



**République Algérienne Démocratique et Populaire**

**Ministre de l'Enseignement Supérieur et de La Recherche Scientifique**

**Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou (UMMTO)**

**Centre de Recherche en Technologies des semi-conducteurs**

**Pour l'énergétique (CRTSE)**



**MEMOIRE**

**En Vue De L'obtention De Diplôme De**

**MASTER**

**Académique En Microélectronique**

**Faculté De Génie Electrique Et Informatique**

**Département d'Electronique**

**Présenté Par : MEKIOUS Saliha et OUMOHAND Ziad**

**Theme:**

**Etude de l'effet de la température et de la durée de diffusion du phosphore à partir des couches PSG sur la jonction PN**

**Encadré par :**

- **M<sup>r</sup>. Djelloul Abdelkader (CRTSE)**
- **M<sup>me</sup>. Hocine Dalila (UMMTO)**

**Soutenue le Jeudi 27/06/2024 à 11H00.**

**Devant les membres de jury :**

- **M<sup>me</sup>. NEMMAR Farida (UMMTO) : Présidente.**
- **M<sup>r</sup>. LABDELLI Boutaleb (CRTSE) : Examineur.**
- **M<sup>me</sup>. SIDI SAID Amel (UMMTO) : Examinatrice.**

**Année universitaire 2023/2024**



# *Dédicaces*

*Je dédie ce mémoire à :*

*Tous ceux qui me sont chers, ils se  
reconnaîtront.*

*EN particulier mon adorable fils Massy, ma  
sœur Akila, ma nièce Ania et ses  
parents*

*MEKIOUS SALIHA*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce travail à :*

*Mes chers parents,*

*Toute ma famille,*

*Tous ceux qui me sont chers, ils se  
reconnaîtront.*

**Ziad OUMOHAND**

# Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre de ma graduation au sein du Centre de Recherche en Technologie des Semi-conducteurs pour l'Energétique (CRTSE) que nous présentons dans le rapport.

A l'issue de ce travail, nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à nos encadreurs, **Mr. Djelloul Abdelkader, Directeur de Recherche**, au sein du Centre de Recherche en Technologie des Semi-conducteurs pour l'Energétique (CRTSE) et **Mme Hocine Dalila, Professeur**, au sein de l'université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou (UMMTO), pour leur soutien, conseils, aide et suivi durant tout le long de ce travail.

Nous tenons à exprimer nos vœux sincères et notre profond respect à tous les membres du jury : **Mme NEMMAR Farida, Maitre de conférence classe « B »** à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou (UMMTO), et **Mme SIDI SAID Amel, Maitre assistante classe « A »** à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou (UMMTO), **Mr. Labdelli Boutaleb, Maitre de recherche « A »**, au CRTSE pour avoir accepté d'évaluer ce travail et pour l'honneur de leur participation à la soutenance de notre mémoire.

Nous exprimons également nos gratitudee à tous les enseignants du département d'électronique de l'UMMTO, à tous les chercheurs et fonctionnaires du CRTSE pour l'accueil, soutien et encouragements, particulièrement à madame **Boudiaf Yamina** et monsieur **MARREF abbas**, de la salle blanche, **CHERAGA Hocine** et **KHELIFATI Nabil**.

## Résumé

Dans ce travail, nous avons étudié l'effet de la température et de la durée de diffusion du phosphore à partir des couches PSG sur la jonction n+. Cela se fait en utilisant un four à tube de quartz, des plaquettes de silicium multi-cristallin de type « p » et des sources de préforme comme source de phosphore. Nous avons caractérisé nos échantillons par diverses techniques de caractérisation tel que :

- Les mesures de la durée de vie de nos échantillons par la technique QSSPC.
- Les mesures électriques pour la détermination des propriétés électriques de nos échantillons par les techniques "pointe chaude", "quatre pointes" et "Effet Hall".
- Informations moléculaires et nature chimique de nos échantillons analysés par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR).

**Mot clés :** *Diffusion, Pré-dépôt, PSG, Drive-in, FTIR, QSSPC.*

## Abstract

In this work, we studied the effect of temperature and duration of phosphorus diffusion from PSG layers on the n+ junction. This is done using a quartz tube furnace, "p" type multi-crystalline silicon wafers and preform sources as the phosphor source. We characterized our samples using various characterization techniques such as:

- Measurements of the lifetime of our samples using the QSSPC technique.
- Electrical measurements for determining the electrical properties of our samples using the "hot probe", "four-point probe" and "Hall Effect" techniques.
- Molecular information and chemical nature of our samples analyzed by Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR).

**Keywords:** *Diffusion, Predepot, PSG, Drive-in, FTIR, QSSPC.*

## Présentation de l'établissement d'accueil

Le centre de recherche en technologie des semi-conducteurs pour l'énergétique (C.R.T.S.E) établissement public à caractère scientifique et technologie, sous la tutelle du ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche Scientifique (MESRS) et la Direction Générale de la recherche scientifique et le Développement Technologie (DGRCDT).

Il a été créé par Décret exécutif n° 12-316 du 21 aout 2012. Le centre de recherche en technologie des semi-conducteurs pour l'énergétique(C.R.T.S.E) est issu de l'ex. UDTs (Unité de Développement de la Technologie du silicium), il est déployé à Alger sur deux sites :

- Site "Frantz Fanon", 02 Bd Frantz Fanon, Alger-7 merveilles, Alger.
- Site "EL Harrach", 01 rue Atlas.

Le C.R.T.S.E active dans des disciplines ayant un impact sur la quasi-totalité des secteurs socio-économiques. Sa mission est de mener des actions de recherche scientifique, d'innovation technologie, de valorisation et de formation poste graduée dans le domaine des sciences et de technologie des matériaux et dispositifs semi-conducteur couvrant des domaines d'application très variés : notamment conversion et stockage d'énergie, détection optoélectronique, photonique et photovoltaïque.

Le CRTSE est composé de quatre (04) divisions :

- 1- Croissance cristalline des semi-conducteurs et procédés métallurgiques (CCPM).
- 2- Développement des dispositifs de conversion à semi- conducteurs(DDCS).
- 3- Couches Minces, surfaces et interfaces(CMSI)
- 4- Technologies Emergents des semi-conducteurs pour l'énergétique(TESE).

L'activité scientifique est organisée sous forme d'équipes de recherche (quatre par division), Le savoir-faire scientifique et technologique acquis par le passé dans la Division

DDCS touche au développement des procédés technologiques de fabrication des cellules solaires est résolument orienté vers la mise au point de prototypes de cellules et modules au silicium monocristallin et multi cristallin.

La Division travail sur la maîtrise et l'optimisation de procédés de fabrication deux types de structures:

- Cellules solaires à base de silicium mono et multi cristallin avec des structures différentes : conventionnelles, à émetteurs sélectif et bifaciales.
- Structures émergentes : à hétérojonctions en couches minces comme le CIGS et CZTS ainsi que les hétéro structures base de silicium massif type n (HIT)

# **Sommaire**

## **Table des matières (Sommaire)**

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des acronymes (Abréviations)

Liste des symboles

Introduction Générale.....1

### **Chapitre I : Généralités sur le silicium et la cellule solaire.**

I.1. Introduction .....	3
I.2. La description du silicium .....	3
I.3. Les étapes de fabrication d'un panneau solaire .....	9
I.3.1. Purification du silicium .....	9
I.3.2. Polissage cylindrique (pour le silicium monocristallin) .....	10
I.3.3. Polissage mécano chimique .....	10
I.3.4. Fabrication des wafers .....	10
I.3.5. Dopages .....	10
I.3.6. Formation de la jonction P-N.....	11
I.3.7. Les Couches de passivation .....	11
I.3.8. Revêtements antireflet .....	11
I.3.9. Dépôt des contacts métalliques .....	12
I.3.10. Encapsulation .....	12
I.3.11. Assemblage En Modules Solaires .....	12
I.4. Principe de fonctionnement d'une cellule solaire et effet photovoltaïque.....	13
I.4.1. Absorption de la lumière (création des paires électrons/trous) .....	14
I.4.2. Création d'une différence de potentiel .....	14
I.4.3. Collecte du courant .....	14
I.5. Association de cellules photovoltaïques .....	15
I.6. Schéma équivalent d'une cellule solaire et paramètres photovoltaïques .....	15

I.6.1. Schéma équivalent d'une cellule solaire, caractéristique $I=f(v)$ et puissance .....	15
I.6.2. Les paramètres photovoltaïques .....	16
I.7. Différents types de cellules photovoltaïques.....	18
I.7.1. Les Cellules au silicium cristallin .....	19
I.7.2. Les Cellules en couches minces.....	19
I.7.3. Cellules organiques (OPV) .....	19
I.7.4. Cellules solaires pérovskites (OPV) .....	19
I.7.5. Cellules doubles dites « Tandem » .....	19
I.7.6. Les cellules solaires passivée .....	19
I.8. Avantages et inconvénients du photovoltaïque .....	20
I.9. Conclusion.....	20
 <b>Chapitre II : Techniques de caractérisations</b>	
II.1. Introduction .....	22
II.2. Caractérisation avec la pointe chaude .....	22
II.2.1. Définition.....	22
II.2.2. Principe de fonctionnement.....	23
II.3. La méthode des quatre pointes (résistance carrée ; $R_{\square}$ ) .....	24
II.3.1. Définition.....	24
II.3.2. Le Principe de la méthode des quatre pointes.....	24
II.4. La caractérisation par effet Hall .....	26
II.4.1. Définition.....	26
II.4.2. Principe de l'effet Hall .....	27
II.5. Mesures ECV .....	28
II.5.1. Définition.....	28
II.5.2 Principe de fonctionnement.....	28
II.6. La Spectroscopie de masse des ions secondaires (En Anglais SIMS : Secondary Ion Mass Spectrometry) .....	29

II.6.1. Définition.....	29
II.6.2. Principe de SIMS.....	29
II.7. La Caractérisation infrarouge à transformé de fourrier (FTIR) .....	31
II.7.1. Définition.....	31
II.7.2. Le Principe De La Spectroscopie FTIR.....	31
II.8. Caractérisation par mesure de la durée de vie (QSSPC) .....	33
II.8.1. Définition.....	33
II.8.2. Principe de fonctionnement .....	33
II.9. Conclusion .....	34
 <b>Chapitre III : Résultats et Discussions</b>	
III.1. Introduction.....	36
III.2. Description des dopants .....	36
III.2.1. Le Phosphore (P) .....	36
III.2.2. Le Bore (B) .....	37
III.3. Préparation et nettoyage des plaques de multi-silicium type P .....	38
III.3.1. Dégraissage .....	39
III.3.2. Désoxydation .....	39
III.3.3. Amincissement .....	39
III.4. Quelques équipements utilisés pour la fabrication des cellules solaires .....	40
III.5. Etapes suivies dans la salle blanche pour la diffusion du phosphore sur du silicium multi-cristallin type p (P-Si-mc).....	41
III.5.1. Etape pré-dépôt .....	42
III.5.1.1. La formation de couches PSG.....	45
III.5.1.2. Les différentes images prises pendant les prés-dépôts.....	46
III.5.2. Etape drive-in.....	49
III.5.2.1. Réalisation des champs de surface avant ou FSF (Front Surface Field) ..	50
III.5.2.2. Recuit rapide (RTP) .....	51

III.6. Résultats des caractérisations et interprétations.....	51
III.6.1. Caractérisation des couches PSG obtenue après les prés-dépôts par la résistance carrée.....	51
III.6.2. Caractérisation des couches PSG obtenue après les prés-dépôt par FTIR.....	52
III.6.3. Les résultats des caractérisations et leurs interprétations obtenues après drive-in et décapage de la couche PSG à température de 23°C.....	55
III.6.3.1. La pointe chaude.....	56
III.6.3.2. Les quatre pointes .....	57
III.6.3.3. Effet Hall.....	60
III.6.3.3.1 Préparation des échantillons.....	60
III.6.3.3.2. Résultats et interprétation (Effet Hall) .....	62
III.6.3.4. Durée de vie (QSSPC) .....	65
III.6.3.4.1. Explication des données affichées sur l'ordinateur du Testeur WCT 120 .....	66
III.6.3.4.2. Caractéristiques et interprétation des résultats des différents échantillons.....	67
III.6.3.4.3. Comparaison des durées de vie des neuf (9) échantillons.....	76
III.7. Conclusion.....	77
Conclusion générale.....	79
Annexes.....	
Références bibliographique.....	

# Liste des figures

## Liste des figures

### ➤ Figures du chapitre I :

<i>Figure I.1. (a) les images du quartz ;(b) la structure cristalline du silicium.....</i>	<i>4</i>
<i>Figure I.2. (a) les lingots du mono-silicium ; (b) cellule solaire monocristalline.....</i>	<i>4</i>
<i>Figure I.3. (a) un barreau de multi-silicium ; (b) pain de multi-silicium ; (c) briquette du multi-silicium.....</i>	<i>5</i>
<i>Figure I.4. Des wafers en multi-silicium.....</i>	<i>5</i>
<i>Figure I.5. Modèles de cellules solaires multi-cristallines.....</i>	<i>6</i>
<i>Figure I.6. (a) Silicium amorphe ; (b) Panneaux solaires amorphes.....</i>	<i>6</i>
<i>Figure I.7. (a) les images du carbure de silicium ; (b) SiC utilisé comme abrasif.....</i>	<i>7</i>
<i>Figure.I.8. Les étapes de transformation du silicium en module PV.....</i>	<i>12</i>
<i>Figure.I.9. Le silicium, de la matière première Au panneau solaire.....</i>	<i>13</i>
<i>Figure.I.10. Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire.....</i>	<i>14</i>
<i>Figure.I.11. Schéma Equivalent D'une Cellule Solaire.....</i>	<i>15</i>
<i>Figure.I.12. Caractéristiques I(V) et puissance.....</i>	<i>16</i>

### ➤ Figures du chapitre II :

<i>Figure II.1. Appareillage De La Pointe Chaude (CRTSE).....</i>	<i>23</i>
<i>Figure II.2. Expérience sur l'effet Seebeck.....</i>	<i>23</i>
<i>Figure II.3. Resistivimètre-CMT-series-SR-2000 N (CRTSE.....</i>	<i>24</i>
<i>Figure II.4. Schéma de principe de la technique de caractérisation des quatre pointes.....</i>	<i>24</i>
<i>Figure II.5. La sonde a effet hall (Profiler HL 5900) (CRTSE).....</i>	<i>27</i>
<i>Figure II.6. Principe de l'Effet Hall.....</i>	<i>27</i>
<i>Figure II.7. L'Appareillage de l'ECV (CRTSE.....</i>	<i>28</i>

<b>Figure II.8.</b> L'Appareillage de La spectroscopie de masse des ions secondaires (SIMS), « Cameca IMS4FE » (CRTSE).....	30
<b>Figure II.9.</b> Schéma de principe du SIMS.....	30
<b>Figure II.10.</b> Appareillage de FTIR, Thermo Nicolet NEXUS 670 (CRTSE).....	31
<b>Figure II.11.</b> Mouvement des liaisons chimiques traversées par les IR).....	32
<b>Figure II.12.</b> Schéma de principe de la FTIR.....	33
<b>Figure II.13.</b> Appareillage de QSSPC, WCT-120(CRTSE) .....	34
 ➤ <b>Figures du chapitre III :</b>	
<b>Figure III.1.</b> Le phosphore à l'état naturel.....	37
<b>Figure III.2.</b> Le bore.....	38
<b>Figures III.3.</b> Quelques équipements utilisés pour la fabrication des cellules (CRTSE).....	41
<b>Figure III.4.</b> Les compartiments du four TEMPRESS Omega Junior 3 (CRTSE) ; (a) les trois étages du four TEMPRESS, (b) le tableau de commande du four TEMPRESS, (c) l'entrée du tube à quartz.....	42
<b>Figure III.5.</b> Prés-dépôt (600°C-20min).....	43
<b>Figure III.6.</b> Prés-dépôt (700°C-10, 15 et 20min) .....	44
<b>Figure III.7.</b> Prés-dépôt (750°C-10, 15 et 20min).....	44
<b>Figure III.8.</b> Prés-dépôt (800°C-10, 15 min).....	45
<b>Figure III.9.</b> L'espace de travail (CRTSE).....	46
<b>Figures III.10.</b> Préparation des wafers pour le prés-dépôt (CRTSE) ; (a,b) Phosphore sous une forme solide, (c) Empilement des feuilles de phosphore entre les plaques de multi-Si, (d) Plaques de multi-silicium bien nettoyées.....	47
<b>Figures III .11.</b> La mise en sandwich d'une source solide de phosphore entre deux plaques de multi-silicium (CRTSE).....	47

<b>Figure III.12.</b> Les échantillons à l'entrée du four TEMPRESS (CRTSE).....	48
<b>Figures III.13.</b> Les échantillons à la sortie du four ; (a) Les plaques post prés-dépôt placées sur la nacelle, (b) Séparation des deux plaques.....	48
<b>Figures III.14.</b> Résultat du prés-dépôt ; (a) Formation d'une couche PSG, (b) Un échantillon destiné pour l'étape drive-in.....	49
<b>Figures III.15.</b> Les outils utilisés (CRTSE) ; (a) La nacelle, (b) Une pince de manipulation, (c) Une tige et un cylindre en verre.....	49
<b>Figure III.16.</b> Drive-in (900°c-20, 30min).....	50
<b>Figure III.17.</b> Emplacement d'échantillon dans le FTIR « Thermo Nicolet NEXUS 670 » (CRTSE) ; (a) Le porte échantillon, (b,c) La cavité de l'FTIR.....	53
<b>Figure III.18.</b> Les spectres de la couche PSG obtenus par la FTIR ; (a) PD1, PD2, PD3 20 min, (b) PD4, PD5, PD6 15 min, (c) PD7, PD8, PD9 10 min.....	55
<b>Figure III.19.</b> Décapage de la couche PSG avec HF10% après drive-in ; (a) Une série de plaques ayant subies la diffusion, (b) Les plaques de silicium émergées dans la solution HF10%.....	56
<b>Figure III.20.</b> Application de la pointe chaude sur la face de l'échantillon dopé N ; (a) Positionnement des pointes (chaude et froide) sur la surface, (b) La LED allumée coté N....	56
<b>Figure III.21.</b> (mapping), injection d'un courant électrique sur les plaques de silicium en plusieurs points après drive-in avec les 4 pointes (R□).....	57
<b>Figure III.22.</b> Le mapping de l'échantillon 1 : pré-dépôt, 700°c-20 min /Drive-in, 900°c-30min.....	58
<b>Figures III.23.</b> Appareillage Effet Hall (HL5900) « la cage de faraday ouverte » (CRTSE).....	61
<b>Figures III.24.</b> Les produits utilisés pour la fixation des échantillons ; (a) Indium Gallium (b) Mélange Indium Gallium/Etain.....	61
<b>Figures III.25.</b> Fixation des échantillons ; (a) Les portes échantillons, (b) échantillon fixé..	61
<b>Figures III.26.</b> Introduction de l'échantillon dans le carrousel de Hall.....	62

<b>Figure III.27.</b> Le résultat de l'échantillon 1 (700°C-20/900°C-30).....	63
<b>Figure III.28.</b> Testeur WCT 120 (CRTSE).....	65
<b>Figure III.29.</b> Caractéristique et différents résultats de l'échantillon 1.....	67
<b>Figure III.30.</b> Caractéristique et différents résultats de l'échantillon 2.....	68
<b>Figure III.31.</b> Caractéristique et différents résultats de l'échantillon 3.....	69
<b>Figure III.32.</b> Caractéristique et différents résultats de l'échantillon 4.....	70
<b>Figure III.33.</b> Caractéristique et différents résultats de l'échantillon 5.....	71
<b>Figure III.34.</b> Caractéristique et différents résultats de l'échantillon 6.....	72
<b>Figure III.35.</b> Caractéristique et différents résultats de l'échantillon 7.....	73
<b>Figure III.36.</b> Caractéristique et différents résultats de l'échantillon 8.....	74
<b>Figure III.37.</b> Caractéristique et différents résultats de l'échantillon 9.....	75
<b>Figure III.38.</b> Histogramme des durées de vie des échantillons.....	76



# Liste des tableaux

## **Liste des tableaux**

<b>Tableau I.1.</b> Description du silicium.....	3
<b>Tableau I.2.</b> Les isotopes du silicium.....	8
<b>Tableau II.1.</b> Comparaison des résistivités théoriques du silicium cristallin à température 25 degré.....	26
<b>Tableau III.1.</b> Description du phosphore.....	37
<b>Tableau III.2.</b> Description du bore.....	38
<b>Tableau III.3.</b> Différentes séries (recettes) choisies pour près dépôts et drive-in ( $T^\circ / t$ ).....	43
<b>Tableau III.4.</b> Paramètres des plaquettes Si-mc-P.....	51
<b>Tableau III.5.</b> Les résistances de la couche PSG.....	52
<b>Tableau III.6.</b> Les liaisons organiques et inorganiques du phosphore dans La couche PSG.....	53
<b>Tableau III.7.</b> Comparaison des résultats des différentes recettes .....	59
<b>Tableau III.8.</b> Les paramètres des échantillons mesurés par Effet Hall.....	63
<b>Tableau III.9.</b> La conductivité ( $\sigma$ ).....	64

# **Liste des acronymes (Abréviations)**

## Liste des acronymes (Abréviations)

Si-mc	Silicium multi-cristallin
m-Si	Mono-silicium
a-Si	Silicium amorphe
CAS	chemical abstracts service
SiP	Silicium poreux
IUPAC	Union internationale de chimie pure et appliquée
SiC	Carbure de silicium
PV	Photovoltaïque
EGS	Silicium de grade électronique
Cz	Czochralski
EVA	Ethylène-acétate de vinyle
CVD	Dépôt chimique en phase vapeur
SC	Semi-conducteur
AM	Air-masse
STC	Conditions standard de test
ECV	Electrochemical Capacitance-Voltage
SIMS	Spectrométrie de masse des ions secondaire
FTIR	Analyse par Infrarouge à transformé de fourrier Quasi-Steady-State-Photo-Conductance
QSSPC	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LASER	Infrarouge
IR	Heat Exchange Method
HEM	Phosphorous Silicate Glass
PSC	Standart Liters per Minute
SLM	Pres-depot
P-D	

# Liste des symboles

## Liste des symboles

T	Température en degré Celsius ou kelvin
t	Temps en seconde
V	Tension en volt
I	Courant en ampère
P	Puissance en watt
R <sub>S</sub>	Resistance série en ohm
R <sub>sh</sub>	Résistance shunte en ohm
I <sub>ph</sub>	Photo-courant en ampère
k	Constante de Boltzmann ( $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ )
q	Charge de l'électron $1,602 \cdot 10^{-19}$ Colomb)
V <sub>co</sub>	Tension de circuit-ouvert en volt
I <sub>cc</sub>	Courant de court-circuit en ampère
FF	Facteur de forme en %
η	Rendement en %
ΔV	Différence de potentiel en volt
R <sub>□</sub>	Résistance carrée en ohm/□
σ	Conductivité en $(\Omega \cdot m)^{-1}$ ou siemens
ρ	Résistivité du matériau en $\Omega \cdot m$
μ	Mobilité en m <sup>2</sup> /vs
e	Epaisseur
Si	Silicium
P	Phosphore
B	Bore
N <sub>2</sub>	Azote
O <sub>2</sub>	Oxygène
SiO <sub>2</sub>	Oxyde de silicium
HF	Acide fluorhydrique

NH <sub>4</sub> F	Fluorure d'ammonium
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	Acide borique
C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Cl <sub>3</sub>	Trichloréthylène
CH <sub>3</sub> COCH <sub>3</sub>	Acétone
EDI	eau dés-ionisée
NaOH	Hydroxyde de sodium
HCl	Acide chlorhydrique

# **Introduction générale**

# Introduction générale

---

## Introduction générale :

Dans le but de lutter contre le changement climatique, de réduire les émissions de gaz à effet de serre causées par les combustibles fossiles (pétrole, charbon et gaz naturel) et d'assurer un avenir énergétique durable, propre et à faible coût, les chercheurs et les investisseurs se tournent vers le domaine photovoltaïque. Ce dernier désigne l'électricité produite par les cellules solaires une fois exposées à la lumière.

La cellule solaire est un composant optoélectronique obtenue par le dopage d'un matériau semi-conducteur (silicium) avec du bore et du phosphore. Pour améliorer la qualité de la cellule solaire, d'assurer sa stabilité à long terme et de maximiser son rendement énergétique, diverses recherches visent à identifier les meilleurs matériaux et techniques de fabrication les plus économiques pour des productions à grande échelle et en un temps record. Pour pouvoir choisir les techniques les plus appropriées, les chercheurs jouent sur plusieurs paramètres lors du procédé de fabrication des cellules solaires, tels que la température et le temps de diffusion des dopants sur du silicium.

L'émetteur est influencé par la température et le temps, d'où la nécessité d'étudier l'effet de ces paramètres sur la jonction. Dans cette optique, nous nous intéressons aux cellules à base de multi-silicium cristallin en raison de leur bon rapport rendement physique/rendement économique. Ces cellules présentent un rendement de conversion de 13% à 18%. **[1-2]**.

C'est dans ce contexte que se situe ce travail, dont la thématique est d'étudier l'effet de la température et de la durée de diffusion du phosphore à partir des couches de PSG (Phosphorous Silicate Glass) sur la jonction PN réalisée avec du multi-silicium cristallin.

Ce travail est structuré en trois chapitres, après une introduction générale. Le premier chapitre est consacré aux généralités sur la cellule solaire et l'effet photovoltaïque. Dans le deuxième chapitre, nous décrivons certaines techniques de caractérisation. Enfin, dans le troisième chapitre, nous présentons la procédure expérimentale et les divers résultats obtenus en faisant varier les deux facteurs principaux, le temps et la température, qui influencent la qualité de diffusion du phosphore sur la jonction PN<sup>+</sup>.

Nous interprétons les résultats de caractérisation et terminons par une conclusion générale avec quelques perspectives **[3,4,10,18]**.

# **Chapitre I : Généralités sur la cellule solaire et l'effet photovoltaïque**

# Chapitre I : Généralités sur la cellule solaire et l'effet photovoltaïque

## I.1. Introduction

Le phénomène photovoltaïque (PV) représente la transformation de la lumière du soleil en électricité via des cellules solaires suite à l'interaction des photons avec le semi-conducteur utilisé pour leurs fabrications. L'agence internationale de l'Energie prévoit pour 2024 que 60% des augmentations en Energies renouvelables seront du photovoltaïque, vue la facilité de leurs réalisations, la gratuité de la source d'énergie (soleil) et la disponibilité en abondance des matériaux semi-conducteur (la silice). Dans ce chapitre nous allons donner les propriétés du silicium, les étapes de fabrication d'une cellule solaire conventionnelle à base de silicium cristallin tout en expliquant le principe de son fonctionnement et son architecture en citons les différents types de cellules photovoltaïques existantes [3-5].

## I.2. La description du silicium

L'optoélectronique est une discipline émergente qui utilise conjointement l'électronique et l'optique. Elle a des portées importantes dans divers domaines, en particulier en informatique, en électronique médicale, en télécommunications et surtout dans la production de l'énergie photovoltaïque dont le composant optoélectronique utilisé est la cellule solaire. Ce composant est réalisé généralement avec du silicium qui est un élément chimique métalloïde tétravalent de numéro atomique 14 appartenant au groupe 14 du tableau périodique et de symbole (SI) [6-7], voici sa description détaillée dans le tableau suivant :

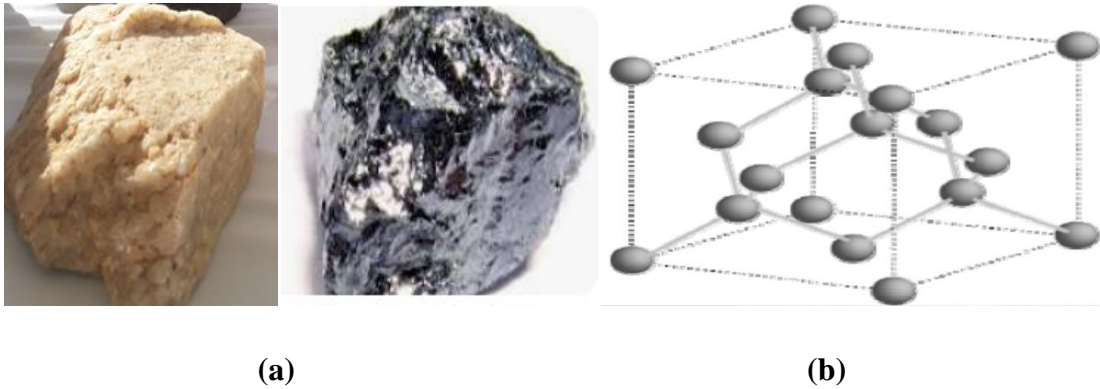
**Tableau I.1.** Description du silicium.

Symbole	Numéro CAS	Masse atomique	Configuration électronique	Numéro atomique	Point de fusion	Électrons par couche
Si	7440-21-3	28,0855 u	[Ne] 3s <sup>2</sup> 3p <sup>2</sup>	14	1 414 °C	2, 8, 4

Numéro CAS : (chemical abstracts service).

Le silicium est considéré le plus abondant dans la croute terrestre après l'oxygène, extrait principalement sous forme de quartz puis transformé en silicium de qualité électronique.

Le silicium pur est gris à noirs avec des reflets métalliques bleutés, il fait partie des éléments chimiques P métalloïdes (situés entre les métaux et les non métaux) et de forme cristalline en forme d'aiguilles ou d'hexaèdres (forme géométrique à six faces). Voir les figures suivantes:



*Figure I.1. (a) Les images du quartz, (b) La structure cristalline du silicium.*

Il existe plusieurs types de silicium : Silicium monocristallin, silicium multicristallin, silicium amorphe, silicium poreux, carbure de silicium et d'autres isotopes de silicium.

### - Le silicium monocristallin (Si-mono) :

Le mono-silicium est une forme de silicium dans laquelle les atomes sont disposés dans une structure cristalline ordonnée, formant un seul cristal de silicium. Ce type de silicium est largement utilisé dans l'industrie des semi-conducteurs pour la fabrication des dispositifs électroniques de bonne qualité tels que les puces électroniques, les capteurs et les composants optoélectroniques. La production du silicium monocristallin implique généralement un processus de croissance cristalline contrôlée, dont un lingot de silicium est extrait à partir d'un bain fondu de silicium hautement pur. Les figures suivantes illustrent respectivement les lingots du mono-silicium et un modèle d'une cellule solaire monocristalline [8-9].

