type Bridgman. Au cours de la solidification, l'avancement de l'interface de solidification s'effectue soit en modifiant les puissances de la zone chaude, soit en déplaçant le creuset avec une vitesse de tirage. Cette technique permet d'obtenir des lingots de la taille différente entre 250 à 1200 kg. Les vitesses de tirages ou de solidification couramment utilisée varient entre 3 à 5  $\mu\text{m} / \text{s}$ .

## 3.4. Conclusion

Pour avoir un produit final avec les qualités recherchées, il faut contrôler le processus de purification. Donc, il faut rassembler dans le processus plusieurs étapes de purification avec des types de procédés variée. Ces procédés sont très complexes, et chacun est dédié à enlever un ou plusieurs types d'impuretés. Pour notre travail, l'étape la plus intéressante dans le processus de purification est la purification par solidification directionnelle en utilisant le phénomène de ségrégation. Cette méthode permet d'avoir un silicium métallurgique de qualité solaire sans passer par des étapes couteuses et complexes. Elle peut purifier le silicium de tous les éléments métallique qui peuvent influencer l'efficacité des cellules solaire.

## Chapitre IV : purification du silicium métallurgique par solidification directionnelle

### 4.1. Introduction

Aujourd'hui, le silicium métallurgique de qualité solaire utilisé dans les panneaux solaires est généralement purifié par la méthode de solidification directionnelle en utilisant le phénomène physico-chimique de ségrégation des impuretés. Cette méthode utilise des fours de solidification de conception spécifiques, si ces fours sont bien conçus, la méthode est très efficace pour les impuretés qui ont des coefficients de ségrégation ( $k$ ) très petite.

### 4.2. Type des impuretés dans le silicium métallurgique

Plusieurs qualités de silicium existent dans le marché, on peut les classer dans deux catégories : le silicium poly cristallin (silicium électronique), et le silicium métallurgique. Le silicium électronique est de haute qualité, les niveaux des impuretés sont très bas. Dans le tableau 4.1, la colonne Grade Semiconductor représente le silicium poly cristallin, les impuretés sont de l'ordre de ppb (partie par billion).

**Tableau 4.1** : Niveaux des impuretés dans les deux types silicium électroniques [14].

Attribute		Grade	
		Photovoltaic	Semiconductor
Purity	Boron, B	$\leq 3$ ppba	$\leq 0.1$ ppba
	Donors: P + As	$\leq 5$ ppba	$\leq 0.2$ ppba
	Carbon	$\leq 1$ ppma	$\leq 0.2$ ppma
Surface metals	Aluminum, Al	$< 5$ ppbw	$< 0.6$ ppbw
	Cobalt, Co	—	$< 0.6$ ppbw
	Copper, Cu	$< 2$ ppbw	$< 0.1$ ppbw
	Chromium, Cr	$< 2$ ppbw	$< 0.2$ ppbw
	Iron, Fe	$< 10$ ppbw	$< 0.8$ ppbw
	Nickel, Ni	$< 2$ ppbw	$< 0.2$ ppbw
	Potassium, K	—	$< 0.5$ ppbw
	Sodium, Na	$< 5$ ppbw	$< 0.5$ ppbw



La deuxième catégorie est celle du silicium métallurgique, ils varient d'un producteur à un autre. Le tableau 4.2 donne les différents types du silicium métallurgique en fonction des niveaux des impuretés [15]. Dans cette catégorie, les impuretés sont de l'ordre de ppm (partie par millions) :

**Tableau 4.2** : Niveaux des impuretés dans les différents types de silicium métallurgiques [15].

Impurities	MG-Si	UMG-Si	SoG-Si
B	40	<30	<1
P	20	<15	<5
O	3000	<2000	<10
C	600	<250	<10
Fe	2000	<150	<10
Al	100-200	<50	<2
Ca	500-600	<500	<2
Ti	200	<5	<1
Cr	50	<15	<1

All values in ppm<sub>w</sub>.



Comme le montrent les deux tableaux, trois types d'impuretés existent dans le silicium :

- *Les impuretés métalliques* : comme l'Al, le Fe, le Ti, le Cu, etc.
- *Les impuretés dopantes* : le bore (comme accepteur) et le phosphore (comme donneur).
- *Les éléments légers* : comme le carbone et l'oxygène dont la concentration dépend des conditions de solidification.

### 4.3. Effet des impuretés sur le rendement des cellules solaires

Le plus fréquent, les impuretés peuvent diminuer la longueur de diffusion des porteurs, ce qui conduit à des pertes dans l'efficacité des cellules solaires. Davis et coll. [16] ont étudié l'effet de différentes impuretés sur le rendement des cellules solaires à base de silicium dopées avec des impuretés. Ils ont tracé la relation entre l'efficacité des cellules et la concentration en impuretés (figure 4.1).

Comme le montre la figure, l'augmentation du niveau des concentrations de tous les éléments étudiés influence le rendement des cellules solaires, d'où l'intérêt de bien purifier le silicium métallurgique avant de l'utiliser dans la production des cellules.

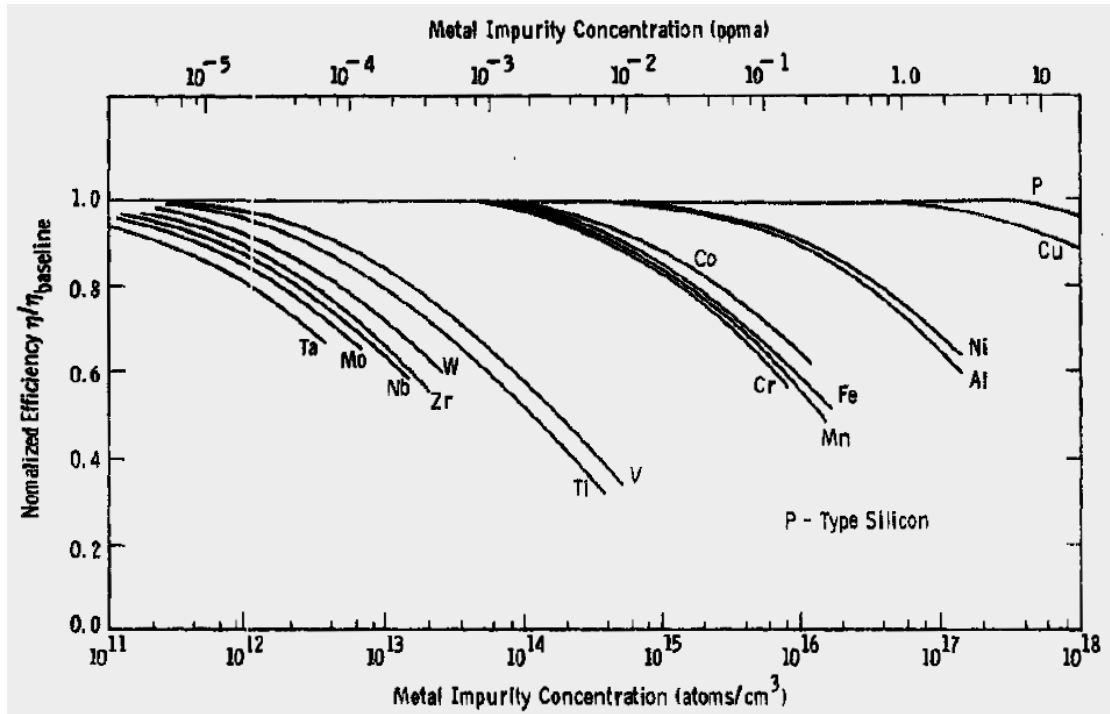
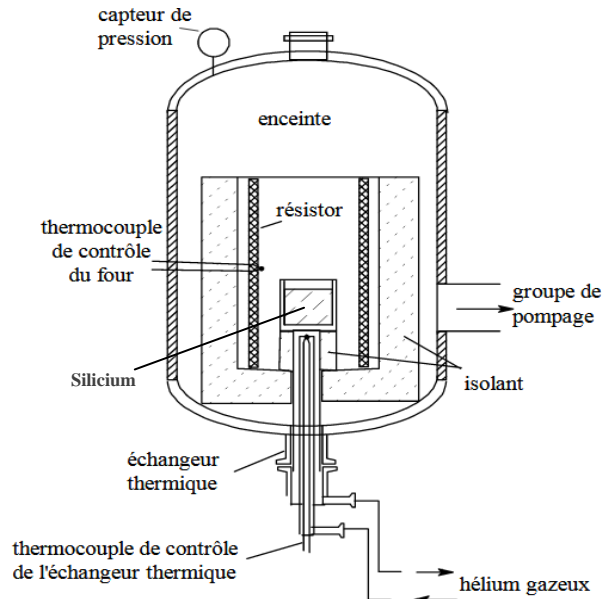


Figure 4.1 : Effet des impuretés métalliques sur le rendement des cellules [16].

#### 4.4. Principe de purification du silicium métallurgique par solidification directionnelle

Son principe est basé sur le phénomène physico-chimique de la ségrégation des impuretés en cours de solidification. Dans un four de ségrégation, le silicium métallurgique est fondu dans un creuset. Au cours de la solidification une extraction de la chaleur est réalisée, elle doit être contrôlée afin de garder l'interface solide liquide entre le silicium solide et le silicium liquide la plus plane possible.

En général, l'extraction de la chaleur est réalisée en bas du creuset. La figure 4.2 représente un schéma d'un four de solidification directionnelle, le four est composé d'une grande enceinte à doubles parois, à l'intérieur de laquelle se trouvent une zone chaude composée des résistances chauffantes et un porte-creuset bien isolé, l'ensemble est en contact avec une partie pouvant effectuer un déplacement vers le bas pour croître l'extraction de la chaleur. Les arrivées des gaz et les canalisations du vide sont branchées sur l'enceinte. Le four est lié à des systèmes de refroidissement et de contrôle de température et de pression.



**Figure 4.2:** Principe de la méthode d'extraction de la chaleur localement en bas du creuset.

En pratique, pour avoir un bon rendement de purification il faut contrôler les éléments essentiels du processus de solidification, qui sont :

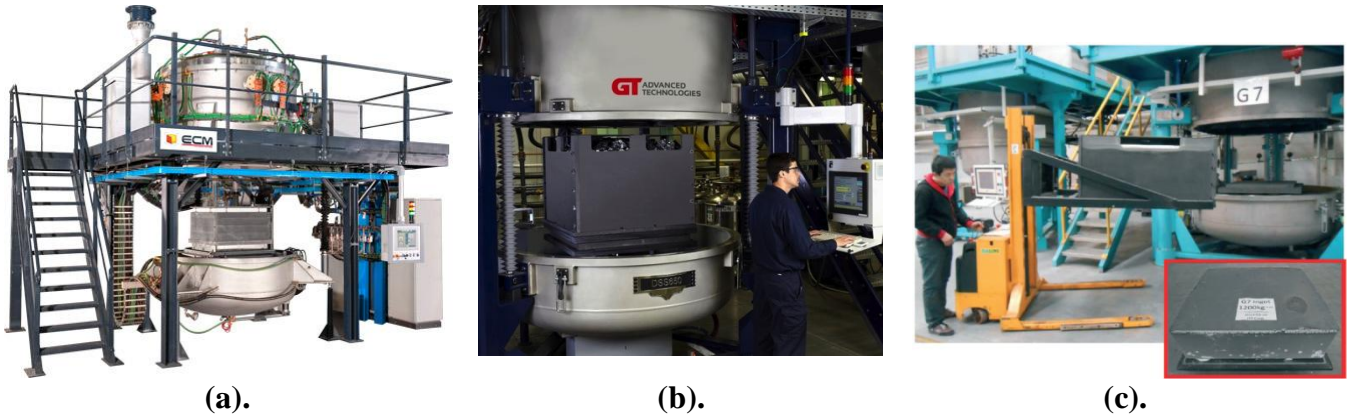
- *La vitesse de tirage ou de solidification* : la ségrégation des impuretés dépend beaucoup de la vitesse de tirage ou la vitesse de solidification des lingots.
- *La forme de l'interface solide liquide* : c'est l'interface qui sépare le silicium solide et le silicium liquide, elle est le siège de la réaction physico-chimique de ségrégation, il faut qu'elle soit le plus possible sous forme plane.
- *La configuration du champ thermique du four* :
  - Il faut que les deux zones chaude et froide du four soient bien contrôlées et bien isolées pour éviter les pertes thermiques,
  - Il faut que les gradients thermiques dans le solide et le liquide soient normalisés en fonction de la vitesse de solidification.

