

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DES SCIENCES  
DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

N° :...../2019.....



DOMAINE : Sciences de la matière

FILIERE : Physique

OPTION : Physique Energétique  
et Energies Renouvelables

Mémoire présenté pour l'obtention  
Du diplôme de Master Académique

Réalisé par:

Rouabah Amina

Zine Aldjia

Intitulé

**Etude et modélisation du procédé d'élaboration  
du silicium polycristallin pour la fabrication des  
cellules photovoltaïques**

Soutenu le / /2019 devant le jury composé de:

Dr. Bendarradji Razik	Université Mohamed Boudiaf- M'sila	Président
Dr. Boulechfar Hichem	Université Mohamed Boudiaf- M'sila	Rapporteur
Dr. Nadia Benmensour	Université Mohamed Boudiaf- M'sila	Examineur

Année universitaire : 2018/2019

## الإهداء

الحمد لله الذي علم بالقلم علم الانسان ما لم يعلم وأصلي وأسلم علي خير  
من تعلم وعمل وعلم سيدنا محمد ﷺ

أهدي هذا العمل المتواضع

إلى من لا يمكن للكلمات أن توفي حقهما

إلى من لا يمكن للأرقام أن تحصى فضائلهما

إلى والديّ العزيزين حفظهما الله وأطال في عمرهما

إلى من يزداد فخري بذكرهم ولا معنى للحياة بدونهم

إخوتي وأخواتي

وبراعمهم

حفظهم الله

إلى جميع أساتذتي من الإبتدائي إلى الجامعة

وبدون أن أنسى زميلتي ورفيقتي وأختي وشريكتي في هذا العمل أمينة

علجية

## *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail en premier lieu à mes chers parents pour leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières le long de mes études jusqu'à ce que je parvienne à ce jour.*

*A mes chères sœurs Nadia et Zineb pour leurs encouragements permanents et leur soutien moral.*

*A mes chers frères, Gharib et Hamza pour leurs appuis et leurs encouragements.*

*A ma chère collègue Aldjia.*

*A tous et toutes mes ami(e)s.*

*Amina*

## **Remerciements**

Nous remercions d'abord Dieu pour son soutien, son aide et pour nous avoir donné la force et la volonté d'accomplir ce modeste travail.

Nous remercions notre encadreur Mr. Hichem Boulechfar pour son suivi, ses orientations, ainsi que pour ses conseils précieux et ses encouragements durant la réalisation de ce mémoire.

Nous exprimons nos vifs remerciements à Monsieur Bendarradji Razik qui a bien voulu présider notre jury de soutenance. Nous remercions également Mademoiselle Benmansour Nadia qui nous a fait l'honneur d'examiner ce mémoire et de participer à notre jury de soutenance.

Sans oublier de remercier tous nos enseignants ainsi que nos collègues.

# Nomenclature

$\eta$	: Rendement de la cellule solaire	[%]
$I_{cc}$	: Courant de court –circuit	[A]
$FF$	: Facteur de forme	
$V_{oc}$	: Tension à circuit ouvert	[V]
$P_{max}$	: Puissance lumineuse	[Watt-Crète]
$P_{inc}$	: Puissance maximale délivrée par la cellule	[Watt-Crète]
$Z_{co}$	: L'impédance circuit oscillant	[ $\Omega$ ]
$Z_c$	: L'impédance génératrice à induction	[ $\Omega$ ]
$E$	: Energie calorifique	[J]
$t$	: Temps	[S]
$R$	: La résistance du conducteur	[ $\Omega$ ]
$I$	: L'intensité du courant	[A]
$\xi$	: La permittivité électrique absolue du milieu	[F.m <sup>-1</sup> ]
$\vec{E}$	: Le champ électrique	[N.C <sup>-1</sup> ]
$\vec{B}$	: Le champ magnétique	[Tesla]
$\vec{D}$	: Induction électrique	coulombs par mètre [C.m <sup>-2</sup> ]
$\vec{A}$	: Potentiel vecteur magnétique	
$\vec{H}$	: Induction magnétique	[Tesla]
$\vec{J}$	: La densité de courant volumique	[A.m <sup>-2</sup> ]
$E$	: Coefficient de Young	[Pa]
$\varphi$	: Source de chaleur	[J]
$\nu$	: Coefficient de poisson	
$\rho$	: La résistivité électrique	[ $\Omega .m$ ]
$\sigma$	: Conductibilité	[S.m <sup>-1</sup> ]
$\mu$	: La perméabilité magnétique absolue du milieu	[H.m <sup>-1</sup> ]
$\omega$	: Fréquence angulaire	[hertz]
$q$	: La densité de source de chaleur induite	[eV]
$C_p$	: La capacité calorifique	[J.K <sup>-1</sup> ]
$d$	: La masse volumique	[kg/m <sup>3</sup> ]
$K$	: La conductivité thermique	[W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$T$	: La température	[K]

# Liste des figures

## Chapitre I

<b>Figure I.1</b> : La structure interne du soleil.	5
<b>Figure I.2</b> : Analyse spectrale du rayonnement solaire.	6
<b>Figure I.3</b> : Types de rayonnement solaire reçus au sol.	7
<b>Figure I.4</b> : Appareils de mesure.	8
<b>Figure I.5</b> : Notion Air Masse.	8
<b>Figure I.6</b> : Carte l'enseillement moyen annuel dans le Monde.	9
<b>Figure I.7</b> : Niveau d'enseillement en Afrique.	10
<b>Figure I.8</b> : Niveau d'enseillement en Algérie.	11
<b>Figure I.9</b> : La croissance démographique en Algérie entre 1960-2015.	12
<b>Figure I.10</b> : La consommation énergétique en Algérie entre 1971-2020.	12
<b>Figure I.11</b> : L'usine de Rouïba Eclairage.	16
<b>Figure I.12</b> : Aurès solaire.	17
<b>Figure I.13</b> : La ligne d'assemblage dans l'usine Aurès Solaire.	17
<b>Figure I.14</b> : Unité d'assemblage dans l'usine de condor électronique.	18
<b>Figure I.15</b> : L'usine de condor électronique.	18
<b>Figure I.16</b> : Différent type d'exploitation d'énergie solaire.	19
<b>Figure I.17</b> : Type de capteur pour concentration thermodynamique.	20
<b>Figure I.18</b> : Type de capteur thermique.	20
<b>Figure I.19</b> : Principe de fonctionnement de capteur solaire thermique.	21
<b>Figure I.20</b> : Prototype de 195m de hauteur à Manzanares en Espagne.	22
<b>Figure I.21</b> : La centrale photovoltaïque de Birr Rebaa à Ouargla de 10 méga watts	23
<b>Figure I.22</b> : Le réseau cubique diamant CFC.	25
<b>Figure I.23</b> : Sable hollandais (grains 0,2 à 0,6 mm).	25
<b>Figure I.24</b> : Quartz de la mine de La Gardette, Bourg d'Oisans, Isère, France.	26
<b>Figure I.25</b> : Mouvements électrons-trous dans un matériau semi-conducteur	27
<b>Figure I.26</b> : Silicium dopé au phosphore : a. $T=0K$ , b. $T\neq 0K$ .	28
<b>Figure I.27</b> : Silicium dopé au Bore : a. $T=0K$ , b. $T\neq 0K$ .	28
<b>Figure I.28</b> : Jonction P-N dans une cellule photovoltaïque.	29
<b>Figure I.29</b> : La chaîne de fabrication des modules photovoltaïques	30

<b>Figure I.30</b> : Schéma du principe de fonctionnement d'une photopile.	31
<b>Figure I.31</b> : Caractéristiques I(V) et P(V) d'une cellule solaire.	31
<b>Figure I.32</b> : Lingot de silicium monocristallin	32
<b>Figure I.33</b> : Lingot de silicium poly cristallin.	33
<b>Figure I.34</b> : Le silicium amorphe.	34

## Chapitre II

<b>Figure II.1</b> : Schéma de la technique de tirage EFG de silicium en ruban et Photographie du dispositif et des plaquettes obtenues.	42
<b>Figure II.2</b> : Techniques de dépôt des couches minces.	42
<b>Figure II.3</b> : Cristallisation d'un lingot par la méthode Cz	44
<b>Figure II. 4</b> : Procédé de Fusion de Zone.	45
<b>Figure II.5</b> : Des lingots de silicium monocristallin.	45
<b>Figure II.6</b> : Cristallisation d'un lingot polycristallin par solidification dirigée.	46
<b>Figure II.7</b> : Procédé 4C exploitée par EMIX®.	47
<b>Figure II.8</b> : Le creuset froid inductif.	50
<b>Figure II.9</b> : Vue extérieure du "Creuset froid" en cours de chauffe.	50

## Chapitre III

<b>Figure III.1</b> : Le chauffage par induction électromagnétique.	52
<b>Figure III.2</b> : Principe du chauffage par induction électromagnétique.	53
<b>Figure III.3</b> : La géométrie simplifiée du problème.	57
<b>Figure III.4</b> : Puissances échangées pendant le tirage du silicium.	59
<b>Figure III.5</b> : Les conditions aux limites sur le lingot du silicium.	60

## Chapitre IV

<b>Figure IV.1</b> : Champ magnétique (ligne du flux).	67
<b>Figure IV.2</b> : Champ de température au sein du silicium.	68
<b>Figure IV.3</b> : Localisation de l'interface de solidification.	69
<b>Figure IV.4</b> : Isothermes au sein du lingot de silicium.	70
<b>Figure IV.5</b> : Variation radiale de la température au sein du silicium.	71

## TABLE DES MATIERES

DEDICACES.....	i
REMERCIEMENTS.....	iii
NOMENCLATURE.....	iv
LISTE DES FIGURES.....	v
TABLE DES MATIERES.....	vii
INTRODUCTION GENERALE.....	1

### CHAPITRE I : GENERALITES ET REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1.Introduction.....	5
I.2. Le soleil.....	5
I.3.Le Spectre solaire.....	6
I.4. Le Rayonnement solaire.....	6
I.4.1. La constante solaire.....	6
I.4.2. Le rayonnement global.....	7
• Rayonnement direct.....	7
• Rayonnement diffus.....	7
• Rayonnement réfléchi.....	7
I.4.3. La convention Air Mass.....	8
I.5.Niveau d’enseillement dans le Monde.....	9
I.5.1 Niveau d’enseillement en Afrique.....	9
I.5.2Niveau d’enseillement en Algérie.....	10
I.6.Croissance de la consommation d’énergie en Algérie.....	11
I.7.Le développement de la filiale photovoltaïque en Algérie.....	14
I.7.1Quelques réalisations photovoltaïques en Algérie.....	14
• Le photovoltaïque dans le secteur Etatique.....	14
○ Unité de développement des équipements solaires (L’UDES).....	14
○ Le projet de Rouïba Eclairage.....	16

• Le photovoltaïque dans le secteur privé.....	16
○ La société Aurès solaire.....	16
○ L'usine Condor Electroniques pour la production des panneaux solaires.....	17
I.8.Les différentes technologies de la conversion de l'énergie solaire.....	19
I.8.1.Solaire à concentration thermodynamique.....	19
I.8.2.Solaire thermique.....	20
I.8.3.La cheminée (tour) solaire.....	21
I.8.4.Le solaire photovoltaïque.....	22
I.9.Le silicium.....	23
I.9.1.Point de vue cristallographique.....	24
I.9.2.Le silicium dans la nature.....	25
I.9.3.Le silicium comme semi-conducteur.....	27
I.10.Le dopage.....	27
• Dopage de type N.....	27
• Dopage de type P.....	28
• La jonction (P N).....	29
I.11.Les différentes étapes pour les fabrications des cellules solaires.....	29
I.12.Principe de fonctionnement d'une cellule solaire.....	30
I.12.1.Le rendement d'une cellule PV.....	31
I.12.2.les différents types de silicium.....	32
• Si monocristallin.....	32
• Si polycristallin.....	33
• Si amorphe.....	33
I.12.3.Les paramètres affectant le rendement.....	34
• Les impuretés.....	34
• Défauts cristallins.....	34
• Défauts ponctuels.....	35
I.13.Revue bibliographique.....	35

## **CHAPITRE II : LES PROCÉDES D'ÉLABORATION DU SILICIUM PHOTOVOLTAÏQUE**

II.1. Techniques pour élaboration du Si amorphe.....	41
II.1.1. La technique RST.....	41
II.1.2. La technique EFG.....	42
II.1.3. Technique de couches minces.....	42
• Dépôt Chimique en phase vapeur (CVD).....	43
• Dépôts physiques en phase vapeur (PVD).....	43
II.2. Techniques pour élaboration du Si monocristallin.....	43
II.2.1. Elaboration du silicium par la méthode de Czochralski « CZ ».....	43
II.2.2. Le procédé de Fusion de Zone (FZ).....	44
II.3. Techniques pour élaboration du Si polycristallin.....	45
II.3.1. Procédé de croissance dirigée.....	45
II.3.2. Le principe du procédé 4C exploité par EMIX.....	46
II.4. La coulée continue (EMCP).....	48
II.4.1. Description de l'installation.....	48
• Le four zénithal.....	48
• Le four de recuit.....	48
• Le générateur de fréquence.....	49
• L'inducteur.....	49
• Le creuset froid.....	49

## **CHAPITRE III : FORMULATION MATHÉMATIQUE ET MODELISATION DU PROBLÈME PHYSIQUE**

III.1. Introduction.....	52
III.2. Chauffage par induction électromagnétique.....	52
III.3. L'effet Joule.....	53
III.3.1. La loi de Joule.....	53
• L'intensité du courant.....	54
• Le temps pendant lequel circule le courant.....	54

• La résistance du conducteur.....	54
III.4. Formulation électromagnétique et thermique.....	54
III.5 Modélisation du problème physique.....	57
III.5.1 Modèle électromagnétique de COMSOL.....	58
• La mise en équation.....	58
III.5.2 Modèle thermique de COMSOL.....	58
• Hypothèses.....	59
• Le bilan énergétique sur le silicium.....	59
• Conditions aux limites.....	60

## **CHAPITRE IV : SIMULATION NUMERIQUE ET DISCUSSION DES RESULTATS**

IV.1. Introduction.....	62
IV.2. Aperçu sur le logiciel.....	62
IV.3. Les étapes d'utilisation de COMSOL.....	62
IV.4. Discussion des résultats de la simulation.....	67
Conclusion générale.....	72
Références bibliographiques.....	75

### Résumés

# **INTRODUCTION GENERALE**

La production d'énergie représente une grande importance et les besoins en énergie ne cessent d'augmenter, À l'heure actuelle, la production mondiale d'énergie dépend en grande partie des sources d'énergie fossiles, sources limitées et polluantes par gaz à effet de serre. Cela a encouragé la recherche d'une solution économique et non polluante pour la production d'énergie. Ce sont les énergies alternatives qui sont renouvelables naturellement et de manière illimitée et parmi ces énergies, il y a l'énergie solaire dont sa lumière peut être utilisée et convertie en électricité à l'aide de cellules photovoltaïques utilisant du silicium.

Le silicium en tant que matière première dans l'industrie photovoltaïque représente plus de 90% dans ses trois formes qui sont les couches minces, silicium monocristallin et silicium polycristallin, ce dernier étant le plus largement utilisé en raison de son faible coût par rapport aux autres types. Pour améliorer le rendement du silicium polycristallin il faut améliorer ses propriétés optoélectriques qui permettent aux cellules de capter une plus grande quantité d'énergie et de la convertir en électricité. Pour ce but, les chercheurs ont mis au point un procédé de production de silicium par induction électromagnétique et sans contact pour obtenir de grandes quantités de silicium et minimiser les défauts cristallins. Le silicium dans ce procédé passe par plusieurs phénomènes physiques, le phénomène électromagnétique et hydrodynamique sans négliger le phénomène de la croissance cristalline pendant la solidification. Le silicium est soumis à de forts gradients thermiques et étant donné la complexité de ce procédé, la méthode expérimentale reste coûteuse et la méthode théorique est presque impossible vu la complexité des phénomènes physiques couplés. La simulation numérique à l'avantage d'être le meilleur moyen pour résoudre ce type de problèmes complexes.

Notre travail se focalise sur le procédé d'élaboration du silicium polycristallin qui varie d'une méthode à une autre, plus la méthode est efficace et contrôlée, meilleure est la qualité du silicium. Pour cela, nous avons choisi le procédé par induction électromagnétique sans contact avec le creuset froid ce qui améliore la qualité du silicium. Ce procédé utilise un four de recuit pour ralentir le refroidissement du silicium en cours de solidification ce qui affecte positive la structure cristallographique et améliore son rendement.

La simulation électromagnétique donne la quantité de chaleur échangée entre le silicium et le creuset froid. A partir de cette donnée on peut simuler le transfert de chaleur qui nous donnera le

champ thermique dans le lingot du silicium. L'objectif de notre travail est d'améliorer le rendement du silicium polycristallin pour permettre au module photovoltaïque de capter une plus grande quantité d'énergie émise et la convertir en une grande production électrique.

Ce travail comprend quatre chapitres, dans le premier chapitre, nous avons parlé des informations générales sur l'énergie solaire, l'effet photovoltaïque, le silicium ainsi que le développement de l'industrie photovoltaïque en Algérie.

Le deuxième chapitre s'articule autour des différents procédés d'élaboration du silicium et en particulier le procédé par induction électromagnétique pour le silicium polycristallin.

Le troisième chapitre comprend la formulation mathématique et la modélisation des phénomènes électromagnétiques et thermiques.

Le dernier chapitre traite la simulation numérique des échanges de chaleur entre le silicium polycristallin et les différents éléments de l'installation lors du tirage ainsi que de la discussion des résultats.

À la fin, nous avons présenté une conclusion générale des résultats obtenus.

# CHAPITRE I

---

## Généralités et revue bibliographique

## I.1.Introduction :

L'énergie est indispensable pour toute activité humaine et représente également l'un des piliers de l'économie moderne. Ses sources se sont diversifiées au cours du temps afin de satisfaire les besoins en termes d'énergie de plus en plus élevés dans le monde. Les sources d'énergies conventionnelles (charbon, pétrole, gaz, nucléaire) sont les plus exploitées et elles sont limitées en termes de réserve. De plus, les risques en matière environnementale liés aux rejets de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère engendrant le phénomène de l'effet de serre. Ces problèmes suscitent actuellement un vif intérêt pour les énergies renouvelables sous leurs multiples formes (Eolienne, solaire thermique, photovoltaïque, hydroélectrique, biomasse, et géothermique). L'énergie solaire est la plus importante de toutes les énergies renouvelable est possède de nombreux atouts tant sur le plan environnemental qu'économique. Pour un pays grand consommateur d'énergie comme l'Algérie, l'énergie solaire représente une solution à l'augmentation des besoins croissants en énergie ainsi la limitation des émissions de gaz à effet de serre et représente même un moteur pour la création de nouveaux emplois dans la fabrication et l'installation de différents systèmes de la conversion de l'énergie solaire.

## I.2. Le soleil :

Le soleil est l'étoile la plus proche de notre planète. Elle apparaît sous la forme d'une sphère gazeuse de 696 000 km de rayon, soit 109 fois celui de la terre, et qui se situe à 150 millions de km de la Terre. Cette distance est si grande que sa lumière nous parvient dans environ 8 minutes après avoir été émise. Sa masse est de l'ordre de  $1,99.10^{30}$  kg. Notre Soleil est une énorme boule de gaz composée de 70% d'hydrogène et de 28% d'hélium, et 2% de carbone, d'azote et d'autres éléments.

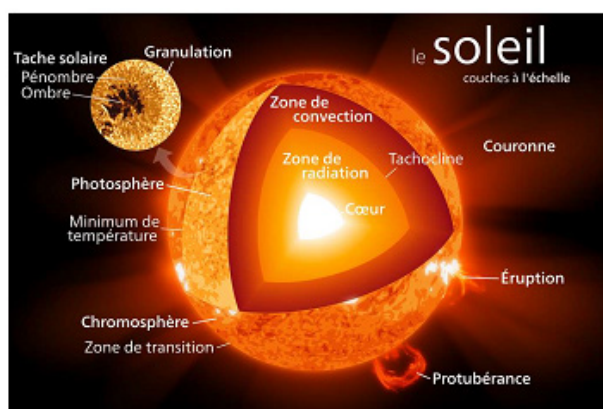


Figure (I.1) : La structure interne du soleil. [1]

### I.3. Le Spectre solaire :

La répartition spectrale du rayonnement solaire est déterminée par la température de sa surface, à savoir 5900 K. La figure (I.2) donne l'allure de la répartition spectrale du rayonnement solaire réel hors atmosphère (l'éclairement spectral est définie comme une puissance reçue par unité de surface pour une longueur d'onde donnée et s'exprimée en  $W/m^2.nm$ ). Le soleil se comporte approximativement comme un corps noir de 5900 K. Ces spectres montrent que le soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur variant de 200 nm à 1000 nm comme suite :

Ultraviolet UV  $200 < \lambda < 380 \text{ nm}$  6.4%.

Visible  $380 < \lambda < 780 \text{ nm}$  48.0%.

Infrarouge IR  $780 < \lambda < 1000 \text{ nm}$  45.6%

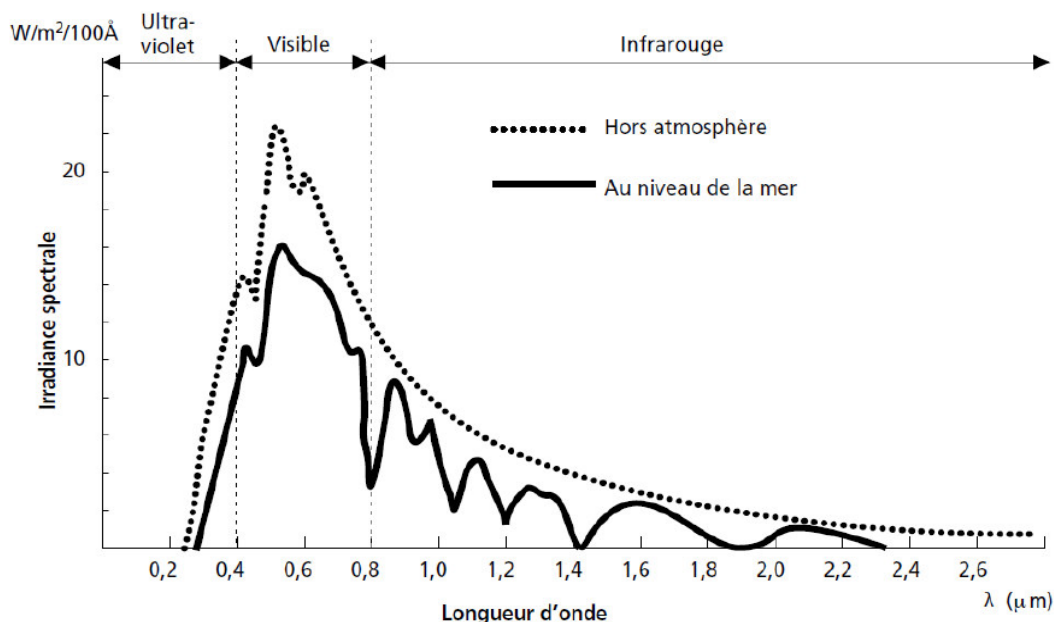


Figure (I.2) : Analyse spectrale du rayonnement solaire. [2]

### I.4. Le Rayonnement solaire :

#### I.4.1. La constante solaire :

L'énergie solaire reçue sur la surface de l'atmosphère est estimée à  $1360 \text{ W/m}^2$  cependant elle s'atténue et perd son intensité en traversant l'atmosphère ne dépassant pas les  $1000 \text{ W/m}^2$  à la surface de la terre en raison de l'absorption dans ce dernier. La constante

solaire varie en fonction de la localisation géographique du site (latitude), la saison, l'heure, les conditions météorologiques (nébulosité, poussière, humidité...), et l'altitude du lieu. [3]

#### I.4.2. Le rayonnement global :

Le rayonnement global est la somme de trois différents types de rayonnements :

- **Rayonnement direct :**

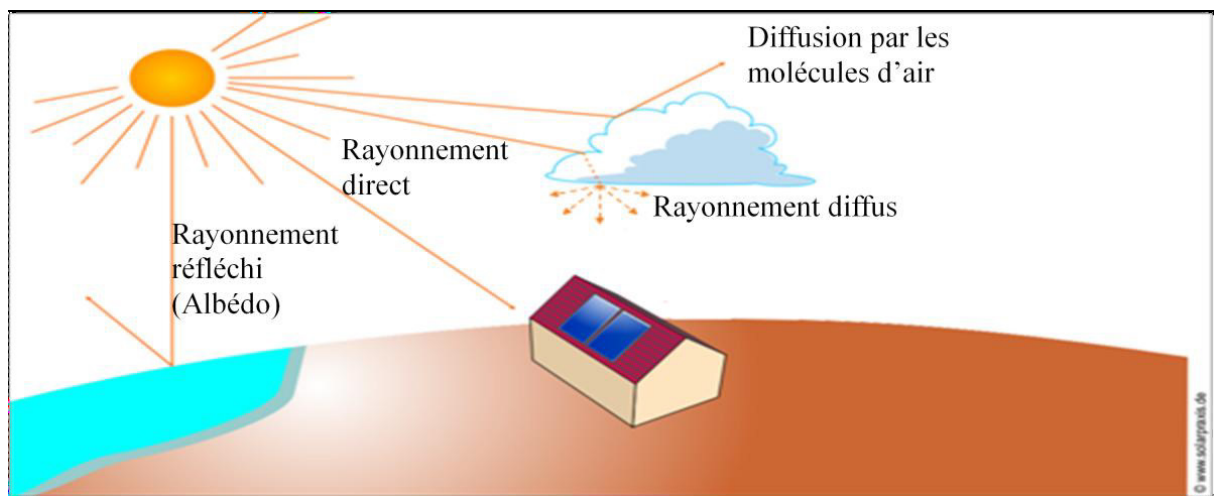
Flux solaire sous forme de rayons parallèles provenant de disque soleil sans avoir été dispersé par l'atmosphère il peut être mesuré par un pyréliomètre.

