

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES



Faculté de Technologie

Département Génie Mécanique

Mémoire de Master

En vue de l'obtention du diplôme de MASTER en :

Filière : génie mécanique

Spécialité : énergie renouvelable en mécanique

THEME

***Influence de la température et de la durée de pré-
dépôt sur la formation des couches PSG.***

Présenté par : Baziz fares

Promoteur : Mr. Djelloul abdelkader

Co promotrice : Mme Domane Radia

Promotion 2023- 2024

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.

Je tiens vivement à exprimer mes remerciements à ma promoteur Mr. Djelloul Abdelkader, Directeur de Recherche, au sein du Centre de Recherche en Technologie des Semi-conducteurs pour l'Energétique (CRTSE) et ma promotrice Mme Domane Radia, Maître de conférences classe B, au sein de l'université M'Hamed Bougara de Boumerdès, ainsi Qu'aux membres de jury d'avoir accepté d'examiner et de corriger ce rapport.

Enfin, je remercie tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin, que ce soit par leur Sympathie, leurs conseils ou leur soutien moral. Qu'ils trouvent dans ces quelques lignes L'expression de ma profonde gratitude.

Nous exprimons également nos gratitude à tous les enseignants du département de Génie Mécanique de l'université M'Hamed Bougara de Boumerdès, à tous les chercheurs et fonctionnaires du CRTSE pour l'accueil, soutien et encouragements, particulièrement à Mme Boudiaf Yamina et les messieurs Abbas Marref, Manseri Amar et Trad-khodja Abdallah.

Résumé

Dans ce travail nous nous intéresserons à l'étude de l'effet de la variation de la température et la durée de pré-dépôt des couches PSG (Phosphorous Silicate Glass) sur des substrats en silicium multi cristallin de type p par des sources dopantes préformes pour objectif de la réalisation des FSF (Front Surface Field).

Nous avons caractérisé nos échantillons par diverses techniques de caractérisation tel que FTIR, XPS, MEB, EDS, ainsi qu'électriquement par la méthode de quatre pointes alignées.

Mot clés : Pré-dépôt, PSG, FTIR, XPS, MEB, EDS.

Abstract

In this work we will be interested in the study of the effect of the variation of the temperature and the duration of pre-deposition of PSG (Phosphorous Silicate Glass) layers on p-type multicrystalline silicon substrates by preform doping sources. For the objective of creating the FSF (Front Surface Field).

We characterized our samples by various characterization techniques, such as FTIR, XPS, SEM and EDS, as well as electrically by the four-point probe method.

Keywords: *Predepot, PSG, FTIR, XPS, MEB, EDS.*

A mes chers parents

A mes frères et mes sœurs

A toute mes amies

Je dédie ce travail

Liste des figures

FIGURE I.1 COMPARAISON DE L'ÉVOLUTION DE LA POPULATION MONDIALE ET DE LA CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE MONDIALE, PAR HABITANT. [1]	4
FIGURE I. 2 SCÉNARIO AVANCÉ PAR L'IEA QUANT AUX INVESTISSEMENTS À VENIR POUR LES DIFFÉRENTES ÉNERGIES RENOUVELABLES CONCERNANT, L'UNION EUROPÉENNE (A) ET LA CHINE (B) [1]	5
FIGURE I. 3 L'ÉNERGIE SOLAIRE	6
FIGURE I. 4 SPECTRE ÉLECTROMAGNÉTIQUE [3].....	7
FIGURE I. 5 ATOME DE SILICIUM CRISTAL DE SILICIUM.	8
FIGURE I. 6 STRUCTURE EN BANDES D'ÉNERGIE POUR LES ISOLANTS, LES SEMI-CONDUCTEURS ET LES CONDUCTEURS. [5].	9
FIGURE I. 7 SILICIUM DOPÉ OU PHOSPHORE.....	10
FIGURE I.8 SILICIUM DOPÉ OU BORD	10
FIGURE I. 9 STRUCTURE DE LA JONCTION PN SOUS ÉCLAIREMENT [7].	11
FIGURE I. 10 PRÉSENTATION DES DIFFÉRENTES ARCHITECTURES : (A) AL BSF, (B) PERT ET (C) PERC.....	12
FIGURE I. 11 CELLULE IBC.....	13
FIGURE I. 12 LES PROCÉDÉS DE DIFFUSION : A) SOURCE SOLIDE, B) SOURCE LIQUIDE, C) SOURCE GAZEUSE [16]	16
FIGURE II. 1ENSEMBLE DES RADIATIONS POUVANT ÊTRE ÉMISES LORS DE L'INTERACTION ENTRE LE FAISCEAU D'ÉLECTRONS ET L'ÉCHANTILLON	20
FIGURE II. 2 SCHÉMA DE PRINCIPE D'UN SPECTROMÈTRE FTIR [1].....	21

FIGURE II. 3 PRINCIPE DE LA DÉTERMINATION DE LA RÉSISTIVITÉ PAR LA MÉTHODE DE 4 POINTES.....	22
FIGURE II. 4 PRINCIPE DE LA TECHNIQUE DE POINTE CHAUDE. [3].....	23
FIGURE II. 5 (A) PHÉNOMÈNE PHYSIQUE À LA BASE DE L'ANALYSE EDS (B) EXEMPLE D'UN SPECTRE EDS [4]	23
FIGURE II. 6 CONSERVATION DE L'ÉNERGIE TOTALE LORS D'UN PHÉNOMÈNE PHOTO ÉLECTRONIQUE, AINSI QUE LORS DE SA MESURE PAR UN SPECTROMÈTRE. [5]	24
FIGURE III. 1 SYSTÈME DE DIFFUSION (FOUR TEMPRESS OMEGA JUNIOR 3, CRTSE).	28
FIGURE III. 2 SCHÉMA MONTRANT LES ÉQUIPEMENTS UTILISÉS DANS CE TRAVAIL, LA CONFIGURATION ET LA POSITION DE LA PLAQUETTE ÉTUDIÉE ET DES SOURCES DE DOPAGE.	30
FIGURE III. 3 PROFIL DE TEMPÉRATURE DE PRÉ-DÉPÔT DES COUCHES PSG EN FONCTION DU TEMPS DE.....	31
FIGURE III. 4 PROFIL DE TEMPÉRATURE DE PRÉ-DÉPÔT DES COUCHES PSG EN FONCTION DU TEMPS DE RECUI À 700 °C.	31
FIGURE III. 5 PROFIL DE TEMPÉRATURE DE PRÉ-DÉPÔT DES COUCHES PSG EN FONCTION DU TEMPS DE.....	32
FIGURE III. 6 ETAT DE SURFACE D'UNE PLAQUETTE DE SILICIUM MULTICRISTALLIN.....	32
FIGURE III. 7 SCHÉMA DE PRINCIPE DU PROTOCOLE DE TRAVAIL SUIVI POUR LA RÉALISATION DE L'ÉMETTEUR PN ⁺ AVEC LA COUCHE PSG.	33
FIGURE III. 8 SPECTRES FTIR DE PRÉ-DÉPÔT DES COUCHES PSG EN FONCTION DU TEMPS DE RECUI À.....	34
FIGURE III. 9 SPECTRES FTIR DE PRÉ-DÉPÔT DES COUCHES PSG EN FONCTION DU TEMPS DE RECUI À T=700°C.....	35
FIGURE III. 10 SPECTRES FTIR DE PRÉ-DÉPÔT DES COUCHES PSG EN FONCTION DU TEMPS DE RECUI À T= 750°C.....	36
FIGURE III. 11 INFLUENCE DE TEMPÉRATURE ET LA DURÉE DE PRÉ DÉPÔT SUR LA RÉSISTANCE MOYENNE.	40

FIGURE III. 12 INFLUENCE DE TEMPÉRATURE ET LA DURÉE DE PRÉ DÉPÔT SUR UNIFORMITÉ.	40
FIGURE III. 13 IMAGES OBTENUS PAR MEB DES COUCHES PSG/SI-MC POUR LES ÉCHANTILLONS PD ₁ ET PD ₂	42
FIGURE III. 14 IMAGES OBTENUS PAR MEB DES COUCHES PSG/SI-MC POUR LES ÉCHANTILLONS PD ₃ ET PD ₄	43
FIGURE III. 15 IMAGES OBTENUS PAR MEB DES COUCHES PSG/SI-MC POUR LES ÉCHANTILLONS PD ₅ ET PD ₆	44
FIGURE III. 16 SPECTRES EDS D'UNE COUCHE PSG DÉPOSÉE SUR SI-MC POUR LES ÉCHANTILLONS PD ₁ ET PD ₂	45
FIGURE III. 17 SPECTRES EDS D'UNE COUCHE PSG DÉPOSÉE SUR SI-MC POUR LES ÉCHANTILLONS PD ₃ ET PD ₄	46
FIGURE III. 18 SPECTRES EDS D'UNE COUCHE PSG DÉPOSÉE SUR SI-MC POUR LES ÉCHANTILLONS PD ₅ ET PD ₆	47
FIGURE III. 19 SPECTRE LARGE D'XPS DE LARGE D'ÉCHANTILLONS PD ₁ ET PD ₂	50
FIGURE III. 20 SPECTRE LARGE D'XPS DE LARGE D'ÉCHANTILLONS PD ₃ ET PD ₄	51
FIGURE III. 21 SPECTRE LARGE D'XPS DE LARGE D'ÉCHANTILLONS PD ₅ ET PD ₆	52
FIGURE III. 22 DÉTERMINATION DE LA POSITION PSG DE L'ÉCHANTILLON PD-1 : SI ₂ P (EV):102/106; P ₂ P (EV) O1S (EV):535/539.	53
FIGURE III. 23 DÉTERMINATION DE LA POSITION PSG DE L'ÉCHANTILLON PD-2 : SI ₂ P (EV):102 /106; P ₂ P (EV):130.1 /139.5; O1S (EV):535/539.	54
FIGURE III. 24 DÉTERMINATION DE LA POSITION PSG DE L'ÉCHANTILLON PD-3 : SI ₂ P (EV):102 /106; P ₂ P (EV):130.1 /139.5; O1S (EV):535/539.	55
FIGURE III. 25 DÉTERMINATION DE LA POSITION PSG DE L'ÉCHANTILLON PD-4 : SI ₂ P (EV):102 /106; P ₂ P (EV):130.1 /139.5; O1S (EV):535/539.	56
FIGURE III. 26 DÉTERMINATION DE LA POSITION PSG DE L'ÉCHANTILLON PD-5 : SI ₂ P (EV):102 /106; P ₂ P (EV):130.1 /139.5; O1S (EV):535/539.	57
FIGURE III. 27 DÉTERMINATION DE LA POSITION PSG DE L'ÉCHANTILLON PD-6 : SI ₂ P (EV):102 /106; P ₂ P (EV):130.1 /139.5; O1S (EV):535/539.	58

Liste des tableaux

TABLEAU III. 1 LES DÉFÉRENTES TEMPÉRATURE ET LA DURÉE DE PRÉ-DÉPÔT ET LEUR ABRÉVIATION.	28
TABLEAU III. 2 DIFFÉRENTES LIAISONS MINÉRALES ET ORGANIQUES DU PHOSPHORE DANS LA COUCHE PSG DÉTECTÉES PAR FTIR.....	37
TABLEAU III. 3 LES DÉFÉRENTES TEMPÉRATURE ET TEMPS ET LEURS RÉSISTANCES CARRÉES.	38
TABLEAU III. 4 LES DÉFÉRENTES TEMPÉRATURES ET TEMPS ET LEURS RÉSISTANCES MOYENNES ET UNIFORMITÉ.....	39
TABLEAU III. 5 LES ÉLÉMENTS CHIMIQUES ET LEUR CONCENTRATION DANS LES ÉCHANTILLONS ÉTUDIER	48

TABLE DES ABREVIATION

1. Physique

Symbol	Définition	unités
φ_{spec}	le travail de sortie du spectromètre	eV
EC_{mes}	l'énergie cinétique du photoélectron mesurée	J
EL	L'énergie de liaison du niveau de cœur considéré	eV
XPS	La spectrométrie XPS (X-Ray Photo-electron Spectroscopy)	/
EDS	La spectroscopie de rayons X à dispersion d'énergie	/
FTIR	Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier	/
MEB	Microscopie Electronique à Balayage	/
FSF	Front Surface Field	/
σ	La résistivité de l'échantillon	$\Omega \cdot m$

d	L'épaisseur de disque (l'échantillon)	μm
K	Coefficient	/

UV	Ultra-violet	mW/m ²
FF	facteur de forme	/
IBC	La cellule à contacts arrière interdigités (Interdigitated Back Contacts)	/
Al-BSF	La cellule Aluminium Back Surface Field	/
PERC	La cellule Passivated Emitter Rear Cell	/
PERT	La cellule Passivated Emitter Rear Totally diffused	/
R _{sq}	La résistance carrée	Ω/□
V _{oc}	Tension de circuit ouvert	V
ZCE	Zone d'espace de charge	/
NC	La bande de conduction	eV
NV	La bande de valence	10 ¹⁹ cm ⁻³
E _g	L'énergie de gap	eV
<i>h</i>	Fréquence	Hz
<i>v</i>	La vitesse	m/s

2. Chimique

N ₂	Azote
O ₂	Oxygène
Si	Silicium
POCl ₃	L'oxychlorure de phosphore
BBr ₃	Tri bromure de bord
NaOH	L'hydroxyde de sodium
HCl	Acide chlorhydrique