#### 4.5. Fours industriels de solidification directionnelle

Dans l'industrie de purification du silicium métallurgique, les fours industriels les plus utilisés proviennent de trois différents constructeurs, qui sont :(figure 4.3)

- Les fours du fabricant français ECM,
- Les fours du fabricant américain GT Solar,
- Les fours du fabricant chinois JYT,

Tous ces fours utilisent le même principe d'extraction de la chaleur, et ils sont adaptés au phénomène de ségrégation avec des conceptions des zones chaude et froide et un dispositif de refroidissement le plus directionnelle possible (vers le bas). Ils possèdent des processus de solidification unique avec des capacités très élevée de l'ordre de 1200kg par lingot.

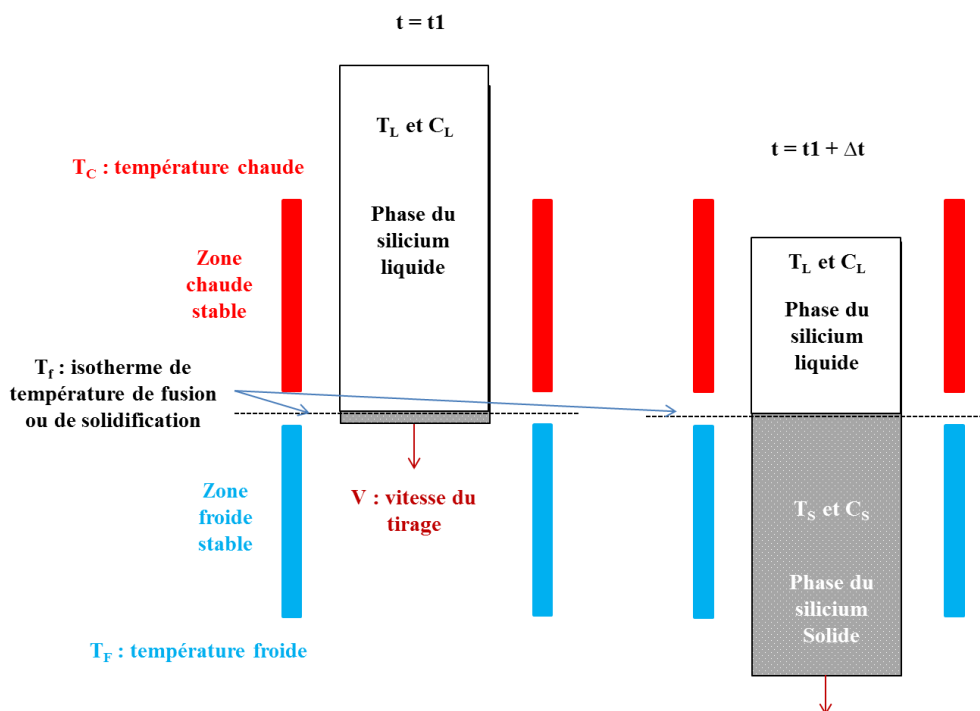


**Figure 4.3:** Fours de solidification industrielle dans le marché : (a) ECM, (b) GT Solar et (c) JYT.

#### 4.6. Principales lois théoriques qui gèrent la solidification directionnelle

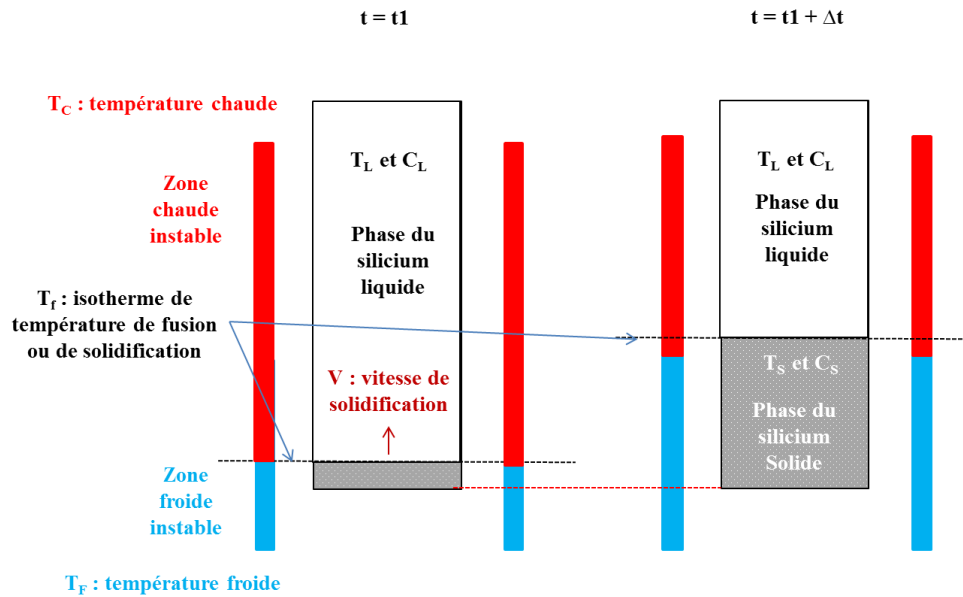
Deux principales méthodes de solidification directionnelle existent :

a) *La méthode Bridgman* : elle consiste à abaisser lentement un bain de métal fondu dans un gradient de température vertical et stable faisant passer le bain de l'état liquide à l'état solide. Dans cette situation, on parle de vitesse de tirage.



**Figure 4.4 :** Solidification directionnelle par vitesse de tirage

b) *La méthode Bridgman améliorée* : elle consiste à laisser le bain stable et changer la thermique du four par une extraction automatisée de la chaleur par le bas du creuset. Dans cette situation, on parle de vitesse de solidification.



**Figure 4.5** : Solidification directionnelle par vitesse de solidification

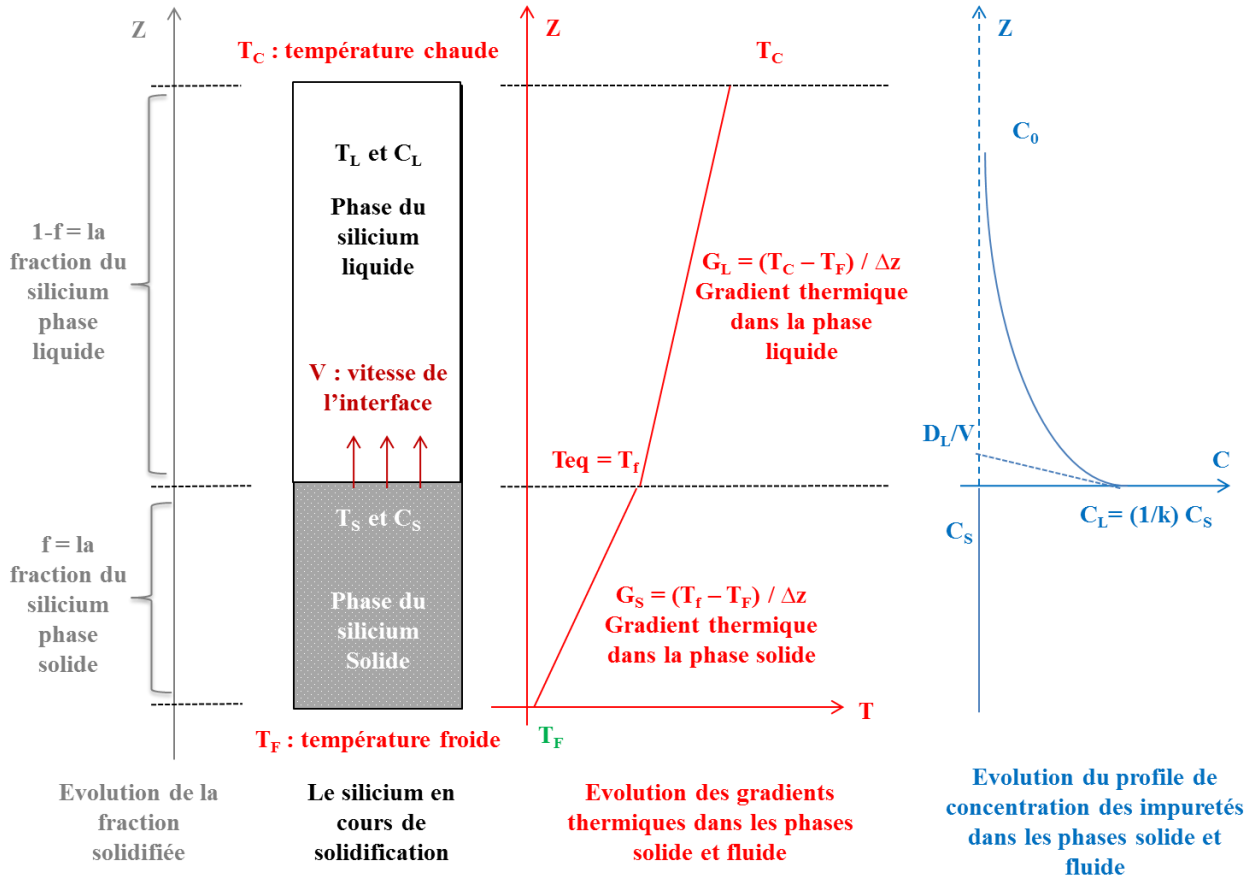
La maîtrise de cette technique nécessite un contrôle précis des gradients thermique et de la vitesse de tirage ou de solidification. Pour cela, il faut connaître la nature des échanges d'énergie entre les différents éléments du four. Lorsqu'un milieu est soumis à des transferts thermiques avec transformation de phase, il faut prendre en considération :

- *La transformation de phase* :
  - Cette transformation produit une variation d'enthalpie, la chaleur latente, qui est distincte de la chaleur du changement du champ thermique du four fourni par les éléments chauffants.
  - La transformation de phase se produit sans changement de température pour un corps purs. Un équilibre s'installe à la température d'équilibre est égale à la température de solidification.
- *L'effet de la convection de l'écoulement du silicium liquide* : la phase liquide peut avoir son effet qui est dû à son comportement propre.

#### 4.7. Équations de conservation

Pour avoir une idée des changements survenus durant la solidification, la figure suivante représente la variation des paramètres de contrôle : fractions de solidification, les

températures (gradients thermiques) du processus, la vitesse de l'interface et les concentrations des impuretés :



**Figure 4.6** : Évolution des paramètres de contrôles d'un système de solidification directionnelle.

En se basant sur cette analogie, les bilans volumiques de température pour le solide ( $T_S$ ) et le liquide ( $T_L$ ) et le bilan de concentration ( $C_L$ ) s'obtiennent en écrivant les équations de conservation de l'énergie et de la masse dans les deux phases. Donc les bilans de conservations sont donnés par les équations suivantes :

Bilans thermiques :  $\nabla^2 T_{S,L} = 0$ , (4.1)

Bilans de transfert de masses :  $\frac{\partial C_L}{\partial t} = D_L \nabla^2 C_L + \mathbf{V} \cdot \nabla C_L$ . (4.2)

Dans le cadre de notre modèle, on a :

- Négliger la diffusion de l'impureté dans le solide,

- Considérer la diffusion thermique infiniment rapide devant la diffusion de l'impureté, cette hypothèse est vérifiée dans la mesure où le coefficient de diffusion  $D_L \sim 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$  est très inférieur au coefficient de diffusion thermique qui varie entre  $10^{-1}$  pour les métaux.

