

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم والبحث العلمي
العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة بوعباكر بكري
تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Génie Mécanique

Spécialité : Energie renouvelables en mécanique

Par : Cheli Hanane et Sebiane Ahmed

Sujet :

*Etude et simulation par le logiciel consol multiphasique du
procédé de conception du silicium pour la réalisation des
cellules photovoltaïques*

Soutenu publiquement, le **06/ 05/ 2023/** devant le jury composé de :

Mr. Zinai Abdelhadi	Président	MCB	Université de Tlemcen
Mme. Benseddik Lila	Encadreur	MCB	Université de Tlemcen
Mr. Bensidane Mohamed	Co encadreur		Université de Mostaganem
Mme. Mostfaoui Amina	Examinatrice	MCB	Université de Tlemcen

Dédicace

Je dédie ce modeste travail A mes chers parents,

mon père « Boudjema » qui ne cesse de

m'encourager, ma mère « Fatima » symbole de

sacrifice, sans eux je ne serais pas ce que je suis

Aujourd'hui. A mes chères sœurs et frère

« Adnan, Yassine, Dgamef, Rahef, Manel »

A toute la famille : mes tentes, mes oncles, et mes

cousins et A tous mes amis

Cheli hanane

Timokten, Aoulef, Adrar

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

A mes très chères parents qui m'ont soutenue moralement et financièrement et de tendresse qu'Allah me les garde durant toute ma vie.

- + Ma mère qui a toujours cru en moi et mes études.*
- + Mon père qui m'a toujours encouragé et guidé*
- + Mes grands-mères et grands-pères.*
- + Mes frères : Lahcene, Hocine et Mohamed.*
- + Ma sœur et mon binôme Chelï Hanane qui n'a pas cessé et m'encourager tout le temps et sa respectueuse famille.*
- + Mes amies intimes : Aymen, Amine, Ahmed et Ayoub.*
- + Mes très chers cousins et cousines.*
- + A toute les familles : Sabiane grands(es) et petits(es).*
- + A tous ma promotion d'Energie renouvelable 2022/2023.*
- + A tous ceux qu'on m'a aidé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*
- + A tous ceux qui me connaissent.*

Sebiane Ahmed

Remerciement

Je remercie Allah de m'avoir donné la volonté, la santé et la patience durant toutes ces longues années d'étude Je remercie avant tous à exprimer ma profonde gratitude à madame « Benseddik » pour la confiance qu'elle m'a donnée afin de pouvoir réaliser ce travail et pour son soutien et ces conseils le long de la préparation de ce projet

Je remercie « le chef département » et les professeurs qui m'ont enseigné de la première à la deuxième année Salutation à mes camarades de spécialité « deuxième master à énergies renouvelables en mécanique » En fin, on s'adresse nos remerciements à tous ceux ou celles qui nous ont apportés de l'aide que ce soit du près ou du loin lors la réalisation de ce modeste travail.

تلخيص ،

يرتبط عملنا بالدراسة الرقمية ومحاكاة عملية علاج السيليكون عن طريق التدفق المستمر في بوتقة باردة لصنع الخلايا الكهروضوئية. يتم إجراء التبادلات الحرارية الرقمية خلال المراحل المختلفة من العملية بواسطة comsol متعددة الفيزياء. جعلت النتائج التي تم الحصول عليها من الممكن معرفة المجال الحراري داخل سبيكة السيليكون من أجل التحكم في المعلمات أثناء تطوره لإنتاج الخلايا الكهروضوئية عالية الكفاءة.

الكلمات الافتتاحية :

الخلايا الكهروضوئية الحث الكهرومغناطيسي المحاكاة السيليكون البوتقة الباردة

Résumé

Notre travail est lié à l'étude numérique et à la simulation du processus de traitement du silicium par flux continu dans un creuset à froid pour fabriquer des cellules photovoltaïques. Des simulations numériques d'échanges thermiques sont effectuées au cours des différentes étapes du processus par COMSOL Multiphasiques. Les résultats obtenus ont permis de connaître le champ thermique à l'intérieur de l'alliage de silicium afin de contrôler les paramètres pendant son développement pour réaliser les cellules photovoltaïques avec rendement élevée.

Mots-Clés : cellule photovoltaïque, silicium, simulation, induction électromagnétique, creuset froid

Abstract

Our work is linked to the digital study and the simulation of the silicone treatment process by continuous flow in a cold crucible to make photovoltaic cells. Digital thermal exchanges are carried out during the different stages of the process by Multiphysics Comsol. The results obtained made it possible to know the thermal field within the silicon alloy in order to control the parameters during its development to produce the high -efficiency photovoltaic cells.

Keywords:

Photovoltaic cell, silicon, simulation, electromagnetic indication, cold crucible

Tableaux des notations :

E	Energie calorifique [J]
t	Temps [S]
R	La résistance du conducteur [Ω]
I	L'intensité du courant [A]
E	Coefficient de Young [Pa]
ϕ	Source de chaleur [J]
ν	Coefficient de poisson
ρ	La résistivité électrique [$\Omega \cdot m$]
σ	Conductibilité [S.m-1]
μ	La perméabilité magnétique absolue du milieu [H. m-1]
Vco	Tension de circuit ouvert.
K	constante de Boltzmann.
T	température en kelvin
q	charge élémentaire $1,6 \cdot 10^{-19}$ (C).
Icc	Courant de court-circuit.
Id	Courant de saturation de diode
QE(λ)	Réponse spectrale,
(λ)	Le flux de photon incidents à la même longueur d'onde
h	Constante de Planck (J.s).
ν	Fréquence (s^{-1}).
C	Vitesse de la lumière dans le vide (m.s).
λ	Longueur d'onde (m)
Nc	La densité effective d'état des électrons.
Nv	La densité effective d'état des trous.
Ec	L'énergie de la bande de conduction.
Ev	L'énergie de la bande de valence.
Eg	L'énergie de la bande interdite (le Gap).
$m^* h$	Les masses effectives respectives des électrons et des trous.
m	La densité du courant de court-circuit,
e	La charge élémentaire de l'électron

Sommaire

DEDICACE

REMERCIEMENT

RESUME

LISTE DE NOTATION

LISTE DE FIGURE

LISTE DE TABLEAU

INTRODUCTION GENERALE

Chapitre I : généralité sur L'énergie solaire photovoltaïque

I.1 Introduction	4
I.2 Soleil :	4
I.3 Rayonnement solaire	4
I.3.1 Spectre solaire	5
I.3.2 Constante solaire	6
I.3.3 Convention air mass	6
I.4 Rayonnement globale	7
I.4.1 Rayonnement direct	8
I.4.2 Rayonnement réfléchi	8
I.4.3 Rayonnement diffus	8
I.5 Effet photovoltaïque	8
I.5.1 Cellule photovoltaïque	9
I.5.2 Principe de fonctionnement de cellule	10
I.5.3 La caractéristique $I(v)$ d'une cellule photovoltaïque	11
I.5.3.1 Courant de court circuit (I_{cc})	11
I.5.3.2 tension circuit ouvert (V_{co})	11
I.5.3.3 Point du fonctionnement P_m (V_m, I_m)	12
I.5.3.4 Facteur de forme (FF)	12
I.5.3.5 Réponse spectrale	12
I.5.3.6 Rendement (η)	13
I.5.3.7 Le rendement quantique, EQE	13

I.6 Semi Conducteur	14
I.6.1 Notion de Bande intrdite (gap)	14
I.6.2 Semi-conducteurs intrinsèques	14
I.6.3 Semi-conducteurs extrinsèques	15
I.6.4 Dopage des semi-conducteurs	15
I.6.4.1 Semi-conducteur dopé N	15
I.6.4.2 Semi-conducteur dopé P	15
I.7 Jonction P N	16
I.7.1 Jonction PN polarisée	17
I.7.1.1 Polarisation directe	17
I.7.1.2 Polarisation inverse	17
I.8 Les différents technologie de la conversion d'énergie	18
I.8.1 Solaire thermodynamique	18
I.8.2 Solaire thermique	19
I.8.3 Cheminé solaire	19
I.8.4 Solaire photovoltaïque	20
I.9 Développement du photovoltaïque en Algérie	21
I.9.1 Niveaux d'ensoleillement en Algérie	21
I.9.2 Niveau d'ensoleillement en Afrique	21
I.9.3 Niveau d'ensoleillement dans le Monde	22
I.9.4 Gisement solaire en Algérie	23
I.9.5 Consommation d'énergie en Algérie	24
I.9.6 Réalisation photovoltaïque en Algérie	25
I.9.6.1 Unité de développement des équipements solaires (L'UDES)	25
I.9.6.2.1. le projet de rouiba éclairage	27
I.9.6.2 La société Aurée solaire	27
I.9.6.3 L'usine Condor Electroniques pour la production des panneaux solaires :	28
I.10 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque	28
I.10.1 Inconvénients	28
I.10.1 Avantages	29
I.11 Conclusion	29
<i>Chapitre II: les procédé d'élaboration du silicium photovoltaïque</i>	
II.1 Introduction	31
II.2 Silicium	31

II.2.1	Défèrent état de silicium	31
II.2.1.1	État cristalline	31
II.2.1.2	État Amorphe	31
II.2.1.3	État Polycristalline	32
II.3	Les paramètres affectant le rendement	33
II.3.1	Les impuretés	33
II.3.2	Défauts cristallins	33
II.3.3	Défauts ponctuels	34
II.4	Techniques pour élaboration du Si polycristallin	34
II.4.1	Procédé de croissance dirigée	34
II.4.2	Le principe du procédé 4C exploite par EMIX	35
II.4.3	La coulé continue (EMCP)	35
II.5	Techniques pour élaboration du Si monocristallin	36
II.5.1	Elaboration du silicium par la méthode de Cz ochralski « CZ »	36
II.5.2	Le procédé de Fusion de Zone (FZ)	37
II.6	Techniques pour élaboration du Si amorphe	38
II.6.1	La technique RST	38
II.6.2	La technique EFG	38
II.7	Technique de couches minces	39
II.7.1	Dépôt Chimique en phase vapeur (CVD)	39
II.7.2	Dépôts physiques en phase vapeur (PVD)	39
II.8	Description de l'installation	39
II.8.1	Le creuset froid	40
II.8.2	L'inducteur	41
II.8.3	Le four zénithal	41
II.8.4	Le four de recuit	41
II.9	Silicium Polycristalline	41
II.9.1	Propriétés électriques	41
II.9.1.1	Effet du dopage sur les caractéristiques électriques	41
II.9.1.2	Influence de la température de dépôt sur la résistivité du silicium polycristallin	42
II.9.2	Propriétés structurales	43
II.9.2.1	Structure d'un film de silicium polycristallin	43
II.9.2.2	Effet de la température sur la taille des grains	44

II.9.3 Propriétés de transport des porteurs dans le silicium polycristallin	44
II.9.3.1 Modèle de ségrégation des dopants	44
II.9.3.2 Modèle de piégeage des porteurs	45
II.9.4 Défauts dans le silicium polycristallin	45
II.9.4.1 Les défauts cristallographiques	45
II.9.4.2 Les défauts chimiques	46
II.10 Chauffage par induction électromagnétique	47
I.11 Conclusion	48

Chapitre III : résultat et interprétation

III.1 Introduction	50
III.2. Présentation du logiciel COMSOL Multi-physiques	50
III.2.1 Les avantages	51
III.2.2 Les inconvénients	51
III.3 Description de l'interface COMSOL	51
III.4 Etape 1 : Mettre en place un environnement du modèle	52
III.5 Etape 2 : La fenêtre « Ajouter des physiques »	52
III.6 Etape 3 : La fenêtre « Géométrie »	53
III.7 Etape 4 : La fenêtre « Matériel »	56
III.8 Etape 5 : La fenêtre « Maillage »	57
III.9 Etape 6: La fenêtre « étude »	58
III.10 Etape 7 : La fenêtre « Résultats »	58
III.11 Conclusion	60

●LISTE DES FIGURES :

CHAPITRE I :

fig (1 .1) : la structure interne du soleil.	4
fig (I.2) : le rayonnement solaire	5
fig (I.3) : analyse spectrale du rayonnement solaire	6
fig (I.4) : notion air masse	7
fig (I.5) : types de rayonnement solaire reçus au sol	7
fig (I.6) : principe de l'effet photovoltaïque	9
fig (I.7) : les cellules solaires	10
fig (I.8) : le principe de fonctionnement de cellule photovoltaïque	10
fig (I.9) : caractéristique du cellule	11
fig (I.10) : réponse spectrale d'une cellule amorphe et d'une cellule cristalline	13
fig (I.11) : silicium dopé au phosphore (a) à $t = 0$ °k et, (b) à $t \neq 0$ °k	15
fig (I.12) : : silicium dopé au bore (a) à $t = 0$ k et, à (b) $t \neq 0$ k	16
fig (I.13) : jonction pn : (a) avant contact ; (b) après contact	16
fig (I.14) : jonction pn polarisée en direct	17
fig (I.15) : jonction pn polarisée en inverse	18
fig (I.16) : solaire thermodynamique	18
fig (I.17) : solaire thermique	19
fig (I.18) : cheminé solaire	20
fig (I.19) : solaire photovoltaïque	20
fig (I.20) : niveau d'ensoleillement en algérie	21
fig (I.21) : niveau d'ensoleillement en afrique	22
fig (I.22) : carte l'ensoleillement moyen annuel dans le monde	23
fig (I.23) : la croissance démographique en algérie entre 1960-2015	24
fig (I.24) : la consommation énergétique en algérie entre 1971-2020	25
fig (I. 25) : l'usine de rouïba éclairage	27
fig (I.26) : aurès solaire	28
fig (I. 27) : l'usine de condor électronique	28

CHAPITRE II :

fig (II.1) : le silicium monocristallin [31
fig (II 2) le silicium amorphe	32
fig (II.3) : silicium poly-cristallin	33
fig (II.4) : cristallisation d'un lingot polycristallin par solidification dirigée	34

fig (II .5) : procédé 4c exploitée par emix	35
fig (II. 6) : cristallisation d'un lingot par la méthode cz	36
fig (II.7) : procédé de fusion de zone	37
fig (II.8) : des lingots de silicium monocristallin	38
fig (II .9) : schéma de la technique de tirage efg de silicium en ruban et photographie du dispositif et des plaquettes obtenues	39
fig (II.10) : le creuset froid inductif	40
fig (II.11) : vue extérieure du "creuset froid" en cours de chauff	40
fig (II.12) : résistivité du silicium poly et monocristallin en fonction du niveau de dopage	42
fig (II .13) : résistivité du silicium polycristallin en fonction de la température de dépôt	43
fig (II.14) : structure colonnaire	43
fig (II.15) : structure granulaire	44
fig (II 16) : taille moyenne des grains en fonction de la température de dépôt de silicium polycristallin (épaisseur du dépôt 0.5 μm)	44
fig (II.17) : schématisation à deux dimensions d'un joint de macle	46
fig (II.18) : le chauffage par induction électromagnétique	47
fig (II.19) : principe du chauffage par induction électromagnétique	48
fig (III.1) : l'interface comsol	51
fig (III.2): fenêtre description des dimensions	52
fig (III.3): fenêtre de domaine étudier	53
fig (III.4) : fenêtre du domaine étudié	53
fig (III.5) : la structure réalisée	54
fig (III.6) : illustre une vue en coupe transversale de la géométrie	56
fig (III.7): fenêtre de type matériaux	57
fig (III.8): fenêtre de réalisation maillage	58
fig III.9) : fenêtre de type d'étude	58
fig (III.10): la géométrie dans le domaine de l'air	59
fig (III.11) : évaluation temporelle de la température pour une fréquence de 10khz. a 0min	61
fig (III.12) : évaluation temporelle de la température pour une fréquence de 10khz. a 2min	62

fig (III.13) : 'évaluation temporelle de la température pour une fréquence de 10khz.a	
10 min	62
fig (III.14) : évaluation temporelle de la température pour une fréquence de 10khz.a	
60 min	63
fig (III.15) :évaluation temporelle de la température pour une fréquence de 10khz.a	
60 min	64
fig (III.16) : évaluation temporelle de la température pour une fréquence de 20khz. a	
2min	64
fig (III.17) : évaluation temporelle de la température pour une fréquence de 20khz. a	
10 min	65
fig (III.18) : évaluation temporelle de la température pour une fréquence de 20khz. a	
60min	65
fig (III.19) : évaluation temporelle de la température pour une fréquence de 30khz a	
0min	66
fig (III.20) évaluation temporelle de la température pour une fréquence de 30khz. a	
2 min	67
fig (III.21) : évaluation temporelle de la température pour une fréquence de 30khz. a	
20min	67
fig (III.22) : évaluation temporelle de la température pour une fréquence de 30khz. a	
60min	68
fig (III.23) : l'évolution de la température du système	69
fig (III.25) : Germe est placé dans le creuset suspendue au-dessus du liquide par une tirage	70
fig (I II.26) : Evaluation de la température Pour le 1er stade du tirage	70
fig (III.27) : Evaluation de la température Pour le 2eme stade du tirage	70
fig (III.28) : Evaluation de la température Pour le 3eme stade du tirage	71
fig (III.28) : Evaluation de la température Pour le 4eme stade du tirage	71
fig (III.29) : les mécanismes de transfert de chaleur durant le tirage	72

LISTE DES TABLEAUX :

Chapitre I :

tableau (i.1) : potentiel solaire	23
tableau (i.2): quelques projets photovoltaïques realises par l'udes	27

Introduction générale



Introduction Générale

Le rayonnement solaire est la meilleure et la plus abondante source d'énergie partageable sur la terre. L'énergie libérée par le soleil et absorbée par la terre en une heure suffit à répondre à la demande énergétique du monde entier pendant une année. On peut dire que le soleil déverse l'équivalent de 1 000 000 de tonnes de pétrole. Une partie du rayonnement peut être utilisée pour générer directement de la chaleur (énergie solaire thermique) ou de l'électricité : c'est l'énergie solaire photovoltaïque. [4]

L'énergie solaire photovoltaïque est une forme d'énergie renouvelable qui permet la production d'électricité en convertissant une partie du rayonnement solaire en un module solaire photovoltaïque comprenant plusieurs cellules photovoltaïques reliées entre elles.

Le silicium cristallin reste la technologie dominante en photovoltaïque. En effet, plus de 93% des modules photovoltaïques sont en silicium cristallin. D'autre part, une nouvelle génération de modules PV couches minces (silicium amorphe, autres technologies CIS, Cd Te, etc.) apparaît progressivement sur le marché. Du fait des faibles performances des modules photovoltaïques traditionnels en silicium cristallin, l'utilisation de ces modules photovoltaïques et leur développement industriel à grande échelle sont encore relativement limités. Cependant, leur technique de fabrication montre un grand potentiel pour réduire considérablement le coût des modules photovoltaïques [3]

La simulation de processus électromagnétiques et thermiques couplés à l'aide de COMSOL Multiphysics peut être un outil puissant pour comprendre et optimiser un large éventail d'applications, telles que le chauffage par induction et la coulée électromagnétique. En couplant les modules Champs Magnétiques et Transfert de Chaleur dans les Solides de COMSOL, nous pouvons modéliser l'interaction entre les champs électromagnétiques et les phénomènes de transfert de chaleur dans une variété de matériaux.

Dans ce contexte, le travail présenté dans ce mémoire concerne le procédé d'élaboration du silicium pour la fabrication des cellules photovoltaïque par logiciel comsol Multiphysics est présentée selon le plan suivant :

Introduction Générale

D'abord, Dans le premier chapitre nous expliquons l'énergie solaire photovoltaïque en générale à savoir le principe de fonctionnement, les avantages et les inconvénients de cette énergie.

Ensuite, dans le deuxième chapitre nous donnons les différents états d'élaboration du silicium cristallin photovoltaïques et les techniques de chaque type.

En dernier chapitre nous avons présenté la simulation du procédé d'élaboration du silicium cristallin pour la fabrication des cellules photovoltaïque par le logiciel Comsol Multiphysics.

Chapitre I :

Généralités sur L'énergie solaire photovoltaïque



I.1 Introduction :

Le soleil est la source essentielle de tout rayonnement reçu par la terre, ce dernier lui procure l'énergie, la chaleur et la lumière qui sont nécessaires à toute forme de vie

L'énergie solaire est une énergie renouvelable la plus importante de toutes les énergies renouvelables et possède de nombreux atouts sur le plan environnemental qu'économique. L'Algérie est un pays grand consommateur d'énergie.

I.2 Soleil :

Le soleil est une sphère gazeuse de $1,392 \cdot 10^9$ m de diamètre ; c'est une étoile résultant de la condensation d'un nuage interstellaire sous l'effet de la gravité. Ce type de nuage est essentiellement composé d'hydrogène, d'hélium, et dans une moindre mesure de carbone, d'azote et d'autres éléments. Le noyau du Soleil (400.000 Km de diamètre) à une température de l'ordre de $15 \cdot 10^6$ a $16 \cdot 10^6$ K et agit comme un réacteur thermonucléaire. Les réactions de fusion nucléaire y transforment l'hydrogène en Hélium en libérant $4 \cdot 10^9$ kg/s d'énergie de masse selon la célèbre équation d'Einstein :

$$E = mc^2 \quad [1]$$

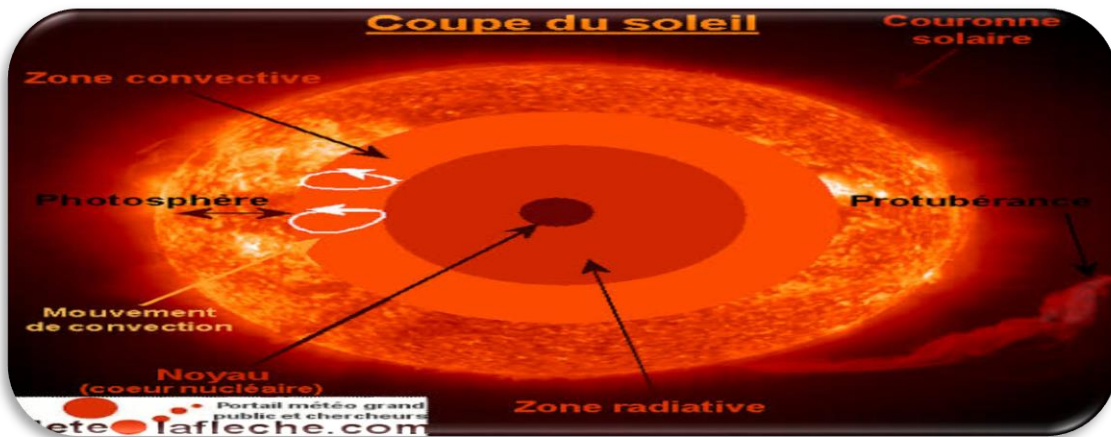


Fig (1.1) : La structure interne du soleil.

[2]

I.3 Rayonnement solaire :

La distance de la terre au soleil est environ 150 million de kilomètres et la vitesse de la lumière est d'un peu plus de 300000 km/h, les rayons du soleil mettent donc environ 8 minutes à nous parvenir. La constante solaire est la densité d'énergie solaire qui atteint la frontière externe de l'atmosphère faisant face au soleil. Sa valeur est communément

prise égale à 1360 W/m^2 . Au niveau du sol, la densité d'énergie solaire est réduite à 1000 W/m^2 à cause de l'absorption dans l'atmosphère. Albert Einstein a découvert en travaillant sur l'effet

Photo électrique que la lumière n'avait pas qu'un caractère ondulatoire, mais que son énergie est portée par des particules, les photons. L'énergie d'un photon étant donnée par la relation [2]

$$E_{ph} = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (\text{I.1})$$

Avec :

h : Constante de Planck (J.s).

ν : Fréquence (s^{-1}).

c : Vitesse de la lumière dans le vide (m.s).

λ : Longueur d'onde (m).

Ainsi, plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande.

Une façon commode d'exprimer cette énergie est $E_{ph} = 1.24/\lambda$

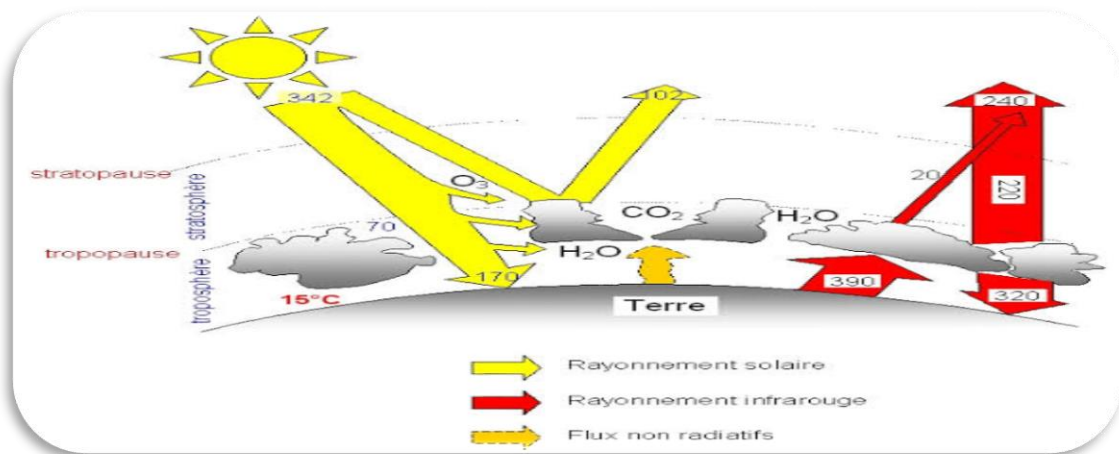


Fig (I.2) : le rayonnement solaire [14]

I.3.1 Spectre solaire

La lumière du soleil se compose de nombreux types de rayonnement de différentes couleurs et de longueurs d'onde, c'est ce qu'on appelle le spectre solaire, qui est caractérisé par sa gamme de longueur d'onde. Il y a une relation entre les photons qui forment le rayonnement électromagnétique et l'énergie associée à leur longueur d'onde donnée par [14]

$$E = hc/\lambda \quad (I.2)$$

Avec : h : la constante de Planck. c : la vitesse de la lumière. λ : la longueur d'onde [3]

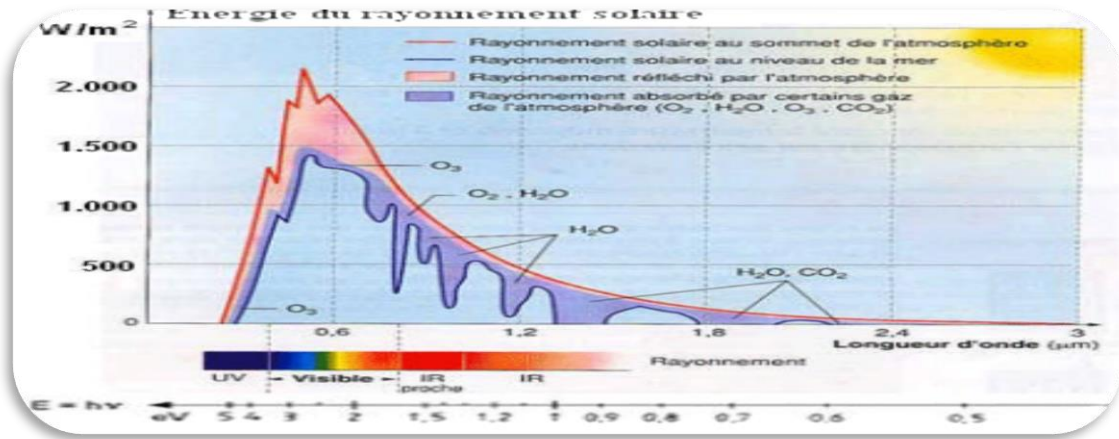


Fig (I.3) : Analyse spectrale du rayonnement solaire [3]

I.3.2 Constante solaire

L'énergie solaire reçue à la surface de l'atmosphère est estimée à 1360 W/m², cependant elle s'atténue et perd en intensité en traversant l'atmosphère, ne dépassant pas 1000 W/m² à la surface de la terre du fait de l'absorption dans cette dernière. La constante solaire varie selon la situation géographique du site (latitude), la saison, le temps, les conditions climatiques (nébulosité, poussière, humidité, etc.) et l'altitude du lieu. [2]

$$C_{t-s} = 1 + 0.034 \cos\left(\frac{360}{365}(j - 2)\right) \quad (I.3)$$

Avec :

J : le nombre de jour de l'année.