SOMMAIRE

<i>Chapitre I</i>	3
<i>GENERALITE SUR LES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES</i>	3
I.1 Introduction	4
I.2 Contexte énergétique	4
I.3 L'énergie solaire	6
I.4 Le rayonnement solaire	6
I.5 L'effet photovoltaïque	7
I.5.1 Définition	7
I.5.2 Historique	7
I.6 Semi-conducteur	8
I.7 Différents types de dopage	9
I.7.1 Semi-conducteur dopé N	9
I.7.2 Semi-conducteur dopé P	10
I.8 La jonction PN	10
I.9 Principe de fonctionnement d'une cellule solaire	11
I.10 Les différentes types de cellule solaire à base de silicium	12
I.11 La cellule IBC	13
I.12 Définition de FSF Front Surface Field	13
I.13 Les étapes de la réalisation des FSF (Front Surface Field) pour les cellules solaires	14
I.14 Diffusion de Phosphore :	14
I.14.1 L'oxychlorure de phosphore, POCl_3 :	15
I.15 Conclusion	17
<i>Chapitre II</i>	18
<i>Les différentes techniques de caractérisatio</i>	18
II.1 Introduction	19

II.2	Microscopie Électronique à Balayage (MEB).....	19
II.3	Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR)	20
II.4	La méthode de quatre pointes alignées.....	21
II.5	La technique de pointe chaude	22
II.6	La spectroscopie de rayons X à dispersion d'énergie.....	23
II.7	La spectrométrie XPS (X-Ray Photo-electron Spectroscopy)	24
II.8	Conclusion	25
<i>Chapitre III.....</i>		26
<i>Procédure expérimentale et résultats.....</i>		26
III.1	Introduction.....	27
III.2	Protocole expérimentale.....	27
III.2.1	Les détails expérimentaux	27
III.2.2	Nettoyage et traitement des plaquettes du silicium	29
III.2.3	La diffusion de phosphore.....	29
III.3	La réalisation des FSF (Front Surface Field)	33
III.3.1	Préparation de l'échantillon	33
III.4	Résultats et discussion	34
III.4.1	Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR)	34
III.4.2	La résistance par carré.....	38
III.5	Le microscope électronique à balayage (MEB).....	41
III.6	La spectroscopie de rayons X à dispersion d'énergie (EDS).....	44
III.6.1	Interprétation de résultats	48
III.7	La spectrométrie XPS (X-Ray Photo-electron Spectroscopy).....	49
III.7.1	Interprétation des résultats	58
III.8	Conclusion	59
Conclusion générale		61

Références bibliographiques	64
Annexe.....	68

Introduction générale

Introduction générale

Dans le cadre de développement durable, face au double enjeu planétaire posé par l'épuisement prochain des ressources énergétiques fossiles et les problèmes posés vis-à-vis du respect de l'environnement, de fortes incitations poussent au développement des énergies renouvelables.

Aujourd'hui plus de 85% de l'énergie produite est obtenue à partir des matières fossiles telles que le pétrole, le charbon, le gaz naturel ou l'énergie nucléaire.

Il existe plusieurs ressources en énergies renouvelables : l'énergie hydraulique, l'énergie éolienne, l'énergie solaire thermique et photovoltaïque, l'énergie produite par les vagues et la houle, la géothermie et la biomasse. Ces ressources sont pratiquement inépuisables et propres et s'opposent à cet effet aux énergies fossiles.

Parmi les énergies renouvelables qui connaissent jour après jour des développements considérables, il y a l'énergie solaire qui est considérée depuis longtemps comme l'origine des majorités d'énergies.

La production d'électricité peut être aussi obtenue directement par la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire au moyen de photopiles. Cette dernière, bien qu'elle soit connue depuis de nombreuses années, comme source pouvant produire de l'énergie allant de quelques milliwatts aux mégawatts, reste à un stade anecdotique et ne se développe pas encore dans de grandes proportions, notamment à cause du coût trop élevé des capteurs mis en œuvre [1].

L'objectif de ce mémoire est l'étude de la formation des couches PSG et de la diffusion du phosphore à partir de ces couches.

Cette étude fait partie des recherches menées au sein du CRTSE dont afin d'étudier l'effet de la variation de la température et la durée de pré-dépôt sur la formation des couches PSG (Phosphorous Silicate Glass) sur des substrats en silicium multi-cristallin de type P par des sources dopantes préformes pour objectif de la réalisation des FSF.

Le premier chapitre est une introduction sur les cellules photovoltaïques et leur principe de fonctionnement, les méthodes de dopage, les différentes types de cellule solaire à base de silicium et les étapes de la réalisation des FSF pour les cellules solaires.

Dans le deuxième chapitre, nous présenterons une description détaillée des différentes techniques de caractérisation, de leurs principes de fonctionnement et de leur objectif. Les couches élaborées ont été caractérisées par les techniques suivantes :

- Microscopie Electronique à Balayage (MEB).
- Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR).
- La méthode de quatre pointes alignées.
- La technique de pointe chaude.
- La spectroscopie de rayons X à dispersion d'énergie (EDS).
- La spectrométrie XPS (X-Ray Photo-electron Spectroscopy).

Le dernier chapitre de ce mémoire est consacré à l'étude de la formation des couches PSG (Phosphorous Silicate Glass) ainsi que l'effet de température et la durée de pré dépôt pour ces derniers et l'application des techniques de caractérisation avec leur résultats et l'interprétation de chaque technique sont aussi présenté dans cette partie.

CHAPITRE I

***GENERALITES SUR LES CELLULES
PHOTOVOLTAÏQUES***

I.1 Introduction

Ce premier chapitre est destiné à constituer une base théorique et bibliographique afin d'aider à la compréhension des chapitres suivants. Représente la consommation énergétique et l'effet de photovoltaïque et le principe de fonctionnement de cellule photovoltaïque les différents types de cellule solaire (PERC, PERT et IBC) Par la suite la réalisation des FSF pour les cellules solaires et la diffusion de phosphore.

I.2 Contexte énergétique

La demande mondiale de l'énergie a atteint sa forte croissance, ce qui nécessite de revoir les différentes politiques énergétiques tout en basant sur la transition énergétique. Ce fait nous permet d'une part de diversifier les sources de l'énergie et d'autre part d'assurer la sécurité énergétique.

La montée en puissance de certains pays en voie de développement, plus particulièrement l'Asie et l'Amérique du sud, ainsi que l'augmentation de la population mondiale et l'accroissement du revenu moyen par habitant mènent à une hausse constante en besoins énergétiques

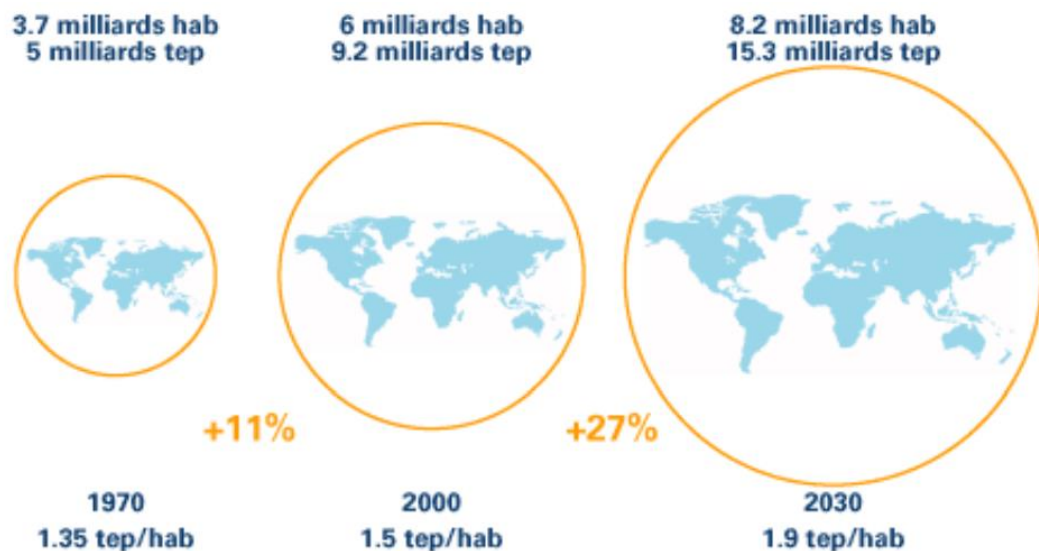


Figure I.1 Comparaison de l'évolution de la population mondiale et de la consommation énergétique mondiale, par habitant. [1]

Les énergies renouvelables, également appelées énergies propres ou vertes, sont des sources d'énergie qui se renouvellent naturellement et en continu.

Les énergies renouvelables présentent de nombreux avantages, notamment en termes de réduction des émissions de gaz à effet de serre et de lutte contre le réchauffement climatique. Cependant, elles présentent également des inconvénients, tels que des coûts relativement importants à l'achat des installations et une dépendance aux conditions météorologiques pour certaines d'entre elles. L'Agence Internationale de l'Energie (IEA, International Energy Agency) propose des scénarii sur l'avenir énergétique et son impact sur l'économie ou le climat. Dans leur scénario central les énergies renouvelables tiennent une place particulièrement importante, et notamment le solaire photovoltaïque. [1]

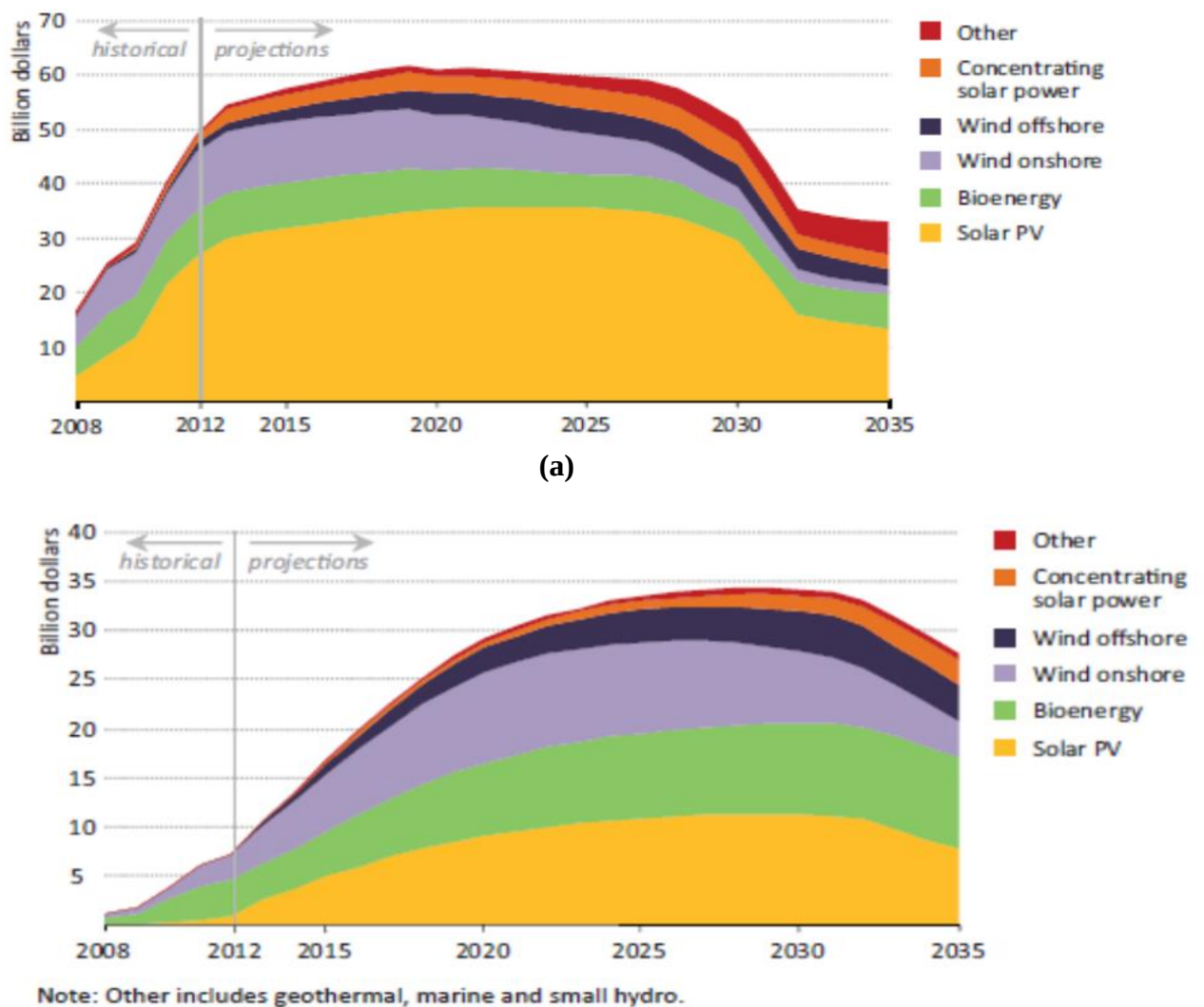


Figure I. 2 Scénario avancé par l'IEA quant aux investissements à venir pour les différentes énergies renouvelables concernant, l'Union Européenne (a) et la Chine (b) [1]

I.3 L'énergie solaire

L'énergie solaire est une source d'énergie qui dépend du soleil. Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité à partir de panneaux photovoltaïques ou des centrales solaires thermiques, grâce à la lumière du soleil captée par des panneaux solaires. [2].



Figure I. 3 conversion de l'énergie solaire

I.4 Le rayonnement solaire

Le soleil émet de l'énergie dans toutes les directions, et la Terre intercepte et reçoit une partie de cette énergie. Le flux de puissance atteignant le sommet de l'atmosphère de la Terre est d'environ 1400 watts / m². L'atmosphère relativement dense de la Terre filtre environ 400W/m², y compris la plupart des rayons ultraviolets.

Les rayonnements émis sont de type électromagnétique. Ils constituent un spectre continu allant des ultra-violets à l'infrarouge en passant par le visible ou il émet avec le maximum d'intensité. Les rayons solaires prennent 8.33 minutes pour arriver à la terre puis qu'ils se propagent à une vitesse de 3×10^5 km S⁻¹ et la distance entre la terre et le soleil 15.9×10^6 km [2].