#### 4.7.1. Bilans inter faciaux

L'interface solide liquide est le siège des transferts des bilans. On appliquant les équations de conservation à l'interface on obtient :

$$\underline{\text{Continuité de la température}} \quad [T_S]_{\phi} = [T_L]_{\phi} = T_{\phi}, \quad (4.3)$$

$$\underline{\text{Conservation de la chaleur}} \quad [K_S \nabla T_S - K_L \nabla T_L]_{\phi} \cdot \mathbf{n} = L \mathbf{V} \cdot \mathbf{n}, \quad (4.4)$$

$$\underline{\text{Conservation du soluté}} \quad D_L [\nabla C]_{\phi} \cdot \mathbf{n} = [C_S - C_L]_{\phi} \mathbf{V} \cdot \mathbf{n}, \quad (4.5)$$

$K_S$  et  $K_L$  désignent les conductivités thermiques dans le solide et le liquide,  $V$  la vitesse de solidification,  $\mathbf{n}$  la normale en un point de l'interface,  $L$  la chaleur latente de solidification par unité de volume et  $D_L$  le coefficient de diffusion de l'impureté. (L'indice  $\phi$  signifie que la valeur de la grandeur considérée ( $T$  ou  $C$ ) est prise au niveau de l'interface solide liquide du silicium).

#### 4.7.2. Équilibre de solidification : coefficient de partage $k$

En solidification directionnelle, à l'interface solide liquide le front de solidification est en équilibre thermodynamique. Cette approximation conduit à une relation importante au niveau de l'interface solide liquide entre les concentrations  $C_S$  dans le solide et  $C_L$  dans le liquide de l'impureté en question avec son coefficient de partage ( $k$ ). Ce coefficient est une constante égale au rapport de la concentration de l'impureté  $C_S$  à celle  $C_L$  (figure 4.5):

$$k = C_S / C_L \quad (4.6)$$

Au début du processus, il est possible de considérer la concentration loin de l'interface égale à la concentration initiale  $C_0$ :

$$C_L = C_0 \text{ pour } z \rightarrow \infty \quad (4.7)$$

### 4.7.3. Enthalpie de solidification

Dans notre cas, le silicium, vu comme un corps pur, est en cours de solidification. Pour exprimer la conservation de la chaleur avec changement de phase, il faut exprimer la variation de l'enthalpie de l'élément de volume en question. Nous avons deux phases :

- *Phase solide* : un silicium solide avec une enthalpie volumique de solide  $H_S$  et une fraction volumique solide égale à  $f$ .
- *Phase liquide* : un silicium liquide avec une enthalpie volumique de liquide  $H_L$  et une fraction volumique liquide égale à  $1-f$ .

Donc l'enthalpie de solidification est égale à :

$$H = f H_S + (1-f) H_L \quad (4.8)$$

En thermodynamique, l'enthalpie de changement d'état (chaleur latente :  $L$ ) d'un corps pur est par définition la variation d'enthalpie qui accompagne un changement d'état du corps rapporté à la quantité de matière mise en jeu lors de cette transformation. Par exemple pour le passage de l'état liquide à l'état solide on parlera d'enthalpie de solidification.

Pour avoir la relation entre les paramètres de control il est possible d'utiliser la formulation de Stefan qui consiste à modéliser le système par deux milieux séparés par une frontière libre est à une température d'équilibre fixe qui est égale à la température de fusion  $T_f$  du silicium:

- Le silicium liquide est un milieu liquide, dont la quantité diminue avec la progression de la solidification.
- Le silicium solide est un milieu solide, dont la quantité augmente avec la progression de la solidification.

Avec l'équation 4.4, on obtient :

$$K_S G_S - K_L G_L = (\Delta H_F / V_M^S) V \quad (4.9)$$

L'équation (4.9) représente les échanges des énergies à l'interface. Cette interface est une frontière libre qui se déplace à une vitesse normale  $V$ , avec un changement de phase et un

---

dégagement de chaleur latente  $L$ .  $K_S$  et  $K_L$  sont les conductivités thermiques du silicium solide et liquide,  $G_S$  et  $G_L$  sont les gradients thermiques dans le silicium solide et liquide,  $\Delta H_F$  la variation de l'enthalpie de fusion par mole, et  $V_M^S$  le volume molaire du silicium.

#### 4.8. Ségrégation des impuretés : modèle de Scheil-Gulliver

Dans la plupart des cas de solidification, la composition du solide formé en impuretés ( $C_s$ ) est différente de celle du liquide initial qui lui donne naissance ( $C_0$ ). Dans la figure 4.6, on remarque que le profil de concentration des impuretés augmente dans le fluide, alors que celle dans le solide est plus faible. Thermodynamiquement, il arrive que l'impureté ait du mal à être incorporée dans le solide, c'est le phénomène de ségrégation.

Le modèle de Scheil-Gulliver de ségrégation, développé par Gulliver (1913) puis Scheil (1942) [17], est bien adapté pour nos conditions d'élaboration par solidification directionnelle. Il est basé sur les hypothèses suivantes :

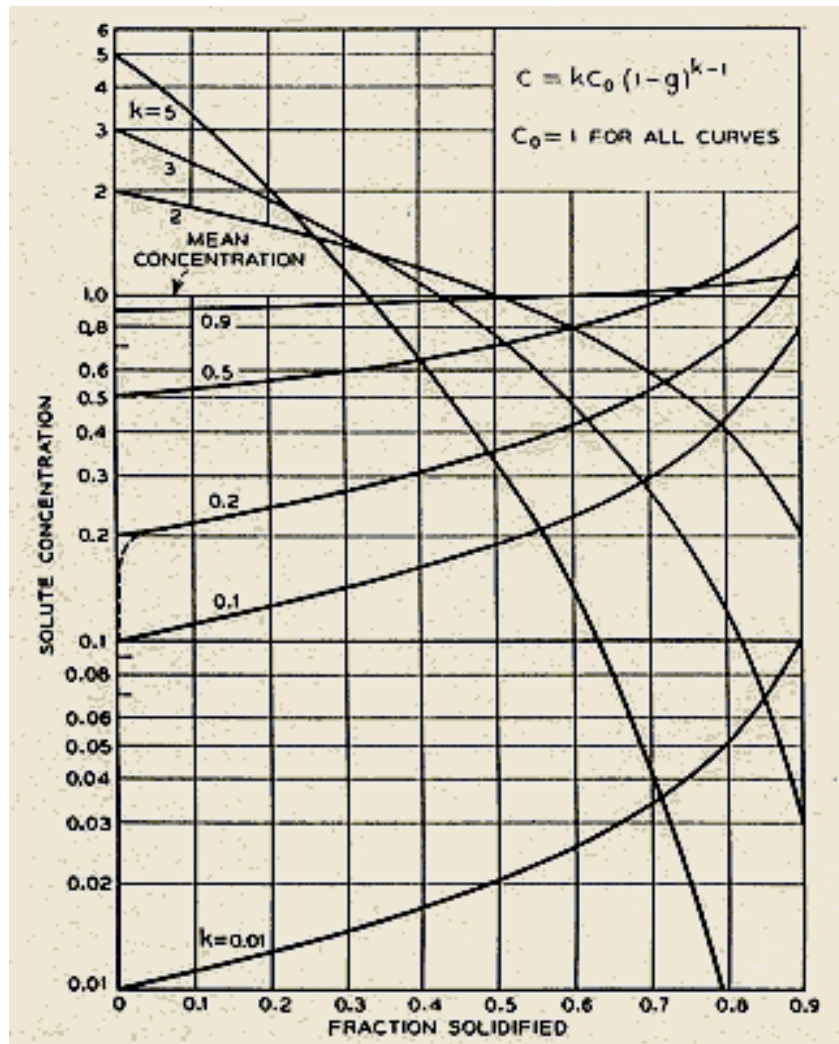
- La solidification est caractérisée par une diffusion négligeable dans le solide,
- l'interface solide liquide est à l'équilibre thermodynamique.

Les profils de concentration sont calculés d'après les équations :  $C_s(Z) = k C_L(Z)$  sur la côte  $Z$  d'un barreau de longueur  $L$  et les bilans de conservation de masse. Car la quantité des impuretés incorporée dans le solide doit être égale à la variation de la masse de l'impureté présente en phase liquide. Après intégration, on obtient le profil de la concentration des impuretés dans le solide:

$$C_s(Z) = k \cdot C_L(Z) = k \cdot C_0 (1 - f)^{(k-1)} \quad (4.10)$$

Cette équation est connue dans la littérature sous le nom d'équation de Scheil-Gulliver. Avec  $f$  : est la fraction solidifiée, dans le repaire  $Z$  elle est définie par  $f = \frac{Z}{L}$

Les profils de concentration des impuretés correspondants sont représentés dans la figure 4.7 pour différentes valeurs de  $k$ . On constate que la variation de concentration dans le solide le long du barreau peut être très faible pour les coefficients de partage très petit.



**Figure 4.7 :** Représentation des profils de concentration le long d'un solide avec la loi de Scheil- Gulliver pour diverses valeurs du coefficient de partage  $k$  [17]

#### 4.9. Différente application du modèle de ségrégation de Scheil-Gulliver

##### 4.9.1. Régime diffusif dans le liquide avec coefficient de partage $k$

Le premier régime est de supposer que le transport des impuretés est purement diffusif, ou en d'autres termes la vitesse de convection est partout nulle ou négligeable dans le silicium liquide. En prenant  $C_L > C_0$  quand  $Z_L > \infty$ , on trouve facilement que le système d'équations (4.2) admet une solution quasi stationnaire de la forme :

$$C_L(Z_L) = C_0 \left\{ 1 + \left[ \frac{1-k}{k} \right] \exp\left(\frac{-V_L}{D_L} Z_L\right) \right\} \quad (4.11)$$

Il est intéressant par ailleurs de remarquer que les variations de concentration dans le liquide se font dans une couche limite de diffusion d'épaisseur caractéristique à l'avant du front de solidification, qui est donnée par la relation suivante :

$$\delta = D_L / V_I \quad (4.12)$$

#### 4.9.2. Régime convecto-diffusif dans le liquide avec coefficient de partage effectif $k_{\text{eff}}$

L'effet de la convection est globalement de réduire l'épaisseur de la couche limite par rapport à sa valeur initiale  $\delta = D_L / V_I$  en régime diffusif. Du point de vue mathématique,  $\delta$  peut être définie à partir de la relation suivante :

$$\delta = - \frac{(C_L^I - C_L^\infty)}{\left(\frac{\delta C_L}{\delta Z}\right)_I} \quad (4.13)$$

$C_L$ , représente la concentration dans le bain fondue loin de l'interface mesurée à l'échelle de la couche limite,  $C_L^I = C_L^\infty/k$ , et la convection aura pour effet de brasser le bain de sorte que  $C_L^I$  sera proche de  $C_L^\infty$ . Dans cette situation, on définit un coefficient de partage effectif  $k_{\text{eff}}$  comme le rapport de la composition des impuretés incorporée dans le solide  $C_S^I$  à la composition au loin dans le bain:

$$k_{\text{eff}} = \frac{C_S^I}{C_L^\infty} = \frac{kC_L^I}{C_L^\infty} = \frac{k}{[1 - (1 - k)\Delta]} \quad (4.14)$$

Avec  $\Delta = \delta V_I / D_L$ .