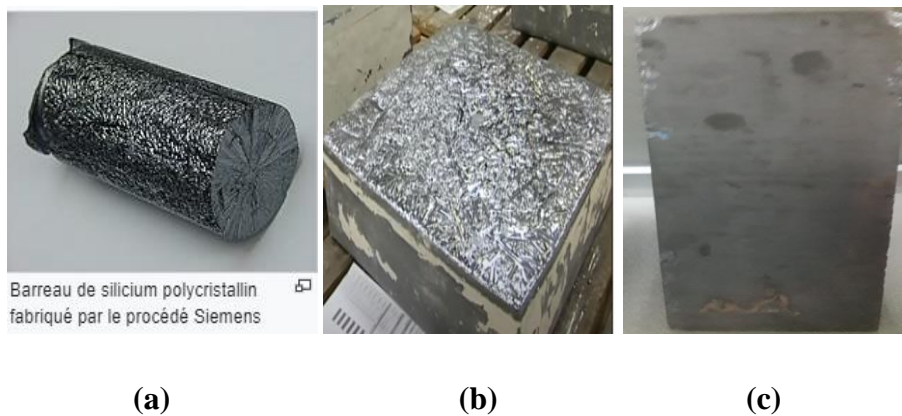


*Figure I.2. (a) Les lingots du mono-silicium, (b) Cellule solaire monocristalline.*

# Chapitre I : Généralités sur la cellule solaire et l'effet photovoltaïque

## - Le silicium multi-cristallin (Si-mc):

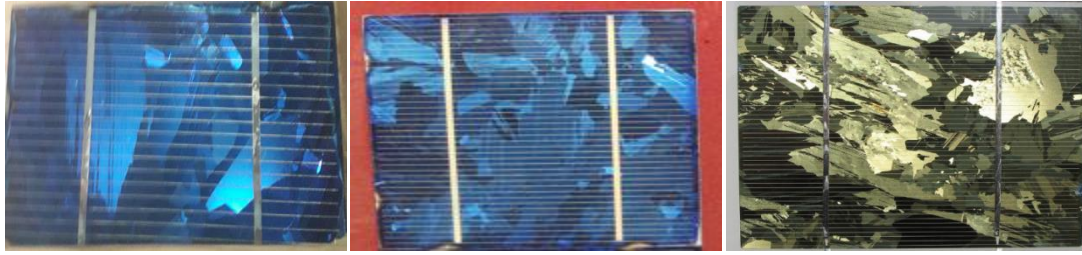
L'opération utilisée pour l'obtention du silicium multicristallin est basé sur la solidification et coulage en lingotières. En mettant du silicium pur (monocristallin) récupéré auprès des entreprises des semi-conducteurs sous forme de résidus ou fragments dans un creuset de graphite qui peut être de forme cylindrique ou cubique et le faire chauffer dans un four à une température de 1500° (degré Celsius) pendant une durée de 75 heures. Une fois le matériau fondu est sorti du four, on le laisse se refroidir lentement pendant 7 heures au minimum afin de faire remonter toutes les impuretés sur la surface du pain de silicium multi-cristallin d'environ 250 kg de poids qu'on découpe sous forme de briques rectangulaires si le creuset est cubique et on obtient un barreau de multi-silicium si le creuset est de forme cylindrique. Sa mise au point est moins énergivore par rapport à celle du monocristallin, mais son rendement énergétique est inférieur, il est de l'ordre de 16% à 18%. Ce type de silicium est composé d'une mosaïque de cristaux ou cristallites de silicium et d'une multitude de paillettes d'aspect métallique, nommé grains séparés par des joints de grains [10] , voir les images suivantes (**Figure I.3**) :



**Figure I.3.** (a) Un barreau de multi-silicium, (b) Pain de multi-silicium, (c) Briquette du multi-silicium.



**Figure I.4.** Des wafers en multi-silicium.

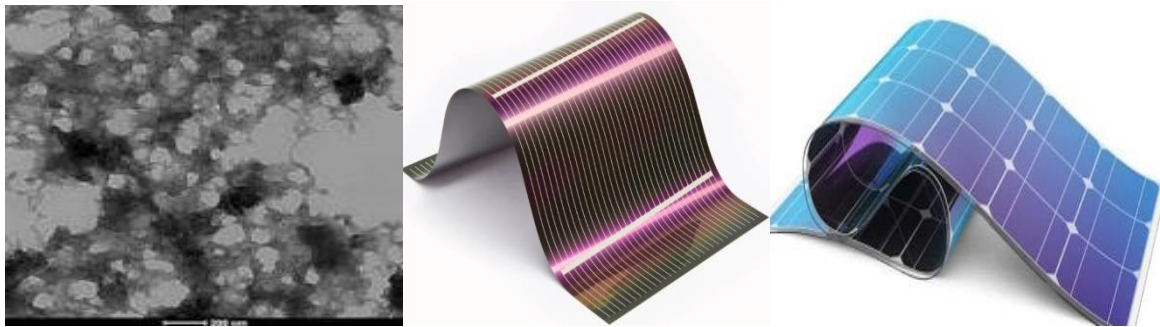


*Figure I.5. Modèles de cellules solaires multi-cristallines.*

### - Le silicium amorphe (a-Si) :

Le a-si désigne le silicium qui n'est pas cristallin dans lequel les atomes ne sont pas rangés de façon ordonnée, il est obtenu par diverses méthodes tel que le dépôt chimique en phase vapeur, pulvérisation cathodique, ...

Il est utilisé dans la fabrication de cellules solaire à couches minces.



(a)

(b)

*Figure I.6. (a) Silicium amorphe, (b) Panneaux solaires amorphes.*

Les panneaux solaires amorphes, également connus sous le nom de panneaux à couches minces se caractérisent par leurs finesses, leurs légèretés et leurs nature pliable, ce qui les rend très polyvalents et adaptables à des diverses applications, leur rendement est très faible (9%) [11].

### - Silicium poreux (SiP) :

Le SiP est une morphologie de silicium constatée pour la première fois dans les années 50 par Uhlir et Turner. Ce type de matériaux nanostructure possède une importante surface spécifique pouvant aller jusqu'à 1000 voire 1500  $m^2/cm^3$ , il est constitué par des nano-cristallites de 1nm à 1 $\mu m$  de diamètre. Les différentes morphologies du silicium poreux sont distinguées en fonction du dopage du substrat à partir duquel il est fabriqué et sont classifiées selon le diamètre

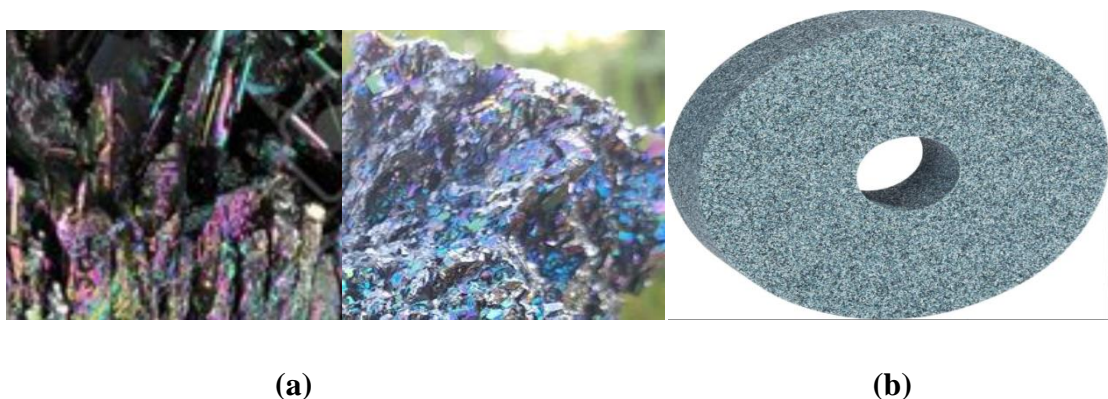
## Chapitre I : Généralités sur la cellule solaire et l'effet photovoltaïque

de leurs pores comme le préconise la norme de l'union internationale de chimie pure et appliquée (IUPAC : International Union of Pure and Applied Chemistry).

Le SiP est fabriqué à partir de substrat monocristallin en utilisant l'anodisation électrochimique. Cette méthode consiste à placer le substrat entre deux électrodes dans un bain de HF-Ethanol, une différence de potentiel est appliquée, les ions attirés vers le substrat réagissent avec le silicium formant ainsi des pores puis l'attaque du HF a lieu au fond des pores conduisant à la formation de silicium poreux et pour augmenter l'homogénéité du SiP, l'anodisation peut avoir lieu en courant pulsé. Le silicium poreux est utilisé dans divers composants tels que les capteurs, les batteries de stockage d'énergie, les isolateurs thermiques, les cellules solaires [12].

### -Carbure de silicium (SiC) :

Le carbure de silicium est un minéral artificiel découvert par Johan Berzélius en 1824 lors d'une synthèse de diamant à haute température. Une réaction chimique parasite a été produite entre le carbone et la silice donnant naissance au carbure de silicium. Le SiC est un semi-conducteur utilisé dans les composants de l'électronique de puissance fonctionnant à des hyperfréquences. Il est formé actuellement par réaction à chaud avec une température supérieure à 2500°C entre le silicium et le carbone ou par réduction à chaud de la silice par excès de carbone. Ce type de matériau est utilisé dans de nombreux domaines notamment dans l'industrie photovoltaïque (PV) comme substrat de haute qualité pour la croissance de couches minces, tels que le nitride de gallium (GaN) afin de produire des cellules solaires de longue durée de vie grâce à sa résistance thermique élevée et à sa stabilité chimique (SiC est résistant aux corrosions et aux éléments chimiques agressifs) [13-14]. Voir les images du SiC en figures suivantes :



*Figure I.7. (a) Les images du carbure de silicium, (b) SiC utilisé comme abrasif.*

## Chapitre I : Généralités sur la cellule solaire et l'effet photovoltaïque

### -Les isotopes de silicium (voir le tableau ci-dessous) :

Les cellules solaires commercialisées sont fabriquées avec l'isotope du silicium stable ( $^{28}\text{Si}$ ), vu qu'il est le plus abondant dans la nature et constitue 92% du silicium naturel, pour ce qui concerne les autres isotopes peuvent être utilisés dans le domaine PV à des fins de recherche ou dans des applications spécialisées [15].

**Tableau I.2 :** Les isotopes du silicium.

Symbol e de l'isotope	Z ( <u>p</u> )	N ( <u>n</u> )	Masse isotopique (u)	Demi-vie	Mode(s) de désintégration	Isotope fils <sup>n</sup> 1	Spin nucléaire
$^{22}\text{Si}$	14	8	22,03453(22)#	29(2) ms	$\beta^+$ (68 %)	$^{22}\text{Al}$	0+
					$\beta^+$ , <u>p</u> (32 %)	$^{21}\text{Mg}$	
$^{23}\text{Si}$	14	9	23,02552(21)#	42,3(4) ms	$\beta^+$	$^{23}\text{Al}$	3/2+#
$^{24}\text{Si}$	14	10	24,011546(21)	140(8) ms	$\beta^+$ (92 %)	$^{24}\text{Al}$	0+
					$\beta^+$ , <u>p</u> (8 %)	$^{23}\text{Mg}$	
$^{25}\text{Si}$	14	11	25,004106(11)	220(3) ms	$\beta^+$ (63,19 %)	$^{25}\text{Al}$	5/2+
					$\beta^+$ , <u>p</u> (36,8 %)	$^{24}\text{Mg}$	
$^{26}\text{Si}$	14	12	25,992330(3)	2,234(13) s	$\beta^+$	$^{26}\text{Al}$	0+
$^{27}\text{Si}$	14	13	26,98670491(16)	4,16(2) s	$\beta^+$	$^{27}\text{Al}$	5/2+
$^{28}\text{Si}$	14	14	27,9769265325(19)	Stable			0+
$^{29}\text{Si}$	14	15	28,976494700(22)	Stable			1/2+
$^{30}\text{Si}$	14	16	29,97377017(3)	Stable			0+
$^{31}\text{Si}$	14	17	30,97536323(4)	157,3(3) min	$\beta^-$	$^{31}\text{P}$	3/2+
$^{32}\text{Si}$	14	18	31,97414808(5)	170 ans	$\beta^-$	$^{32}\text{P}$	0+
$^{33}\text{Si}$	14	19	32,978000(17)	6,18(18) s	$\beta^-$	$^{33}\text{P}$	(3/2+)
$^{34}\text{Si}$	14	20	33,978576(15)	2,77(20) s	$\beta^-$	$^{34}\text{P}$	0+
$^{35}\text{Si}$	14	21	34,98458(4)	780(120) ms	$\beta^-$ (94,74 %)	$^{35}\text{P}$	7/2-#
					$\beta^-$ , <u>n</u> (5,26 %)	$^{34}\text{P}$	
$^{36}\text{Si}$	14	22	35,98660(13)	0,45(6) s	$\beta^-$ (88 %)	$^{36}\text{P}$	0+
					$\beta^-$ , <u>n</u> (12 %)	$^{35}\text{P}$	
$^{37}\text{Si}$	14	23	36,99294(18)		$\beta^-$ (83 %)	$^{37}\text{P}$	(7/2-)#

## Chapitre I : Généralités sur la cellule solaire et l'effet photovoltaïque

				90(60) ms	$\beta^-$ , n (17 %)	$^{36}\text{P}$	
$^{38}\text{Si}$	14	24	37,99563(15)	90# ms [> 1 $\mu\text{s}$ ]	$\beta^-$ , n $\beta^-$	$^{37}\text{P}$ $^{36}\text{P}$	0+
$^{39}\text{Si}$	14	25	39,00207(36)	47,5(20) ms	$\beta^-$	$^{39}\text{P}$	7/2-#
$^{40}\text{Si}$	14	26	40,00587(60)	33,0(10) ms	$\beta^-$	$^{40}\text{P}$	0+
$^{41}\text{Si}$	14	27	41,01456(198)	20,0(25) ms	$\beta^-$	$^{41}\text{P}$	7/2-#
$^{42}\text{Si}$	14	28	42,01979(54)#	13(4) ms	$\beta^-$	$^{42}\text{P}$	0+
$^{43}\text{Si}$	14	29	43,02866(75)#	15# ms [> 260 ns]			3/2-#
$^{44}\text{Si}$	14	30	44,03526(86)#	10# ms			0+

### I.3. Les étapes de fabrication d'un panneau solaire

La fabrication des cellules photovoltaïques nécessite un savoir-faire de pointe. Il existe différents types de cellules, mais on va présenter uniquement les techniques de fabrication des cellules conventionnelle à base de silicium monocristallin. L'assemblage en série et en parallèle de nombreuses cellules forme un panneau solaire [16-17].

#### I.3.1. Purification du silicium

Le processus de fabrication de cellule solaire commence par la purification du silicium, qui représente l'extraction du silicium brut du sable de quartz en utilisant des hautes températures proches de  $1500^\circ\text{C}$  (degré Celsius) et lui faire subir des réactions chimiques pour obtenir du silicium de qualité électronique ou de grade solaire en anglais EGS (Electronic Grade Silicon). Ensuite le silicium fondu est transformé en lingots de silicium monocristallin dur de forme cylindrique de diamètre d'environ 20 à 30 cm et de longueur qui variée entre 1.5m à 2m en utilisant la méthode Czochralski (Cz). Cette procédure consiste à faire croître du silicium consistant et fondu sur un germe monocristallin ayant une orientation cristalline connue comme matériau de départ en le tirant vers le haut lentement à une faible vitesse. Les panneaux solaires réalisés avec du monocristallin donne le meilleur rendement énergétique (23%).

# **Chapitre I : Généralités sur la cellule solaire et l'effet photovoltaïque**

---

## **I.3.2. Polissage cylindrique (pour le silicium monocristallin)**

Une fois le lingot est formé et refroidi, on procède à l'élimination des ondulations pour avoir le même diamètre tout le long du lingot.

## **I.3.3. Polissage mécano chimique**

Le polissage mécano-chimique intervient de plus en plus dans les nouveaux procédés. Cette étape utilise essentiellement de l'eau oxygénée et des poudres de granularité dépendant du niveau d'attaque.

## **I.3.4. Fabrication des wafers**

Les lingots de silicium monocristallin sont découpés (sciage) d'une manière précise en tranches très minces et fragiles d'épaisseur d'environ 350 à 450 $\mu\text{m}$  d'épaisseur sous forme de disques appelées wafers. Le sciage est réalisé en présence d'une solution abrasive (Slurry) et une bobine de fil diamanté. A noter qu'une perte d'environ 30% de silicium non recyclé est observée pendant l'étape de sciage.

## **I.3.5. Dopages**

Le terme "dopage" vient du latin "dotare" et signifie "équiper". Le dopage est un processus d'imprégnation de la surface d'un matériau avec de petites quantités d'une substance étrangère par rapport à celles du matériau initial pour perfectionner ses propriétés électroniques ou mécaniques. Le dopage est réalisé soit par diffusion soit par implantation ionique.

Dans le cas de fabrication de cellules solaires, le dopage est l'ajout contrôlé à la plaque de silicium des impuretés du phosphore ou du bore pour créer respectivement des régions de type N ou de type P, formant ainsi une jonction P-N qui facilite la génération de courant électrique (photo courant) avec la présence de la lumière solaire. La quantité de dopants est de l'ordre d'un atome d'impureté pour un milliard d'atomes de silicium [18]. On distingue deux types de dopages :

### **-Dopage de type N :**

C'est l'introduction des impuretés qui ont des électrons supplémentaires, (phosphore) par rapport au matériau semi-conducteur de base (silicium) pour obtenir du silicium type N (création des électrons libres) dans la structure.

# **Chapitre I : Généralités sur la cellule solaire et l'effet photovoltaïque**

---

## **-Dopage de type P :**

C'est l'introduction des impuretés (bore) qui ont des électrons de moins (trois électrons de valence) par rapport au matériau semi-conducteur de base qui possède quatre électrons de valence (silicium) pour obtenir du silicium type P (création des trous) dans la structure.

## **I.3.6. Formation de la jonction P-N**

Les zones dopées, type N et type P sont ensuite mises en contact pour former ainsi une jonction P-N à l'intérieur de la cellule solaire. Cette jonction est essentielle car elle crée un champ électrique interne qui favorise la séparation des charges lorsque la lumière frappe la face avant de la cellule solaire. Les photons excitent les électrons de valence en les faisant traverser la jonction P-N et créer un courant électrique (photon-courant) exploité par l'homme à des usages domestiques ou industrielles [19].

## **I.3.7. Les Couches de passivation**

La passivation consiste à améliorer les qualités électroniques de la surface et de l'interface du matériau (silicium) en neutralisant les effets des défauts (les liaisons pendantes et impuretés) électriquement actifs. En se référant à la conception d'une couche mince efficace pouvant limiter la recombinaison des porteurs de charge au niveau de la cellule solaire, d'assurer sa stabilité et sa durabilité en protégeant la surface contre l'oxydation et d'autres dommages environnementaux ce qui permet d'optimiser l'efficacité de la cellule solaire. Les matériaux souvent utilisés pour la passivation sont des diélectriques (des oxydes métalliques) tels que l'oxyde d'aluminium ( $Al_2O_3$ ), l'oxyde thermique de silicium ( $SiO_x$ ), nitrure de silicium hydrogéné ( $SiN_x:H$ ) ou même des polymères. Les techniques de dépôt de couches de passivation peuvent varier en fonction du matériau utilisé. Elles comprennent des procédés par plasma, le dépôt chimique en phase vapeur (CVD), le dépôt par pulvérisation cathodique ou d'autres méthodes de dépôt sous vide ou à basse températures [20].

## **I.3.8. Revêtements antireflet**

Un revêtement antireflet est appliqué sur la face avant de la cellule pour faciliter le passage de la lumière à l'intérieure de sa zone active tout en rajoutant un piège lumière sous forme de pyramide pour favoriser l'absorption de la lumière et augmenter le rendement photovoltaïque.

# Chapitre I : Généralités sur la cellule solaire et l'effet photovoltaïque

## I.3.9. Dépôt des contacts métalliques

Les contacts métalliques sont déposés par sérigraphie sur la face avant de la cellule sous forme de grille fine pour éviter l'ombrage soit en argent, en cuivre ou en nickel et sur sa face arrière sous forme de couche pleine (ruban) généralement en aluminium pour collecter le courant électrique généré par la cellule solaire. Ensuite on procède à un recuit avec une certaine température bien étudiée pour la robustesse de la cellule. La face avant de la cellule comporte deux bus-barre et 43 doigts (finger en anglais) pour acheminer le courant électrique vers les batteries ou appareils externes.

## I.3.10. Encapsulation

Les cellules solaires sont encapsulées dans des couches de verre et d'éthylène-acétate de vinyle (EVA) pour les sceller, les isoler et les protéger de l'environnement extérieur.

## I.3.11. Assemblage en modules solaires

Plusieurs cellules solaires sont assemblées pour former un panneau solaire et plusieurs panneaux forment un module solaire. Les modules sont équipés d'un cadre et de connecteurs pour faciliter l'installation des systèmes solaires photovoltaïque [21]. Les deux figures suivantes illustrent les étapes de transformation du silicium en module photovoltaïque :

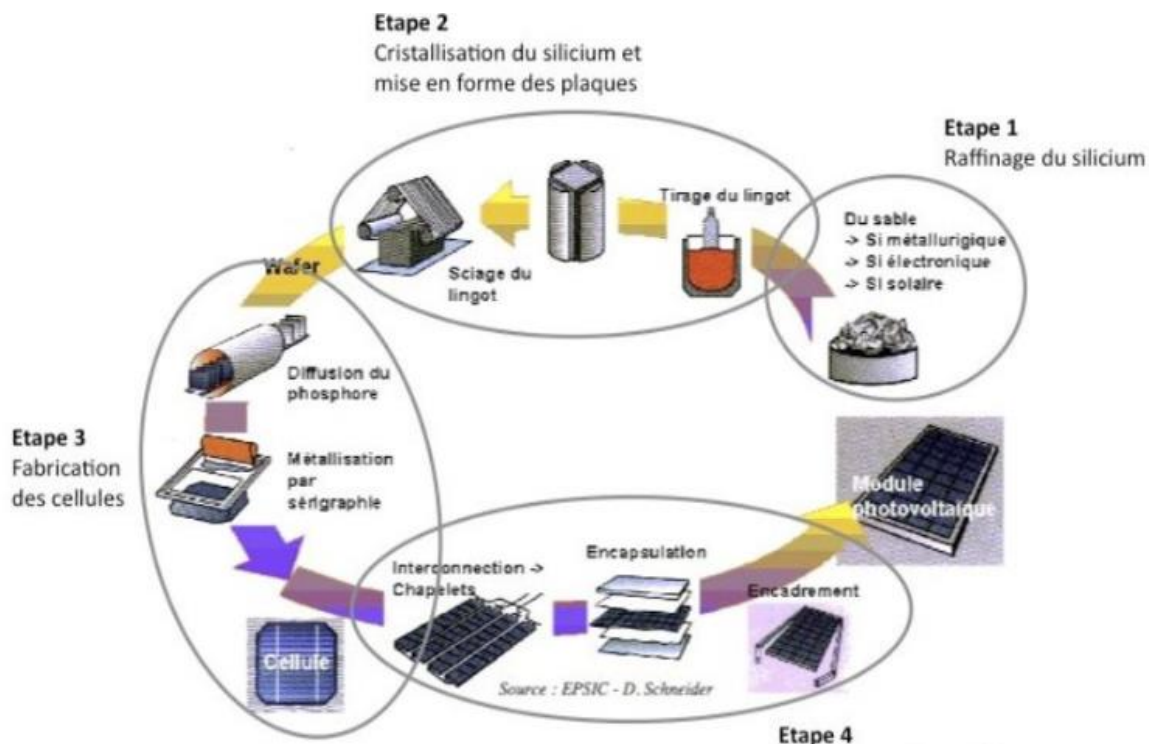


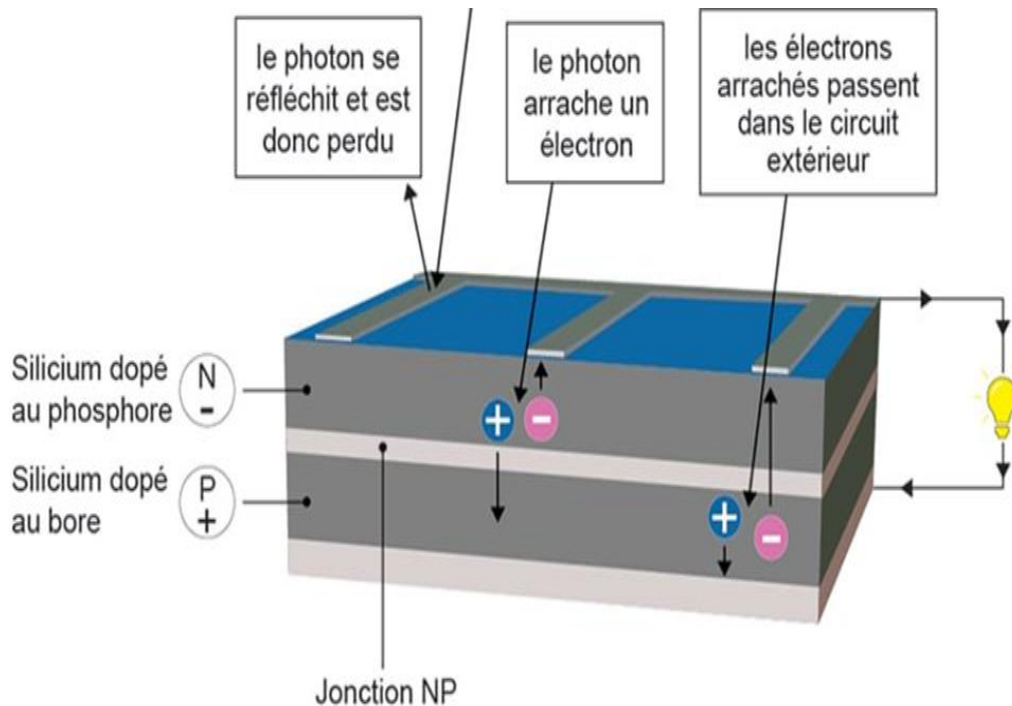
Figure.I.8. Les étapes de transformation du silicium en module PV.



*Figure.I.9 : Le silicium, de la matière première au panneau solaire.*

### I.4. Principe de fonctionnement d'une cellule solaire et effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est un phénomène physique découvert en 1839 par le physicien Alexandre Edmond Becquerel. Le fonctionnement de la cellule photovoltaïque est fondé sur la propriété des semi-conducteurs, qui une fois percuté par les photons venant du soleil mettent en mouvement un flux d'électrons et Lorsque ce flux prend une seule direction s'interprète en courant électrique continu. Les photons sont des particules élémentaires qui transportent l'Energie solaire à 300 000Km/s et qu'Albert Einstein appelait dans les années 1920 les <<grains de lumière>> [22] . Le principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque est illustré en (Figure.I.10).



*Figure.I.10 : Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire.*

### I.4.1. Absorption de la lumière (création des paires électrons/trous)

Le semi-conducteur (sc) avec lequel la cellule solaire est fabriquée, une fois exposé à la lumière du soleil, les photons fournissent l'énergie nécessaire pour déloger les électrons liés aux atomes du matériau (sc). La condition pour que l'absorption aura lieu, il faut que l'énergie des photons ( $E_{ph}$ ) soit supérieur ou égale à l'énergie du gap ( $E_g$ ) du semi-conducteur ( $E_{ph} \geq E_g$  du sc).

### I.4.2. Création d'une différence de potentiel

Lorsque les électrons sont délogés par l'énergie de la lumière, ils se mettent en mouvement en laissant des trous chargés positivement derrière eux et créant ainsi une différence de potentiel entre les deux côtés de la cellule ; un côté porte des charges négatives et un autre opposé porte des charges positives.

### I.4.3. Collecte du courant

La différence de potentiel électrique induite interprète la présence d'un champ électrique interne qui sépare les paires électrons/trous et le mouvement du flux d'électrons crée un courant électrique continu. Ce courant continu est ensuite dirigé à travers des fils conducteurs métalliques pour alimenter des charges externes ou pour qu'il soit stocké dans des batteries.

# Chapitre I : Généralités sur la cellule solaire et l'effet photovoltaïque

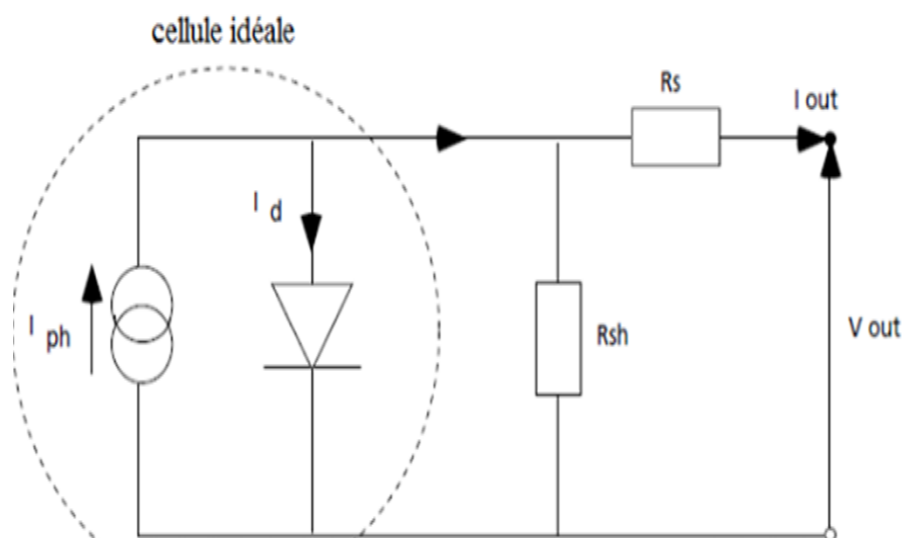
## I.5. Association de cellules photovoltaïques

Une cellule solaire de surface  $S=10 \text{ cm}^2$  produit en moyenne 1,25 watt dans des conditions standard de test STC (température  $T=25^\circ$ , l'éclairement=  $1000 \text{ watt/m}^2$ , air-masse  $AM= 1,5$  à ciel dégagé), cette puissance est très faible et insuffisante. Pour pouvoir augmenter la quantité d'énergie à produire par les modules PV, l'association de plusieurs cellules en série et/ou en parallèle est indiqué. Le groupement en série des cellules solaires permet d'augmenter la tension et le groupement des cellules solaires en parallèle permet l'augmentation du courant à la sortie du système PV.

## I.6. Schéma équivalent d'une cellule solaire et paramètres photovoltaïques

### I.6.1. Schéma équivalent d'une cellule solaire, caractéristique $i=f(v)$ et puissance

La (**Figure.I.11**) ci-dessous représente le circuit électrique équivalent d'une cellule solaire à jonction PN. La partie pointillée est une cellule idéale, sans pertes en courants ou en tension. Par contre le circuit global, contient une résistance shunte ( $R_{sh}$ ) qui représente les pertes en courant qui sont dues aux défauts de fabrication et aux recombinaisons des charges et une autre résistance série ( $R_s$ ) représente les pertes en tension dues au contacts métallique. La figure (**Figure.I.12**) montre la variation du courant débité par la cellule solaire en fonction de la tension a ses bornes (courbe en rouge), ainsi l'évolution de la courbe de puissance (courbe en bleu).