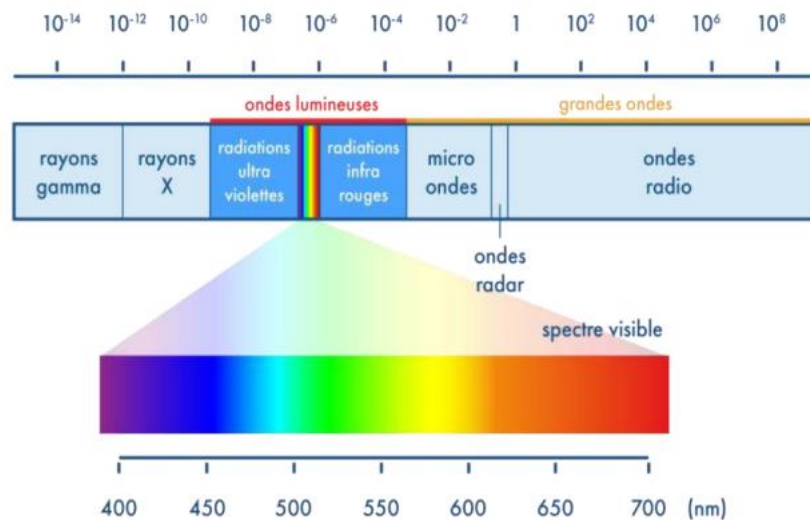


Figure I. 4 Spectre électromagnétique [3].

I.5 L'effet photovoltaïque

I.5.1 Définition

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par la production et le transport, dans le semi-conducteur, de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière.

I.5.2 Historique

L'effet photovoltaïque a été découvert en 1839 par Alexandre Edmond Becquerel, qui a démontré qu'il s'agissait d'une conversion directe de la lumière en énergie électrique. A cette époque, les appareils électriques n'existaient pas encore, donc il n'y avait pas d'utilisation pratique de cette découverte.

En 1905, Albert Einstein a écrit que la lumière pouvait entrer à l'intérieur des atomes, et que la collision entre les photons et les atomes pouvait faire sortir des électrons de leurs orbites et permettre la création d'un courant électrique.

Il a fallu attendre le XXème siècle pour voir se développer aux États-Unis une série de travaux et de réalisations se rapportant à l'énergie solaire. Les laboratoires de Bell Telephone (États-Unis) vont en 1954 mettre au point la première cellule photovoltaïque de rendement acceptable (environ 6%). Ce rendement a été par la suite augmenté grâce à la découverte de la photosensibilité du silicium, qui pouvait être augmentée en ajoutant des impuretés.

Ceci a permis d'atteindre des rendements proches de 15% au début des années 1960. Lors de la course vers l'espace, les photopiles ont fait des progrès intéressants. En effet, les photopiles sont une solution idéale pour combler les besoins en électricité des satellites.

En 1973, suite au choc pétrolier, l'énergie solaire subit un essor considérable. Au début des années 90, la prise de conscience des limites de l'électrification rurale conventionnelle (le réseau câblé), oblige les marchés du photovoltaïque à s'ouvrir afin d'atteindre les campagnes de façon plus rentable [4].

I.6 Semi-conducteur

Un semi-conducteur dit intrinsèque est un matériau idéal ne possédant ni défaut physique ni défaut chimique. Le monocristal du silicium possède une structure de type Tétraédrique c'est à dire que chaque atome est entouré symétriquement de 4 atomes. Lorsque le corps est parfaitement pur, il est qualifié d'intrinsèque. Exemples : Silicium (Si), Germanium (Ge), Sélénium (Se). Le Silicium est un atome tétravalent : Il possède 4 électrons de valence qui vont se mettre en commun avec d'autres atomes de Silicium pour avoir la forme cristalline.

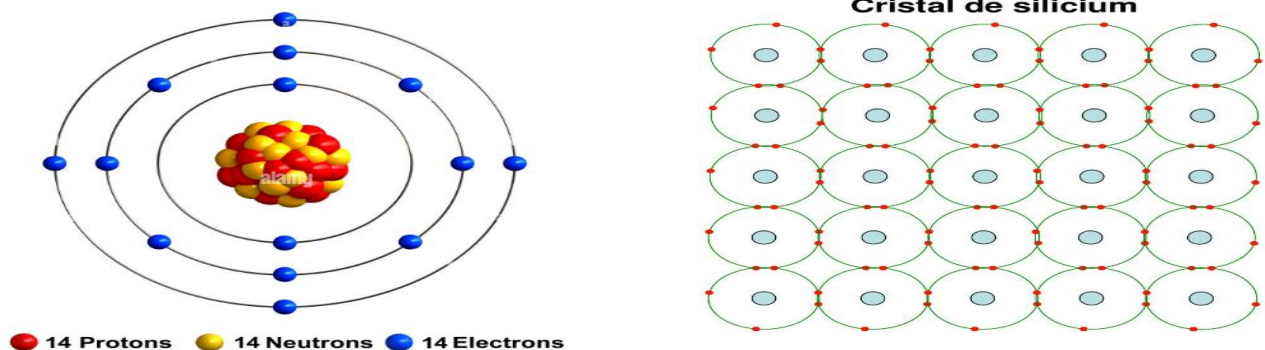


Figure I. 5 Atome de Silicium Cristal de Silicium.

On qualifie le silicium d'intrinsèque lorsqu'il ne présente pas d'impuretés dopantes. Un tel Silicium est en pratique impossible à obtenir. Dans un silicium intrinsèque, il existe autant de trous que d'électrons libres susceptibles de participer à la conduction, mais leur densité n_i est très faible à température ambiante si bien que la résistivité (ρ) théorique du matériau est de $3.2 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$. La densité n_i s'exprime en fonction de densités d'états effectives de la bande de conduction (N_C) et de la bande de valence (N_V) ainsi que l'énergie de bande interdite E_g (1.12eV à 300 °K dans le Silicium) [6]. Le dopage est l'introduction dans un semi-conducteur intrinsèque de très faible quantité d'un corps étranger appelé dopeur. Pour

les semi-conducteurs usuels (Si, Ge), les Dopeurs utilisés sont Soit des éléments pentavalents ayant 5 électrons périphériques.

- Exemples : L'Arsenic (As), l'Antimoine (Sb), le Phosphore (P), ...

Soit des éléments trivalents : ayant 3 électrons périphériques.

- Exemples : Le Bore (B), le Gallium (Ga), l'Indium (In), ... Après le dopage, le semi-conducteur n'est plus intrinsèque mais extrinsèque

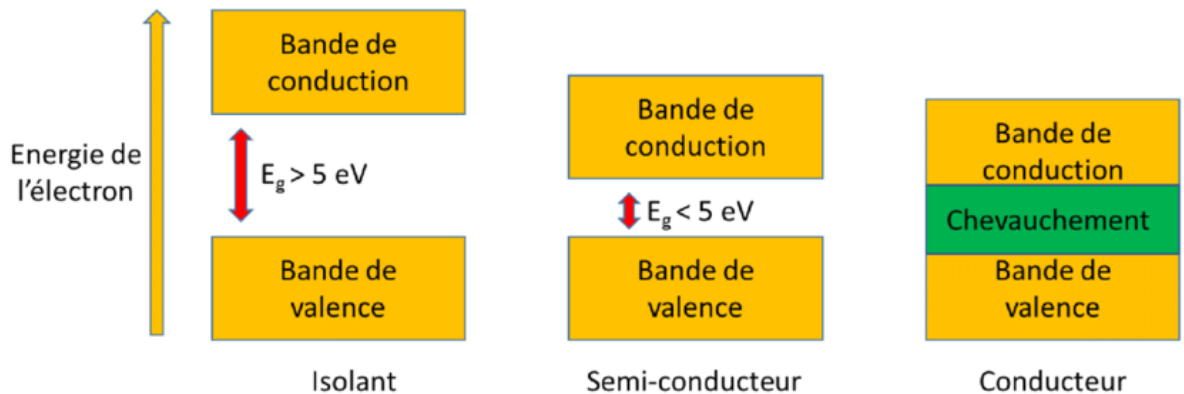


Figure I. 6 Structure en Bandes d'énergie pour les isolants, les semi-conducteurs et les conducteurs. [5].

I.7 Différents types de dopage

Les semi-conducteurs intrinsèques n'ont pas une grande utilité en tant que tels ; ils servent de base aux semi-conducteurs dopés : on y rajoute des impuretés pour modifier leur propriété électronique. Il existe deux types de semi-conducteurs extrinsèques :

I.7.1 Semi-conducteur dopé N

Un semi-conducteur de type N est un semi-conducteur intrinsèque, dans lequel on introduit des impuretés qui possèdent 5 électrons sur leur couche externe (Phosphore ou Arsenic...). Les impuretés sont appelées des donneurs parce qu'elles donnent un électron à la bande de conduction. Quatre électrons d'atome de silicium voisins sont mis en commun avec quatre électrons de l'atome donneur. Le cinquième électron est faiblement lié à l'impureté. Dans un semi-conducteur de type N, les électrons sont majoritaires, les trous sont minoritaires, et la conduction est assurée par les électrons.

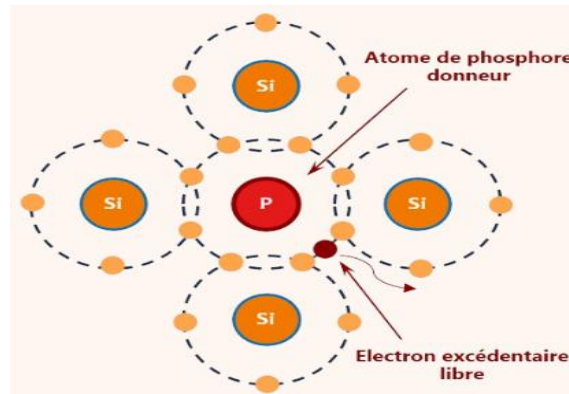


Figure I. 7 silicium dopé ou phosphore

I.7.2 Semi-conducteur dopé P

Un semi-conducteur de type P est un semi-conducteur intrinsèque, dans lequel on introduit des impuretés, qui possèdent trois électrons sur leur couche externe (Bore, Indium,). Ces impuretés sont appelées des accepteurs parce qu'elles acceptent un Electron de la bande de conduction afin de réaliser une liaison avec le cristal semi-conducteur. L'atome dopant a perdu sa neutralité et est Devenu alors un ion fixe négatif par capture d'un électron. Dans un semi-conducteur de type P, les trous sont les Majoritaires, les électrons sont les minoritaires, et Conduction est assurée par les trous [5].

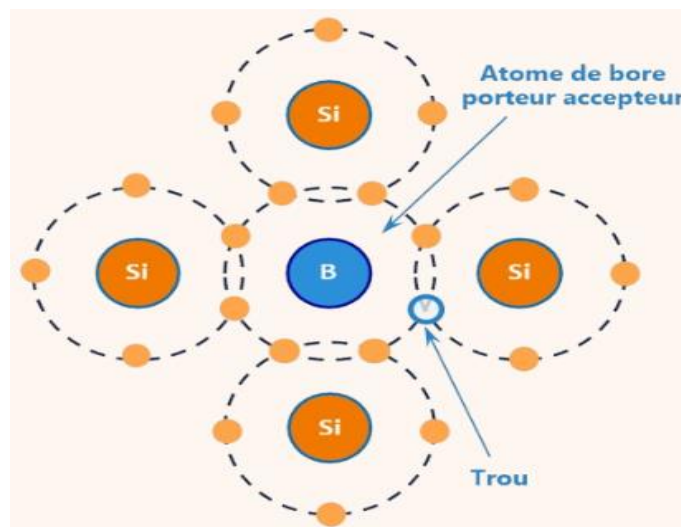


Figure I.8 silicium dopé ou bord

I.8 La jonction PN

Lorsque les deux zones sont mises en contact, certains électrons de semi-conducteur de type N passent vers le matériau de type P tandis que les trous du semi-conducteur de type P

se déplacent au même moment dans la direction opposée. Le mouvement de ces charges majoritaires forment des paires électron-trou neutre, nous obtenons alors une région appelée jonction PN dans laquelle la conductibilité passe progressivement du type P au type N. [6].

I.9 Principe de fonctionnement d'une cellule solaire

La cellule photovoltaïque est un dispositif qui convertit l'énergie lumineuse en électricité grâce à l'effet photoélectrique. Composée de plusieurs couches de matériaux semi-conducteurs, elle fonctionne sur le principe de la jonction p-n, Cette transformation est basée sur trois mécanismes suivants :

- Absorption des photons (dont d'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif.
- Conversion de l'énergie du photon énergie électrique, ce qui correspond à la création de paires électron /trou dans la matériau semi-conducteurs
- Collecte des particules générées dans le dispositif

Le matériau constituant la cellule photovoltaïque (généralement le silicium) doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant d'où l'intérêt des semi-conducteurs pour l'industrie photovoltaïque. Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les pairs électron/trou créées est nécessaire. la figure suivante présent fonctionnement des cellules photovoltaïque [7].

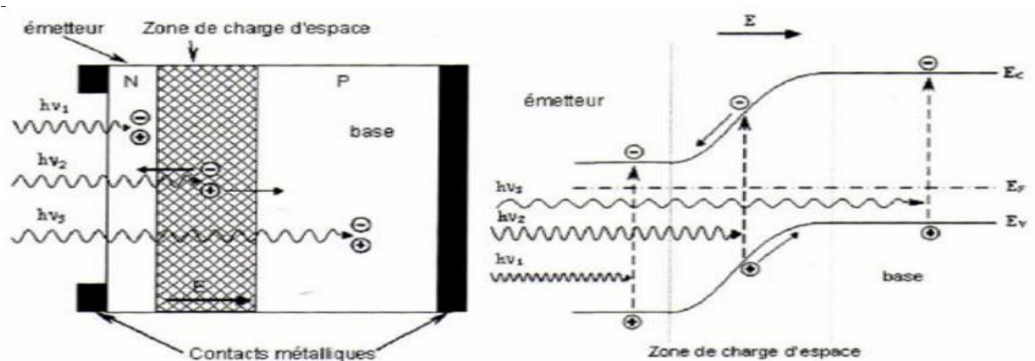


Figure I. 9 structure de la jonction PN sous éclairement [7].