Donc l'équation de Scheil-Gulliver pour le régime convecto-diffusif devient:

$$C_S(Z) = k_{\text{eff}} \cdot C_0 (1 - f)^{(k_{\text{eff}} - 1)} \quad (4.15)$$

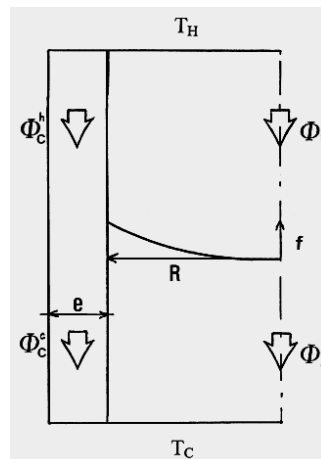
Dans le tableau suivant on représente des coefficients de partage  $k$  pour différentes impuretés pour le silicium :

**Tableau 4.3 :** Les coefficients de ségrégations des différents éléments dans le silicium [13].

Element	$k$	Element	$k$
Ag	$1.00 \times 10^{-6}$	In	$4.00 \times 10^{-4}$
Al	0.002	Li	0.01
As	0.3	Mn	$1.00 \times 10^{-5}$
Au	$2.50 \times 10^{-5}$	N	$7.00 \times 10^{-4}$
B	0.8	Ni	$8.00 \times 10^{-6}$
Bi	$7.00 \times 10^{-4}$	O	1.25; $1.4^a$
C	0.07	P	0.35
Cd	$1.00 \times 10^{-6}$	S	$1.00 \times 10^{-5}$
Co	$8.00 \times 10^{-6}$	Sb	0.023
Cr	$1.10 \times 10^{-5}$	Sn	0.016
Cu	$4.00 \times 10^{-4}$	Ta	$1.00 \times 10^{-7}$
Fe	$8.00 \times 10^{-6}$	Ti	$3.60 \times 10^{-6}$
Ga	0.008	Tl	$1.70 \times 10^{-4}$
Ge	0.33	Zn	$1.00 \times 10^{-5}$

#### 4.10. Effet de la forme de l'interface solide / liquide sur la ségrégation

La forme de l'interface peut affecter profondément le profil de concentration des impuretés incorporées dans le solide, elle en parfait accord avec le modèle de ségrégation de Scheil-Gulliver, plus elle est plane plus le solide est pure. Pour déterminer la relation entre la forme de l'interface et les paramètres de contrôle, la figure suivante montre les flux de chaleur qui sont possibles dans un système de solidification directionnelle :



**Figure 4.8 :** Géométrie avec les principaux paramètres [18].

D'après C. Barat et coll. [18], la forme de l'interface  $f$  est calculée d'après les bilans thermiques entre les différents éléments de système. Elle est donnée en relation avec les

paramètres suivants : les caractéristiques thermiques du silicium et du four, le flux de chaleurs  $\dot{\phi}_L$  dans le silicium liquide et le flux de chaleur  $\dot{\phi}_S$  dans le silicium solide. Elle est égale a :

$$f = R/2 (K_L G_L - K_S G_S) / K_S G_S \quad (4.16)$$

Pour avoir une bonne purification au point de vue ségrégation des impuretés, il faut bien contrôler les gradients thermiques dans le four pour avoir un  $f$  très petit qui donne une interface plus plane.

#### **4.11. Conclusion**

Pour avoir une bonne efficacité de purification par ségrégation dans un procédés de solidification directionnelle il faut que le coefficient de partage de l'impureté soit le plus petit possible,  $k \ll 1$ . Durant le procédé de solidification directionnelle, il y a trois points très importants. Le premier est en relation avec la configuration du champ thermique du four, il faut qu'il soit bien directionnel pour avoir la possibilité d'appliquer le phénomène de ségrégation des impuretés. Le deuxième point est en relation avec le régime qui contrôle le transfert des impuretés, il faut bien analyser le régime pour appliquer les bonnes relations physiques. Et finalement, le dernier point est en relation avec la forme de l'interface solide liquide de silicium, il faut qu'elle soit plane pour avoir une bonne qualité de ségrégation des impuretés.

## **Chapitre V : amélioration de four de solidification directionnelle par simulation numérique**

### **5.1. Introduction**

Dans cette partie, nous allons présenter un travail de simulation d'un four de solidification directionnelle. Le choix des dimensions de four est basé sur les caractéristiques des fours qui existent actuellement en intégrant la capacité des machines de calcul disponibles pour réaliser les calculs numériques. Deux modèles en deux dimensions ont été réalisés, le premier est pour le cas d'une configuration tirée de la conception réel qui existe dans l'industrie, et le deuxième est pour une configuration proposée pour améliorer la conception du four pour augmenter le rendement de la purification de silicium métallurgique.

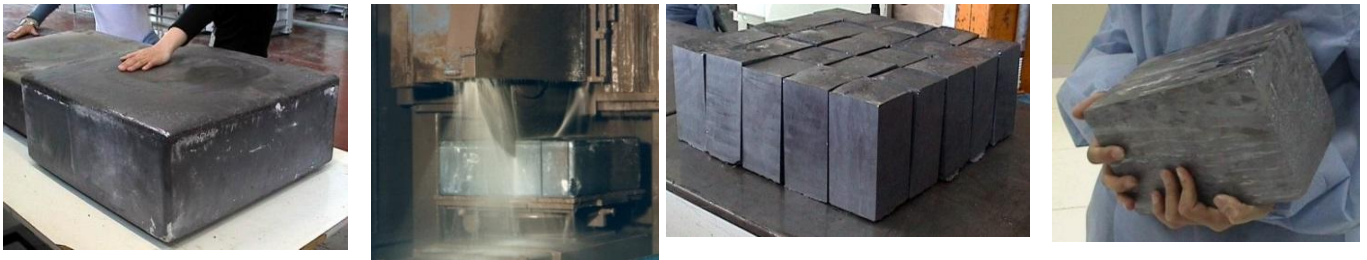
### **5.2. Outil de calcul : logiciel COMSOL**

C'est un logiciel multi physique, qui est sous forme d'une plate-forme qui permet de modéliser et de simuler plusieurs phénomènes physiques. Son point fort est le couplage entre différents phénomènes physiques, il possède plus de 30 modules physiques différents. Ces modules offrent des interfaces spécialisées en acoustique, génie chimique, géophysique, électromagnétisme, transfert de chaleur, transport de matière et de quantité de mouvement, et mécanique des structures, etc. De plus, il est équipé d'une interface qui peut relier les simulations réalisées à d'autres logiciels.

### **5.3. Modelés de simulation**

#### **5.3.1. Description du choix de la géométrie**

Ils existent plusieurs types des dimensions de lingots de silicium métallurgique, de G1 à G8.



**Figure 5.1** : Forme des lingots les briques de silicium métallurgique après purification et découpage [19]

La figure 5.1 représente un exemple de lingot de forme G5, il est coupé en 5x5 brique de dimension standard égale à 16cm x 16cm. Pour réduire les temps de calcul, nous avons opté pour un four de laboratoire de dimension de lingot de forme G1 représenté sous forme d'une brique dans la figure 5.1. Cette dimension représente l'unité dimensionnelle de tous les lingots. Les dimensions du four de calcul sont présentés en détails dans l'annexe C.

### 5.3.2. Description du modèle

Comme nous l'avons vu dans notre analyse théorique tous les paramètres de contrôle : les gradients thermiques, la vitesse de solidification ou de tirage et la forme de l'interface solide liquide sont reliés à la configuration thermique du four, qui est contrôlé par les éléments chauffants en graphite solide figure 5.2.

Donc, notre travail est de focaliser sur la partie thermique et d'utiliser le logiciel de simulation COMSOL dans la résolution de l'équation de transfert de chaleur proposée dans le chapitre 4, équation 4.1. Pour faciliter l'analyse, l'indice de l'amélioration que nous allons utiliser est l'effet de la thermique du four sur la forme du front de solidification ou l'interface solide liquide du silicium dans le creuset. Baser sur cette approche, nous avons résous le modèle thermique de notre four pour calculer la configuration des lignes iso thermiques pour voir leurs formes et montrer comment on va les améliorer pour avoir un profil d'interface adéquate à la purification.

### 5.4. Description de la géométrie du four et des résultats de simulation

Dans cette partie nous allons présenter les schémas des deux géométries : réel et améliorer analysés avec les résultats de la simulation numérique.

### 5.4.1. Four avec la configuration de conception réel qui existe dans l'industrie

La figure 5.2 montre un schéma de four à l'état réel. Le four est composé d'une enceinte à doubles parois refroidie avec une circulation contenue d'eau. À l'intérieure de cette enceinte, on trouve une autre enceinte en fibre de graphite pour isoler la zone chaude du processus et garder une température stable à l'intérieure de four. Des éléments chauffants (en graphite solide) sont utilisés sur toutes les faces latérales de porte-creuset (en graphite solide) et du creuset (en quartz) rempli de avec une charge de silicium métallurgique. Plus de détails sur des exemples des matériaux utilisées dans les fours réels sont dans l'annexe D.

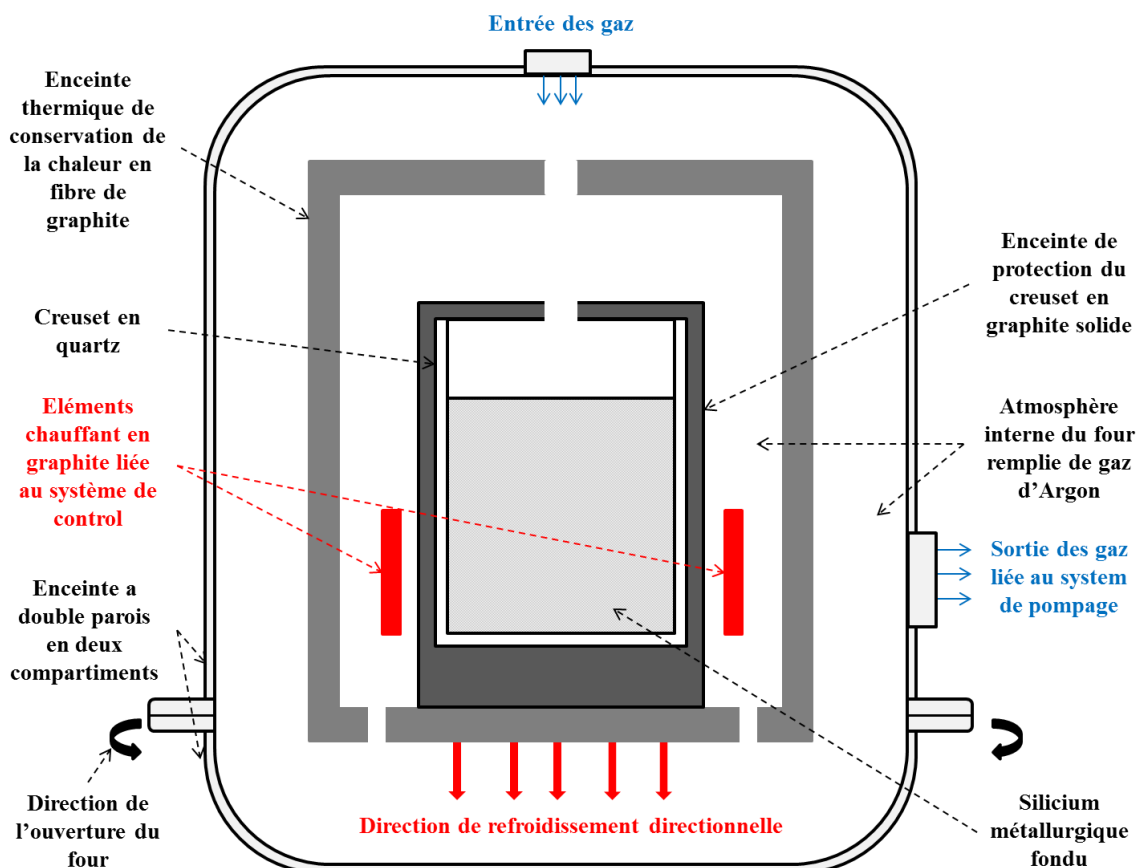
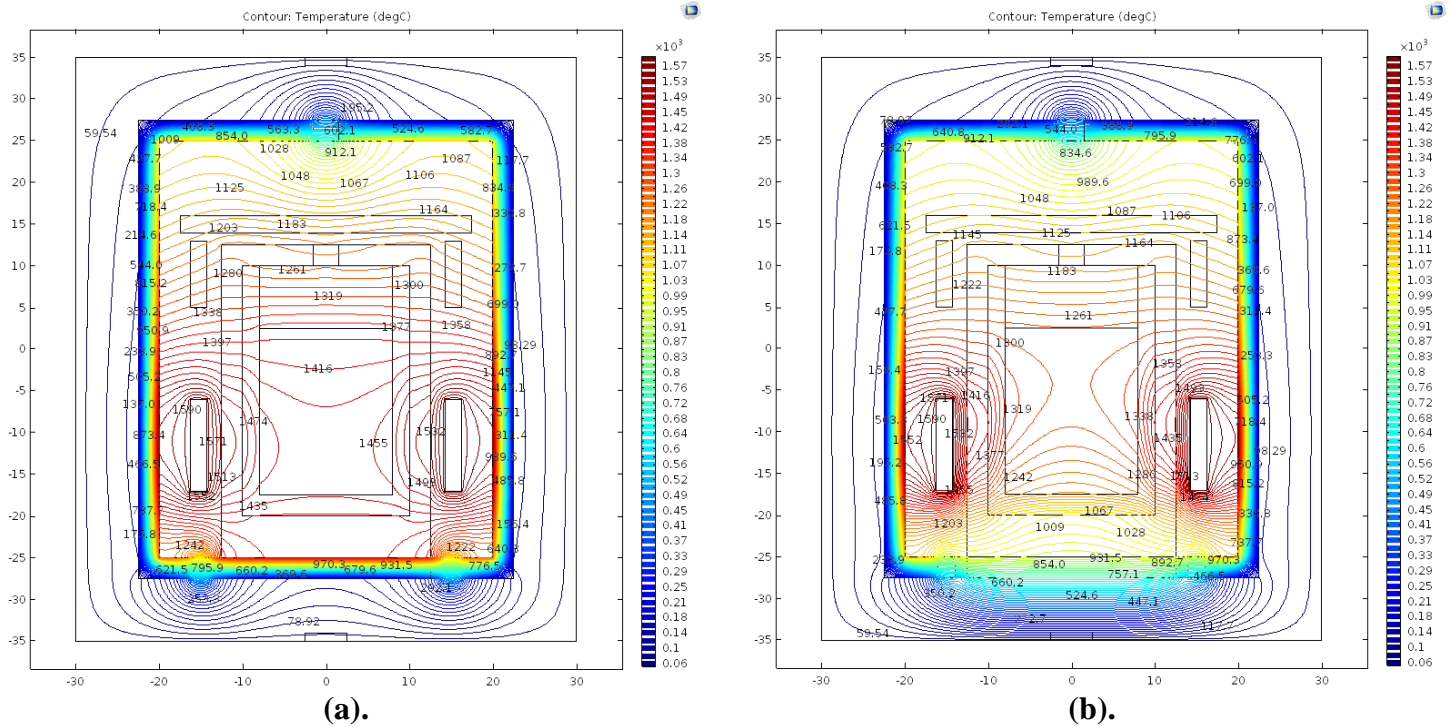