- **Rayonnement diffus :**

C'est la partie du rayonnement provenant du soleil, ayant subi multiples réflexions (dispersions), dans l'atmosphère.

- **Rayonnement réfléchi :**

C'est la partie de l'éclairement solaire réfléchi par le sol, ce rayonnement dépend directement de la nature du sol (Eau, sable...). Il se caractérise par un coefficient propre de la nature de lieu appelé Albédo.



**Figure (I.3) :** Types de rayonnement solaire reçus au sol. [4]

Il existe des instruments pour la mesure de chaque composante du rayonnement global, ce qui nous permet de mesurer la valeur exacte du rayonnement en tenant compte des différents paramètres géographiques. Ces différents instruments de mesure sont montrés sur la figure suivante :



Figure (I.4) : Appareils de mesure [5]

### I.4.3. La convention Air Mass :

La notion d'air mass (AM) sert à évaluer la masse atmosphérique traversé par le rayonnement solaire et dépend de l'épaisseur de l'atmosphère traversée, celle-ci définit le spectre de référence pour unifier les performances des cellules photovoltaïques. AM0 représente le spectre à la limite de l'atmosphère, AM1 représente le spectre arrivant à la surface de la terre quand le soleil est au zénith, AM1.5 représente le spectre standard arrivant avec un angle de  $48.2^\circ$  à la surface de la terre à une atmosphère et demi et en dernier AM2 qui représente le spectre arrivant avec  $60.1^\circ$  à la surface de la terre. [3]

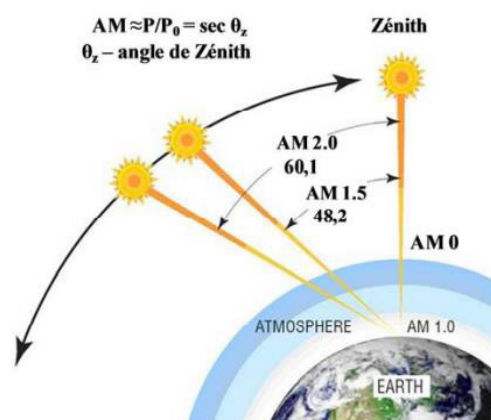
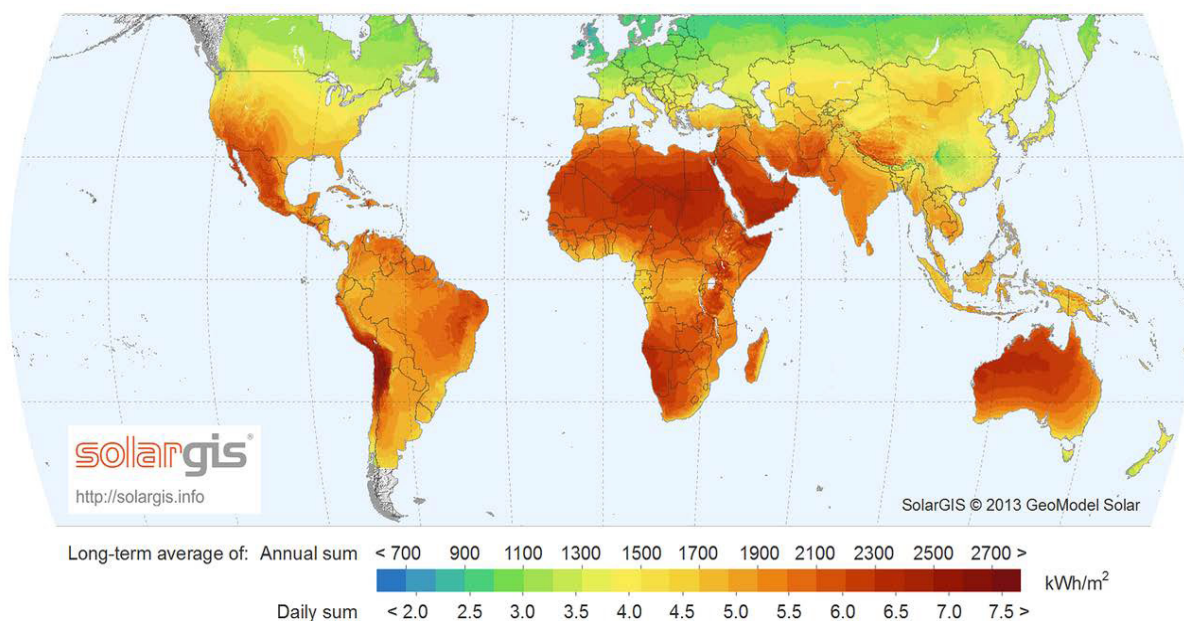


Figure (I.5) : Notion Air Masse. [6]

## I.5. Niveau d'ensoleillement dans le Monde :

Les valeurs maximales de durée d'ensoleillement sont enregistrées dans ce que l'on désigne généralement - dans le jargon de l'énergie solaire - sous le terme de « ceintures solaires » de la Terre. Ces ceintures solaires sont des régions essentiellement désertiques. Les moyennes annuelles de la durée d'ensoleillement dans ces régions sont généralement entre 3 600 et 4 000 h, soit une moyenne journalière extraordinaire de 10 à 11 heures. D'après (World Sunshine Chart) réalisée par le service météorologique des États-Unis.

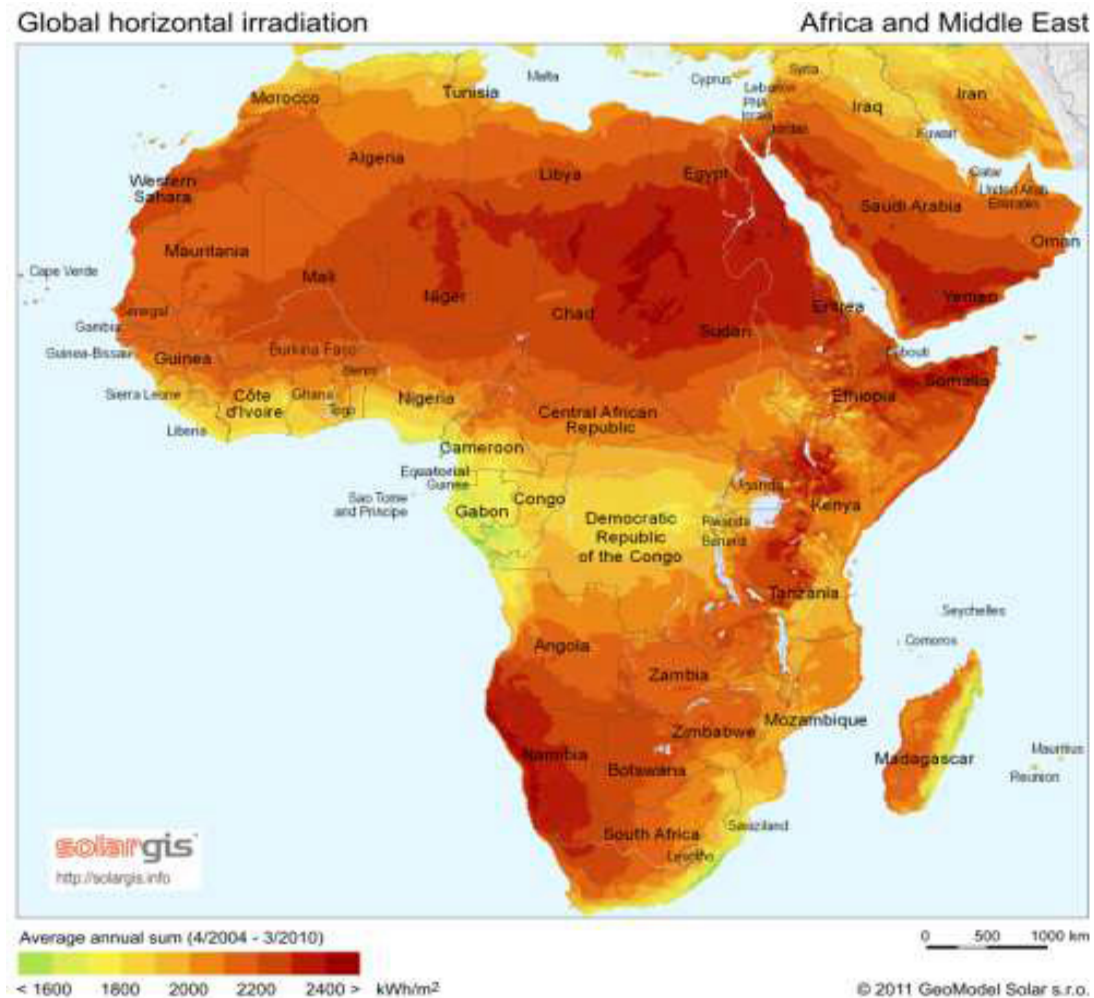


**Figure (I.6) :** Carte l'ensoleillement moyen annuel dans le Monde. [7]

### I.5.1 Niveau d'ensoleillement en Afrique :

L'Afrique est souvent considérée et désignée comme le «Continent du soleil» c.à.d. le continent où l'influence du Soleil est la plus importante. Selon la Carte du monde du Soleil, l'Afrique reçoit beaucoup plus de temps d'ensoleillement au cours de l'année que tout autre continent de la Terre. Tous les endroits les plus ensoleillés de la planète se trouvent en Afrique. Le Sahara oriental / Afrique du nord est particulièrement connue pour ses records d'ensoleillement, la région expérimente non seulement la plus grande durée annuelle de soleil mais aussi les valeurs moyennes annuelles les plus élevées de rayonnement solaire.

La figure ci-dessous montre l'irradiation solaire globale annuelle dans tous les pays d'Afrique.



**Figure (I.7) : Niveau d'ensoleillement en Afrique. [7]**

### **I.5.2 Niveau d'ensoleillement en Algérie :**

L'Algérie est constituée d'une multitude de reliefs. Le nord est sillonné d'ouest en est par une double barrière montagneuse (Atlas tellien et saharien) avec des chaînes telles que le Dahra, l'Ouarsenis, le Hodna, les chaînes de Kabylie (le Djurdjura, Babor et Biban) et l'Aurès. La superficie de pays est la plus grande d'Afrique, de par sa situation géographique, l'Algérie dispose l'un des gisements solaire les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m<sup>2</sup> est de l'ordre de 5 KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700KWh/m<sup>2</sup>/an au Nord et 2263 kWh/m<sup>2</sup>/an au Sud du pays. Ce gisement solaire dépasse les 5 milliards de GWh. [8]

Moyenne annuelle de l'irradiation Globale reçue sur une surface horizontale, Période 1992-2002

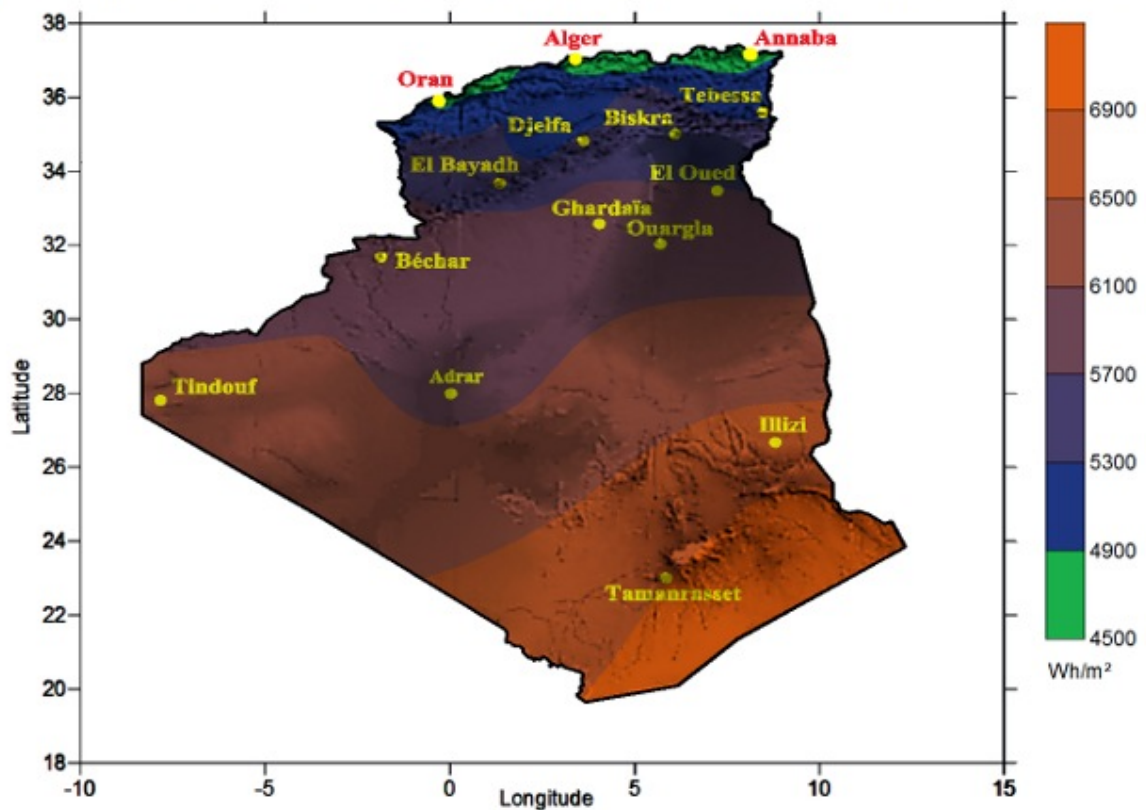
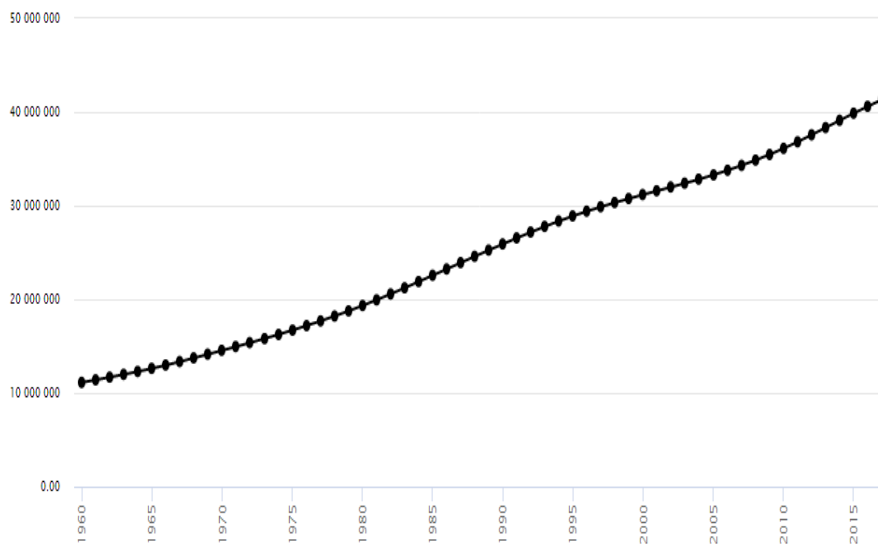


Figure (I.8) : Niveau d'ensoleillement en Algérie. [9]

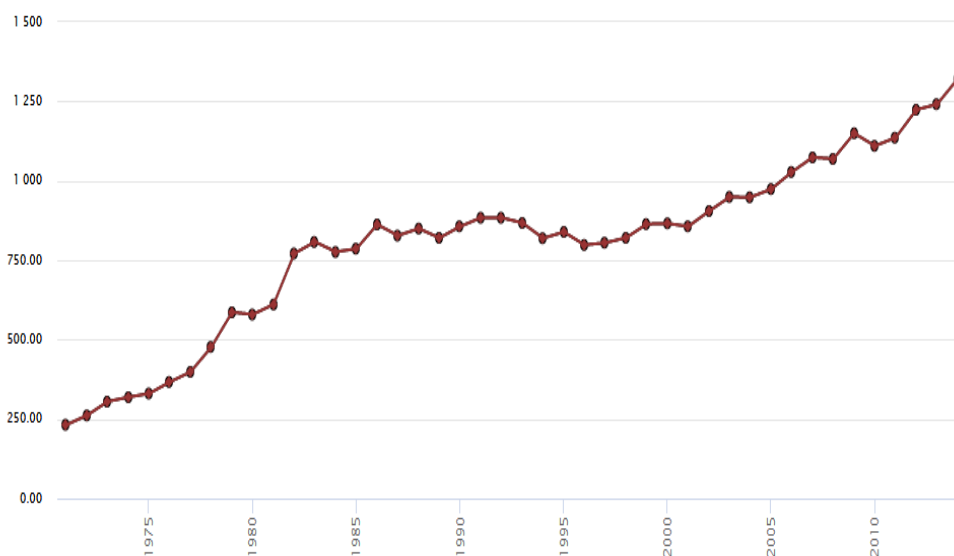
### I.6. Croissance de la consommation d'énergie en Algérie :

Pour estimer le besoin en termes d'énergie, il faut bien connaître l'allure de la croissance démographique ainsi que l'évolution du secteur industrielle qui représentent deux facteurs majeurs dans la consommation de l'énergie en Algérie. D'après l'ONS, la population algérienne observe une nette croissance de la natalité. Donc le facteur démographique doit être pris en compte sérieusement en ce qui concerne la consommation d'énergie qui va augmenter davantage. Le développement industriel qu'a connu l'Algérie que soit dans le secteur étatique ou privé a également contribué à la croissance de la consommation de l'énergie.



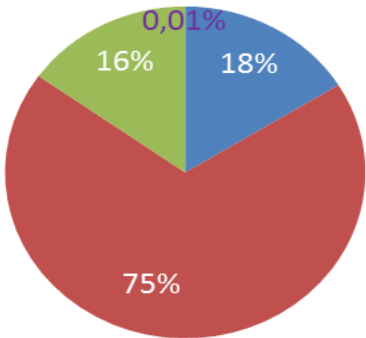
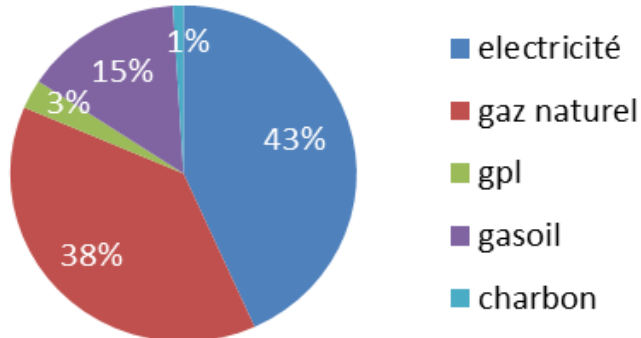
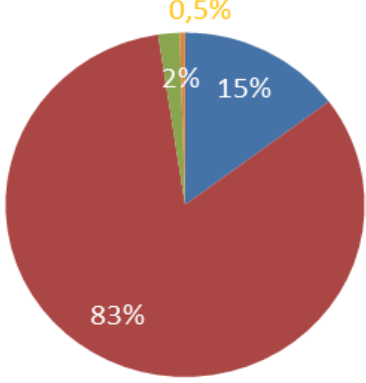
**Figure(I.9) :** La croissance démographique en Algérie entre 1960-2015[10]

Pour l'ensemble de la période 1971-2014, on enregistre 470 % d'augmentations dans la consommation local d'énergie. [10]



**Figure (I.10) :**La consommation énergétique en Algérie entre 1971-2020 .

Table (I.1) : La consommation énergétique en Algérie. [11]

<p><b>1/La consommation finale du secteur résidentiel a atteint 10,5 millions de TEP :</b></p>	 <table border="1"> <thead> <tr> <th>Source</th> <th>Pourcentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>gpl</td> <td>16%</td> </tr> <tr> <td>electricité</td> <td>18%</td> </tr> <tr> <td>gaz naturel</td> <td>75%</td> </tr> <tr> <td>gasoil</td> <td>0,01%</td> </tr> </tbody> </table>	Source	Pourcentage	gpl	16%	electricité	18%	gaz naturel	75%	gasoil	0,01%		
Source	Pourcentage												
gpl	16%												
electricité	18%												
gaz naturel	75%												
gasoil	0,01%												
<p><b>2/La consommation énergétique du secteur tertiaire a atteint 2,3 millions de TEP :</b></p>	 <table border="1"> <thead> <tr> <th>Source</th> <th>Pourcentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>electricité</td> <td>43%</td> </tr> <tr> <td>gaz naturel</td> <td>38%</td> </tr> <tr> <td>gpl</td> <td>3%</td> </tr> <tr> <td>gasoil</td> <td>15%</td> </tr> <tr> <td>charbon</td> <td>1%</td> </tr> </tbody> </table>	Source	Pourcentage	electricité	43%	gaz naturel	38%	gpl	3%	gasoil	15%	charbon	1%
Source	Pourcentage												
electricité	43%												
gaz naturel	38%												
gpl	3%												
gasoil	15%												
charbon	1%												
<p><b>3/La Consommation énergétique du secteur de l'industrie a atteint 5,2 millions de TEP :</b></p>	 <table border="1"> <thead> <tr> <th>Source</th> <th>Pourcentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>gpl</td> <td>2%</td> </tr> <tr> <td>electricité</td> <td>15%</td> </tr> <tr> <td>gaz naturel</td> <td>83%</td> </tr> <tr> <td>gasoil</td> <td>0,5%</td> </tr> </tbody> </table>	Source	Pourcentage	gpl	2%	electricité	15%	gaz naturel	83%	gasoil	0,5%		
Source	Pourcentage												
gpl	2%												
electricité	15%												
gaz naturel	83%												
gasoil	0,5%												

Il est bien évident que selon les analyses de la croissance démographique ainsi que la consommation en énergie, nous sommes devant la nécessité de rechercher des ressources d'énergies autres que les énergies conventionnelles. Une des sources des énergies

renouvelables est l'énergie photovoltaïque qui devient une exigence pour pouvoir assurer le besoin en termes d'énergie électrique avec une source inépuisable.