I.10 Les différentes types de cellule solaire à base de silicium

- Les cellules Aluminium Back Surface Field (Al-BSF)
- Les cellules Passivated Emitter Rear Cell (PERC)
- Les cellules Passivated Emitter Rear Totally diffused (PERT).
- La cellule IBC (Interdigitated Back Contacts)

Elles sont représentées sur la figure 1.10 Ces trois premier architectures sont encore aujourd'hui les plus commercialisées dans l'industrie du photovoltaïque [8].

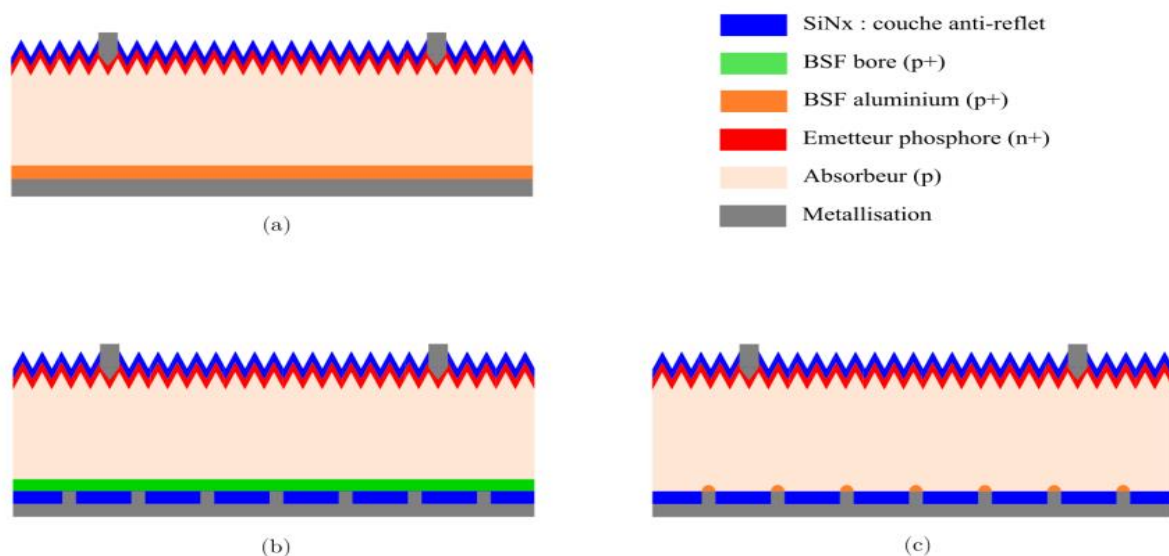


Figure I. 10 Présentation des différentes architectures : (a) Al BSF, (b) PERT et (c) PERC.

La principale différence entre elles réside dans la face arrière. La structure des cellules Al-BSF est considérée comme l'architecture la plus simple [9]. La présence d'un BSF (Back Surface Field) en face arrière obtenu par diffusion de l'aluminium sur un substrat de type p permet de créer un champ répulsif pour les porteurs minoritaires en face arrière, entraînant une réduction des recombinaisons surfaciques. Une telle amélioration entraîne une nette augmentation du Voc[10]

L'ajout d'une couche de passivation en face arrière avec un BSF localisé contribue à une augmentation significative de la durée de vie des porteurs de charges et améliore la

réflexion optique en face arrière. Cette amélioration technologique donne naissance à la cellule PERC [11]. La cellule PERT est obtenue en remplaçant le BSF aluminium par un BSF bore, tout en suivant le même procédé que la PERC.

I.11 La cellule IBC

La cellule à contacts arrière interdigités (Interdigitated Back Contacts, IBC), est représentée dans la Figure I.11 [12] se différencie par son placement de tous les contacts, de l'émetteur et du BSF en face arrière ; avec en face avant une région sur-dopée du même type que l'absorbeur (Front Surface Field, FSF), qui joue le même rôle que le BSF. L'intérêt est d'augmenter à la fois le J_{sc} en diminuant les pertes d'ombrage dues au masquage de la cellule par les contacts en face avant, et le FF en augmentant la fraction de surface contactée grâce à l'absence de contacts en face avant, qui permet d'éviter le compromis entre problèmes d'ombrage et pertes résistives. Le procédé de fabrication, en particulier pour des cellules à hautes performances, est plus compliqué que pour les cellules Al-BSF et PERC, et peut nécessiter plusieurs étapes de gravure (avec photolithographie ou procédé laser) et des étapes d'implantation ionique pour la formation de l'émetteur et du BSF afin de réduire les pertes électriques par rapport à la diffusion [13].

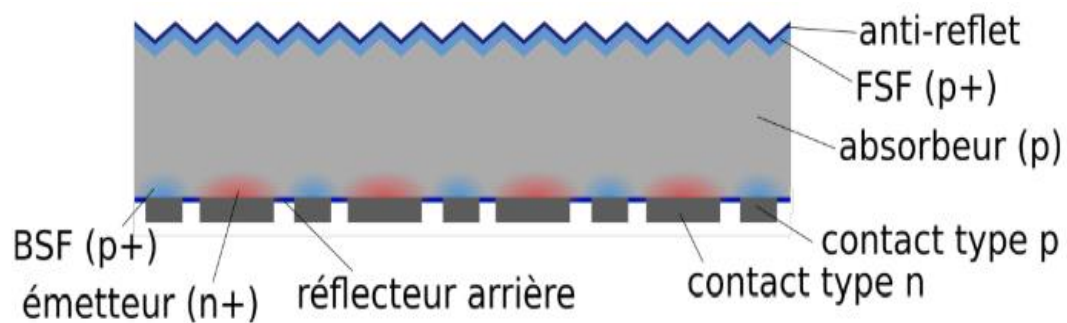


Figure I. 11 Cellule IBC

I.12 Définition de FSF Front Surface Field

Est une technique de passivation qui consiste à former un champ de surface avant sur une cellule solaire pour améliorer l'efficacité de la conversion de l'énergie solaire en électricité. Cette technique est utilisée pour réduire la recombinaison de surface et abaisser la résistance série, ce qui permet d'augmenter la tension de circuit ouvert et le courant de court-circuit de la cellule solaire. Le FSF est également utilisé pour réduire la dégradation de la cellule solaire due à l'exposition aux UV.

I.13 Les étapes de la réalisation des FSF pour les cellules solaires

1. **Dopage du silicium** Le silicium est dopé avec des impuretés comme le bore ou le phosphore pour créer une jonction PN dans la cellule solaire.
2. **Formation du FSF** Un dopage supplémentaire, souvent avec du phosphore, est appliqué sur la face avant de la cellule pour créer un champ électrique supplémentaire à la surface, aidant à collecter les porteurs de charge.
3. **Dépôt de la couche antireflet** Une couche antireflet, généralement en nitrure de silicium (SiN), est déposée sur la face avant pour réduire les pertes par réflexion et améliorer l'absorption de la lumière.
4. **Métallisation des contacts** Des contacts métalliques sont déposés sur les faces avant et arrière de la cellule pour collecter et acheminer les porteurs de charge.
5. **Passivation de la surface** : Une couche de passivation est appliquée pour réduire les recombinaisons de porteurs de charge à la surface, améliorant ainsi le rendement de la cellule.

Ces étapes visent à optimiser la collecte des porteurs de charge photo-générés dans la cellule solaire, contribuant à améliorer son efficacité de conversion photovoltaïque [14].

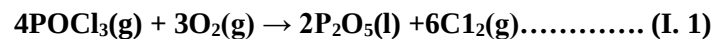
Le champ de surface avant (FSF) est un élément crucial dans la conception et l'optimisation des cellules solaires à contacts interdigités (IBC) industrielles. Le FSF est formé par un processus de diffusion qui crée une région n^+ sur la surface avant de la cellule, servant de barrière à la recombinaison et améliorant la conductivité des porteurs majoritaires. L'optimisation du FSF est essentielle pour les performances des cellules solaires IBC, et en étudiant l'influence de la qualité de la passivation de la surface avant et de la résistivité de base, il est possible d'améliorer les performances et la fiabilité de la cellule solaire. [15].

I.14 Diffusion de Phosphore :

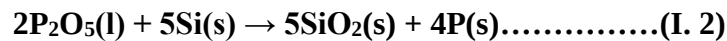
Différentes méthodes existent pour la formation de ces émetteurs par la diffusion de Phosphore, la différence est à la fois dans les précurseurs et les techniques utilisées pour le dépôt de la source, ainsi que dans la méthode employée pour réaliser la diffusion. [16].

I.14.1 L'oxychlorure de phosphore, POCl_3 :

Le procédé industriel le plus répandu pour la formation d'émetteur dans les cellules Solaires au silicium multi-cristallin est la diffusion de P à partir d'une source d'oxychlorure de phosphore liquide (POCl_3) dans un tube en quartz fermé à pression contrôlée (Lydop). Une fois que les échantillons sont chargés dans le tube, le four doit être chauffé jusqu'à la température désirée avant d'ouvrir tous les débits des gaz. Au cours de la phase initiale du processus de diffusion. La source liquide pendant la diffusion où il s'évapore et réagit avec O_2 pour former du P_2O_5 sur la surface des plaquettes de mc-Si, selon la réaction :



Pendant le pré-dépôt, le chlore gazeux Cl_2 , est continuellement évacué du système. L'alimentation de POCl_3 dans le tube est ensuite coupée afin de contrôler l'épaisseur ou la quantité de P_2O_5 . Par la suite la diffusion du P dans le Si aura lieu lors de la réduction de P_2O_5 par Si selon la réaction :



Les figures qui suivent décrivent le principe général des processus de diffusion usuels, (pour notre cas, un solide (POCl_3) contenant les dopants est utilisé) ainsi que des gaz de transport (oxygène et azote) :

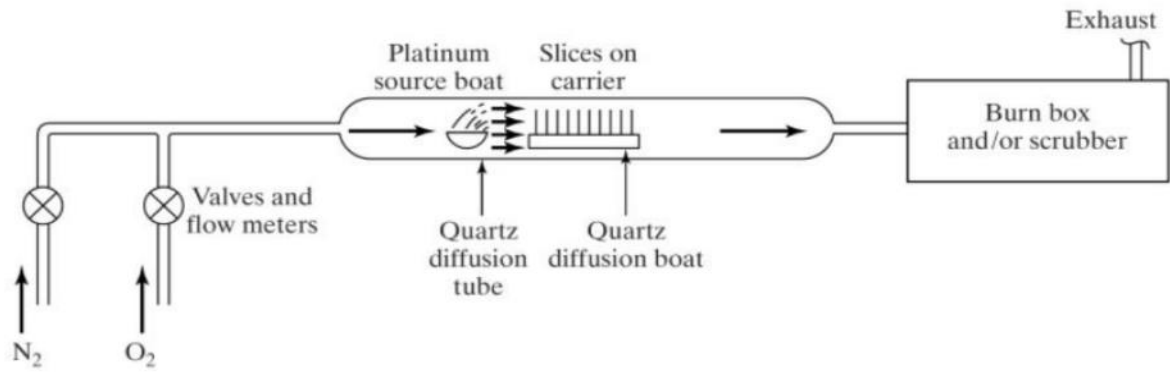
I.14.1.1 A partir de sources gazeuses :

Le gaz contenant l'espèce dopante est introduit dans l'atmosphère

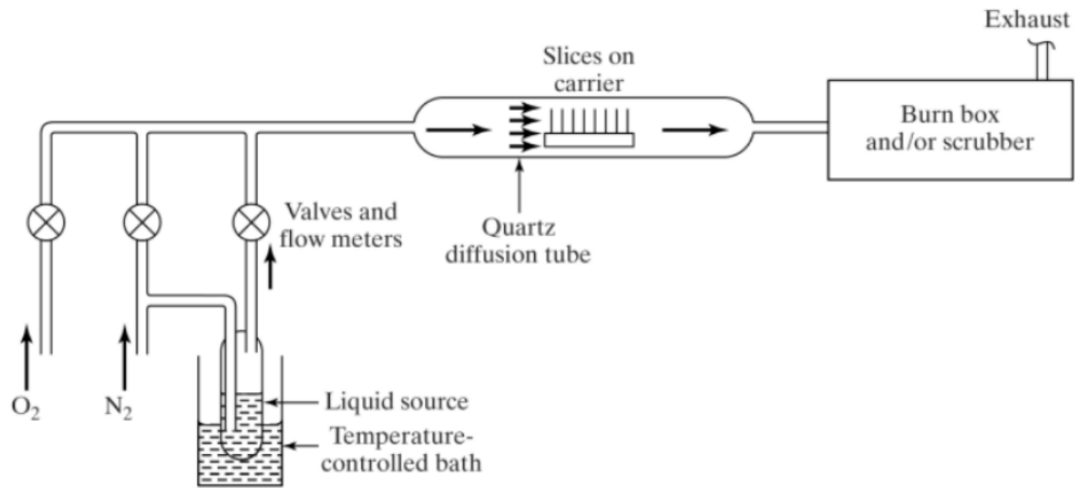
I.14.1.2 A partir de sources liquides :

Le gaz vecteur barbote dans le liquide ou frôle sa surface à température choisie. La pression partielle du composé dans le gaz est égale à la tension de vapeur liquide.