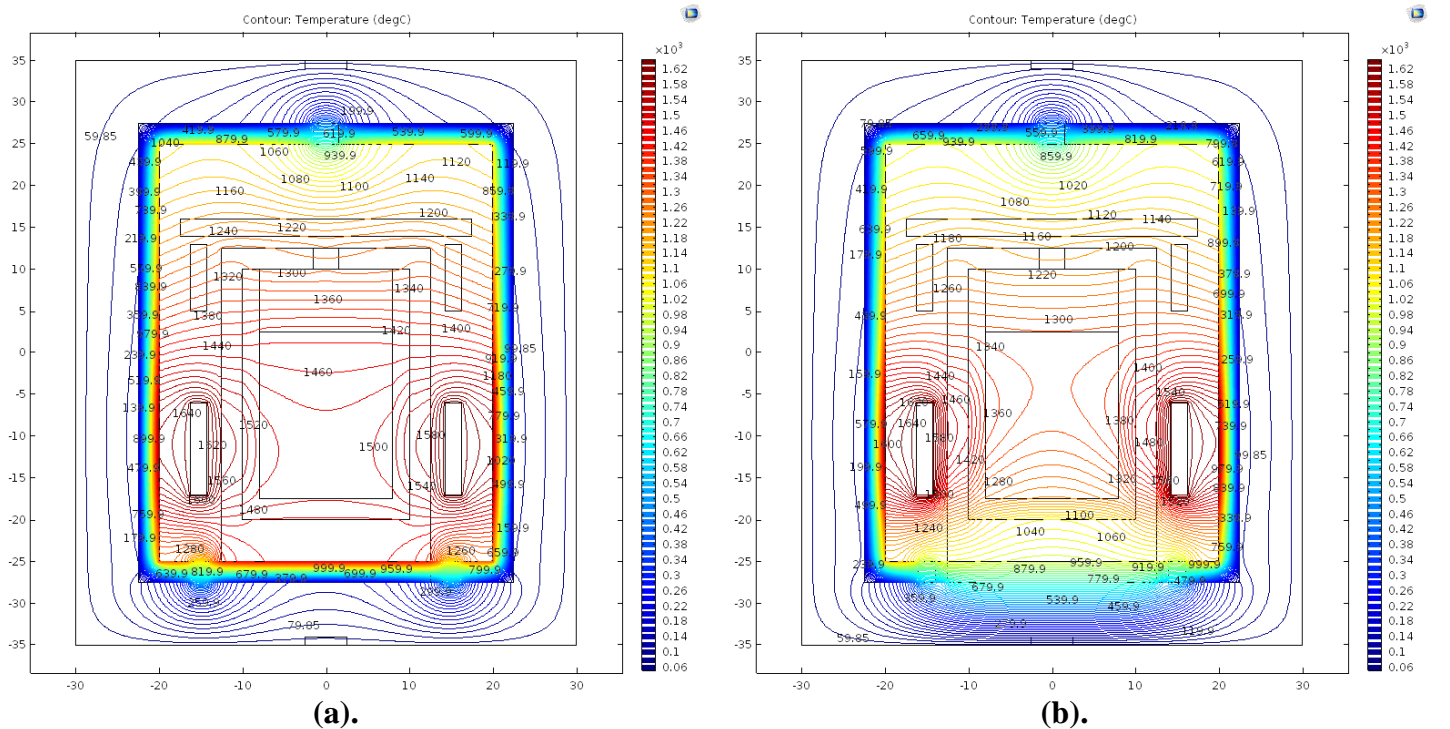
Figure 5.2 : Schéma du four comme il existe dans l'industrie

La figure 5.3 représente les résultats de simulation pour le cas réel. On peut voir que les lignes isothermiques à l'intérieure du silicium sont très difformée. Par conséquent, la forme de l'interface est très courbée et on perd l'aspect directionnel de la solidification et par la suite l'efficacité de la purification par ségrégation.



**Figure 5.3 :** Four réel avec une température de travail des éléments chauffants latéraux de 1600C. (a) : configuration thermique du silicium liquide, (b) : configuration thermique après la solidification.

Pour voir si la situation s'améliore avec le changement de température de travail, nous avons augmenté la température de travail de 1600 à 1650C. Le résultat est présenté dans la figure suivante 5.4 :



**Figure 5.4 :** Four réel avec une température de travail des éléments chauffants latéraux de 1650C. (a) : configuration thermique du silicium liquide, (b) configuration thermique après la solidification.

Le résultat montre que la configuration thermique est toujours la même. Donc il est difficile de changer la configuration thermique de four en augmentant juste la température de travail. Il faut apporter des améliorations dans la conception.

#### 5.4.2. Four avec la configuration de la conception amélioré

La figure suivante montre le schéma du four avec l'amélioration proposée dans le cadre de notre étude. Comme on peut le voir, l'amélioration est dans l'addition d'une deuxième partie chauffante sur le haut de la charge de silicium dans la zone chaude pour améliorer la thermique du four.

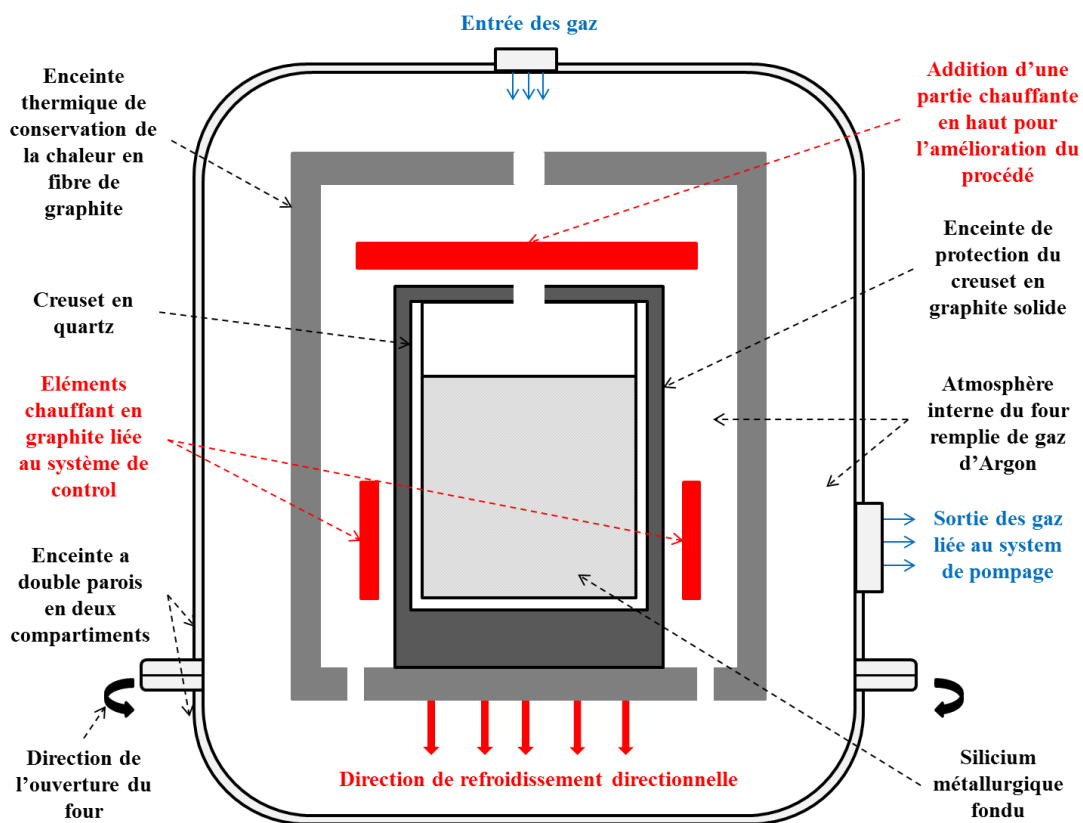
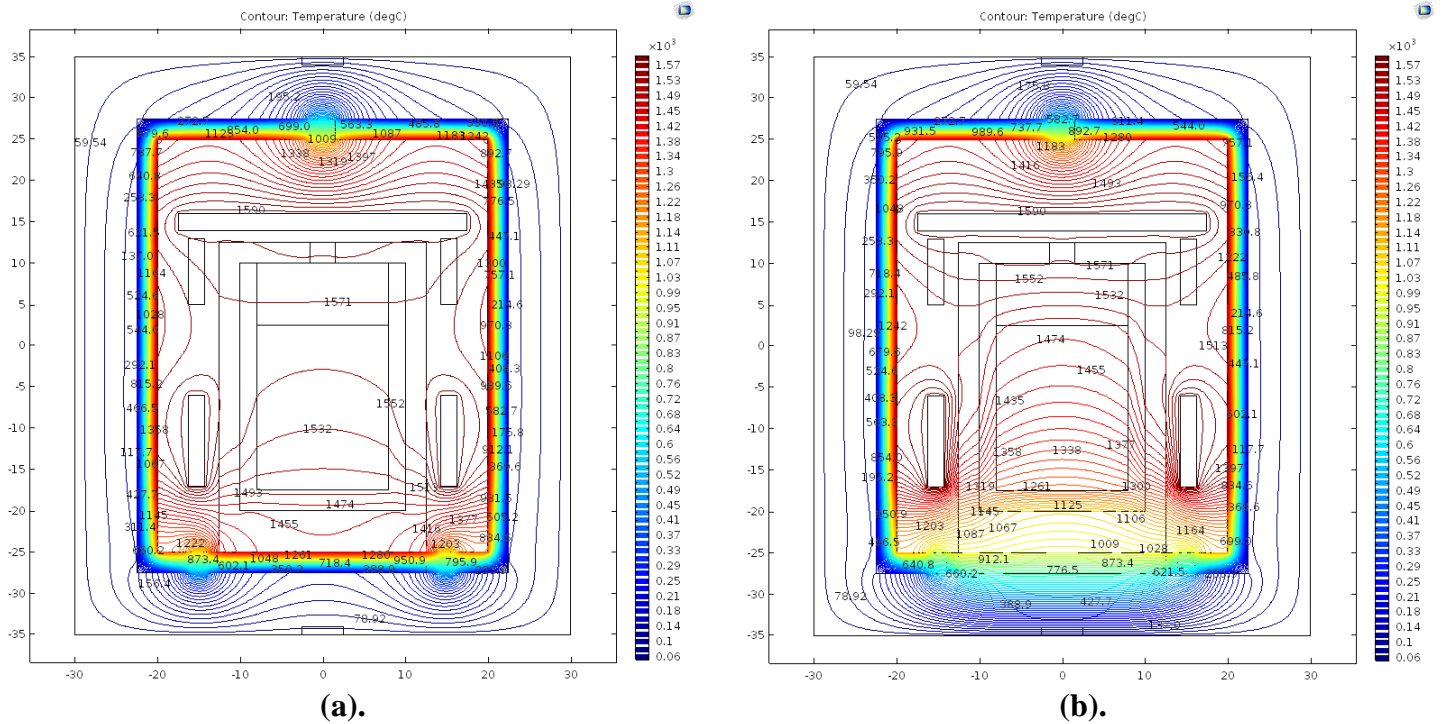