### **I.7. Le développement de la filiale photovoltaïque en Algérie :**

Le développement du photovoltaïque en Algérie a connu plusieurs étapes selon les objectifs fixés par l'état. Pour la période 2014-2020, il est prévu la construction d'une usine de fabrication de silicium. Par ailleurs, il est attendu qu'un réseau de sous-traitance nationale soit mis en place pour la fabrication des onduleurs, des batteries, des transformateurs, des câbles et ces autre équipements entrant dans la construction d'une centrale photovoltaïque. Dans la période 2021-2030, objectif est d'atteindre un taux d'intégration supérieur à 80%. C'est pourquoi, la capacité de production des modules photovoltaïques devrait être étendue pour atteindre les 200MWC/an. Cette période serait marquée par le développement d'un réseau nationale pour la fabrication des équipements photovoltaïques. [12]

#### **I.7.1 Quelques réalisations photovoltaïques en Algérie :**

- **Le photovoltaïque dans le secteur étatique :**
  - **Unité de développement des équipements solaires (L'UDES) : [13]**

Le siège de l'UDES est localisé à 40Km à l'ouest d'Alger, le tableau ci-dessous nous montre quelques projets réalisés par l'UDES dans l'installation des panneaux solaire photovoltaïque.

Table (I.2) : Quelques projets photovoltaïques réalisés par l'UDES. [13]

ORGANISME	TYPE	PUISSANCE
CRND	Installation de dix neuf (19) systèmes d'éclairage public par énergie photovoltaïque	2,09 KWc
CDTA	Installation de vingt six (26) systèmes d'éclairage public par énergie photovoltaïque	2,86 KWc
NAFTAL	Installation de vingt deux (22) systèmes d'éclairage public par énergie photovoltaïque et l'alimentation électrique de deux (02) volucompteurs en énergie solaire	7,22 KWc
MDN	Alimentation par énergie photovoltaïque d'une cabine de cuisson tractable	0,7 KWc
Hôpital militaire de Ain naadja	Installation d'un (01) système d'éclairage public par énergie photovoltaïque	0,11KWc
ALGERIE TELECOM	Alimentation d'un relais de transmissions par énergie photovoltaïque	4,2 KWc
MESRS	Installation de quarante (40) systèmes d'éclairage public par énergie photovoltaïque	4,4 KWc
Postes de surveillance routières et unités de la Gendarmerie Nationale	Installation de systèmes d'éclairage public et alimentation des cabines <sup>10</sup>	07 KWc
Ecole Nationale Supérieure de l'hydraulique	Installation d'un (01) système d'éclairage public par énergie photovoltaïque	0,11KWc
Université de Boumerdes	Installation de (02) deux kits d'éclairage par énergie photovoltaïque	0,33KWc
Complexe Touristique (Djenan ETAKAFA)	Installation de douze (12) systèmes d'éclairage public par énergie photovoltaïque	1,32 KWc
AFSI BOUCHAOUI Gendarmerie Nationale	Installation de vingt (20) systèmes d'éclairage public par énergie photovoltaïque	2,2 KWc
Station de Veille de l'Atmosphère Globale (ONM) Assekrem W-	Installation d'une mini-centrale solaire photovoltaïque pour l'alimentation électrique des équipements de mesure	05 KWc
Tamarasset		
Direction des Mines et de L'Industrie : Gara-Djebilet (Wilaya de Tindouf)	Installation d'une mini-centrale solaire photovoltaïque pour l'alimentation électrique des maisons et l'éclairage extérieur	09 KWc
Ministère de la Défense Nationale	Fourniture de 21 systèmes photovoltaïques de 750 Wc pour l'alimentation électrique des appareils de transmissions	15,75 KWc
Commandement de la Gendarmerie Nationale	Fourniture de 189 systèmes photovoltaïques de 750 Wc pour l'alimentation électrique des équipements de transmissions	141,75 KWc

- **Le projet de Rouïba Eclairage :**

L'usine de Rouïba est le plus grand projet dans le continent d'Afrique dans la production des panneaux solaire photovoltaïque.



**Figure(I.11) :L'usine de Rouïba Eclairage. [14]**

- **Le photovoltaïque dans le secteur privé :**

- **La société Aurès solaire :**

Aurès solaire est une société de fabrication de panneaux solaires photovoltaïque d'une nouvelle génération avec une capacité de 25MW. Cette société est installée dans la zone industrielle d'Ain Yagout de la wilaya de Batna.



Figure(I.12) : Aurès solaire. [15]



Figure (I.13) : La ligne d'assemblage dans l'usine Aurès Solaire. [16]

- **L'usine Condor Electronics pour la production des panneaux solaires photovoltaïque :**

Condor électronique a procédé au lancement de la construction de son usine de panneaux solaire photovoltaïque, cette usine est implantée dans la wilaya de Bordj Bou-Arredj et annonce aussi la réalisation prochaine d'un autre complexe destiné à produire des composants photovoltaïque.

L'usine est implantée dans la zone industrielle de Bordj Bou-Arredj, sur une superficie de  $5584\text{m}^2$  et avec un effectif de 200 personnes. La capacité nominale de production est de 50MW par an. [17]



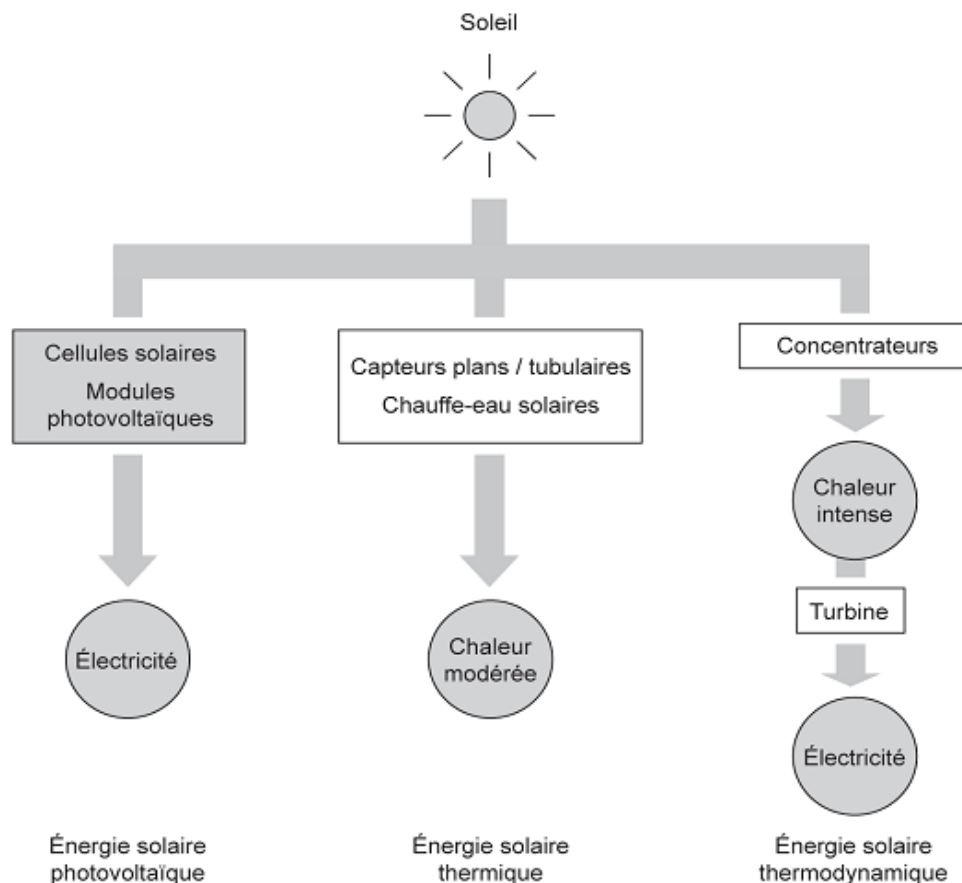
**Figure(I.14)** : Unité d'assemblage dans l'usine de condor électronique. [14]



**Figure(I.15)** : L'usine de condor électronique. [14]

## I.8. Les différentes technologies de la conversion de l'énergie solaire :

La conversion de L'énergie solaire en électricité peut être réalisée par trois technologies principales illustrées par le schéma ci-dessous :



**Figure (I.16) :** Différents types d'exploitation d'énergie solaire. [18]

### I.8.1. Solaire à concentration thermodynamique [5] :

Le solaire à concentration thermodynamique est une technologie qui utilise des miroirs qui concentrent l'énergie solaire vers un tube contenant un fluide caloporteur qui chauffe jusqu'à une température pouvant atteindre 500°C.

La chaleur obtenue est transférée à un circuit d'eau, la vapeur alors produite actionne une turbine couplée à un alternateur qui produit de l'électricité. L'un des grands avantages de cette technologie provient du fait que la chaleur peut être stockée, permettant ainsi aux centrales solaires de produire de l'électricité pendant la nuit.. Les miroirs qui collectent l'énergie solaire (placés à 3 ou 4 mètres du sol) forment une zone d'ombre sur le

sol, cependant il arrive suffisamment de lumière pour cultiver des fruits ou des légumes. Une partie de l'eau douce formée sur place par condensation en sortie de la turbine peut être utilisée pour l'arrosage.



*Capteurs thermodynamique cylindro-paraboliques*



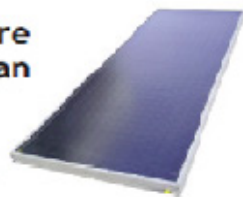
*Capteurs thermodynamique paraboliques*

**Figure (I.17) :** Types de capteur pour concentration thermodynamique.

### **I.8.2. Solaire thermique [5] :**

Le principe de l'énergie thermique consiste à transformer le rayonnement solaire en énergie thermique grâce à un fluide qui circule dans des panneaux exposés au soleil, figure(I.18). Cette forme de conversion d'énergie peut être directe si on veut uniquement chauffer de l'eau sanitaire. Par contre, si on veut générer de l'électricité, il faudra utiliser des générateurs qui convertissent l'énergie thermique générée en électricité (par exemple, moteurs à air chaud).

**Capteur solaire thermique plan**



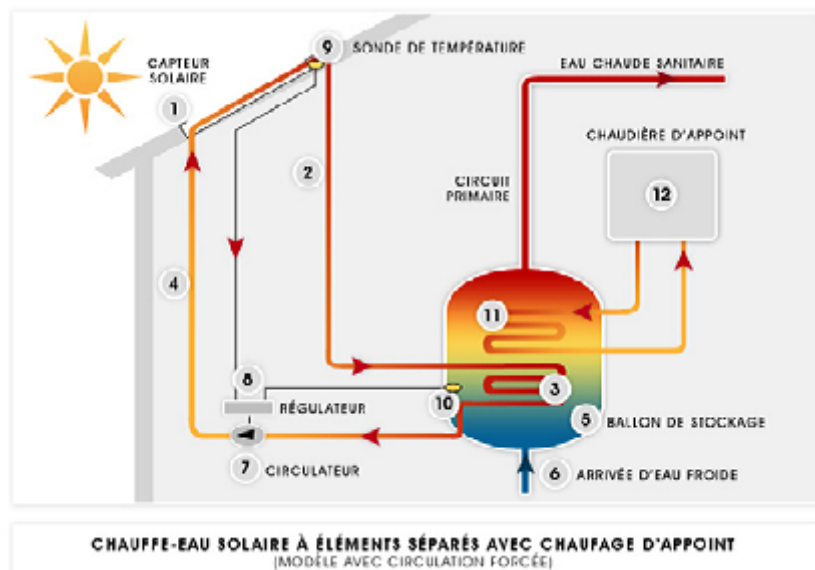
**Capteur solaire thermique**



**Figure (I.18) :** Types de capteur thermique.

Le principe de fonctionnement de l'énergie solaire thermique est montré dans la figure (I.19), le rayon solaire traverse une plaque de verre transparente où les rayons lumineux seront alors absorbés après avoir passé la plaque de verre, par une plaque de métal noir qui absorbera environ 80 à 90% des rayons solaires. Puis, la chaleur ainsi générée est

transmise à un circuit d'eau qui alimente un circuit secondaire qui alimente une habitation en eau sanitaire ou en chauffage.



**Figure(I.19)** : Principe de fonctionnement de capteur solaire thermique.

L'énergie thermique utilise la chaleur du rayonnement solaire pour le chauffage de bâtiments ou de l'eau sanitaire. Pour cette dernière il est intéressant de savoir que dans certains pays le chauffage d'eau sanitaire représente environ 20% des dépenses énergétique d'un foyer et que l'énergie solaire thermique peut subvenir à environ 80% de cette dépense énergétique .

### **I.8.3. La cheminée (tour) solaire [19] :**

Le fonctionnement de la tour solaire se base sur un principe simple : l'air chaud étant plus léger que l'air froid, il s'élève par convection naturelle. Une serre gigantesque, (collecteur) placée tout autour de la cheminée centrale, chauffe l'air grâce au soleil et provoque un vent puissant exploité par des turbines situées à l'embouchure de la cheminée pour produire de l'électricité. Pour obtenir un fonctionnement plus régulier, favorable aussi bien sur le plan technique (pour les turbines) que pour le consommateur d'énergie, des systèmes d'accumulation de chaleur sont prévus, pour rendre le système opérationnel quasiment 24 heures sur 24.



**Figure (I.20)** : Prototype de 195m de hauteur à Manzanares en Espagne.

Le premier à avoir publié sur la conversion d'énergie par convection est l'anglais Alfred Rosling Bennett, qui a publié un brevet sur ce principe en 1897. Un modèle, construit en 1919 (par Albert H. Holmes & Son, Londres), est exposé au Science Museum de Londres. Le colonel espagnol Isidore Cabanyes a conçu le premier prototype en 1903 et la première centrale a été construite en Espagne (Manzanares) par l'ingénieur allemand Jörg Schlaich en 1981.

#### **I.8.4. Le solaire photovoltaïque :**

L'énergie solaire photovoltaïque est l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire dans une cellule photovoltaïque. Les cellules photovoltaïques sont fabriquées à partir de matériaux semi-conducteurs, comme le silicium, produits à partir d'une matière première de très grande pureté.



**Figure(I.21)** : La centrale photovoltaïque de Birr Rebaa a Ouargla de 10 mégawatts. [20]

### **I.9. Le silicium [21] :**

Les semi-conducteurs sont classés selon leur composition chimique, il y a des semi-conducteurs élémentaires tels que le diamant (C), le silicium (Si), le germanium (Ge) qui appartiennent tous au groupe IV du tableau périodique.

Il existe également des semi-conducteurs composites, binaires, ternaires, quaternaires, voire quinaires, respectivement constitués de deux, trois, quatre ou cinq espèces chimiques différentes.

Le silicium est un élément métallique pur de couleur gris foncé avec des reflets métalliques bleutés. Élément de la série chimique des métalloïdes, du groupe des cristallogènes dans le Tableau périodique des éléments.

Terme créé par l'Anglais Sir Humphry Davy, en 1808, à partir du mot silica, silice, oxyde de silicium. On peut aussi combiner deux différents groupes semi-conducteurs IV pour obtenir un matériau composé tel que le SiC (carbure de silicium). Élément chimique de numéro atomique 14, de masse atomique 28,086.

- Table périodique des éléments chimiques. [18]

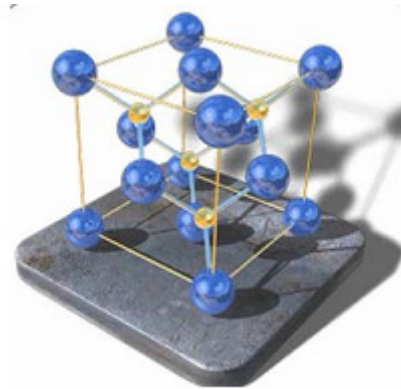
Tableau périodique des éléments chimiques. Le silicium (Si) est entouré d'un cercle rouge.

Après l'oxygène, c'est l'élément le plus abondant dans la croûte terrestre. Le silicium sur Terre se trouve essentiellement sous forme minérale, il forme avec le quartz et les silicates, plus de 90 % de la croûte terrestre. Le silicium a été isolé pour la première fois en 1823 par Jöns Jacob Berzelius, son utilisation dans l'industrie est variée, par exemple :

- Verrière, le verre est fabriqué depuis la protohistoire à partir de la silice
- Composant des céramiques
- Composants électroniques, pour ses propriétés de semi-conducteur
- Synthèse des silicones (environ 40 % de la consommation)
- Semi-conducteur, pour la fabrication de cellules solaires photovoltaïques

### I.9.1. Point de vue cristallographique:

Le silicium est un élément tétravalent, sa structure cristalline est du type cubique diamant, son paramètre de maille est  $a=5.43 \text{ \AA}$ . Il a  $4,96 \cdot 10^{22}$  atomes par centimètre cube. Le caractère localisé des liaisons covalentes fait que le Si peut être isolant à l'état parfait, il est bien connu également comme conducteur. Le caractère isolant du silicium fait qu'il ne présente pas de couplage électromagnétique à température ambiante. [22]



**Figure(I.22)** : Le réseau cubique diamant CFC.

### **I.9.2. Le silicium dans la nature :**

On obtient le silicium à partir de la silice que l'on trouve notamment dans le sable Figure (I. 23) et le quartz Figure (I. 24). La silice, dont le nom chimique est « dioxyde de silicium », est un assemblage d'un atome de silicium et de deux atomes d'oxygène ( $\text{SiO}_2$ ). Le raffinage du silicium consiste à séparer ces atomes dans un four, étape fortement consommatrice d'énergie. Elle permet d'obtenir du silicium liquide qualifié de « métallurgique ».



**Figure (I. 23)** : Sable hollandais (grains 0,2 à 0,6 mm). [23]



**Figure (I. 24) :** Quartz de la mine de La Gardette, Bourg d'Oisans, Isère, France. [24]

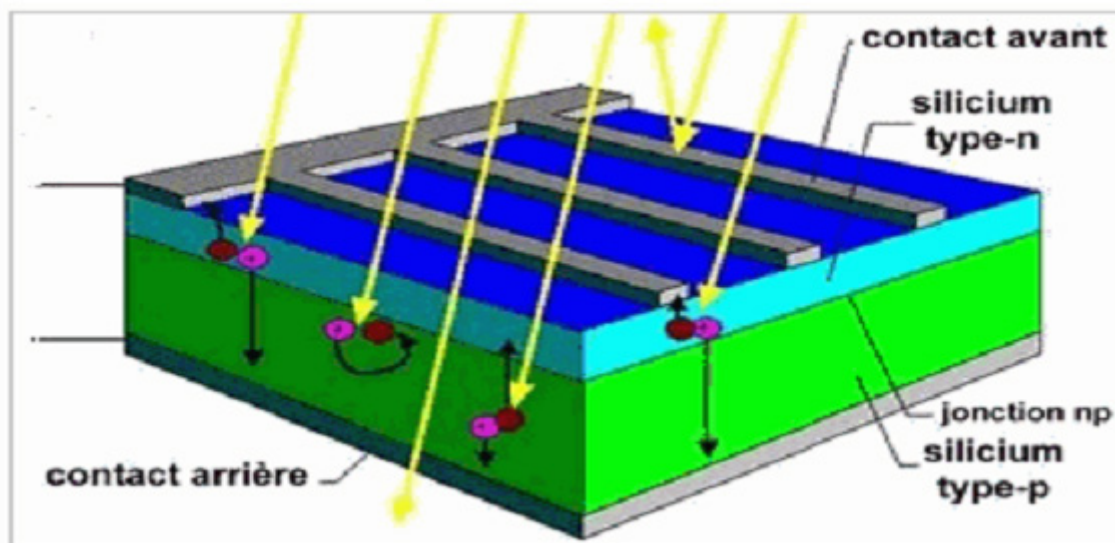
Aujourd'hui, plus de 99% des équipements photovoltaïques utilisent le silicium comme matériau de base. Ce dernier se présente sous différentes formes, les plus répandues étant le silicium monocristallin, le silicium poly cristallin et le silicium amorphe. Le silicium offre de nombreux avantages. Présent en abondance dans la croûte terrestre c'est un matériau non toxique. Outre ses propriétés semi-conductrices, le silicium présente un oxyde naturel  $\text{SiO}_2$  qui trouve de nombreuses applications en microélectronique.[25] Enfin, il est aisé de modifier les propriétés électriques du silicium en introduisant dans la matrice cristalline des atomes dopants tels que le bore ou le phosphore.

**Table (I.3) :** Propriétés physiques et thermiques du silicium. [26]

Propriété physique	Numéro atomique	Poids atomique (u.a)	Rayon atomique (nm)	Emissivité à 300 K	Densité à 293K ( $\text{kg.m}^{-3}$ )	Gap à 300K (eV)
	14	28,0855	0,117	0,58	2329	1,12
Propriétés thermique	Température °C		Chaleur spécifique ( $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ )		Chaleur latente (kJ/kg)	
	Fusion	Ebullition	25°C	1414°C	Fusion	vaporisation
	1414	3265	700	1000	1800	13700

### I.9.3. Le silicium comme semi-conducteur:

Il existe plusieurs matériaux connus comme semi-conducteurs comme par exemple le germanium Ge, l'étain Sn et le silicium qui sont des éléments de la colonne IV de la table périodique dont les propriétés physique comme la conductivité peuvent être contrôlées par l'insertion des impuretés au sein de la structure cristallographique, ce procédé est appelé dopage. Un semi-conducteur est un matériau qui a les caractéristiques électriques d'un isolant, mais pour lequel la probabilité qu'un électron puisse contribuer à un courant électrique, quoique faible, est suffisamment importante.



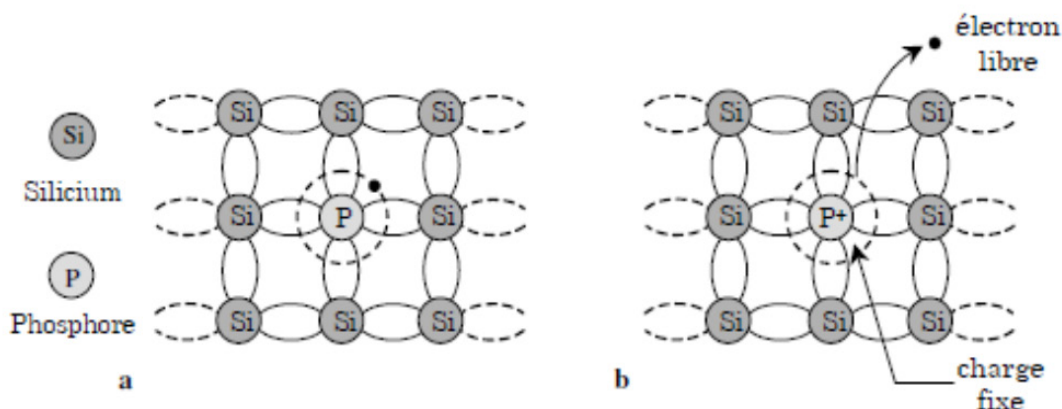
Figure(I.25) : Mouvements électrons-trous dans un matériau semi-conducteur [27]

### I.10. Le dopage [28] :

Le dopage est une méthode qui permet de modifier la conductivité du silicium. Cela consiste à introduire des impuretés dans un cristal intrinsèque dans le but de modifier ces propriétés électriques. Le Semi-conducteur dopé est appelé « semi-conducteur extrinsèque ». Il existe deux types de dopage :

- **Dopage de type N**

Le dopage de type N consiste à augmenter la densité en électrons dans le semi-conducteur. Pour ce faire, on inclut un certain nombre d'atomes riches en électrons dans le semi-conducteur. Par exemple, dans le cas du silicium (Si) on inclut un atome ayant cinq électrons de valence, comme ceux de la colonne V de la table périodique comme le phosphore (P) par exemple.