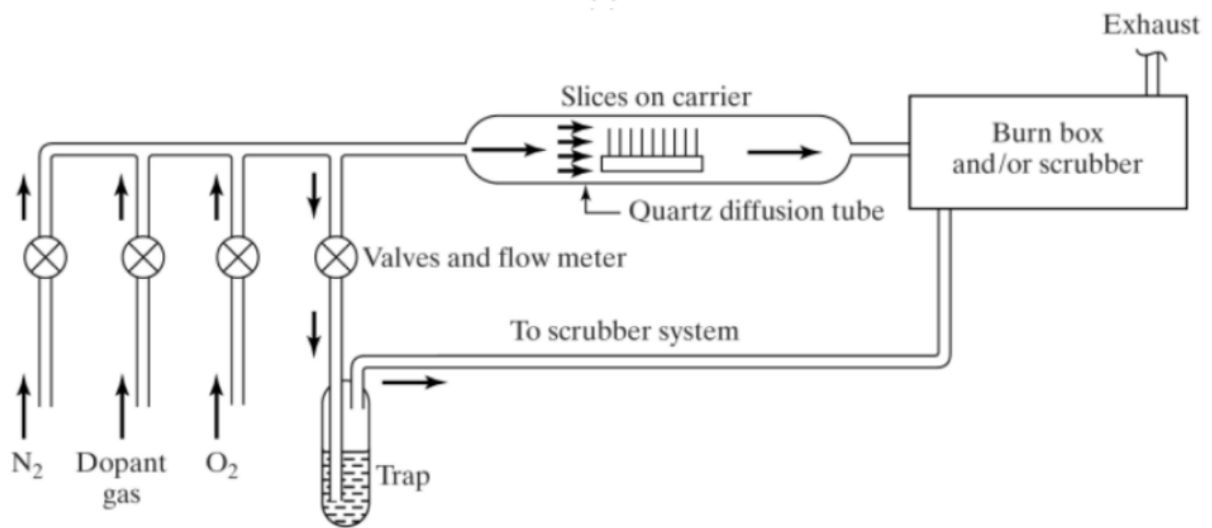
L'échantillon à doper est placé dans l'enceinte. L'impureté est transportée jusqu'au matériau par gaz vecteur inerte, à partir d'un composé solide qui se sublime.



(a)



(b)



(c)

Figure I. 12 Les procédés de diffusion : a) source solide, b) source liquide, c) source gazeuse [16]

I.15 Conclusion

Dans ce chapitre il est rappelé sur historique sur l'effet photovoltaïque puis nous avons présentés le matériau qui constitue la cellule solaire photovoltaïque et ces différentes types de dopage et le principe de fonctionnement de cellule solaire, les différentes types de cellules solaire à base de silicium, enfin nous parlons sur la diffusion de phosphore.

CHAPITRE II

LES DIFFERENTES TECHNIQUES DE CARACTERISATIO

II.1 Introduction

Ce chapitre vise à fournir un aperçu complet des techniques de caractérisation, à sensibiliser à leur importance dans le processus de déterminer les différentes propriétés de nos échantillons.

II.2 Microscopie Électronique à Balayage (MEB)

On utilise MEB pour les Caractérisations Morphologiques permet d'explorer la surface d'un échantillon point par point en utilisant un faisceau d'électrons produits par une cathode. Sous l'impact de ce faisceau d'électrons accélérés, qui perdent leur énergie par collisions multiples avec les atomes du matériau, il y'a essentiellement émission d'électrons secondaires provenant de l'ionisation des atomes du matériau, rétrodiffusion d'électrons du faisceau incident, émission d'électrons Auger et de rayons X caractérisant les éléments présents dans l'échantillon dans la (figure II.1) Ces particules émises lors de l'interaction entre le faisceau d'électrons et l'échantillon sont recueillies sélectivement et de manière synchrone par des détecteurs qui génèrent un signal servant à reconstruire l'image en modulant la brillance d'un tube cathodique.

Un microscope électronique à balayage comprend les composants principaux suivants :

- Le canon à électrons servant à produire les électrons primaires.
- La colonne électronique constituée de lentilles électromagnétiques focalisantes et des bobines de déflexion permettant de déplacer le faisceau et donc de balayer l'échantillon.
- Détecteur d'électrons secondaires ; Le détecteur d'électrons rétro-diffusés .
- Le détecteur de rayons X (EDS). [1]

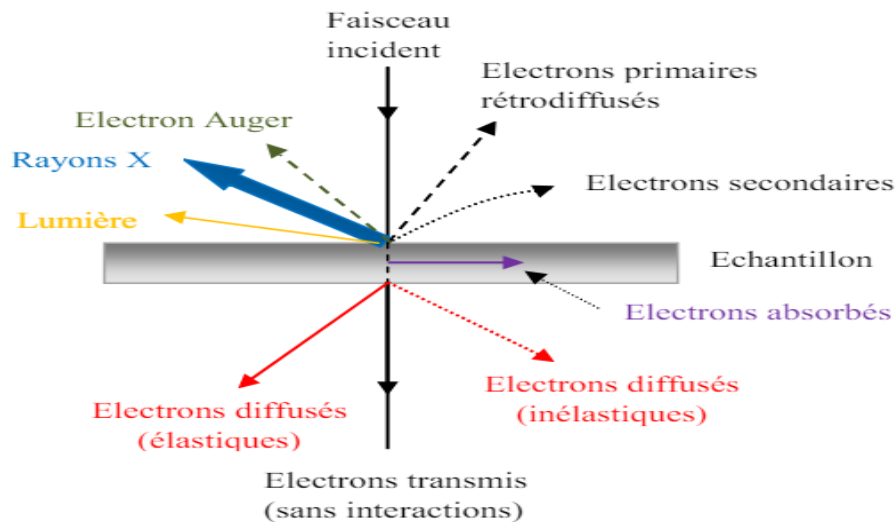


Figure II. 1 Ensemble des radiations pouvant être émises lors de l'interaction entre le faisceau d'électrons et l'échantillon

II.3 Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR)

Le but d'utiliser FTIR pour les Caractérisations structurales leur principe de fonctionnement est Lorsque l'échantillon est placé, le faisceau infrarouge codé interagit avec ce dernier où certaines fréquences peuvent être absorbées ou partiellement absorbées. Le détecteur enregistre l'intensité du signal à la sortie de l'échantillon en générant un « interférogramme de l'échantillon » appelé « Sample interferogram ». En conséquence, le faisceau recueilli à la sortie de l'échantillon est différent de celui le heurtant à l'entrée. C'est comme si l'échantillon a laissé une « empreinte digitale » dans le faisceau infrarouge.

En effet, l'ordinateur décode les données relatives à chaque interférogramme pour obtenir une courbe d'énergie en utilisant un calcul mathématique complexe à Transformée de Fourier, appelé « Transformée de Fourier Rapide ». Cette courbe d'énergie montre l'intensité de la radiation atteignant le détecteur à chaque fréquence. La comparaison des deux courbes indique que le changement d'intensité à une fréquence donnée est dû tout simplement à l'énergie absorbée par l'échantillon à cette fréquence. La formule utilisée pour calculer le spectre de transmission est une simple division de la courbe d'énergie de l'échantillon par la courbe d'énergie de référence pour obtenir un pourcentage. [1]

Ce spectromètre FTIR est composé principalement de

- Source
- Interféromètre
- Détecteur
- Compartiment échantillon
- Laser
- Ordinateur.

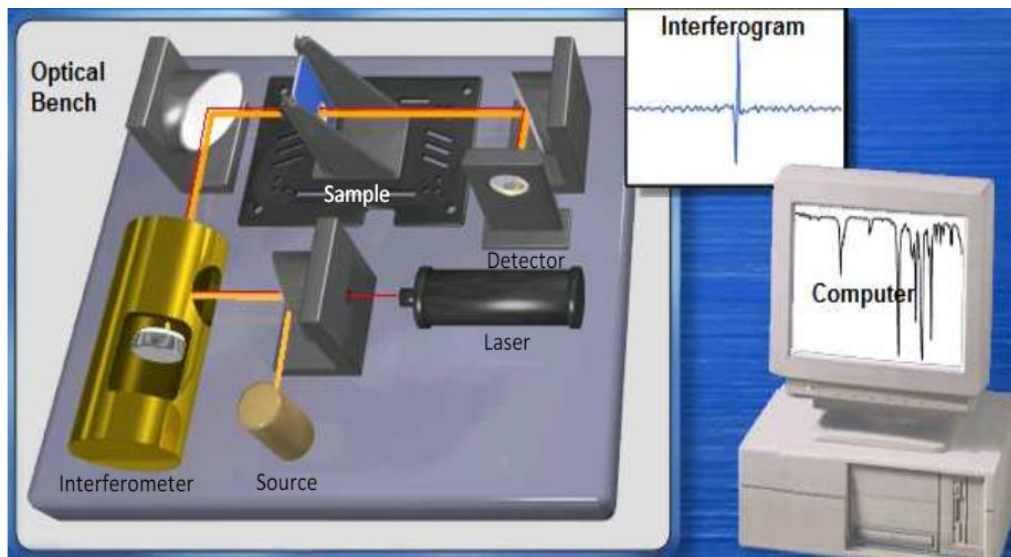


Figure II. 2 Schéma de principe d'un spectromètre FTIR [1]

II.4 La méthode de quatre pointes alignées

On utilise pour mesurer la résistivité électrique d'un matériaux conducteur son principe est composé d'appliquer quatre pointes métalliques (quatre électrodes) alignées sur la surface de l'échantillon représenté dans la figure II.3

Dans la disposition des 4 pointes alignées, les deux électrodes externes (1,4) servent à amener le courant i , alors que les deux électrodes internes (2,3) permettent la mesure de la différence de potentiel ΔV , dont l'écart entre deux électrodes est de 1mm. [2]

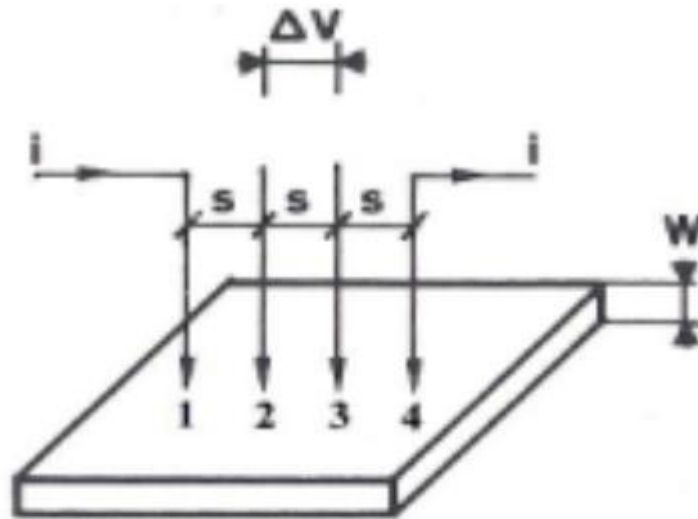


Figure II. 3 Principe de la détermination de La résistivité par la méthode de 4 pointes

Alignées [2]

Pour mesurer la résistivité on donne

$$\Delta V/i = k. \sigma / d \dots\dots\dots (II.1)$$

D'où:

$$k = \ln 2 / \Pi \dots\dots\dots (II.2)$$

σ : La résistivité de l'échantillon

d : L'épaisseur de disque (l'échantillon)

K : Coefficient

Alors

$$\sigma = d.(\Delta V/i). (\Pi / \ln 2) \dots\dots\dots (II.3)$$

II.5 La technique de pointe chaude

La technique de la pointe chaude consiste à déterminer le type du semi-conducteur. Elle est rapide, fiable et efficace pour déterminer le type de sa conductivité. Le principe est simple, il suffit d'appliquer une source de chaleur (exemple : fer à souder) et de relier la couche mince du semi-conducteur à un milliampèremètre. Le fer à souder va jouer le rôle d'une source de chaleur pour l'une des électrodes du milliampèremètre qui va indiquer une valeur positive ou

négative ; ce qui permet d'en déduire le type des porteurs majoritaires (sens positif (type n), sens négatif (type p)). [3]

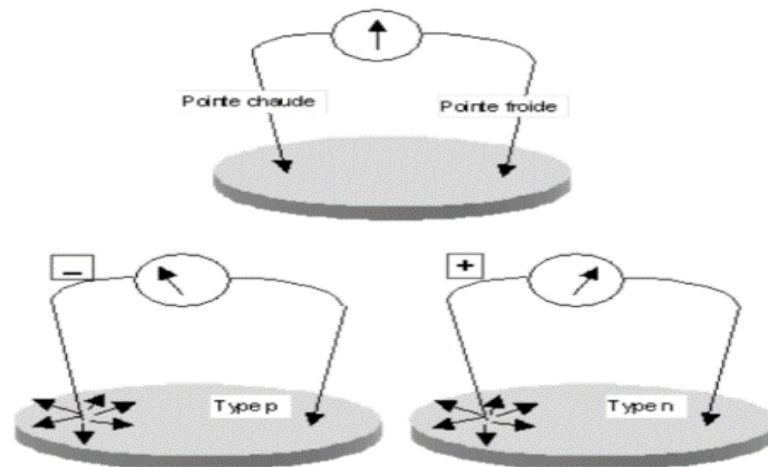


Figure II. 4 Principe de la technique de pointe chaude. [3]

II.6 La spectroscopie de rayons X à dispersion d'énergie

Est un outil essentiel pour la caractérisation approfondie de la composition chimique qui tire profit des rayons X émis par l'échantillon. A, le faisceau d'électrons peut expulser un électron d'une couche plus ou moins interne d'un atome constituant l'échantillon.