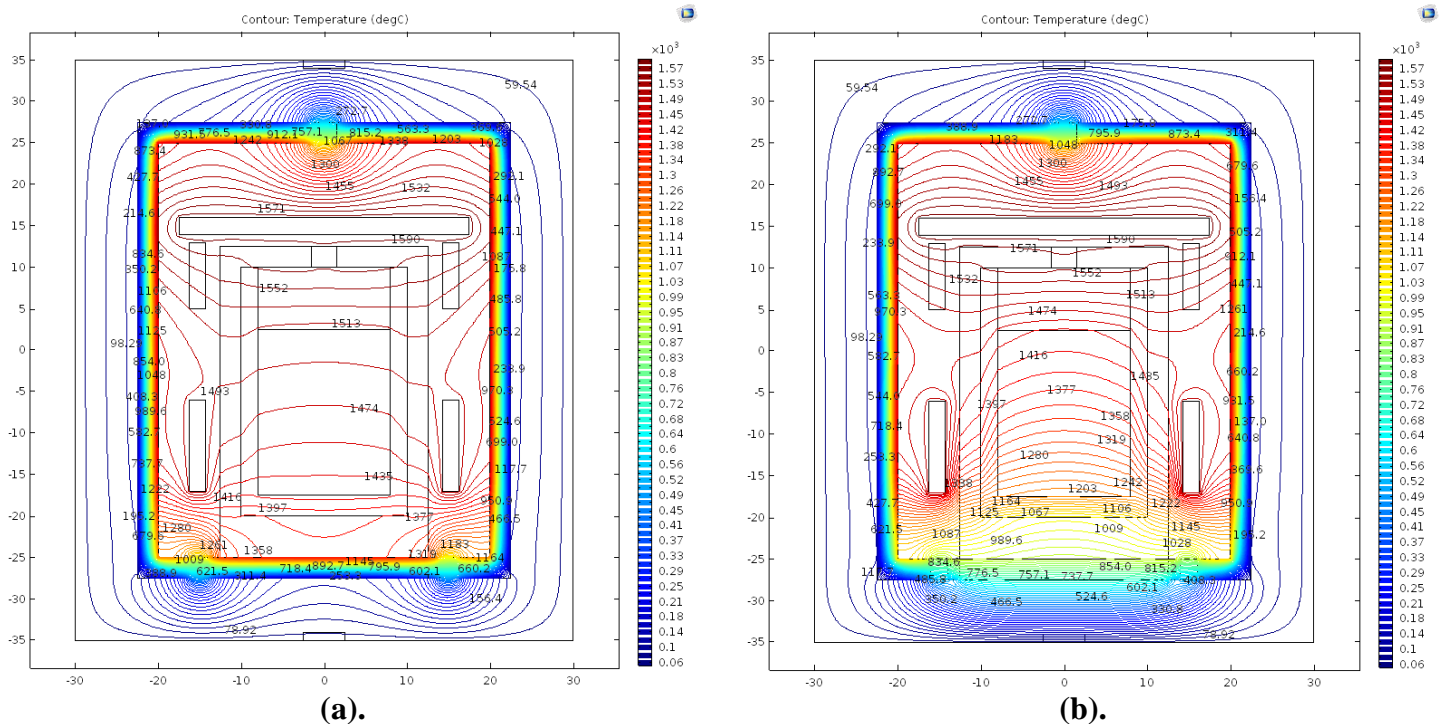
Figure 5.5 : Schéma du four avec l'amélioration proposé par notre cas d'étude.

Plusieurs simulations ont été réalisées pour cette amélioration, les résultats les plus importants sont présentés dans les figures 5.6 et 5.7. Dans la figure 5.6, la température de travail des tous les éléments chauffants est maintenue à 1600C. Comme on peut le voir, l'addition d'un élément chauffant en haut a changé complètement la configuration thermique. Nous avons obtenu des profils isothermiques de forme plane à concave, cette forme d'interface peut améliorer la purification.



**Figure 5.6 :** Four amélioré avec une température de travail de tous les éléments chauffant de 1600C. (a) : Configuration thermique du silicium liquide, (b) : Configuration après la solidification.

Pour augmenter la performance du procédé, dans la figure 5.7 nous avons changé les températures de travail des éléments chauffants latéraux de 1600 à 1500C, tandis que celle de haut est maintenue à 1600C.



**Figure 5.7 :** Four amélioré avec une température de travail des éléments chauffants latéraux de 1500C et de haut de 1600C. (a) : Configuration thermique du silicium liquide, (b) : Configuration après la solidification.

Le résultat montre une nette amélioration, des profils isothermiques quasiment plans et légèrement concave sont obtenus. Cette configuration est la meilleure pour ce type de procédé pour la purification par solidification directionnelle.

### **5.5. Conclusion**

Le modèle numérique a permis d'obtenir des résultats très satisfaisants. Comme on peut le voir, l'addition d'une partie chauffante sur le haut dans la zone chaude a nettement amélioré la configuration thermique du four. Ce résultat conforte notre analyse théorique du lien qui existe entre la thermique du four et les paramètres de contrôle. L'amélioration de la configuration de la thermique nous a permis d'améliorer la forme du front de solidification (l'interface solide liquide) et par la suite la purification du silicium métallurgique.

## **Conclusion générale et perspectives**

Le domaine photovoltaïque est en développement contenu, le principal intérêt de ce développement est de rendre l'énergie solaire accessible pour tout le monde. Pour atteindre cet objectif, tous les travaux réalisés sont en relation avec la réduction des coûts de production et d'exploitation. L'un des éléments essentiels dans les coûts de production photovoltaïques est la production de la matière première, le silicium. Le rendre accessible à des prix bas est un objectif très intéressant d'où l'intérêt de notre travail sur la purification de silicium métallurgique pour obtenir un silicium métallurgique de qualité solaire sans passer par les procédés compliqués qui coûtent cher.

Comme nous l'avons vu l'analyse de la physique qui contrôle le procédé de purification par la méthode de solidification directionnelle, nous a permis de connaître les paramètres de contrôle et leurs interrelations, et par conséquent de bien choisir les modifications qui peuvent apporter des améliorations dans le processus de purification du silicium métallurgique dans la conception des fours. Cette partie a permis de choisir le paramètre le plus simple pour faire notre analyse, qui est dans notre cas l'effet de la configuration thermique sur la forme de l'interface solide liquide.

De plus, l'outil numérique nous a permis d'appliquer cette amélioration, de simuler son effet sur la configuration finale et de faire des comparaisons des résultats entre la configuration réelle et la configuration améliorée. Les résultats sont très intéressants, elles peuvent être utilisées dans la conception d'un futur four de laboratoire.

Comme perspectives futures, il sera très intéressant de simuler d'autres paramètres, comme la vitesse de solidification, pour voir son effet sur la forme de l'interface solide liquide.

---

## Références bibliographiques

- [1] l’Echo du Solaire, Études de marché,  
<http://lechodusolaire.europeselectronics.net/h/archives.php?MD=10&J=xvzvmflfakafduay>.
- [2] British Petroleum (BP), BP Energy Outlook, Edition 2019.
- [3] International Energy Agency (IAE), Global Energy & CO2 Status Report: The latest trends in energy and emission in 2018, IEA 2019, <https://www.iea.org/geco/>.
- [4] S.W. Glunz, R. Preu, et D. Biro, Crystalline Silicon Solar Cells: State-of-the-Art and Future Developments, Edition Elsevier 2012.
- [5] British Petroleum (BP), Renewable Energy, Edition 2019,  
<https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy/renewable-energy.html>.
- [6] F.B. Santara, Cristallisation du silicium photovoltaïque sous induction électromagnétique : étude d’une vanne de rétention et de la ségrégation sous brassage, thèse de doctorat de l’Université de Grenoble 2010.
- [7] Photovoltaïques, les cellules photovoltaïques, <https://www.photovoltaique.info/fr/realiser-une-installation/choix-du-materiel/caracteristiques-des-panneaux-photovoltaiques/les-technologies-de-cellules-solaires-photovoltaiques/>
- [8] PV solar panel from silicon wafer, Edition 2019,  
<http://recyclingtrade.blogspot.com/2009/04/pv-solar-panelmodule-from-silicon-wafer.html>
- [9] Helios Resource, <http://www.hr-pv.com/-id=26&lang=.htm>
- [10] Evasol, Groupe français des énergies, quel est le processus technique de production des panneaux photovoltaïques ?, <http://www.evasol.fr/P-15-129-E1-la-chaine-technique-du-photovoltaïque.html>
- [11] National Renewable Energy Laboratory (NREL), <https://www.nrel.gov/>
- [12] J. Degoulange, Purification et caractérisations physico-chimiques et électriques de silicium d’origine métallurgique destiné à la conversion photovoltaïque, Thèse de doctorat, INPG, 2008.
- [13] H. Matthias, Metallurgical Grade and Metallurgically Refined Silicon for Photovoltaics, Editors: Semiconductors and Semimetals, Vol. 89, Burlington: Academic Press, 2013, pp. 77-134.

- [14] SME Mineral Processing and Extractive Metallurgy Handbook, Édition S. Komar Kawatra & Country A. Young 2019.
- [15] D. Sarti et R. Einhaus, Silicon feedstock for the multi-crystalline photovoltaic industry, Solar Energy Materials & Solar Cells, Vol. 72 (2002), pp. 27–40.
- [16] Davis et coll., Impurities in Silicon Solar Cells, IEEE Transactions on Electron Devices 27 (1980) p.677.
- [17] Soliditice, Cours de solidification, Grenoble INP, <http://soliditice.minatec.grenoble-inp.fr/index.php?sVersion=fr>
- [18] C. Barat, T. Duffar, J-P. Garandet, Estimation of the curvature of the solid –liquid interface during Bridgman crystal growth, Journal of Crystal Growth, Vol.194 (1998), pp. 149-155.
- [19] PV EDUCATION.ORG, A collection of resources for the photovoltaic educator, <https://www.pveducation.org/>

## **Annexes :**

- **Annexe A** : les technologies des cellules solaires photovoltaïques.
- **Annexe B** : les rendements de conversion photovoltaïques des modules confirmés pour diverses technologies photovoltaïques d'après NREL.
- **Annexe C** : les dimensions du four de solidification directionnelle utilisées pour la simulation numérique.
- **Annexe D** : les données de propriétés des éléments utilisées dans les fours industriels de solidification directionnelle.

## 4.1 LES TECHNOLOGIES DE CELLULES SOLAIRES PHOTOVOLTAÏQUES

Les cellules en silicium cristallin, élément principal de la plupart des modules photovoltaïques, sont fabriquées à partir de fines tranches de silicium, sous forme de plaquettes (wafers en anglais). Le silicium est obtenu à partir d'un seul cristal ou de plusieurs cristaux : on parle de cellules monocristallines (mono Si) ou multicristallines (mc-Si). Des technologies dérivées, toujours à base de silicium cristallin, se sont développées ces dernières années pour améliorer les rendements des cellules (Si type n, Si type p, Hétérojonction Si).