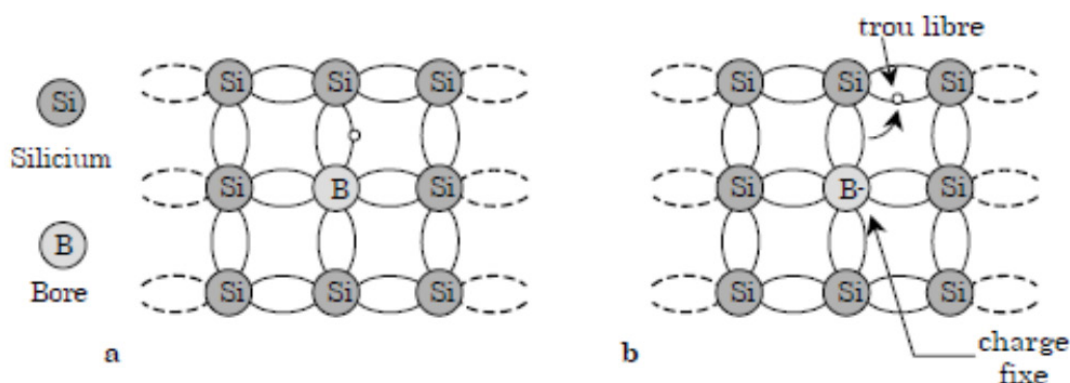


**Figure (I.26)** : Silicium dopé au phosphore : a.  $T=0K$ , b.  $T\neq 0K$ . [29]

On remplace un atome de Silicium par un atome pentavalent. Quatre d'entre eux assurent les liaisons avec les atomes voisins de silicium et le cinquième reste disponible va être excité vers la bande de conduction très facilement par l'agitation thermique. D'où le nombre d'électron libre qui va fortement augmenter, dans ce cas le nombre de trou est très inférieur au nombre d'électron libre on obtient ainsi un cristal dopé N (négatif).

- **Dopage de type P**

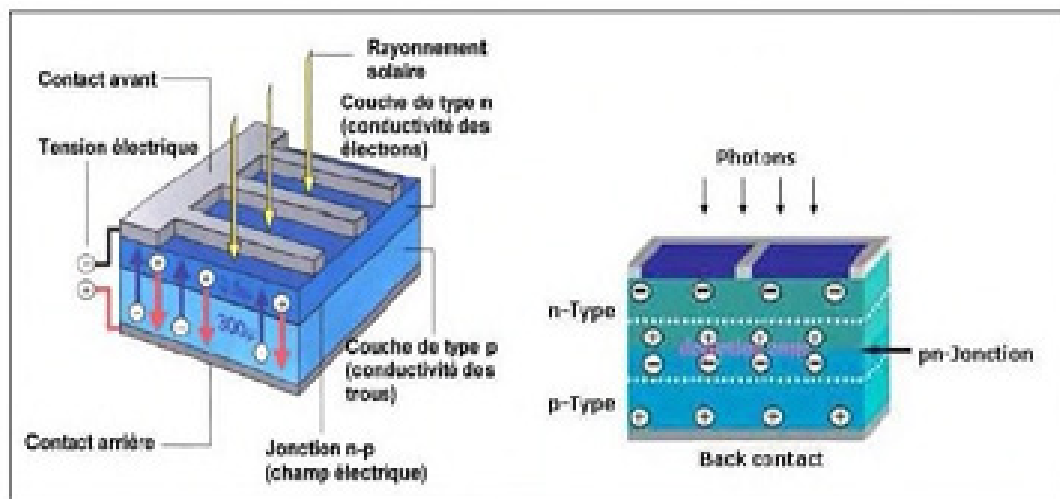
Le dopage de type P consiste à augmenter la densité en trous dans le semi-conducteur en incluant un certain nombre d'atomes pauvres en électrons dans le semi-conducteur afin de créer un excès de trous. Dans l'exemple du silicium, on inclura un atome trivalent (colonne III du tableau périodique), généralement un atome de Bore.



**Figure (I.27)** : Silicium dopé au Bore : a.  $T=0K$ , b.  $T\neq 0K$ . [29]

- **La jonction (P-N) :**

Les paires électron-trou qui sont créées dans la zone de charge dans de la jonction sont immédiatement séparées par le champ électrique qui règne dans cette région, et entraîné dans les zones neutres de chaque côté de la jonction. Si le dispositif est isolé, il apparaît une différence de potentiel aux bornes de la jonction et s'il est connecté à une charge électrique extérieure, on observe le passage d'un courant alors qu'on n'applique aucune tension au dispositif. C'est le principe de base d'une cellule photovoltaïque. [30]

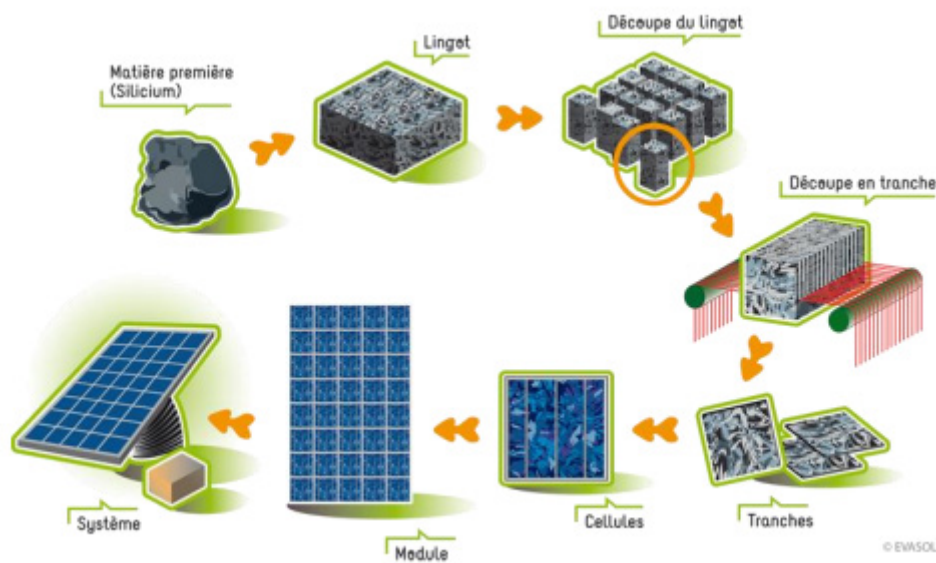


**Figure(I.28) :** Jonction P-N dans une cellule photovoltaïque.

### **I.11. Les différentes étapes pour les fabrications des cellules solaires :**

Pour fabriquer un système photovoltaïque il faut passer par plusieurs étapes qui sont vraiment nécessaires en commençant par l'élaboration du silicium et en arrivant finalement à l'assemblage et le montage des systèmes photovoltaïques.

- Etape 1 : Elaboration du silicium de grade solaire à partir du silicium métallurgique, lui-même obtenu à partir de quartz.
- Etape 2 : Cristallisation de ce silicium solaire pour former des cellules.
- Etape 3 : Transformation de ces cellules en silicium cristallisé en composant actif pour devenir une cellule photovoltaïque.
- Etape 4 : Assemblage des cellules photovoltaïques en module photovoltaïque.
- Etape 5 : Groupement de plusieurs modules pour réaliser un système photovoltaïque.



**Figure(I.29) :** La chaîne de fabrication des modules photovoltaïques [31]

### I.12. Principe de fonctionnement d'une cellule solaire:

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité. La cellule photovoltaïque est fabriquée à partir de deux couches de Silicium:

- Une couche possédant un excès d'électrons (zone N).
- Une couche possédant un déficit en électrons (zone P).

Lorsqu'un photon arrive, son énergie crée une rupture entre un atome de silicium et un électron, modifiant les charges électriques. C'est ce qu'on appelle l'effet photovoltaïque, les atomes, chargés positivement, vont alors dans la zone P et les électrons, chargés négativement, dans la zone N, une tension électrique est ainsi créée.

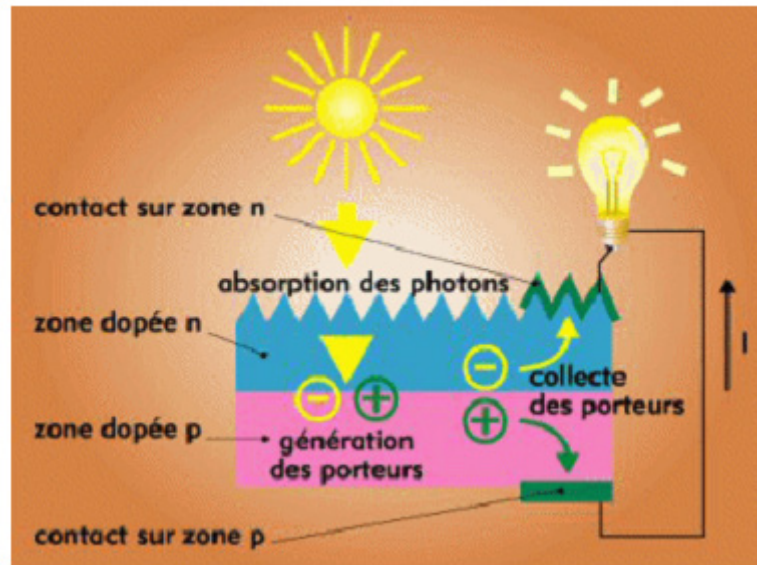


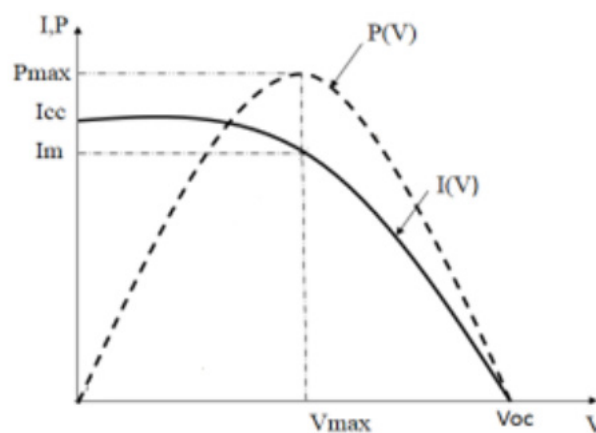
Figure (I.30) : Schéma du principe de fonctionnement d'une photopile. [32]

### I.12.1 Le rendement d'une cellule PV:

Le rendement  $\eta$  de la cellule solaire exprimé en pourcentage, désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente  $P_{inc}$ .

$$\eta = P_{max}/P_{inc} = FF I_{cc} V_{oc} / P_{inc}$$

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert (figure I.31).



Figure(I.31) : Caractéristiques I(V) et P(V) d'une cellule solaire.

### I.12.2 Les différents types de silicium:

La technologie photovoltaïque se distingue par la nature du silicium qui se divise en trois catégories :

- **Si Monocristallin :**

Le silicium à l'état brut est fondu pour utilisant des méthodes bien connues pour donner un barreau (biellette). Le refroidissement du silicium doit être très lent et maîtrisé pour obtenir un monocristal. Il est cependant plus efficace que les autres types de silicium car son rendement peut atteindre les 20% son procédé d'élaboration est très couteux.



**Figure(I.32) :** Lingot de silicium monocristallin.

- **Si polycristallin :**

Le silicium polycristallin se caractérise par son procédé d'élaboration et de production en masse avec une vitesse de refroidissement moins lente que celle du monocristallin. L'avantage des cellules à base de silicium polycristallin par rapport au silicium monocristallin est moins coûteux et son rendement est d'environ 15%.



**Figure(I.33) :** Lingot de silicium polycristallin.

- **Si amorphe:**

Le silicium amorphe a des coûts de fabrication bien inférieurs à ceux du silicium cristallin. Les atomes ou molécules qui constituent un matériau amorphe sont disposés aléatoirement les uns par rapport aux autres. La position relative des molécules ou atomes voisins est imposée par la nature des liaisons assurant la cohésion du solide. Les cellules amorphes sont utilisées partout où une alternative économique est recherchée et quand très peu d'électricité est nécessaire (alimentation des montres, calculatrices...). Elles sont également souvent utilisées là où un fort échauffement des modules est à prévoir. Cependant, le rendement est plus faible que celui du silicium cristallin autour de 11 % et nécessite donc plus de surface pour la même puissance installée.



**Figure (I.34) :** Le silicium amorphe.

### **I.12.3. Les paramètres affectants le rendement :**

Les principaux facteurs affectants le rendement des cellules photovoltaïques sont liés à la qualité du silicium utilisé, notamment à la présence d'impuretés et de défauts à la surface ou dans le volume du matériau.

- **Les impuretés :**

Les impuretés peuvent être classées selon deux catégories dans le silicium dédié à la conversion photovoltaïque : les dopants et les contaminants. Les dopants sont des éléments introduits intentionnellement pour moduler la conductivité électrique du silicium. Cependant, la concentration en dopants est limitée à une valeur de  $10^{16}$  à  $10^{17}$  atomes/cm<sup>3</sup>, à partir de laquelle le temps de vie des porteurs minoritaires diminue d'une façon très brusque. C'est pour cette raison que leur concentration dans le silicium doit être parfaitement contrôlée pour ne pas dégrader le rendement de la cellule photovoltaïque. La contamination du silicium peut se produire pendant son élaboration.

- **Défauts cristallins :**

Les défauts cristallins se forment au cours de l'étape de cristallisation des lingots de silicium. Ils ont eux aussi une influence très néfaste quant à la conversion photovoltaïque. Les défauts engendrent notamment des niveaux d'énergie supplémentaires dans la bande interdite, ce qui conduit à une augmentation de la recombinaison des porteurs minoritaires et donc une dégradation des propriétés photovoltaïques du silicium.

Le nombre de défauts a donc une incidence importante sur le rendement photovoltaïque. Ces défauts peuvent être classés en différentes catégories selon leur géométrie mais sont principalement sous forme de dislocations et de joints de grains.

- **Défauts ponctuels :**

Ils se présentent comme un écart localisé à la périodicité de la matrice cristalline. Les défauts ponctuels peuvent par exemple être des atomes d'impuretés, des lacunes ou des interstitiels. Ces défauts sont susceptibles de s'associer pour former des défauts ponctuels complexes, paires de lacunes.

Le rendement du silicium dépend principalement de ces défauts qui surgissent lors de l'élaboration du silicium par les différents procédés. Plusieurs types de procédés sont utilisés pour la cristallisation du silicium qui est catégorisés selon le produit final obtenu après élaboration.

### **I.13. Revue bibliographique**

**G. Nouet et al. [33]** Ont utilisé le procédé de solidification unidirectionnelle du silicium polycristallin. L'originalité de leur méthode est due à l'utilisation d'un encapsulant qui agit comme une barrière entre le creuset et le bain liquide. L'analyse de la morphologie et des caractéristiques structurales, ainsi que l'analyse chimique ont permis de suivre l'influence des différents paramètres sur les propriétés photovoltaïques des cellules solaires. Leur optimisation a donné des rendements photovoltaïques de 11 %.

**Yves Boussant-Roux [34]** a participé au développement du procédé d'élaboration en creuset froid de lévitation. Cette technique peut permettre la fusion d'un alliage en quasi-lévitation pour des masses voisines du kilogramme ou alors dans une poche de fusion sans réactions physicochimiques avec le creuset. Il a aidé au dimensionnement et à la mise au point d'installations de fusion et/ou d'élaboration, en cherchant à mieux contrôler et optimiser la structure métallurgique des produits obtenus. Il a également contribué à l'amélioration des caractéristiques électromagnétiques des géométries

**Sophie PLAN SERVANT [35]** a présenté travail qui consisté à démontrer que le creuset froid peut permettre d'élaborer du silicium photovoltaïque, ce procédé a été réalisé au laboratoire EPM-Madylam. L'étude suivant deux axes. Le premier concerne la détermination

des contraintes thermiques qui provoquent la fissuration des billettes et la seconde l'étude de modèles micro/macro de solidification. La méthode d'investigation repose sur des essais sur un pilote d'échelle semi industrielle et sur une modélisation numérique du procédé.

**H. Boulechfar [36]** a réalisé une simulation numérique avec le logiciel FEMLAB du phénomène électromagnétique sans prendre en compte le couplage avec l'hydrodynamique dans la partie du dôme liquide, et comme résultat de cette application c'est l'effet de chauffage inductif pour réaliser la simulation du phénomène thermique qui donne le champ de température dans le lingot du silicium supposé axisymétrique. Le calcul du champ de contrainte dans le silicium solide se fait avec l'hypothèse d'un matériau purement élastique. Les résultats obtenus ont été comparés aux résultats d'Anderhuber qui a permis de mettre en évidence l'importance du four de recuit dans ce procédé de tirage de silicium (EMCP).

**Malek BENMANSOUR [37]** a développé et a mis au point un procédé de projection de poudres de silicium par plasma thermique inductif, afin d'élaborer des couches minces à finalité photovoltaïque. L'hydrogénation des couches de silicium a également été analysée par des mesures d'exo diffusion et corrélée avec les différents paramètres du procédé. L'analyse des propriétés du plasma d'argon faiblement hydrogéné en présence des poudres de silicium a été réalisée par spectroscopie d'émission. Les mesures ont montré la présence d'hydrogènes radicalaires hautement excités, à l'origine de la passivation des dépôts de silicium. Le diagnostic du plasma a montré que la densité et la température électronique étaient maximales au niveau de la zone d'induction. Les propriétés du plasma ont également été déterminées par modélisation numérique.

**Mourad OUDDAH [38]** a étudié les différents paramètres géométriques de la texture sur la surface éclairée des cellules photovoltaïques, pour améliorer ses performances. Il a adopté la technique électrochimique pour fabriquer le silicium poreux avec la réalisation des mesures de la réflectivité de la surface poreuse obtenue. Il a réalisé une simulation de la forme pyramidale qui a été choisie comme une forme d'une texture à étudier pour voir l'augmentation de la surface éclairée en fonction des paramètres géométriques de cette texture. Une deuxième simulation par le logiciel PC1D a été réalisée également pour analyser la texture par rapport à l'amélioration du rendement des cellules.

**Fatoumata Bintou SANTARA [39]** a présenté un dispositif expérimental de laboratoire du procédé sans tirage de silicium poly cristallin avec les différents éléments constitutifs, ainsi

que les calculs de dimensionnement thermique nécessaires aux expérimentations. Il a présenté également un travail de dimensionnement électromagnétique réalisé à travers la modélisation numérique du couplage entre l'induction et les deux charges en présence, à savoir le silicium et le graphite. Il a exposé ces études sur la ségrégation des impuretés durant la cristallisation sous brassage électromagnétique avec la modélisation numérique de la ségrégation en configurations axisymétrique et 3D.

**Anne KAMINSKI et Luc PICHON [40]** Les travaux de cette thèse concerne le procédé S'TILE pour produire les cellules photovoltaïques d'un rendement acceptable à partir d'un matériau fritté et par à une étape de recristallisation. la plaquette de silicium frittée puis recristallisée est utilisée directement pour la réalisation de cellules qui doit être recristallisée dans toute son épaisseur et doit

**Amor BENMEDDOUR [41]** Ce travail concerne l'étude et les simulations numériques des contraintes thermomécaniques dans le silicium photovoltaïque élaboré par le procédé de tirage Czochralski. Le modèle numérique bidimensionnel de l'écoulement du fluide et de transfert de chaleur avec solidification développé est basé sur le modèle FEMLAB, nous avons pu simuler le champ de température pendant la croissance du cristal. L'influence de différents paramètres, tel que la longueur du lingot de silicium, la vitesse de tirage, la rotation du cristal et celle du creuset sur la forme de l'interface solide / liquide et la répartition des contraintes thermiques dans le silicium. Une optimisation des paramètres du processus Czochralski pour obtenir un état de contrainte minimale a été établie.

**M. ELIEZER Nir [42]** a mis au point une technique d'analyse multi élémentaire de silicium solide de différentes qualités (métallurgique à solaire). Une étude préalable a été menée pour choisir les différents composants du système. Après avoir validé la répétabilité de la mesure, et les conditions environnementales optimales de mesure, l'identification de différentes impuretés métalliques, non-métalliques et dopantes a été réalisée. Une attention particulière a été portée au cas du bore dopant essentiel au bon fonctionnement des cellules photovoltaïques. La LIBS a pu être mise en pratique sur des échantillons issus de différents procédés de tirage (4C et solidification dirigée) et leur a permis de suivre la ségrégation des différentes impuretés le long d'un lingot de silicium. Ils ont validé les mesures LIBS par comparaison à la GDMS et l'ICP, et corrélé la baisse de durée de vie des porteurs de charge à la présence de certaines impuretés.

**Huang Feng et al [43]** a mis au point une nouvelle méthode de solidification basée sur la technologie du creuset utilisée pour la production des lingots de silicium, cette méthode a pour but d'éviter la contamination du creuset. Un lingot de silicium à section transversale carrée a été solidifié directionnellement avec un creuset froid. En raison de la chaleur induite libérée dans la couche de surface et du contact incomplet entre creuset et la matière en fusion.

**Zabardjade SAIDBACAR [44]** L'objectif de ce travail de thèse est l'élaboration du silicium poly cristallin en phase liquide sur substrat de verre borosilicate, en utilisant l'irradiation par laser continu de forte puissance d'un film de silicium amorphe. Des simulations numériques modélisant l'interaction laser silicium amorphe ont été effectuées grâce à un modèle développé sur l'outil COMSOL. Il a étudié également les propriétés structurales et morphologiques de films Si poly cristallin obtenus par l'irradiation laser de films Si amorphe. La simulation réalisée montre que la croissance des cristallites de silicium s'opère par épitaxie à partir d'un effet de gradient thermique latéral et longitudinal.

**Mailys GRAU [45]** a utilisé le procédé d'épitaxie de silicium pour fabriquer des cellules minces. Le premier axe de la thèse est la fabrication de cellules solaires et leur optimisation sur des substrats de référence monocristallins. Dans ce cadre, de nombreuses voies ont été explorées : l'utilisation de réflecteurs de Bragg en silicium poreux, l'optimisation du dopage de l'émetteur, la formation de gradients de dopage dans la base et l'utilisation de structures à émetteur en face arrière. Ces études ont permis d'évaluer le potentiel de ces différentes voies ; des résultats prometteurs pour l'amélioration du rendement de conversion des cellules sur couches minces ont été obtenus. Le second axe de la thèse est la fabrication de cellules sur les substrats frittés préparés par S'TILE et l'application des moyens développés dans le cadre du premier axe pour améliorer ces cellules. Les rendements encourageants obtenus ont ainsi démontré la faisabilité de cellules solaires sur les substrats réalisés par le procédé de frittage à bas coût développé par la société S'TILE.

**Mohamed NEKOUS [46]** a eu pour objectif d'élaborer le silicium à partir du sable de désert Algérien. Pour cela, il a choisi le sable de régions Saida-Adrar-Laghouat. Il a réalisé un travail expérimental au laboratoire où il a commencé par la purification chimique du sable avec méthode de la fusion alcaline. L'analyse chimique du sable avant et après faite au niveau de l'ENAVA (société de verre) pour la réduction de la silice avec le carbone il a utilisé le four à arc à 1400°C.

**Amina TANDJAOUI [47]** a étudié in-situ et en temps réel la structure de grains du silicium multi cristallin issue de la solidification dirigée en utilisant l'imagerie X synchrotron. La radiographie X permet de suivre l'évolution de l'interface solide/liquide et de caractériser sa dynamique et sa morphologie. La topographie X donne des informations sur la structure de grains formée, les contraintes et les défauts issus de la solidification. Il a montré également l'importance la préparation de l'état initial de la solidification en particulier pour les expériences de reprise sur germe. L'analyse de la morphologie de l'interface solide/liquide a permis de caractériser la surfusion cinétique du front de solidification, de comprendre l'évolution des sillons de joints de grains et d'analyser les mécanismes de compétition de grains ainsi que de révéler l'impact des impuretés sur la structure de grains formée à l'issue de la solidification. Le phénomène de maclage a aussi été observé dans ces expériences ou il a démontré que les macles dans le silicium multi cristallin peuvent être des macles de croissance. Deux types de macles ont été identifiés et le phénomène de compétition de grains en présence de macles étudié.

**P. Bellanger et al [48]** Le but de ce travail est de décrire le procédé CRYSTALSI qui vise à former des films de silicium polycristallin grâce à la cristallisation thermique de la couche de silicium amorphe déposée sur des substrats à base d'aluminium qui sont utilisés comme catalyseur pour la cristallisation du silicium mais également comme contact arrière en métal et réflecteur pour cellules solaires photovoltaïque. Deux types de substrats en aluminium ont été appliqués dans ces études : un substrat en aluminium pur (Pureté de 99,7%) et un substrat d'aluminium riche en silicium contenant environ 12% de silicium. Épaisseurs de silicium entre. Les films de silicium cristallisé ont ensuite été caractérisés par spectroscopie.