Ce phénomène se réalise sur un grand nombre d'atomes à la fois quand l'échantillon est placé sous le faisceau. Ces RX ont des énergies spécifiques pour chaque atome puisqu'ils dépendent des niveaux d'énergie, ce qui permet une étude de la composition chimique aussi bien qualitative que quantitative de l'échantillon. [4]

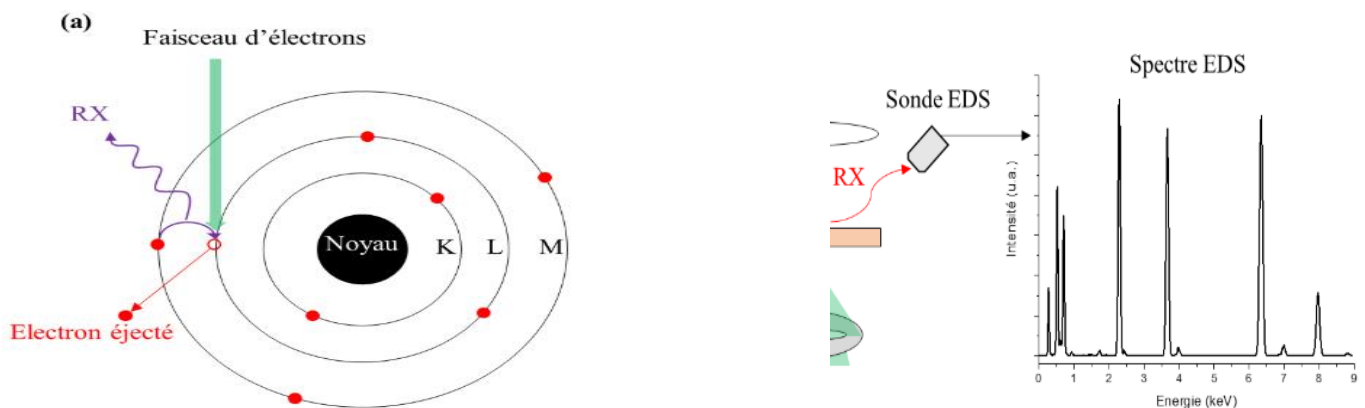


Figure II. 5 (a) Phénomène physique à la base de l'analyse EDS (b) Exemple d'un spectre EDS [4]

II.7 La spectrométrie XPS (X-Ray Photo-electron Spectroscopy)

La spectroscopie de photoélectrons par rayons X, ou X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS), est une technique de caractérisation de surface non destructive qui repose sur l'utilisation de l'effet photoélectrique.

La mesure par XPS repose sur l'étude de la distribution en énergie cinétique des photoélectrons éjectés d'un échantillon sous l'impact de rayons X d'énergie $h\nu$ connue. La variation de l'énergie de liaison des photoélectrons en fonction de l'environnement chimique des atomes dont ils sont issus est à l'origine du principal intérêt de cette technique. Ainsi, la profondeur d'analyse ne dépasse pas 10 nm.

La spectroscopie de photoélectrons par rayons X repose sur le principe de la conservation de l'énergie du photon incident et s'exprime comme suit :

$$h\nu = E_c + E_L + \varphi_{ech} \dots\dots\dots (II.4)$$

Avec

$h\nu$: l'énergie du photon incident (h étant la constante de Planck et ν la fréquence du photon incident)

E_c : l'énergie cinétique du photoélectron

E_L : l'énergie de liaison du niveau de cœur considéré φ_{ech} le travail de sortie de l'échantillon [5]

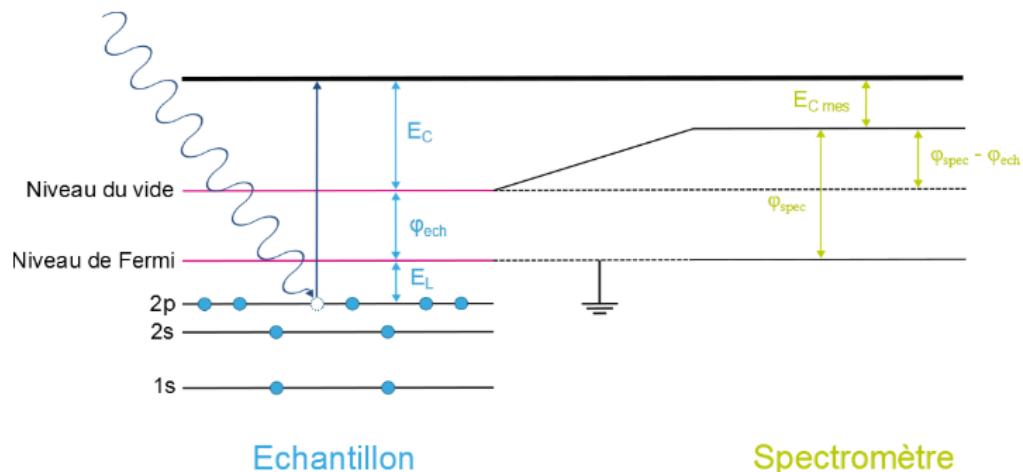


Figure II. 6 Conservation de l'énergie totale lors d'un phénomène photo électronique, ainsi que lors de sa mesure par un spectromètre. [5]

Ainsi, au niveau du spectromètre, la conservation de l'énergie s'exprime comme suit :

$$EL = h\nu - E_{C,mes} - \varphi_{spec} \dots\dots\dots (II.5)$$

Avec

$E_{C,mes}$: l'énergie cinétique du photoélectron mesurée

φ_{spec} : le travail de sortie du spectromètre

II.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons vu les principes de fonctionnement, l'utilisation et les spécifications des différentes techniques de caractérisation et que chaque technique utilisées nous permet de déterminer les différentes caractéristiques que ça soit morphologiques, structurales, et électriques des films élaborés. Le reste de ce manuscrit sera consacré à l'analyse des différents résultats de mesures.

CHAPITRE III
PROCEDURE EXPERIMENTALE ET
RESULTATS

III.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est de présenter les procédures expérimentales utilisées pour la diffusion du phosphore à partir de source solide (source préforme) sur le silicium multi cristallin (mc-Si) et l'Influence de la température ainsi la durée de pré-dépôt sur la formation des couches PSG et la formation de l'émetteur P N⁺ en expliquant les techniques ayant permis la caractérisation de ces dernières.

III.2 Protocole expérimentale

III.2.1 Les détails expérimentaux

Pour effectuer la diffusion du phosphore, nos expériences ont été menées sur des plaquettes de silicium multi-cristallin de 10x10 cm² type HEM de type p, d'épaisseur 0.4mm et de faible résistivité (1-3 Ohm.cm) fabriquées au CRTSE ; en utilisant des sources préformes comme sources de phosphore.

Avant la diffusion de phosphore l'étape de nettoyage et de traitement des plaquettes de silicium multi-cristallin est très importante.

Plusieurs paramètres interviennent durant le procédé de réalisation de l'émetteur P N⁺, essentiellement la température de diffusion et la durée du pré-dépôt. La variation d'un seul de ces paramètres conduit à la modification des caractéristiques de l'émetteur.

Le procédé expérimental se déroule dans un four à 3 étages (TEMPRESS) présenté sur la figure III.1 pour les étapes suivantes :

- Le premier étage (DIFFUSION BBR3)
- Le deuxième étage (RECUIT)
- Le troisième étage (OXYDATION)

En se basant sur le 2^{ème} étage où s'effectue la diffusion du phosphore dans les plaquettes de type P, on fait varier les principaux paramètres à savoir :

- Les débits des gaz de N₂ et O₂ (2.75 et 0.75 Slm)
- La température de diffusion du pré-dépôt (600, 700 et 750 °C)
- la durée de diffusion (10, 20 et 30 min)



Figure III. 1 Four TEMPRESS Omega Junior 3 A le centre de recherche C.R.T.S.E

Dans le tableau suivant les variations des températures ainsi que la durée de pré-dépôt sont résumées sous forme d'abréviations.

Tableau III. 1 températures et durée de pré dépôt correspondant à la diffusion du phosphore.

PD₁	600C°-10min
PD₂	700C°-10min
PD₃	750C°-10min
PD₄	600C°-20min
PD₅	700C°-20min
PD₆	750C°-20min
PD₇	600C°-30min
PD₈	700C°-30min
PD₉	750C°-30min

Avant de faire la diffusion de phosphore on a une étape très importante elle est nécessaire pour les plaquettes de silicium multi-cristallin (le nettoyage et traitement).

III.2.2 Nettoyage et traitement des plaquettes du silicium

Une bonne qualité de dépôt est obtenue sur des substrats bien nettoyés. Le nettoyage est donc une étape très importante, il faut éliminer toute trace de graisse ou de poussière car la moindre impureté peut engendrer la contamination et le décollement des couches déposées.

Le nettoyage de surface du substrat se fait comme suit :

III.2.2.1 Dégraissage des plaquettes de silicium

- Immersion dans un bain de trichloréthylène à $T=80\text{ }^{\circ}\text{C}$ pendant 10 min.
- Acétone pendant 10 min.
- Finalement on termine par le rinçage avec l'eau dés ionisé suivi un séchage avec le N_2 .

III.2.2.1 Amincissement des plaquettes

Ce fait par une solution de NaOH à $T=80\text{ }^{\circ}\text{C}$ pour réduire l'épaisseur de $400\mu\text{m}$ a $360\mu\text{m}$ et le rendre polis avec un aspect brillant pendant 20 min.

III.2.2.2 Neutralisation dans le HCl

Cette procédure a pour but d'enlever les ions Na^+ de la surface de plaquettes.

- Rinçage des plaquettes avec l'eau dés ionisé.
- Séchage avec le N_2 .
- Utilisation de spin Dreyer pour le rinçage et séchage.

III.2.3 La diffusion de phosphore

Une fois cette opération de nettoyage terminée, les échantillons sont placés dans une nacelle en quartz qui sera introduite dans un four de diffusion thermique à pression atmosphérique (Four Tempress Omega Junior 3) dans lequel ils subissent différentes températures de recuit ($600, 700$ et $750\text{ }^{\circ}\text{C}$) pendant différents temps (10, 20 et 30 min). Pour assurer une bonne stabilité, on utilise deux plaquettes de silicium multi-cristallin (Si-mc) entre eux on a une source dopante phosphore. Ce recuit est nécessaire car il permet de brûler les véhicules organiques existants dans le film dopant.

Une quantité d'oxygène est injectée dans l'enceinte du four pour contrôler la combustion de la matière organique de la source et favoriser la formation des molécules P_2O_5 , avec une autre quantité d'azote pour éliminer les gaz brûlés.

Les plaquettes sont maintenues back to back sur la nacelle en quartz à l'aide de deux Plaquettes de silicium multi cristallin entre eux on a une source dopante phosphore (Figure III.2) pour assurer une bonne stabilité et un bon contact de surface.

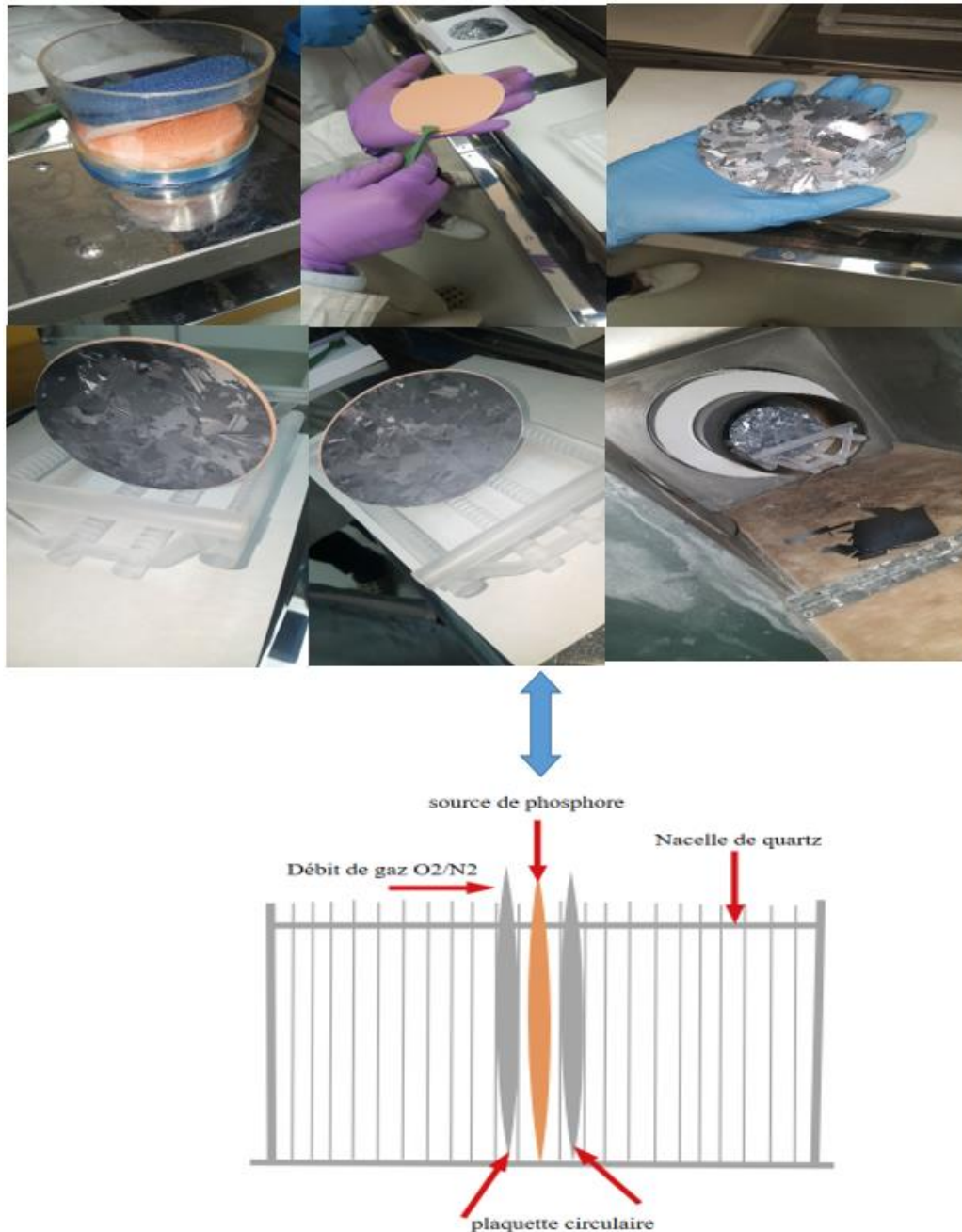


Figure III. 2 Schéma montrant les équipements utilisés dans ce travail et la configuration et la position de la plaquette étudiée et des sources de dopage.