La constante solaire corrigée est donc :

$$I = I_0 \cdot C_{t-s} \quad (\text{W/m}^2) \quad (I.4)$$

I.3.3 Convention air masse

C'est la masse de l'atmosphère traversée par le rayonnement solaire. Pour évaluer cette qualité, nous utilisons le concept de « qualité de l'air », qui définit un spectre de référence pour la normalisation des performances photovoltaïques. AM0 représente le spectre au bord de l'atmosphère, AM1 représente le spectre lorsque le soleil atteint la

surface de la terre à l'apogée (zénith), AM1.5 représente le spectre standard atteignant la surface de la terre à un angle de $48,2^\circ$ de la terre à une atmosphère et demie, et AM2 représente l'atteinte de la Terre à un spectre de surface de $60,1^\circ$

[3]

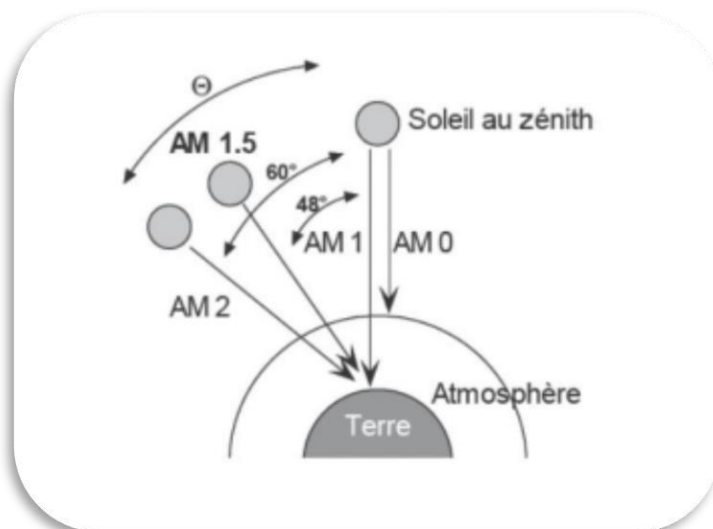


Fig (I.4) : Notion Air Masse

I. Rayonnement, globale :

Un plan reçoit de la part du sol un rayonnement global qui est le résultat de la superposition des trois compositions direct, diffus et réfléchi [4]



Fig (I.5) : Types de rayonnement solaire reçus au sol [9]

I.4.1 Rayonnement direct :

La conversion du rayonnement direct E_D est une question trigonométrique. Le rayonnement direct, sur le plan horizontal, est la différence entre le rayonnement global et le rayonnement diffus [5]

I.4.2 Rayonnement réfléchi :

C'est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige, etc...). [5]

I.4.3 Rayonnement diffus :

C'est la partie du rayonnement provenant du soleil, ayant subi multiples réflexions (dispersions), dans l'atmosphère [4]

I.5 Effet photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque se manifeste quand un photon est absorbé dans un matériau composé de semi-conducteurs dopés p (positif) et n (négatif), dénommé comme jonction p-n (ou n-p). Sous l'effet de ce dopage, un champ électrique est présent dans le matériau de manière permanente (comme un aimant possède un champ magnétique permanent). Quand un photon incident (grain de lumière) interagit avec les électrons du matériau, il cède son énergie ($h\nu$) à l'électron qui se retrouve libéré de sa bande de valence et subit donc le champ électrique intrinsèque. Sous l'effet de ce champ, l'électron migre vers la face supérieure laissant place à un trou qui migre en direction inverse. Des électrodes placées sur les faces supérieure et inférieure permettent de récolter les électrons et de leur faire réaliser un travail électrique pour rejoindre le trou de la face antérieure, ainsi se crée un courant électrique. [6]

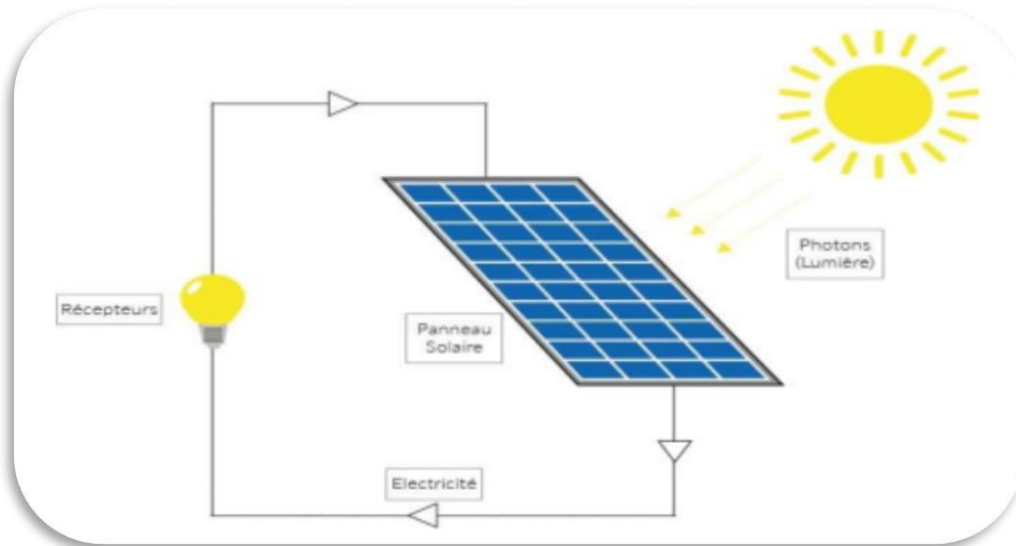


Fig (I.6) : principe de l'effet photovoltaïque [3]

I.5.1 Cellule photovoltaïque

La cellule PV ou encore photopile est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semi-conducteurs et transforme directement l'énergie lumineuse en énergie électrique. Les cellules photovoltaïques sont constituées de plusieurs couches : [7]

- un cristal semi-conducteur dope de type P (compose de silicium dope par un élément contenant un nombre inférieur d'électrons qu'une couche de silicium pur),
- celui-ci recouvert d'une couche très mince (d'épaisseur égale a quelques millièmes de millimètres) d'un semi-conducteur dope de type N (compose de silicium
- dope par un élément contenant un nombre supérieur d'électrons qu'une couche de silicium pur), [7]

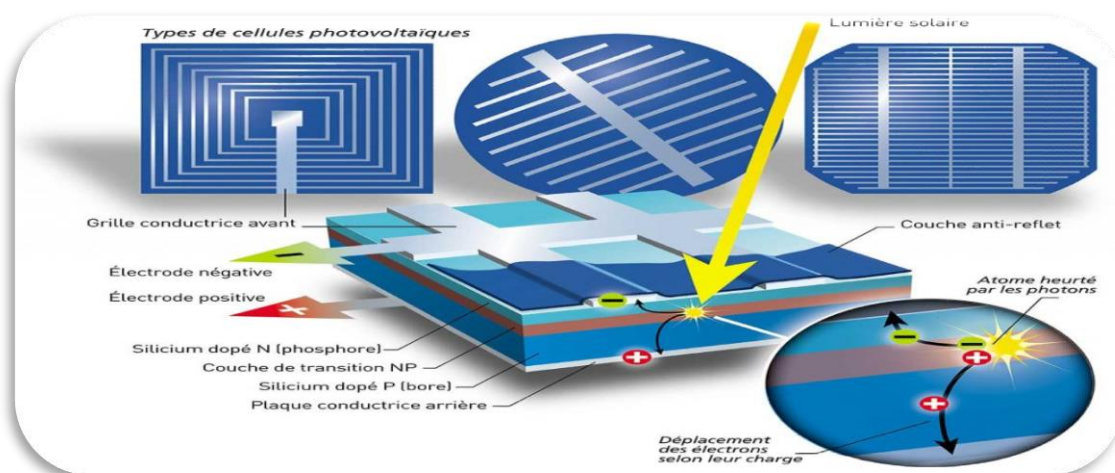


Fig (I.7) : les cellules solaires [14]

I.5.2 Principe de fonctionnement de cellule :

La conversion photovoltaïque est basée sur trois principes :

- L'absorption du maximum de l'énergie lumineuse (photons)
- La conversion, de cette énergie absorbée, en charges électriques libres,
- La collecte sans perte de ces charges dans un circuit électrique extérieur. [14]

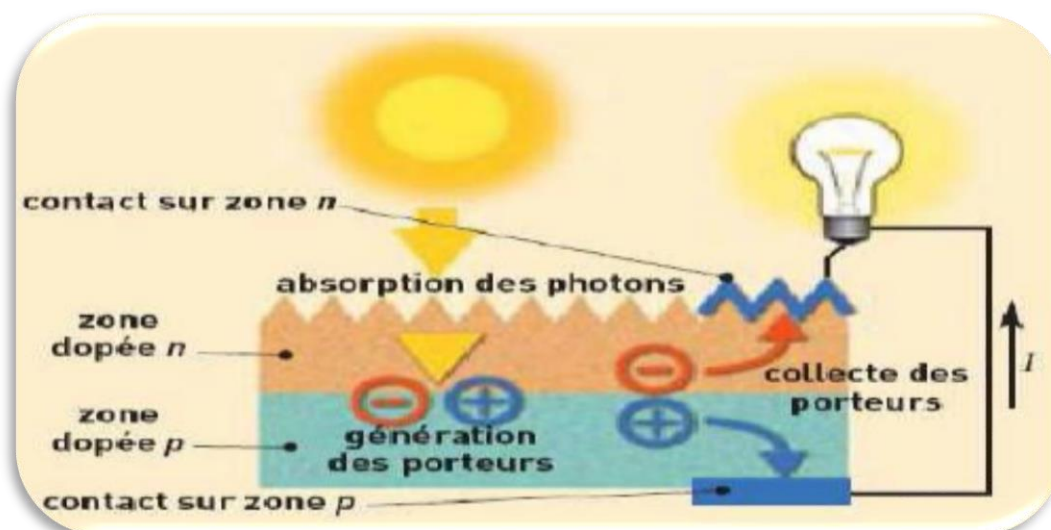


Fig (I.8) : le principe de fonctionnement de cellule photovoltaïque [14]

Par conséquent, une cellule solaire doit être composée d'un matériau absorbant ayant une bande interdite (gap) convenable dans la bande du spectre solaire (1-1.5 eV) afin de transformer l'énergie lumineuse en énergie électrique, donc de créer des charges

électriques. Ces dernières doivent être séparées par un champ électrique permanent et indestructible, puis collectées au moyen d'une structure de collecte de faible résistance. Ces deux conditions sont réunies dans les jonctions à semi-conducteurs dont la plus simple est l'homo-jonction P-N. En effet, pour comprendre le fonctionnement de la cellule solaire, nous étudierons la physique du semi-conducteur et la structure de base d'une cellule solaire qu'est la jonction P-N. [4]

I.5.3 La caractéristique I(v) d'une cellule photovoltaïque :

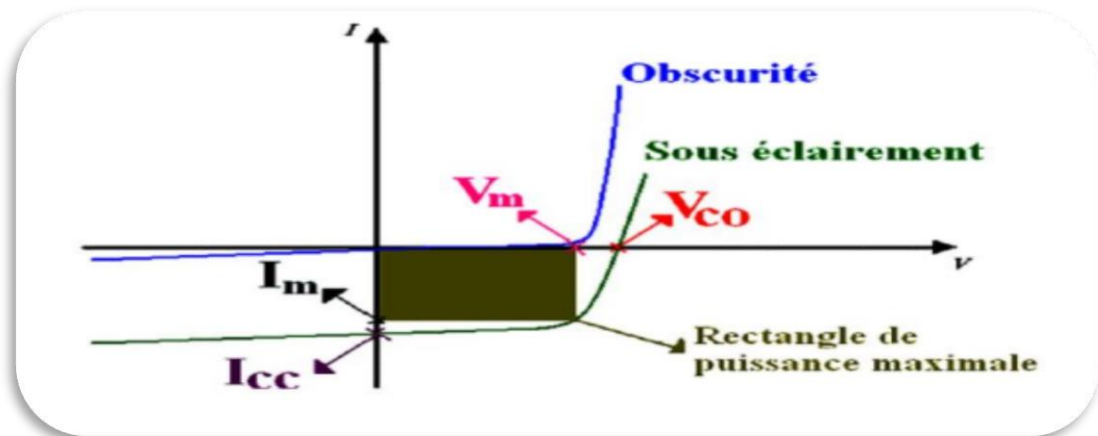


Fig (I.9) : caractéristique du cellule [3]

I.5.3.1 Courant de court-circuit (I_{cc})

Le courant de court-circuit est le courant débité par la cellule sous éclairement en court-circuitant la sortie. C'est-à-dire que : $I_{cc} = (V = 0)$ pour une cellule solaire idéale le courant de court-circuit est égal au courant photovoltaïque I_{ph} [8]

$$I_{cc} = I_{ph} \quad (I.5)$$

I.5.3.2 Tension circuit ouvert (V_{co})

C'est la tension mesure aux borne de la cellule et pour laquelle de courant débité de la cellule solaire est nul ($I=0$), elle donnée par la relation suivant [8]

$$V_{co} = \frac{KT}{q} \ln \left(\frac{I_{cc}}{I_s} + 1 \right) \quad (I.6)$$

I.5.3.3 Point du fonctionnement P_m (V_m , I_m)

La puissance maximale d'une cellule photovoltaïque éclairée est la grandeur essentielle pour évaluer sa performance ; elle est donnée par la relation :

$$P_m = V_m * I_m \quad (I.7)$$

Elle traduit sur la caractéristique

$I(V)$ le point du fonctionnement

P_m (V_m , I_m) qui est situé au coude de la caractéristique

$I(V)$ et dit point de puissance maximale où les valeurs de tension

V_m et du courant I_m appelées également tension et courant maximums respectivement

I.5.3.4 Facteur de forme (FF)

Un paramètre important est souvent utilisé à partir de la caractéristique $I(V)$ pour qualifier la qualité d'une cellule ou d'un générateur **PV** : c'est le facteur de remplissage ou facteur de forme (**FF**). Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée P_{max} et la puissance formée par le rectangle $I_{cc} * V_{oc}$. Plus la valeur de ce facteur sera grande, plus la puissance exploitable le sera également. Les meilleures cellules auront donc fait l'objet de compromis technologiques pour atteindre le plus possible les caractéristiques idéales Il est défini par la relation suivante : [9]

$$FF = \frac{P_m}{V_{oc} * I_{cc}} \quad (I.8)$$

I.5.3.5 Réponse spectrale :

La réponse spectrale d'une cellule solaire PV c'est l'efficacité de la transformation d'énergie solaire en énergie électrique. Cette efficacité dépend essentiellement des caractéristiques du matériau formant la cellule solaire. La réponse spectrale s'exprime selon l'équation suivant [8]

$$Q(\lambda) = \frac{J_{sc}(\lambda)}{e\Phi(\lambda) * (1 - R(\lambda))} \quad (I.9)$$

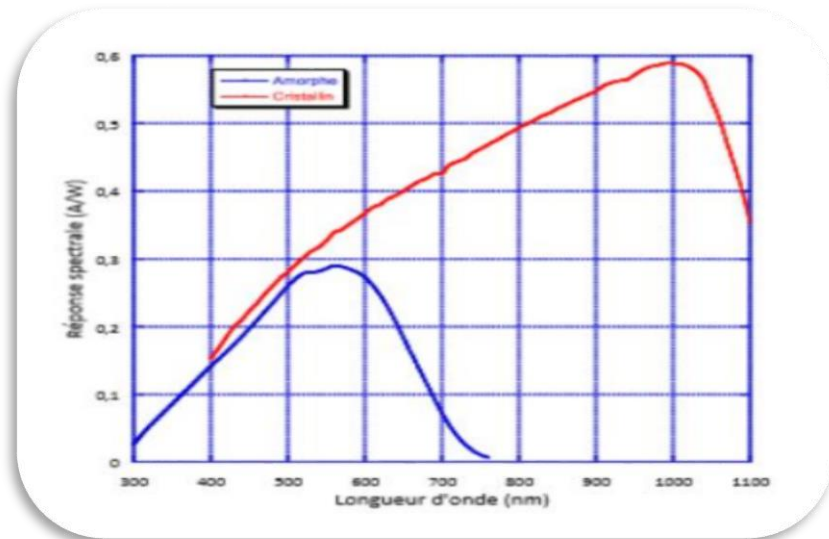


Fig (I.10) : Réponse spectrale d'une cellule amorphe et d'une cellule cristalline [3]

I.5.3.6 Rendement (η)

C'est le rendement énergétique externe de conversion de puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente P_{in} : [10]

$$\eta = \frac{P_m}{P_{inc}} = \frac{I_m \cdot V_m}{P_{in}} = FF \frac{V_{oc} \cdot I_{cc}}{P_{in}} \quad (I. 10)$$

Ce rendement peut être optimisé en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert. C'est un paramètre essentiel, car la seule connaissance de sa valeur permet d'évaluer les performances de la cellule [10]

I.5.3.7 Le rendement quantique, EQE

Le rendement quantique est le rapport entre le nombre d'électrons dans le circuit externe et le nombre de photons incidents. Lorsque les photons perdus par réflexion (à la fenêtre de la cellule) et les photons perdus par transmission à travers toute l'épaisseur de la cellule (à cause de l'absorption incomplète) ne sont pas pris en compte, cette grandeur s'appelle alors le rendement quantique interne, IQE (internal quantum efficiency). Dans le cas contraire, ce paramètre s'appelle le rendement quantique externe, EQE (external quantum efficiency). Le rendement quantique externe est défini comme suit: [9]

$$QE(\lambda) = \frac{I_{ph}(\lambda)}{q \phi_0(\lambda)} \quad (I.11)$$

I.6 Semi-Conducteur ;

I.6.1 Notion de bande interdite (gap):

L'énergie de bande interdite est la mesure de la quantité d'énergie nécessaire à un électron pour passer de la bande de valence à la bande de conduction lorsque celui-ci est soumis à une excitation. Le matériau sera appelé semi-conducteur si le gap (notée E_g , unité : eV), ou la distance énergétique entre le bas de la bande de conduction (E_c) et le sommet de la bande de valence (E_v) valence, est inférieur à 2eV c'est à dire : [11]

$$E_g = E_c - E_v \quad (I.12)$$

I.6.2 Semi-conducteurs intrinsèques :

Un semi-conducteur intrinsèque est un matériau idéal ne possédant ni défaut physique ni défaut chimique, c'est à dire un matériau dépourvu de toute impureté susceptible de modifier la densité des porteurs. Les électrons de la bande de conduction ne peuvent résulter que par l'excitation thermique des électrons de la bande de valence. Les électrons et les trous existent nécessairement par paires ($p = n$). La densité intrinsèque des porteurs et le niveau de Fermi intrinsèque sont donnés par les expressions suivantes : [12]

$$n_i = (N_c \cdot N_v)^{\frac{1}{2}} \cdot \exp\left[\frac{-E_g}{2KT}\right] \quad (I.13)$$

$$E_F = \frac{1}{2}(E_c + E_v) + \frac{3}{4} KT \cdot \log\left(\frac{m^*h}{m^*c}\right) \quad (I.14)$$

Avec :

N_c : La densité effective d'état des électrons.

N_v : La densité effective d'état des trous.

E_c : L'énergie de la bande de conduction.

E_v : L'énergie de la bande de valence. :

E_g : L'énergie de la bande interdite (le Gap).

m^*_h, m^*_c : Les masses effectives respectives des électrons et des trous.

K : La constante de Boltzmann. T : La température en ($^{\circ}K$).

I.6.3 Semi-conducteurs extrinsèques :

Les semi-conducteurs intrinsèques n'ont pas d'une grande utilité en tant que tels ; ils servent de base aux semi-conducteurs dopés : on y rajoute des impuretés (dopants) pour changer leurs comportements, particulièrement leurs propriétés électriques. Il existe deux types de semi-conducteurs extrinsèques [12]

I.6.4 Dopage des semi-conducteurs

I.6.4.1 Semi-conducteur dopé N

Si un atome ayant cinq électrons de valence (le phosphore (P)), est incorporé dans le réseau cristallin, alors cet atome présentera quatre liaisons covalentes et un électron libre. Cet électron faiblement lié à l'atome peut être facilement excité vers la bande de conduction. Dans ce genre de matériau, le nombre d'électrons dépasse le nombre de trous. [13]

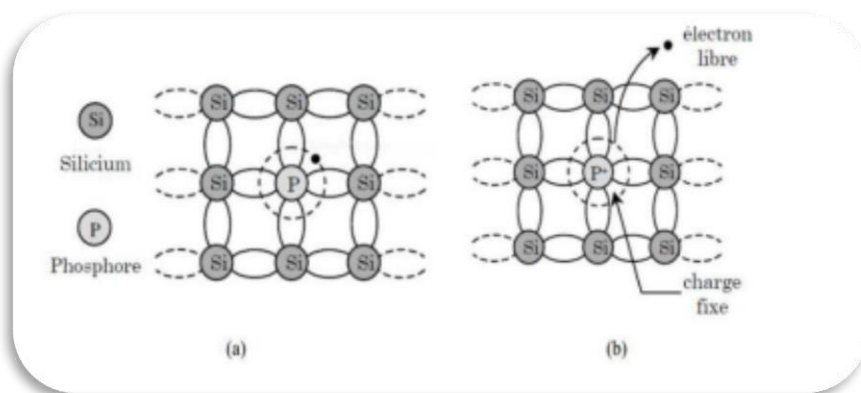


Fig (I.11) : Silicium dopé au phosphore (a) à $T = 0 \text{ }^{\circ}K$ et, (b) à $T \neq 0 \text{ }^{\circ}K$

I.6.4.2 Semi-conducteur dopé P

Si un atome trivalent (bore (Br)) est substitué à un atome de silicium dans le réseau cristallin, alors il manquera un électron pour l'une des quatre liaisons covalentes des atomes de silicium adjacents et l'atome trivalent peut accepter un électron pour compléter cette quatrième liaison, formant ainsi un trou. Quand le dopage est suffisant, le nombre de trous dépasse le nombre d'électrons. [13]

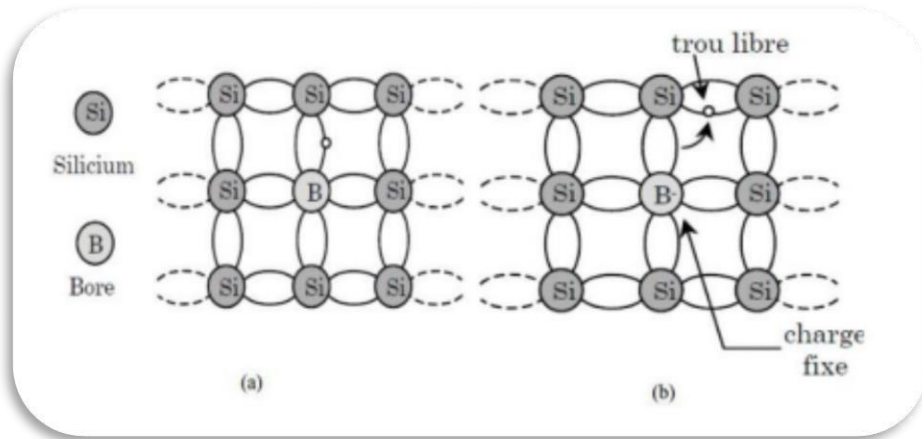


Fig (I.12) : : Silicium dopé au Bore (a) à $T = 0 \text{ K}$ et, à (b) $T \neq 0 \text{ K}$ [14]

I.7 Jonction P N :

Une jonction p-n est la juxtaposition de deux zones dopées pour améliorer la conductivité du matériau : - Une zone de type p qui possède un excès de trous avec la présence d'atome de la colonne III du tableau périodique (typiquement le bore), ou la conduction s'effectue par les trous. -une zone de type n qui possède un excès d'électrons avec la présence d'atome de la colonne v du périodique (typiquement le phosphore), ou la conduction s'effectue par les électrons. A la jonction des zones p et n, il se crée une zone de charge d'espace de quelque micromètres avec une zone n chargée positivement et une zone p chargée négativement .il se crée donc un champ électrique qui repousse les électrons dans la zone n et les trous dans la zone p. En ajoutant des contacts électrique à la jonction [10]

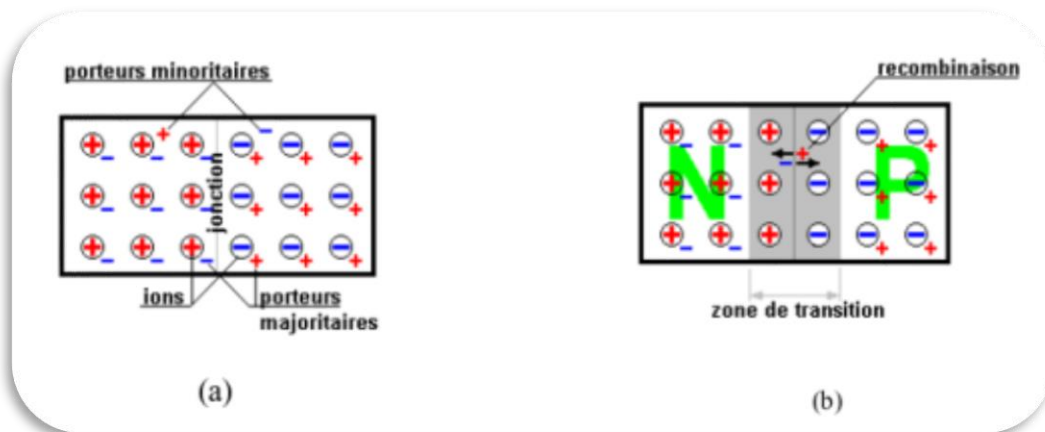


Fig (I.13) : Jonction PN : (a) avant contact ; (b) après contact [14]

I.7.1 Jonction PN polarisée

I.7.1.1 Polarisation directe

Une polarisation directe est obtenue en appliquant aux bornes de la jonction une tension V qui réduit la barrière de potentiel et par conséquent le champ électrique interne.

Dans le cas d'une polarisation directe le sens passant d'une diode est défini par le sens des courants créés par les porteurs majoritaires dans la jonction.