**Figure.I.11.** Schéma équivalent d'une cellule solaire.

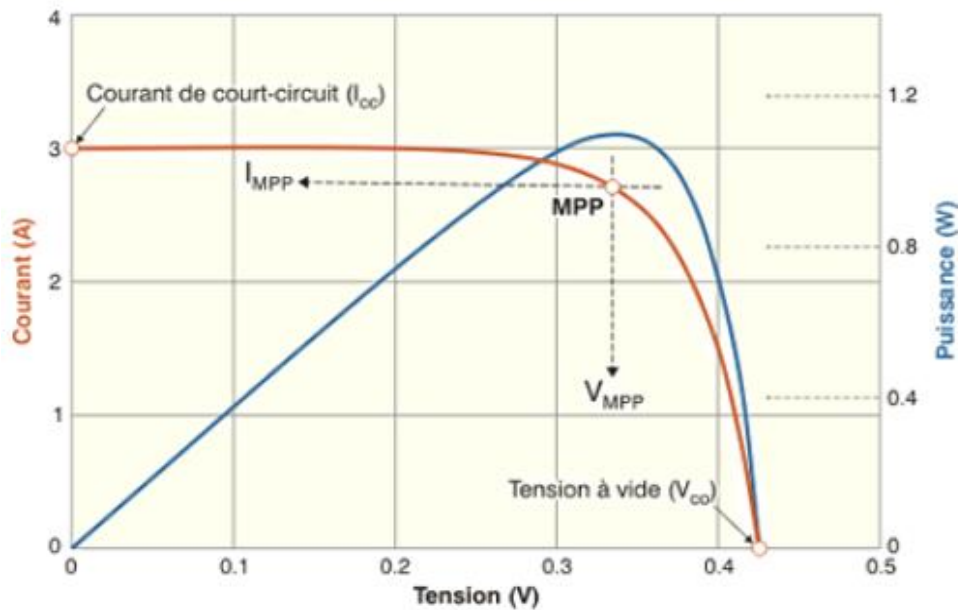


Figure.I.12. Caractéristiques I(V) et puissance.

## I.6.2. Les paramètres photovoltaïques (PV)

Ceux sont des grandeurs électriques qui décrivent le fonctionnement et les performances d'un système photovoltaïque. Ces paramètres sont très importants pour la conception, la réalisation et l'installation d'un système à base de panneaux solaires photovoltaïque qui permet de convertir l'Énergie solaire en électricité. Voici les principaux paramètres PV clés :

Le modèle mathématique associé au courant de la cellule solaire est celui d'une diode (jonction PN) on lui ajoutant le photo-courant ( $I_{ph}$ ) qui est proportionnel à l'éclairement du soleil avec des termes modélisant les phénomènes internes de sa structure qui représentent respectivement des pertes en courant et en tension ( $R_{sh}$  et  $R_s$ ). La diode modélise le comportement de la cellule dans l'obscurité ( $I_d$ ). Le générateur modélise le courant  $I_{ph}$  généré par l'éclairement (photo-courant) [23]

Voici en dessous les expressions des courants issus de la cellule solaire : avec  $I=I_{out}$  et  $v=v_{out}$

$$I = I_{ph} - I_{d0} (e^{q(v+R_s I)/KT} - 1) - (v + R_s I) / R_{sh} \Rightarrow \text{le courant généré par une cellule solaire réelle} \quad (I1)$$

$$I = I_{ph} - I_{d0} (e^{qv/KT} - 1) = I_{ph} - I_d \Rightarrow \text{le courant généré par une cellule solaire idéale} \quad (I2)$$

## Chapitre I : Généralités sur la cellule solaire et l'effet photovoltaïque

---

$$I_d = I_{d0} (e^{qv/KT} - 1) \implies \text{le courant d'une cellule solaire dans l'obscurité} \quad (I3)$$

$I_{ph}$  : photo-courant en ampère (A).

$I_{od}$  : courant de saturation de la diode (A).

V : la tension au borne de la cellule en volt (V).

$R_s$  : résistance série en ohm ( $\Omega$ ).

$R_{sh}$  : résistance shunt en ohm ( $\Omega$ ).

k : constante de Boltzmann ( $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ )

q : charge de l'électron ( $q = 1,602 \cdot 10^{-19}$  Colomb)

T : température en degré kelvin (K).

**-Tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ )** : c'est la tension maximale obtenue lorsque la cellule solaire n'est pas connectée à une charge, sa valeur est mesurée avec un voltmètre ou avec un calcul théorique en mettant  $I=0$  dans (1) ou (2).

**-Courant de court-circuit ( $I_{cc}$ )** : c'est le courant maximal mesuré lorsque le panneau solaire est court-circuité, on obtient aussi sa valeur par les expressions (1) ou (2) en mettant  $V=0$ , ou bien avec la mesure directe par un ampèremètre.

**-Tension maximale ( $V_{max}$ )** : c'est la tension maximale délivrée par la cellule solaire dans les conditions standards de test (STC).

**-Courant maximal ( $I_{max}$ )** : c'est le courant maximal obtenu par la cellule.

**-Puissance maximale ( $P_{max}$ )** : c'est la puissance maximale fournie par la cellule solaire dans les STC, elle est obtenue en multipliant  $V_{max}$  par  $I_{max}$  ( $P_{max} = V_{max} * I_{max}$ ).

**-Facteur de forme (FF)** : il est appelé aussi facteur de remplissage, c'est le rapport entre la puissance réelle de sortie et la puissance maximale théorique de la cellule solaire. Il donne une indication de l'efficacité de la conversion globale ( $0 < FF < 1$ ).

**-Coefficient de température** : il indique comment les performances d'une cellule solaire changent avec la température.

## **Chapitre I : Généralités sur la cellule solaire et l'effet photovoltaïque**

---

**-Tolérance :** c'est la variation permise par rapport à la puissance nominale exemple, une tolérance de +/-5% signifie que la puissance réelle peut varier de 5% par rapport à la puissance nominale.

**-Durée de vie et dégradation :** cela concerne la durée de vie utile de la cellule solaire et la façon dont ses performances diminuent progressivement au fil du temps.

**-Efficacité (rendement) :** représente le pourcentage d'Energie solaire incidente convertie en électricité. Une efficacité élevée (proche de 100%) indique une meilleure conversion de l'Energie solaire.

**-Rendement (%)  $\eta$  :** (puissance maximale produite en watt/puissance incidente en watt)\*100.

Cependant, il existe plusieurs étapes pour obtenir des valeurs plus au moins précises du rendement :

-Mesure de l'Energie électrique produite, en utilisant un compteur d'Energie sur une période donnée.

-Estimation de l'Energie solaire incidente, celle-ci dépend des données historiques d'ensoleillement des régions, pour extraire l'Energie moyenne incidente.

-Prendre en considération les pertes dues : aux conditions météorologiques, aux situations géographiques des régions, aux convertisseurs utilisés, aux saletés et à l'ombrage.

-Utilisation des outils en ligne ou des logiciels pour faire un calcul plus précis.

Le rendement est également influencé par la qualité des composants du système, la manière dont il est installé et la technologie de fabrication utilisée.

En général, les cellules solaires ont basé du mono-Si commerciales ont actuellement un rendement allant jusqu'à 25% ou plus.

### **I.6. Différents types de cellules photovoltaïques**

Avec l'évolution des technologies en photovoltaïque et dans l'objectif principale est d'améliorer le rendement en puissance et généraliser ce type d'Energie renouvelable en réduisant les couts, on trouve plusieurs types de cellules qui sont réalisées et d'autres représentent les sujets de recherche dans les laboratoires. On distingue trois grandes familles de cellules solaires [24]:

# **Chapitre I : Généralités sur la cellule solaire et l'effet photovoltaïque**

---

## **I.7.1. Les cellules au silicium cristallin (sont détaillées ci-dessus)**

Ce type de cellules constituent plus de 95% du marché et leur rendement moyen va de 16,5% à 23% selon leur technologie. Le silicium utilisé peut être monocristallin, multi-cristallin ou amorphe.

## **I.7.2. Les cellules en couches minces**

Les matériaux semi-conducteurs sont déposés en couches minces d'une épaisseur de quelques microns sur un substrat en verre ou en plastique. On peut utiliser du tellure de cadmium ou du CIGS (cuivre/indium/gallium/sélénium). Le silicium peut également être utilisé en couches minces s'il est sous sa forme amorphe (cristallisée). Les rendements en laboratoire sont proches de ceux des cellules conventionnelles (allant jusqu'à 23%).

## **I.7.3. Cellules organiques (OPV)**

Ce type de cellules sont fondées sur la chimie organique avec laquelle on produit des semi-conducteur organique, tels que les polymères et cellules solaires à pigments (colorants). Leurs rendements sont encore faibles et la stabilité à long terme n'est pas suffisante mais elles pourraient avoir un très bas coût de production et facile à transporter.

## **I.7.4. Cellules solaires pérovskites (OPV)**

Ce sont réalisées à l'aide d'un matériau hybride, avec une partie organique et une partie inorganique. Leurs rendements en laboratoire atteignent déjà celui des cellules conventionnelles (23,7%). Malgré leurs nombreux avantages : légèreté, souplesse, avec la possibilité d'être manipuler sous forme d'encre pour de grands revêtements et leurs coûts de fabrication peu élevé, elles nécessitent encore beaucoup d'amélioration avant l'industrialisation étant donné qu'elles présentent des problèmes d'instabilité.

## **I.6.5. Cellules doubles dites « Tandem »**

Sont obtenues par empilement de plusieurs couches minces.

## **I.6.6. Les cellules solaires passivée**

C'est une nouvelle structure de type PERC (passivated emitter and rear cell), qui fait référence à la passivation de la surface arrière de la cellule solaire. Cette dernière comporte d'autres technologies de plus en plus avancées qui sont misent au point pour augmenter l'efficacité de

## **Chapitre I : Généralités sur la cellule solaire et l'effet photovoltaïque**

---

conversion de l'énergie solaire en électricité, parmi elles on trouve : PERT, PERD, PERL et PERF.

-PERL (Passivated Emitter And Rear Locally Diffused) : structure à émetteur passivé et diffusion locale arrière, le dopage est réalisé d'une manière sélective conçue en (1999).

-PERD (Passivated Emitter Rear Dead Layer) : est une technologie à émetteur passivé et arrière à contact direct dû à l'intégration d'une couche morte à l'arrière de la cellule.

-PERF (Passivated Emitter And Rear Fully Diffused): c'est l'émetteur passivé à jonction arrière flottante.

-PERT (Passivated Emitter And Rear Tatally Diffused): ce type de cellule a une configuration à émetteur passivé et arrière totalement diffusé. Le type p-PERT est conçu et fabriquée en 1992 par le chercheur Aihua wang à l'université de Nouvelle-Galles du Sud (UNSW) en Australie dans le but d'améliorer le facteur de remplissage (FF) et en 2002, il a introduit le type n-PERT qu'il considère comme un candidat idéal dans le photovoltaïque.

### **I.7. Avantage et inconvénient du photovoltaïque**

**Avantages :** la matière première (la silice) est disponible, la source d'Energie est gratuite, économique à long terme, écologique, pas de gaz à effet de Cère, durable et inépuisable et facile à installer.

**Inconvénients :** processus de fabrication très lent et coûteux.

### **I.8. Conclusion**

Vers Une Convergence Des Technologies, les chercheurs travaillent sur des combinaisons entre les différentes familles pour créer des cellules multi-jonctions, afin d'atteindre un rendement énergétique idéal et d'arriver à généraliser l'énergie photovoltaïque et de la rendre accessible à tout le monde. Sauf qu'à l'heure actuelle, la cellule solaire réalisée à base du silicium monocristallin reste toujours le produit dominant par excellence le marché mondial, grâce à la baisse des prix et au rendement qu'elle fournit. Les études se multiplient surtout sur les cellules doubles dites « **tandem** », associant du silicium et des couches minces, dont le rendement théorique est envisagé à 43 %.

## **Chapitre II : Techniques de caractérisation des matériaux**

## **Chapitre II : Techniques de caractérisations des matériaux**

---

### **II.1. Introduction**

Tout matériau qui se trouve sur la planète terre soit sous sa forme primaire ou modifié par l'Homme diffère l'un de l'autre. Dans le but de distinguer les matériaux et d'extraire le maximum d'informations approfondies sur leurs structures et leurs compositions, plusieurs techniques de caractérisation sont mises en évidence et chacune d'elles est adaptée à des propriétés spécifiques aux échantillons et à des échelles de mesure particulières, généralement sont complémentaires ou utilisées conjointement. Dans ce présent chapitre on a cité plusieurs méthodes de caractérisation telle que la technique de pointe chaude, méthode de quatre pointes, mesure par effet Hall, la technique de mesure électrochimiques de capacité-tension (ECV : Electrochemical Capacitance-Voltage), la spectrométrie de masse des ions secondaires (SIMS), l'analyse par Infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) et la technique QSSPC (Quasi-Steady-State-Photo-Conductance) pour la mesure de durée de vie.

Les techniques d'analyses suscitée servent à déterminer le type de semi-conducteur utilisé pour la cellule solaire, les caractéristiques électriques, profil de dopage, la composition chimique des matériaux et la durée de vie des porteurs de charges minoritaires [25-28].

### **II.2. Technique de caractérisation avec la pointe chaude**

#### **II.2.1. Définition**

Cette méthode est souvent appelée pyrolyse à la pointe chaude ou boîte chaude, en anglais « hot point probe », c'est une technique facile, rapide, efficace et très répandue pour déterminer le type de conductivité d'un semi-conducteur N, P ou intrinsèque. L'appareillage utilisé est constitué d'un galvanomètre, Pointe froide, pointe chaude, substrat en silicium type P ou en verre, couche référence Si (N), couche mince type P et un spot [25-26], voir l'image suivante (**Figure II.1**).



Figure II.1. Appareillage de la pointe chaude (CRTSE).

### II.2.2. Principe de fonctionnement

Son principe de fonctionnement est basé sur l'effet Seebeck ou effet thermoélectrique découvert par le physicien allemand Thomas Johann Seebeck en 1821, par lequel une différence de potentiel ( $\Delta V$ ) apparaît lorsqu'un matériau est soumis à une différence de température ( $\Delta T$ ), entre une région froide et une région chaude du même matériau. Le signe du potentiel est relié au signe des porteurs de charges et l'amplitude est proportionnelle à la différence de température. Expérimentalement, on utilise un galvanomètre relié aux deux pointes, l'une chauffée à l'aide d'un courant électrique et l'autre non chauffée, et un étalon couche de silicium de type N comme référence. Si le sens de déviation du « spot » est le même que celui de la couche référence (N) alors notre semi-conducteur est de type N et dans le cas contraire il est de type P si non la couche est intrinsèque [25-26].

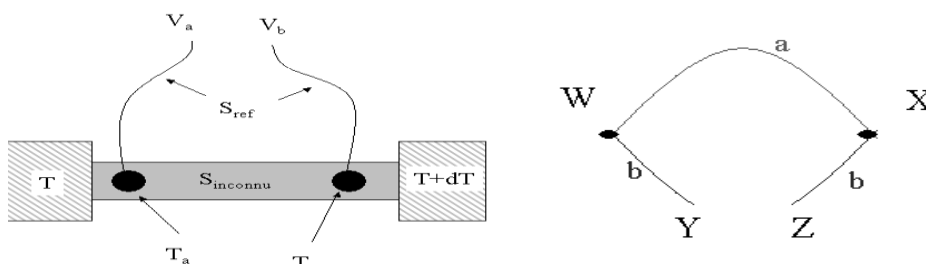


Figure II.2. Expérience sur l'effet Seebeck.

## Chapitre II : Techniques de caractérisations des matériaux

### II.3. La méthode des quatre pointes (résistance carrée ; $R_{\square}$ )

#### II.3.1. Définition

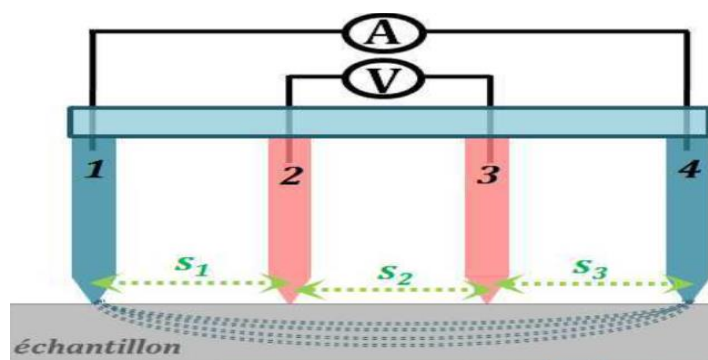
C'est une technique qui permet de déterminer d'une manière précise et fiable les paramètres électriques des matériaux ; conductivité, résistivité, résistance carrée, concentration des dopants et l'uniformité du dopage. Elle est nommée en science de la mesure (métrologie) la méthode de résistance carrée ( $R_{\square}$ ) [27-28].



*Figure II.3. Resistivimètre-CMT-series-SR-2000 N (CRTSE).*

#### II.3.2. Le Principe de la méthode des quatre pointes

Son schéma de principe est représenté en figure ci-dessous (Figure II.4) :



*Figure II.4. Schéma de principe de la technique de caractérisation des quatre pointes.*

1, 2, 3, 4 sont des pointes métalliques.

$S_1$  : la distance entre les pointes 1 et 2.

$S_2$  : la distance entre les pointes 2 et 3.

## Chapitre II : Techniques de caractérisations des matériaux

---

$S_3$  : la distance entre les pointes 3 et 4.

Avec,  $S_1 = S_2 = S_3 = S$ .

A : Ampèremètre.

V : voltmètre.

La plaque de couleur grise : c'est l'échantillon à caractériser.

Le principe de cette méthode, c'est de placer sur l'échantillon (loin de ces bords) quatre (4) pointes métalliques équidistantes qui peuvent être soit alignées, soit disposées en carrée. On injecte un courant constant (I) entre les pointes 1 et 4 et on mesure la différence de potentiel (V) entre les pointes 2 et 3. Le rapport de la tension mesurée sur l'intensité qui traverse l'échantillon donne la résistance du tronçon entre les pointes 2 et 3. Un tel dispositif est développé par le Physicien Laure Arbenz en 2014 pour caractériser la conductivité électrique ( $\sigma$ ) sur le produit roue polaire.

Les relations qui donnent les paramètres électriques des plaques de silicium sont les suivantes :

$$R_{\square} = k \cdot V/I, (k = 4,532) = R_{\square} = \rho/e \implies \text{(II.1)}$$

$$\rho = e \cdot R_{\square} = e \cdot 4,532 \cdot V/I = (\Omega \cdot m) \implies \text{(II.2)}$$

$$\sigma = 1/\rho = q \cdot n \cdot \mu (\Omega \cdot m)^{-1} \implies \text{(II.3)}$$

V : la tension entre les pointes 2 et 3 en volt (v).

I : le courant injecté en ampère (A).

R : la résistance en ohm ( $\Omega$ ).

$R_{\square}$  : la résistance par carré en ( $\Omega/\square$ ).

$\rho$  : la résistivité du matériau en ( $\Omega \cdot m$ ).

$\sigma$  : la conductivité du matériau en ( $\Omega \cdot m$ )<sup>-1</sup> ou siemens.

q : la charge =  $1,6 \cdot 10^{-19}$  coulomb (C).

n : la concentration ( $m^{-3}$ ).

$\mu$  : la mobilité des porteurs de charges en ( $m^2/Vs$ ).

## Chapitre II : Techniques de caractérisations des matériaux

e : l'épaisseur de l'échantillon en m.

Cette technique conduit à déduire la concentration des dopants à partir de la résistivité d'un échantillon. Le tableau suivant montre les résistivités et concentrations théoriques du silicium cristallin type N, P et intrinsèque [27-28].

**Tableau II.1.** Comparaison des résistivités théoriques du silicium cristallin à température ambiante (23°C).

Types de silicium		Concentration ( At/cm <sup>3</sup> )	Résistivité, $\rho$ ( $\Omega$ m)
<b>Silicium monocristallin</b>	Intrinsèque	n=p	10 <sup>3</sup> à 10 <sup>5</sup>
	Dope n	10 <sup>15</sup> à 10 <sup>18</sup>	10 à 10 <sup>-3</sup>
	Dope p	10 <sup>15</sup> à 10 <sup>18</sup>	10 à 10 <sup>-3</sup>
<b>Silicium Multi-cristallin</b>	Intrinsèque	n=p	10 <sup>2</sup> à 10 <sup>4</sup>
	Dope n	10 <sup>15</sup> 10 <sup>18</sup>	20 à 10 <sup>-2</sup>
	Dope p	10 <sup>15</sup> 10 <sup>18</sup>	20 à 10 <sup>-2</sup>

### II.4. La caractérisation par Effet Hall [5]

#### II.4.1. Définition

Le capteur à Effet-Hall est solide et très sensible il détecte et mesure la présence de champs magnétiques. L'effet Hall est exploité pour caractériser les matériaux conducteurs et semi-conducteurs, son appareillage est dans la (**Figure II.5**).

L'effet Hall vient du nom du physicien « Hall » ayant fait cette découverte en 1880. Ce phénomène est observé lorsqu'un élément conducteur ou semi-conducteur (fil, barreau ou plaque) parcouru par un courant électrique d'intensité I est plongé dans champ magnétique ( $B_z$ ) qui lui est perpendiculaire, une force proportionnelle à la fois au champ et au courant se manifeste et une tension également perpendiculaires au matériau appelée tension Hall ( $V_H$ ) est mesurée par un voltmètre, voir la (**Figure II.6**) [29].



Figure II.5 La sonde à effet hall (Profilers HL 5900) (CRTSE).

### II.4.2. Principe de l'Effet Hall

Le principe de cette technique explique l'influence du champ magnétique, la force de Lorentz qui provoque la déviation des particules chargées négativement (électrons) vers un côté de la plaque et celles chargées positivement vers l'autre côté, cette dissymétrie crée le champ de Hall ( $E_H$ ) donc la tension de Hall ( $V_H$ ) et permet aussi de savoir le type de semi-conducteur. Si l'indicateur du cadran du voltmètre dévie dans la même direction que celle des aiguilles d'une montre donc le semi-conducteur est de type P mais s'il dévie dans le sens opposé le matériau est de type N [29-30].

$V$  : tension électrique et  $t$ ,  $l$  et  $w$  : l'épaisseur, la longueur et la largeur du matériau respectivement.

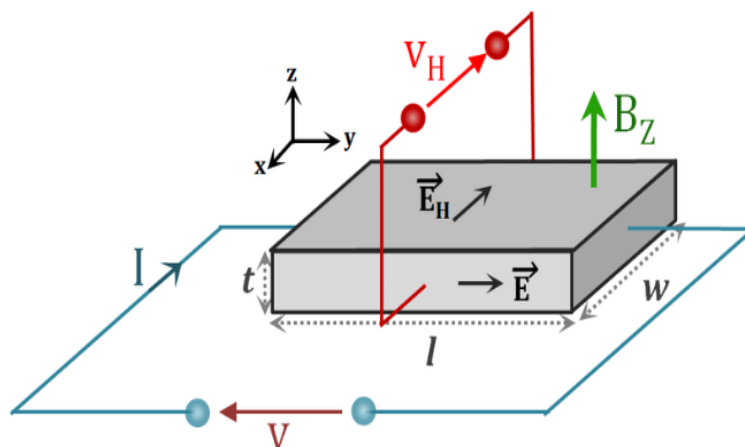


Figure II.6. Principe de l'Effet Hall.

## Chapitre II : Techniques de caractérisations des matériaux

---

### II.5. Mesures ECV

#### II.5.1. Définition

Les mesures électrochimiques de capacité-tension (ou ECV « Electrochemical Capacitance-Voltage ») sont utilisées pour déterminer la profondeur du dopage et permettent l'obtention des profils de concentration en dopants actifs (informations essentielles sur la distribution des dopants) [31].

#### II.5.2. Principe de fonctionnement

Pour cet objectif on met en contact la surface de l'échantillon avec un électrolyte Acide fluorhydrique (HF) et fluorure d'ammonium ( $\text{NH}_4\text{F}$ ) afin de créer un contact Schottky. La surface de l'échantillon est alors gravée par polarisation du contact, et la mesure en dopants actifs est obtenue par mesures de capacité-tension (C-V). C'est l'alternance entre gravure contrôlée et mesure C-V qui permet de remonter à la quantité de dopants actifs selon la profondeur de gravure. Connaissant la profondeur gravée entre l'échantillon et une contre-électrode, il est possible de remonter au profil de concentration de dopants actifs effectifs au sein du substrat de silicium. Les mesures ECV peuvent être réalisées sur des échantillons de silicium polis ou texturés. Néanmoins, si cette mesure est réalisée sur des substrats texturés, les mesures ECV doivent être corrigées par un facteur d'aire correspondant à la surface développée [31-32].



*Figure II.7. L'Appareillage de l'ECV (CRTSE).*

## Chapitre II : Techniques de caractérisations des matériaux

---

### II.6. La Spectroscopie de masse des ions secondaires (SIMS)

#### II.6.1. Définition

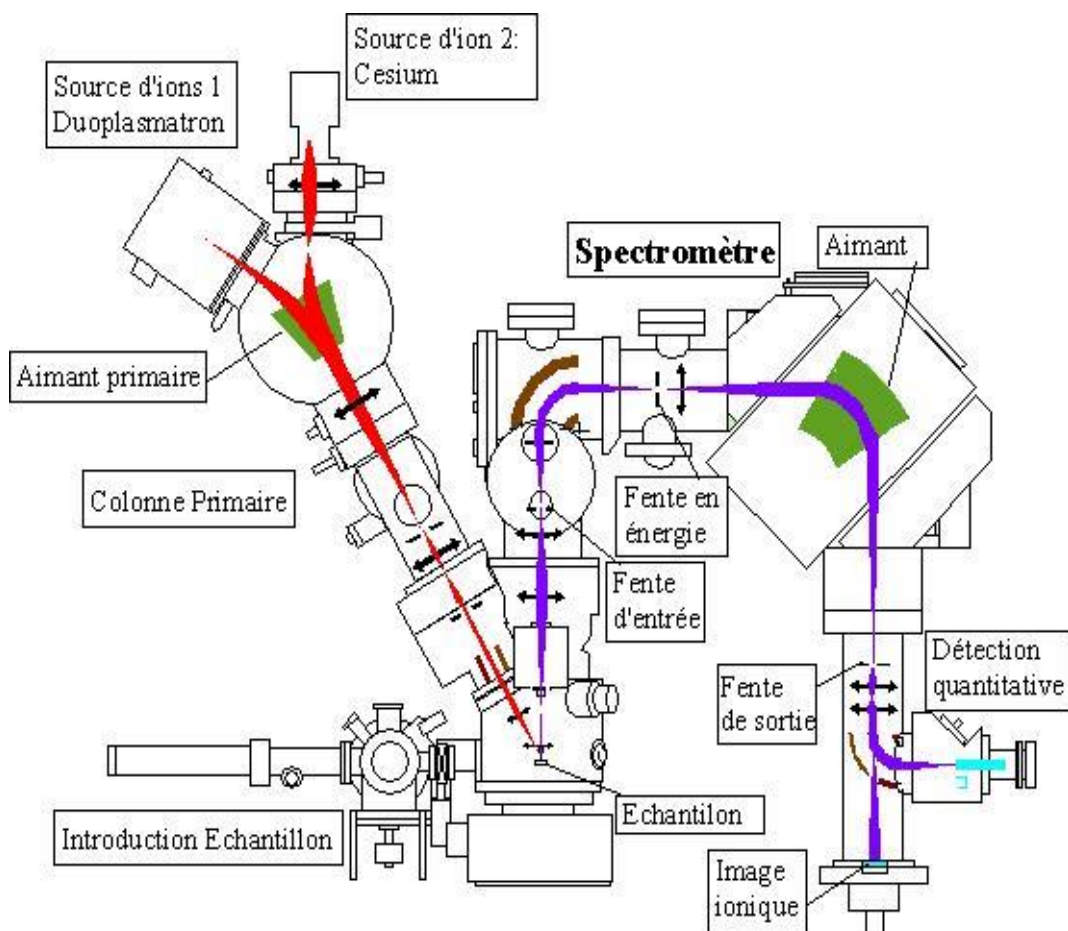
Ce type de procédé permet l'analyse, l'étude et la quantification des compositions élémentaires des surfaces solides telles que les couches minces ou autres d'une manière optimale.

#### II.6.2. Principe de fonctionnement

Un faisceau d'ions de gaz inertes tel que l'argon est focalisé sur l'échantillon, l'énergie de ces ions est suffisamment grande pour arracher les atomes du matériau, l'échantillon est pulvérisé entraînant l'ionisation d'une partie de ces atomes. Un spectromètre de masse analyse les atomes arrachés à la surface ce qui permet de connaître la composition chimique du matériau. Le bombardement ionique et la détection des ions émis sont réalisés au même temps, aussi l'analyse de la couche en fonction de la profondeur peut être établie. Le faisceau d'ions fait le balayage de la surface de l'échantillon point par point pour obtenir une cartographie en deux dimensions des éléments chimiques. Ainsi de remonter à la profondeur abrasée, on mesure la profondeur de la zone bombardée, ce qui permet de faire correspondre le temps d'abrasion avec la profondeur sondée. La méthode de caractérisation SIMS est très sensible et permet de remonter à des concentrations d'atomes faibles tels que les dopants et la profondeur d'incorporation. Les ions secondaires ainsi éjectés sont extraits de la surface par un champ électrique et accélérés vers un analyseur de masse. Dans l'analyseur de masse, les ions secondaires sont ensuite séparés en fonction de leur rapport masse/charge, ce qui permet de déterminer leur composition élémentaire et leur distribution spatiale. Ce qui rend la SIMS un outil polyvalent utilisé dans de nombreux domaines, à noter la géochimie, la science des matériaux, l'analyse des surfaces et interfaces et dans la recherche en nanotechnologie, en raison de sa sensibilité élevée et sa capacité à fournir des informations détaillées sur la composition des matériaux à l'échelle microscopique [33-34]. Son appareillage est en **(Figure II.8)** et son schéma de principe est en **(Figure II.9)**



*Figure II.8. L'Appareillage de la spectroscopie de masse des ions secondaires (SIMS),  
« Cameca IMS4FE »(CRTSE).*



*Figure II.9. Schéma De Principe Du SIMS.*

## Chapitre II : Techniques de caractérisations des matériaux

---

### II.7. La Caractérisation infrarouge à transformée de fourrier (FTIR)

#### II.7.1. Définition

L'analyse FTIR est une technique physico-chimique non destructive qui permet d'identifier la nature des liaisons chimiques caractéristiques du matériau par la détection des longueurs d'ondes absorbées par l'échantillon. Un spectromètre FTIR comporte essentiellement :

- Une source lumineuse infrarouge (IR).
- Un dispositif permettant de générer les interférences (interféromètre).
- Un rayonnement Laser.
- Un compartiment échantillon (porte-échantillon) qui permet d'accueillir plusieurs types d'accessoires dépendant du mode de mesures utilisé (réflexion ou transmission).
- Détecteurs ou capteurs photosensibles.
- Un convertisseur analogique numérique qui interroge le détecteur à des intervalles réguliers et transforme le signal analogique en un signal numérique manipulable par les systèmes informatiques (ordinateur).