# CHAPITRE II

---

## **Les procédés d'élaboration du silicium photovoltaïque**

Il existe plusieurs procédés d'élaboration du silicium pour son utilisation dans la fabrication des cellules photovoltaïque, ces procédés se distinguent selon le type du silicium et nous allons voir quelques procédés pour le silicium amorphe, monocristallin et polycristallin.

### **II.1. Techniques pour élaboration du Si amorphe [49] :**

Il s'agit d'un silicium fixé en couches minces de quelques microns seulement, sur un support en verre ou en matière synthétique. Avec cette technologie, le silicium est produit directement à partir du gaz silane ( $\text{Si H}_4$ ). Les plaques de verre ou bien les supports synthétiques sont placés dans une enceinte chauffée sous vide où le gaz silane est injecté et décomposé par une décharge radiofréquence. Le silicium libéré se dépose alors sur les supports. La présence d'hydrogène (H) est également nécessaire pour la qualité du matériau (limite le nombre de défauts, en saturant les liaisons pendantes de silicium présentes à cause de la structure atomique désordonnée).

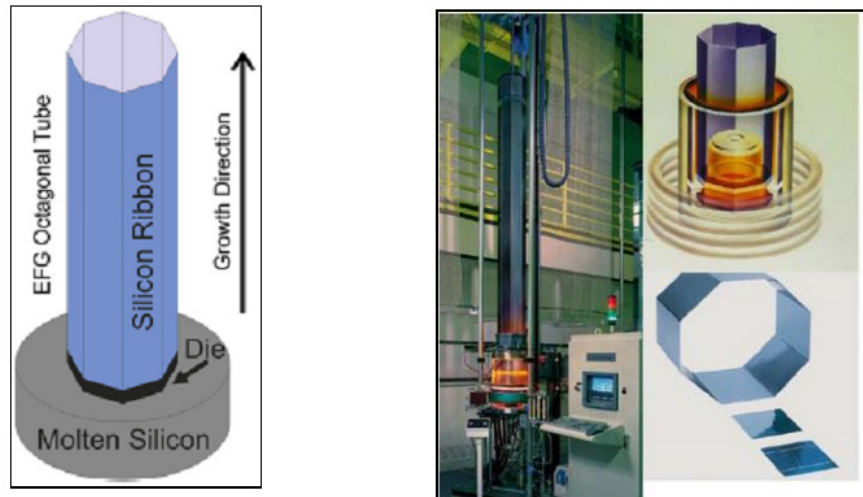
L'adjonction des dopants pour réaliser les couches p et n, est obtenue par ajout de gaz  $\text{PH}_3$  (phosphine) et  $\text{B}_2\text{H}_6$  (diborane) au silane. En pratique, le support comporte, sur la face où l'on dépose le silicium, une couche mince transparente et conductrice faite d'oxyde d'étain ( $\text{SnO}_2$ ) servant d'électrode (+). L'électrode (-) arrière est produite par un dépôt métallique sur le silicium.

#### **II.1.1. La technique RST:**

Le substrat utilisé pour cette technique est généralement du graphite ou du carbone souple qui est tiré au travers d'un bain liquide de silicium. Le principe est de cristalliser deux films de silicium sur les deux faces du carbone. Les rubans de silicium sont ensuite récupérés par brulage du graphite à haute température. Cette technique est actuellement exploitée par l'entreprise Solarforce et prend le nom de la technique RST « Ribbon on Sacrificial Template ». Les grains formés sont caractéristiques de la procédure de croissance et sont généralement colonnaire et allongés, dans le sens du tirage. Les dislocations se développent dans certains grains et leur formation doit être contrôlée pour améliorer le rendement.

### II.1.2. La technique EFG:

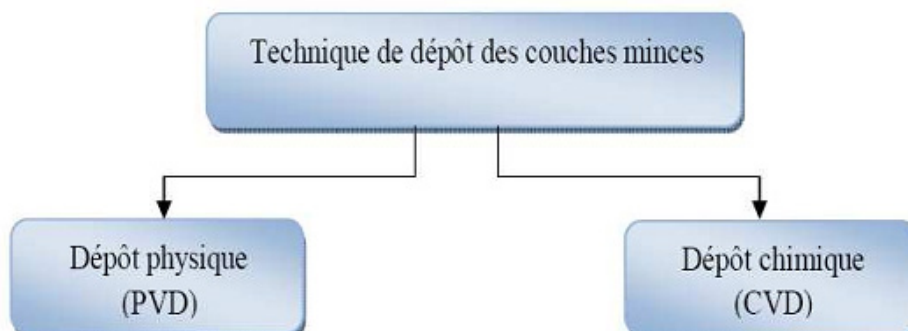
Le principe est de tirer un tube de forme octogonale à partir d'un bain de silicium fondu, le liquide est attaché par capillarité sur la surface du tube (figure II.1). Les wafers découpés à partir du produit final ont actuellement des surfaces de 125 x 125 mm<sup>2</sup>, les cellules commercialisées atteignent des rendements de 15,2 % pour une épaisseur de 200 µm.



**Figure (II.1) :** Schéma de la technique de tirage EFG de silicium en ruban et photographie du dispositif et des plaquettes obtenues.

### II.1.3. Technique de couches minces :

La technique de dépôt de couches minces se caractérise par deux principales méthodes montrées ci-dessous :



**Figure(II.2) :** Techniques de dépôt des couches minces.

- **Dépôt chimique en phase vapeur (CVD) [50] :**

Le dépôt chimique en phase vapeur consiste à mettre un composé volatile du matériau à déposer, en contact soit avec un autre gaz au voisinage de la surface à recouvrir, soit avec la surface en question, de façon à provoquer une réaction chimique donnant un composé solide. La température du substrat fournit l'énergie d'activation nécessaire pour déclencher la réaction chimique. Les principaux paramètres à contrôler lors des dépôts CVD sont : la nature et la température du substrat, la composition chimique des produits de départ, le ou les flux de gaz, la pression totale et la géométrie de la chambre de réaction. Les principaux avantages de ces techniques sont de permettre la cristallisation de films sans avoir recours à un recuit, de pouvoir contrôler la composition durant le dépôt, de réaliser un dépôt d'épaisseur et de composition uniformes possédant en plus une excellente adhérence.

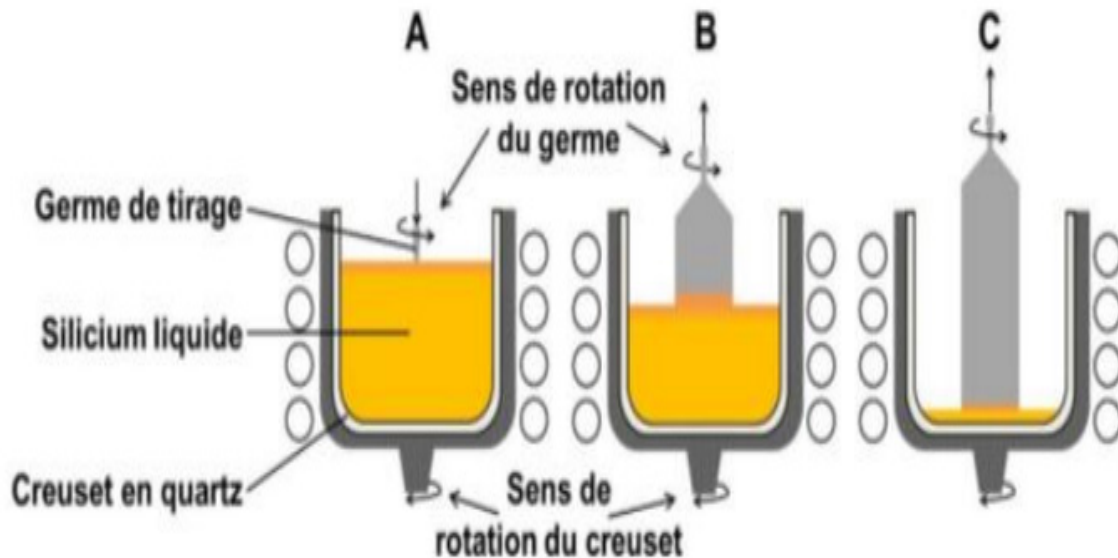
- **Dépôts physiques en phase vapeur (PVD) :**

Le dépôt en phase vapeur physique (PVD) présente beaucoup d'avantages par rapport au dépôt en phase vapeur chimique. Par exemple, les films sont denses, le processus est facile à contrôler et il n'y a pas de pollution. Les procédés par PVD regroupent principalement l'évaporation, la pulvérisation sous toutes ses formes et l'ablation laser.

## **II.2. Techniques pour élaboration du Si monocristallin :**

### **II.2.1. Elaboration du silicium par la méthode de Czochralski « CZ » [51]**

Cette méthode a été inventée par le chimiste polonais Czochralski au début du XX<sup>ème</sup> siècle. Cette technique consiste à obtenir une structure monocristalline en fondant du silicium polycristallin de haute pureté dans un creuset en quartz en rotation, placé dans un four d'étirage sous argon afin de garantir une atmosphère neutre pour éviter l'oxydation. La cristallisation se fait par contact entre le silicium fondu et un germe qui est une fraction d'un cristal préalablement obtenu.



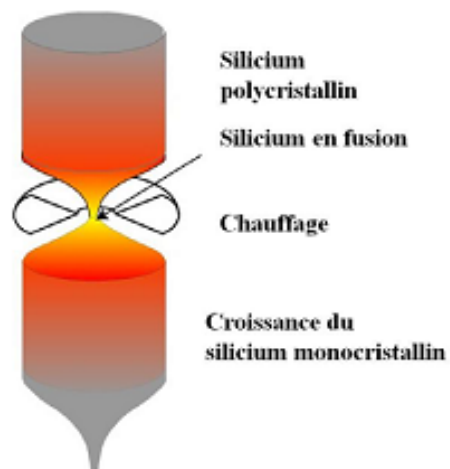
**Figure(II.3) :** Cristallisation d'un lingot par la méthode Cz.

Lorsque la température se stabilise, le bain se solidifie sur le germe qui est plus froid et qui est en mouvement de rotation inverse (Figure II.3). Ensuite on extrait le cristal formé en tirant lentement ce germe vers le haut. Ainsi, on obtient un lingot de cristaux ayant tous la même orientation cristalline et de diamètre contrôlé en modifiant la température ou la vitesse de tirage. Pour les cellules solaires, le germe est orienté  $\langle 100 \rangle$ , c'est-à-dire que le plan atomique où les atomes du cristal sont rangés est horizontal dans le but de faciliter la texturation de surface. Ce procédé permet d'obtenir un matériau ayant de bonnes propriétés électriques mais avec un coût élevé puisqu'il nécessite une longue durée de fabrication des cristaux et produit une faible quantité de silicium monocristallin.

### II.2.2. Le procédé de Fusion de Zone (FZ) [52] :

Cette technique consiste à passer plusieurs fois un barreau de silicium polycristallin dans un anneau à induction qui fait fondre localement le silicium (Figure II.4). Un germe monocristallin est placé à l'extrémité du barreau de silicium pour débiter la croissance du lingot. Le silicium monocristallin se forme du bas vers le haut, de sorte que toutes les impuretés existantes sont entraînées par ségrégation vers le haut avec la zone fondue. Le silicium monocristallin obtenu est plus purifié que celle du procédé (Cz). Le

procédé (FZ) est significativement plus cher que celui de (Cz), il n'est utilisé pour le photovoltaïque que dans des applications très particulières.



**Figure (II.4) :** Procédé de Fusion de Zone. [52]

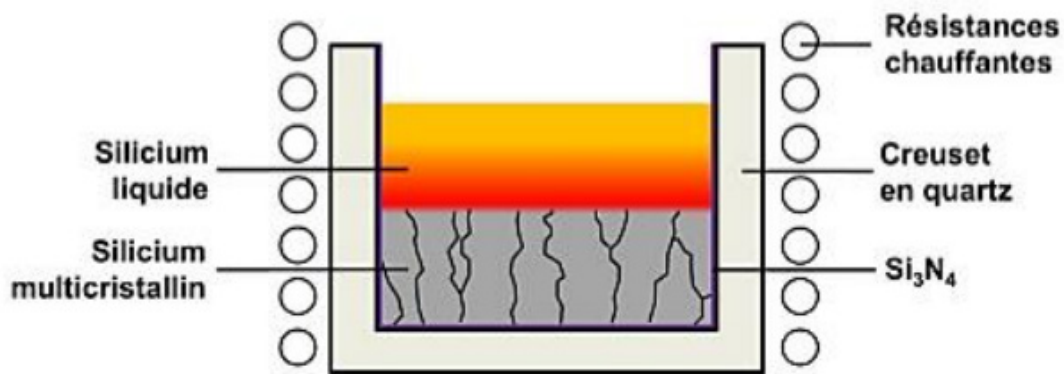


**Figure (II.5) :** Des lingots de silicium monocristallin. [53]

### **II.3. Techniques pour élaboration du Si polycristallin :**

#### **II.3.1. Procédé de croissance dirigée:**

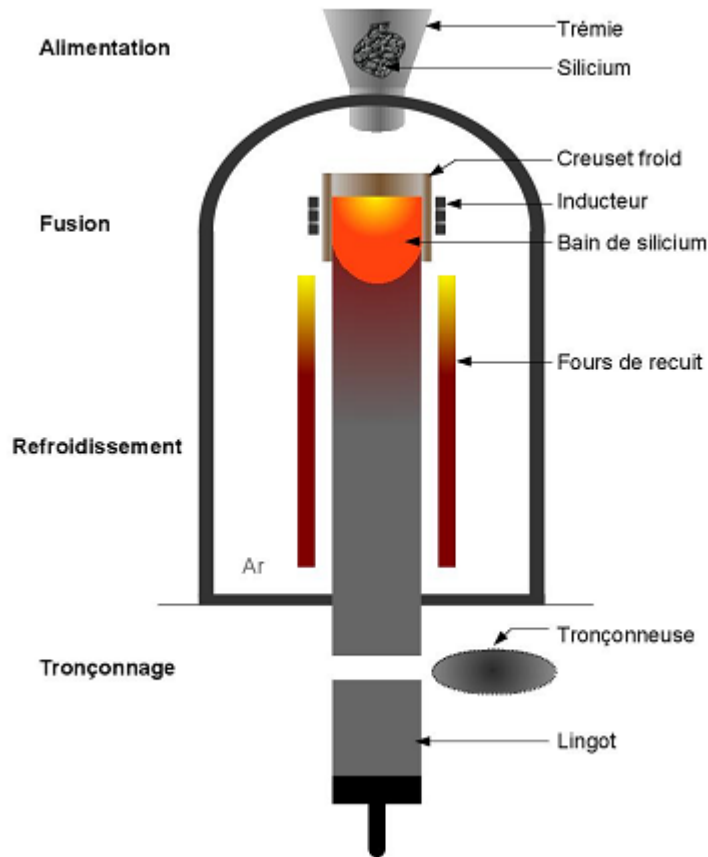
Cette technique dite également « solidification dirigée » consiste à faire fondre du silicium purifié dans un creuset en quartz recouvert d'une couche de nitrure de silicium ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) de manière à ce que la silice du quartz ne réagisse pas avec le silicium liquide. Après homogénéisation de la température du bain de silicium, le creuset se refroidit progressivement du bas vers le haut permettant ainsi la formation de polycristaux de tailles et d'orientations différentes (Figure II.6). Cette cristallisation s'avère peu coûteuse mais elle donne un matériau de qualité moyenne en raison de la présence de défauts, en particulier les joints entre les grains et les impuretés métalliques. Les lingots obtenus possèdent des propriétés plus faibles que ceux issus de la cristallisation par procédé Czochralski ou fusion de zone.



**Figure(II.6) :** Cristallisation d'un lingot polycristallin par solidification dirigée. [54]

### II.3.2. Le principe du procédé 4C exploité par EMIX:

La technologie 4C (Continuous Casting in Cold Crucible) est basée sur la fusion du silicium par induction dans un creuset froid. Le principe de la technique est représenté sur la figure (II.7). Le silicium sous forme de grains est chargé dans deux trémies situées au-dessus de l'enceinte, le silicium est introduit en continu par le haut du four. Il est maintenu en fusion par un inducteur placé autour du creuset en cuivre, refroidi par un circuit d'eau afin d'éviter la montée en température du cuivre, qui permet la mise en forme de la colonne. La colonne descend dans le four grâce à un système de tirage. Lorsque le silicium liquide passe sous le niveau de l'inducteur, le couplage électromagnétique ne s'effectue plus et le silicium se solidifie brutalement en se rapprochant des parois froides du creuset formant ainsi une croûte sur l'extérieur de la colonne.



**Figure (II.7) :** Procédé 4C exploitée par EMIX®. [55]

Cette croûte permet de maintenir le bain de silicium liquide dont le refroidissement est maîtrisé lors de la descente de la colonne dans le four. Les forces électromagnétiques générées par l'inducteur permettent également de maintenir le bain de silicium liquide éloigné du creuset, il n'y a donc pas de contact entre le silicium liquide et le creuset ce qui permettrait d'éviter la contamination du silicium par le matériau du creuset en cuivre. L'ensemble de la fusion et du refroidissement s'effectue en atmosphère inerte d'argon pour éviter l'oxydation du silicium. Une scie circulaire placée dans le bas de l'enceinte permet le tronçonnage des lingots en ligne.

## **II.4.La coulée continue (EMCP):**

La coulée continuée est un procédé de solidification très couramment employé dans la métallurgie de fer, du cuivre et d'aluminium, ce procédé est adapté pour la production en masse. Le laboratoire SIMAP ex (EPM) de Grenoble a développé ce procédé pour le tirage du silicium en lingots destinés à être découpés en tranches et traités pour la production des cellules photovoltaïques polycristallines. Le procédé EMCP (Electromagnétique Continus Pauling) consiste à créer une zone fondue chauffée par induction électromagnétique, l'installation est continuellement alimentée en matière brute sous forme de granules. Ce procédé est très similaire de celui d'EMIX sans système de découpe et avec en plus un four zénithal en haut de l'installation.

### **II.4.1.Description de l'installation :**

Le silicium est fondu par chauffage dans un creuset froid, qui se fait par induction magnétique et qui exerce en plus une force répulsive sur la surface fondue pour la maintenir loin du creuset froid, de façon à éviter le contact du silicium fondu avec toute sorte de source d'impuretés et pour minimiser les pertes thermiques dans l'installation.

Le transfert thermique entre le silicium dans sa partie liquide et solide et les différents constituants de l'installation se fait par rayonnement, conduction et convection.

Le procédé EMCP consiste en plusieurs constituants que nous allons expliquer ci-dessous :

- **Four zénithal :**

Le four zénithal fonctionne par asservissement de façon à maintenir sa température constante, son rôle principal est de minimiser les déperditions thermiques au niveau de la surface du dôme liquide et d'éviter l'apparition des calottes solides sur sa surface.

- **Le four de recuit :**

L'étape de passage du silicium recristallisé dans un four de recuit est indispensable pour une restructuration de texture granulaire est alors nécessaire pour lui redonner les propriétés mécaniques sensiblement identiques à celles qu'il avait avant la fusion. Il est également important pour l'adaptation de la taille des grains du métal pour des performances optimales, l'élimination de contraintes résiduelles (déformation plastique). La vitesse lente de l'ordre de 1mm par minute de passage du silicium dans le four permet de relaxer le réseau cristallin, en

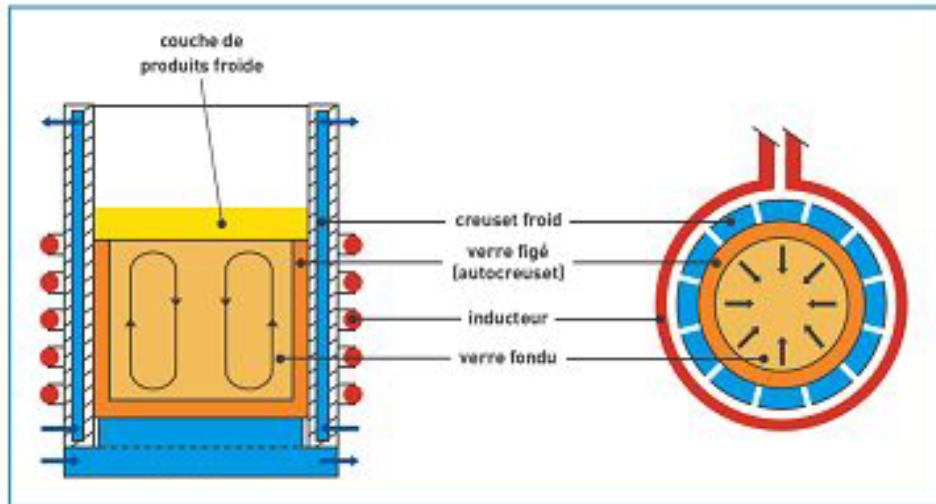
effet, au cours d'un recuit thermique, la matrice tend à se réarranger et certains défauts sont neutralisés. Généralement, le chauffage est assuré par des lampes halogènes et la température avoisine 900 °C.

- **L'inducteur:**

Il est constitué d'un ensemble de spires formant ainsi le creuset siège de la fusion. Il est alimenté à partir du générateur de fréquence par un circuit monophasé réparti en quatre phases chaque phase forme un ensemble des spires isolées entre elles. La bobine est bridée radicalement par 15 entrefers qui sont constitués de tôles feuilletées et permettent une bonne canalisation du flux magnétique. Le matériau utilisé pour sa construction, généralement du cuivre, matériau possédant une excellente conductivité électrique. La forme et la disposition de l'inducteur sont des paramètres importants car ils influent sur la distribution des lignes de champ magnétique et donc sur la distribution des forces électromagnétiques dans la charge.

- **Le creuset froid:**

La plupart des procédés d'élaboration de silicium utilisent des creusets en graphite (en général pour fondre le silicium grâce au chauffage induit par de l'induction électromagnétique) ou des creusets en quartz (en général pour des procédés de cristallisation où on cherche à éviter la contamination en carbone). Le creuset en graphite présente l'intérêt d'être réutilisable plusieurs fois de suite, mais produit cependant du carbure de silicium (SiC) au contact avec le silicium liquide. Le creuset en quartz est beaucoup plus fragile et souvent inutilisable après une ou deux expériences, sa température de fusion (1500°C) est de plus assez proche de celle du silicium (1414°C) ce qui est limitant pour le chauffage. En fait il s'agit d'un tube en cuivre divisé en plusieurs secteurs, séparés les uns des autres par des fines couches d'isolant pour que le courant électrique de la surface externe du creuset soit orienté vers la surface interne de ce dernier. Le courant sur la face interne est de sens opposé à celui de la face externe, les secteurs du creuset ne sont pas en cuivre massif, ils sont creux pour assurer une circulation de l'eau de refroidissement et évacuer la chaleur produite par effet Joule. L'énergie produite dans le creuset froid résulte de l'effet Joule par l'action du courant intense sous l'action du champ électromagnétique produit par la bobine inductrice.



**Figure(II.8) :** Le creuset froid inductif. [56]



**Figure (II.9) :** Vue extérieure du "Creuset froid" en cours de chauffe [57]

# CHAPITRE III

---

## Formulation mathématique et modélisation du problème physique

### III.1.Introduction :

Dans le but de produire une température élevée pour fondre le silicium de manière précise et saine sans contact avec les différents éléments de l'installation et sans toucher les extrémités du four et d'éviter la contamination du silicium par les impuretés de différentes natures, le chauffage par induction électromagnétique est une technique très utilisée pour assurer une bonne qualité du silicium polycristallin.