Le procès de diffusion de phosphore choisi et utilisé dans notre étude est le suivant :

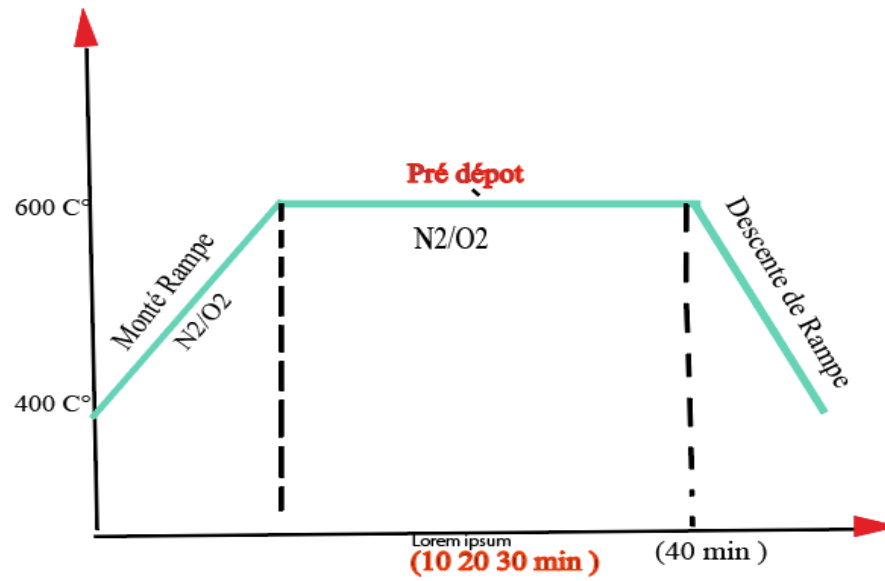


Figure III. 3 Profil de température de pré-dépôt des couches PSG en fonction du temps de

Recuit à 600 °C.

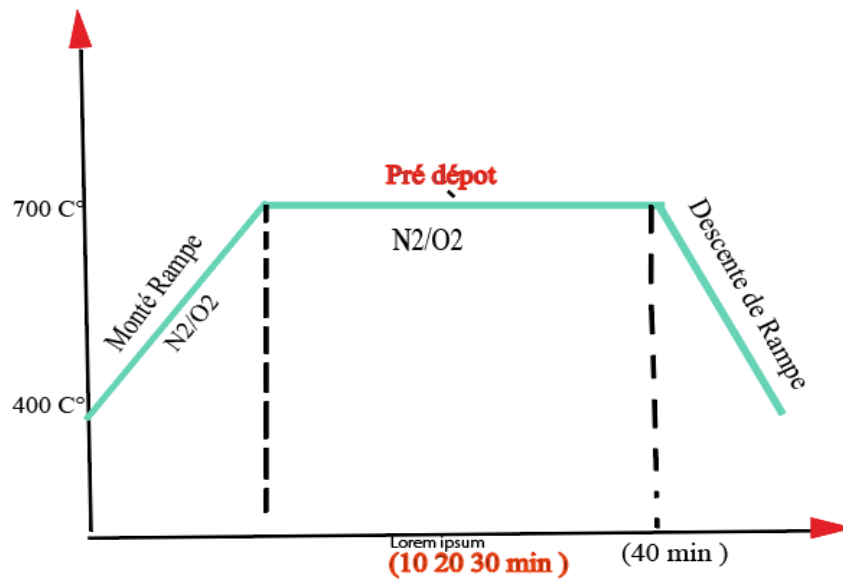


Figure III. 4 Profil de température de pré-dépôt des couches PSG en fonction du temps de Recuit à 700 °C.

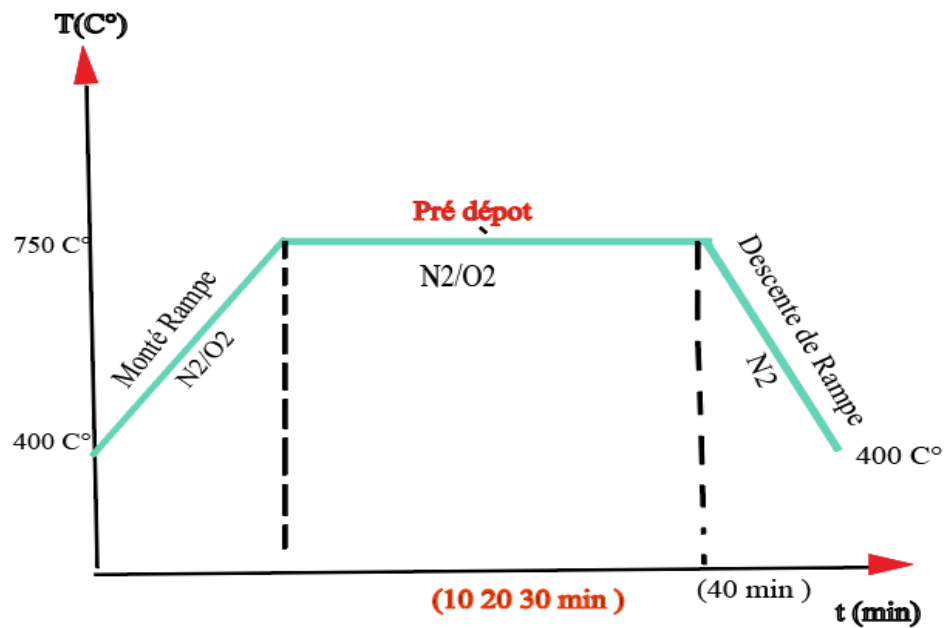


Figure III. 5 Profil de température de pré-dépôt des couches PSG en fonction du temps de Recuit à 750 $^{\circ}\text{C}$.

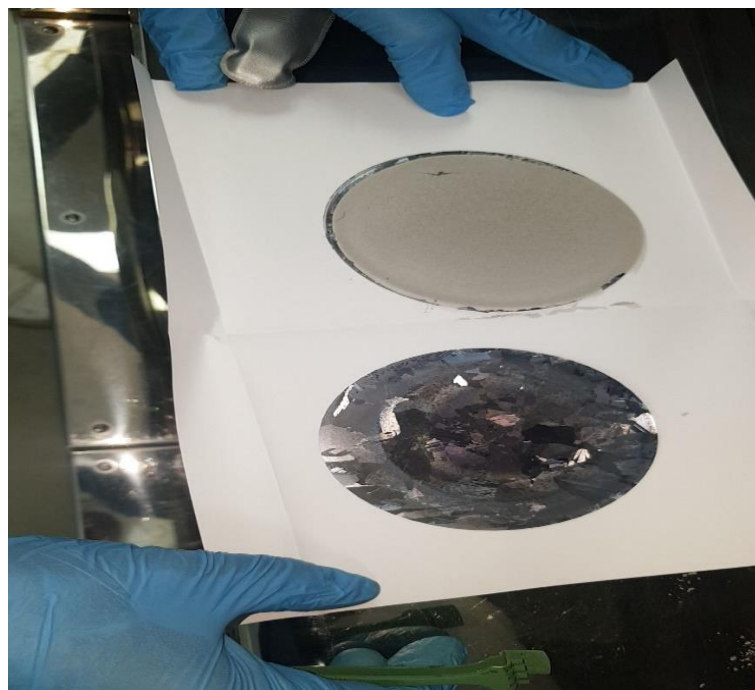


Figure III. 6 État de surface d'une plaquette de silicium multi-cristallin Subi un recuit à 750 $^{\circ}\text{C}$ durant 20 minutes.

III.3 La réalisation des FSF (Front Surface Field)

III.3.1 Préparation de l'échantillon

Des plaquettes de silicium monocristallin sont utilisées comme substrat pour la formation de l'émetteur PN^+ en dopant ces dernières avec le phosphore (source solide). Les plaquettes utilisées subissent un processus (le nettoyage) avant le pré-dépôt.

- Dégraissage et amincissement de la plaquette de Si multi-cristallin.

La surface de plaquettes doit être polie et homogène pour une bonne diffusion de phosphore.

- Après le nettoyage on passe à l'étape de Formation de la jonction par diffusion de phosphore à partir d'une source solide.

On met les plaquettes avec la source dopant dans une nacelle de quartz et on met dans le four de diffusion. L'atome dopant est alors transporté jusqu'à l'échantillon par un gaz vecteur inerte. Les éléments dopants sont diffusés vers l'intérieur du substrat à une vitesse déterminée par la température du four et le temps de processus. Voici un schéma explicatif (Figure III.7)

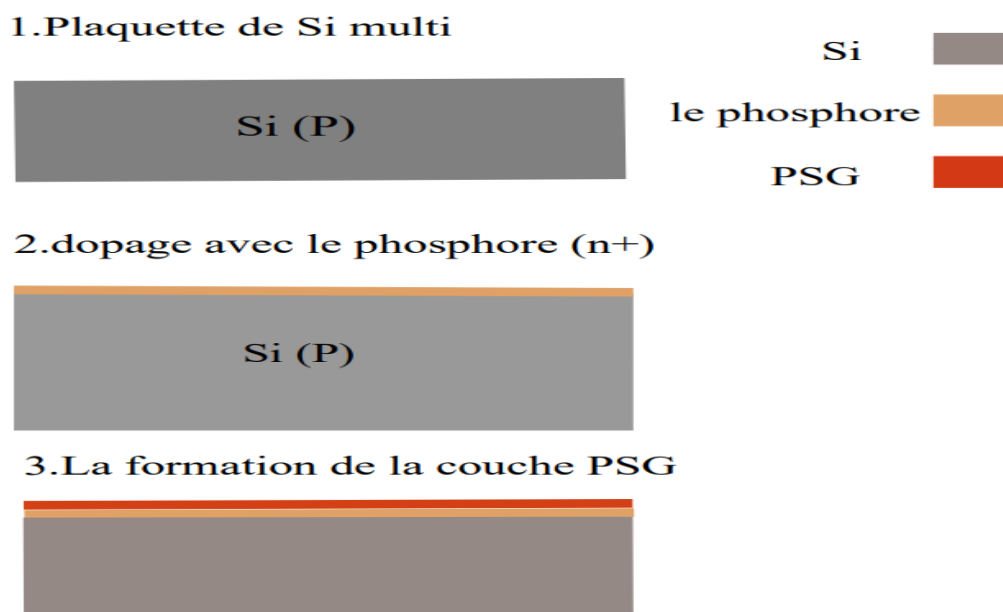


Figure III. 7 Schéma de principe du protocole de travail suivi pour la réalisation de l'émetteur PN^+ avec la couche PSG.

III.4 Résultats et discussion

III.4.1 Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR)

Pour vérifier l'existence de la source dopante dans la couche déposée sur la surface du silicium, nous avons procédé à des caractérisations par la technique de transformée de Fourier l'avantage principal de la technique repose sur le fait qu'elle est généralement réalisé sur une gamme IR très large entre 400 et 4000 cm^{-1} les plaquettes de silicium ont été caractérisé par FTIR après la diffusion de phosphore et traités par logiciel (OMNIC) de façon de déterminer les évolution de liaison minérale et organique, Les figures III.7, III.8 et III.9 montrent les spectres FTIR de pré-dépôt des couches PSG en fonction du temps 10 min , 20 min et 30 min de recuit à différentes températures (600, 700 et 750°C). L'analyse des différents pics au niveau de chaque spectre tel que résumé dans le tableau III.1.

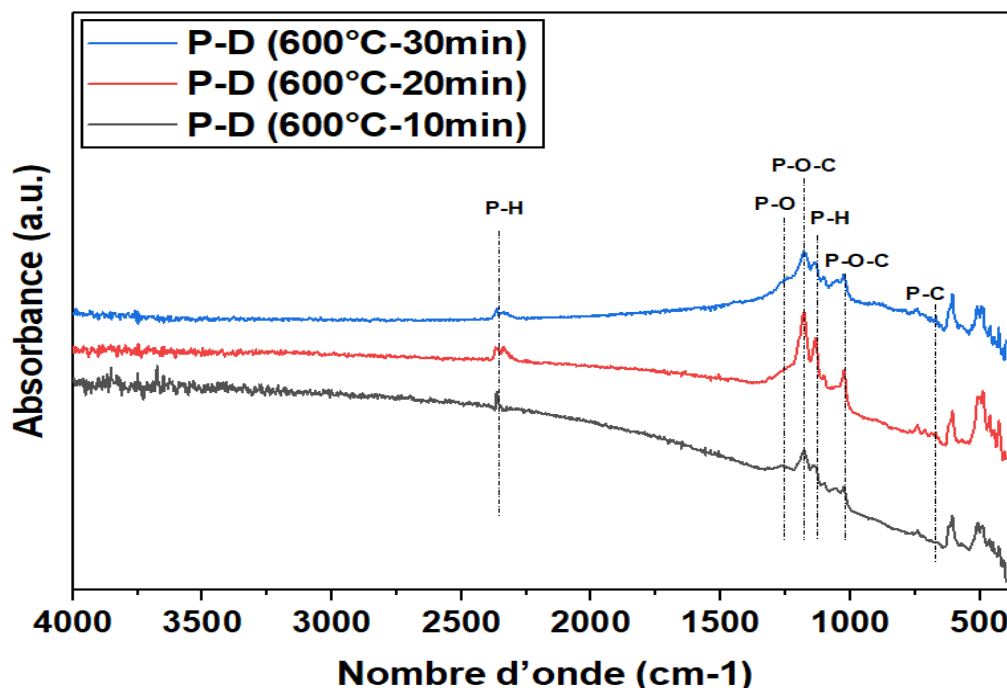


Figure III. 8 Spectres FTIR de pré-dépôt des couches PSG en fonction du temps de recuit à $T=600\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Dans le premier spectre de température de 600C° et temps de 10, 20 et 30min on remarque qu'on a plusieurs pics d'absorption parmi eux on a le pic phosphore d'hydrogène situé a (2350 et 1090 cm^{-1}) et le pic de phosphore oxygène situé a (1250 cm^{-1}) et le pic de carbone situé à 670 cm^{-1} et le pic de carbone et oxygène 1000 et 1200.