*Figure II.10. Appareillage de FTIR, Thermo Nicolet NEXUS 670 (CRTSE).*

#### II.7.2. Le Principe De La Spectroscopie FTIR (Figure II.11 et II.12) :

Une source IR émet un faisceau de longueurs d'ondes allant de 2,5 à 25 micromètre ( $\mu\text{m}$ ) qui correspondent aux nombres d'ondes allant de 400 à 4000 respectivement, le faisceau est dirigé

## Chapitre II : Techniques de caractérisations des matériaux

---

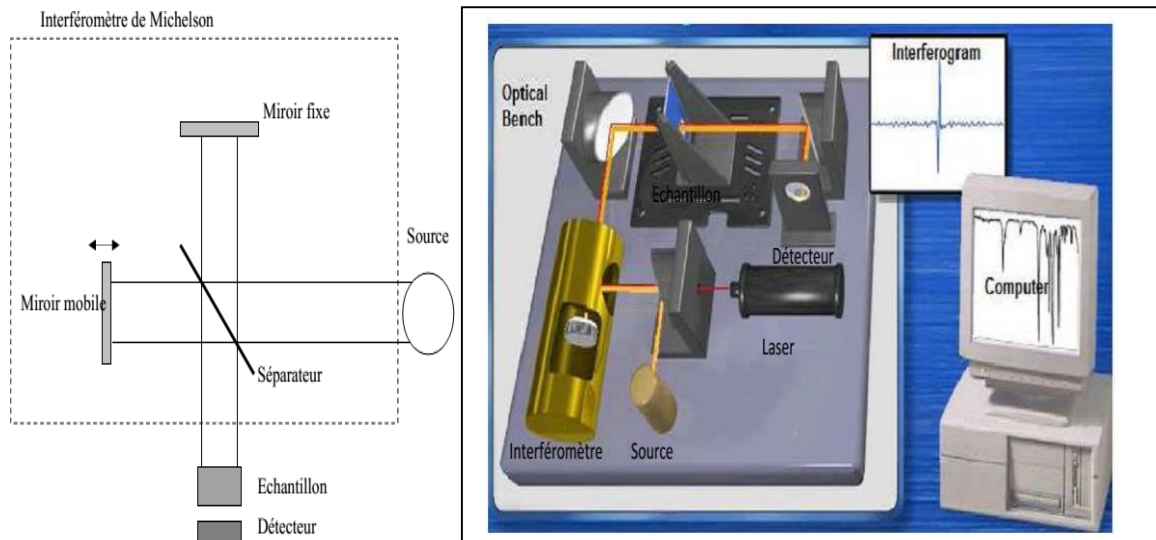
vers l'interféromètre de Michelson ou il est partagé en deux par une lame séparatrice, l'un se réfléchit sur un miroir fixe et parcourt un chemin optique fixe tandis que l'autre sur un miroir mobile et parcourt un chemin optique de longueur variable. Le déplacement régulier du miroir mobile génère une différence de chemin optique entre les deux faisceaux, cette configuration peut être constructive ou destructive. Quand les deux faisceaux se recombinent, le signal résultant appelé interférogramme de référence (Background Interferogram) qui contient des informations sur les fréquences présentes dans le faisceau est scanné et enregistre l'intensité totale du rayonnement infrarouge (IR) codé. Un LASER est utilisé pour mesurer d'une manière précise le déplacement du miroir mobile de l'interféromètre.

La lumière infrarouge (IR) possède une énergie capable d'exciter et de faire vibrer les liaisons chimiques entre les atomes. Lorsque le rayonnement IR modulé traverse l'échantillon, certaines fréquences sont absorbées et grâce aux mouvements de vibration, la nature des liaisons chimiques de l'échantillon est identifiée ainsi que les groupes caractéristiques, en interprétant le spectre d'absorption. Le détecteur enregistre l'intensité du signal à la sortie de l'échantillon et génère l'interférogramme de l'échantillon (Sample interferogram).

L'ordinateur décode les données relatives à chaque interférogramme pour obtenir la courbe d'énergie qui leur correspond, en utilisant un calcul mathématique complexe appelé « Transformée de Fourier Rapide ». La courbe d'énergie à l'entrée de l'échantillon est appelée « Background energy curve » et celle obtenue à sa sortie est appelée « sample energy curve », la comparaison des deux courbes indique l'énergie absorbée par l'échantillon [35-36]



*Figure II.11. Mouvement des liaisons chimiques traversées par les IR.*



*Figure II.12. Schéma de principe de la FTIR.*

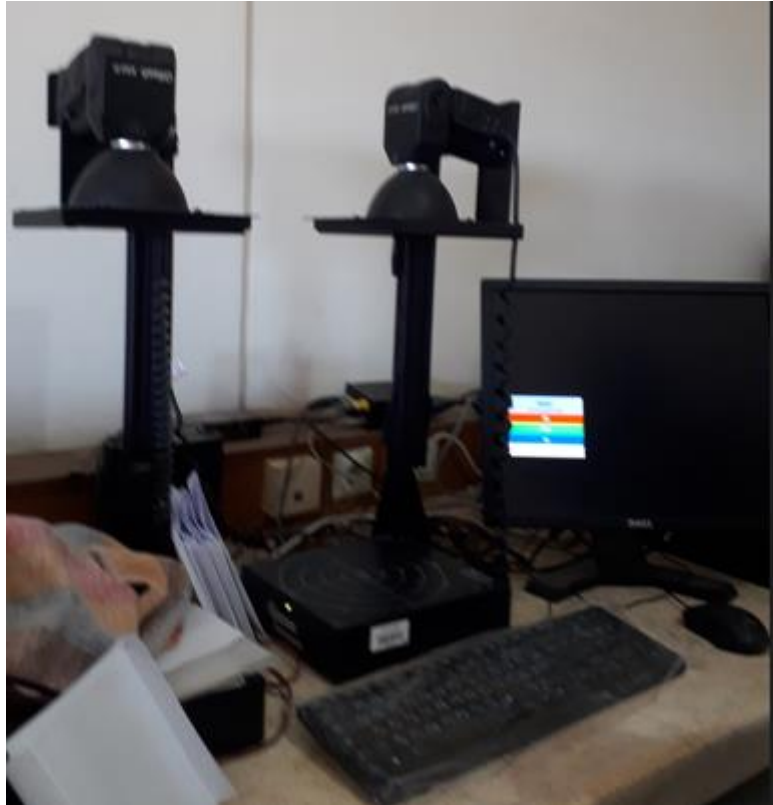
### II.8. Caractérisation par mesure de la durée de vie (QSSPC)

#### II.8.1. Définition

La durée de vie des matériaux est obtenue ou mesurée en utilisant la méthode QSSPC (Quasi-Steady-State Photo Conductance), qui signifie photo-conductance quasi stable. Cette méthode est souvent utilisée dans le domaine photovoltaïque pour estimer la durée de vie des cellules solaires en évaluant la qualité des matériaux semi-conducteurs qui les constituent [37].

#### II.8.2. Principe de fonctionnement

Le principe de la technique QSSPC repose sur l'excitation des porteurs de charges dans le matériau semi-conducteur à l'aide d'une lumière intense (flash) ou d'une impulsion électrique de l'ordre de 50 soleil. Pendant que les porteurs de charge se déplacent de la couche de valence vers la couche de conduction du matériau, un courant de charge est généré et mesuré par l'appareil QSSPC. Après l'analyse, une décroissance du courant est observée au fil du temps puis enregistré, cette diminution est due au phénomène de recombinaison de charges. A partir des données enregistrées, il est possible de déterminer la durée de vie moyenne des porteurs de charges minoritaire dans le matériau semi-conducteur qui représente la durée de vie de la cellule solaire [37-38].



*Figure II.13. Appareillage de QSSPC, WCT-120(CRTSE).*

### **II.9. Conclusion :**

Dans ce chapitre, on a cité quelques techniques de caractérisation destinées pour l'analyse des matériaux, principalement semi-conducteur destinés pour le photovoltaïque. Commenant par la pointe chaude pour déterminer le type de dopage réalisé, suivie des autres techniques suscité pour la mesure des caractéristiques électrique, l'estimation de l'épaisseur des jonctions, la concentration des dopants et la durée de vie des porteurs de charges minoritaires, chaque technique joue un rôle dans la recherche pour le développement de la cellule solaire.

# **Chapitre III : Partie expérimentale & Résultats et discussions**

### III.1. Introduction

Le processus clé et fondamental dans la fabrication de la cellule solaire à base de silicium cristallin est la réalisation d'une jonction PN. Cette dernière repose sur la diffusion du phosphore sur un wafer en silicium type P ou du bore sur du silicium type N.

Ce chapitre a été consacré pour ce type d'études avec deux étapes qui se succèdent ; étape pré-dépôt et drive-in, suivies de nombreuses analyses pour caractériser les résultats des expériences à travers les techniques de caractérisation suivantes :

- La technique infrarouge à transformée de fourrier (FTIR) pour détecter les éléments chimiques des wafers.

-Les mesures électriques pour la détermination des propriétés électriques des couches par les techniques "pointe chaude", "quatre pointes" et "Effet Hall ".

-Les mesures de la durée de vie des échantillons par la technique QSSPC.

Le tableau III.4 illustre les caractéristiques électriques et les dimensions des plaquettes utilisées pour nos expériences.

**REMARQUE :** ECV et SIMS sont tombés en panne au niveau du centre de recherche CRTSE d'Alger.

### III.2. Description des dopants

#### III.2.1. Le Phosphore (P)

Le phosphore est un élément chimique qu'on appelle porteur de lumière (chimiluminescence), il est le 14<sup>ème</sup> élément chimique qui a été découvert en 1669 par l'alchimiste allemand de Hambourg (souffleur de verre). Le phosphore est de numéro atomique 15, de symbole P et il se trouve dans le cinquième groupe principal dans le tableau périodique, ou 15<sup>e</sup> groupe dans la norme de l'union internationale de chimie pure et appliquée (IUPAC : International Union of Pure and Applied Chemistry) . Cet élément est très nécessaire pour l'organisme humain, animal, pour la photosynthèse des plantes et pour l'industrie photovoltaïque. Il existe deux types de phosphore, organique et inorganique qui peuvent être de couleur noir, rouge ou blanc [39] :

## Chapitre III : Partie expérimentale & Résultats et discussions

-Le **phosphore organique** : provient des produits laitiers, légumineuses, viandes rouges, fruits de mer et les noix.

-Le **phosphore inorganique (minéral)** : provient de roche phosphatée transformée chimiquement. Il se trouve sous forme de phosphates d'origine animale dans les guanos d'oiseaux ou de chauve-souris accumulés durant des millions d'années sur des sites dortoirs ou de reproduction. Les roches phosphatées exploitables se concentrent au Maroc, en Chine, en Afrique du sud et aux Etats Unis.



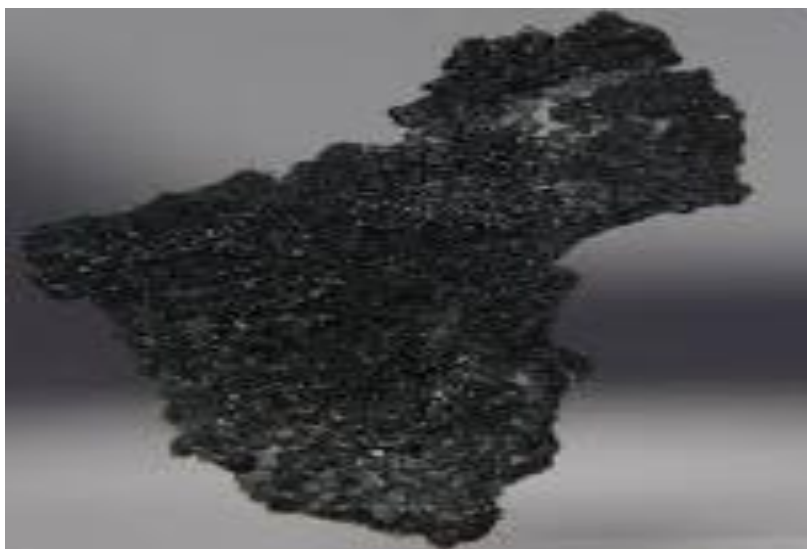
*Figure III.1. Le phosphore à l'état naturel.*

**Tableau III.1.** Description du phosphore.

Symbole	Numéro CAS	Masse atomique	Numéro atomique	Configuration électronique	Électrons par couche	Point de fusion	Date de découverte
P	7723-14-0	30,973762	15	[Ne] 3s <sup>2</sup> 3p <sup>3</sup>	2, 8, 5	44,1 °C	1669

### III.2.2. Le Bore (B)

Le bore est un constituant naturel de certaines roches, il se retrouve en abondance dans les océans. Cet élément chimique a été découvert par Humphry Davy , Louis Jacques Thénard et Joseph Louis Gay-Lussac. Il existe toujours en combinaison avec l'oxygène dans la nature sous la forme d'acide borique (H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>) ou de ses sels, les borates [40].



*Figure III.2. Le bore.*

**Tableau III.2. Description du Bore**

Symbole	Numéro CAS	Masse atomique	Numéro atomique	Configuration électronique	Électrons par couche	Point de fusion	Date de découverte
B	7440-42-8	10,811 u	5	[He] 2s <sup>2</sup> 2p <sup>1</sup>	2,3	2 076 °C	1808

### III.3. Préparation et nettoyage des plaques de multi-silicium type P

Les wafers en silicium multicristallin sont généralement de forme carrée, sont découpés en disquettes circulaires avec un « LASER 301 PV » afin de les adapter à la forme de la source solide du phosphore et encore pour faciliter leurs introductions dans le tube à quartz du four de diffusion « TEMPRESS omega junior 3 ».

Le nettoyage des plaques de silicium se fait avec précaution dans une hotte chimique ventilée en portant des équipements de protection appropriés (gants, lunettes de protection, masque, stoppe bruits et blouse).

## **Chapitre III : Partie expérimentale & Résultats et discussions**

---

La procédure vise à éliminer efficacement les contaminants (particules, liaisons pendantes, poussière, graisse,...) de la surface du silicium tout en préservant l'intégrité et la pureté du matériau afin d'avoir un dépôt de bonne qualité sans engendrer le décollement des couches déposées.

Les étapes de nettoyage sont les suivantes :

### **III.3.1. Dégraissage**

Consiste à éliminer les résidus et les contaminants organiques sur les surfaces, en émergeant les plaques dans du trichloréthylène ( $C_2H_3Cl_3$ ) pendant 5 minutes à une température de  $25^\circ$ , puis on rince et on sèche avec un jet d'azote ( $N_2$ ). Ensuite de la même manière on utilise l'Acétone ( $CH_3COCH_3$ ) pendant 5 minutes suivie de rinçage et de séchage. Certain protocole utilise le PIRANHA (produits dangereux) pour l'élimination des résidus organique rapidement.

### **III.3.2. Désoxydation**

C'est l'élimination des oxydes de silicium natifs ( $SiO_2$ ) d'une épaisseur de 2 à 3 nm qui se forme naturellement sur la surface du silicium exposé à l'Air par interaction avec l'oxygène ou l'humidité. Cette étape est réalisée en submergeant les plaques de silicium dans l'acide fluorhydrique (HF) 10% pendant 15 ou 18 minutes puis on procède au rinçage abondant d'une manière excessive avec de l'eau dés-ionisée pour éliminer les résidus et ensuite vient le séchage des plaques avec un jet d'azote ( $N_2$ ) à grande pression.

### **III.3.3. Amincissement**

L'aminçissement consiste à décaper la surface des plaques de silicium de quelques dizaines de micromètre ( $\mu m$ ) par l'attaque chimique en utilisant une solution basique exotherme (NaOH) 30% obtenue en mélangeant 800g de grain d'Hydroxyde de sodium dans 2 litres d'eau ultra pur chauffé à une température de  $86^\circ C$  pendant 20 à 40 minutes pour le mono-Si et pendant 8 à 12 minutes pour le multi-Si. La solution NaOH réduit l'épaisseur des plaques en moyenne de  $5 \mu m$  chaque minute. Un thermocouple a servi de détecteur de température et un palmer pour la mesure de l'épaisseur(e) des plaques avant et après l'attaque chimique. La mesure initiale de l'épaisseur est  $e_1=404 \mu m$ . Après 20 minutes, on a obtenu une épaisseur  $e_2=362 \mu m$ , puis on a rincé avec de l'eau dés-ionisée (EDI) et séché avec un jet de gaz d'Azote avec une grande pression, ensuite on a trempé les plaques dans l'acide chlorhydrique (HCl) 50% pendant 10 minutes afin d'éliminer les ions  $Na^+$  pour obtenir 100% de silicium pur neutralisé

## Chapitre III : Partie expérimentale & Résultats et discussions

(neutralisation de la Base avec de l'acide), ensuite on utilise le spin-dreyer (PSC 108) pour le rinçage et le séchage automatique des plaquettes d'une manière optimale. Cette étape permet de rendre les wafers en silicium très propre, polis, homogènes et hydrophobes avec un aspect brillant prêts pour d'autres procédés.

### III.4. Quelques équipements utilisés pour la fabrication des cellules solaires (Figures III.3)

-Une station de chimie lourde pour la préparation des plaquettes de silicium (image « **III.3.a** »).

-Un four à 3 étages de diffusion à pression atmosphérique de marque américaine TEMPRESS OMEGA JUNIOR 3 (image « **III.3.b** »).

-Un four à 4 étages de diffusion à basse pression (Lydop) de marque française SEMCO Engineering (image « **III.3.c** »).

- Plasma etcher : un équipement de décapage des bords des plaquettes de silicium par plasma (image « **III.3.d** »).

-Un four de recuit de type RTP (recuit rapide) (image « **III.3.e** »).

-Les équipements de caractérisation (illustrés en chapitre II), Résistivimètre (image « **III.3.f** »).



(a)

(b)

(c)



(d)

(e)

(f)

*Figures III.3. Quelques équipements utilisés pour la fabrication des cellules (CRTSE).*

### **III.5. Etapes suivies dans la salle blanche pour la diffusion du phosphore sur du silicium multi-cristallin type p (P-Si-mc)**

A l'intérieur de la salle blanche du centre de recherche (CRTSE), plusieurs équipements sont mis en service pour la recherche dans le domaine du photovoltaïque. Parmi ces derniers, on trouve le four TEMPRESS OMEGA JUNIOR 3 fonctionnant à pression atmosphérique qui servirait aux traitements thermiques contrôlés. Ce four est constitué principalement de trois étages, un étage pour l'oxydation, le deuxième pour le recuit et le troisième pour la diffusion du BORE (BBR3) via une source liquide.

Voici les différents compartiments du four utilisé pour la diffusion du phosphore dans le silicium multi-cristallin de type p (**Figure III.4**).



(a)

(b)

(c)

**Figure III.4.** Les compartiments du four TEMPRESS Omega Junior 3 (CRTSE) ; (a) les trois étages du four TEMPRESS, (b) le tableau de commande du four TEMPRESS, (c) l'entrée du tube à quartz.

Le processus de diffusion du phosphore se déroule dans un tube en quartz à pression atmosphérique en deux étapes ; pré-dépôt et drive-in. La montée en température (Ramp-up) est estimée à 15°C chaque minute et la descente en température (Ramp-down) est estimée à 12°C chaque minute.

### III.5.1. Etape pré-dépôt

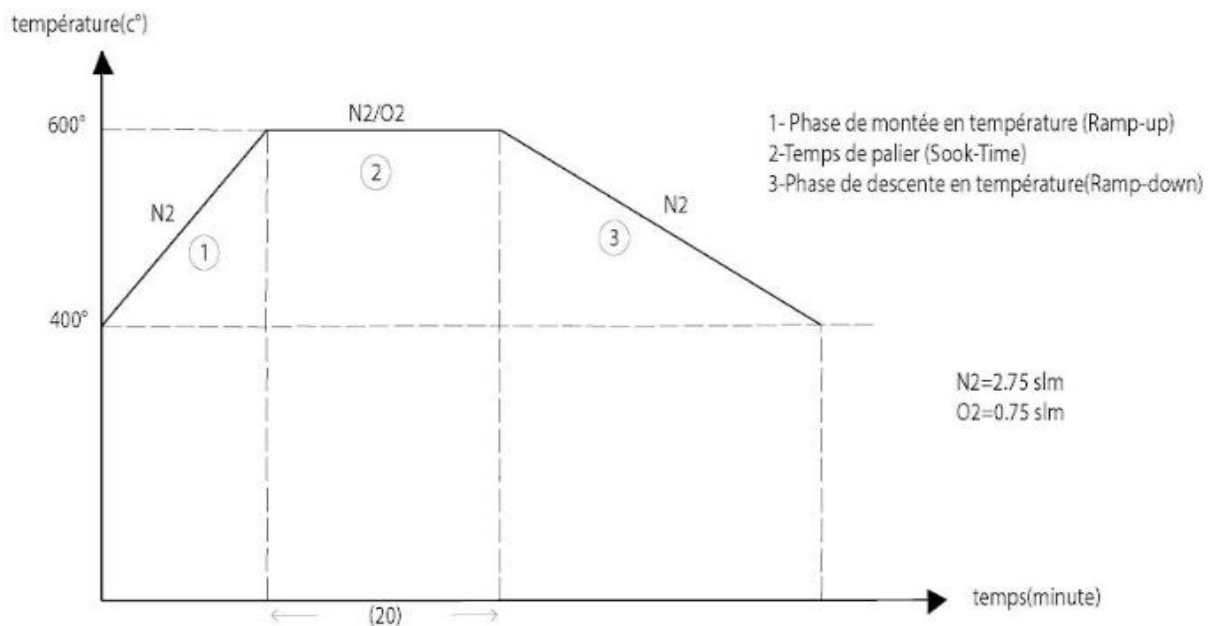
Cette étape permet le contrôle de la dose du dopant (phosphore) à introduire sur la face avant de la cellule solaire à réaliser, avec le choix des températures et durées de pré-dépôt selon le (Tableau III.3). Le four est préchauffé au préalable à 400°C. Ensuite, on a placé les échantillons à l'intérieur du four à pression atmosphérique (760 mmHg=10 mbar) accompagné d'un flux de gaz d'Oxygène (O<sub>2</sub>) à un débit de 0,75 SLM (Standart Liters per Minute) qui rentre dans la réaction du pré-dépôt pour la formation du trioxyde de phosphore (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) avec l'Azote (N<sub>2</sub>) qui est un gaz inerte à un débit de 2,75 SLM qui servira pour le nettoyage permanent du tube à quartz et des échantillons. Et quand les températures atteignent soit 600°C, 700°C, 750°C ou 800°C, le pré-dépôt peut se réaliser pendant 10 minutes, 15 minutes ou 20 minutes puis on laisse le four se refroidir progressivement pendant au moins une heure (1h) de temps jusqu'à ce que la température atteint 400°C pour retirer la nacelle qui porte les échantillons très chauds du

## Chapitre III : Partie expérimentale & Résultats et discussions

four avec précaution en utilisant des gants de protection (isolateurs thermiques), un récipient cylindrique et un bâtonné en verres [41].

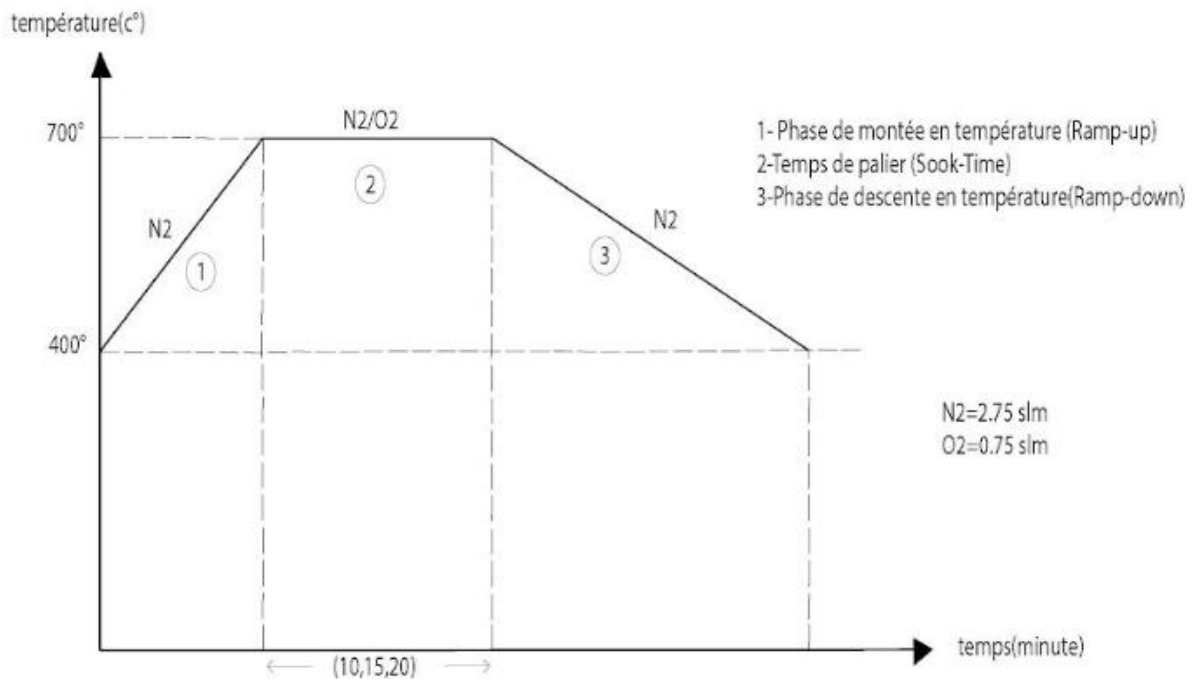
**Tableau III. 3.** Les différentes séries (recettes) choisies pour prés-dépôt et drive-in (T/ t)

Prés-dépôt (Température-temps)	Drive-in (Température-temps)
Echantillon 1 : 700°C / 20 min	900°C / 30 min
Echantillon 2 : 750°C/ 20 min	
Echantillon 3 : 600°C / 20 min	
Echantillon 4 : 800°C/ 10 min	900°C / 20 min
Echantillon 5 : 750°C / 10 min	
Echantillon 6 : 700°C / 10 min	
Echantillon 7 : 800°C/ 15 min	900°C / 20 min
Echantillon 8 : 700°C /15 min	
Echantillon 9 : 750°C/15 min	

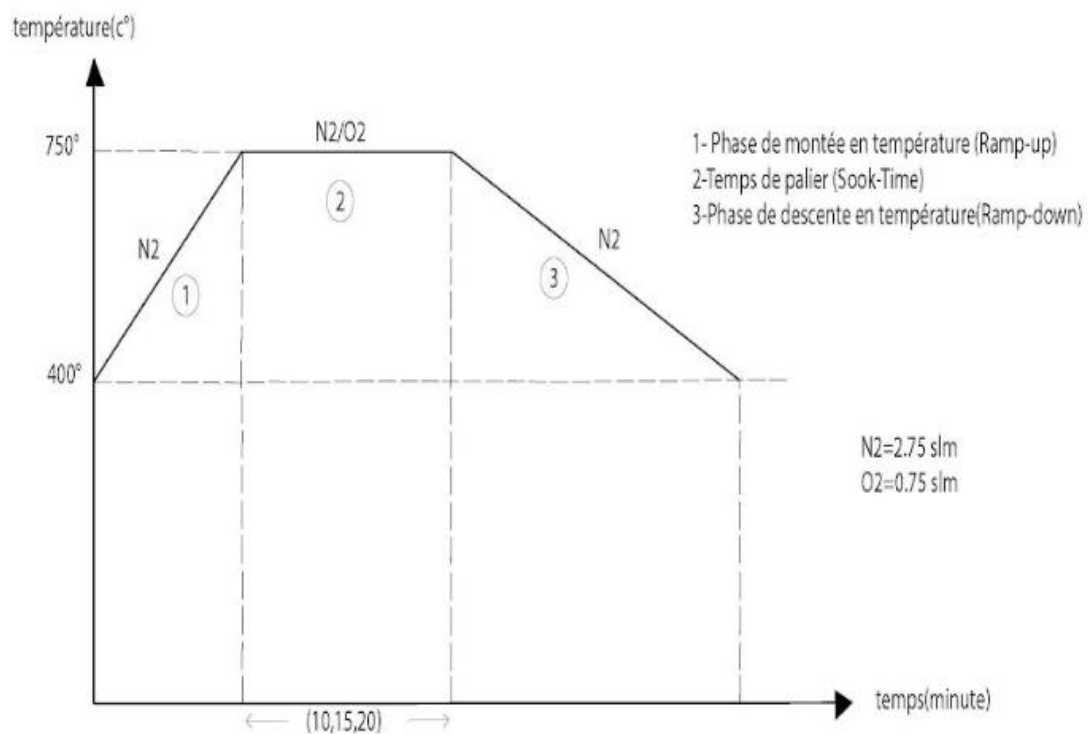


**Figure III.5.** Prés-dépôt (600°C-20min).

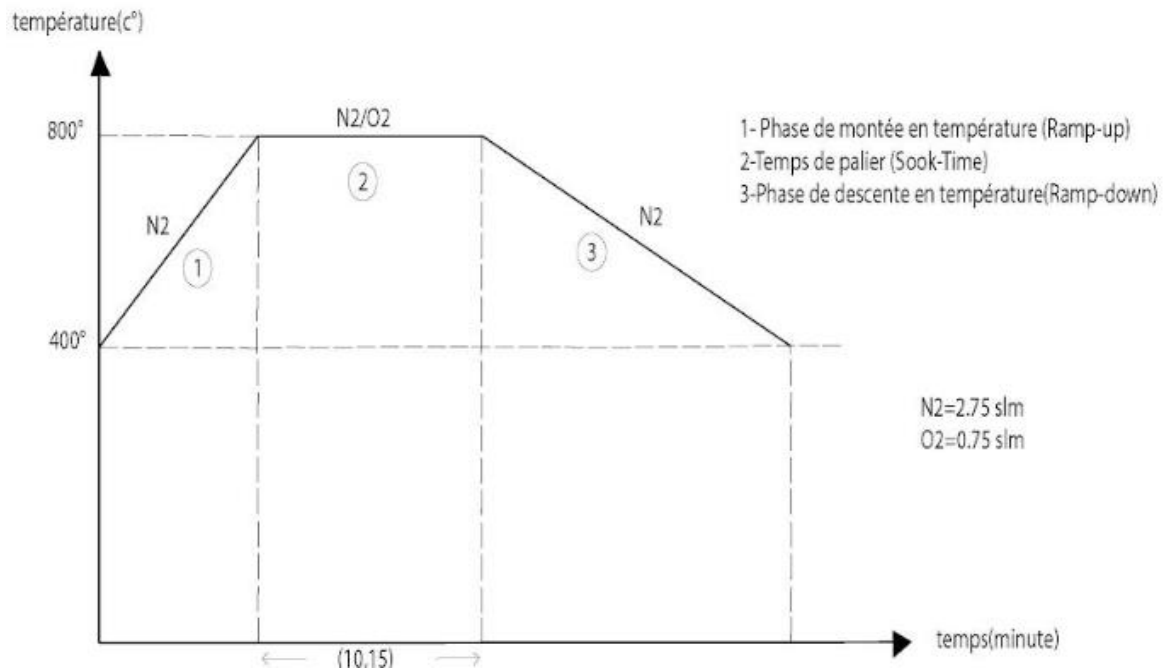
## Chapitre III : Partie expérimentale & Résultats et discussions



**Figure III.6.** Prés-dépôt (700°C-10, 15 et 20min).



**Figure III.7.** Prés-dépôt (750°C-10, 15 et 20min).



**Figure III.8.** Prés-dépôt (800°C-10, 15 min).

### III.5.1.1 La formation de couches PSG

L'étape de prés-dépôt engendre la formation des couches PSG (**Phosphorous Silicate Glass**) appelées verre phosphosilicaté. Ces dernières sont principalement composées de silice (dioxyde de silicium,  $\text{SiO}_2$ ) et de phosphore (P), avec d'autres éléments présents en petites quantités tels que le bore (B), l'hydrogène (H), le carbone (C) et l'azote (N). Les couches PSG sont généralement déposées sur des substrats de silicium par des techniques de dépôts chimiques en phase vapeur (CVD) ou par des techniques de dépôts physiques. Ces couches contiennent une concentration relativement élevée de phosphore, généralement ajouté sous forme de gaz phosphoreux ( $\text{PH}_3$ ) mélangé avec des précurseurs de silicium lors du dépôt pour former un verre dopé au phosphore. Le rôle de chaque constituant des couches PSG sont décrits comme suit :

-La silice ( $\text{SiO}_2$ ) : La silice est le principal constituant des couches PSG, elle fournit la structure de base du verre.