### III.2. Chauffage par induction électromagnétique :

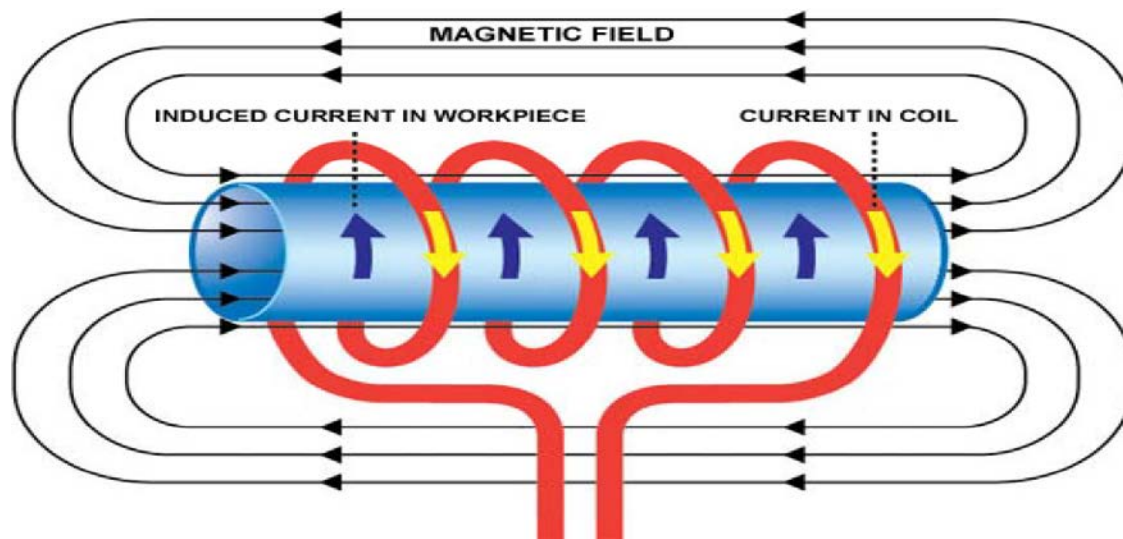
Le chauffage par induction électromagnétique est une technique permettant de chauffer des matériaux conducteurs d'électricité, sans contact matériel avec une source électrique. Lorsqu'un conducteur électrique est déplacé dans un champ magnétique statique, un courant électrique s'établit dans cet objet. C'est le phénomène d'induction. De la même manière on induit un courant dans un conducteur fixe placé dans un champ magnétique variable.



**Figure (III.1):** Le chauffage par induction électromagnétique. [58]

Un courant alternatif parcourant un bobinage (ou solénoïde) génère en effet un champ magnétique oscillant à la même fréquence dont l'intensité est maximale à l'intérieur de celui-ci (loi d'Ampère).

Si une pièce conductrice est placée à l'intérieur d'une bobine, les courants induits par le champ magnétique s'y développent (loi de Lenz) et chauffent la pièce par effet Joule. Un équipement de chauffage par induction comprend essentiellement un ou plusieurs inducteurs de chauffage, une alimentation électrique, un système de refroidissement de l'inducteur et de l'alimentation électrique et un système de contrôle.



**Figure (III.2) :** Principe du chauffage par induction électromagnétique. [59]

Le chauffage par induction entraîne successivement les phénomènes physiques suivants :

- ✓ Le transfert de l'énergie par voie électromagnétique de l'inducteur vers le matériau a chauffé.
- ✓ La transformation de cette énergie électrique en chaleur par effet Joule.
- ✓ La diffusion par conduction thermique de la chaleur au sein du matériau.

### III.3.L'effet Joule :

La loi de Joule décrit le phénomène appelé l'effet Joule qui est le dégagement de chaleur qui accompagne le passage d'un courant électrique dans un matériau conducteur lui opposant une résistance. L'effet Joule résulte du fait que les électrons, en circulant dans le matériau conducteur, font vibrer les atomes qui le constituent. Lorsque les atomes vibrent, la température augmente.

#### III.3.1.La loi de Joule :

L'énergie calorifique produite est décrite par la loi de Joule :

$$E = R \times I^2 \times t \quad (3.1)$$

L'énergie calorifique (ou chaleur) E dépend donc de trois facteurs :

- **L'intensité du courant :**

Le courant « I » est le facteur le plus important, plus le nombre d'électrons pendant un temps donné qui traverse le matériau est important, plus ses particules qui vibrent et, par conséquent, la température va augmenter. Comme il s'agit dans cette relation du carré de l'intensité l'énergie calorifique augmentera très rapidement avec l'intensité du courant.

- **Le temps pendant lequel circule le courant :**

La durée « t » de circulation du courant électrique qui traverse le circuit est aussi importante car plus elle est élevée, plus que les atomes vont vibrer et la température augmente davantage. Donc plus le temps pendant lequel le courant traverse le circuit augmente, plus l'énergie « E » calorifique dégagée est grande.

- **La résistance du conducteur :**

Lorsque les atomes des matériaux possèdent une grande résistance au passage du courant ils vont vibrer davantage par rapport aux matériaux de résistance faible, l'énergie calorifique dégagée sera donc plus grande plus la résistance « R » du matériau est importante, plus l'énergie calorifique « E » dégagée est grande.

### **III.4. Formulation électromagnétique et thermique [60]:**

La variation de champ électrique génère un champ magnétique et vice versa ce qui résulte en une onde électromagnétique qui transporte de l'énergie à la pièce. Pour un milieu linéaire isotrope la relation entre l'intensité du champ et la densité de flux électriques est donnée par :

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (3.2)$$

Où  $\varepsilon$  est la permittivité électrique absolue du milieu mesurée en Farad par mètre (F/m). La relation entre la densité de flux magnétique et l'intensité du champ magnétique est donnée par :

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (3.3)$$

Où  $\mu$  est la perméabilité magnétique absolue du milieu mesurée en Henry par mètre (H/m). A l'intérieur d'un matériau conducteur les courants de conduction sont le résultat du

mouvement des charges mobiles du au champ électrique. Ce phénomène est formulé par la loi d'Ohm, donnée par :

$$\vec{J} = \frac{1}{\rho} \vec{E} \quad (3.4)$$

Où  $J$  représente la densité de courant volumique,  $\vec{E}$  est le champ électrique et  $\rho$  est la résistivité électrique. Les grandeurs  $\vec{E}$  et  $\vec{D}$  représentant le champ électrique et les grandeurs  $\vec{B}$  et  $\vec{H}$  représentant le champ magnétique sont liées par les équations connues sous le nom d'équation de Maxwell :

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3.5)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (3.6)$$

$$\partial \cdot \vec{D} = \rho v \quad (3.7)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (3.8)$$

L'équation (3.5) est la loi de Faraday, l'équation (3.6) est le théorème d'Ampère généralisé, l'équation (3.7) est le théorème de Gauss et l'équation (3.8) définit la conservation du flux magnétique ou bien le non présence de la charge magnétique.

En substituant l'équation (3.3) dans les équations (3.5) et (3.8) on obtient les relations :

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial(\mu \vec{H})}{\partial t} \quad (3.9)$$

$$\nabla \cdot (\mu \vec{H}) = 0 \quad (3.10)$$

De la même manière en substituant les équations (3.2) et (3.4) dans les équations (3.6) et (3.7) on obtient les relations :

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{\vec{B}}{\rho} + \frac{\partial(\varepsilon \vec{E})}{\partial t} \quad (3.11)$$

$$\nabla \cdot (\varepsilon \vec{E}) = \rho_i \quad (3.12)$$

La densité de flux magnétique  $\vec{B}$ , peut être exprimée en termes de potentiel vecteur magnétique  $\vec{A}$  comme suit :  $\vec{B} = \nabla \times \vec{A}$

En introduisant le potentiel scalaire électrique  $V$ , qui satisfait  $\nabla \times \nabla_v = 0$  Donc :

$$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \nabla_v \quad (3.13)$$

En substituant  $\vec{B} = \nabla \times \vec{A}$  dans l'équation (3.11), on peut obtenir :

$$\frac{1}{\mu} \nabla^2 \vec{A} = -\frac{\partial \varepsilon \vec{E}}{\partial t} - \frac{\vec{E}}{\rho} \quad (3.14)$$

Après substituant l'équation (3.13) dans l'équation (3.14), l'équation du champ électromagnétique en termes de  $\vec{A}$  est donnée ci-dessous :

$$\frac{1}{\mu} \nabla^2 \vec{A} = \frac{\varepsilon \partial^2 \vec{A}}{\partial t^2} + \varepsilon \frac{\partial \nabla_v}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \nabla_v \quad (3.15)$$

Pour les applications les plus pratiques, le courant de déplacement peut être négligé et l'équation (3.15) peut être simplifiée comme suit:

$$\frac{1}{\mu} \nabla^2 \vec{A} + \vec{J} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = 0 \quad (3.16)$$

En régime harmonique, si la fréquence d'oscillation est  $f$ ,  $\vec{A}$  peut être exprimé :

$$\vec{A}(x, y, z, t) = \vec{A}(x, y, z) e^{j\omega t} \text{ avec } j = \sqrt{-1} \text{ et } \omega = 2\pi f \text{ est la fréquence angulaire.}$$

La substitution de celui-ci dans l'équation (3.16) donne :

$$\frac{1}{\mu} \nabla^2 \vec{A} + \vec{J} - \frac{1}{\rho} j\omega \vec{A} = 0 \quad (3.17)$$

L'équation de conservation d'énergie est obtenue à partir du premier principe de la thermodynamique :

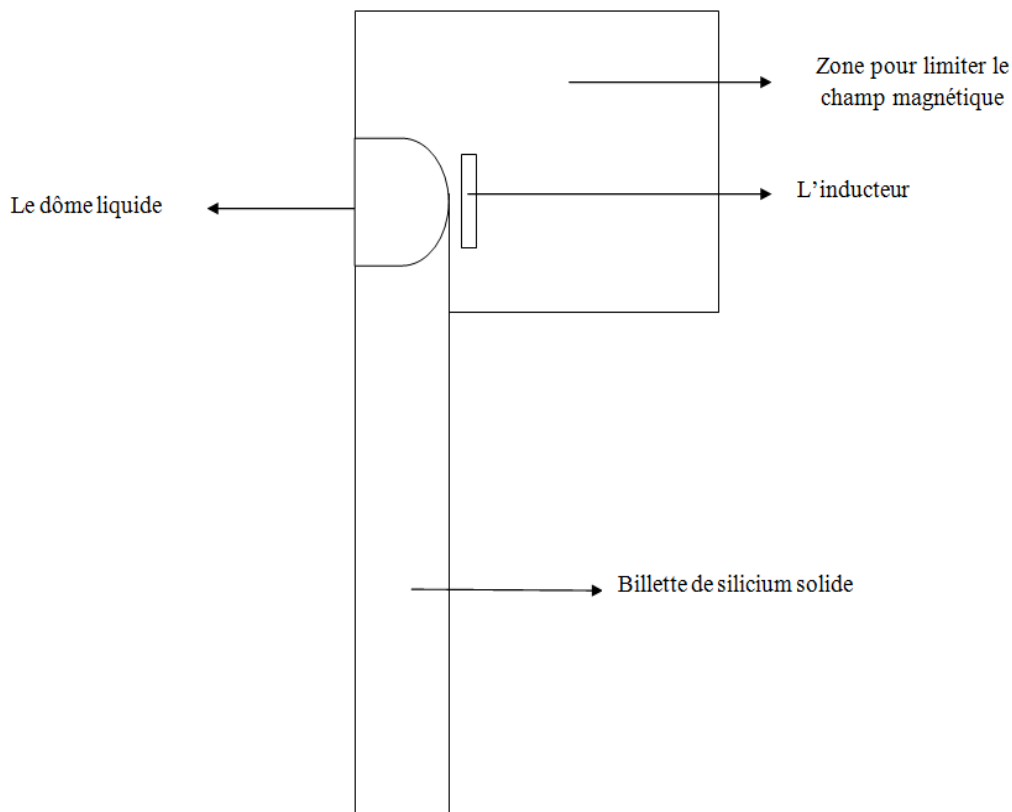
$$\nabla(-K\nabla T + dC_p T.U) = Q \quad (3.18)$$

Où  $T$  est la température,  $k$  est la conductivité thermique,  $d$  est la masse volumique,  $C_p$  est la capacité calorifique et  $Q$  est la densité de source de chaleur induite par les courants de Foucault par unité de temps dans une unité de volume. La densité de la source de chaleur est liée à la densité de courant par la loi de Joule, comme indiqué ci-dessous :

$$Q = \vec{J}^2 \rho = \frac{1}{\rho} \frac{(\partial \vec{A})^2}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \left( \partial \frac{\vec{A} e^{j\omega t}}{\partial t} \right)^2 = \frac{1}{\rho} (j\omega \vec{A} e^{j\omega t})^2 \quad (3.19)$$

### III.5 Modélisation du problème physique :

Afin de faciliter la compréhension du système mathématique ou physique, nous utilisons la Modélisation qui consiste à construire un système physique qui produit un phénomène qui consiste à construire un ensemble des équations différentielles décrivant ce phénomène en modifiant les variables initiales.



**Figure (III.3) :** La géométrie simplifiée du problème.

A partir d'un modèle graphique simplifié dans la figure (III.3) on va coupler les équations de l'électromagnétique et les équations de transferts de chaleur. La figure (III.3) représente La

géométrie simplifiée du problème et on va garder dans L'installation sauf l'inducteur et le lingot de silicium qui a une symétrie axiale et l'autre composante affectent le problème sont remplacé par leurs effets.

### III.5.1 Modèle électromagnétique de COMSOL[61]:

- **La mise en équation :**

La production du silicium polycristallin à usage photovoltaïque par le procédé nommé EMCP se fait sous l'action d'un champ magnétique oscillant à moyenne fréquence. La zone fondue est soumise à une induction électromagnétique, pour la détermination des grandeurs intervenant dans ce phénomène, il revient à résoudre l'équation de Maxwell. Pour cette partie du calcul électromagnétique, on a utilisé un modèle de COMSOL qui traite ce calcul d'une façon plus commode. Dans notre cas le courant de l'inducteur est perpendiculaire sur la surface du silicium, pour cela on a adopté l'application « courant Azimutal Quasi-statique » pour une symétrie axiale, seule la composante angulaire est considérée. Le problème est basé sur une formulation qui utilise la composante non nulle du vecteur de potentiel magnétique. COMSOL propose différentes modes de résolution, le mode statique et transitoire ou bien le mode harmonique. La formulation PDE (Partiel Différentiel Equation) en deux dimensions pour une géométrie à symétrie axiale est donnée par l'équation suivante dans le modèle choisi de COMSOL:

La relation constitutive généralisée  $\vec{B} = \mu(\vec{H} + \vec{M})$ , loi d'ampère peut s'écrire de la manière suivante :

$$\sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \nabla \times (\mu^{-1} \nabla \times \vec{A} - \vec{M}) - \sigma \vec{v} \times (\nabla \times \vec{A}) + \sigma \vec{\nabla} V = \vec{J}^e \quad (3.20)$$

### III.5.2 Modèle thermique de COMSOL :

Les bilans d'énergie sont fait séparément sur le dôme liquide et la billette solide dans un régime stationnaire. Le but de ce calcul est de visualiser la variation de la température au sein du silicium dont la qualité dépend essentiellement du gradient de température, ainsi de chercher l'isotherme qui représente la forme du front de solidification.

- **Hypothèses :**

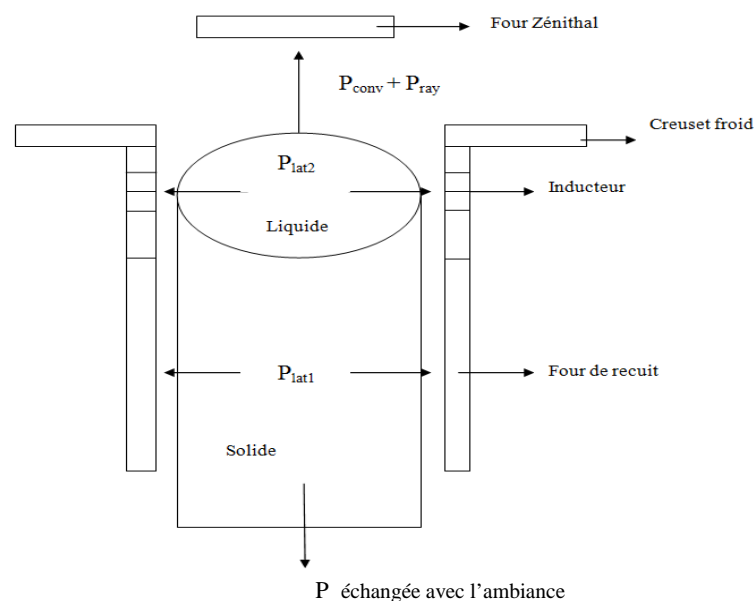
Afin de rendre notre problème simple à résoudre, on suppose les hypothèses simplificatrices suivantes :

- Régime permanent.
- La géométrie est supposée axisymétrique
- La température ambiante  $T_a = 27C^o$
- La température du four zénithal  $T_z = 1200C^o$
- La température du four recuit  $T_{fr} = 900C^o$
- La température de séparation entre le solide et le liquide est  $T_f = 1414C^o$
- La billette solide est supposée infiniment longue.
- La vitesse du tirage est constante  $V_p = 1mm / min$

- **Le bilan énergétique sur le silicium :**

Le front liquide-solide est caractérisé par l'isotherme qui a la température qui  $T_f$ .

Sur la figure (III.4) l'échange de chaleur au niveau du dôme liquide se fait avec le four zénithal par rayonnement et convection et avec les parois du creuset froid de la même façon sauf qu'il faut tenir compte de la conduction à travers la fine couche de l'argon qui sépare le creuset froid du dôme liquide. Le dôme liquide transmet de la chaleur par conduction vers le solide. Les échanges entre le solide et le creuset froid se font de la même manière et l'échange avec l'ambiance dans le bas de l'installation figure (III.4).



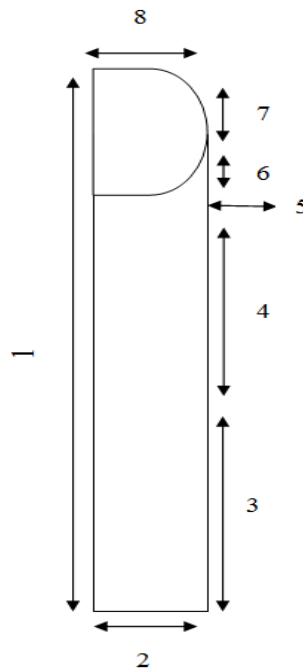
**Figure (III.4):** Puissances échangées pendant le tirage du silicium.

Vu que la billette est en condition de tirage, pour résoudre notre problème on a adopté un modèle de COMSOL qui est représenté par l'équation suivante :

$$\nabla(-K\nabla T + dC_p T.U) = Q \quad (3.21)$$

- **Conditions aux limites :**

Les conditions aux limites sont du type Neumann, elles sont résumées sur la figure suivante :



**Figure (III.5) :** Les conditions aux limites sur le lingot du silicium.

1-Axe de symétrie.

2 et 3-Echange thermique avec l'ambiance.

4- Echange thermique avec le four de recuit.

5- Echange thermique avec le creuset froid.

6- Echange thermique avec l'ambiance (feutre).

7-Chauffage par l'effet de l'inducteur.

8- Echange thermique avec le four zénithal.

# CHAPITRE IV

---

## Simulation numérique et discussion des résultats

### **IV.1.Introduction :**

La simulation numérique est devenue un élément indispensable dans les domaines des sciences et de l'ingénierie. Elle permet de comprendre et de modéliser le fonctionnement des systèmes réels. Aujourd'hui une large gamme d'outils numériques est disponible. Elle repose sur la mise en œuvre des modèles théoriques utilisant différents outils mathématiques dont la technique des éléments finis. La simulation numérique permet d'étudier le fonctionnement et les propriétés d'un système modélisé ainsi qu'à en prédire son évolution. Il est très intéressant d'avoir un environnement de simulation qui inclut la possibilité d'ajouter différents phénomènes physiques au modèle étudié. C'est dans cette philosophie la que Comsol Multiphysics a été développé.

### **IV.2. Aperçu sur le logiciel [63]:**

COMSOL Multiphysics version 3.5a est un environnement interactif puissant pour la modélisation et la résolution de toutes sortes de problèmes scientifiques et d'ingénierie basés sur des équations à dérivées partielles (PDE). COMSOL Multiphysics a une interface utilisateur graphique flexible ou par script programmation en langage MATLAB. Comme indiqué, la structure mathématique sous-jacente de COMSOL Multiphysics.

Pour résoudre les PDE, COMSOL Multiphysics utilise la méthode des éléments finis (FEM). Le logiciel exécute l'analyse par éléments finis avec le maillage adaptatif avec contrôle des erreurs en utilisant une variété de solveurs numériques. .

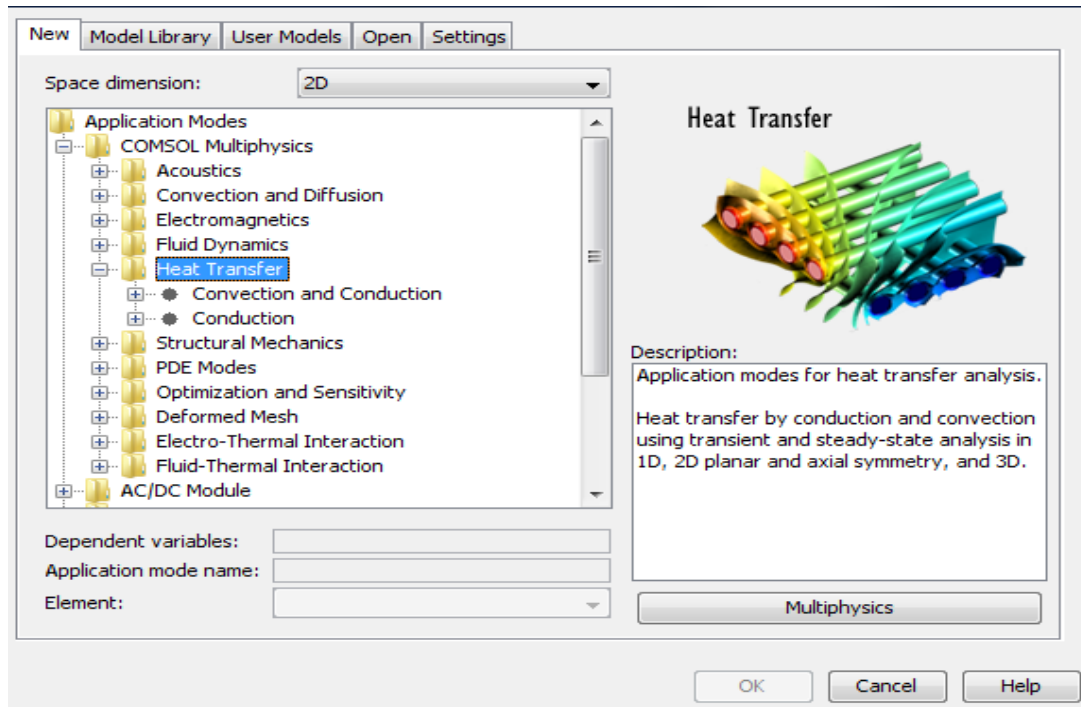
### **IV.3. Les étapes d'utilisation de COMSOL :**

Lors du lancement de COMSOL, l'assistant Modèle (Model Wizard) permet de définir toutes les étapes de la modélisation . Ces étapes sont les suivantes :

#### **Etape 1 : Mettre en place un environnement du modèle.**

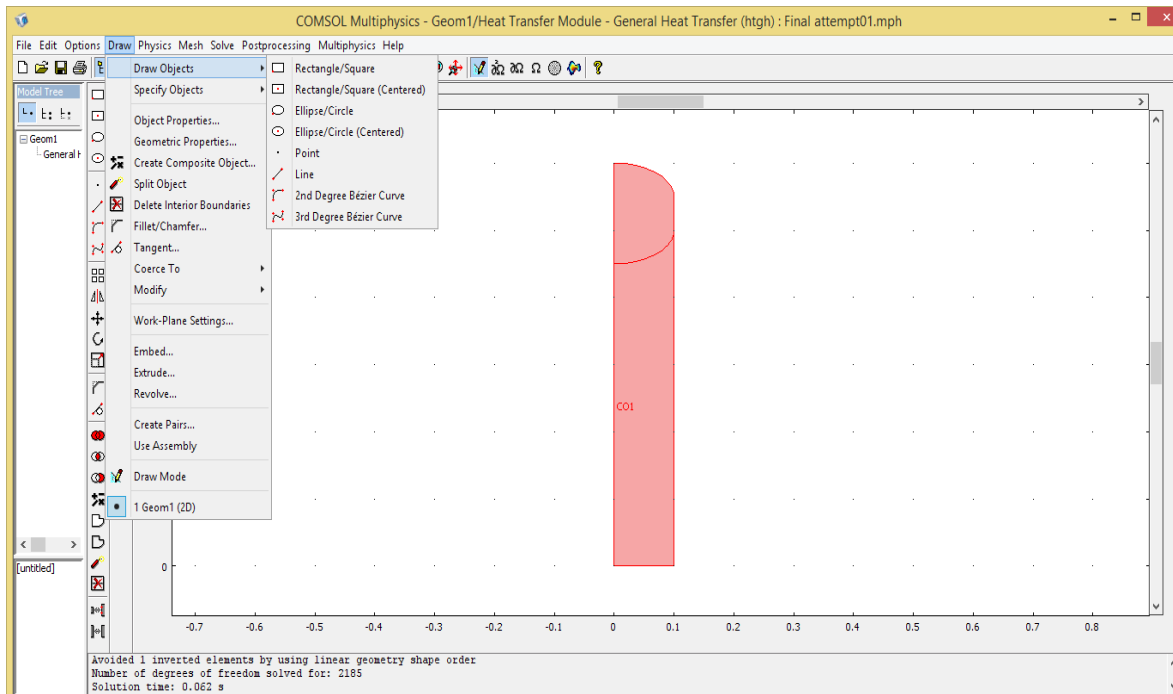
Exécutez l'assistant Modèle pour choisir le système de coordonnées, le modèle, la physique adaptée au problème et le type d'études que l'on souhaite effectuer (stationnaire ou en fonction du temps).