Les électrons majoritaires de la zone N se déplacent vers l'anode, les trous majoritaires de la zone P se déplacent vers la cathode. Le sens direct est défini par un courant dirigé de l'anode vers la cathode [14]

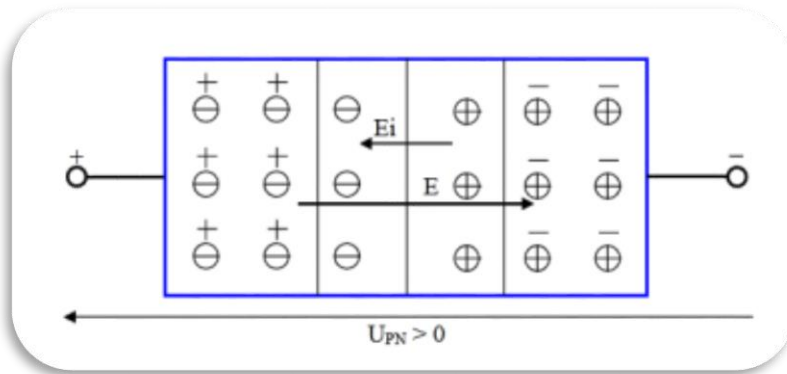


Fig (I.14) : jonction PN polarisée en direct [3]

I.7.1.2 Polarisation inverse

Dans le cas de la polarisation inverse la jonction est reliée à une alimentation dans le sens bloqué. La tension doit rester supérieure à une valeur minimale. Alors, [15] le courant résulte du déplacement des porteurs minoritaires. L'intensité du courant est très faible [14]

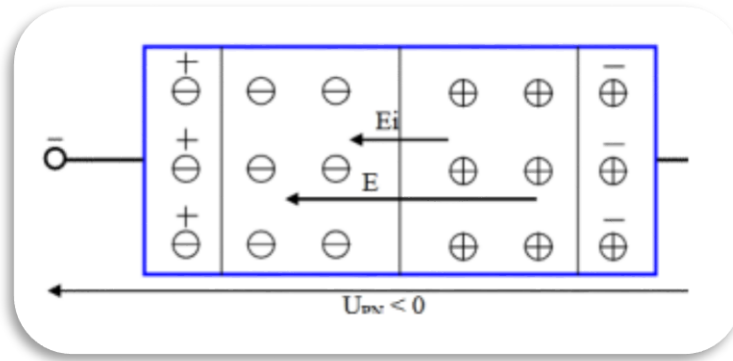


Fig (I.15) : Jonction PN polarisée en inverse [3]

I.8 Les différentes technologies de la conversion d'énergie

I.8.1 Solaire thermodynamique

L'énergie solaire thermodynamique est un moyen de produire de l'électricité et d'accumuler l'énergie thermique nécessaire à cette production pendant plusieurs heures après le coucher du soleil, dans des centrales solaires à concentration. Le principe est de concentrer la chaleur du soleil par des miroirs pour chauffer une fluide haute température (plusieurs centaines de degrés) afin de générer de la vapeur par échange thermique pour ensuite produire de l'électricité au moyen d'une turbine. Le fluide utilisé peut conserver sa chaleur pendant plusieurs heures après le coucher du soleil, cela permet de produire de l'électricité en début de soirée, au moment où la consommation est la plus importante [16]



Fig (I.16) : Solaire thermodynamique [3]

I.8.2 Solaire thermique

L'énergie solaire thermique est une forme d'énergie solaire. Elle désigne l'utilisation de l'énergie thermique du rayonnement solaire dans le but d'échauffer un fluide (liquide ou gaz). L'énergie reçue par le fluide peut être ensuite utilisée directement (eau chaude sanitaire, chauffage, etc.) ou indirectement (production de vapeur d'eau pour entraîner des alternateurs et ainsi obtenir de l'énergie électrique, production de froid, etc.). L'énergie solaire thermique provient de la chaleur transmise par le soleil par rayonnement et ne doit pas être confondue avec d'autres formes d'énergie solaire et notamment l'énergie solaire photovoltaïque qui utilise l'effet photoélectrique afin de transformer les photons émis par le soleil en électricité. [9]

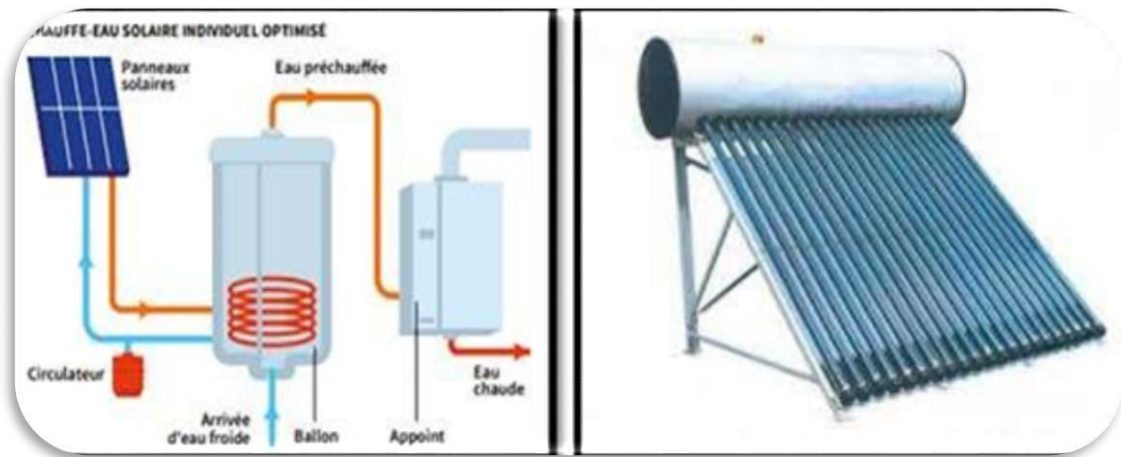


Fig (I.17) : Solaire thermique [4]

I.8.3 La cheminée solaire :

Ce type de centrales est constitué de nombreux miroirs plats (plus de 100m²) concentrant les rayons solaires vers une chaudière située au sommet d'une tour (80 à 100m de haut). La tour solaire offre l'avantage de ne pas avoir à faire circuler de fluide dans l'ensemble du champ de miroirs (la surface exposée est limitée), les pertes thermiques sont donc significativement réduites. Les miroirs uniformément répartis sont appelés héliostats. Chaque héliostat traque le soleil individuellement (motorisation sur 2 axes) et réfléchit le rayonnement solaire sur la chaudière (récepteur). Le facteur de concentration varie de 600 à plusieurs milliers, ce qui permet d'atteindre des températures importantes, de 800 °C à 1000°C [9]

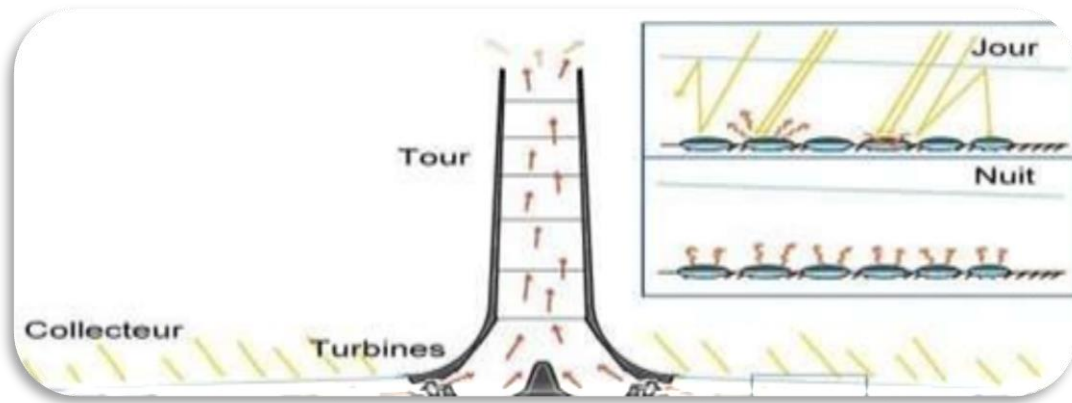


Fig (I.18) : Cheminée solaire

I.8.4 Solaire photovoltaïque :

Contrairement à l'énergie solaire thermique qui utilise le soleil comme source de chaleur, l'énergie solaire photovoltaïque utilise le soleil comme source de lumière en transformant en électricité l'énergie des photons arrivant à la surface de la Terre. La lumière solaire (photons) transmet son énergie aux électrons contenus dans un semi-conducteur (qui constitue une cellule photovoltaïque). Cette transformation (effet photovoltaïque) est sans action mécanique, sans bruit, sans pollution et sans combustible. L'effet photovoltaïque a été découvert par le physicien français A. Becquerel en 1839. Le mot « photovoltaïque » vient du mot « photo » (du grec « phos » qui signifie « lumière ») et du mot « Volt » (patronyme du physicien Alessandro Volta qui a contribué de manière très importante à la recherche en électricité) [9]

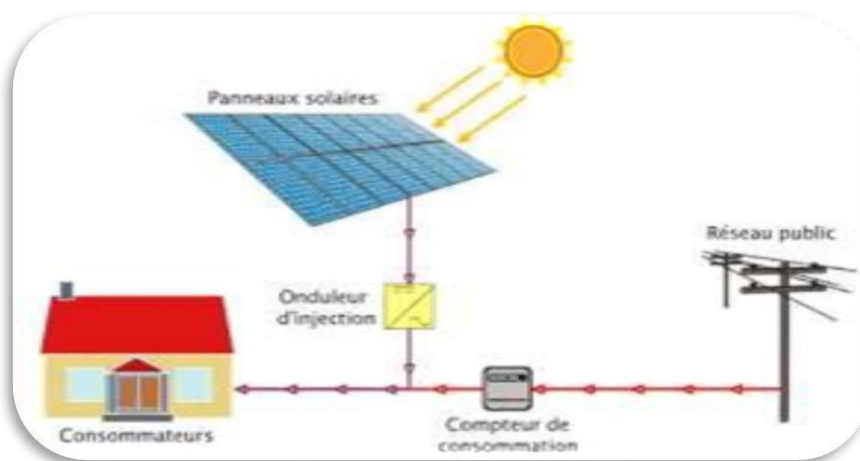


Fig (I.19) : solaire photovoltaïque [3]

I.9 Développement du photovoltaïque en Algérie

I.9.1 Niveaux d'ensoleillement en Algérie

L'Algérie a un gisement parmi les gisements les plus élevés dans le monde, où les durées moyennes annuelles d'ensoleillement varient entre 2600h/an dans le Nord à 3500h/an dans le sud. Au vu de sa grande superficie et de sa situation géographique, lui permet d'attirer de grandes quantités d'énergie solaire

La figure I.20 présente la moyenne annuelle de l'irradiation globale reçue sur une surface horizontale durant la période allant de 1992 jusqu'à 2002 [9]

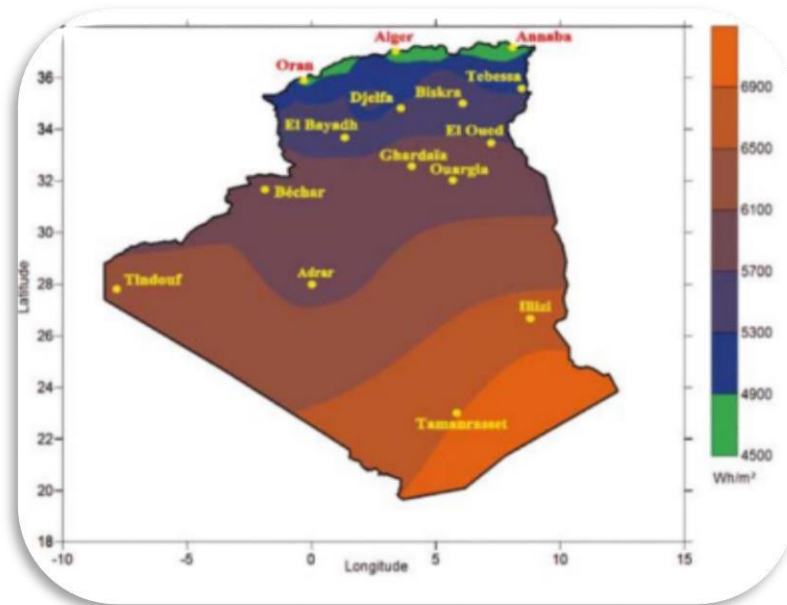


Fig (I.20) : Niveau d'ensoleillement en Algérie [19]

I.9.2 Niveau d'ensoleillement en Afrique :

L'Afrique est souvent considérée et désignée comme le « continent du soleil » c.a.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 connu 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 [3]

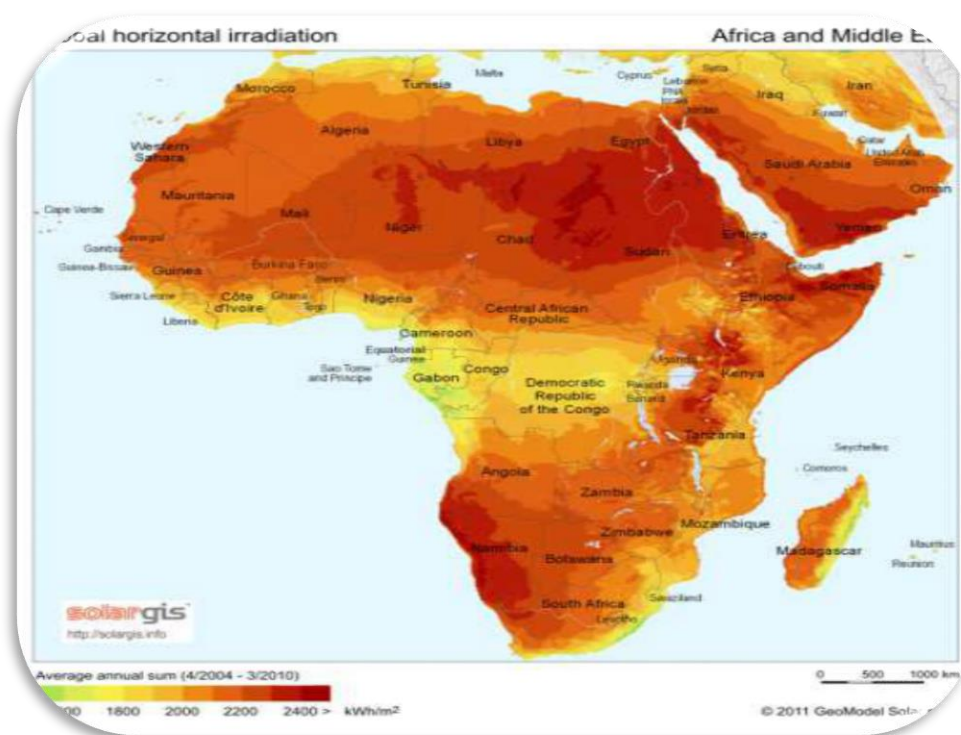


Fig (I.21) : Niveau d'ensoleillement en Afrique [9]

I.9.3 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 000h, soit une moyenne journalière extraordinaire de 10 à 11 heures. D'après (World Sunshine Chart) réalisée par le service météorologique des États-Unis [9]

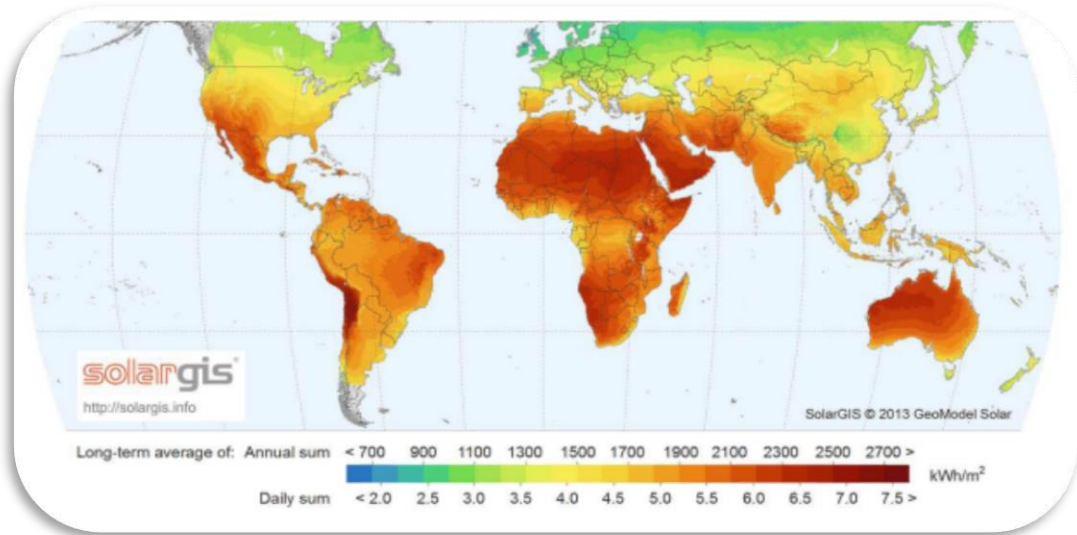


Fig (I.22) : Carte l'ensoleillement moyen annuel dans le Monde [3]

I.9.4 Gisement solaire en Algérie

Les gisements solaires, sont les différentes typiques du rayonnement solaire, susceptibles d'influencer les performances d'un système en un lieu donné. Une bonne compréhension du gisement solaire est nécessaire à l'étude des systèmes photovoltaïques. De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus importants du monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et atteint les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m² est de l'ordre de 5 kWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 kWh/m²/an au Nord et 2263 kWh/m²/an au sud du pays. Le tableau suivant résume le potentiel solaire en Algérie.[9]

Régions	Régions côtière	Hauts plateaux	Sahara
Superficies	4	10	86
Durée Moyenne d'ensoleillement (heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m²/an)	1700	1900	2650

Tableau (I.1) : Potentiel solaire [14]

I.9.5 Consommation d'énergie en Algérie

Si nous voulons connaître la quantité l'énergie consommée en Algérie, il faut connaître le taux de croissance démographique aussi que le développement du secteur industriel. D'après l'ONS, le pourcentage de naissances continue d'augmenter, ce qui augmente continuellement la consommation de ressources énergétiques. Quant au secteur industriel, il a la plus grande part de consommation d'énergie au fil des ans en raison du développement industriel que connaît l'Algérie, ceci est présenté par la figure suivante

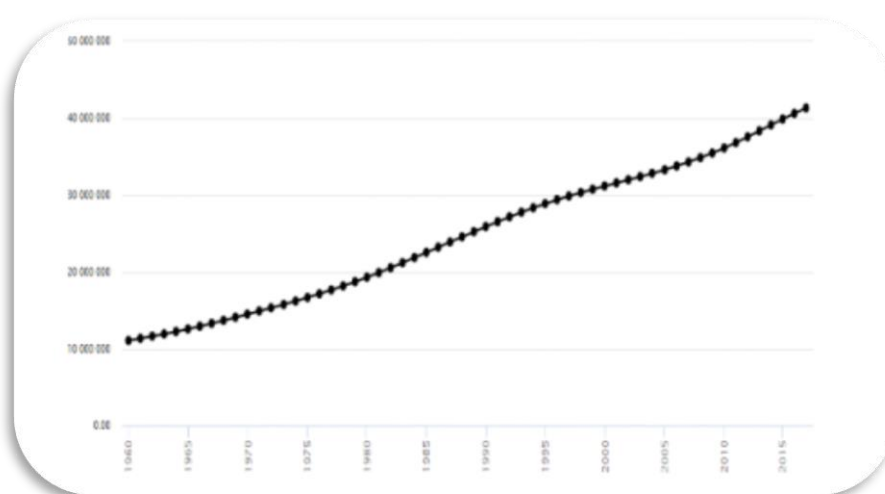


Fig (I.23) : La croissance démographique en Algérie entre 1960-2015 [3]

De la période 1971-2014, on enregistre 470 % d'augmentations dans la consommation local d'énergie [9]. La figure suivant présente la consommation énergétique en Algérie

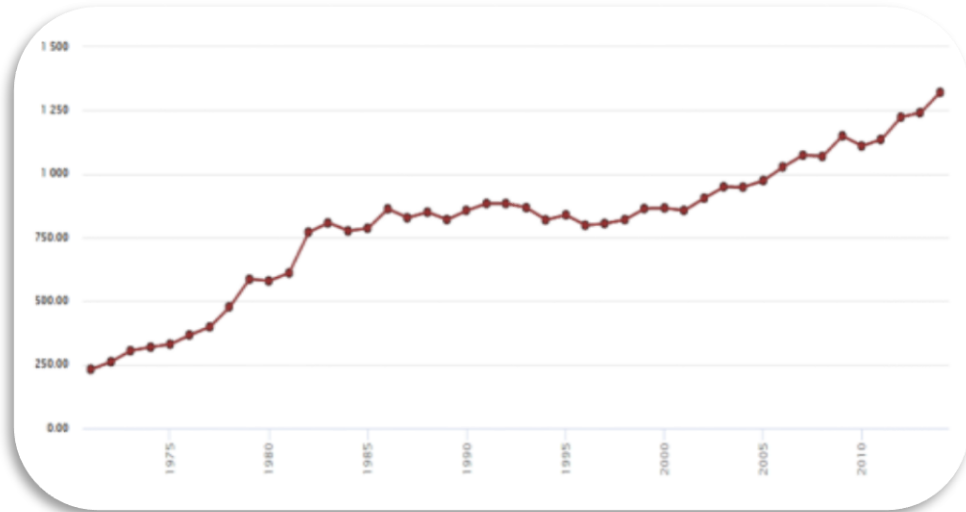


Fig (I.24) : La consommation énergétique en Algérie entre 1971-2020 [3]

En analysant le taux de croissance démographique et le pourcentage de consommation d'énergie en Algérie, il est nécessaire de recourir à différentes sources d'énergie renouvelable pour parvenir à l'autosuffisance. Parmi les sources d'énergie renouvelables se trouve l'énergie photovoltaïque, qui contribue grandement à répondre aux besoins du pays

I.9.6 Réalisation photovoltaïque en Algérie

I.9.6.1 Unité de développement des équipements solaires (L'UDES)

Le siège de l'UDES est situé à 40 km à l'ouest d'Alger et le tableau ci-dessous répertorie certains des projets entrepris par l'UDES dans l'installation de panneaux solaires photovoltaïques [3]

Organism	Type	Puissance
CRND	Installation de (19) systèmes d'éclairage public par énergie photovoltaïque	2,09 KWc
CDTA	Installation de (26) systèmes d'éclairage public par énergie photovoltaïque	2.86 KWc
NAFTAL	Installation de (22) systèmes d'éclairage public par énergie photovoltaïque et l'alimentation électrique de deux volucompteurs en énergie solaire	7.22 KWc

MDN	Alimentation par énergie photovoltaïque d'une cabine de cuisson tractable	07 KWc
Hôpital militaire d'Ain naadja	Installation de (01) système d'éclairage public par énergie photovoltaïque	0.11 KWc
ALGERIE TELECOM	Alimentation d'un relais de transmissions en énergie photovoltaïque	4.2 KWc
MESRS	Installation de (40) systèmes d'éclairage public par énergie photovoltaïque	4.4 KWc
Poste de surveillance routières et unités de la Gendarmerie nationale	Installation de système d'éclairage public et alimentation des cabines 10	0.7 KWc
Ecole nationale supérieure de l'hydraulique	Installation de (01) système d'éclairage public par énergie photovoltaïque	0.11 KWc
Université de Boumerdes	Installation de (12) systèmes d'éclairage public par énergie photovoltaïque	0.33 KWc
Complexe touristique (djenan ETAKAFA)	Installation de (12) systèmes d'éclairage public par énergie photovoltaïque	1.32 KWc
AFSI BOUCHAOUI Gendarmerie nationale	Installation de (20) systèmes d'éclairage public par énergie photovoltaïque	2.2 KWc
Station veille de l'atmosphère globale (ONM) Assekrem Wtamanrasset	Installation d'une mini-centrale solaire photovoltaïque pour l'alimentation électrique des équipements de mesure	05 KWc

Direction des minces et de l'industrie : GARADJEBILET (tindouf)	Installation d'une mini-centrale solaire photovoltaïque pour l'alimentation électrique des maisons de l'éclairage extérieure	09 KWc
Ministère de la défense nationale	Fourniture de (21) systèmes photovoltaïques de 750 WC pour l'alimentation électrique des appareils de transmissions	15.74 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

Tableau (I.2): Quelques projets photovoltaïques réalisés par l'UDES [3]

I.9.6.2.1. le projet de rouiba eclaireage :

L'usine de rouiba est le plus grand projet de production de panneaux solaire photovoltaïque sur le continent africain [3]



Fig (I. 25) : L'usine de Rouïba Eclairage [3]

I.9.6.2 La société Aurée solaire :

Aurés solaire est une entreprise de fabrication de panneaux solaires photovoltaïques de nouvelle génération d'une capacité de 25MW. La société est située dans la zone industrielle d'Ain Yagout 222 province de Batna [3]



Fig (I.26) : Aurès solaire [3]

I.9.6.3 L'usine Condor Electroniques pour la production des panneaux solaires :

Condor électronique a lancé la construction de son usine de panneaux solaires photovoltaïques dans la province de Bordj Bou Arreridj et a annoncé la construction imminente d'un autre complexe destiné a produire des modules photovoltaïques

L'usine est situé dans la zone induserielle de Bordj Bou Arreirdj , s'etend sur une superficie de 5542 m et compte 200 solaire. Capacité nominale de 50 MW par an [3]



Fig (I. 27) : L'usine de condor électronique [3]

I.10 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

I.10.1 Inconvénients :

La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et exigé des investissements d'un coût élevé. Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % avec une limite théorique pour une cellule de 28%.

Tributaire des conditions météorologiques. [17]

Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes.

Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées. Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru. [18]

Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes.

I.10.1 Avantages

D'abord une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées. [18]

C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux. Ensuite le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers.

Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt. Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé. [18]

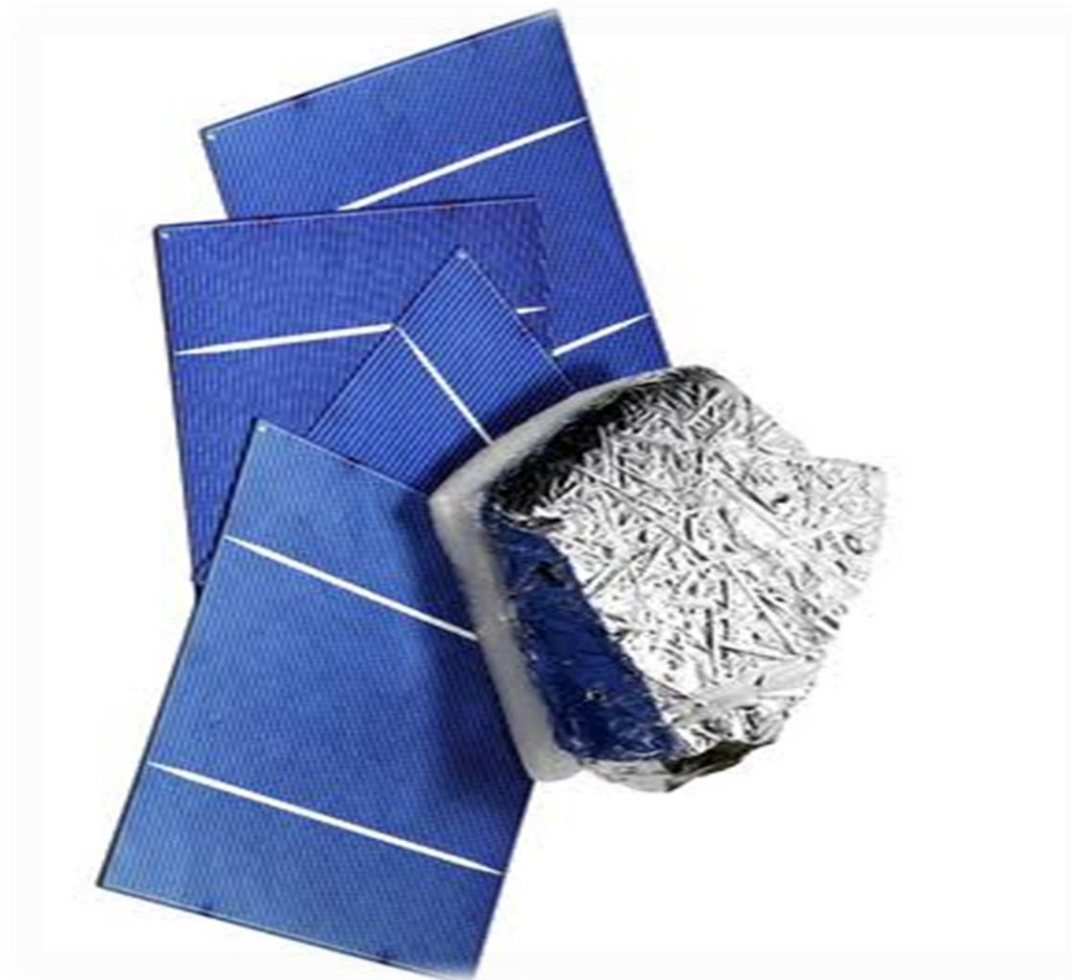
La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions

I.11 Conclusion

L'estimation du rayonnement solaire reçu par la Terre nécessite des informations précises sur les paramètres météorologiques pour un lieu spécifique. Ces paramètres sont mesurés par des stations de rayonnement.