-Le phosphore (P) : le phosphore est introduit sous forme de gaz phosphoreux ( $\text{PH}_3$ ), il est ajouté à la silice pour former le verre phosphosilicaté. La présence du phosphore modifie les propriétés électriques du verre (conductivité électrique).

## **Chapitre III : Partie expérimentale & Résultats et discussions**

---

-Oxygène ( $O_2$ ) : l'oxygène est un élément important pour la formation des couches PSG, formant des liaisons avec le silicium et le phosphore.

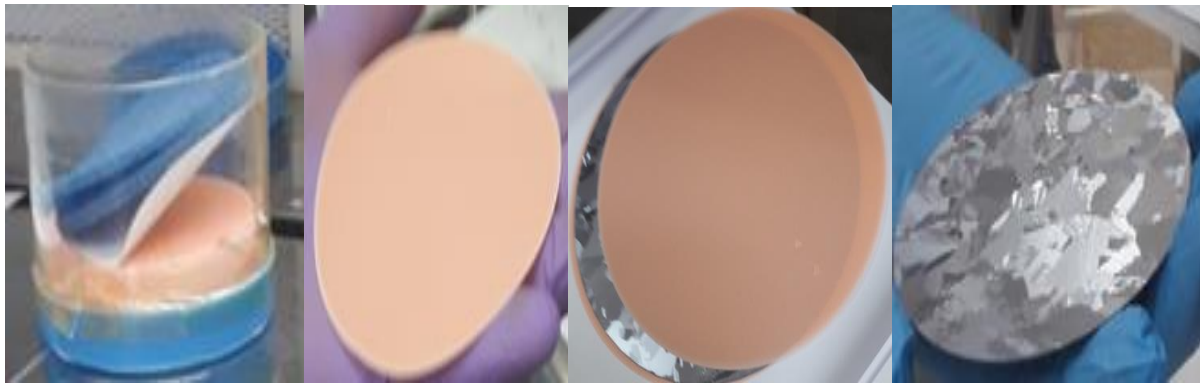
-L'hydrogène (H), l'azote (N), le carbone (C) et le bore (B) : sont des éléments qui peuvent se trouver en petite quantité dans les PSG, en fonction des processus de fabrication [42].

### **III.5.1.2 Les différentes images prises pendant les prés-dépôts**

Ces images sont illustrées en figures suivantes (**Figure III.9 à III.15**) :



*Figure III.9. L'espace de travail (CRTSE).*



(a)

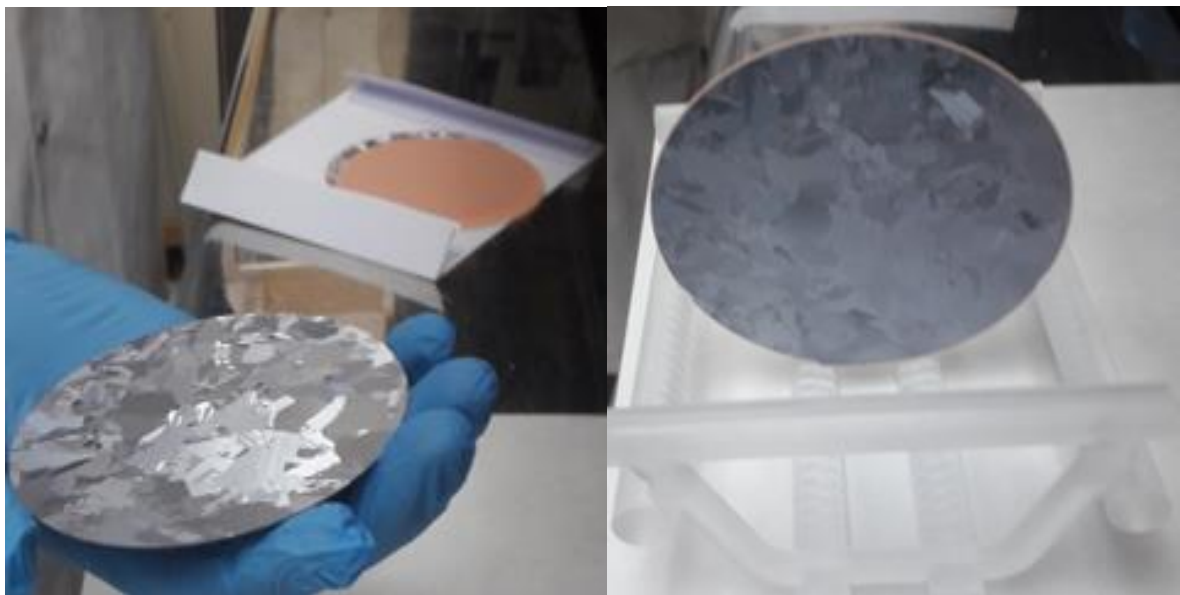
(b)

(c)

(d)

*Figures III.10. Préparation des wafers pour le prés-dépôt (CRTSE) ; (a,b) Phosphore sous une forme solide, (c) Empilement des feuilles de phosphore entre les plaques de multi-Si, (d) Plaques de multisilicium bien nettoyées.*

Le positionnement des échantillons sur la nacelle peut être horizontal pour quelques plaques de forme carrée, mais l'emplacement vertical est destiné à plusieurs wafers de forme circulaire pour les introduire facilement dans le tube du four.



*Figures III .11. La mise en sandwich d'une source solide de phosphore entre deux plaques de multi-silicium (CRTSE).*



*Figure III.12. Les échantillons à l'entrée du four TEMPRESS (CRTSE).*



**(a)**

**(b)**

*Figures III.13. Les échantillons à la sortie du four ; (a) Les plaques post prés-dépôt placées sur la nacelle, (b) Séparation des deux plaques.*



(a)

(b)

*Figures III.14. Résultat du prés-dépôt ; (a) Formation d'une couche PSG, (b) Un échantillon destiné pour l'étape drive-in.*



(a)

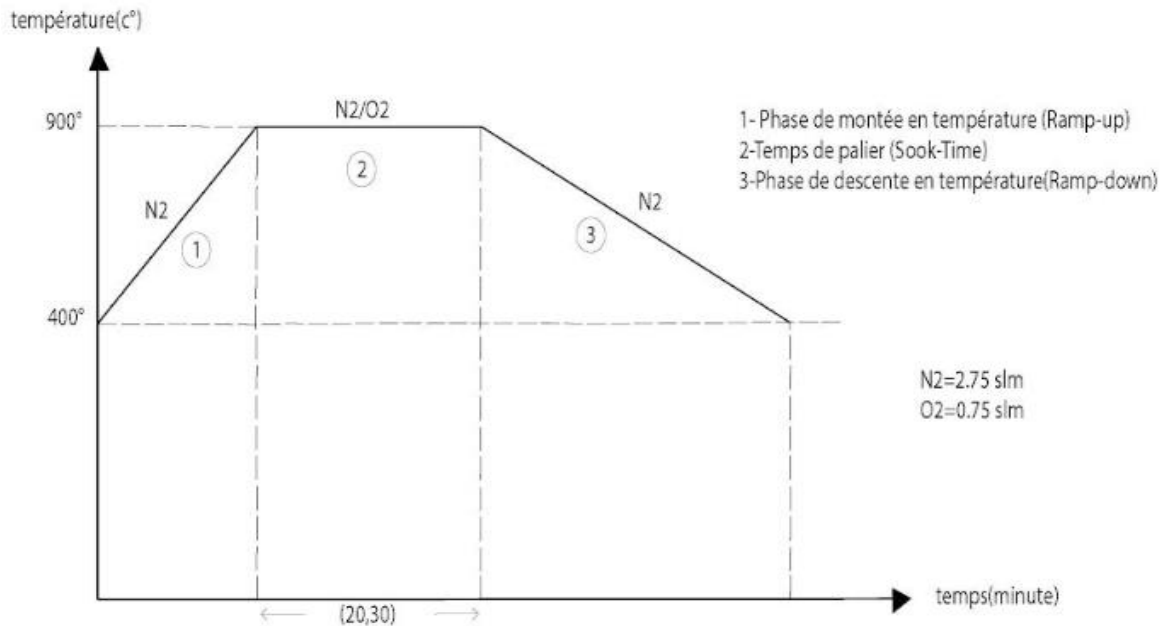
(b)

(c)

*Figures III.15. Les outils utilisés (CRTSE); (a) La nacelle, (b) Une pince de manipulation, (c) Une tige et un cylindre en verre.*

### III.5.2. Etape drive-in

C'est dans cette étape que les éléments dopants (atomes du phosphore) de la couche PSG sont pénétrés en profondeur dans la substance sans introduire d'autres atomes de phosphore, en faisant varier la durée de diffusion de 20 à 30 minutes pour une température de 900°C.



**Figure III.16.** Drive-in (900°C-20, 30min).

### III.5.2.1. Réalisation des champs de surface avant ou FSF (Front Surface Field)

Dans le but d'augmenter l'efficacité de la cellule photovoltaïque, on opte à utiliser la technique FSF pour former la jonction n<sup>+</sup>n qui permet de réduire les pertes de recombinaison à la surface de la cellule solaire. Les principales étapes de réalisation des FSF dans le processus de fabrication des cellules solaires sont :

-Nettoyage de la surface soigneusement pour éliminer toutes impuretés ou contaminants qui pourraient affecter les performances du dispositif. Cette étape englobe le dégraissage, la désoxydation et l'amincissement.

-Dépôt de dopants de type N (n-dopée), consiste l'ajout des éléments chimiques en focalisant une source solide de phosphore sur la surface avant du wafer.

- Diffusion thermique, en chauffant les dopants déposés sur la surface du wafer en silicium à des températures élevées allant de 750° jusqu'à 950°C dans un four pour qu'ils pénètrent dans le matériau en profondeur. Une fois la couche FSF (champ de surface avant ou Front Surface Field en anglais) est formée, un traitement thermique est nécessaire pour assurer sa stabilité à long terme. Cette dernière donne un émetteur de bonne qualité agissant comme une barrière pour empêcher les porteurs de charge de se recombiner à la surface, ce qui augmente et

## Chapitre III : Partie expérimentale & Résultats et discussions

maximise la conversion de la lumière solaire en électricité et augmente l'efficacité globale de la cellule.

### III.5.2.2. Recuit rapide (RTP)

C'est un traitement thermique qui vient après la diffusion. Il est réalisé à une température d'environ 200°C dans un four de recuit rapide (RTP) pendant une durée allant de 30 secondes à 2 minutes, ce type de traitement présente comme avantages [43] :

- La réparation des défauts cristallins.
- L'activation du dopage.
- Régularisation de la surface.
- L'augmentation (prolongation) de la durée de vie.
- La stabilité à long terme du composant

### III.6. Résultats des caractérisations et interprétations

Le choix des techniques de caractérisation repose sur l'objectif rechercher et la disponibilité du matériel nécessaire, les séries d'échantillons représentées dans le (Tableau III.3) peuvent être soumises à une multitude de techniques analyses pour extraire plus d'informations et précisions sur la qualité du dopage. Le (Tableau III.4) illustre les caractéristiques électriques et les dimensions des plaquettes utilisées.

**Tableau III.4.** Les paramètres des plaquettes Si-mc-P.

Type de plaquettes	Dimension (cm <sup>2</sup> )	Épaisseur (cm)	R <sub>□</sub> (ohm)	Résistivité (ohm.cm)
Si-mc-P	10*10	0,0348	38,3	1 à 3

#### III.6.1. Caractérisation des couches PSG obtenue après les prés-dépôts par la résistance carrée

Ces résistances sont classées dans le (Tableau III.5) suivant :

**Tableau III.5.** Les résistances de la couche PSG.

Les échantillons	prés-dépôts (PSG)	Résistances (ohm)
Echantillon 1	PD1 (700°C-20min)	166,9 ; 144,1
Echantillon 2	PD2 (750°C-20min)	120,5 ; 148,4
Echantillon 3	PD3 (600°C-20min)	119,57 ; 114,87
Echantillon 4	PD4 (800°C-10min)	121,35 ; 115,70
Echantillon 5	PD5 (750°C-10min)	140,3 ; 101,72
Echantillon 6	PD6 (700°C-10min)	150,32 ; 167,1
Echantillon 7	PD7 (800°C-15min)	105,32 ; 128,62
Echantillon 8	PD8 (700°C-15min)	121,2 ; 159,7
Echantillon 9	PD9 (750°C-15min)	151 ; 103,7

Les résultats précédents montrent que les résistances de la couche vitreuse (PSG) sont élevées, cela est dû à l'oxyde formé sur la surface des plaques de silicium qui se comporte comme un isolant. L'échantillon 1, PD1 (700°C-20min) donne la plus grande résistance de tôle et l'échantillon 7, PD7 (800°C-15min) donne la plus petite résistance de tôle.

### III.6.2. Caractérisation des couches PSG obtenue après les prés-dépôt par FTIR

Dans cette pratique, la technique de caractérisation infrarouge à transformée de fourrier (FTIR) est utilisée pour l'identification des liaisons chimiques existantes entre le phosphore qu'on a déposé sur le si-mc type P avec les autres éléments constituant la couche PSG (Si, O, H, C, .....). L'interprétation des spectres se réfère au (**Tableau III.6**) qui indique les plages d'absorption du spectre IR par le phosphore, voir la présence des pics d'absorption dans les

## Chapitre III : Partie expérimentale & Résultats et discussions

spectres en (Figure III.18) La mise en place de l'échantillon dans le dispositif FTIR est en (Figure III.17).

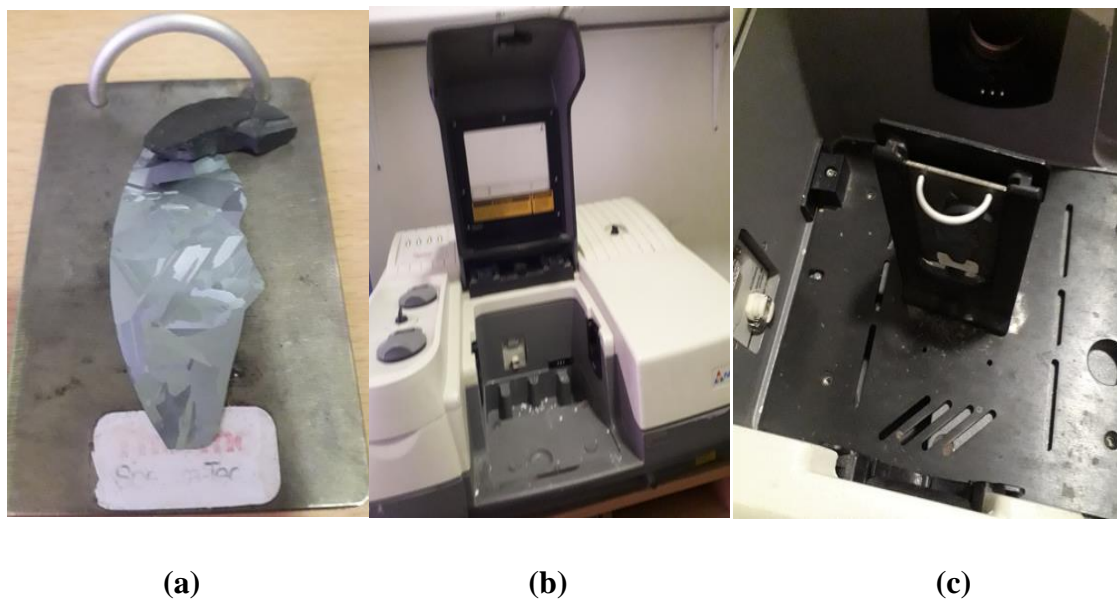
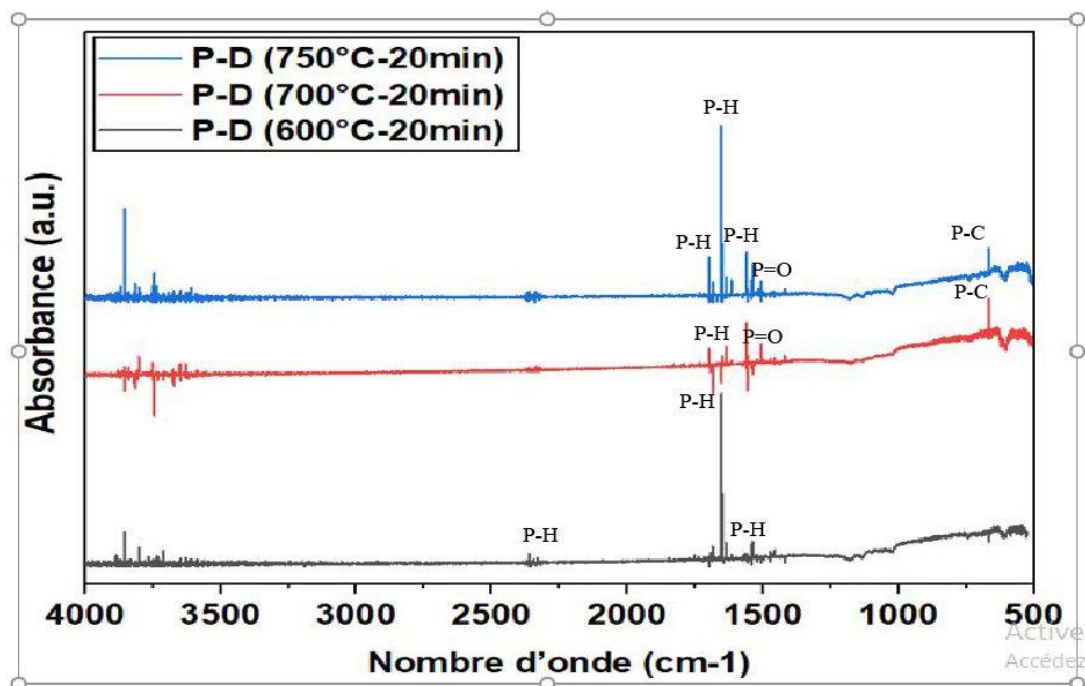


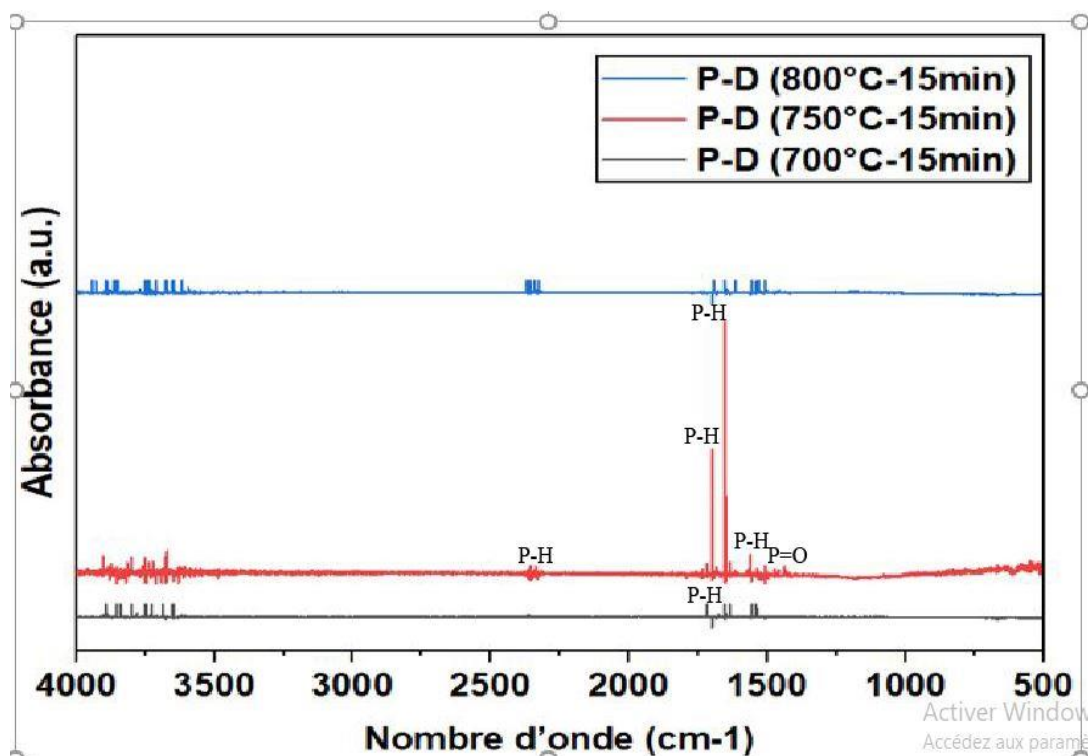
Figure III.17. Emplacement d'échantillon dans le FTIR « Thermo Nicolet NEXUS 670 » (CRTSE) ; (a) Le porte échantillon, (b,c) La cavité de l'FTIR.

Tableau III. 6. Les liaisons organiques et inorganiques du phosphore dans la couche PSG.

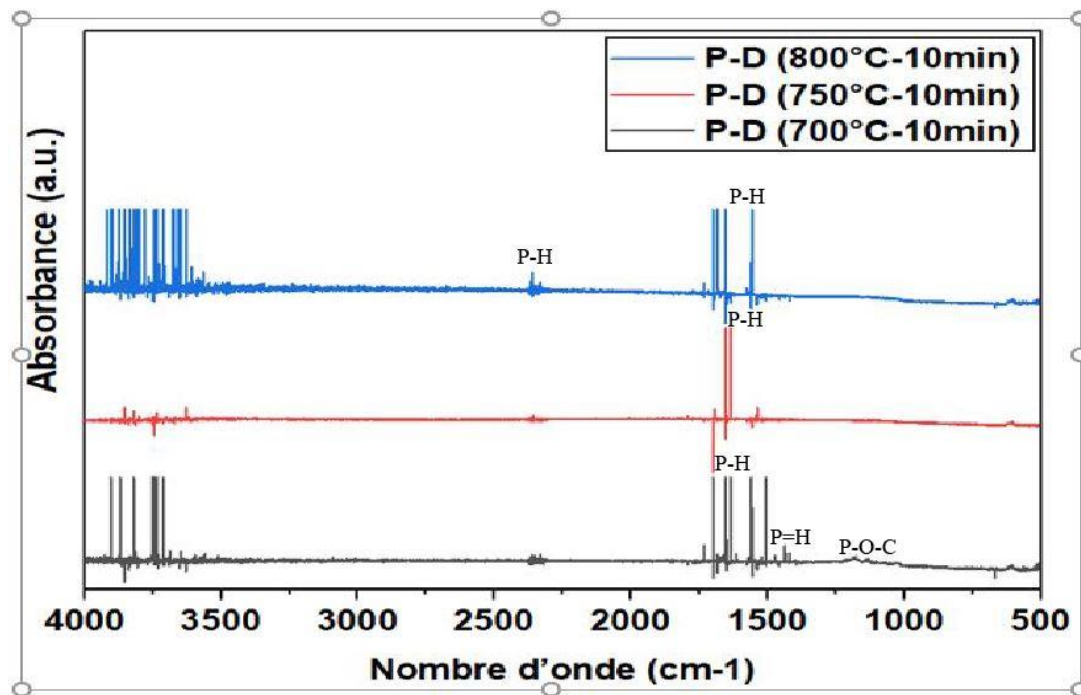
Liaisons organiques	Liaisons inorganiques
P-O-R : 870/1110 $\text{cm}^{-1}$	P-H : 2280/2410 $\text{cm}^{-1}$
P-O-C : 950/1050 $\text{cm}^{-1}$	P-H : 1040/1100 $\text{cm}^{-1}$
	P-C : 650/700 $\text{cm}^{-1}$
	P-O-C : 1190/1240 $\text{cm}^{-1}$
	P=O : 1255/1285 $\text{cm}^{-1}$
	P=O : 1500/1455 $\text{cm}^{-1}$
	P=O : 870/900 $\text{cm}^{-1}$



(a)



(b)



(c)

**Figure III.18.** Les spectres de la couche PSG obtenus par la FTIR ; (a) PD1,PD2,PD3 20 min, (b) PD4,PD5,PD6 15 min, (c) PD7,PD8,PD9 10 min.

L'analyse par FTIR des échantillons montre la présence des liens phosphoreux organiques et minéraux dans la couche formée, quand les échantillons sont traités à des températures élevée de 600°C à 800°C.

### III.6.3. Les résultats des caractérisations et leurs interprétations obtenues après drive-in et décapage de la couche PSG à température de 23°C

Avant la caractérisation des plaques ayant subies la diffusion (drive-in), on a procédé d'abord au décapage de la couche PSG situées en surfaces des plaques de si-mc avec une solution chimique à base de HF 10% pendant 3 minutes, puis laver, rincer avec de l'eau dés-ionisé (EDI) et sécher avec de l'Azote. L'épaisseur de la couche PSG décapée est de l'ordre de 60 nanomètres (nm). La (Figure III.19) montre le déroulement du décapage.



(a)

(b)

*Figure III.19. Décapage de la couche PSG avec HF10% après drive-in ; (a) Une série de plaques ayant subies la diffusion, (b) Les plaques de silicium émergées dans la solution HF10%.*

### III.6.3.1. La pointe chaude

Cette méthode de caractérisation montre le type de dopage réalisé, et cela à travers la LED allumée pour type N ; voir les illustrations de la (Figure III.20).



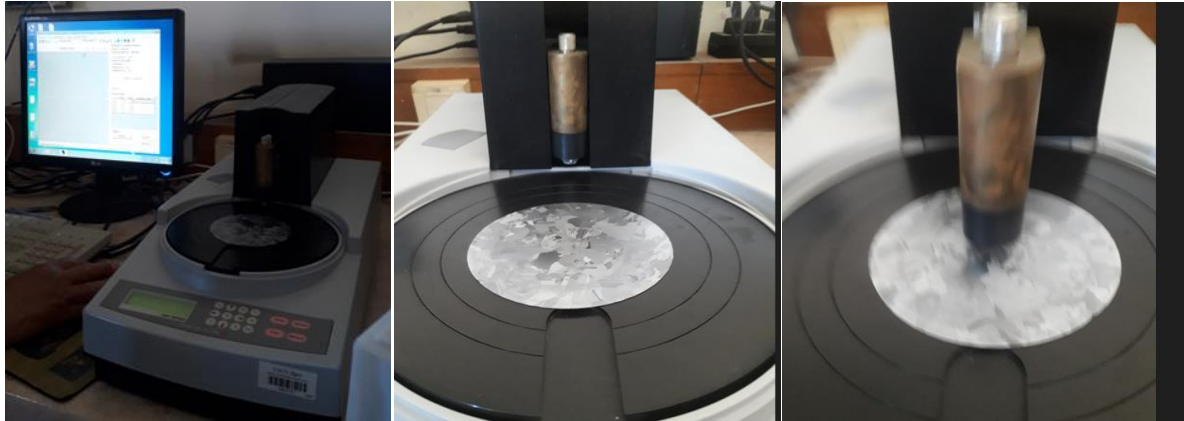
(a)

(b)

*Figure III.20. Application de la pointe chaude sur la face de l'échantillon dopé N ; (a) Positionnement des pointes (chaude et froide) sur la surface, (b) La LED allumée coté N.*

### III.6.3.2. Les quatre pointes

Dans cette technique on a utilisé le mapping, qui consiste en l'injection d'un courant électrique constant de l'ordre de  $20 \mu\text{A}$  en plusieurs points sur la face des plaquettes de silicium à caractériser, voir les images de la (**Figure III.21**).



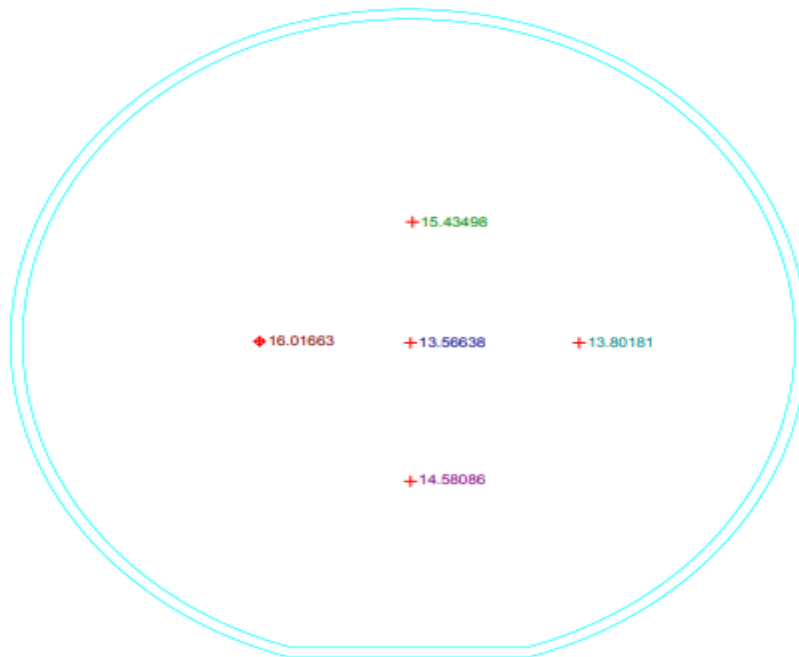
*Figure III.21. (Mapping), injection d'un courant électrique sur les plaques de silicium en plusieurs points après drive-in avec les 4 pointes ( $R_{\square}$ ).*

Les images des différents points choisis pour le mapping et les résultats des caractérisations par  $R_{\square}$  sont données automatiquement par le **résistivimètre « CMT-series-SR-2000 N »**.