- Définir les paramètres, les équations et les variables pour le modèle.



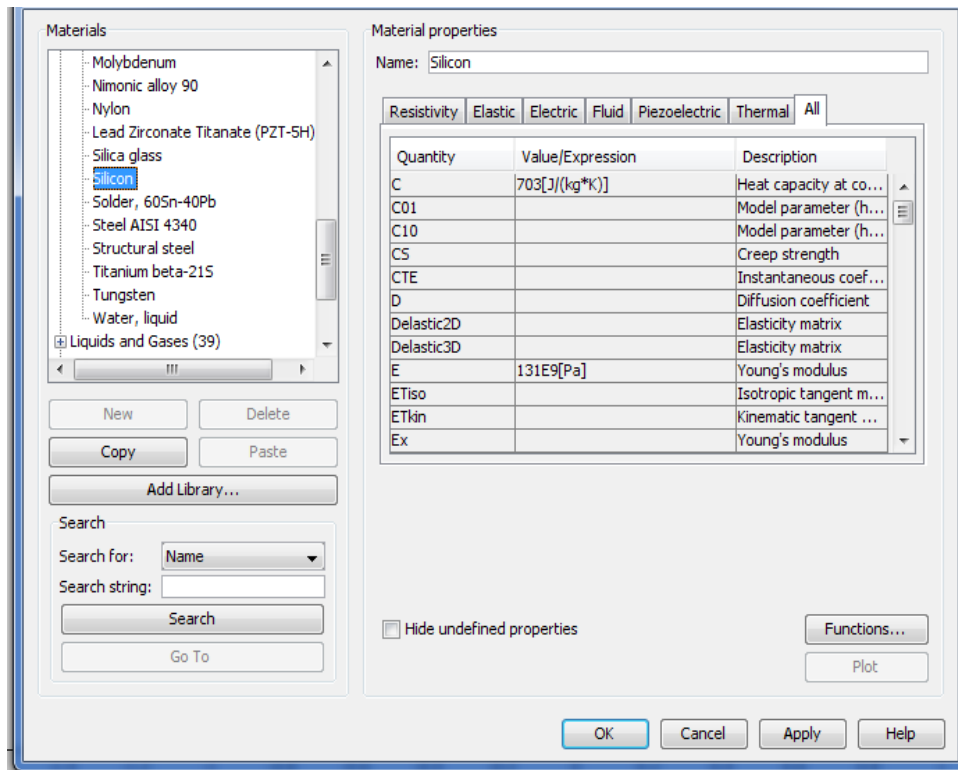
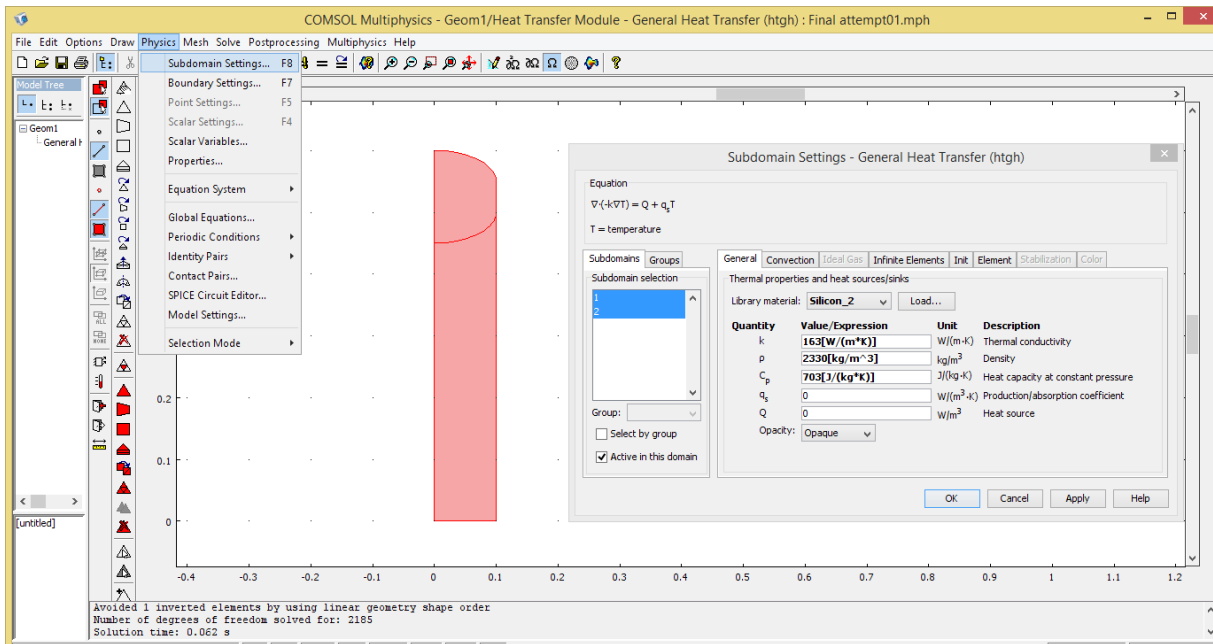
**Etape 2 : Création de la géométrie.**

Définir la géométrie du modèle



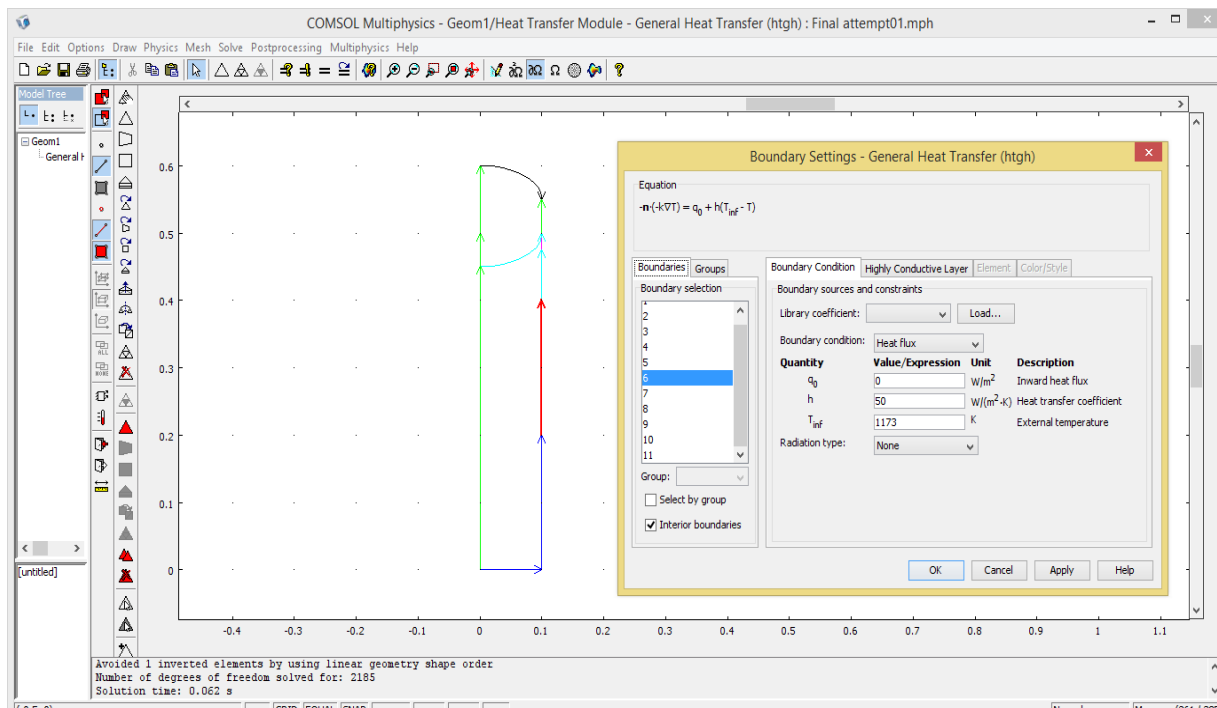
**Etape 3 : Spécifier les propriétés du matériau.**

Choisir les matériaux qui construisent le domaine physique du modèle.



**Etape 4 : Définir les conditions aux limites.**

Choisir les conditions initiales et aux limites du modèle



1,3 et 4-Axe de symétrie.

2 et 5-Echange thermique avec l'ambiance.

6-Echange thermique avec le four de recuit.

7-Echange thermique avec le creuset froid.

8-Echange thermique avec l'ambiance (feutre).

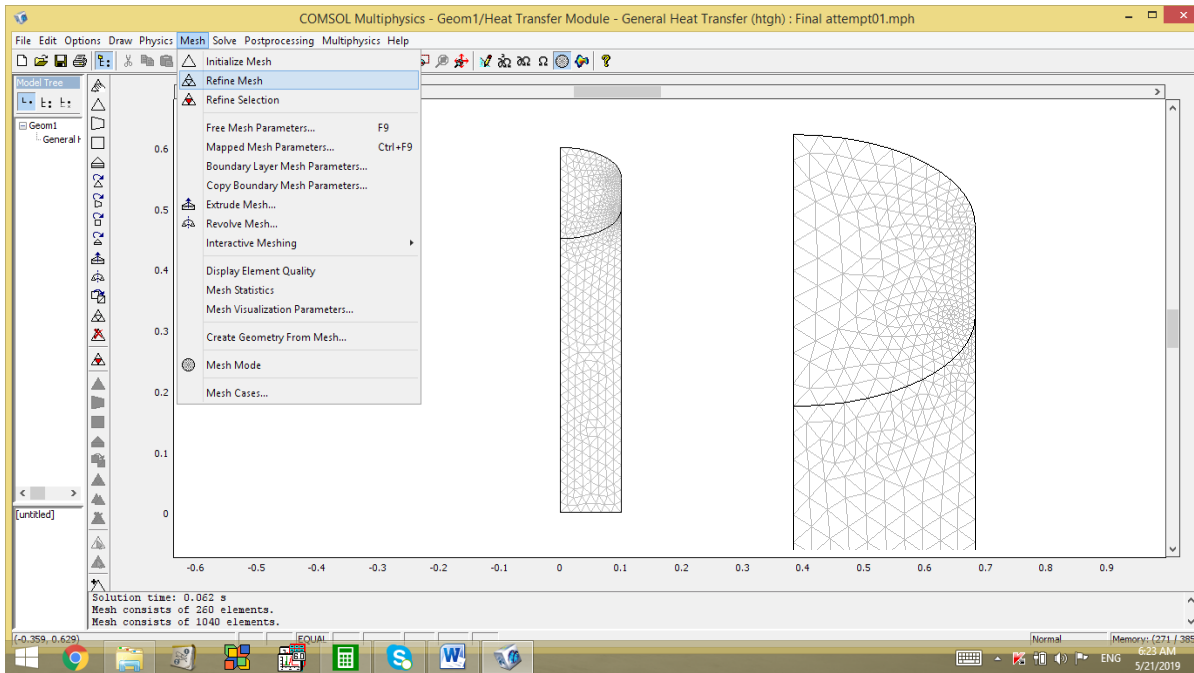
9- Condition aux limites de la continuité

10- Echange thermique avec le four zénithal.

11- Chauffage par l'effet de l'inducteur.

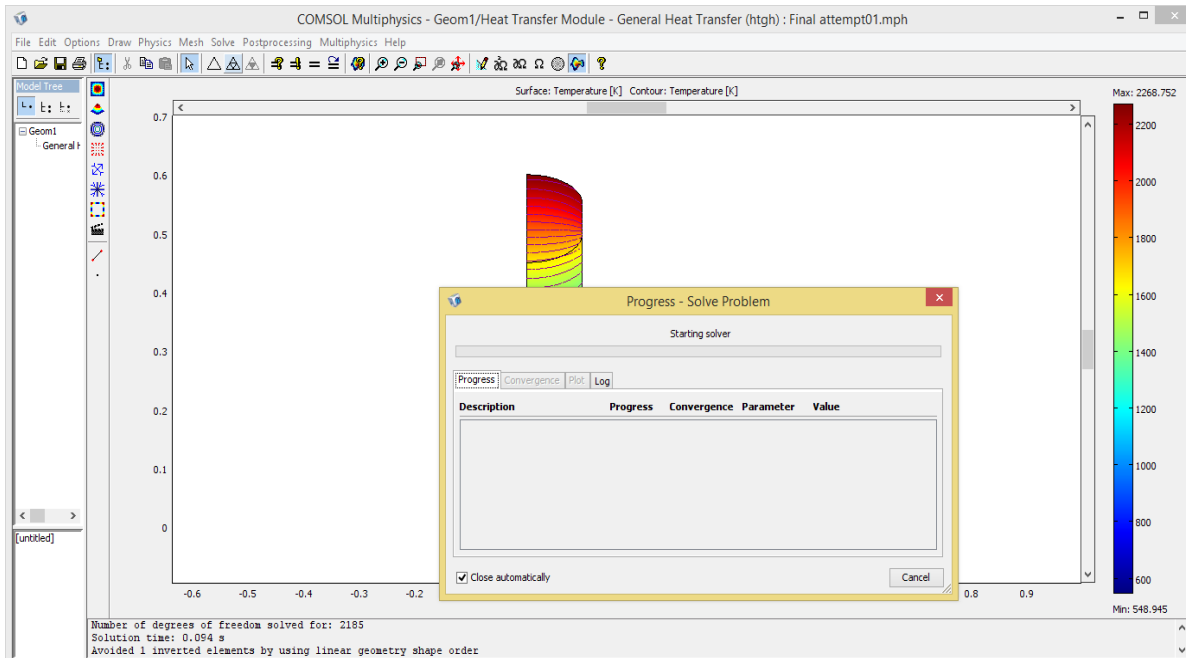
**Etape 5 : Génération de maillage.**

Utiliser les paramètres de génération de maillage.



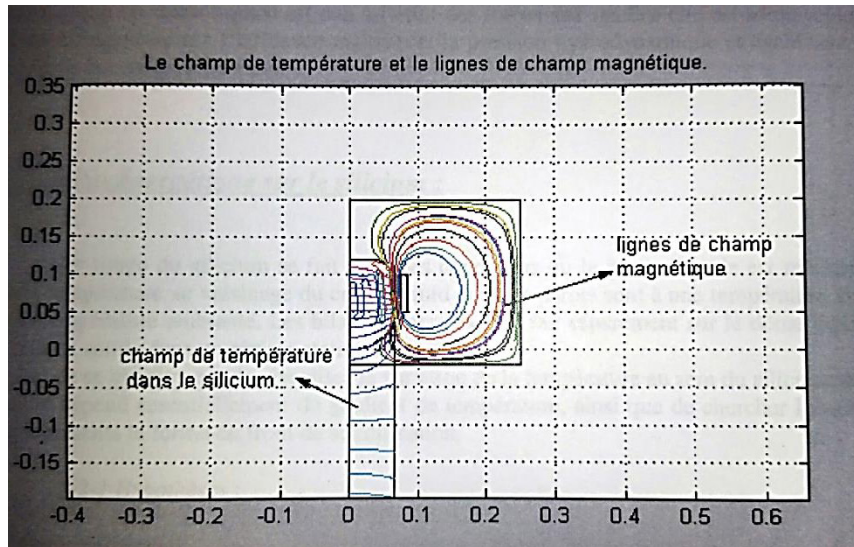
### Etape 6 : Exécuter la simulation.

Régler les paramètres du solveur et lancer les calculs



#### IV.4. Discussion des résultats de la simulation :

Nous avons exploité le résultat de l'étude électromagnétique réalisée par [36], ce résultat nous donne la quantité de chaleur échangée avec le silicium liquide par induction électromagnétique ainsi que les différents coefficients d'échange. Avec cette information nous avons pu réaliser la simulation numérique des échanges thermiques entre un lingot de silicium cylindrique d'une hauteur de 0.6 m et diamètre de 0.2 m et son environnement lors de l'élaboration du silicium polycristallin par le procédé EMCP.

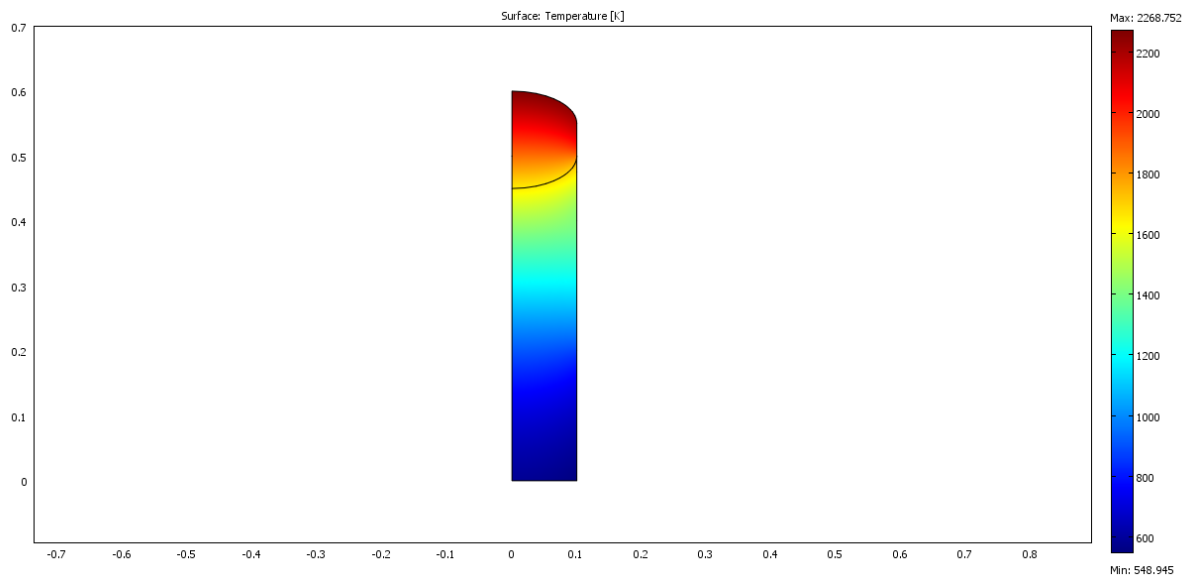


Figure(IV.1) : Champ magnétique (ligne du flux)

Sur la figure (IV.1) qui représente les lignes du champ magnétique, on remarque que ces lignes ne pénètrent pas le volume du dôme liquide en raison de la fréquence assez élevée, l'effet de peau se produit et le champ magnétique passe par une couche très mince confinée aux frontières extérieures du dôme. Un courant induit prend naissance dans cette couches parcourant la superficie du dôme ce courant est dû à la résistance électrique élevée causée par la petite surface de passage du courant, l'effet de Joule se produit alors uniquement dans cette mince couche extérieure entourant le dôme liquide. La forme courbée du dôme liquide est due principalement à l'effet des forces auxquelles il est soumis, comme la pression magnétique, la pression hydrodynamique ainsi que la tension superficielle.

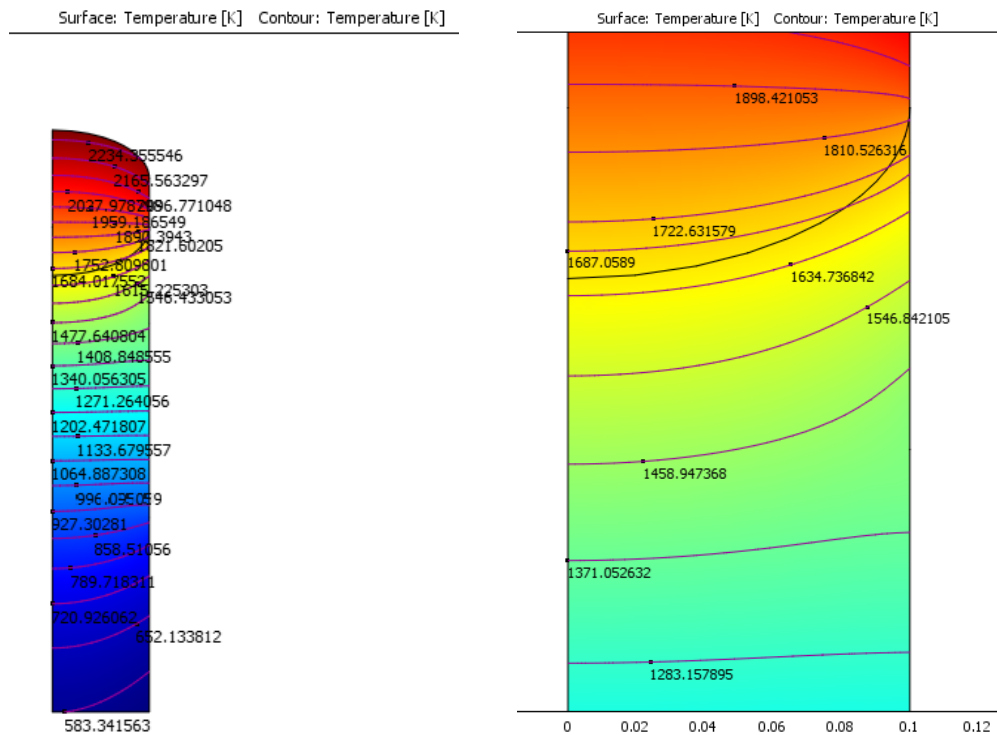
- **Distribution la température au sein du lingot de silicium :**

La figure (IV.2) illustre le champ thermique au sein du lingot de silicium pendant le processus d'élaboration. Sur cette figure on voit uniquement la moitié du lingot du a la symétrie axiale ce qui va nous économiser le temps de calcul. La répartition de la chaleur ce fait par mode de conduction au sein du silicium. La partie liquide du silicium appelée dôme est caractérisée par les températures les plus élevées qui sont de l'ordre de 2000 K où le silicium se trouve dans son état liquide sous l'effet de la fusion par induction. L'interface entre le dôme et l'inducteur ainsi que la couche superficielle du silicium liquide ont les températures les plus élevées sous l'effet de Joule qui se produit dans la couche superficielle entourant le dôme liquide.