Chapitre II :

Les procédés d'élaboration du silicium photovoltaïque



II.1 Introduction

Plus de 90% de l'industrie photovoltaïque est centrée sur l'utilisation du silicium comme matériau de base, découvert en Suède en 1840. Ce semi-conducteur présente plusieurs avantages : il est abondant à la surface de la terre car il s'extrait facilement du sable, il est non toxique et stable dans le temps, et la maîtrise micro-industrielle de sa technologie-électronique assure in fine un bon rendement de conversion électrique.

Le silicium utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques est produit dans une variété de procédés, qui se différencient par le type de silicium, et nous en verrons quelques-uns pour le silicium amorphe, monocristallin et poly cristallin.

II.2 Silicium

II.2.1 Différent états de silicium

II.2.1.1 État cristalline

L'état cristallin représente une distribution périodique dans les trois directions de l'espace d'un motif d'atomes (présence d'un ordre à longue distance)

On distingue deux types de l'état cristallin : monocristallin et polycristallin. Un monocristal représente une série de plans cristallographiques parallèles les uns aux autres dans tout le matériau] 20]

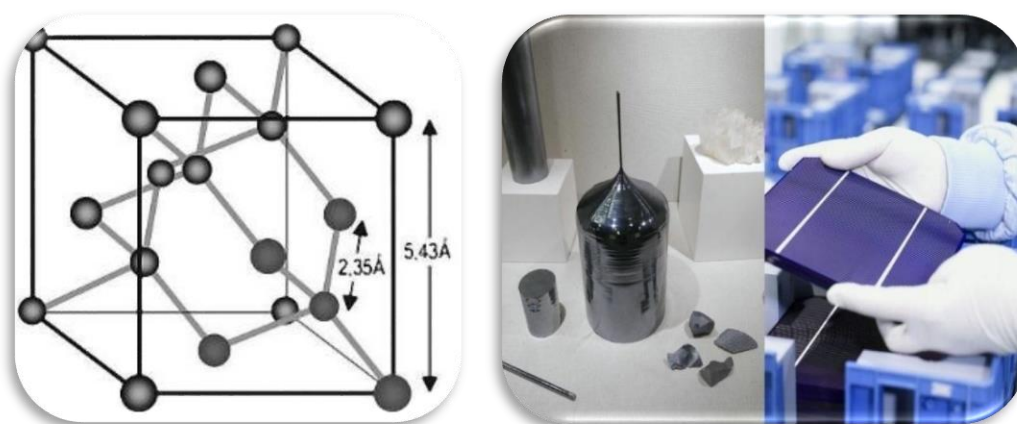


Fig (II.1) : le silicium monocristallin [23]

II.2.1.2 État Amorphe

Cet état est systématiquement défini comme étant dépourvu d'ordre cristallin à longue distance par rapport à la distance inter-atomique. Les angles inter-liaison et les distances

interatomiques ne sont pas respectés et seul un ordre à courte distance peut exister. Dans le silicium amorphe, les premiers voisins d'un atome de silicium seront bien aux sommets d'un tétraèdre, mais il y aura distorsion des angles de liaisons en atteignant les seconds, troisièmes voisins. On aboutira à une disposition des atomes où certaines liaisons chimiques ne peuvent pas être satisfaites pour des raisons géométriques. Les niveaux d'énergie correspondant aux liaisons non satisfaites sont situés dans la région de la bande interdite du cristal puisque c'est précisément l'hybridation qui crée la bande interdite [21]

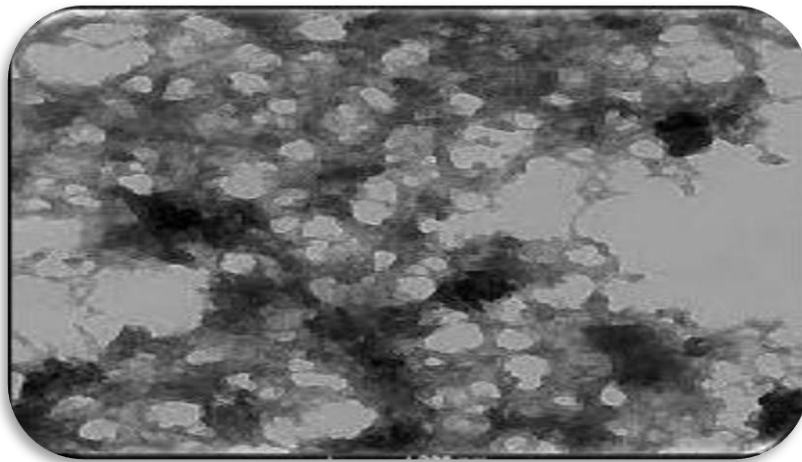


Fig (II. 2) le silicium amorphe [23]

II.2.1.3 État Polycristalline

La structure du silicium polycristallin ou poly silicium, se situe entre celle du silicium monocristallin et celle du silicium amorphe. Elle est constituée de grains de silicium monocristallins d'orientations cristallines dont la taille diffère d'un grain à un autre mais reste comprise entre 1 μm et 1 mm qui sont séparés entre eux par des zones désordonnées et riches de défauts cristallins appelée les joints de grains. Les joints de grains délimitant des grains d'orientations différentes constituent des zones désordonnées, souvent assimilées à du silicium amorphe [22]

Les grains et les joints de grains sont les sièges de deux types de défauts :

- Les dislocations qui induisent l'apparition de liaisons pendantes électriquement actives.

- Les macles qui peuvent être électriquement actives ou non selon qu'elles se terminent à l'intérieur du grain (apparition de dislocations) ou en surface

En fonction de la géométrie des grains, le poly silicium peut se présenter sous deux formes différentes : forme granulaire et la forme colonnaire [22]



Fig (II.3) : silicium poly-cristallin [23]

II.3 Les paramètres affectant le rendement

II.3.1 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 ajuster la conductivité du silicium. Cependant, la concentration en dopants est limitée à une valeur de 10^{16} à 10^{17} atomes/cm³, à partir de laquelle les durées de vie des porteurs minoritaires chutent fortement. Pour cette raison, leur concentration en silicium doit être parfaitement maîtrisée afin de ne pas dégrader les performances des cellules photovoltaïques. La contamination du silicium peut se produire lors de son traitement. [22]

II.3.2 Défauts cristallins

De la recombinaison des porteurs minoritaires et donc une dégradation des propriétés photovoltaïques du silicium.

Des défauts cristallins se forment lors de l'étape de cristallisation du lingot de silicium. Ils ont également des effets très néfastes sur la conversion photovoltaïque. Ces défauts

créent de manière significative des niveaux d'énergie supplémentaires dans la bande interdite, entraînant une augmentation [23]

II.3.3 Défauts ponctuels

Ils apparaissent comme des déviations locales de la périodicité de la matrice cristalline. Les défauts ponctuels peuvent être, par exemple, des atomes d'impuretés, des lacunes ou des atomes interstitiels. Ces défauts sont susceptibles de se combiner pour former des défauts ponctuels complexes, des lacunes appariées. Le rendement en silicium est largement déterminé par ces défauts qui se produisent lors de la production de silicium par divers procédés. Plusieurs types de procédés sont utilisés pour la cristallisation du silicium, qui sont classés en fonction du produit final obtenu après traitement [23]

II.4 Techniques pour élaboration du Si polycristallin :

II.4.1 Procédé de croissance dirigée :

Cette technique, également connue sous le nom de "solidification directionnelle", consiste à faire fondre Purification du silicium dans un creuset en quartz recouvert d'une couche de nitrure de silicium (Si_3N_4) empêche le dioxyde de silicium du quartz de réagir avec le silicium liquide. Après que la température du bain de silicium soit uniforme, le creuset se refroidit progressivement de bas en haut, formant ainsi Poly cristaux de différentes tailles et orientations. Ce cristal S'avère être bon marché, mais en raison de Présence de défauts, notamment joints de grains et impuretés Métallique. Le rapport de performance du lingot obtenu à partir de Cristallisation par procédé Czochralski ou fusion de zone [22]

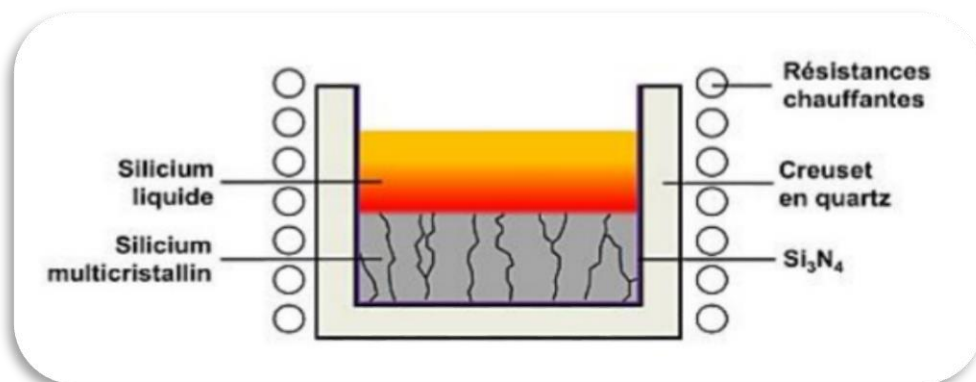


Fig (II.4) : Cristallisation d'un lingot polycristallin par solidification dirigée [28]

II.4.2 Le principe du procédé 4C exploité par EMIX :

La Technologie 4C (Cold Crucible Continuous Casting) basée sur la fusion Induction du silicium dans un creuset froid. Le principe de cette technique est exprimé en Graphique (II.7). Le silicium sous forme de grains est chargé dans deux trémies situées au-dessus de la virole, et le silicium est introduit en continu depuis la voûte du four. Il est maintenu à Fondu par un inducteur placé autour d'un creuset en cuivre, refroidi par de l'eau Cela évite l'échauffement du cuivre, permettant ainsi la mise en forme du tenon. La colonne est descendue dans le four grâce au système de traction quand le silicium liquide Par le niveau en dessous de l'inducteur, le couplage électromagnétique ne se produit plus et Le silicium se solidifie brutalement à l'approche des parois froides du creuset Formant ainsi une coquille à l'extérieur de la colonne. [23]

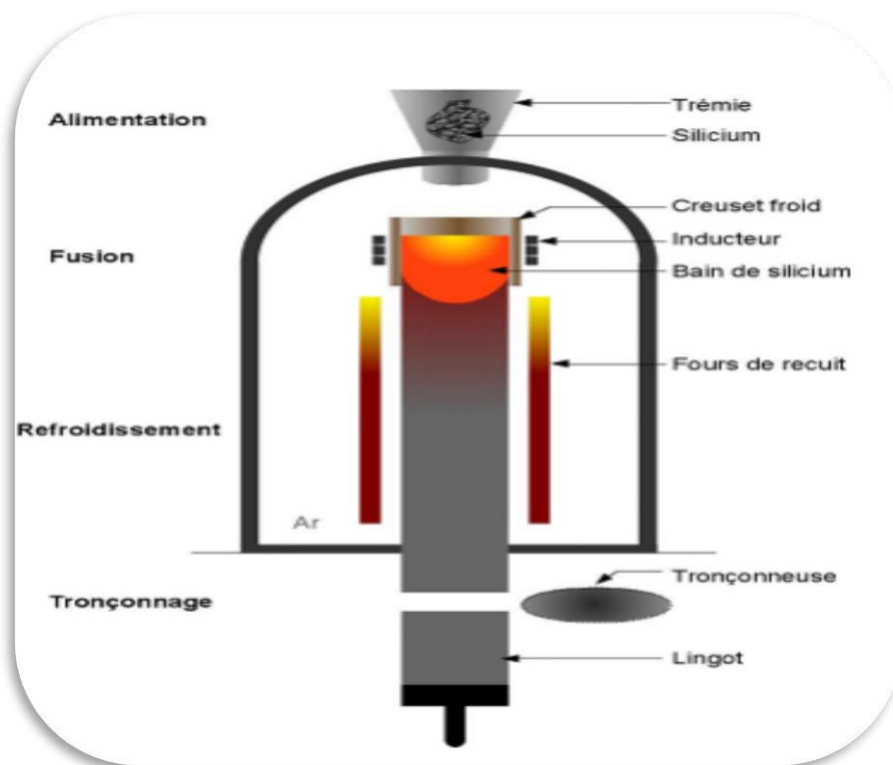


Fig (II .5) : Procédé 4C exploitée par EMIX [28]

II.4.3 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. [23]

.II.5 Techniques pour élaboration du Si monocristallin :

II.5.1 Elaboration du silicium par la méthode de Cz ochralski « CZ » :

Dans le cas des oxydes utilisés notamment dans le cadre des applications laser, la méthode Cz ochralski est l'une des seules permettant d'obtenir de gros monocristaux de qualité optique suffisante. Le matériau à élaborer est d'abord porté à la fusion dans un creuset. Un germe monocristallin est approché du centre de la surface du bain, avec laquelle il est mis en contact. Le liquide remonte par capillarité le long du germe, créant une interface triple liquide-solide-gaz. Le germe est ensuite lentement tiré vers le haut, à des vitesses de l'ordre du millimètre par heure, pour former un monocristal. L'ensemble de la croissance est effectuée en maintenant le cristal en rotation, de manière à homogénéiser le bain et à contrôler la forme de l'interface solide/liquide [24]

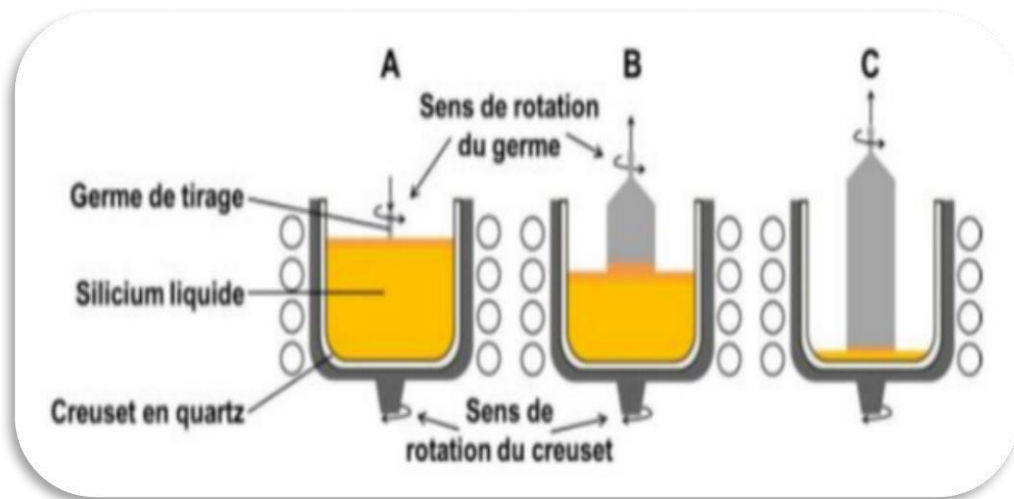


Fig (II. 6) : Cristallisation d'un lingot par la méthode Cz [28]

Lorsque la température se stabilise, le bain gèle sur le germe plus froid contrarotatif. Les cristaux formés sont ensuite extraits en tirant lentement sur le germe. Ainsi, des lingots de cristal ayant tous la même orientation cristalline et un diamètre contrôlé sont obtenus en faisant varier la température ou la vitesse de tirage. Pour les cellules solaires, les

germes sont orientés $\langle 100 \rangle$, c'est-à-dire que les plans atomiques dans lesquels les atomes du cristal sont disposés sont horizontaux pour faciliter la texturation de surface. Le processus peut donner des matériaux avec de bonnes propriétés électriques mais est coûteux car il nécessite de longs temps de fabrication des cristaux et produit de petites quantités de silicium monocristallin. [23]

II.5.2 Le procédé de Fusion de Zone (FZ)

La méthode de la zone flottante permet de fabriquer des monocristaux de très haute pureté. Elle permet d'une part de purifier un barreau de silicium polycristallin et d'autre part de le transformer en un monocristal d'orientation cristalline et de diamètre contrôlés. La solidification est initiée au moyen d'un germe monocristallin qui sélectionne l'orientation du monocristal massif. Les différentes étapes de l'opération sont illustrées schématiquement sur la figure [25]

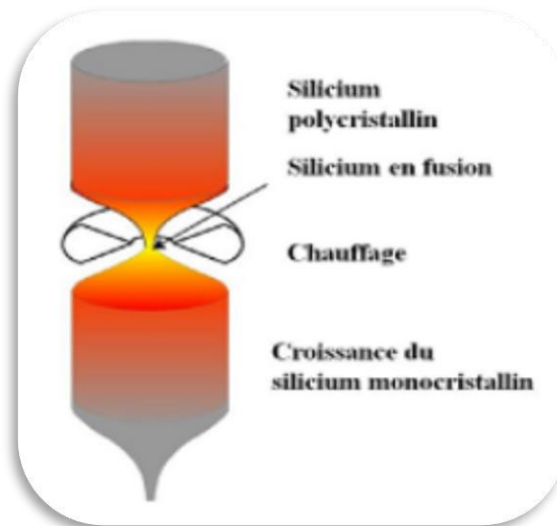


Fig (II. 7) : Procédé de Fusion de Zone [4]

Comme montré sur la figure III-10, l'extrémité inférieure du barreau polycristallin est fondue, après un préchauffage par passage d'un courant à effet joule, dans le barreau. Le germe monocristallin est orienté et plongé depuis le bas dans la goutte de silicium fondu. La zone fondue est progressivement déplacée vers le haut du cristal, elle est maintenue par tensions superficielles. Un contrôle judicieux des températures, des vitesses de déplacement et de rotation conduit à la recristallisation de tout le barreau [25]



Fig (II.8) : Des lingots de silicium monocristallin [23]

II.6 Techniques pour élaboration du Si amorphe :

II.6.1 La technique RST :

Le substrat utilisé pour cette technique est généralement du graphite ou du carbone. Un matériau flexible tiré à travers un bain de fluide de silicium. Le principe est de cristalliser deux Films de silicium des deux côtés du carbone. puis recyclez le ruban de silicone En brûlant du graphite à haute température. Cette technique est actuellement utilisée Le nom "Ruban sur modèle sacrificiel". Les grains formés sont caractéristiques du processus de croissance Et sont généralement colonnaires et allongées dans le sens de l'étirement. Dislocation se développent dans certains grains, leur formation doit être maîtrisée pour améliorer rendement [28]

II.6.2 La technique EFG

Le principe est de sortir un tube octogonal d'un bain de silicium Après fusion, le liquide adhère à la surface du tube par capillarité (Figure II.1). tranche La zone actuellement découpée du produit final est de 125 x 125 mm², Les cellules disponibles dans le commerce atteignent un rendement de 15,2 % pour une épaisseur de cellule de 200 μm [28]

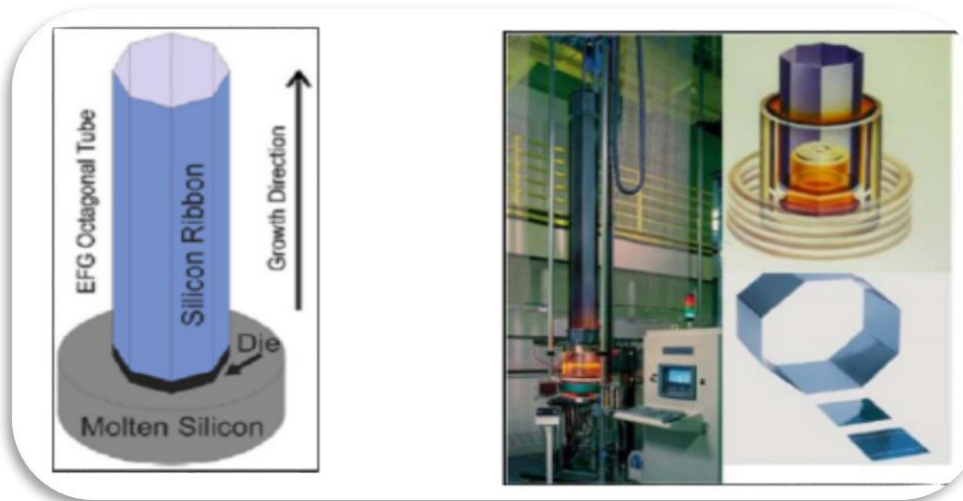


Fig (II .9) : Schéma de la technique de tirage EFG de silicium en ruban et photographie du dispositif et des plaquettes obtenues [28]

II.7 Technique de couches minces :

II.7.1 Dépôt Chimique en phase vapeur (CVD)

La formation de dépôt sur le substrat se fait à partir des réactions chimiques entre les précurseurs gazeux. Ces réactions (qui peuvent être une simple réaction de décomposition ou une réaction de combinaison) sont déclenchées par l'énergie d'activation fournie par le chauffage du substrat. Le chauffage du substrat permet également aux ad-atomes d'acquies une mobilité suffisante pour obtenir la structure souhaitée [20]

II.7.2 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. [23]

II.8 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 [26]

II.8.1 Le creuset froid

La plupart des procédés d'élaboration de silicium utilisent des creusets en graphite ou des creusets en quartz. Le creuset en quartz est beaucoup plus fragile et souvent inutilisable après une ou deux expériences, sa température de fusion est de plus assez proche de celle du silicium ce qui est limitant pour le chauffage. 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. [26]

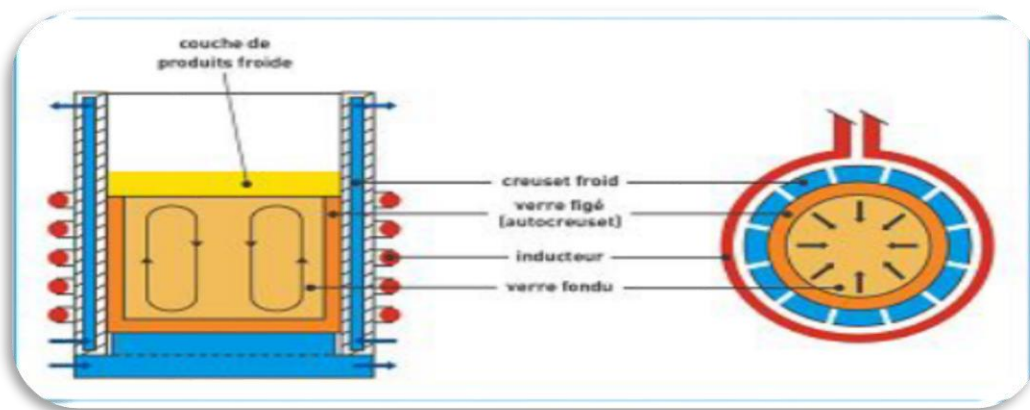


Fig (II.10) : Le creuset froid inductif [28]



Fig (II.11) : Vue extérieure du "Creuset froid" en cours de chauffage [28]

II.8.2 L'inducteur

Il est constitué d'un ensemble de spires formant ainsi le creuset siège de la fusion. La bobine est bridée radicalement par 15 entrefers qui sont constitués de tôles feuilletées et permettent une bonne canalisation du flux magnétique. 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. [26]

II.8.3 Le 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 [26]

II.8.4 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. 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. [26]

II.9 Silicium Polycristalline

II.9.1 Propriétés électriques :

II.9.1.1 Effet du dopage sur les caractéristiques électriques :

Plusieurs études ont été réalisées dans le but de mieux comprendre les propriétés électriques et diode latérale du silicium poly-cristallin. [27]

Ce matériau contient de nombreux grains de formes géométriques différentes orientés de manière désordonnée. Ces grains sont entourés de zones à forte activité électrique appelées: joints de grains, qui constituent les principaux défauts dans les semi-conducteurs polycristallins. Les propriétés des joints de grains, qui sont des surfaces internes comprises entre deux grains adjacents, régissent la plupart des propriétés

électriques et optiques des matériaux polycristallins. Leurs interactions avec les porteurs de charge libres, les défauts ponctuels intrinsèques (tels que les lacunes et les interstices) et les impuretés, sont les processus physiques les plus importants à considérer. [27]

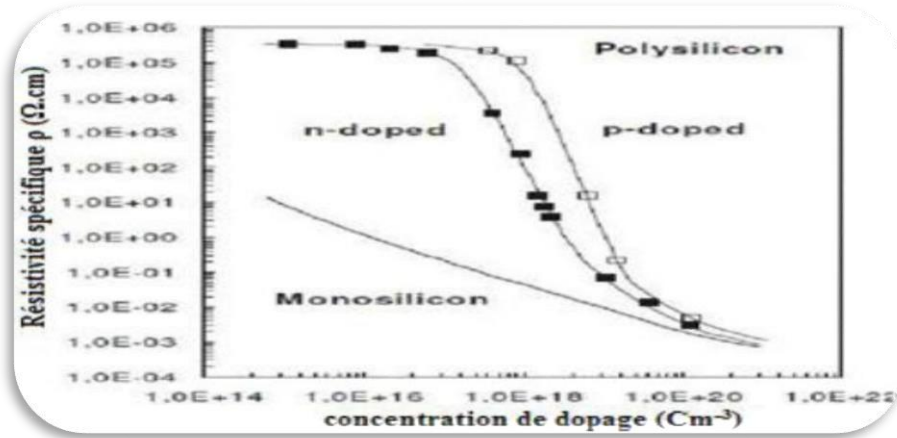


Fig (II 012) : Résistivité du silicium poly et monocristallin en fonction du niveau de dopage [23]

II.9.1.2 Influence de la température de dépôt sur la résistivité du silicium polycristallin :

La résistivité du matériau est affectée par plusieurs facteurs tels que la température et les conditions de dépôt. Lorsque le silicium est déposé à une température supérieure à la température ambiante T , cela conduit à la formation d'un grand nombre de pièges et donne une barrière de potentiel et une épaisseur plus importante des joints de grains. Ce qui rend la résistivité au joint de grain supérieure à celle du grain. Par conséquent, la résistivité du si poly-cristallin est grande [20]

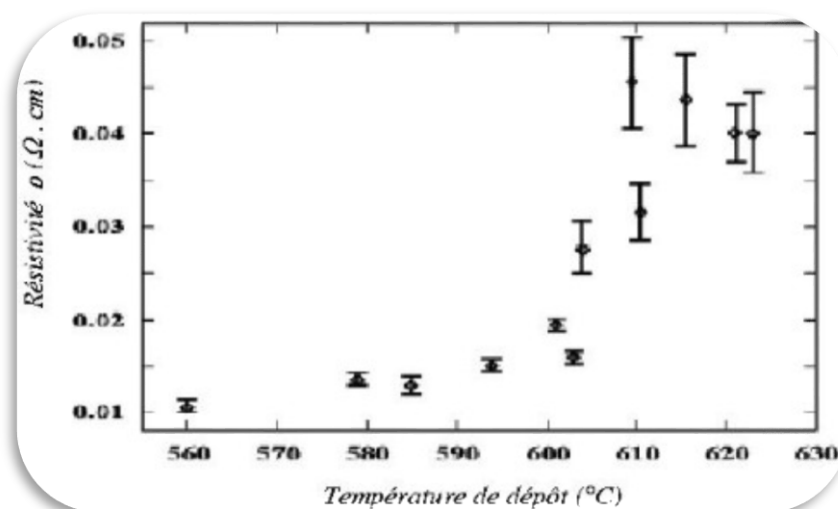


Fig (II .13) : Résistivité du silicium polycristallin en fonction de la température de dépôt [23]