Les cellules en couches minces sont fabriquées en déposant une ou plusieurs couches extrêmement fines, de moins de quelques microns (millionièmes de mètre) de matériaux semiconducteurs sur un support à bas coût tels le verre, l'acier inoxydable ou le plastique. Elles ont l'avantage d'un coût de fabrication plus bas, mais ont un rendement inférieur. Trois types de modules en couches minces sont actuellement disponibles dans le commerce : à partir de silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H), de composés polycristallins de diséléniure de cuivre-indium/sulfure de cadmium (CIS/CdS et CIGS avec du gallium en

plus), de composés polycristallins de tellure de cadmium/sulfure de cadmium (CdTe/CdS), de matériaux tels que l'arséniure de gallium (GaAs) ou d'un absorbant fait de cuivre, de zinc, d'étain, de soufre et de sélénium (CZTS).

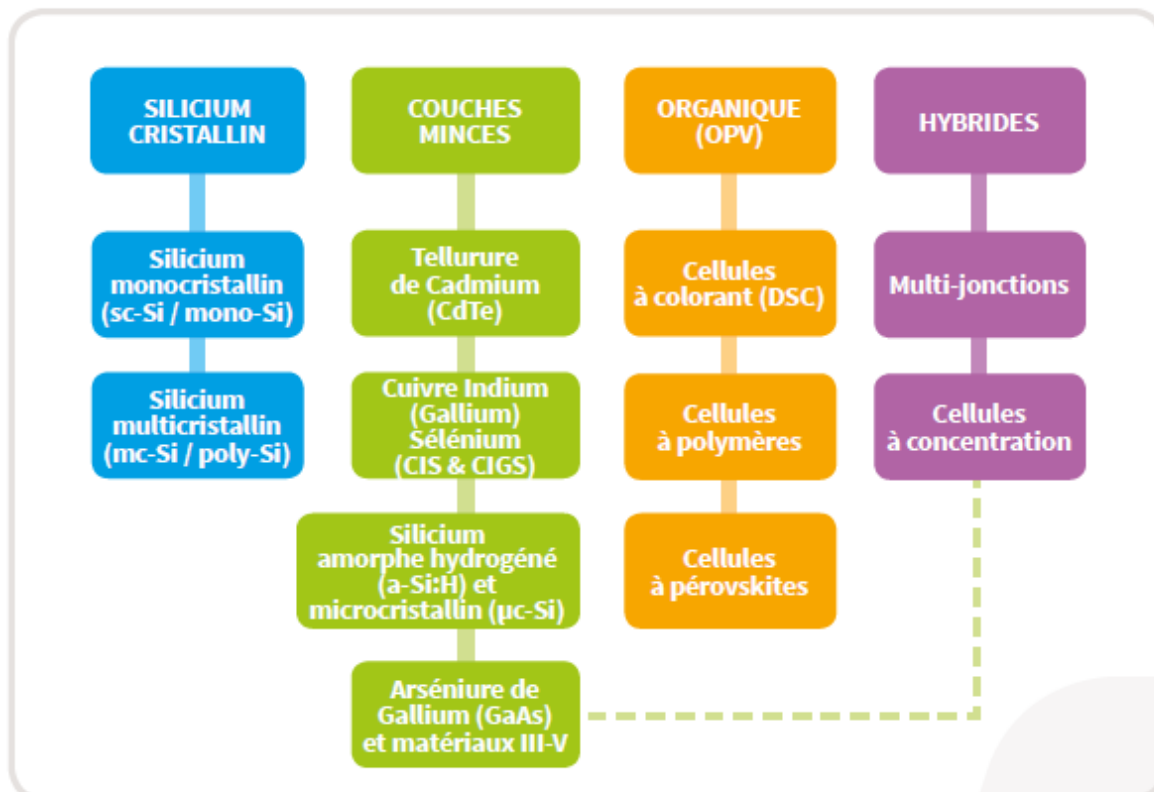
Les cellules organiques fonctionnent sur le principe des cellules à colorant de Michaël Grätzel avec différents matériaux (cellules à colorant, à polymères ou à pérovskites). Avec des rendements de l'ordre de 3 à 5 %, leur point faible reste aujourd'hui encore leur durée de vie limitée.

Enfin, les cellules hybrides rassemblent les cellules mettant en présence des technologies de natures différentes pour atteindre des rendements optimisés (multijonctions sur Si ou CIGS...).

La figure 16 résume ces différentes technologies.

Les modules à concentration (CPV ou HCPV) fonctionnent en focalisant la lumière sur une petite surface au moyen d'un concentrateur optique tel qu'une lentille de Fresnel. Leur rendement est élevé (20 à 30 %). On utilise principalement des technologies de couches minces à base de matériaux tels que l'arséniure de gallium.

FIGURE-16 CLASSIFICATION DES PRINCIPALES TECHNOLOGIES DE CELLULES SOLAIRES PV



Source : Hespul, <http://www.photovoltaique.info/Les-technologies-de-cellules.html>



# Champion Module Efficiencies

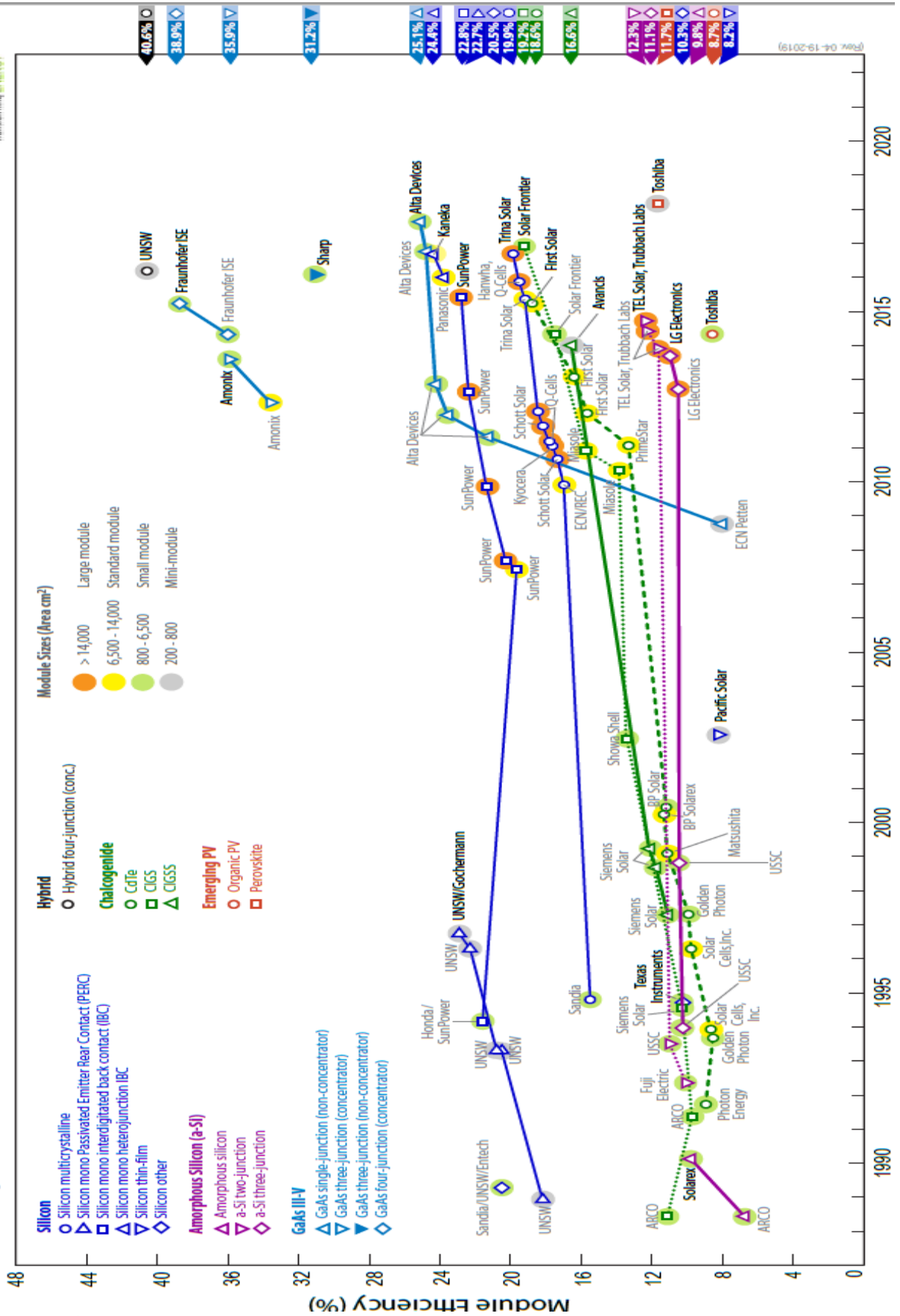
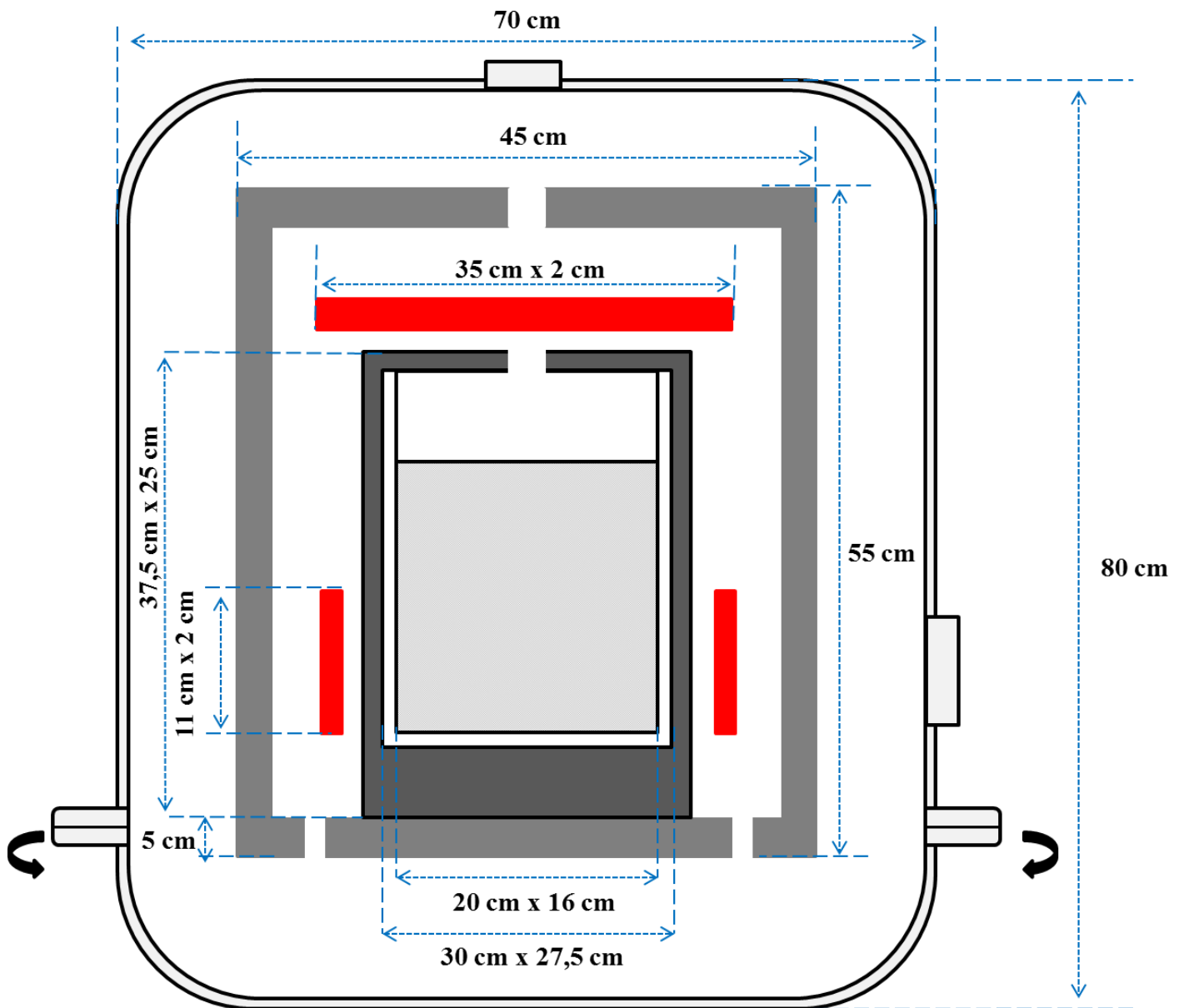


Figure B.1 : Rendements de conversion PV confirmés pour diverses technologies PV (NREL).