Donnant comme exemple la configuration donnée par l'appareil pour l'échantillon 1 (**Figure III.22.**).

### Data Map (Inside)

1. Lot ID : None  
2. Data File : None  
3. Sample Size (mm) - Sample : 200 Flat : 60 Exclusion : 3  
4. Thickness (um) : 0  
5. Sample Material : Unknown  
6. Mat. Resistivity (ohm.cm) : 0.00E+00  
7. Correction F : 4.532  
8. Probe Space (mm) : 1  
9. TCoefficient : 0  
10. TMeasure (°C) : 23  
11. TReference (°C) : 23  
12. MMode : None  
13. Date : 4/22/2006 Time : 12:34:52 AM  
14. Op ID : aitco  
15. Analysis [ ohm/sq ] : 3 Sigma=Max : 15.93552 Min : 13.42474  
1) Max : 15.43498 2) Min : 13.56638 3) Ave : 14.34601  
4) StDev : 0.73229 5) Uni (%) : 6.51261 6) Max-Min(Range) : 1.86860  
/ Ave (%) : 5.10448  
16. Description :



*Figure III.22. Le mapping de l'échantillon 1 : pré-dépôt, 700°C-20 min /Drive-in, 900°C-30min.*

## Chapitre III : Partie expérimentale & Résultats et discussions

Les résultats des 9 échantillons sont résumés dans le tableau ci-dessous (**Tableau III.6**) :

**Tableau III.6.** Comparaison des résultats des différentes recettes.

Recettes	$R_{\square}(\Omega/\square)$ moy	$\rho(\Omega\text{cm})$	$\sigma(\Omega\text{cm})^{-1}$	Uni%
<b>Echantillon1:</b> 700°C-20/900°C-30	14,34601	0,49924	2,003	6,51261
<b>Echantillon2:</b> 750°C-20/900°C-30	11,33645	0,3945	2,86533	3,42885
<b>Echantillon3:</b> 600°C-20/900°C-30	11,85139	0,41249	2,4243	15,55469
<b>Echantillon4:</b> 800°C-10/900°C-20	5,29473	0,18425	5,4274	6,36265
<b>Echantillon5:</b> 750°C-10/900°C-20	5,7821825	0,201	4,975	13,23116
<b>Echantillon6:</b> 700°C-10/900°C-20	5,39340	0,1876	5,33	10,80314
<b>Echantillon7:</b> 800°C-15/900°C-20	5,74898	0,2	5	3,92470
<b>Echantillon8:</b> 700°C-15 /900°C-20	14,89097	0,518	1,9305	89,90739
<b>Echantillon9:</b> 750°C-15/900°C-20	6,24061	0,217	4,608	21,47129

### Interprétation des résultats

-  $R_{\square}$  ( $\Omega/\square$ ) : c'est la résistance carrée moyenne qui est la somme des résistances mesurées divisée par le nombre de résistances obtenues aux différents points.

- l'uniformité :  $Uni\% = (R_{max} - R_{min} / 2 * R_{moy}) * \%$ .

- la résistivité :  $\rho = R_{\square} * e$  en  $ohm * cm$ , avec l'épaisseur  $e = 348 \mu m$ .

- la conductivité :  $\sigma = 1 / \rho$  en ( $\Omega cm^{-1}$ ), siemens.

A partir des résultats résumés dans le tableau précédant, on distingue deux résultats satisfaisants :

- Echantillon 4:  $800^{\circ}C-10/900^{\circ}C-20$  qui a donné la conductivité la plus élevée  $\sigma = 5,4274 (\Omega cm)^{-1}$ , l'uniformité = 6,36265% (proche de 5%),  $R_{\square} = 5,29473 (\Omega/\square)$  et la résistivité  $\rho = 0,18425 (\Omega cm)$  la plus faible.

- Echantillon 7 :  $800^{\circ}C-15/900^{\circ}C-20$  a donné la meilleure uniformité = 3,92470% (<5%),  $R_{\square} = 5,74898 (\Omega/\square)$  et la résistivité  $\rho = 0,18425 (\Omega cm)$  avec une conductivité  $\sigma = 5 (\Omega cm)^{-1}$  assez importante.

La diminution de la résistivité et de la résistance carrée par rapport à celles de la PSG confirme la pénétration du phosphore en profondeur et la formation de la jonction  $n^+n$ .

### III.6.3.3. Effet Hall

#### III.6.3.3.1 Préparation des échantillons

Pour opter à la caractérisation par Effet Hall, on fixe les échantillons en quatre positions de la surface avec de l'étain mélangé avec de l'indium et du galium sur le porte échantillon d'une manière à assurer une bonne conduction avec les 4 pistes en aluminium et aussi pour éviter la corrosion, comme il est montré sur (a) et (b) de la (**Figure III.25**) suivante :



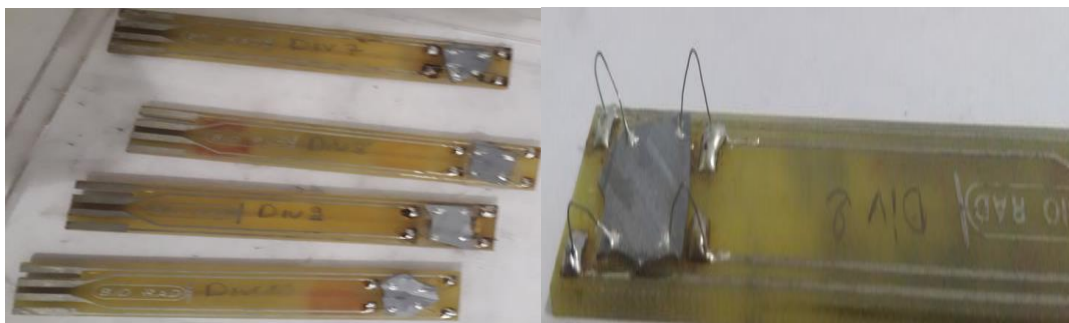
*Figures III.23. Appareillage Effet Hall (HL5900) « la cage de faraday ouverte » (CRTSE).*



(a)

(b)

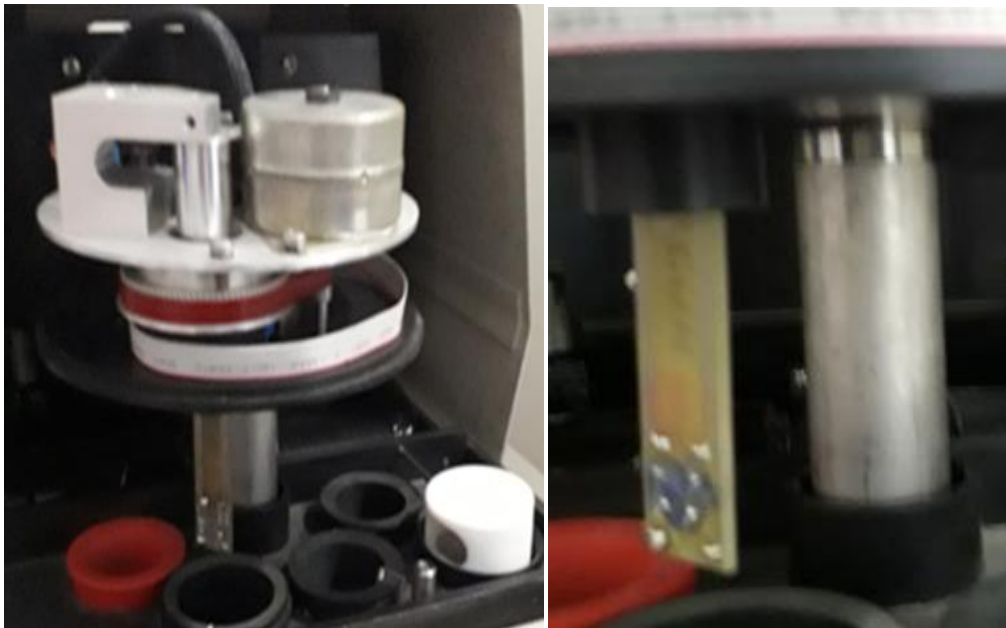
*Figures III.24. Les produits utilisés pour la fixation des échantillons ; (a) Indium Gallium, (b) Mélange Indium Gallium/Étain.*



(a)

(b)

*Figures III.25. Fixation des échantillons ; (a) Les portes échantillons, (b) Echantillon fixé.*



*Figures III.26. Introduction de l'échantillon dans le carousel de Hall.*

### III.6.3.3.2. Résultats et interprétation (Effet Hall)

La caractérisation par Effet Hall a permis de donner la résistivité électrique, la mobilité des porteurs de charges et leurs concentrations en surface et en profondeur (**Tableau III.7**). Les résultats s'affichent automatiquement sur l'écran de l'ordinateur relié au profiler Hall (HL5900), le champ magnétique est  $B=0,320$  Tesla, la tension  $V_r=20$  mv, le courant injecté ( $I$ ) est de 10 ou 20  $\mu A$  et la température  $T=23^\circ C$ .

Les résultats sont affichés tel que la figure suivante (**Figure.III.27**) pour chaque échantillon :

## Chapitre III : Partie expérimentale & Résultats et discussions

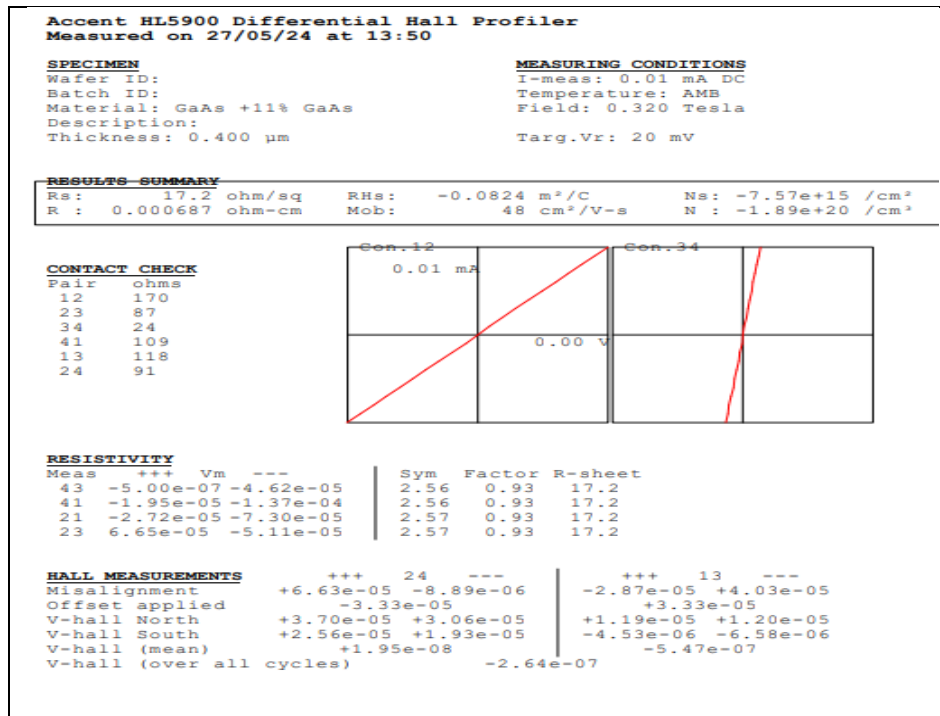


Figure III.27. Le résultat de l'échantillon 1 (700°C-20/900°C-30).

Pour le reste des échantillons les résultats sont résumé dans le tableau si dessous :

Tableau III.7. Les paramètres des échantillons (échantillon 1 à 9) par Effet Hall.

Echantillons	Rs (ohm/sq)	$\rho$ (ohm cm)	RH (m²/cs)	$\mu$ (cm²/vs)	Ns (cm <sup>-2</sup> )	N (cm <sup>-3</sup> )
<b>Echantillon 1 :</b> <b>700°C-</b> <b>20/900°C-30</b>	17,2	0,000687	-0,0824	48	7,57*10 <sup>15</sup>	1,89*10 <sup>20</sup>
<b>Echantillon 2 :</b> <b>750°C-</b> <b>20/900°C-30</b>	11.3	0.000452	-0.124	110	5.03*10 <sup>15</sup>	1.26*10 <sup>20</sup>
<b>Echantillon 3 :</b> <b>600°C-</b> <b>20/900°C-30</b>	11.7	0.00047	-0.029	24.7	2.15*10 <sup>15</sup>	5.38*10 <sup>20</sup>
<b>Echantillon 4 :</b> <b>800°C-</b> <b>10/900°C-20</b>	5.48	0.000219	-0.00183	3.34	3.41*10 <sup>15</sup>	8.52*10 <sup>20</sup>

### Chapitre III : Partie expérimentale & Résultats et discussions

<b>Echantillon 5 :</b> <b>750°C-</b> <b>10/900°C-20</b>	6.16	0.000246	-0.0854	139	$7.30 \cdot 10^{15}$	$1.83 \cdot 10^{20}$
<b>Echantillon 6 :</b> <b>700°C-</b> <b>10/900°C-20</b>	5.94	0.000238	-0.0277	46.6	$2,26 \cdot 10^{16}$	$5,64 \cdot 10^{20}$
<b>Echantillon 7 :</b> <b>800°C-</b> <b>15/900°C-20</b>	5.55	0.000222	-0.0356	64.1	$1,75 \cdot 10^{16}$	$4,38S \cdot 10^{20}$ 0
<b>Echantillon 8 :</b> <b>700°C-</b> <b>15/900°C-20</b>	5.55	0.000222	-0.0058	10.4	$1,08 \cdot 10^{17}$	$2,69 \cdot 10^{21}$
<b>Echantillon 9 :</b> <b>750°C-</b> <b>15/900°C-20</b>	5.78	0.000231	-0.087	151	$7.18 \cdot 10^{15}$	$1.79 \cdot 10^{20}$

**Tableau III.8.** La conductivité ( $\sigma$ ).

Echantillons	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\sigma=1/\rho$ (siemens)	1455,604	2212,389	2127,659	4566,210	4065,040	4201,680	4504,504	4504,504	4329,004

La caractérisation par Effet-Hall a donné plusieurs paramètres concernant les conséquences des variations de la température et de la durée de traitement thermique dans le processus de dopage et la réalisation de la jonction n<sup>+</sup>n. Ces paramètres sont :

La résistance de surface, résistivité, conductivité, mobilité, coefficient de Hall et la concentration des dopants en surface et en profondeur. D'après les résultats détaillés dans les tableaux précédents (**Tableau III.7**), on remarque que les concentrations en profondeurs sont plus élevées que celle en surface, ce qui confirme la pénétration du phosphore dans le silicium type P et la formation de la jonction.

## Chapitre III : Partie expérimentale & Résultats et discussions

---

La durée de diffusion de 30 minutes donne des faibles conductivités pour les trois températures différentes (600°C, 700°C et 750°C) pendant la phase des prés-dépôts, par contre l'échantillon 4 : 800°C-10/900°C-20, avec élévation de la température du pré-dépôt et la baisse de la durée a donné la meilleure conductivité, sauf que sa mobilité est la plus faible.

Pour l'échantillon 8 : 700°C-15/900°C-20, sa concentration est la plus élevée mais on observe une baisse de la mobilité.

On peut conclure que les résultats estimés meilleurs dans les diverses expériences sont :

Pour l'échantillon 7 : 800°C-15/900°C-20 et échantillon 9 : 750°C-15/900°C-20, vu leurs faibles résistances, bonne mobilité et bonne conductivité. Le signe négatif du coefficient de Hall indique que silicium est de type N.

En résumé, l'analyse des résultats de l'Effet-Hall permet de comprendre les propriétés électriques et magnétiques des matériaux, ainsi que la nature et le comportement des porteurs de charge qui les traversent.

### III.6.3.4. Durée de vie (QSSPC)

Cette technique a permis de visualiser les différentes allures liées à l'illumination (flash) exercer sur les échantillons, voir les résultats élaborés en figures (III.29 à III.37).



*Figure III.28. Testeur WCT 120 (CRTSE).*

### III.6.3.4.1. Explication des données affichées sur l'ordinateur du Testeur WCT 120 :

1. **Time (s)** : Le temps en secondes pendant lequel les mesures sont effectuées.
2. **Photoconductance\_Signal (V)** : Le signal de photoconductance mesuré en volts. Il est proportionnel à la densité de porteurs de charge générés par la lumière.
3. **Reference\_Voltage (V)** : La tension de référence en volts utilisée pour calibrer le signal de photoconductance.
4. **Apparent\_Carrier\_Density (cm<sup>-3</sup>)** : La densité apparente de porteurs de charge en cm<sup>-3</sup>, calculée à partir du signal de photoconductance et de la tension de référence.
5. **Tau (s)** : La durée de vie des porteurs de charge en secondes, calculée à partir de la décroissance du signal de photoconductance après l'extinction de la lumière.
6. **Inverse\_Tau\_Auger\_Corrected (s<sup>-1</sup>)** : L'inverse de la durée de vie des porteurs de charge en s<sup>-1</sup>, corrigée des recombinaisons Auger. Les recombinaisons Auger sont un mécanisme de recombinaison non radiatif qui devient dominant à forte injection.
7. **Minority\_Carrier\_Density (cm<sup>-3</sup>)** : La densité de porteurs minoritaires en cm<sup>-3</sup>, calculée à partir de la densité apparente de porteurs et de la tension de référence.
8. **Implied\_Voc (V)** : La tension de circuit ouvert implicite en volts, calculée à partir de la densité de porteurs minoritaires en utilisant l'équation de Shockley.
9. **Implied\_Suns (suns)** : L'éclairement solaire implicite en soleils, calculé à partir de la densité de porteurs minoritaires en utilisant l'équation de Shockley.
10. **Photogeneration (A/cm<sup>2</sup>)** : Le courant de photogénération en A/cm<sup>2</sup>, calculé à partir de la densité de porteurs minoritaires et de la durée de vie.
11. **Jo (A/cm<sup>2</sup>)** : Le courant de saturation inverse en A/cm<sup>2</sup>, calculé à partir de la densité de porteurs minoritaires et de la durée de vie.
12. **ni (cm<sup>-3</sup>)** : La concentration intrinsèque de porteurs en cm<sup>-3</sup>, calculée à partir de la température de mesure.

## III.6.3.4.2. Caractéristiques et interprétation des résultats des différents échantillons :

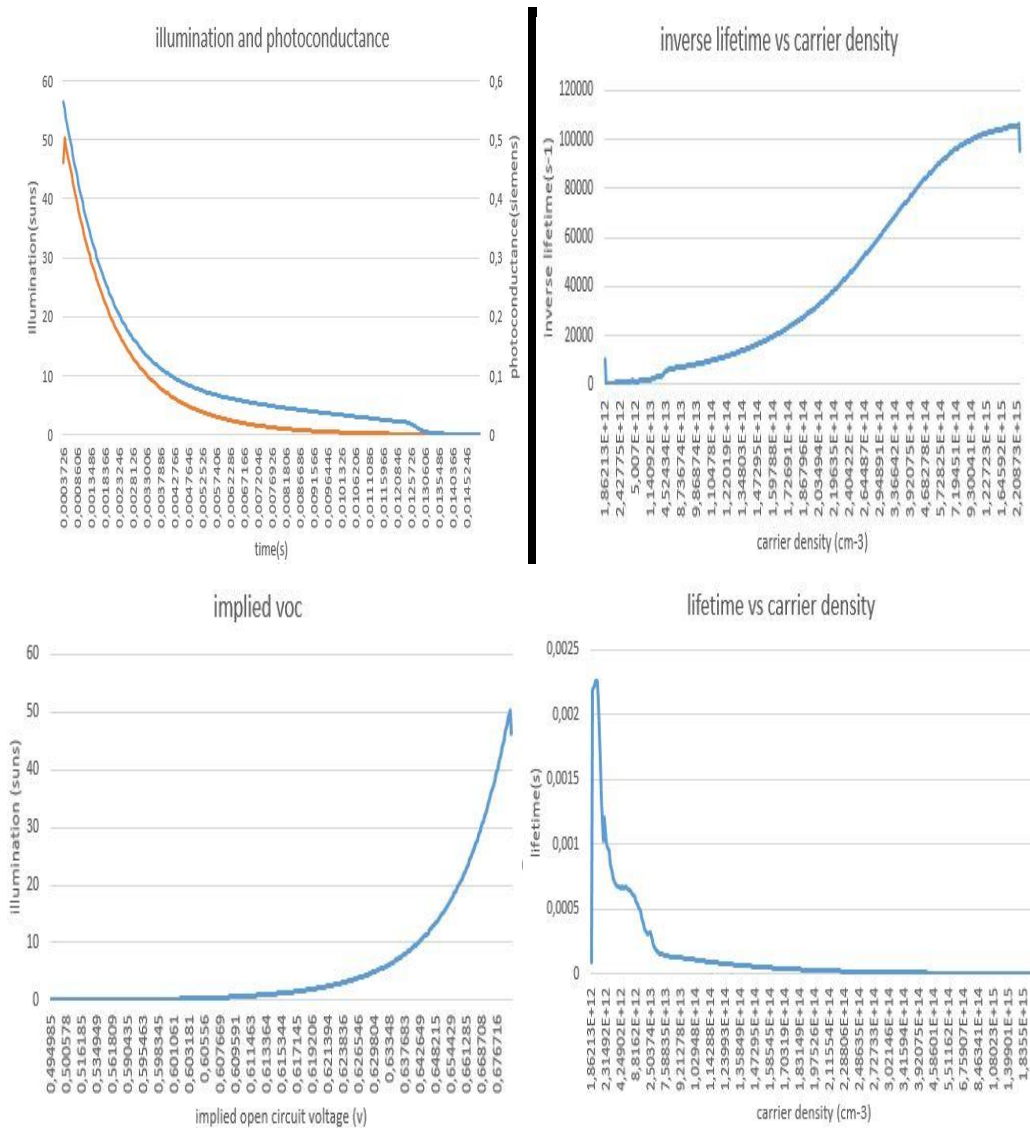


Figure III.29. Caractéristique et différents résultats de l'échantillon 1.

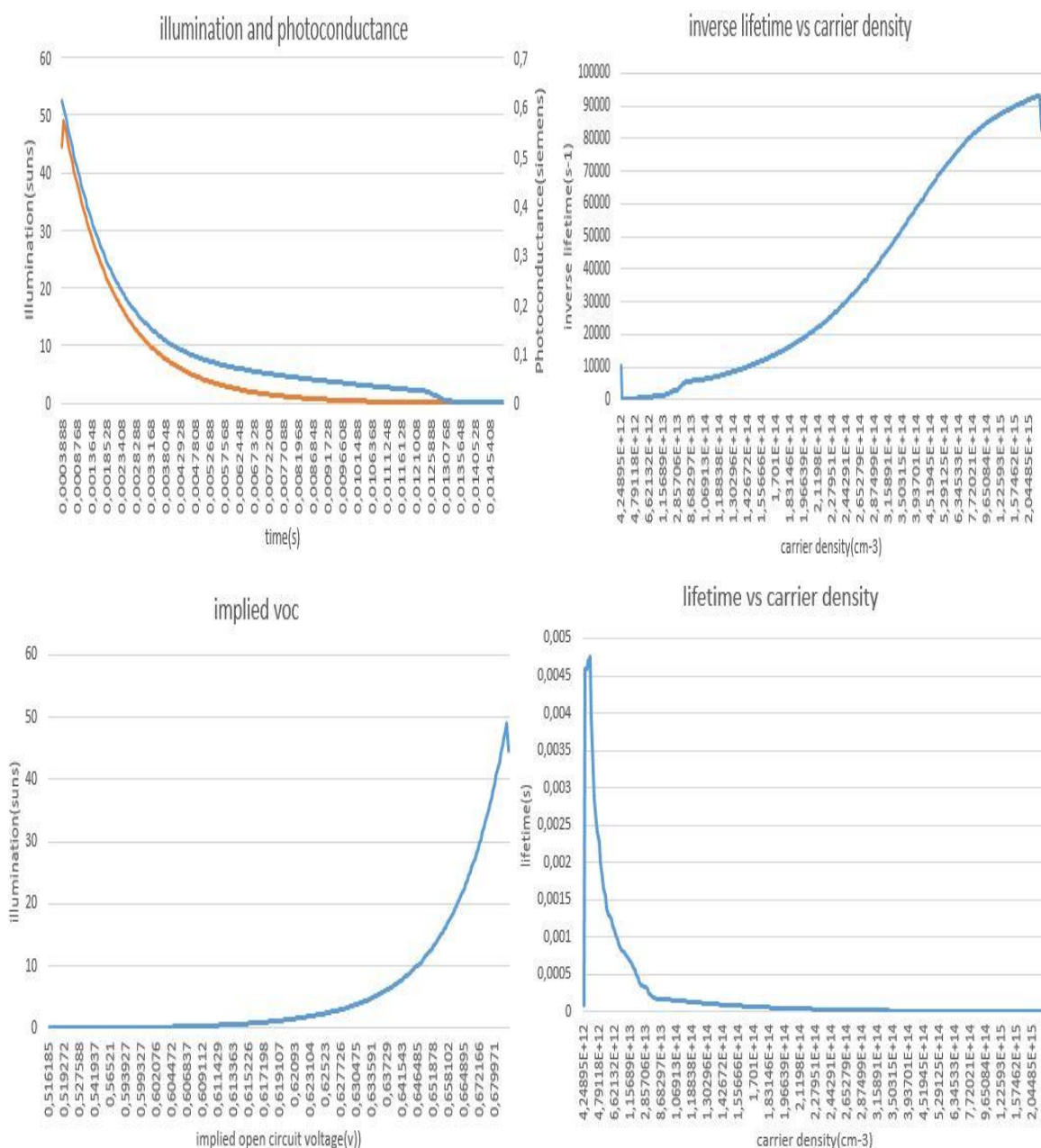


Figure III.30. Caractéristique et différents résultats de l'échantillon 2.

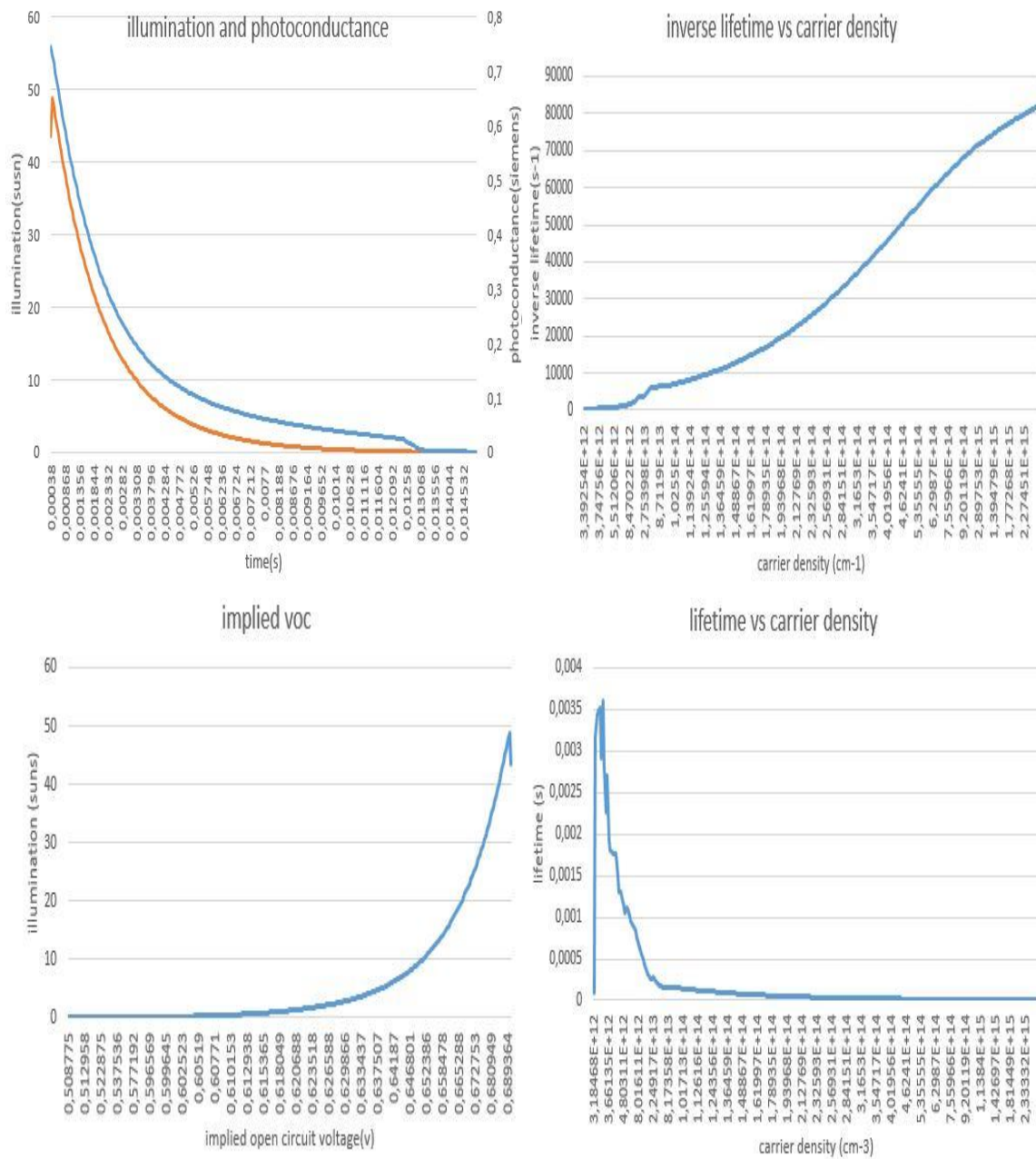


Figure III.31. Caractéristique et différents résultats de l'échantillon 3.