II.9.2 Propriétés structurales

II.9.2.1 Structure d'un film de silicium polycristallin

Le film de silicium polycristallin colonnaire a des grains traversant verticalement son épaisseur. Les propriétés électroniques et physiques du film dépendent principalement de la taille moyenne des grains, car elle est prise comme une référence et une fonction afin de connaître les conditions du dopage, de dépôt et des traitements thermiques [28]

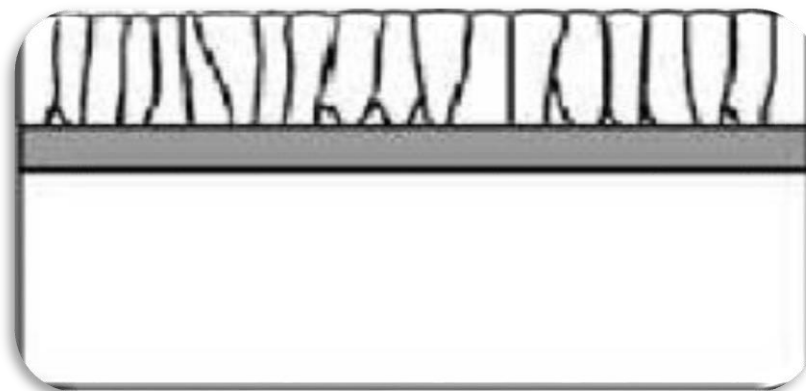


Fig (II.14) : structure colonnaire [23]

La structure d'un film peut être décrite par une approximation d'homogénéisation locale. La densité de joints de grains est égale à la surface totale des joints de grains par unité de volume de silicium polycristallin. Les figures (II.7), (II.8) présentes les différentes structures du silicium polycristallin [28]

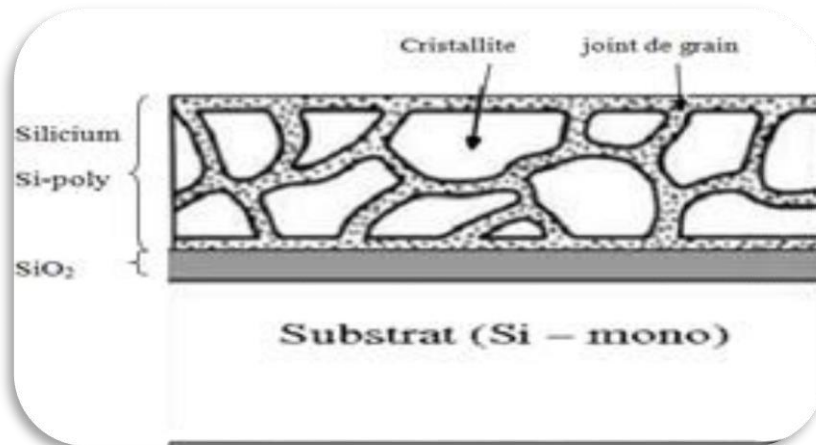
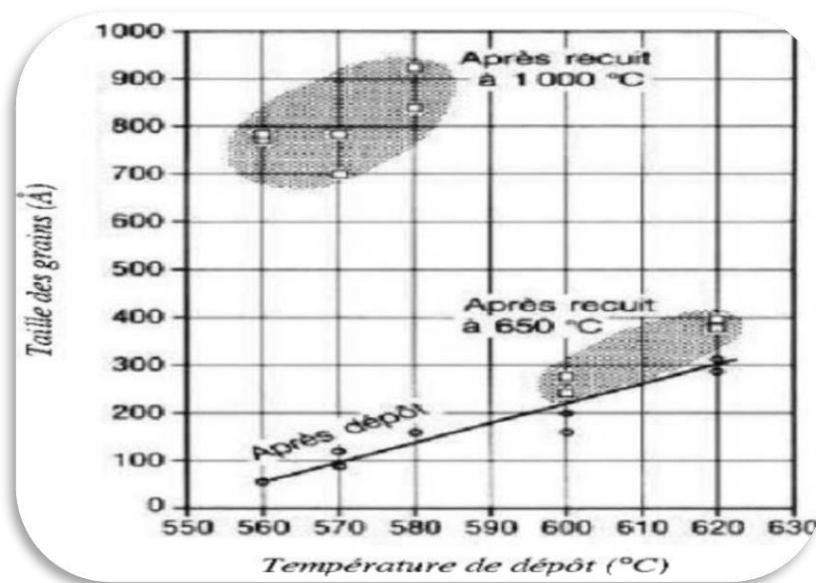


Fig (II.15) : structure granulaire [23]

II.9.2.2 Effet de la température sur la taille des grains

À haute température, la taille des grains de silicium polycristallin augmente et la densité des joints de grains diminue, ce qui signifie que chaque fois que la température s'élève au-dessus de la température ambiante, le phénomène de croissance des grains se produit [29]

Fig (II. 16) : Taille moyenne des grains en fonction de la température de dépôt de silicium polycristallin (Epaisseur du dépôt 0.5 μm) [23]

II.9.3 Propriétés de transport des porteurs dans le silicium polycristallin

II.9.3.1 Modèle de ségrégation des dopants

Ce modèle a été proposé par Cocher et Sidgwick, pour expliquer la variation de la résistivité en fonction de la concentration de dopant : l'hypothèse de départ est que les joints de grains constituent des sites préférentiels pour la ségrégation des atomes de dopant. Pour les faibles concentrations de dopant, presque tous les atomes sont localisés aux joints de grains, ou ils sont supposés neutres et électriquement inactifs. La concentration en porteurs libres rejoint celle en dopant, et la résistivité du film de silicium poly-cristallin qui a d'abord diminué très rapidement, croît linéairement avec la concentration de dopant aux forts dopages [27]

Ce modèle, basé sur le mécanisme de la ségrégation des dopants, n'est pas en mesure d'expliquer la variation de la résistivité avec la température, et le [8]minimum de la mobilité de Hall des porteurs, observé aux concentrations intermédiaires de dopant [27]

II.9.3.2 Modèle de piégeage des porteurs.

Grâce à Seto, le modèle de piégeage des porteurs a été développé et a pu bien expliquer les propriétés du silicium polycristallin, Il s'agit notamment des propriétés de conduction électrique, sur la base d'un ensemble d'hypothèses :[30]

- Grains identiques de taille L .
- Les joints de grains ont une épaisseur négligeable par rapport à la taille des grains, et contiennent une densité d'états pièges Q_t , situés à un niveau d'énergie E_t par rapport au niveau intrinsèque dans la région neutre.
- Les pièges sont initialement neutres et se chargent en piégeant des porteurs.
- Présence d'un seul type d'atomes de dopant uniformément distribués et totalement ionisés avec une concentration N dans la couche de silicium poly- cristallin.[30]

II.9.4 Défauts dans le silicium polycristallin

II.9.4.1 Les défauts cristallographiques

II.9.4.1.1 Les défauts intragranulaires

Les dislocations sont des défauts linéaires, créées à partir d'un glissement de certains plans

Atomiques par rapport à d'autres ou de la distorsion de deux régions adjacentes l'une par rapport à l'autre dans la structure cristalline.

Elles sont dues aux chocs thermiques lors de l'élaboration du matériau ou encore à la présence d'impuretés. Ces défauts sont électriquement actifs. Ils augmentent la vitesse de recombinaison des porteurs minoritaires ce qui provoque la réduction de leur longueur de diffusion.[31]

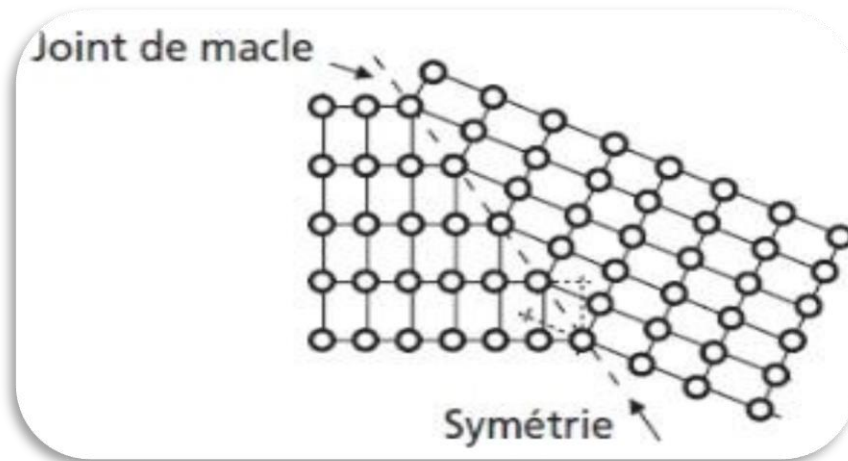


Fig (II.17) : Schématisation à deux dimensions d'un joint de macle [23]

II.9.4.1.2 Les joints de grains

Les joints de grains sont composés par les surfaces adjacentes de grains d'orientation cristallographiques divers, Il a également une structure désordonnée et contient de grandes quantités de liaisons pendantes qui piègent les porteurs minoritaires présents dans la bande interdite car ils attirent les porteurs majoritaires, ce qui conduit à affaiblir leur présence et à une dégradation des propriétés électriques des semi-conducteurs polycristallins. [29]

II.9.4.2 Les défauts chimiques

II.9.4.2.1 L'oxygène

L'hydrogène est l'une des impuretés les plus compatibles avec le silicium. Précipité sous forme de SiO_x. Il agit pour piéger les impuretés dans la couche et détériorer la durée de vie et la longueur de diffusion des porteurs minoritaires [32]

En effet, sa présence conduit à un piégeage des impuretés dans la couche et à une dégradation de la durée de vie et de la longueur de diffusion des porteurs minoritaires

II.9.4.2.2 L'hydrogène :

Comme nous venons de le voir, Les joints de grains et les dislocations constituent des centres de recombinaison des porteurs de charges. Ils sont électriquement actifs et tendent à limiter les performances du silicium polycristallin [32]

L'hydrogénation des couches poly-cristallines permet la passivation des liaisons pendantes provoquées par les dislocations. Cela se fait en formant des liaisons entre les atomes d'hydrogène et les défauts structurels du silicium (liaisons pendantes). [31]

L'hydrogénation des couches polycristallines (et amorphes) permet de passiver les liaisons pendantes générées par les dislocations. Elle permet donc de réduire la densité des défauts électriquement actifs comme l'ont reporté Ditzio *et al.* et Jousse *et al.* [31]

II.10 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 [23]



Fig (II.18) : Le chauffage par induction électromagnétique [23]

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 [23]

Le chauffage par induction entraîne successivement les phénomènes physiques suivants

- ✓ Le transfert de l'énergie par voie électromagnétique de l'inducteur vers le matériau à chauffer.
- ✓ La transformation de cette énergie électrique en chaleur par effet Joule.
- ✓ La diffusion par conduction thermique de la chaleur au sein du matériau[23]

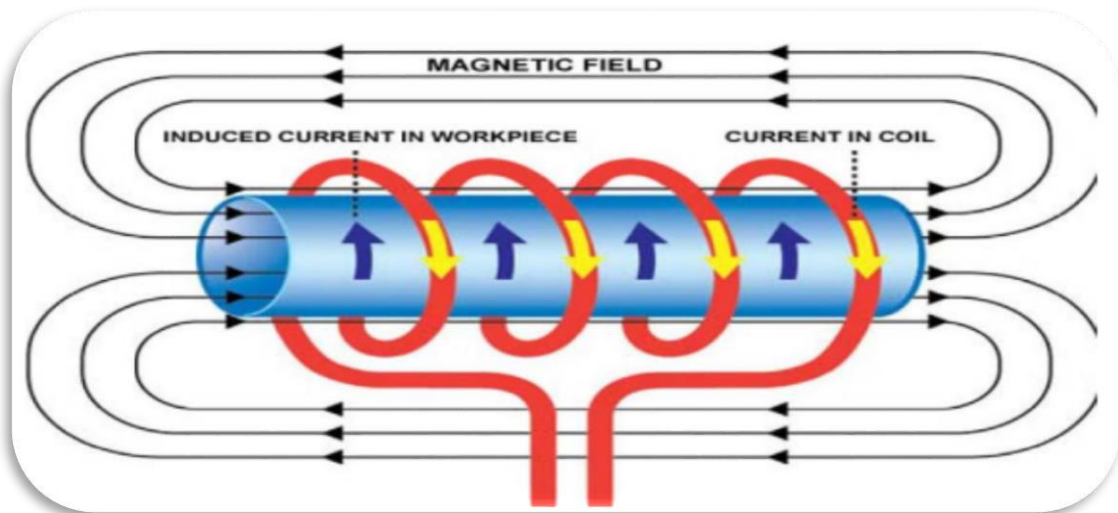


Fig (II.19) : Principe du chauffage par induction électromagnétique [23]

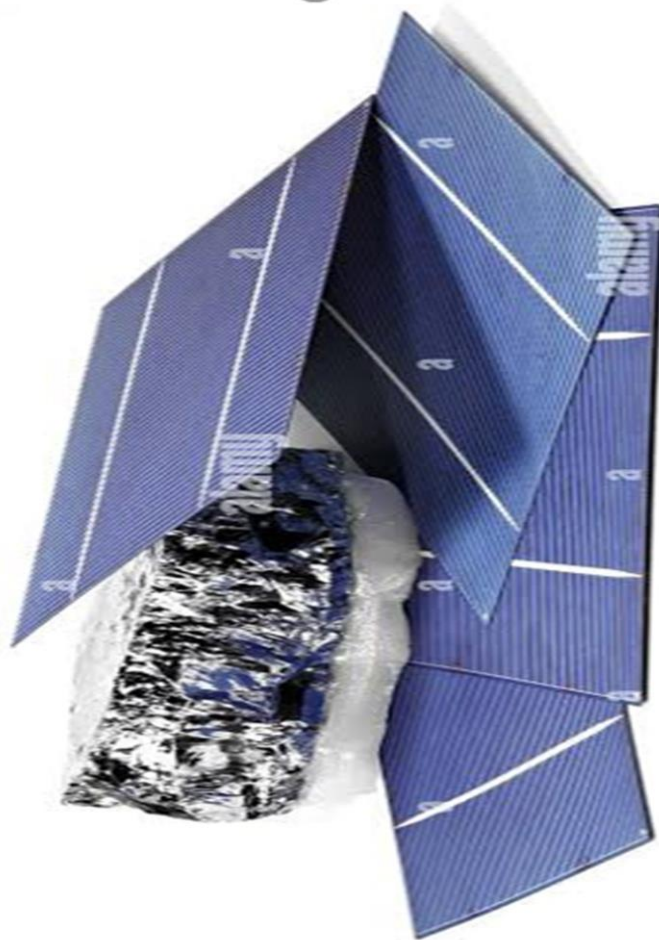
II.11 Conclusion :

Le silicium photovoltaïque est une technologie prometteuse pour produire de l'énergie solaire renouvelable. des améliorations continues dans la technologie et la production, le silicium photovoltaïque pourrait jouer un rôle important dans la transition vers une énergie propre et durable

Dans cette chapitre nous expliquons les déférent état du silicium et les techniques de chaque état .et induction électromagnétique

Chapitre III:

Résultats et interprétations



III.1 Introduction :

Dans les domaines des sciences et de l'ingénierie, la simulation numérique est devenue un élément primordial. Elle permet de découvrir 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 important d'avoir un environnement de simulation qui inclut la possibilité d'ajouter différents phénomènes physiques au modèle étudié. C'est dans ce contexte que COMSOL-MULTIPHYSICS a été développé

III.2. Présentation du logiciel COMSOL Multi-physiques :

Le logiciel Comsol Multiphysics est un programme d'analyse structurelle, permettant de résoudre des problèmes de physique et d'ingénierie par éléments finis : Mécanique des structures, électromagnétisme haute et basse fréquence, écoulement, transfert de chaleur, réactions chimiques, optiques, acoustiques et autres, plus particulièrement les phénomènes couplés ou multi-physiques. Les logiciels couvrent plusieurs plateformes (Windows, Mac, Linux). En plus des interfaces utilisatrices classiques basées sur la physique. [33]

COMSOL Multiphysics est un logiciel de simulation numérique basé sur la méthode des éléments finis. Un élément fini est la donnée d'une cellule élémentaire et de fonctions de base de l'espace d'approximation dont le support est l'élément, et définies de manière à être interpolées.

COMSOL Multiphysics est un programme d'analyse structurelle, qui couvre toutes les étapes du flux de travail de modélisation, de la définition de la géométrie, des propriétés des matériaux et de la physique décrivant les phénomènes spécifiques à la résolution au post-traitement des modèles pour produire des résultats précis et fiables.

Ce logiciel fournit une interface complète avec MATLAB et ses boîtes à outils pour une grande variété de capacités de programmation, de prétraitement et de post-traitement. Les produits d'interface permettent également d'intégrer des simulations à d'autres logiciels d'ingénierie et mathématiques utilisés dans la conception de produits et de processus. Une fois que vous avez développé un modèle, vous pouvez même le

convertir en une application de simulation avec une interface utilisateur dédiée, qui peut être conçue pour une utilisation très spécifique [33]

III.2.1 Les Avantages:

- Affecte plusieurs domaines (électronique, électrotechnique, Médecine...)
- Etude 0D, 1D, 2D, 3D
- Programmation directe
- A l'aide d'une interface graphique [33]

III.2.2 Les inconvénient:

- Il manque de certaines fonctions utiles telles que les dérivés...etc.
- Nécessité de disposer d'un ordinateur puissant et performant (carte graphique, espace RAM...) [33]

III.3 Description de l'interface COMSOL :

COMSOL Desktop aide à organiser nos simulations en fournissant toujours un aperçu clair du modèle. Il utilise la forme fonctionnelle, la structure et l'esthétique comme des moyens simples pour réaliser une modélisation complexe de la réalité. Par exemple, des outils spécifiques à une tâche apparaissent sur le bon bureau lorsque nous en avons besoin, montrant uniquement ce qui est actuellement possible, ce qui supprime l'incertitude de la construction de modèles et apporte un peu d'ordre à nos simulations. Le bureau se compose de plusieurs fenêtres qui peuvent ou non être affichées comme vous le souhaitez. Ces fenêtres incluent Model Builder, Paramètres, Graphiques, Messages, Progression, Aide, etc. [33]

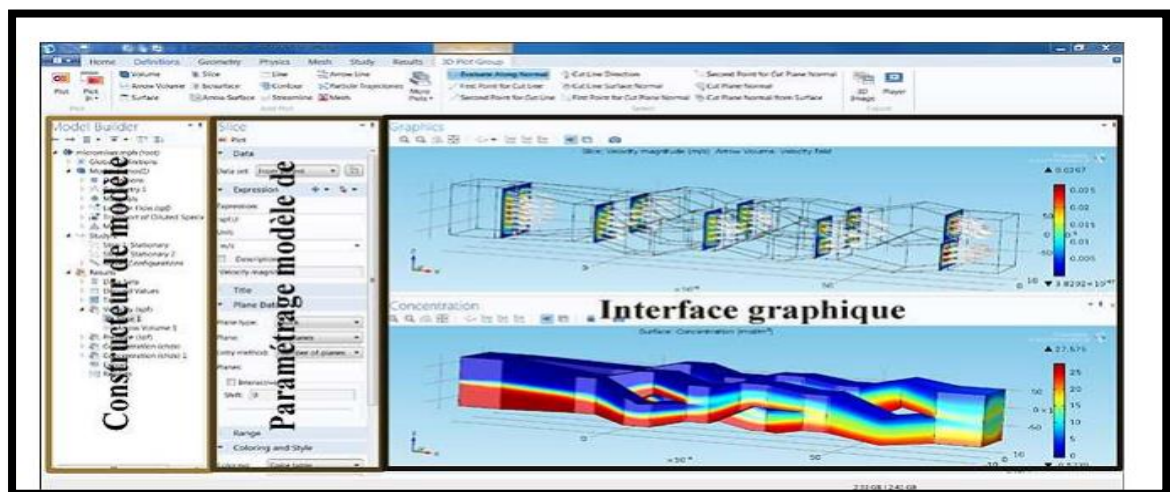


Fig (III.I) : l'interface COMSOL

III.4 Etape 1 : Mettre en place un environnement du modèle :

COMSOL Multiphysics propose des outils de modélisation géométrique en 1D, 2D et 3D, à partir d'un moteur géométrique COMSOL natif. Différentes primitives sont disponibles et il est également possible d'extruder des objets géométriques 2D en 3D. De plus, une révolution ou une extrusion peut être appliquée aux objets en 2D le long de courbes paramétrées. Les opérations booléennes (union, différence ou intersection par exemple) permettent de créer des formes plus complexes impliquant des ensembles de solides, de surfaces, de courbes et de points. Les fonctions de modélisation à main levée font appel aux surfaces et aux courbes paramétrées, ainsi qu'aux courbes interpolées. Les opérations géométriques sont toujours organisées selon une séquence dans l'arborescence du modèle.

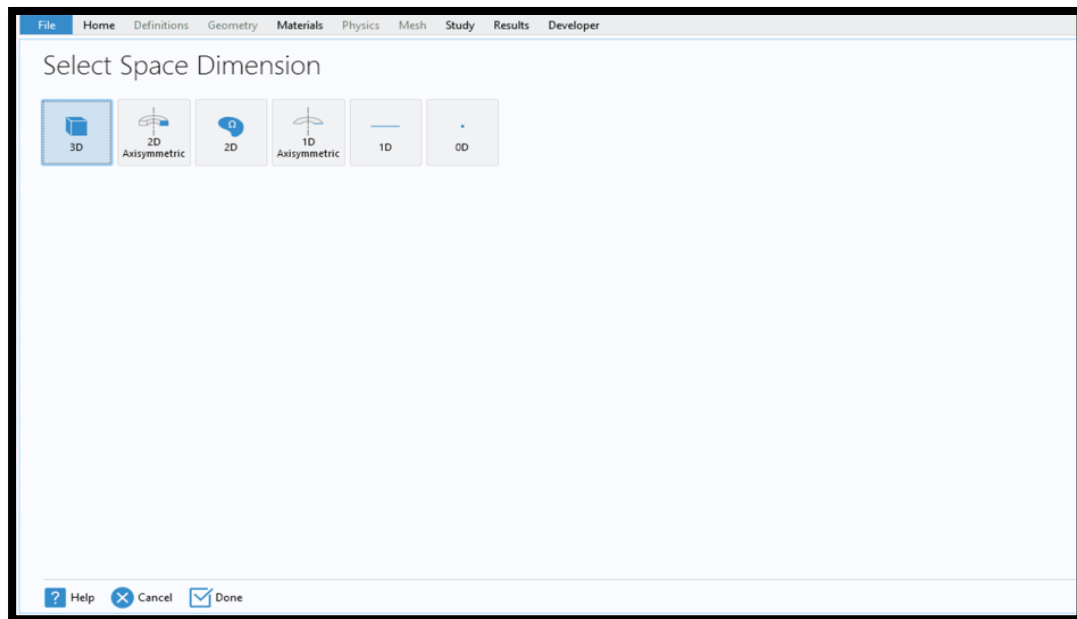


Fig (III.2): Fenêtre Description des dimensions

III.5 Etape 2 : La fenêtre « Ajouter des physiques » :

Cette fenêtre nous permet de choisir le domaine physique étudié en défilant le menu « Added physics interface » puis cliquer sur 

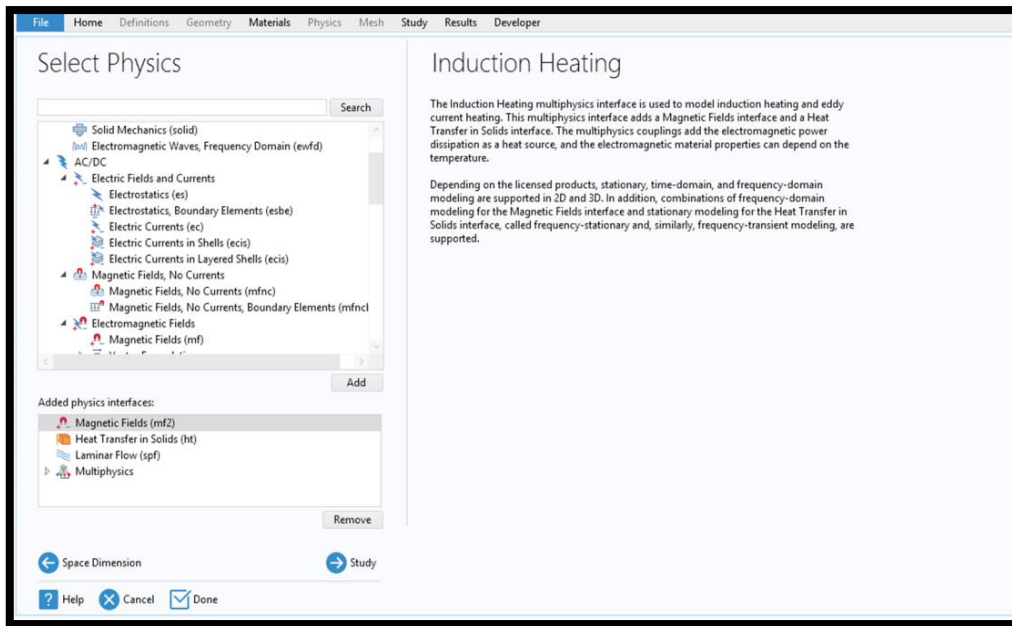


Fig (II.3): Fenêtre de domaine étudiant.

III.6 Etape 3 : La fenêtre « Géométrie » :

La Figure III.4 représente le modèle tridimensionnel (3D) de la géométrie de simulation qui sera utilisé dans le logiciel COMSOL Multiphysics. Le modèle se compose de deux composants principaux : la bobine et le creuset.