**Figure(IV.2) :** Champ de température au sein du silicium

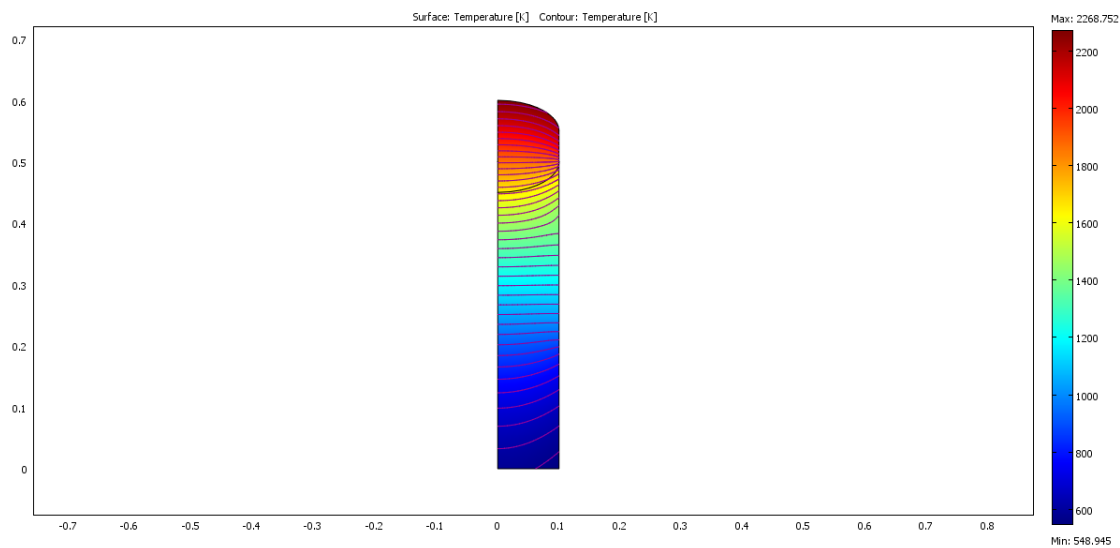
La ligne séparant le silicium liquide du silicium solide est appelée interface de solidification, les échanges de chaleur avec les autres parties de l'installation permettent la solidification lente du silicium au voisinage de cette interface qui est dessinée préalablement d'une façon approximative. En bas de cette interface le silicium se solidifie pour donner un lingot solide de forme cylindrique imposée par la forme du creuset froid.



**Figure(IV.3) :** Localisation de l'interface de solidification

Le champ de température au sein du lingot de silicium nous permet de localiser d'une façon précise la position du front de solidification qui se confond avec l'isotherme de température de fusion du silicium  $T=1414$  degrés Celsius ce qui correspond à  $T=1687$  Kelvin. On remarque sur la figure (IV.3) que l'isotherme caractérisant l'interface de solidification est très proche de l'interface dessinée préalablement mais avec une allure très différente. Cette information nous permet de redessiner la géométrie et refaire le calcul pour obtenir des résultats plus précis.

La forme de l'interface de solidification est due principalement au brassage magnétique au sein du silicium liquide, cette courbure de l'interface influe négativement sur la structure cristallographique du silicium polycristallin. On remarque également que le changement brusque en température entre le silicium liquide et solide au niveau du front de solidification engendre des gradients thermiques très élevés qui causent une croissance non homogène dans la structure du silicium.



**Figure(IV.4) :** Isothermes au sein du lingot de silicium

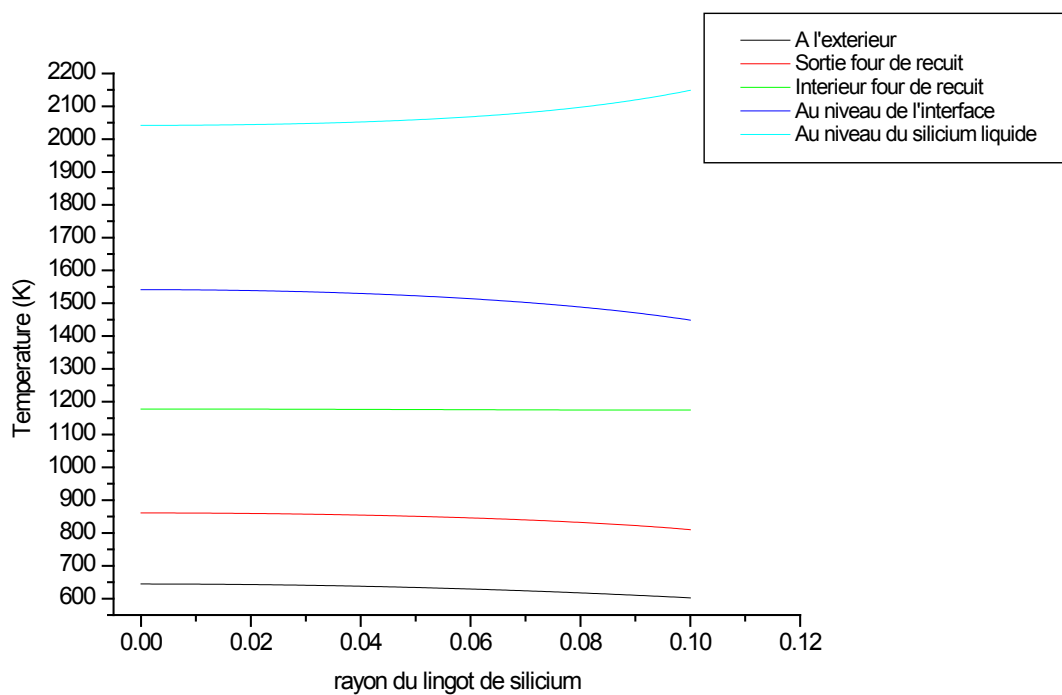
La figure (IV.4) montre la répartition des isothermes au sein du silicium lors du procédé d'élaboration. On peut remarquer sur cette figure que les isothermes sont très proches les uns des autres au niveau de l'inducteur, cette concentration des isothermes est due principalement à l'importance du flux thermique échange entre le silicium et l'inducteur ainsi que dans la zone du creuset froid. On peut remarquer également sur cette figure que les isothermes ont tendance à être stratifiées en s'éloignant de l'interface de solidification et en bas du creuset froid où les échanges de chaleur deviennent moins intenses et les gradients de température diminuent sensiblement.

La diminution des gradients de température est plus claire au niveau du four de recuit où on remarque que les isothermes sont quasiment parallèles le long de la longueur du four. L'allure des isothermes dans la partie basse du lingot de silicium nous informe de la naissance des gradients thermique importants à la sortie du four de recuit vers l'ambiance où la température diminue brusquement.

La figure (IV.5) nous montre la variation radiale de la température pour différentes positions dans le lingot de silicium polycristallin. On remarque au niveau du dôme liquide que la température de la couche superficielle est plus élevée que celle du cœur du dôme cela est dû au chauffage par induction. Cette partie du silicium nous intéresse pas beaucoup contrairement à la partie de l'interface de solidification qui représente une zone intéressante où les gradients thermiques sont très élevés avec un écart radial de température de l'ordre de  $100\text{ C}^0$  ce qui influe négativement sur la structure du silicium affectant ainsi son rendement.

La partie du silicium qui se trouve à l'intérieur du four de recuit se caractérise d'après la figure (IV.5) par un gradient thermique quasiment nul entre le cœur et l'extérieur du lingot de silicium avec  $\Delta T_r = 3 \text{ C}^\circ$ , cette zone représente une structure cristallographique homogène due à l'effet de recuit qui minimise les défauts dans le silicium.

La sortie du four de recuit se distingue par un gradient thermique relativement important au sein du silicium avec  $\Delta T_r = 50 \text{ C}^\circ$  car il sort du four à  $T = 900 \text{ C}^\circ$  vers la température ambiante donc cette zone se caractérise également par la présence des défauts engendrés par l'écart élevée de température.



**Figure(IV.5) :** Variation radiale de la température au sein du silicium

## Conclusion générale

Notre étude concerne la modélisation et la simulation numérique du procédé d'élaboration de silicium polycristallin pour la fabrication de cellules photovoltaïques. Le procédé adopté dans notre étude repose sur la coulée continue du silicium liquide dans une partie du dispositif connue sous le nom de creuset froid, qui consiste à fondre le silicium solide par induction électromagnétique sans contact et sous l'effet de chauffage par effet Joule.

L'étude électromagnétique nous a fourni la quantité de chaleur produite par induction électromagnétique échangée avec du silicium liquide au niveau du creuset froid, ainsi que les différents coefficients d'échange thermique entre le dispositif d'élaboration et le lingot de silicium, nous avons pu effectuer une simulation numérique des échanges thermiques au cours du procédé de la production de silicium polycristallin et ceci en utilisant le logiciel COMSOL Multiphysics qui utilise la méthode des éléments finis pour la résolution d'équations mathématiques qui sont des équations aux dérivées partielles (PDE) pour le transfert de chaleur par conduction et par convection à l'intérieur du lingot ayant une géométrie à deux dimensions considérées axisymétrique.

La simulation numérique nous a permis de connaître le champ thermique au sein du lingot de silicium polycristallin au cours du procédé d'élaboration qui passe par différentes étapes à partir de la première phase où le silicium est présent sous la forme d'un dôme liquide à l'intérieur du creuset froid en passant par l'interface de solidification qui sépare les parties liquide et solide dans le silicium en arrivant à la phase de refroidissement où le silicium passe à travers le four de recuit jusqu'à ce que le lingot sort du dispositif.

A partir des résultats de la simulation nous constatons que le silicium passe par trois étapes essentielles à l'intérieur du dispositif d'élaboration pour former un lingot solide de silicium polycristallin :

La zone du dôme liquide:

Le dôme est la partie liquide du silicium polycristallin sous l'influence de la fusion par induction électromagnétique où le champ magnétique passe à travers un très petit espace entre l'inducteur et la surface du dôme liquide et génère un courant induit dû à la résistance élevée du silicium liquide. Dans cette zone, les isothermes sont très proches les uns des autres en raison du flux thermique élevé entre le silicium et l'inducteur où la température est très élevée et dépasse la température de fusion du silicium. La forme incurvée du dôme liquide est due aux forces d'agitation électromagnétiques qui poussent le silicium dans toutes les directions pour éviter le contact avec le creuset froid. La surface du silicium liquide à la température la plus élevée sous l'effet Joule qui se produit dans la couche superficielle entourant le dôme liquide.

La zone du front de solidification:

L'interface séparant le silicium liquide du solide est appelée front de solidification, caractérisée par une ligne isotherme de 1414 °C qui correspond à la température de fusion du silicium. Le champ thermique au sein du lingot nous a permis de définir avec précision la position ainsi que la forme de l'interface liquide-solide. Le front de solidification représente une zone importante dans laquelle il y a un changement de phase et un gradient de température très élevé entre le silicium liquide et solide où la croissance cristalline n'est pas homogène dans la structure du silicium due au gradients radiaux très importants ce qui affecte négativement la qualité du silicium.

Le silicium se cristallise pour donner un lingot cylindrique, sa forme est imposée par la forme du creuset froid. La forme courbée du front de solidification est principalement due à l'agitation magnétique au sein du silicium liquide et cette courbure de l'interface à un effet négatif sur la structure cristallographique de silicium.

La zone du four de recuit:

L'échange de chaleur à l'entrée du four de recuit est moins intense et cela est dû aux faibles valeurs du gradient thermique entre le lingot du silicium et le four, ce qui ralentit la diminution de la température du silicium où la courbure des isothermes diminue ce qui donne des valeurs du gradient thermique presque nulles entre la surface extérieure et le noyau du lingot. Le silicium

dans cette zone a une structure cristalline homogène avec une bonne qualité de surface de conversion ce qui garantit un rendement élevé de la cellule photovoltaïque.

Nous concluons par cette simulation ainsi que par l'analyse des résultats que plus le gradient de température est faible entre les différentes étapes du procédé d'élaboration du silicium plus la qualité du silicium polycristallin est meilleure. La courbure de l'interface de solidification joue un rôle négatif sur qualité du silicium en raison de la non-uniformité cristalline au cours du processus de cristallisation.

Le rôle du four de recuit est très important car il permet au silicium de se solidifier de manière homogène, ce qui influe positivement sur la qualité de la structure cristalline qui est à son tour responsable de la qualité du silicium et de la valeur du rendement de conversion des cellules photovoltaïques.

Donc l'objectif de cette étude était d'obtenir des cellules photovoltaïques avec rendement élevé en utilisant du silicium multicristallin, ce qui nécessite une connaissance approfondie du procédé d'élaboration des lingots de silicium afin d'améliorer ce procédé en contrôlant les différents paramètres affectant la qualité du silicium en réduisant les défauts cristallins pendant la production.

## Références

[1] <https://www.futura-sciences.com/sciences>

[2] **R. Bernard et al.**, "Le rayonnement solaire conversion Thermique et applications" Technique et documentation Lavoisier, 2ème édition 1980.

[3] **Halouane Assia**, "modélisation du transfert radiatif dans les strates supérieures d'un module photovoltaïque", mémoire de master, université M'Hamed bougera Boumerdes 2017.

[4] **Debili Narimene**, "étude et optimisation en environnement matlab/simulink d'un système de pompage photovoltaïque", thèse de magister, université Constantine I, 2015.

[5] **Helali Kamelia**, "modélisation d'une cellule photovoltaïque : étude comparative ", thèse de magister, université mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2012.

[6] **Hasni Hhadjèr**, "caractérisation automatisée d'une cellule solaire ", mémoire de fin d'étude en master, université Med Khider Biskra, 2014.

[7] <http://www.africa-solar-energy.com/l'énergie-solaire-afrique/>

[8] **Zerguine Bilal**, "modélisation d'un système de production électrique par la cellule photovoltaïque", thèse de magister, université Badji mokhtar Annaba, 2010.

[9] <https://portail.cder.dz/spip.php?article3354>

[10] <http://perspective.usherbooke.ca/bilan/tend/dza/fr/sp.pop.totl.html>

[11] **Camara Mohamed Ansoumane**, "modélisation du stockage de l'énergie photovoltaïque par super condensateurs", thèse de doctorat, université de paris, 2011.

[12] **Atmania Hanane**, "la stratégie d'implantation des énergies renouvelables en Algérie cas de la photovoltaïque", thèse de magister, université d'oran-2-mohamed ben Ahmed, 2015

[13] [www.udes.dz](http://www.udes.dz)

[14] <http://www.google.com>

[15] [www.lefinancier.dz](http://www.lefinancier.dz)

[16] [www.auressolair.dz](http://www.auressolair.dz)

[17] [www.condor.com](http://www.condor.com)

[18] **Berrezzoug Hanane**, "principe de fonctionnement et mesure des caractéristiques d'une cellule photovoltaïque", mémoire de master, université Dr. Moulay Tahar de Saida, 2016.

[19] <https://www.ecosources.info/dossiers/centrale-solaire-tour-effet-cheminee>

[20] <https://www.algerie-eco.com>

[21] <http://www.geowiki.fr/encyclopédie>

[22] **Gilles Dour**, "tirage demi-continu de silicium photovoltaïque multi cristallin en creuset froid inductif", thèse de doctorat INP de Grenoble, 1996.

[23],[24] [https://www.encyclopedie-energie.org/wp-content/uploads/2018/09/belkhayat\\_merieme\\_four\\_silicium\\_photovoltaique.pdf](https://www.encyclopedie-energie.org/wp-content/uploads/2018/09/belkhayat_merieme_four_silicium_photovoltaique.pdf)

[25] **Hadjab Moufdi**, "développement des performances d'un système photovoltaïque", mémoire de magister, université Djilali liabes sidi belabbes, 2011.

[26] **M. Rafik Benrabbah**, "développement de procédés plasma pour l'élaboration et la caractérisation du silicium photovoltaïque -dépôt de couches minces épitaxiales de silicium par pecvd -mesure de la pureté du silicium à l'état solide (20°C) et liquide (1414°C) par lib", écoles doctorales génie des procédés et technologies avancées & sciences mécanique acoustique, électronique & robotique de paris, université pierre et marie curie, 2015.

[27] **Doumane Radhia**, "modélisation du vieillissement d'une cellule photovoltaïque au silicium et de ses matériaux d'encapsulation", thèse de doctorat, université M'Hamed bougera Boumerdes, 2018.

[28] **Bounouar Malika**, "étude de la purification du silicium destiné à la réalisation de cellules", mémoire de magister, université mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2015.

[29] **Belarbi Moussaab**, "contribution à la modélisation des paramètres électriques des cellules solaires sensibilisées par colorant", thèse doctorat, université Tlemcen, 2016.

[30] **Louzazna Brahim et Madi Salim**, "étude et caractérisation d'un panneau photovoltaïque type condor", mémoire de master en électrotechnique, université de Bejaïa, 2015.

[31] <https://hal.archives-ouvertes.fr/>

[32] **Yesref Djamel**, "optimisation d'une cellule solaire à base du silicium poly cristallin en couche mince déposé sur un substrat en céramique", mémoire de magister, université Abou-Bakr Belkaid – Tlemcen, 2013.

[33] **G. Nouet, et al**, "le silicium poly cristallin polix : élaboration, propriétés et performances", revue phys. appl. 22 (1987) 535-547.

[34] **Yves Boussant-roux**, "les procédés de refusions en creuset froid : analyse des paramètres clés", thèse de doctorat de l'INP, Grenoble 1990.

[35] **Sophie Plan Servant**, "élaboration semi-continue de silicium multi cristallin en creuset froid inductif", thèse de doctorat, de l'institut national polytechnique de Grenoble, 1993.

[36] **H. Boulechfar**, "simulation numérique des contraintes thermodynamiques dans le silicium photovoltaïque", rapport de stage de D.E.A d'énergétique physique, laboratoire epm-madylam, Grenoble, 2002.

[37] **Malek Benmansour**, "développement, contrôle et modélisation d'un procédé de projection de poudres de silicium par plasma rf – application aux couches minces photovoltaïques", thèse de doctorat, l'université pierre et marie curie, 2003.

[38] **Ouddah Mourad**, "étude du silicium poreux destine aux cellules solaires", mémoire de magister, université Mentouri Constantine, 2009.

[39] **Fatoumata Bintou Santara**, "cristallisation du silicium photovoltaïque sous induction électromagnétique : étude d'une vanne de rétention et de la ségrégation sous brassage", thèse de doctorat, université de Grenoble, 2010.

[40] **Anne Kaminski et Luc Pichon**, "étude d'un procédé de recristallisation de plaquettes de silicium fritté pour la réalisation de cellules solaires photovoltaïques", thèse de doctorat, l'institut national des sciences appliquées de Lyon, 2010.

[41] **Benmeddour Amor**, "études et simulations numériques des contraintes thermomécaniques dans le silicium photovoltaïque", thèse pour obtenir le grade de docteur en sciences, université mentouri – Constantine, 2010.

[42] **M. Eliezer Nir**, "analyse multi élémentaire des impuretés du silicium par libs", thèse de doctorat, l'université pierre et marie curie, 2011.

[43] **Huang Feng et Al**, "continuous melting and directional solidification of silicon ingot with an electromagnetic cold crucibles", vol.9 no.1 ,school of materials science and engineering, harbin institute of technology, 2012

[44] **Zabardjade Saidbacar**, "élaboration et caractérisations du silicium poly cristallin par cristallisation en phase liquide du silicium amorphe", thèse de doctorat, universite paris sud, 2012.

[45] **Maïlys Grau**, "réalisation de nouvelles structures de cellules solaires photovoltaïques à partir de couches minces de silicium cristallin sur substrat de silicium préparé par frittage de poudres", thèse doctorat, le 4 mai 2012.

[46] **Nekous Mohamed**, "élaboration du silicium à partir du sable du désert algérien", mémoire de magister, université des sciences et de la technologie d'Oran, 2013

[47] **Amina Tandjaoui**, "solidification dirigée du silicium multi-cristallin pour les applications photovoltaïques : caractérisation in situ et en temps réel par imagerie x synchrotron", thèse de doctorat, université d'Aix-Marseille, 2013.

[48] **P. Bellanger et al**, "polycrystalline silicon films obtained by crystallization of amorphous silicon on aluminum based substrates for photovoltaic applications", université de Strasbourg CNRS, 636 (2017) 150–157.

[49] <http://www.lepanneausolaire.net/la-fabrication-cellules-photovoltaiques.php>

[50] **Mr. Bouras Abdellatif**, "caractérisation des matériaux organiques pour la réalisation des cellules solaires", diplôme de magister, université Mohammed Chérif Messadia Souk Ahras, 2013.

[51] [http://cmdo.cnrs.fr/img/pdf/ferrand\\_czochralski.pdf](http://cmdo.cnrs.fr/img/pdf/ferrand_czochralski.pdf)

[52] **Mekemeche Abdelkader**, "modélisation à deux dimensions des propriétés physiques de cellules solaires au silicium à base de substrat de type n. Étude de quelques cas particuliers de cellules innovantes", thèse de doctorat, l'université Abdel Hamid ibn badis de Mostaganem, 2017.

[53] **Abdi Zohir**, "étude comparative par simulation numérique des cellules base de silicium", mémoire de master, université Boubakra Belaud Tlemcen, 2017.

[54] <https://www.encyclopedie-energie.org/les-fours-de-cristallisation-du-silicium-photovoltaique/>

[55] <https://www.controles-essais-mesures.fr/actualite-2524-simuler-pour-le-solaire>

[56] revue annuelle de la CEA, "les matériaux au cœur du processus d'innovation", n°59 clefs été 2010 Issn 0298-6248.

[57] <https://www.siris-induction.fr/applications/>

[58] <http://fr.ambrell.com/applications.html>

[59] <https://www.ifram.com>

[60] **Soualmia Asma**, "conception et modélisation d'inducteurs pour la fusion par induction", université Constantine I, 2014.

[61] Comsol multiphysics quick start and quick reference book version 3.5a ©copyright 1998–2008

## ملخص

عملنا يتعلق بدراسة ومحاكاة عددية لعملية إعداد سبائك السيليكون متعدد البلورات بهدف تصنيع الخلايا الكهروضوئية بطريقة الصب المستمر للسيليكون السائل داخل جهاز إعداد السبائك والذي يعرف بإسم البوتقة الباردة. المحاكاة العددية للتبادلات الحرارية بين سبيكة السيليكون و المكونات المختلفة للجهاز أثناء عملية الإنتاج تمت باستعمال برنامج COMSOL Multiphysics و قد مكنتنا النتائج من معرفة التوزيع الحراري داخل سبيكة السيليكون بحيث يمكننا التحكم في مختلف المعايير أثناء العملية بغرض إنتاج خلايا كهروضوئية ذات مردود عال.

**الكلمات المفتاحية :** السيليكون متعدد البلورات , الحث الكهرومغناطيسي , البوتقة الباردة , التسخين بتأثير جول , المحاكاة العددية , الخلايا الكهروضوئية.

## Abstract

Our work concerns a study and numerical simulation of the polycrystalline silicon process by continuous casting inside the cold crucible for the fabrication of photovoltaic cells. The numerical simulation of the heat exchange inside the silicon ingots during the various stages of the process was performed using COMSOL Multiphysics. The results obtained permitted us to know the thermal field inside the silicon ingot so we can control the various parameters during the process in order to produce high efficiency photovoltaic cells.

**Keywords:** Polycrystalline silicon, electromagnetic induction, cold crucible, Joule heating, numerical simulation, photovoltaic cells.

## Résumé

Notre travail porte sur l'étude et la simulation numérique du procédé d'élaboration du silicium polycristallin par coulée continue dans un creuset froid pour la fabrication de cellules photovoltaïques. La simulation numérique des échanges thermiques au cours des différentes étapes du procédé est réalisée par COMSOL Multiphysics. Les résultats obtenus ont permis de connaître le champ thermique à l'intérieur du lingot de silicium afin de contrôler les paramètres au cours de son élaboration pour produire des cellules photovoltaïques avec un rendement élevé.

**Mots-clés:** Silicium polycristallin, induction électromagnétique, creuset froid, chauffage par effet Joule, simulation numérique, cellules photovoltaïques.