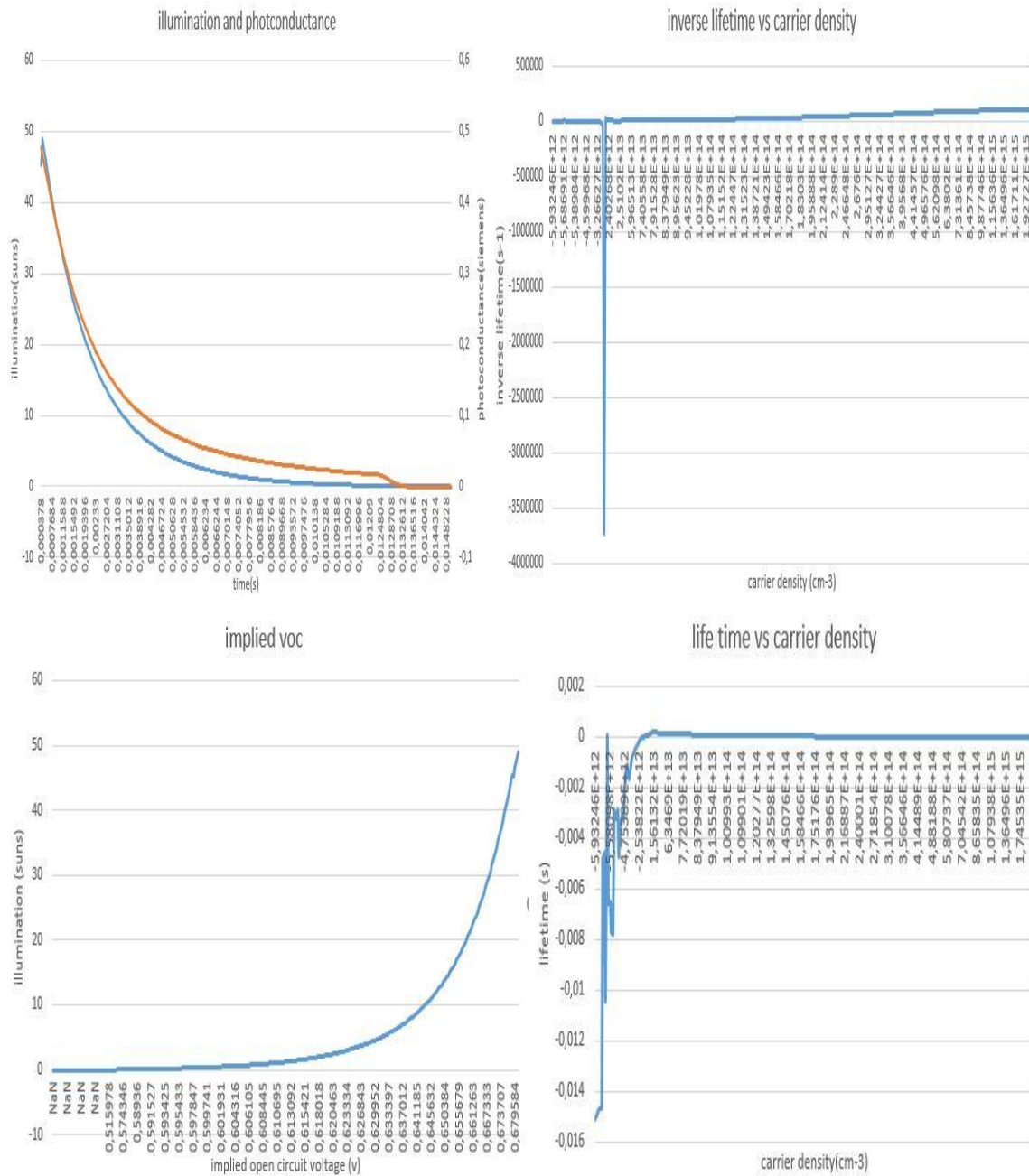


Figure III.32. Caractéristique et différents résultats de l'échantillon 4.

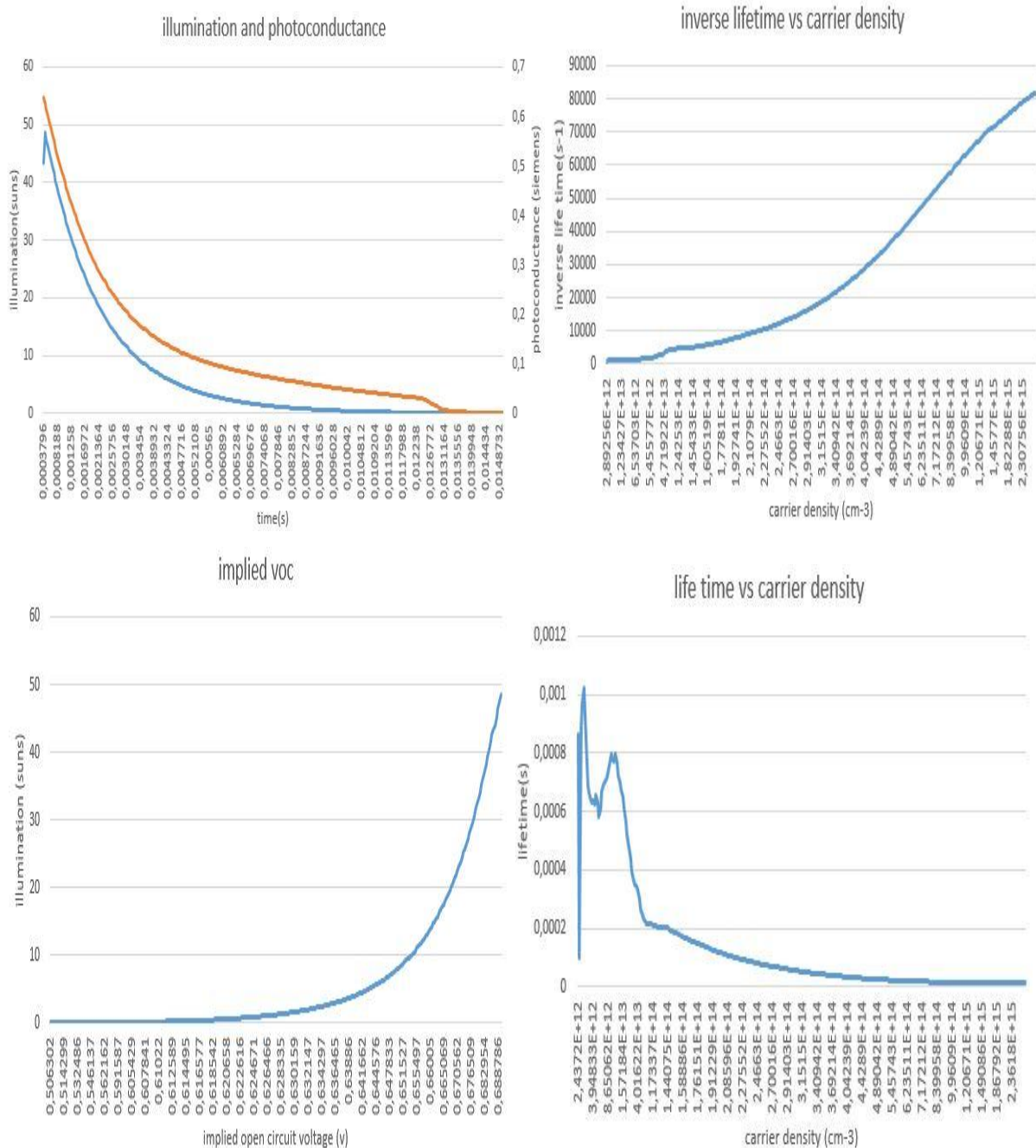


Figure III.33. Caractéristique et différents résultats de l'échantillon 5.

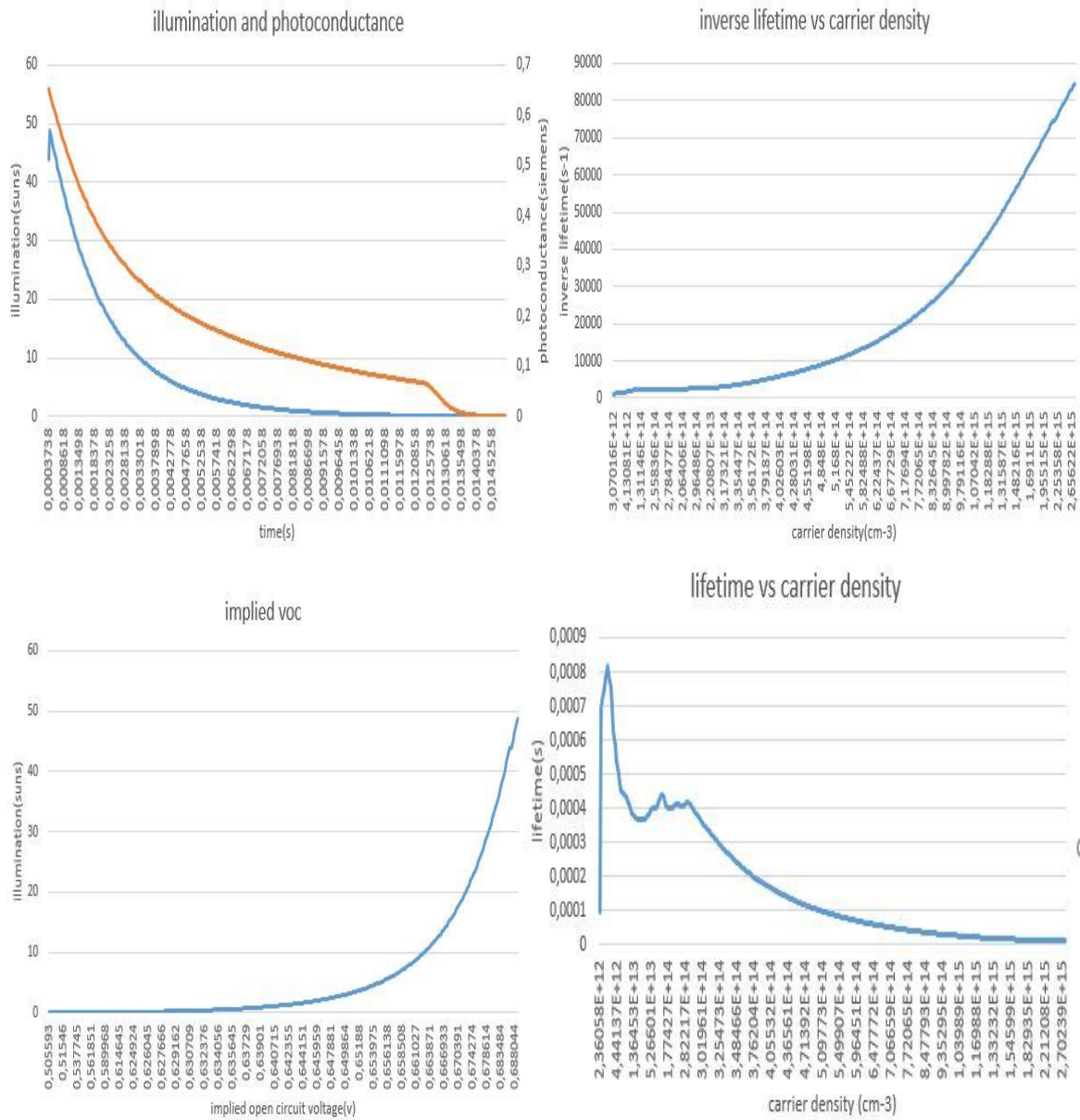


Figure III.34. Caractéristique et différents résultats de l'échantillon 6

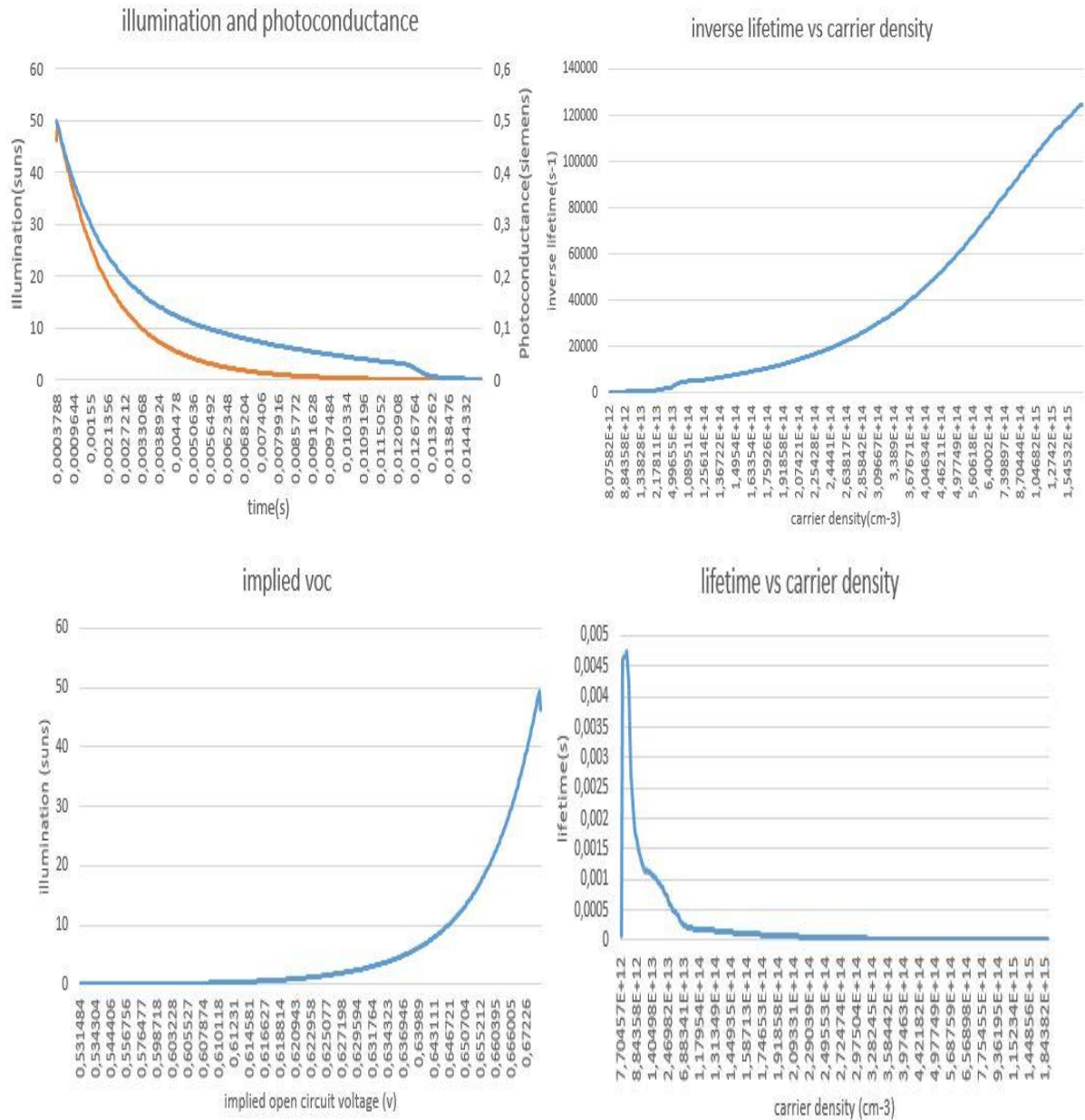


Figure III.35. Caractéristique et différents résultats de l'échantillon 7.

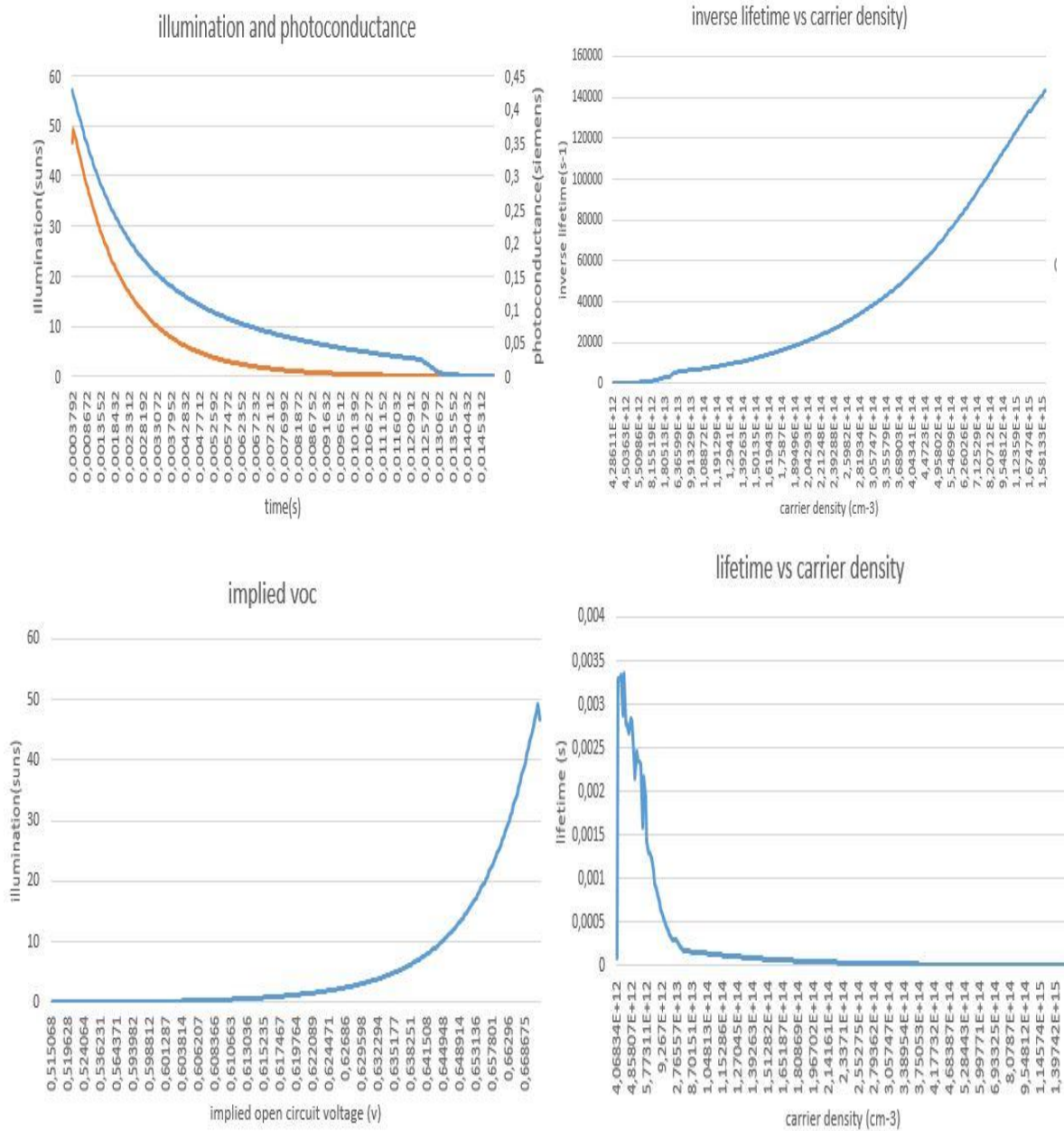


Figure III.36. Caractéristique et différents résultats de l'échantillon 8.

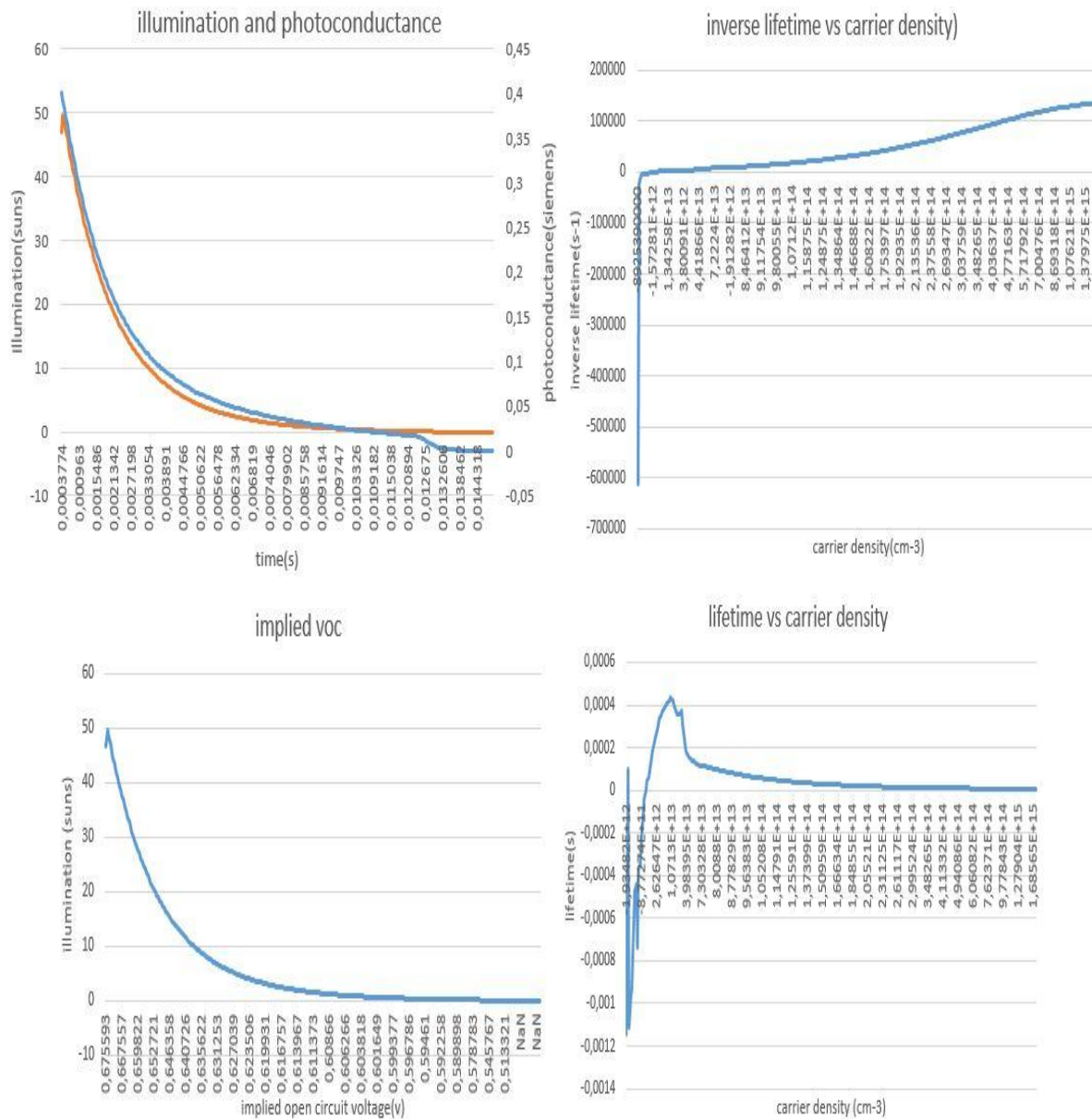
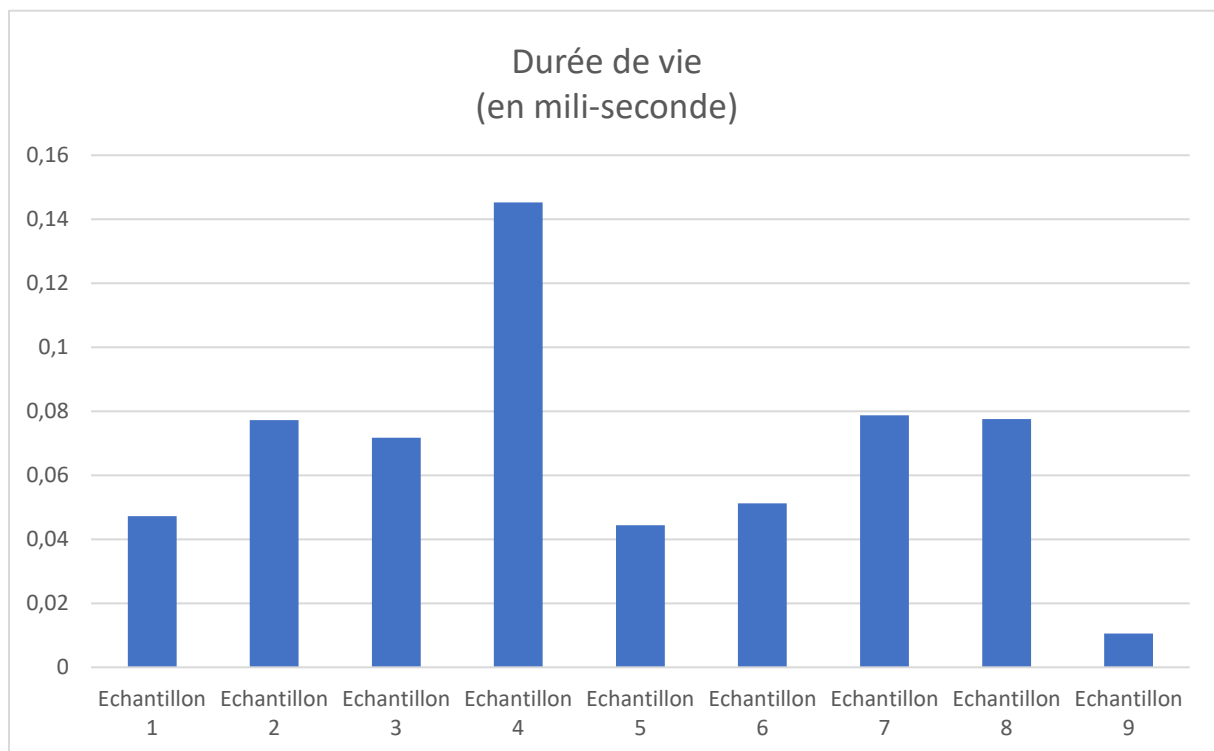


Figure III.37. Caractéristique et différents résultats de l'échantillon 9.

### III.6.3.4.3. Comparaison des durées de vie des neuf (9) échantillons



*Figure III.38. Histogramme des durées de vie des échantillons.*

On remarque dans les différentes figures que la photo-conductance est directement proportionnelle à l'illumination, elle diminue avec la diminution de l'intensité de la lumière ce qui explique la présence d'une population de porteurs de charge pendant une durée bien précise estimée en milliseconde au niveau de la bande de conduction des wafers en silicium. La qualité de la jonction est considérée meilleure pour la durée de vie des porteurs minoritaires la plus importante possibles, cette dernière diminue avec l'augmentation de recombinaisons des

## **Chapitre III : Partie expérimentale & Résultats et discussions**

---

porteurs de charges et la tension du circuit ouvert ( $v_{co}$ ) augmente avec l'augmentation de la lumière, avec laquelle le rendement des cellules solaires sera estimé.

### **III.7. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté la partie expérimentale d'une manière ordonnée. On a commencé le processus par la préparation des plaques de silicium type P avec un nettoyage rigoureux suivi d'un traitement thermique destiné pour la diffusion du phosphore solide sur ce type de wafers à des températures et des durées choisies pour les neuf (9) échantillons, passant par l'étape pré-dépôt puis l'étape drive-in. Ensuite, on a caractérisé les neufs échantillons par : la pointe chaude, la résistance carrée, Effets-Hall, FTIR et QSSPC avec illustration des différents résultats et leurs résumés dans les tableaux précédant, montrant que la température et la durée de diffusion ont une grande importance sur la qualité des émetteurs.

# **Conclusion générale**

## Conclusion générale

---

### Conclusion générale :

Ce travail, entrepris dans le cadre de ce mémoire, portait sur l'étude de l'effet de la température et de la durée de diffusion sur la jonction PN.

Nous avons utilisé des plaquettes de silicium multicristallin (Si-mc, type p), fabriquées par la méthode HEM (Heat Exchange Method) au CRTSE. Ces plaquettes mesurent 10 x 10 cm<sup>2</sup>, ont une épaisseur de 348 µm et une faible résistivité de 1 à 3 ohm.cm. Nous avons élaboré plusieurs échantillons pour étudier les couches de PSG (phosphorus-silicate-glass) formées par le pré-dépôt de phosphore solide sur des wafers de silicium soigneusement nettoyés. Nous avons ensuite étudié la diffusion (Drive-in) du phosphore à partir de ces couches à différentes températures pour montrer comment la variation de la température peut influencer les caractéristiques des différents émetteurs n+ (fortement dopés) élaborés.

Il était nécessaire de définir les techniques de caractérisation utilisées pour l'ensemble des échantillons afin d'illustrer leurs caractéristiques électriques (mesures à la pointe chaude, aux quatre pointes et par effet Hall), chimiques (FTIR) et la durée de vie (méthode QSSPC). Le spectre FTIR des couches PSG montre la présence de phosphore en surface, avec des pics de liaison avec les constituants des échantillons. Les résultats de la résistance carrée ont montré de faibles résistivités après le drive-in et les mesures par effet Hall ont confirmé la formation de la jonction avec des concentrations élevées en profondeur.

Les résultats de caractérisation électrique et de durée de vie des échantillons 4 (800-10/900-20) et 7 (800-15/900-20) se sont révélés les plus satisfaisants grâce à leurs meilleures conductivités, leurs dopages relativement uniformes et leurs durées de vie remarquables. Pour approfondir l'étude de la diffusion, il serait nécessaire d'élargir la gamme d'expériences avec plusieurs températures de dépôt et de drive-in, des temps de traitement thermique adéquats, et d'étudier l'influence des flux de gaz (azote et oxygène) qui participent au processus de diffusion.

En comparant les résultats de caractérisation de nos émetteurs avec ceux réalisés en monocristallin, nous constatons toujours moins de recombinaisons des porteurs de charge dans le mono-Si, ce qui se traduit par de meilleures performances sur toutes les caractéristiques par rapport au multi-Si. Le multi-Si comporte plusieurs grains et joints de grains qui provoquent des pertes d'énergie et d'efficacité. L'efficacité des cellules solaires est globalement limitée par la surface et la nature des matériaux. Pour cette raison, les chercheurs dans le domaine de l'énergie photovoltaïque cherchent constamment à améliorer les émetteurs

## **Conclusion générale**

---

par la passivation et d'autres techniques, ainsi qu'à trouver les meilleures combinaisons de matériaux, telle que la structure tandem avec la pérovskite, dont le rendement en laboratoire dépasse celui des cellules fabriquées en silicium.

# **Annexes**

## Annexe : Filières du photovoltaïque

Une cellule solaire PV est un dispositif qui permet de transformer en énergie électrique la lumière qu'il reçoit. Les matériaux de base utilisés pour fabriquer des cellules PV sont les semi-conducteurs qui possèdent un gap suffisamment faible pour absorber le maximum du spectre solaire. Les principales filières de cellules solaires sont celles à base de silicium, des III-V (GaAs), les chalcopyrites (CIS, CIGS) et les chalcogénures (CdTe).

Une illustration de l'évolution du rendement de conversion au niveau de laboratoire des différentes filières PV présentée ci-dessous (Figure A.1 et A.2) met en relief les progrès réalisés par chacune d'elles. Dans ces deux figures, les cellules solaires à base de silicium avec en 2025 un rendement de conversion record atteignant 27%.