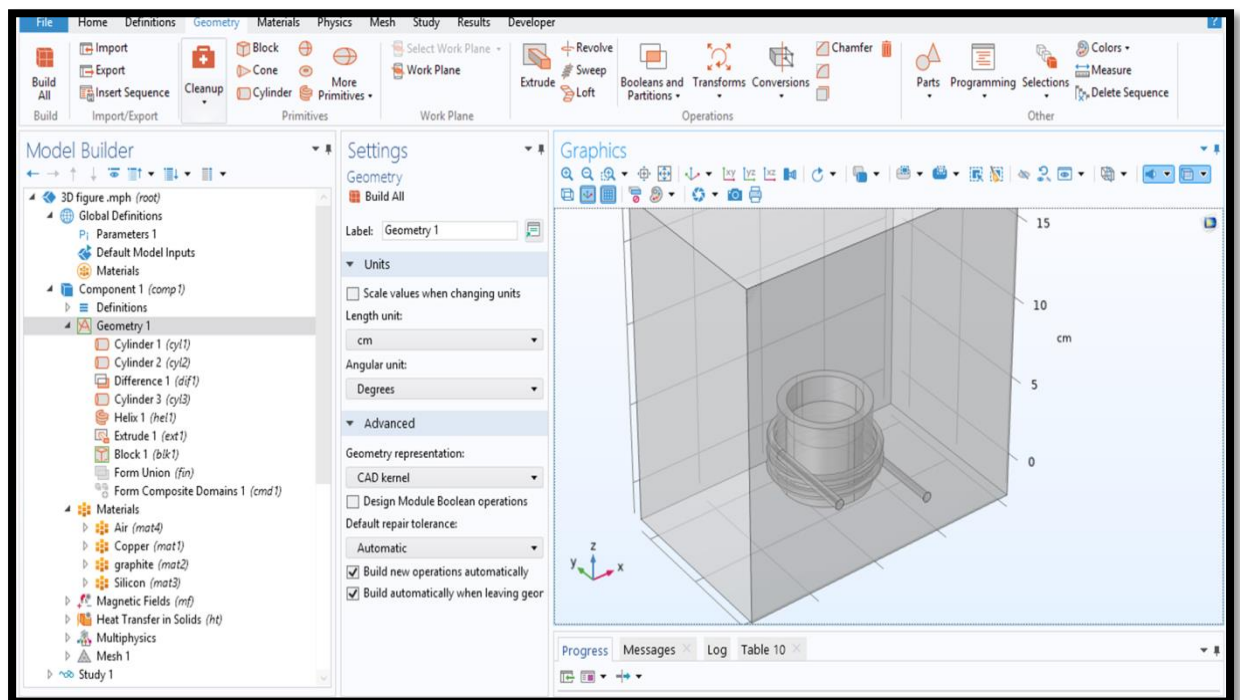


Fig (III.4): Fenêtre de la Géométrie



Fig (III.5) : La structure réalisée

Le modèle 3D de la géométrie que nous allons simuler à l'aide de COMSOL Multiphysics]

est décrit comme suit;

- **La Bobine:**

Est représentée comme une structure enroulée conçue pour générer un champ magnétique. Elle peut être composée de plusieurs tours de fil ou d'une configuration de solénoïde. La bobine a pour but d'induire un champ magnétique à l'intérieur du domaine de simulation, influençant ainsi le comportement des matériaux environnants, y compris le silicium à l'intérieur du creuset.

- **Le Creuset:**

Le creuset est le contenant qui contient le matériau de silicium, qui est l'objet de la simulation. Il est représenté comme une structure solide, généralement fabriquée dans un matériau thermorésistant, conçue pour résister aux températures élevées pendant le processus de simulation. Le creuset joue un rôle crucial en termes de confinement et de régulation du transfert de chaleur et d'autres phénomènes physiques se produisant à l'intérieur du matériau de silicium.

- **Ensemble:**

la bobine et le creuset forment la géométrie de simulation, représentant les composants essentiels du système étudié. L'interaction entre le champ magnétique généré par la bobine et le comportement du silicium à l'intérieur du creuset sera étudiée à l'aide de COMSOL Multiphysics.

La simulation de l'interaction entre une bobine et un creuset contenant du silicium à l'aide de COMSOL Multiphysics peut fournir des informations sur le comportement de chauffage et de fusion du silicium lors du chauffage par induction. La géométrie en 3D de notre simulation comprend une bobine avec 2,5 tours et un creuset en graphite entourant le silicium. Pour configurer notre simulation, nous commencerions par définir la géométrie du système en 3D à l'aide du module de géométrie de COMSOL. Cela impliquerait de définir les dimensions et la forme de la bobine, du creuset et du silicium, ainsi que toutes les conditions ou contraintes limites pertinentes. Ensuite, nous mettrions en place les équations et la physique pertinente pour simuler les processus électromagnétiques et thermiques. Le module Champs magnétiques de COMSOL serait utilisé pour modéliser les champs magnétiques générés par la bobine transportant le courant et les courants de Foucault induits dans le silicium. Le module de transfert de chaleur dans les solides de COMSOL serait utilisé pour simuler le transfert de chaleur et l'évolution de la température dans le silicium en raison des courants de Foucault induits.

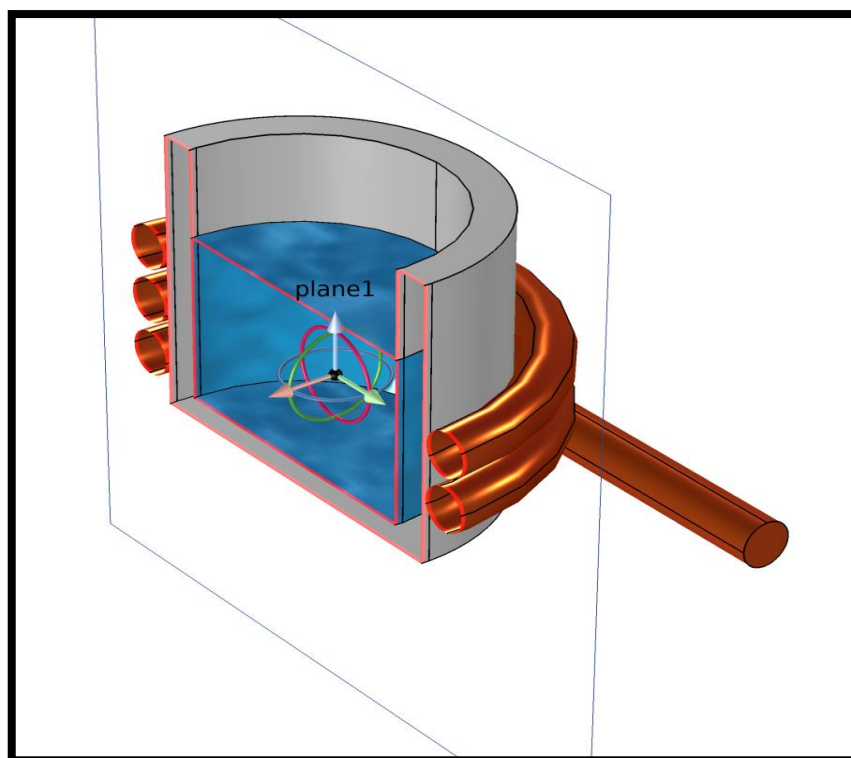


Fig (III.6) : La coupe transversale de structure

La Figure(III.6) illustre une vue en coupe transversale de la géométrie, offrant un aperçu détaillé de la structure de la bobine et du creuset dans la simulation.

III.7 Etape 4 : La fenêtre « Matériel » :

Ce menu nous permet de choisir le matériau voulu et l'introduire dans les différentes régions de la structure. Le logiciel est muni d'une bibliothèque des matériaux existants déjà et il nous donne la possibilité de rajouter d'autres matériaux de notre choix.

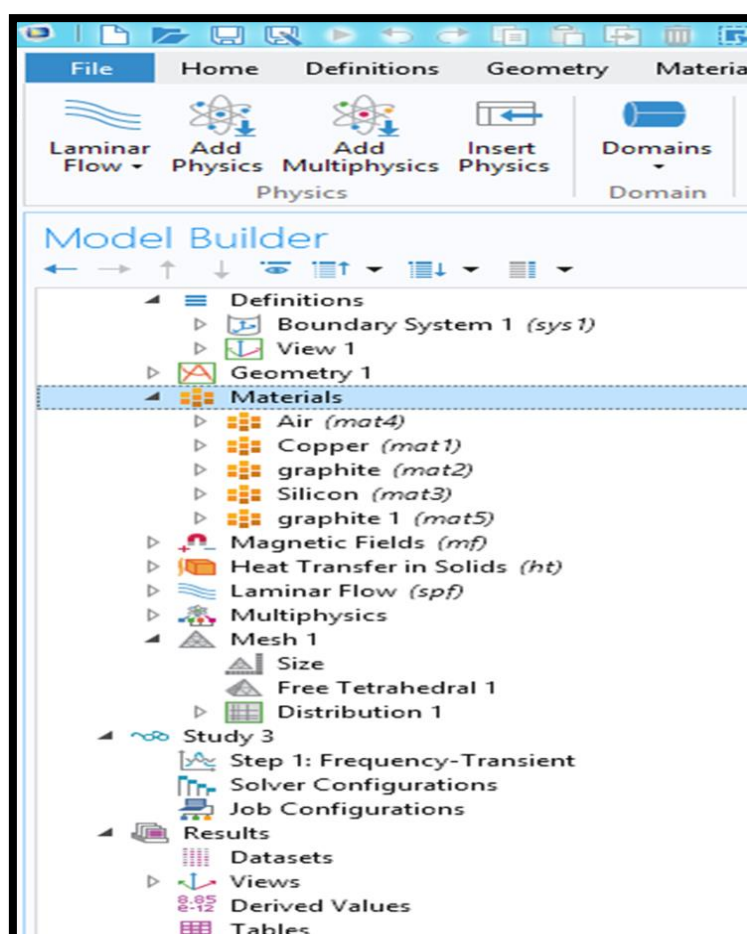


Fig (III.7) : Fenêtre du type de matériaux

III.8 Etape 5 : La fenêtre « Maillage » :

La fenêtre de maillage possède toutes les caractéristiques qui définissent une séquence de maillage. Faites un clic droit pour ajouter une fonctionnalité ou pour construire des éléments que vous avez utilisé pour réaliser le maillage.

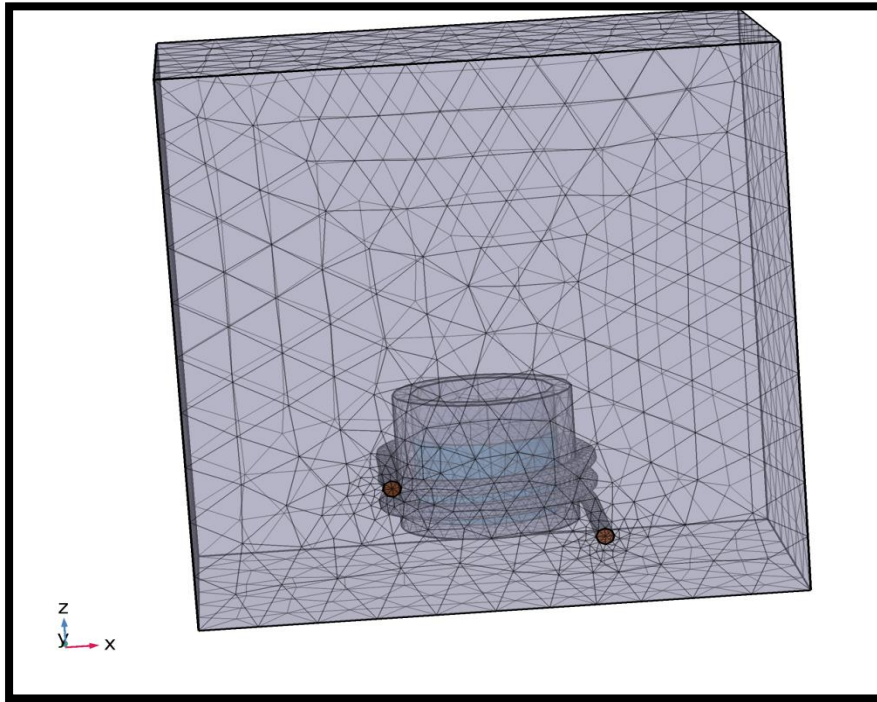


Fig (III.8): Fenêtre de réalisation du maillage

III.9 Etape 6: La fenêtre « étude » :

Avec un click droit sur ce menu, la fonctionnalité « Comput » s'affiche et nous permet de lancer la simulation qui consiste à résoudre les équations propres au modèle : Poisson et continuité des porteurs dans notre cas.

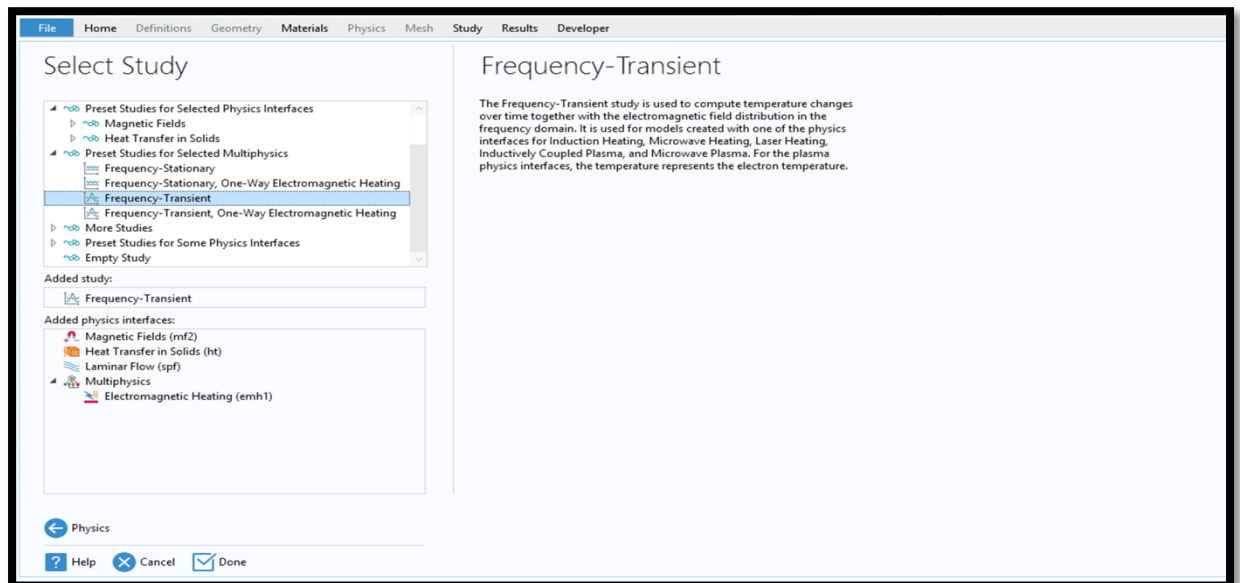


Fig (III.9) : Fenêtre de type d'étude

III.10 Etape 7 : La fenêtre « Résultats » :

En utilisant des simulations à la fois dans le domaine de la fréquence et dans le domaine temporel dans notre étude, nous pouvons obtenir une compréhension complète du comportement de chauffage et de fusion du système, notamment le temps nécessaire pour atteindre le point de fusion et la dégradation de la chaleur dans la géométrie.

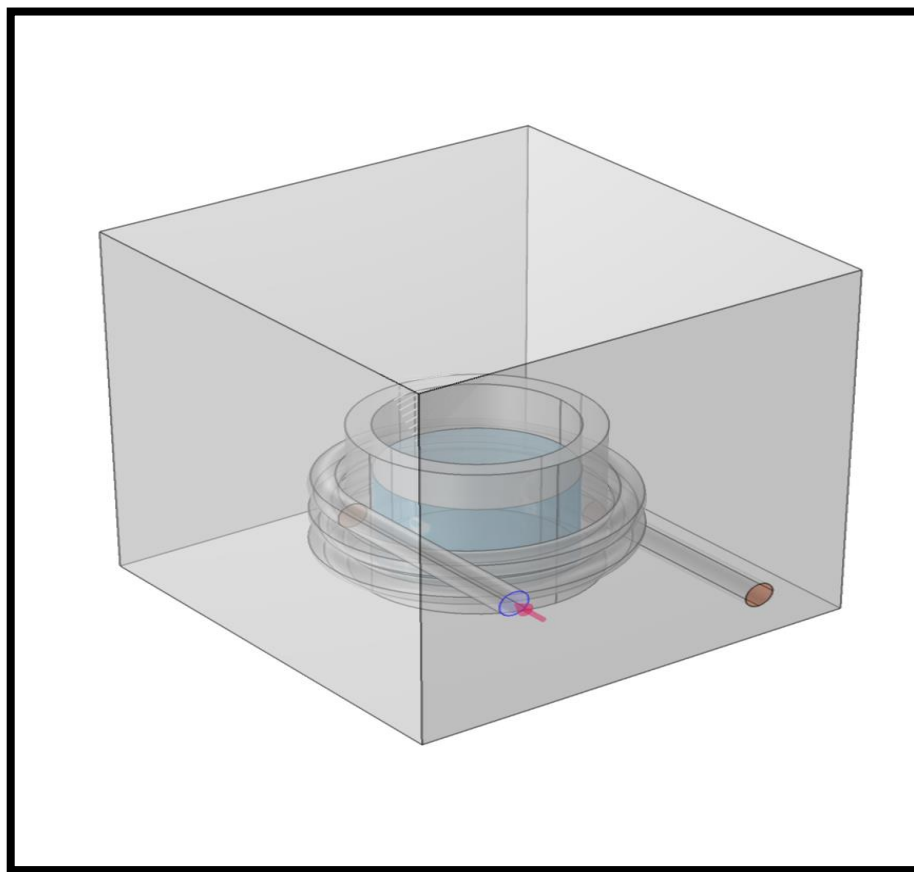


Figure (III.10): la géométrie dans le domaine de l'air

La Figure III.10 présente la géométrie dans le domaine de l'air, offrant une représentation visuelle de l'espace environnant où se situent la bobine et le creuset.

- **Le Domaine de l'Air:**

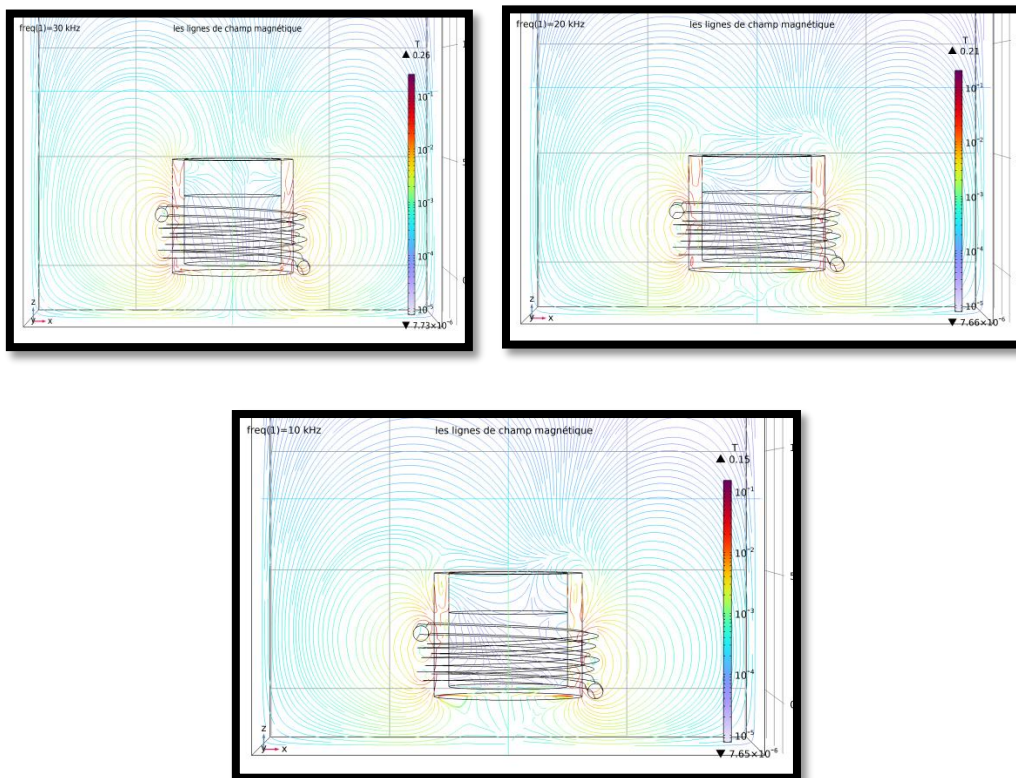
Dans cette figure, l'accent est mis sur la région entourant la bobine et le creuset, qui est remplie d'air. Le domaine de l'air s'étend au-delà de la bobine et du creuset, mettant en évidence les limites et l'espace dans lequel le champ magnétique et les autres interactions se produisent.

- **La Bobine et le Creuset :**

Dans le domaine de l'air, la bobine et le creuset sont présents en tant que composants distincts. Ils sont représentés comme des structures délimitées, mettant en évidence leur forme et leur position dans l'air environnant. L'arrangement relatif de la bobine et du creuset peut être observé par rapport au domaine de l'air.

En présentant la géométrie dans le domaine de l'air, la Figure 3 permet de comprendre le contexte spatial dans lequel la bobine et le creuset opèrent. Cette visualisation aide à appréhender l'interaction entre le champ magnétique, les matériaux à l'intérieur du creuset et l'air environnant.

La figure comprend également une flèche pour indiquer les courants d'entrée dans la bobine. Le courant d'entrée représente l'énergie électrique circulant dans la bobine, ce qui génère le champ magnétique.



Figure(III.11): Lignes de champ magnétique au sein de la structure

Le schéma III.11 met en évidence la distribution des lignes de champ magnétique au sein de la coupe transversale. Il représente visuellement les trajectoires et l'intensité des lignes de champ magnétique traversant les différentes régions du système.

Les simulations dans le domaine temporel, quant à elles, sont utilisées pour analyser le comportement transitoire du système au fil du temps. En simulant l'évolution temporelle des champs magnétiques et de la distribution de température dans le système, nous pouvons analyser le temps nécessaire pour atteindre le point de fusion et la dégradation de la chaleur dans la géométrie. Ces informations peuvent être utilisées pour optimiser le fonctionnement du système de chauffage par induction, par exemple en ajustant la puissance d'entrée ou la fréquence par exemple ou bien la géométrie du système pour améliorer l'efficacité de chauffage et réduire les pertes de chaleur.

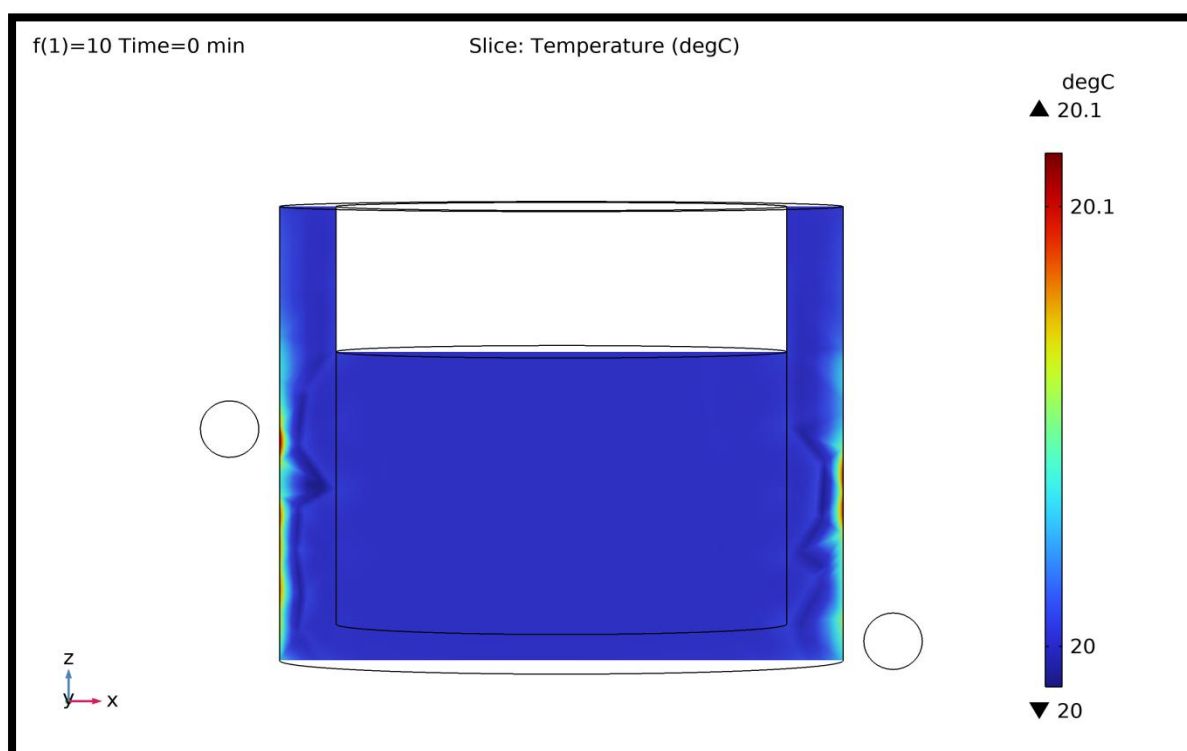


Figure (III.12) : Evaluation temporelle de la température pour une fréquence de 10kHz. A 0min

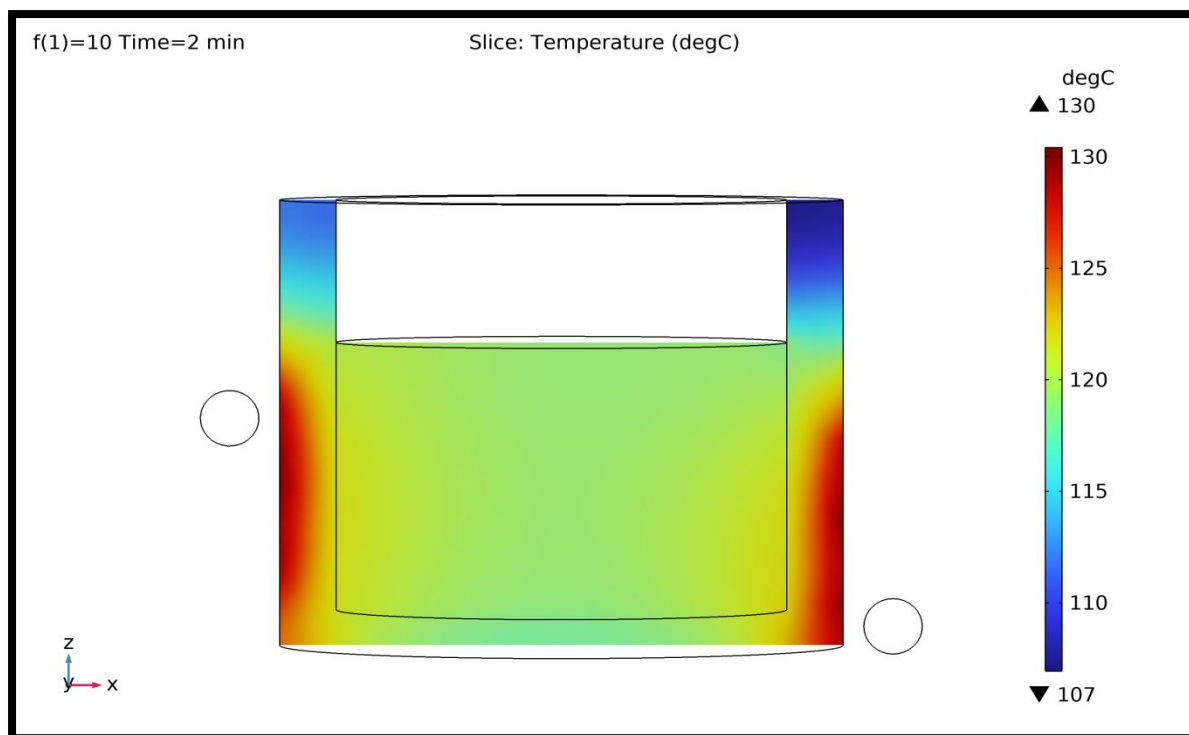


Figure (III.III) : Evaluation temporelle de la température pour une fréquence de 10khz. A 2min