**Figure C.1** : Dimensions du four de solidification directionnelle utilisé pour la simulation numériques.

**Tableau C.1 :** Exemple propriétés du graphite solide utilisé pour les éléments chauffants et le porte creuset d'après TOYO TANSO.

## Données de propriétés

### ■ Propriétés type

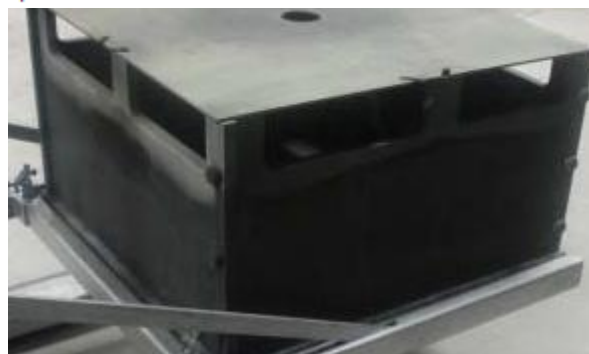
Qualité	Densité de masse	Dureté	Résistivité électrique	Résistance à la flexion	Résistance à la compression	Résistance à la traction	Module de Young	Coefficient d'expansion thermique	Conductivité thermique	Dimensions standard (mm)
	mg/m <sup>3</sup>	HSD	μΩ·m	MPa	MPa	MPa	GPa	10 <sup>-6</sup> /K	W/(m·K)	
IG-11	1,77	51	11,0	39	78	25	9,8	4,5	120	305 x 620 x 1000 ø585 x 1050
IG-12	1,78	55	12,5	39	88	28	10,8	4,7	100	305 x 620 x 1000 ø585 x 1050
<b>IG-15</b>	1,90	60	9,5	54	103	29	11,8	4,8	140	230 x 620 x 1000
IG-19	1,75	60	17,0	38	88	25	9,5	4,6	80	ø400 x 900 305 x 620 x 1000
IG-43	1,82	55	9,2	54	90	37	10,8	4,8	140	300 x 540 x 850
IG-45	1,88	55	9,0	60	110	40	12,0	4,9	140	300 x 540 x 850
IG-56	1,77	57	12,2	43	88	27	10,3	4,7	100	1050 x 1050 x 450 ø740 x 730
IG-70	1,83	58	10,0	47	103	31	11,8	4,6	130	305 x 620 x 1000 ø460 x 1050
ISEM-1	1,68	45	13,5	36	69	20	8,8	4,2	90	305 x 620 x 1000
ISEM-2	1,78	55	11,0	41	83	25	9,8	4,6	120	305 x 620 x 1000
ISEM-3	1,85	60	10,0	49	103	29	11,8	5,0	130	305 x 620 x 1000
ISEM-8	1,78	63	13,4	52	106	34	10,1	5,6	90	305 x 620 x 1050
ISO-63	1,78	76	15,0	65	135	46	12,0	5,6	70	230 x 540 x 1000
ISO-66	1,82	75	14,4	70	134	46	12,6	7,1	80	180 x 450 x 850
ISO-68	1,82	80	15,5	76	172	54	13,2	5,6	70	230 x 540 x 1000
TTK-50	1,80	70	13,0	60	130	40	11,5	5,1	100	230 x 540 x 1000
TTK-4	1,78	72	14,0	73	135	49	10,9	5,0	90	210 x 510 x 950
TTK-5	1,78	80	15,5	80	150	53	11,6	5,7	80	210 x 510 x 950
TTK-8	1,77	78	15,0	80	155	55	12,0	5,3	80	100 x 400 x 700
TTK-9	1,77	90	18,0	92	180	67	13,0	5,8	70	100 x 400 x 700
SIC-6	1,85	60	10,0	49	103	29	11,8	5,0	130	305 x 620 x 1000
SIC-12	1,77	65	14,1	47	93	29	10,8	5,0	80	305 x 620 x 1000
HPG-51	1,78	73	14,3	75	140	50	11,0	5,1	90	210 x 510 x 950
HPG-53	1,78	81	15,7	80	156	55	11,8	5,8	80	210 x 510 x 950
HPG-59	1,91	88	13,5	100	210	74	12,7	5,7	95	100 x 500 x 950
HPG-81	1,77	80	15,1	83	161	58	12,2	5,2	80	100 x 400 x 700
HPG-83	1,77	92	18,2	96	187	70	13,3	5,9	70	100 x 400 x 700

\* Les chiffres ci-dessus sont des valeurs type et ne sont pas garantis.

\* La plage de température de mesure pour le coefficient d'expansion thermique est comprise entre 350 et 450°C.

\* Conversion d'unité : μΩ·m=μΩ·cm × 0,01 MPa=kgf/cm<sup>2</sup> × 0,098 GPa=kgf/mm<sup>2</sup> × 0,0098 W/(m·K)=kcal/h·m·°C × 1,16

\* Il y a d'autres dimensions de produits en plus de celles précitées. Contactez Toyo Tanso pour plus d'informations.



**Tableau C.2 :** Exemple des propriétés de fibre de graphite utilisé pour l'enceinte d'isolation thermique d'après TOYO TANSO.

# Propriétés

## ■ Propriétés type

Forme	Matériau	Densité de masse (mg/m <sup>3</sup> )	Résistivité électrique (μΩ·m)	Résistance à la flexion (MPa)	Module de flexion (GPa)	Résistance à la traction (MPa)	Coefficient d'expansion thermique RT à 1273K (10 <sup>-6</sup> /K)		Conductivité thermique (W/(m·K))		type C/C	Description
							(⊥)	(//)	(⊥)	(//)		
		—	—	—	—	—	(⊥)	(//)	(⊥)	(//)		
Panneau plat	CX-741	1,51	23	140	46	185	8,1	<1	6	35	2DC/C	Résistance moyenne (méthode de moulage A)
	CX-761	1,58	20	185	55	250	8,4	<1	9	44		Résistance élevée (méthode de moulage A)
	CX-742	1,48	24	130	42	170	7,8	<1	5	34		Résistance moyenne (méthode de moulage B)
	CX-762	1,58	21	170	50	185	8,2	<1	8	42		Résistance élevée (méthode de moulage B)
	CX-31	1,61	22	90	23	98	4,1	<1	12	52		Visserie
	C/C-201 <sup>1)</sup>	1,50	30	147	47	127	8,2	<1	5	20		Force moyenne, composants de boulons et écrous
Profils	CX-743	1,48	24	130	—	—	7,8	<1	5	34	FWC/C	Profils
	CX-763	1,58	21	170	—	—	8,2	<1	8	42		Profils de résistance élevée
Cylindres	CX-45	1,44	24	105	34	114	8	<1	4	34	FWC/C	Cylindre de force moyenne
	CX-47	1,52	23	140	45	154	8	<1	6	35		Cylindre de force élevée
Creusets	CX-510V	1,57	13	195	—	290	7	<1	7	-		Creusets bobinés
Cylindres	C/C-FW <sup>1)</sup>	150	12	245	—	245	—	<1	5	30	FWC/C	Moules bobinés pour fours presse à chauds
	CX-55	1,60	11	195	—	290	7,4	<1	7	-		Cylindres bobinés
Tuiles	CX-2002U <sup>2)</sup>	1,65	2,7, 3,4, 5,1 (X, Y, Z)	47, 43, 17 (X, Y, Z)	—	35, 30, 11 (X, Y, Z)	5,3 (Z)	1,7, 2,3 (X, Y)	190 (Z)	390, 320 (X, Y)	feutre C/C	Utilisation dans les centrales nucléaires
	Graphite isotropique (IG-56)	1,77	12	43	10	27	4,7		104			

\* Les chiffres ci-dessus sont des valeurs type et ne sont pas garantis.

1) Fabriqué par Ohwada Carbon Industrial Co., Ltd. ;

2) La direction du laminage du feutre est conçue comme axe Z et les directions sur le plan comme axes X et Y.



**Tableau C.3** : Exemple des propriétés du quartz utilisé pour les creusets de solidification d'après LABMODERNE.

<b>Propriétés physiques</b>	
Densité	2201 kg/m <sup>3</sup>
Elasticité	Ca. 50 N/mm <sup>2</sup>
Dureté	5,3-6,5 Mohs ; 8,8 GPa
Pureté	Typique 10-1000 ppm
<b>Propriétés optiques</b>	
Transmittance	160 – 3500 ppm
Indice de refraction	1,46 à 550 nm
Angle de brewster	55,58°
<b>Propriétés thermiques</b>	
Dilatation thermique de 0 à 600° C	0,54.10 <sup>6</sup> /K
Capacité thermique de 0 à 900° C	1052 J/(Kg.K)
Conductivité thermique (20° C)	1,38 W/(m.K)
Conductivité thermique (2000 ° C)	15 W/(m.K)
Point de liquéfaction	1130 °C
Point de ramollissement	1585 °C
Temperature de travail	>2000 °C
Point d'ébullition	2230 °C

## ملخص:

من أجل تطوير الطاقة الضوئية ، من الضروري دراسة وتحسين عمليات تنقية السيليكون الخام لتحسين تكاليف تصنيعها. مع هذا الاعتبار، و كجزء من عملنا قمنا بوصف عمليات التنقية وتحليل تأثيرات عوامل التحكم الخاصة بها: مثلا لدرجات الحرارة ، سرعة التصليب و شكل الواجهة التي تتكون ما بين المادة السائلة والصلبة وكذا تفاعلاتهم لظاهرة فصل الشوائب بطريقة الصلابة الاتجاهية. كما قمنا باستعمال دراسة رقمية لبرنامج COMSOL و تم اقتراح عملية تحسين على أساس التصميم الفعلي لفرن الصلابة الاتجاهية. من خلال هذه الدراسة تحصلنا على نتائج مهمة جدا في زيادة فعالية فصل الشوائب من السيليكون الخام عن طريق تحسين شكل الواجهة التي تتكون ما بين المادة السائلة والصلبة.

**الكلمات المفتاحية:** السيليكون الخام، الخلايا الكهروضوئية ، تنقية الفصل ، تصليب الاتجاهي ، برنامج COMSOL.

## Résumé :

Pour le développement photovoltaïque, il est nécessaire d'étudier et d'optimiser les procédés de purification du silicium métallurgique pour réduire les coûts. Dans cette optique, et dans le cadre de notre travail, nous avons décrit les procédés de purification et analysé les effets des paramètres de contrôles: les gradients thermiques, la vitesse de solidification et la forme de l'interface solide / liquide et leurs interactions sur le phénomène de ségrégation des impuretés pour la méthode de solidification directionnelle. Nous avons proposés une amélioration de four de solidification directionnelle basée sur la conception réelle en utilisant une simulation numérique avec le logiciel COMSOL. Le travail a données des résultats intéressants pour augmenter l'efficacité de la ségrégation des impuretés par l'amélioration de la forme de l'interface.

**Mots clés:** silicium métallurgique, photovoltaïque, purification par ségrégation, solidification directionnelle, logiciel COMSOL.

## Abstract:

In order to develop photovoltaic energy, it is necessary to study and to optimize the purification process of silicon by reducing the purification costs. With this consideration, in our work we have described the process of purification and analyzed the effects of the controlling parameters as: the thermal gradients, the solidification rate and the shape of the solid / liquid interface and their interaction on the segregation phenomena of impurities during the directional solidification. We proposed new improvement on the actual furnaces design based on numerical simulation using COMSOL software. Our work has given interesting results to increase the efficiency of the segregation of impurities by optimizing the shape of the solid / liquid interface.

**Key words:** metallurgical silicon, photovoltaic, purification by segregation, directional solidification, COMSOL Software.