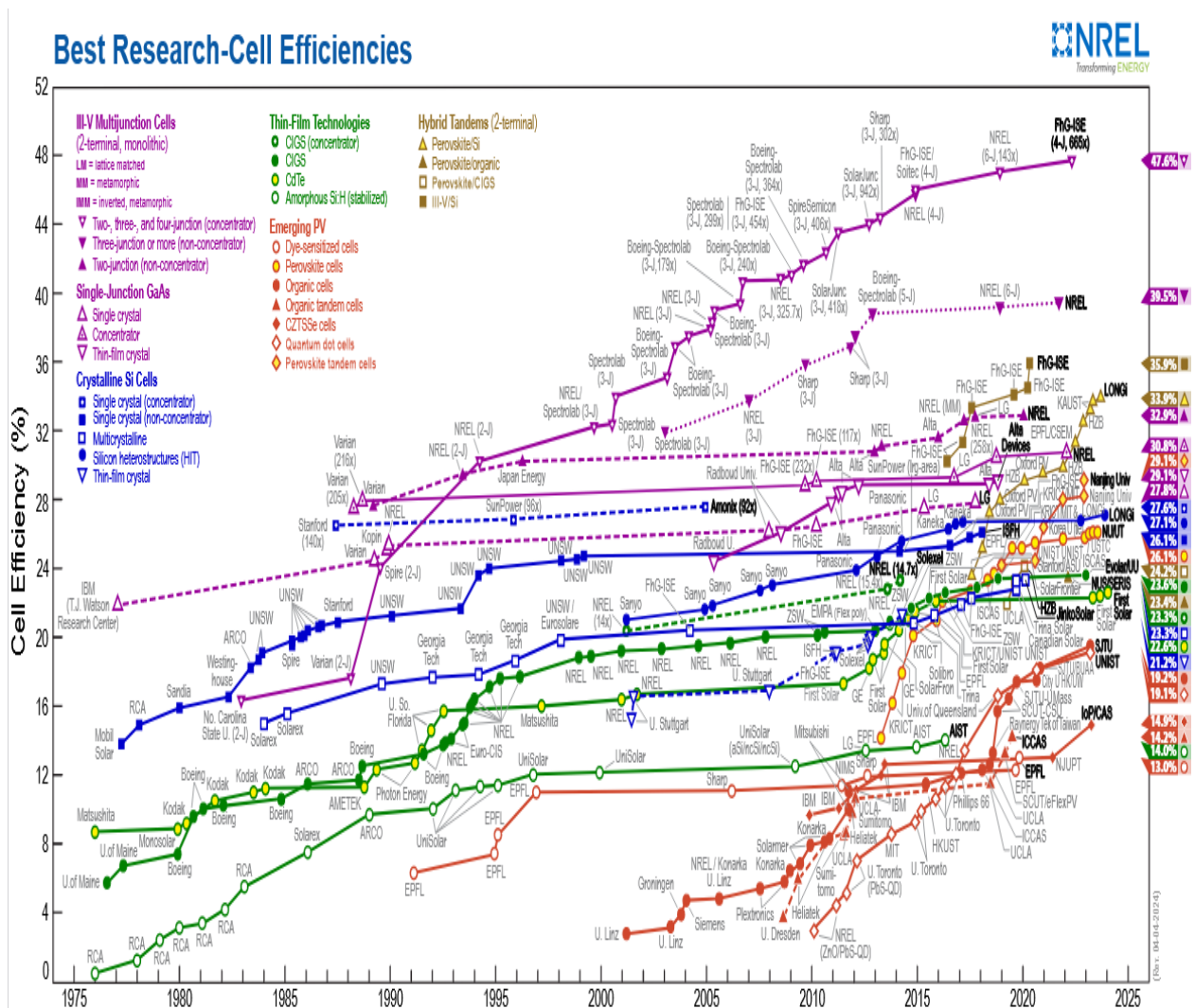
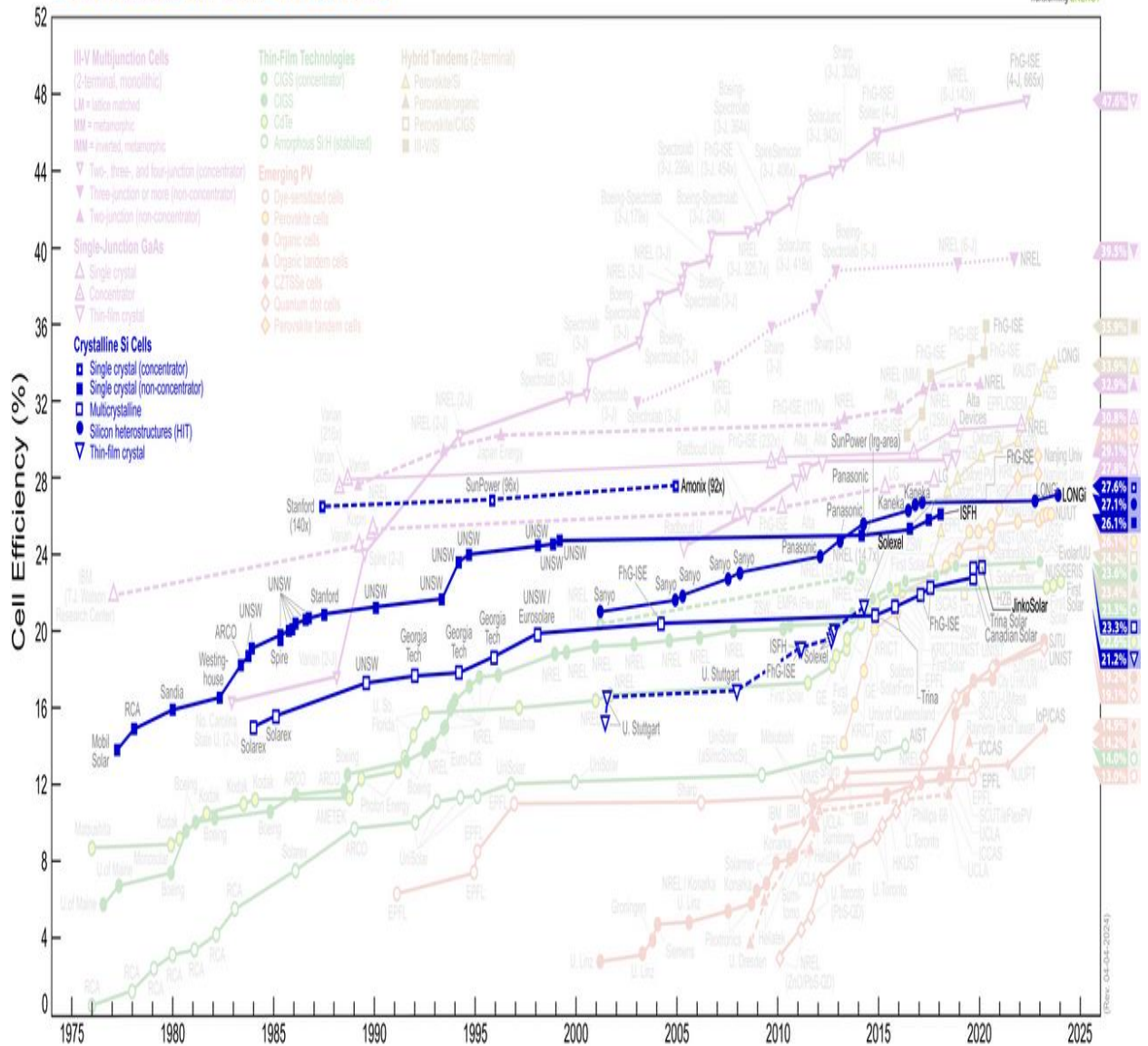


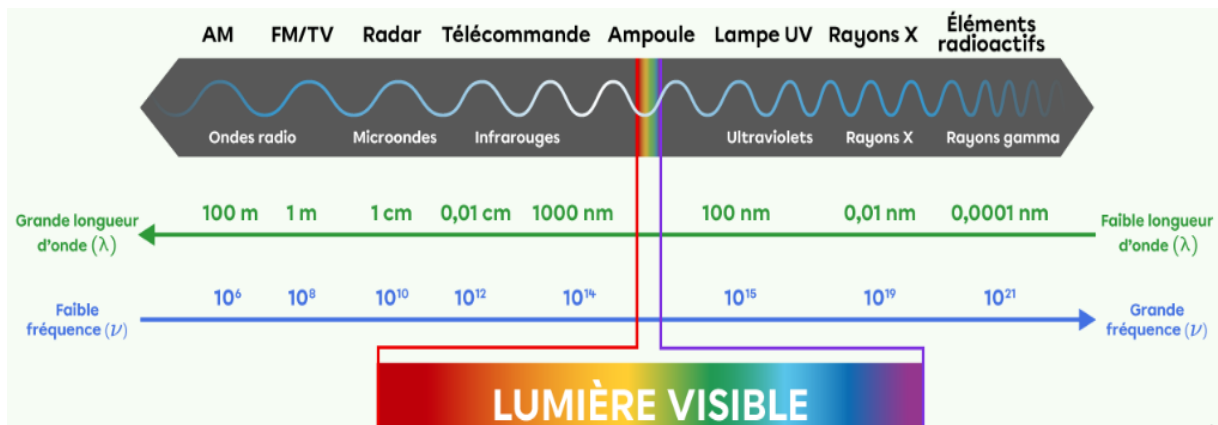
Figure 1 (Annexe). Diagramme montrant les différentes technologies et l'évolution des rendements des cellules au niveau de laboratoire (Source: NREL, 2024).

# Best Research-Cell Efficiencies



**Figure 2 (Annexe).** Diagramme montrant les différentes technologies et l'évolution des rendements des cellules au niveau de laboratoire (Source. NREL, 2024).

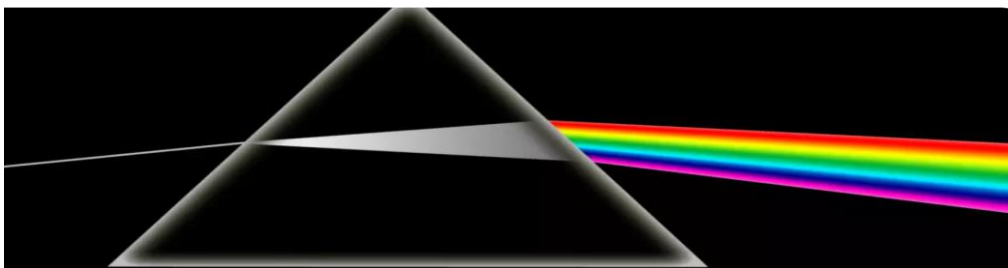
## ANNEXE A : Aperçu Sur La Lumière



*Fig a : Le Spectre Electromagnétique De La Lumière.*



*Fig b : Décomposition De La Lumière Blanche à Travers L'atmosphère.*



*Fig c : Décomposition De La Lumière Blanche à Travers Un Prisme.*

<b>Paramètres du soleil et lumière</b>	<b>Grandeurs physiques</b>
la masse du soleil	$M_s=2*10^{30}\text{Kg}$
le diamètre du soleil	$D=1,4 *10^6\text{Km}=1,4*10^9\text{m}$
la température du soleil	$T=5779 \text{ K}=5505,9 \text{ c}^\circ$
la durée de vie du soleil	environ 10 milliards d'années
la distance entre le soleil et la Terre	$L=150$ millions de kilomètre
le temps (t) que la lumière du soleil prend pour atteindre la	$t=8$ minutes et 20 secondes
L'énergie transportée par la lumière	$E=h*c / \lambda$

L'énergie transportée par le spectre lumineux est exprimé par la relation :  $E=h*c / \lambda$ ,  
l'énergie (E) est en joule ou en électron volt (ev), h : constante de Planck= $6,626*10^{-34}\text{m}^*\text{Kg/s}$ , c : la vitesse de la lumière (célérité)= $3*10^8 \text{ m/s}$  et  $\lambda$  : La longueur d'onde en mètre  
( $\lambda$  diffère d'un spectre à un autre).

# ANNEXE B : Tableau périodique des éléments ou table de Mendeleïev.

## Tableau périodique des éléments chimiques

Groupe → I A 18  
Période

I A 18

— nom de l'élément (**gaz**, **liquide** ou **solide** à 0°C et 101,3 kPa)  
 — numéro atomique  
 — symbole chimique  
 — masse atomique relative (ou celle de l'isotope le plus stable)  
 © [ CIAAW "Atomic Weights 2013" + rev. 2015 ]

1	Hydrogène 1 H 1,007975											II B 13	IV B 14	V B 15	VI B 16	VII B 17	VIII A 18	
2	Lithium 3 Li 6,9395	Béryllium 4 Be 9,0121831											Bore 5 B 10,8135	Carbone 6 C 12,0106	Azote 7 N 14,00644	Oxygène 8 O 15,9994	Fluor 9 F 18,9984031	Néon 10 Ne 20,1797
3	Sodium 11 Na 22,98976928	Magnésium 12 Mg 24,3055	III A 3	IV A 4	V A 5	VI A 6	VII A 7	VII 8 9 10			I B 11	II B 12	Aluminium 13 Al 26,9815385	Silicium 14 Si 28,0855	Phosphore 15 P 30,97376209	Soufre 16 S 32,0675	Chlore 17 Cl 35,4515	Argon 18 Ar 39,948
4	Potassium 19 K 39,0983	Calcium 20 Ca 40,078	Scandium 21 Sc 44,955908	Titane 22 Ti 47,867	Vanadium 23 V 50,9415	Chrome 24 Cr 51,9961	Manganèse 25 Mn 54,938044	Fer 26 Fe 55,845	Cobalt 27 Co 58,933194	Nickel 28 Ni 58,6934	Cuivre 29 Cu 63,546	Zinc 30 Zn 65,38	Gallium 31 Ga 69,723	Germanium 32 Ge 72,630	Arsenic 33 As 74,921595	Sélénium 34 Se 78,971	Brome 35 Br 79,904	Krypton 36 Kr 83,798
5	Rubidium 37 Rb 85,4678	Strontium 38 Sr 87,62	Yttrium 39 Y 88,90584	Zirconium 40 Zr 91,224	Niobium 41 Nb 92,90637	Molybdène 42 Mo 95,95	Technétium 43 Tc [98]	Ruthénium 44 Ru 101,07	Rhodium 45 Rh 102,90550	Palladium 46 Pd 106,42	Argent 47 Ag 107,8682	Cadmium 48 Cd 112,414	Indium 49 In 114,818	Étain 50 Sn 118,710	Antimoine 51 Sb 121,760	Tellure 52 Te 127,603	Iode 53 I 126,90447	Xénon 54 Xe 131,298
6	Césium 55 Cs 132,905452	Baryum 56 Ba 137,327	Lanthanides 57-71	Hafnium 72 Hf 178,49	Tantale 73 Ta 180,94788	Tungstène 74 W 183,84	Rhénium 75 Re 186,207	Osmium 76 Os 190,23	Iridium 77 Ir 192,217	Platine 78 Pt 195,084	Or 79 Au 196,966569	Mercury 80 Hg 200,592	Thallium 81 Tl 204,3835	Plomb 82 Pb 207,2	Bismuth 83 Bi 208,98040	Polonium 84 Po [209]	Astato 85 At [210]	Radon 86 Rn [222]
7	Francium 87 Fr [223]	Radium 88 Ra [226]	Actinides 89-103	Rutherfordium 104 Rf [267]	Dubnium 105 Db [268]	Seaborgium 106 Sg [269]	Bohrium 107 Bh [270]	Hassium 108 Hs [277]	Méitnium 109 Mt [278]	Darmstadtium 110 Ds [281]	Roentgenium 111 Rg [282]	Copernicium 112 Cn [285]	Nihonium 113 Nh [286]	Flerovium 114 Fl [289]	Moscovium 115 Mc [289]	Livermorium 116 Lv [293]	Tennesse 117 Ts [294]	Oganesson 118 Og [294]
			Lanthane 57 La 138,90547	Cérium 58 Ce 140,116	Praseodyme 59 Pr 140,90766	Néodyme 60 Nd 144,242	Prométhium 61 Pm [145]	Samarium 62 Sm 150,36	Europium 63 Eu 151,964	Gadolinium 64 Gd 157,25	Terbium 65 Tb 158,92535	Dysprosium 66 Dy 162,500	Holmium 67 Ho 164,93033	Erbium 68 Er 167,259	Thulium 69 Tm 168,93422	Ytterbium 70 Yb 173,045	Lutécium 71 Lu 174,9668	
			Actinium 89 Ac [227]	Thorium 90 Th 232,0377	Protactinium 91 Pa [231,03588]	Uranium 92 U 238,02891	Neptunium 93 Np [237]	Plutonium 94 Pu [244]	Americium 95 Am [243]	Curium 96 Cm [247]	Berkélium 97 Bk [247]	Californium 98 Cf [251]	Einsteinium 99 Es [252]	Fermium 100 Fm [257]	Mendelevium 101 Md [258]	Nobelium 102 No [259]	Lawrencium 103 Lr [266]	

Métaux

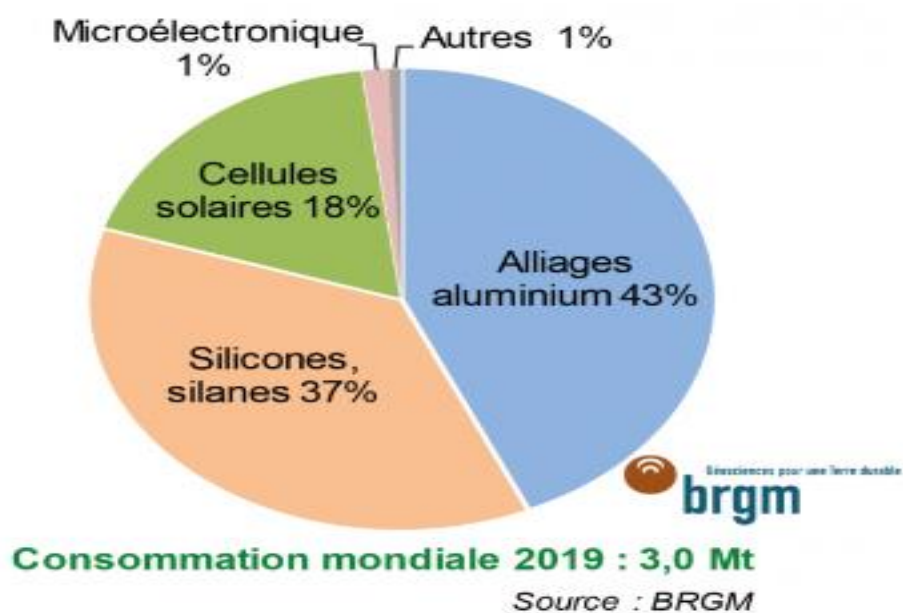
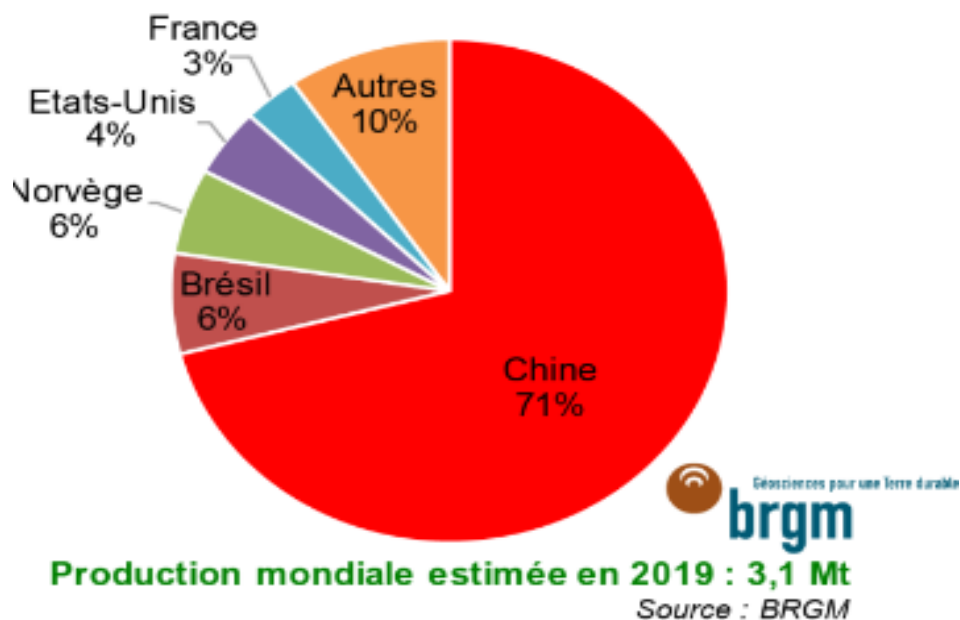
Alcalins	Alcalino-terreux	Lanthanides	Actinides	Métaux de transition	Métaux pauvres
----------	------------------	-------------	-----------	----------------------	----------------

Non métaux

Métalloïdes	Autres non-métaux	Halogènes	Gaz nobles	Non classés
-------------	-------------------	-----------	------------	-------------

primordial	de désintégration d'autres éléments	synthétique
------------	-------------------------------------	-------------

## ANNEXE C : Répartition géographique de la production de silicium en 2019



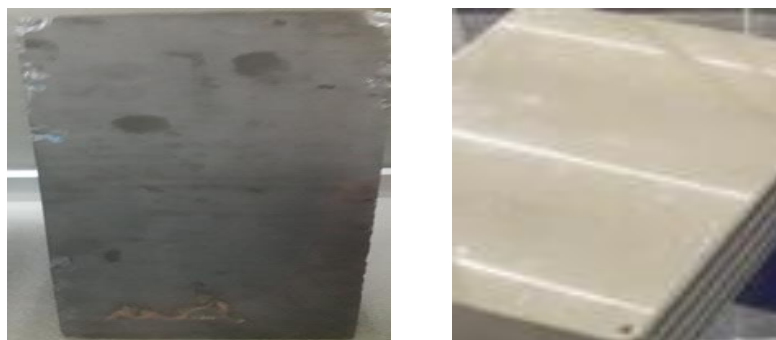
**ANNEXE D : Quartz, Silicium et cellules solaires.**



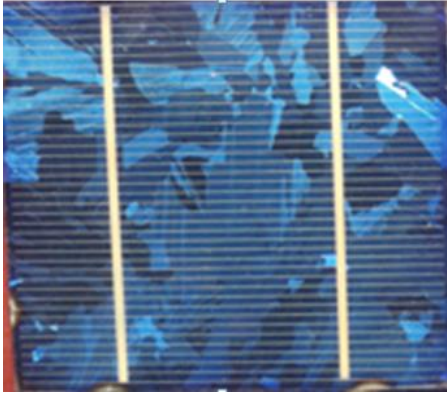
*Différentes couleurs de Quartz a l'état naturel*



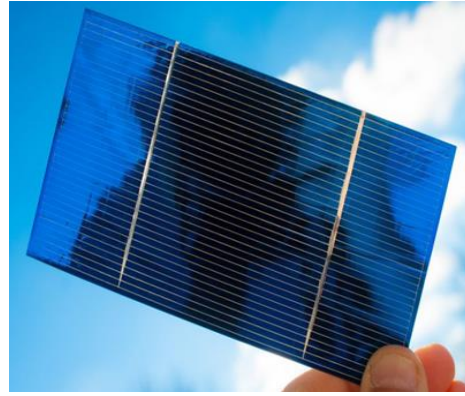
*Fragments du Mono-silicium*



*Briques du multi-Silicium*



*Cellule solaire multicristalline*



*Cellule solaire monocristalline*



*Colorations des plaques de multi-silicium après le recuit à différentes températures.*

#### **ANNEXE E : Les produits dopants sous forme solide (Sources de préforme)**



*a) Bore)*



*b) Phosphore*

**ANNEXE F : Quelques équipements du CRTSE.**



*Les compartiments du four TEMPRESS OMEGA JUNIOR 3.*



***LASER 301***

# **Références bibliographique**

## **Bibliographie générale :**

- [1] <https://www.google.le+rendement+des+cellules+solaires+en+polycristallin>.
- [2] <https://www.ef4.be/fr/pv/composants-dun-systeme/cellules-photovoltaïques.html>.
- [3] R. Dumon, « Energie solaire et stockage d'énergie », Edition Masson, 1977.
- [4] M. Orgeret, « Les Piles solaires : Le composant et ses applications », Edition Masson, 1985.
- [5] S. Rebiai-Benahmed , « Composants Optoélectroniques », Edition Ellipse, 2001.
- [6] H.Mathieu, H. Fanet, «Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques », Edition Dunod, Paris, 2009.
- [7] Zabardjade Said-Bacar. « Elaboration et caractérisations de silicium polycristallin par cristallisation en phase liquide du silicium amorphe », thèse doctorat, Université Paris Sud - Paris XI, 2012.
- [8] L. BECHANE, « Etude de l'amélioration des propriétés de matériaux semi-conducteurs pour des applications comme cellules photovoltaïques », thèse doctorat, Université Ferhat Abbas - Sétif 1, 2022.
- [9] Rihab El Houda. Djabou, Rima. Beztout, « Propriétés structurales et électroniques des Matériaux photovoltaïques : Le Silicium », 2015.
- [10] F. KERKAR, « L'élaboration du silicium multicristallin : Etude, Caractérisation et valorisation », thèse doctorat, Université M'hamed bougara boumerdas, 2012.
- [11] AMIRI Benameur, « Modélisation d ' une cellule solaire p-i-n à base de silicium amorphe (a-Si : H) et silicium nanocristallin oxydé ( nc-SiOx : H ) », mémoire de magister, université d'oran ( USTO –MB ), 2014.
- [12] N. BENASID, « Le Silicium Poreux et son rôle dans L'amélioration des performances des cellules photovoltaïques », mémoire de master, Université Abou-Bekr Belkaid – Tlemcen, 2021.
- [13] ROSSIQUET, Gilles. « Carbure de silicium pour application blindage: élaboration et étude du comportement à l'impact ». Thèse de doctorat. Dijon. 2012.

- [14] Othman, Dhouha. « Etude d'interrupteurs en carbure de silicium et potentiel d'utilisation dans des applications aéronautiques ». Diss. Université Paris Saclay (COmUE), 2015.
- [15] Coffineau, Nathalie. « Processus contrôlant la distribution des isotopes du silicium dissous ( $\delta^{30}\text{Si}$ ) dans l'océan Atlantique et Indien ». Diss. Brest, 2013
- [16] G. Poulain, «Réalisation De Cellules Photovoltaïques En Silicium à Haut Rendement », Edition Insa de Lyon », 2012.
- [17] Cherifi, Mohand, and Houa Ounouh. « Étude du refroidissement par eau d'un panneau solaire photovoltaïque », thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2018.
- [18] VEIRMAN, Jordi. « Effets de la compensation du dopage sur les propriétés électriques du silicium et sur les performances photovoltaïques des cellules à base de silicium solaire purifié par voie métallurgique », Thèse de doctorat. Lyon, INSA, 2012.
- [19] HOURYA, REZKI. « Elaboration et caractérisation des couches minces  $\text{CuInS}_2$ ,  $\text{CdS}$  pour la formation d'une jonction pn », Thèse de doctorat, Université mohamed boudiaf des sciences et de la technologie d'oran, 2015.
- [20] DEFRESNE, Alice. « Amélioration de la passivation de cellules solaires de silicium à hétérojonction grâce à l'implantation ionique et aux recuits thermiques », Thèse de doctorat, Université Paris-Saclay (ComUE), 2016
- [21] Cécile Miquel, « Systèmes photovoltaïques : fabrication et impact environnemental », Synthèse, Hespul, 2009.
- [22] HELALI, Kamelia. « Modélisation d'une cellule photovoltaïque: étude comparative », Thèse de doctorat. Université Mouloud Mammeri, 2012.
- [23] CABAL, Cedric. « Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque », Thèse de doctorat. Université Paul Sabatier-Toulouse III, 2008.
- [24] LEMERCIER, Thibault. « Développement de cellules solaires pérovskites semi-transparentes de type PIN dans la perspective d'une application tandem ». Thèse de doctorat, Université Savoie Mont Blanc, 2020.

[25] Adnane, Mohamed, et al. « Elaboration et caractérisation des matériaux binaires  $Cu_xS$  et  $Ag_2S$  élaborés par la technique SILAR pour couche tampon de cellule solaire à base de couche absorbante CIS. » *Journal of Renewable Energies* 13.4, 2010.

[26] Daranféd, Ouarda, and M. S. Aida. « Elaboration et caractérisation de couches absorbantes des cellules solaires en couches minces à base de  $Cu_2ZnSnS_4$ . » 2013.

[27] CHALH, Malika. Elaboration, « Caractérisation et modélisation optique d'électrodes transparentes intégrant des nanofils d'Ag pour des applications solaires ». Thèse de doctorat. Université de Limoges, 2018.

[28] BEN HAOUA, Atmane. « Caractérisation des couches minces de  $SnO_2$  élaboré par spray ultrasonique utilisées dans les cellules solaires ». Thèse de doctorat. Université Kasdi Merbah Ouargla, 2016.

[29] OULMI, Noura. « Etude et synthèse de composés chalcopyrites en couches minces ». 2021. Thèse de doctorat. Université de Batna 2.

[30] BOURLIER, Yoan. « Etude de films minces de  $CuInS_2$ ,  $CuIn_{1-x}Ga_xS_2$ , et  $Cu_2ZnSnS_4$ , élaborés par voie sol-gel, destinés aux applications photovoltaïques », Thèse de doctorat, Lille 1, 2013.

[31] Mr DOUBA walid, rapport de stage préparé au sein de centre de recherche en technologie des semi-conducteurs pour l'énergie, 2023.

[32] Adeline Lanterne. Étude, « réalisation et caractérisation de dopages par implantation ionique pour une application aux cellules solaires en silicium. Matériaux », thèse de doctorat Université de Grenoble, 2014.

[33] NEMRAOUI, Ouassini. « Elaboration et caractérisation des multicouches métalliques: interprétation des profils SIMS aux interfaces ». Thèse de doctorat. Paris 11, 1998.

[34] DUEZ, Benoit. « Caractérisation de dépôts multicouches  $TiC_xNy$  et  $Al_2O_3$  sur WC: analyse quantitative par SIMS ». 2003. Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique de Lorraine, 2003

[35] AMIEL, Caroline. « Potentialités de la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (IRTF) pour l'identification et la caractérisation de bactéries d'implication laitière ». Thèse de doctorat. Caen, 2000.

[36] LABED, Asma, MAKHLOUFIA, Meriem, BOUCHAIR, Abdennour Encadreur, et al. « Synthèse et caractérisation des oxydes de type Pérovskite à partir d'une source végétale, pour une application en photocatalyse solaire », Thèse de doctorat. Université de Jijel, 2023.

[37] XU, Ming. « Photoluminescence techniques for the characterization of photovoltaic interfaces ». Thèse de doctorat. Université Paris-Saclay (ComUE), 2016.

[38] AUBRIET, Valentin. « Étude du photo-potentiel de surface pour la caractérisation des interfaces enterrées par microscopie à sonde de Kelvin ». 2022. Thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes, 2020.

[39] FARDEAU, J. C. « Le phosphore assimilable des sols: sa représentation par un modèle fonctionnel à plusieurs compartiments. Agronomie », 1993, vol. 13, no 4, p. 317-331.

[40] BOUGOIN, M., THEVENOT, F., DUBOIS, J., et al. Synthèse et « caractérisation de céramiques denses en carbure de bore. Journal of the Less Common Metals », 1985, vol. 114, no 2, p. 257-271.

[41] BARBOS, Corina. « Passivation de surface des cellules photovoltaïques en silicium cristallin: Dépôt par ALD et caractérisation de couches minces d'Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ». Thèse de doctorat. Université de Lyon, 2016.

[42] PAVIET-SALOMON, Bertrand. « Procédés de dopage et de recuit laser pour la réalisation de cellules photovoltaïques au silicium cristallin », Thèse de doctorat. Strasbourg, 2012.

[43] MILLON, Cyril. « Contribution à l'étude de procédés de réalisation de structures métal/PZT/métal sur silicium pour microsystemes piézoélectriques », Thèse de doctorat. Lyon, INSA, 2003.