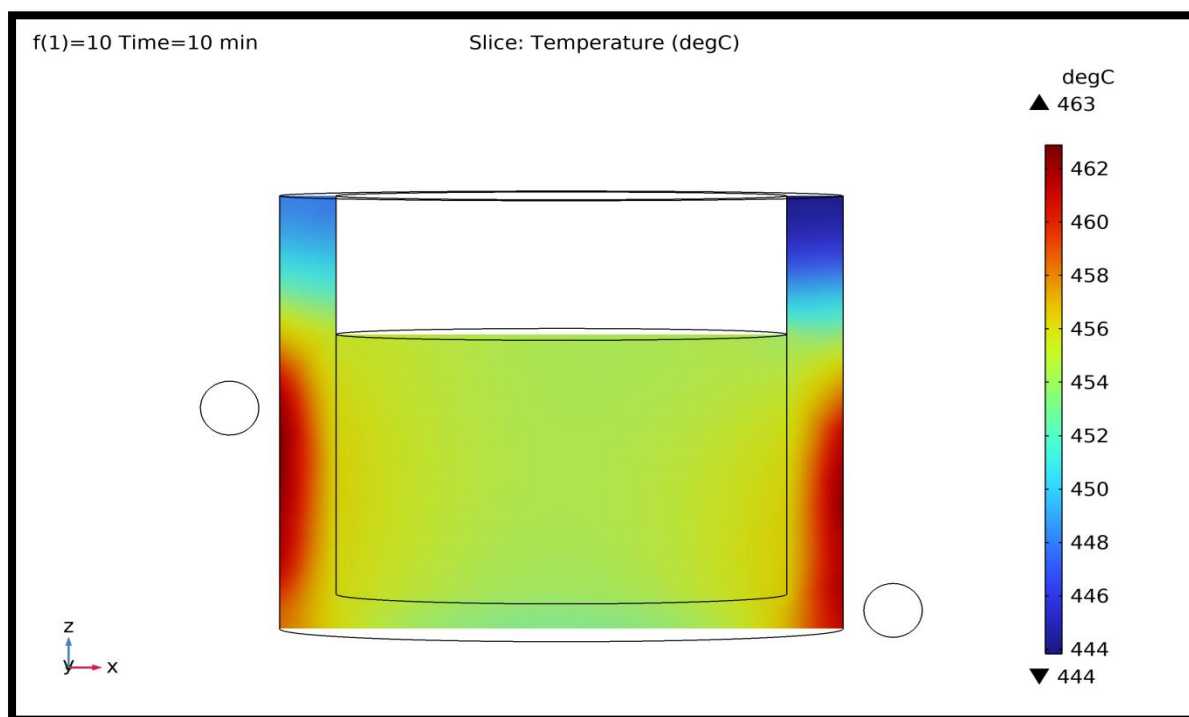


Figure (III.14) : Evaluation temporelle de la température pour une fréquence de 10khz.a 10 min

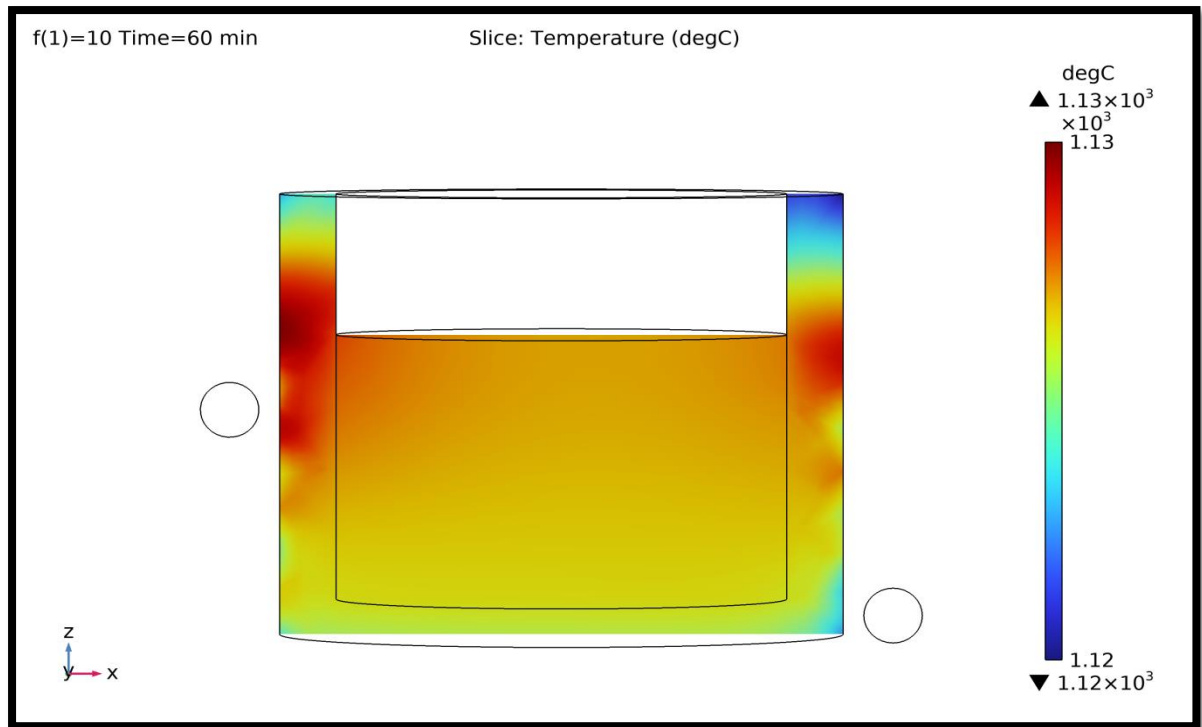


Figure (III.15) : Evaluation temporelle de la température pour une fréquence de 10kHz.a 60 min

La figure III.15 illustre le champ thermique au sein du lingot de silicium pendant le processus d'élaboration. Le mode de transfert de la chaleur se fait par 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 $1130\text{ }^{\circ}\text{C}$ où le silicium se trouve dans son état liquide sous l'effet de la fusion par induction

Les figure III.11 au III.15 illustrées en dessus représentent la caractéristique du de la température en fonction du temps pour une fréquence égale à 10 KHz , nous voyons clairement que la température du silicium dans le creuset passe de 120° à 1120° au bout de 58 mn.

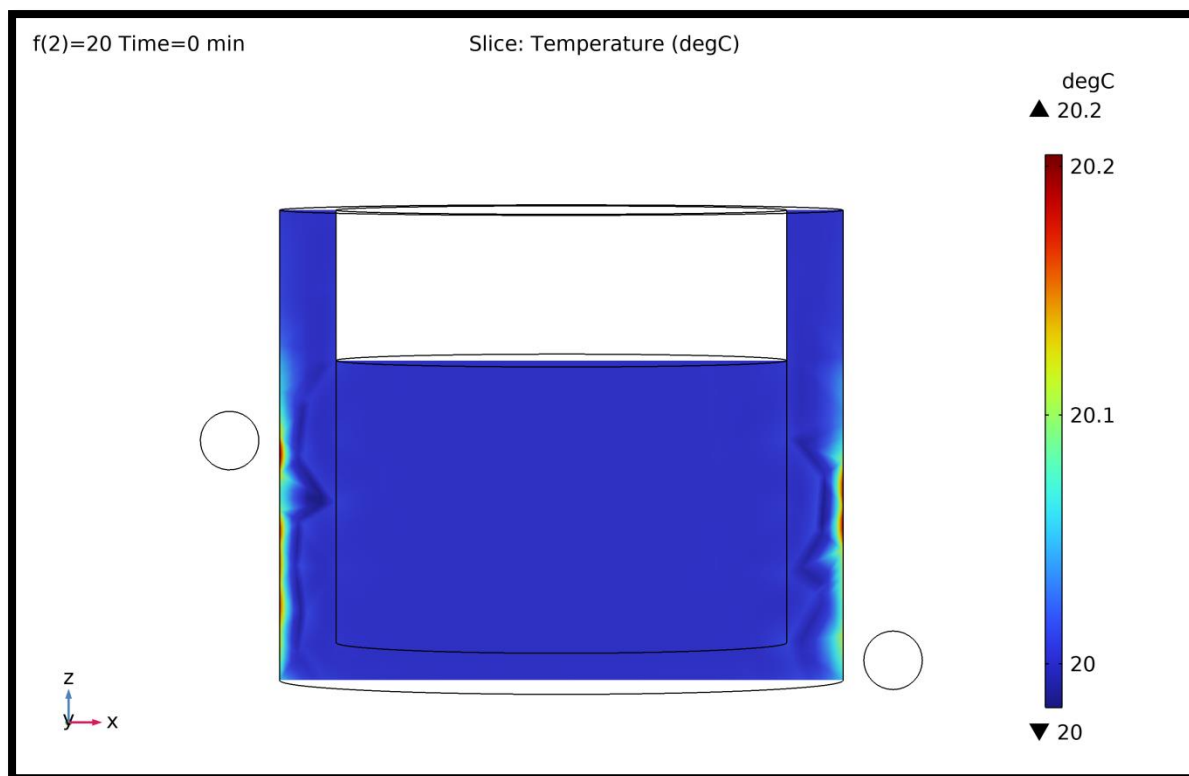


Figure (III.16) : Evaluation temporelle de la température pour une fréquence de 10khz.a 0 min

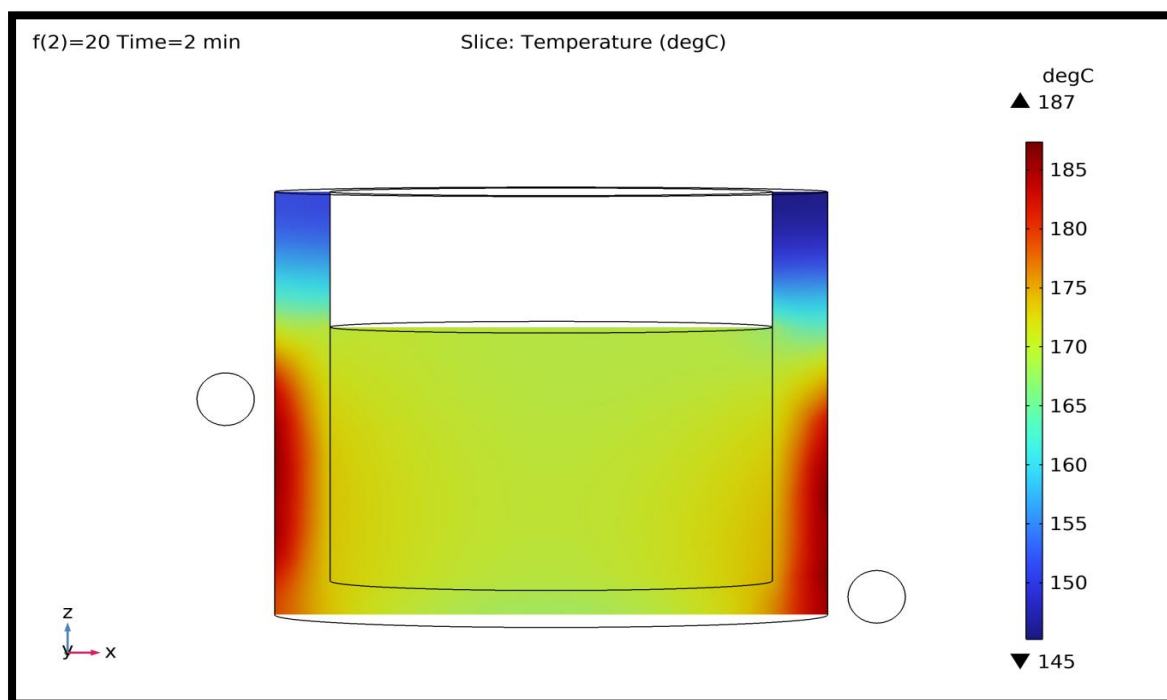


Figure (III.17) : Evaluation temporelle de la température pour une fréquence de 20khz. A 2min

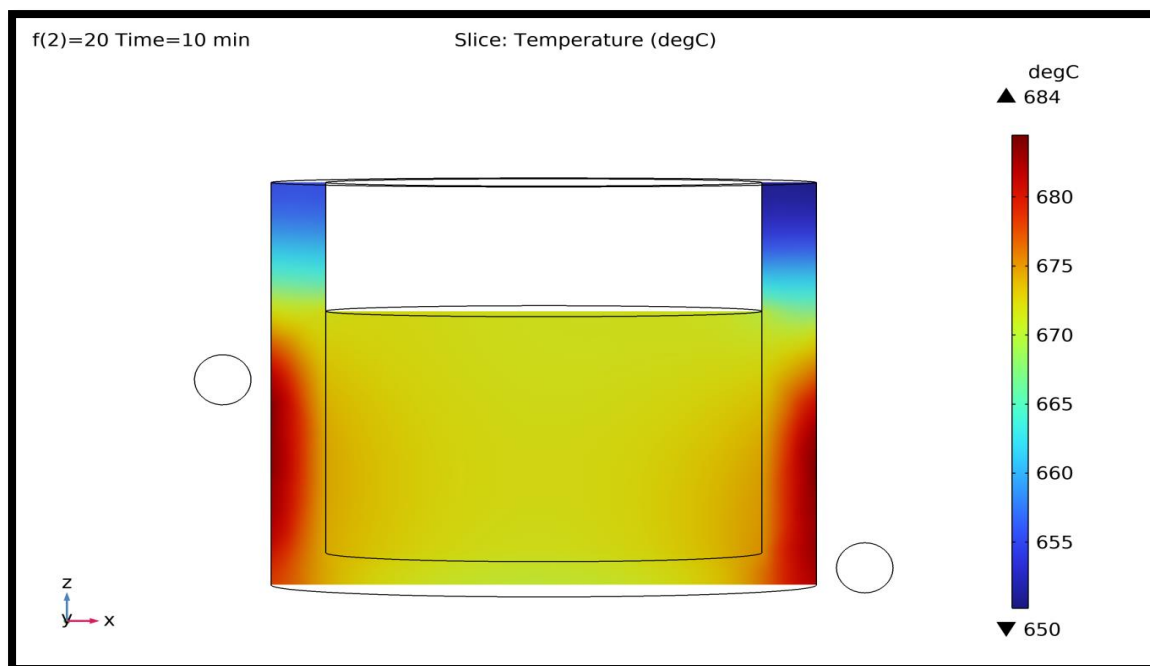


Figure (III.18) : Evaluation temporelle de la température pour une fréquence de 20kHz. A 10min

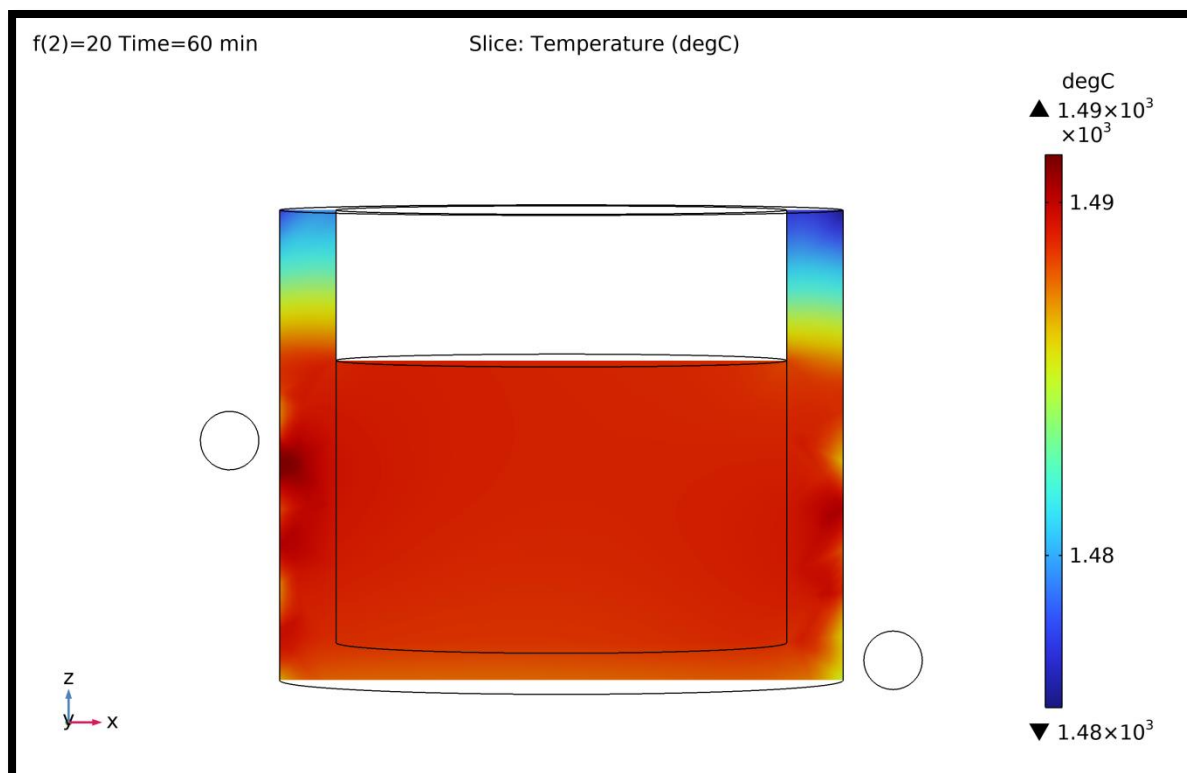


Figure (III.19) : Evaluation temporelle de la température pour une fréquence de 20kHz. A 60min

Nous constatons que le comportement de la fusion du silicium représenté dans les figures I.16 au I.19, garde les mêmes caractéristiques que celle des figures I.13 au I.15

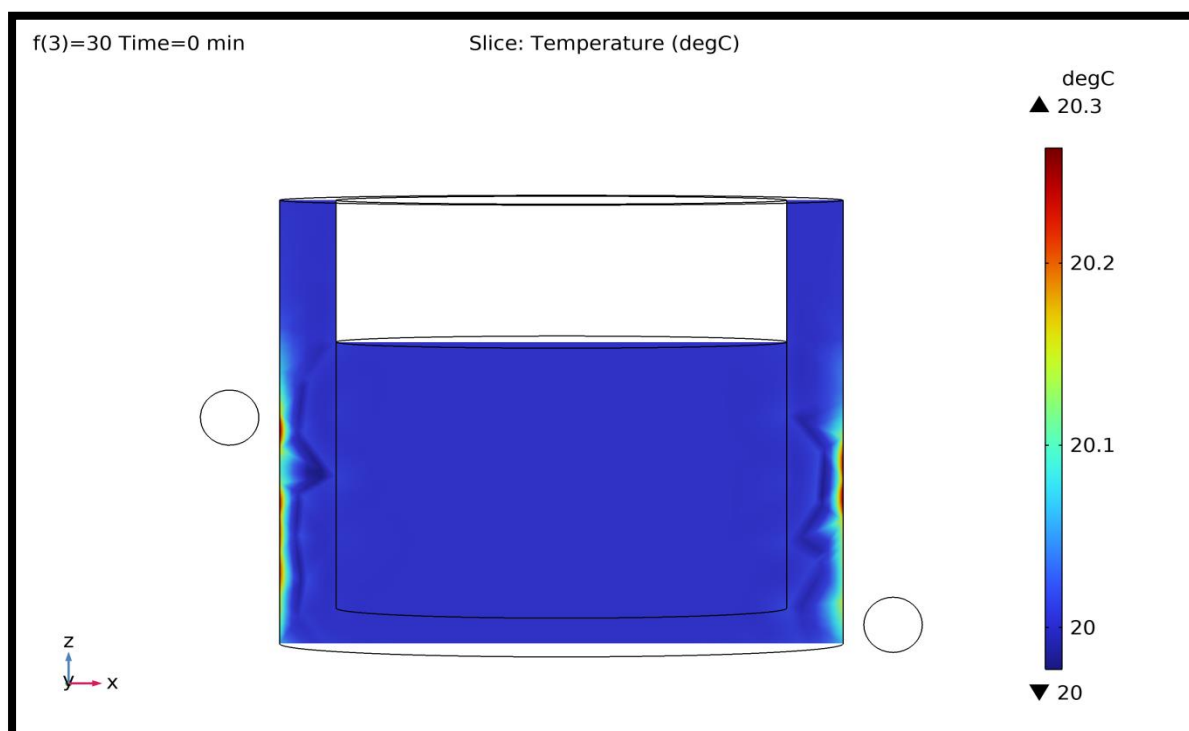


Figure (III.20) : Evaluation temporelle de la température pour une fréquence de 30kHz A 0min

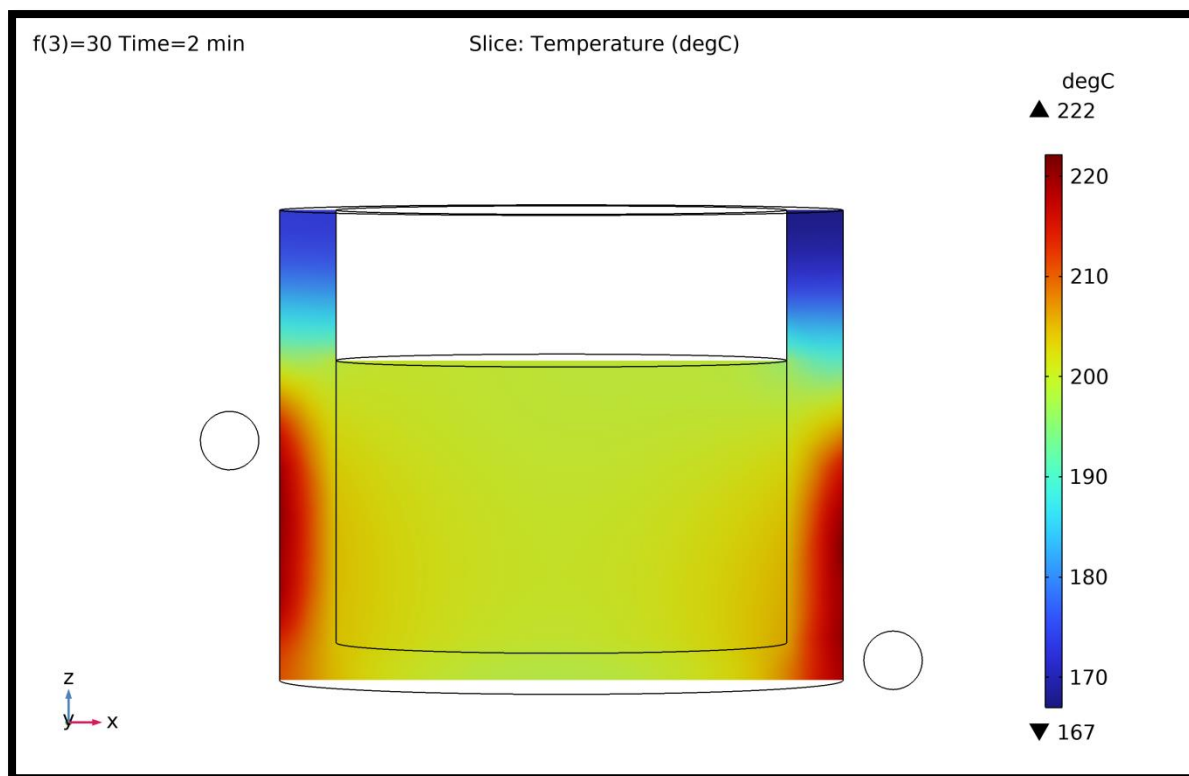


Figure (III.21) : Evaluation temporelle de la température pour une fréquence de 30khz. A 2 min

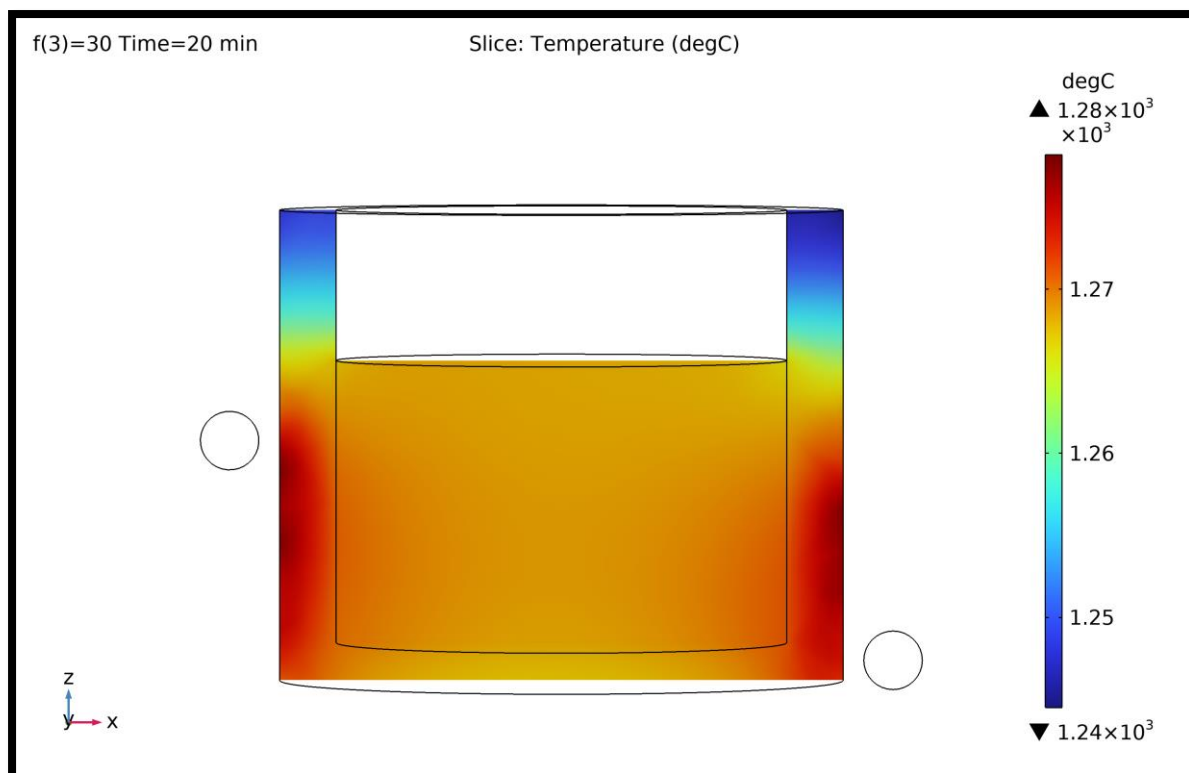


Figure (III.22) : Evaluation temporelle de la température pour une fréquence de 30khz. A 20min

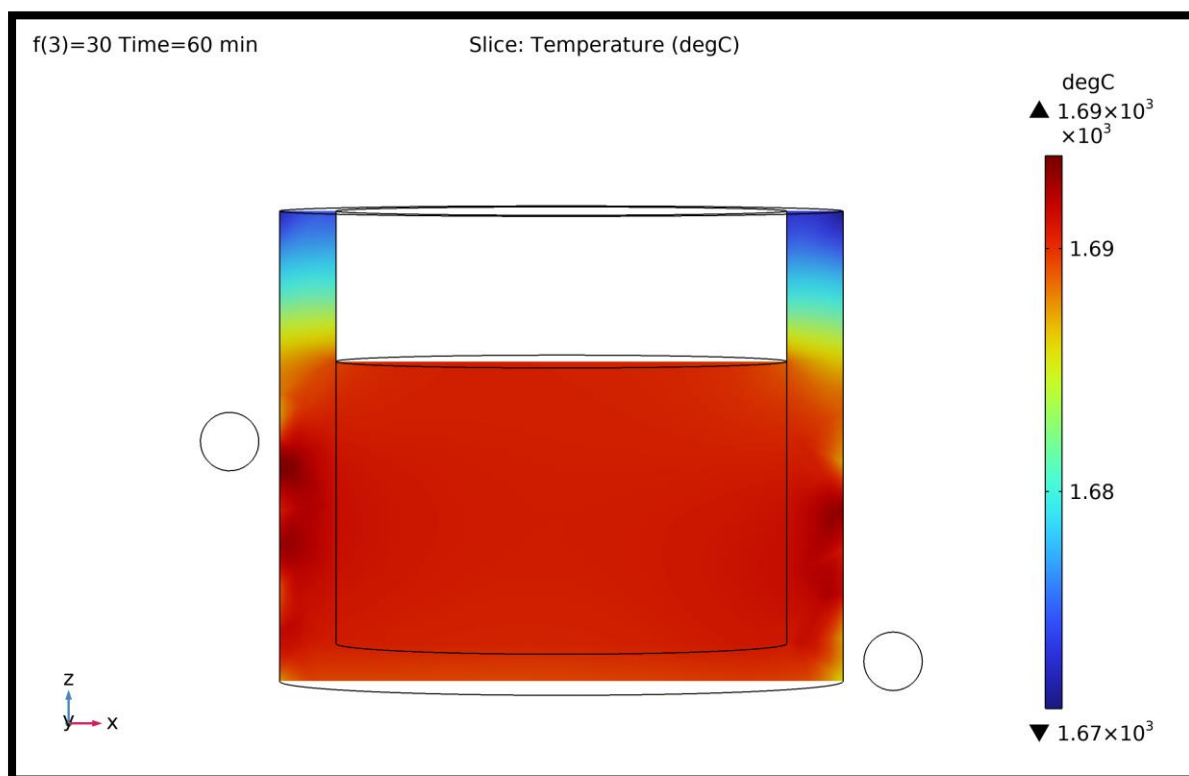


Figure (III.23) : Evaluation temporelle de la température pour une fréquence 30khz. A 60min

A travers le graphique qui illustre l'évaluation temporelle de la température pour une fréquence 30khz, nous remarquons A 60min la température grimpe à 1650°C

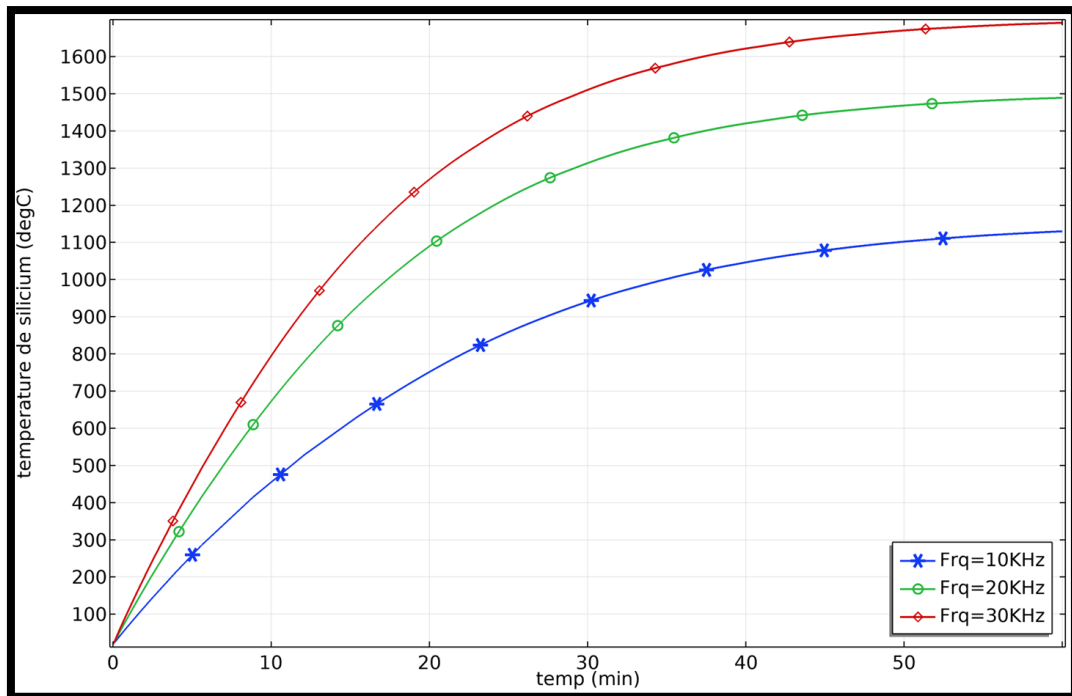


Figure (III.24) : l'évolution de la température du système

La Figure III.24 présente l'évolution de la température du système, comprenant le creuset et le matériau de silicium, pour différentes fréquences. Le graphique montre les variations de température au fil du temps pour des fréquences de 10 kHz, 20 kHz et 30 kHz, tout en maintenant le même courant d'entrée et la même tension (60 A / 200 V).

L'axe des x représente le temps, indiquant la durée de la simulation ou de l'expérience. L'axe des y représente la température en degrés Celsius ($^{\circ}\text{C}$), indiquant les variations de température du système.

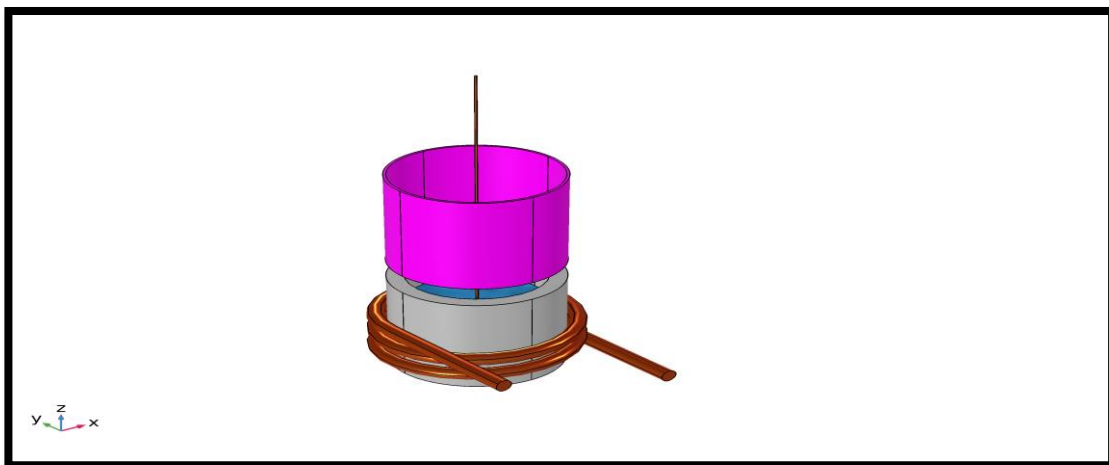


Figure (III.25) : Germe est placé dans le creuset suspendue au-dessus du liquide par une tirage

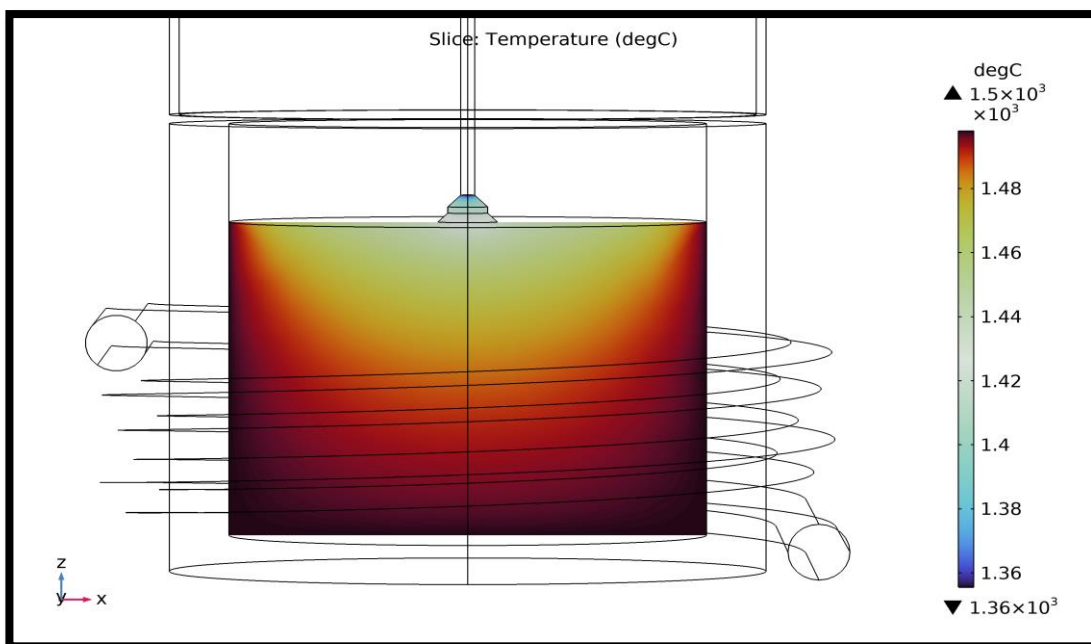


Figure (III.26) : Evaluation de la température Pour le 1er stade du tirage

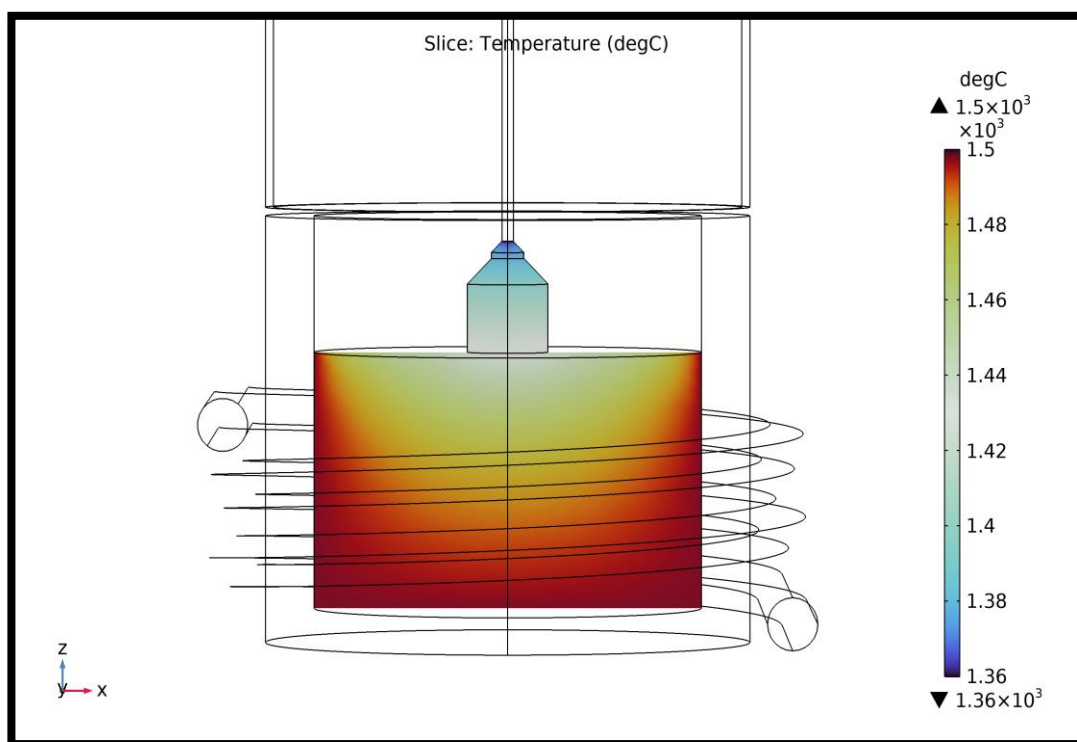


Figure (III.27) : Evaluation de la température Pour le 2eme stade du tirage

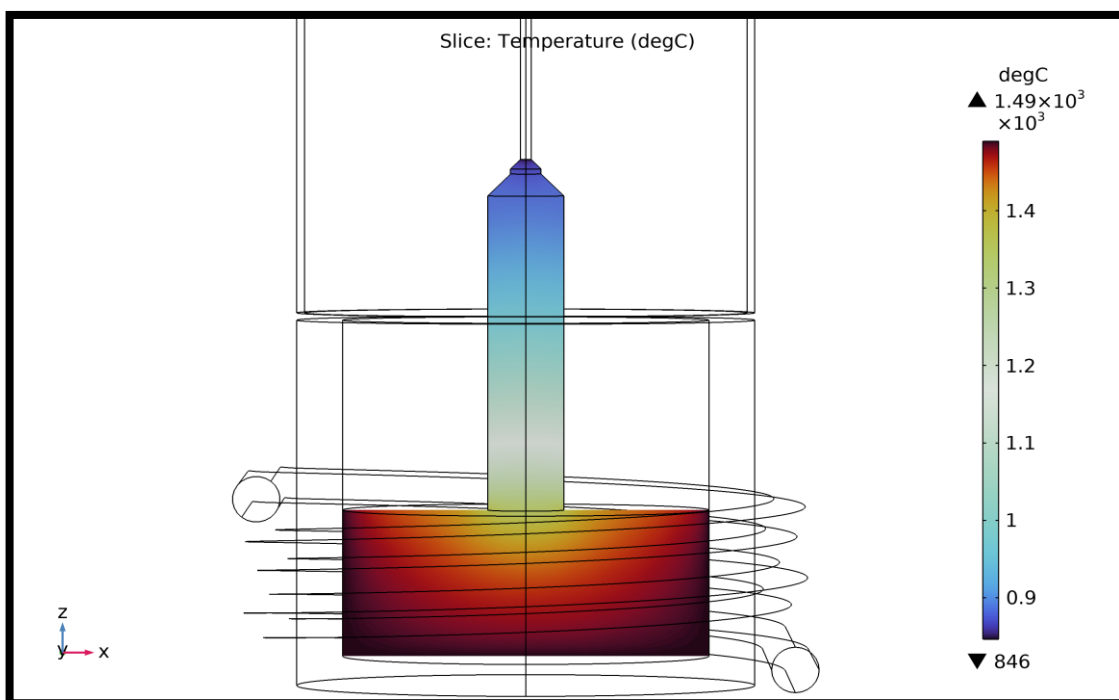


Figure (III.28) : Evaluation de la température Pour le 3eme stade du tirage

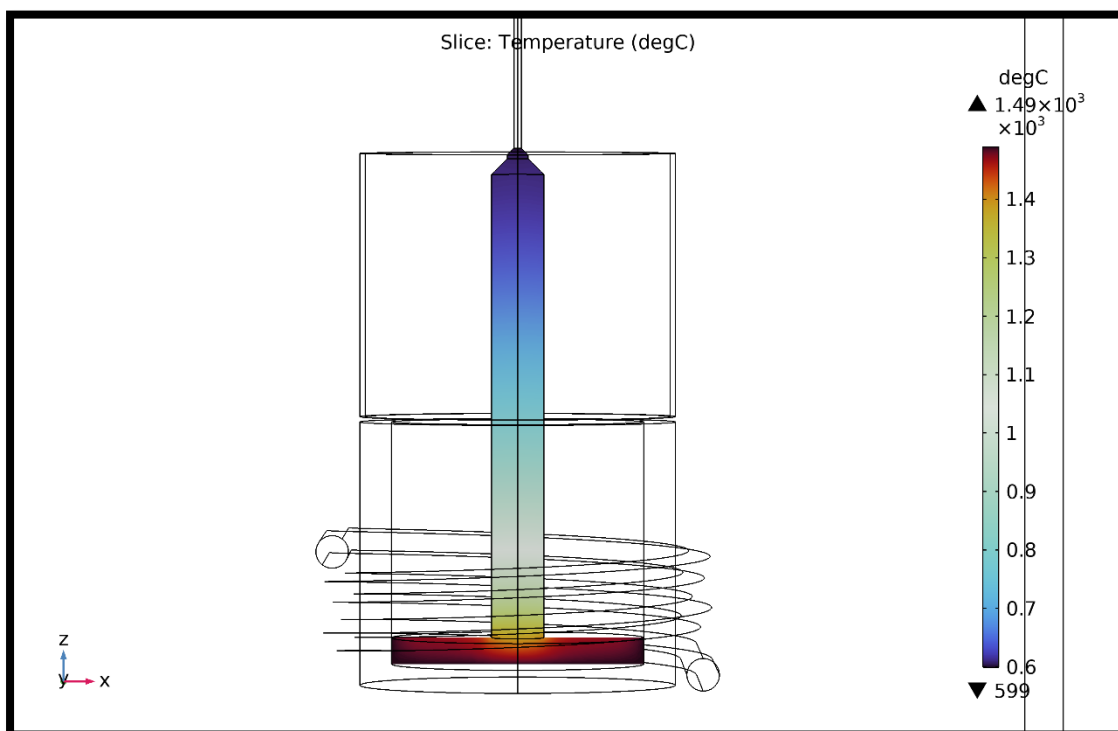


Figure (III.29) : Evaluation de la température Pour le 4eme stade du tirage

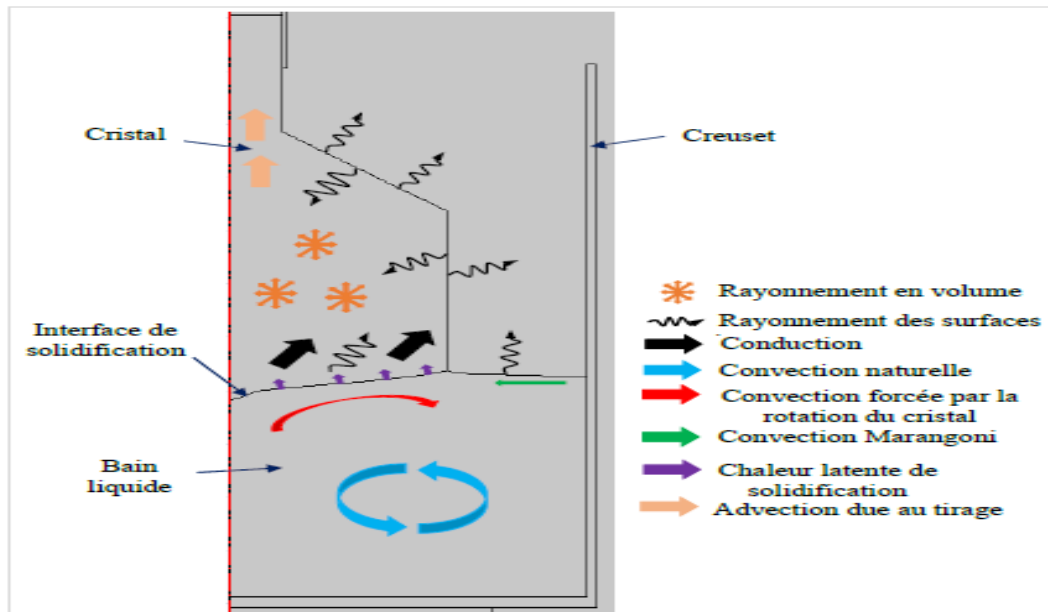


Figure (III.29) :les mecanismes de transfert de chaleur durant le tirage

II.11 Conclusion

Le chauffage inductif est parmi les techniques de chauffage les plus utilisées dans l'industrie de la croissance cristalline aujourd'hui, car il permet de chauffer les matériaux sans contact jusqu'à de très hautes températures. Le solénoïde en cuivre parcouru par un courant électrique alternatif produit un champ magnétique autour de lui mais surtout en son centre, dont la force dépend de l'intensité du courant. Ce champ va exercer une force, appelée force de Lorentz, sur les électrons libres présents dans le suscepteur en kanthal, ce qui génère un courant électrique appelé courant de Foucault. L'énergie se dissipe alors à l'intérieur du suscepteur sous forme de chaleur.

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats de simulation effectués avec le logiciel Multiphysics COMSOL pour la croissance de cristaux par la méthode Czochralski. Nous avons simulé les variations de température comprenant le creuset et le matériau de silicium, pour différentes fréquences 10 kHz, 20 kHz et 30 kHz, tout en maintenant le même courant d'entrée et la même tension (60 A / 200 V).

Conclusion Générale



Conclusion Générale

Notre étude porte sur la modélisation et la simulation numérique du procédé de développement du silicium pour la fabrication photovoltaïque. Le procédé adopté dans notre étude est basé sur l'écoulement continu de silicium liquide dans une partie du dispositif connue sous le nom de creuset froid, qui consiste à faire fondre du silicium solide par induction électromagnétique ne communiquant pas et sous l'effet d'un chauffage.

La simulation de l'interaction entre une bobine et un creuset contenant du silicium à l'aide de COMSOL Multiphysics peut fournir des informations sur le comportement de chauffage et de fusion du silicium lors du chauffage par induction. La géométrie en 3D de notre simulation comprend une bobine avec 2,5 tours et un creuset en graphite entourant le silicium. Pour configurer notre simulation, nous commencerions par définir la géométrie du système en 3D à l'aide du module de géométrie de COMSOL. Cela impliquerait de définir les dimensions et la forme de la bobine, du creuset et du silicium, ainsi que toutes les conditions ou contraintes limites pertinentes. Ensuite, nous mettrions en place les équations et la physique pertinentes pour simuler les processus .

Dans l'ensemble, la simulation de l'interaction entre la bobine, le creuset en graphite et le silicium à l'aide de COMSOL Multiphysics peut fournir des informations précieuses sur le comportement de chauffage et de fusion du silicium lors du chauffage par induction et aider à optimiser la conception et l'exploitation des systèmes de chauffage par induction.

En utilisant des simulations à la fois dans le domaine de la fréquence et dans le domaine temporel dans notre étude, nous pouvons obtenir une compréhension complète du comportement de chauffage et de fusion du système, notamment le temps nécessaire pour atteindre le point de fusion et la dégradation de la chaleur dans la géométrie.

Par conséquent, l'objectif de cette étude était d'obtenir des cellules photovoltaïques à haut rendement utilisant du silicium ce qui nécessite une connaissance approfondie du processus de développement de l'alliage de silicium afin d'optimiser ce processus en contrôlant divers paramètres qui affectent la qualité du silicium par réduire les défauts cristallins pendant la production.

Reference:

- [1] S. MOUHOUS-CHAOUCHI, «Etude statistique du rayonnement solaire,» UNIVERSITE ABOU BEKR, 2011-2012.
- [2] O. T. A. M. Y. KHEDIM Belhadj Abdelkarim, "Etude de fonctionnement électrique des panneaux photovoltaïque," UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID TLEMCEN, 2014-2015.
- [3] B. Chahrazad, "Etude comparative des cellules photovoltaïques," UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ DE BOUIRA, 2020/2021.
- [4] B. A. HASNAOUI Ali, "Modélisation et Simulation d'une Cellule Solaire Uni-Couche par logiciel consol myltiphisique," UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA, 2017-2018.
- [5] B. Afaf, "Évaluation du rayonnement solaire en Algérie pour les applications photovoltaïque," UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, 2017/2018.
- [6] H. L. Meghellet Hanine, "Contribution à l'étude d'un système photovoltaïque," Université Colonel Akli Mohand-Oulhadj Bouira, 2017/2018.
- [7] D. N. MILOUDI Asmaa, "Amélioration des performances thermiques dans les panneaux photovoltaïque et PCM," UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET, 2017 /2018.
- [8] H. L. A. B. H. Ahlam, "Etude et simulation d'une cellule solaire à base des éléments chalcogènes," UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, 2018/2019.
- [9] H. KAMELIA, "Modélisation D'une Cellule Photovoltaïque Etude Comparative," UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU, 25 / 06 / 2012 .

Reference

- [10] A. Souhila, "Etude et simulation des cellules solaires," UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, 2018 /2019.
- [11] M. Sana, "Comparaison par simulation numérique entre les caractéristiques d'une cellule solaire," Université Mohamed Khider – Biskra, 04/07/2012.
- [12] B. Fethi, "Etude et Modélisation d'une cellule photovoltaïque au," L'Université Abdel Hamid Ibn Badis de Mostaganem , 2013.
- [13] Z. s. M. cheymaa, "Etude et Simulation d'un Générateur," UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, 2016 /2017.
- [14] F. MECHAI, "Etude et simulation des structures photovoltaïques à base de chalcogénures de métaux de transition MX₂ (M = W, Mo; X = S, Se)," universite mouloud mammeri de TIZI-OUZOU, 2016..
- [15] R. Ilyas, "Etude de comportement de la capacité d'une diode tude de comportement de la capacité d'une diode polycristalline latérale polycristalline latérale Proposé," Université mohamed boudiad - M'SILA, 2016.
- [16] G. M. R. I.KARIM, 2021.
- [17] M. M. N. H. C. Eddine, "Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau," UNIVERSITÉ KASDI MERBAH – OUARGLA, 25/06/2013.
- [18] S. Fateh, "Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique," UNIVERSITE FERHAT ABBAS - SETIF, 24/06/2012.
- [19] "Etude d'une chaîne de conversion de L'énergie solaire avec système De suiveur solaire"," Université Larbi Ben Mhidi –Oum El Bouaghi , 2021.
- [20] C. BENYEKKEN, «Elaboration et caractérisation structurale et électrique des couches minces de Ni_{100-x} Px électrodéposées,» Diplôme de Doctorat Troisième Cycle, Université Hadj Lakhdar - BATNA 1, le 06 /07/ 2022.

Reference

- [21] B. NISRINE, «Potentialités de films de silicium polycristallin LPCVD destinés à l'étude d'une cellule solaire multicouches,» diplôme de Doctorat en Sciences, Université des frères MENTOURI (Constantine).
- [22] D. Assia, «Etude et simulation d'une cellule photovoltaïque en silicium Polycristallin.,» UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ DE BOUIRA, 02/12/2020.
- [23] Z. A. Rouabah Amina, «Etude et modélisation du procédé d'élaboration du silicium polycristallin pour la fabrication des cellules photovoltaïques,» UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, 2018/2019.
- [24] B. Amel, «Simulation des propriétés électriques et optiques de la cellule solaire à base de silicium amorphe,» Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem, 31 / 05 / 2016.
- [25] N. D. Chafik, «CHARACTERISATIONS ET ETUDE DU SILICIUM PHOTOVOLTAÏQUE ISSU DE LINGOTS COULES A L'AIDE DU SILICIUM METALLURGIQUE « SI U1146 » ET « SI T401103 » PAR LA METHODE DE BRIDGMAN SANS BRASSAGE ELECTROMAGNETIQUE,» Ecole Nationale Polytechnique, avenu Hassen BADI, El Harrach, Alger, Juin 2013.
- [26] A. Tandjaoui, «solidification dirigée du silicium multi-cristallin pour les applications photovoltaïques : caractérisation in situ et en temps réel par imagerie x synchrotron,» thèse de doctora, université d'Aix-Marseille, 2013.
- [27] R. Ilyas, «Etude de comportement de la capacité d'une diode polycristalline latérale,» MEMOIRE DE MASTER, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, UIN 2016.
- [28] B. Chahrazad, «Etude comparative des cellules photovoltaïques en silicium polycristallin et en silicium amorphe,» UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ DE BOUIRA, 2020/2021.
- [29] H. Belgacem, «Développement d ' une Nouvelle Technique Spectroscopique de Détermination de la Densité des Etats Localisés dans les Semi-conducteurs à

Reference

- partir de la Photoconductivité Transitoire,» université Hadj Lakhdar- Batna, 2010..
- [30] F. MECHAI, «Etude et simulation des structures photovoltaïques à base de chalcogénures de métaux de transition MX_2 ($M = W, Mo$; $X = S, Se$),» université mouloud mammeri de TIZI-OUZOU, 2016.
- [31] Z. Said-Baca, «Elaboration et caractérisations de silicium polycristallin par cristallisation en phase liquide du silicium amorphe,» Zabardjade Said-Bacar. Elaboration et caractérisations de silicium polycristallin par cristallisation en phase liquide du silicium amorphe. Autre [cond-mat.other], Université Paris Sud - Paris XI, 2012. 19 Mar 2012.
- [32] Z. Said-bacar, «Elaboration et caractérisations de silicium polycristallin par cristallisation en phase liquide du silicium amorphe,» hèse de Doctorat, université PARIS SUD, 2012 .
- [33] B. A. B. A. H. L. Hamhoum Lamia, "Initiation à l'utilisation du logiciel comsol application a la cellule solaire," université Larbi ben M'h idi Oum el Bouaghi, 2020