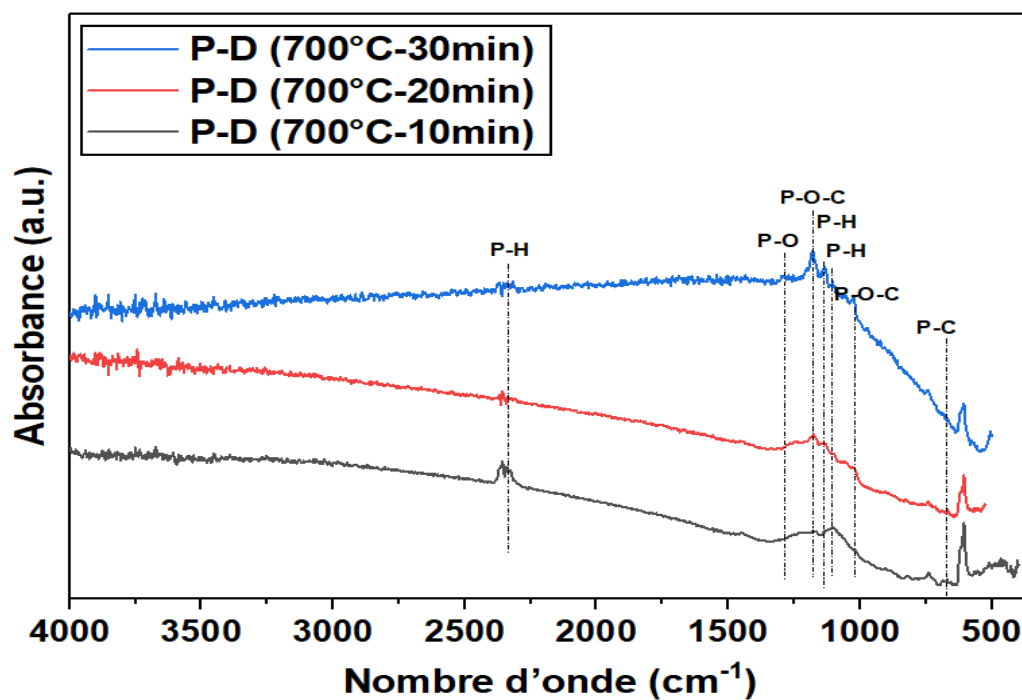


Figure III. 9 Spectres FTIR de pré-dépôt des couches PSG en fonction du temps de recuit à $T=700^{\circ}\text{C}$.

Dans le deuxième spectre de température de 700°C et temps de 10, 20 et 30min on remarque qu'on a plusieurs pics d'absorption parmi eux on a le pic phosphore d'hydrogène situé à $(2350, 1100 \text{ et } 1080\text{cm}^{-1})$, le pic de phosphore oxygène situé à (1300cm^{-1}) et le pic de phosphore carbone situé à (700cm^{-1}) et le pic de phosphore carbone et oxygène $(1190 \text{ et } 1020 \text{ cm}^{-1})$.

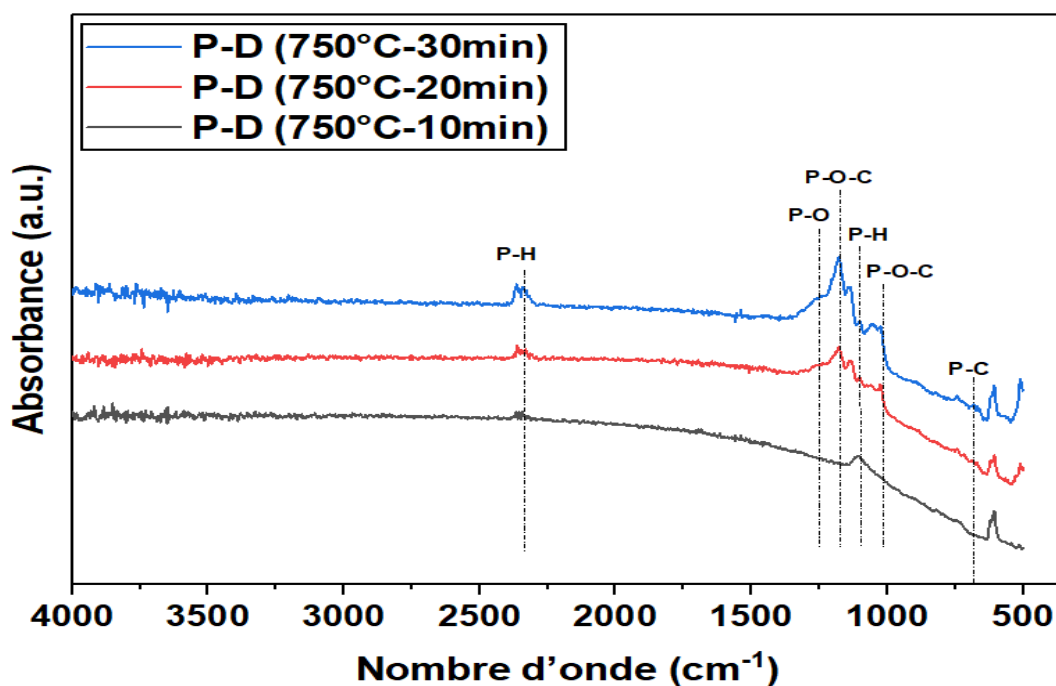


Figure III. 10 Spectres FTIR de pré-dépôt des couches PSG en fonction du temps de recuit à $T = 750^{\circ}\text{C}$.

Dans le troisième spectre de température de (750°C) et temps de 10, 20 et 30 min on remarque qu'on a plusieurs pics d'absorption parmi eux on a le pic phosphore d'hydrogène situé à $(2350, 1100 \text{ cm}^{-1})$, le pic de phosphore oxygène situé à (1250 cm^{-1}) , le pic de phosphore carbone situé à (700 cm^{-1}) et le pic de phosphore carbone et oxygène $(1020 \text{ et } 1200 \text{ cm}^{-1})$.

III.4.1.1 Interprétation des spectres

Pour mieux interpréter les résultats, on tient à définir les différentes liaisons présentes sur les graphes. Les liaisons $\text{P}=\text{O}$ sont des liaisons covalentes entre l'atome de phosphore et l'atome d'oxygène. Ces liaisons sont essentielles pour la formation du réseau vitreux des verres phosphosilicates.

Les autres liaisons comme le $\text{P}=\text{H}$, $\text{P}=\text{O}=\text{C}$ et $\text{P}=\text{O}=\text{C}$ dans les couches PSG peuvent être considérées comme des impuretés car elles ne sont pas typiques des structures de verre phosphosilicate. Ces liaisons sont généralement associées à des espèces organiques ou des contaminants carbonés.

Les bandes d'absorption autour de $1250\text{-}1300 \text{ cm}^{-1}$ dans les spectres FTIR indiquent la présence de liaisons $\text{P}=\text{O}$ dans le verre PSG. L'intensité de ces bandes dépend de la concentration en phosphore dans la couche.

On remarque que plus les températures et les durées du pré-dépôt sont élevées, plus la concentration en phosphore incorporé dans le PSG sera importante. Cela se traduira par :

- Une augmentation de l'intensité des bandes P=O à 1250-1300 cm^{-1} .
- Un élargissement des bandes.
- Un décalage de ces bandes vers des nombres d'onde plus élevés.

Les liaisons P=O sont des liaisons covalentes entre l'atome de phosphore et l'atome d'oxygène. Ces liaisons sont essentielles pour la formation du réseau vitreux des verres phosphosilicates.

Dans les spectres d'absorbance de pré-dépôt des couches PSG en fonction du temps de recuit à différentes températures (600, 700 et 750°C). Nous remarquons que quel que soit la température de recuit (600, 700 et 800°C) ou temps de pré-dépôt (10, 20 et 30 minutes) nous permet de déterminer la nature chimique en présence (liaison organique et chimique).

Tableau III. 2 Différentes liaisons minérales et organiques du phosphore dans la couche PSG détectées par FTIR. [1]

liaisons minérales	liaisons organiques
P-H : 2280/2410 cm^{-1}	P-O-R : 870/1110 cm^{-1}
P-H : 1040/1100 cm^{-1}	P-OH: elongation : 3300/1600 cm^{-1}
P-C : 650/700 cm^{-1}	P-O-C: 950/1050 cm^{-1}
P-O-C : 1190/1240 cm^{-1}	
P=O : 1255/1285 cm^{-1}	
P-H: elongation: 2420-2480 cm^{-1}	
P-O: 1250/1320 cm^{-1}	
P=O: 1500-1455 et 870-900 cm^{-1}	

III.4.2 La résistance par carré

La résistance par carré, notée $\Omega/\square$ (ohm par carré) ou Ω/sq , est une unité de mesure de la résistance électrique d'un matériau en couche mince.

Dans notre étude on a mesuré de la résistance par carré après le dépôt de la couche PSG de 9 échantillons les 6 premier a été mesuré on 9 points les 3 dernier on a mesuré à 3 points on a met les résultats dans le tableau suivant :

Tableau III. 3 Les différentes température et temps et leurs résistances carrées.

Température de dépôt (C°)	Temps (min)	R (ohm/carré)
600	10	141,95/212,65/172,44/130,11/354,58/150,33/202,05/170,14/159,64
	20	151,49/48,09/145,93/116,68/133,94/127,07/155,55/164,81/207,25
	30	115,46/111.25/116,87
700	10	170,17/103,06/168,45/134,25/142,55/140,60/143,64/128,72
	20	131,59/158,01/128,38/112,49/202,52/120,42/104,11/112,55/157,69
	30	157,12/142,33/145,72
750	10	76,80/91,10/69,96/67,36/97,88/89,44/61,03/85,35/71,63
	20	63,34/69,40/69,80/61,86/71,05/60,49/73,22/63,18
	30	125.25 /120.2/ 137,32

Après ces mesures on a calculé R moyennes (ohm/carré) et uniformité (%) par les lois suivantes :

La résistance moyenne par carré à travers la relation suivante :

$$R_{\text{Moy}} = \sum_{i=1}^n \frac{R_i}{n} \dots\dots\dots(III.1)$$

En peut calculer l'uniformité de dopage à partir de relation suivante :

$$\text{Unif \%} = \left[\frac{R_{\text{max}} - R_{\text{min}}}{2 R_{\text{moy}}} \right] \times 100\% \dots\dots\dots(III.2)$$

On a mis les calcule dans le tableau suivant :

Tableau III. 4 les valeurs des résistances moyennes et de l'uniformité pour déférentes températures et temps de recuit..

Température (C°)	Temps (min)	Rmoy (ohm/carré)	uniformité (%)
600	10	188,21	59
	20	138,97	57
	30	114,52	2
700	10	141,43	23
	20	136,41	16
	30	123,39	4
750	10	78,95	23
	20	66,54	9
	30	127,59	6

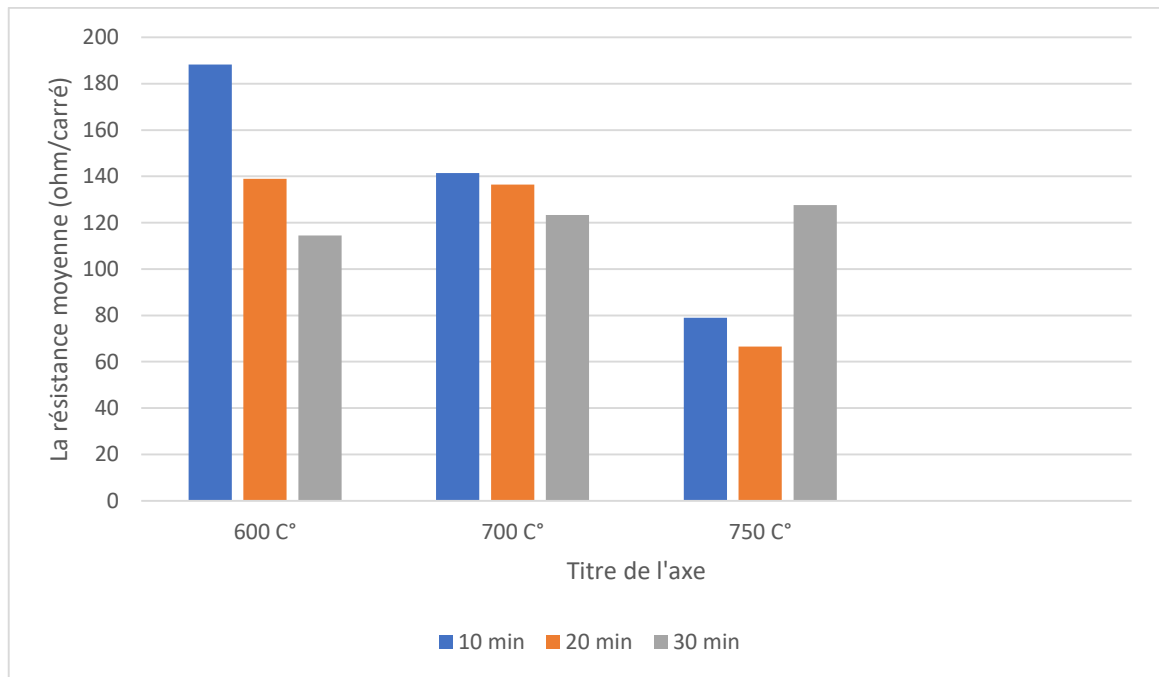


Figure III. 11 Influence de température et la durée de pré dépôt sur la résistance moyenne.

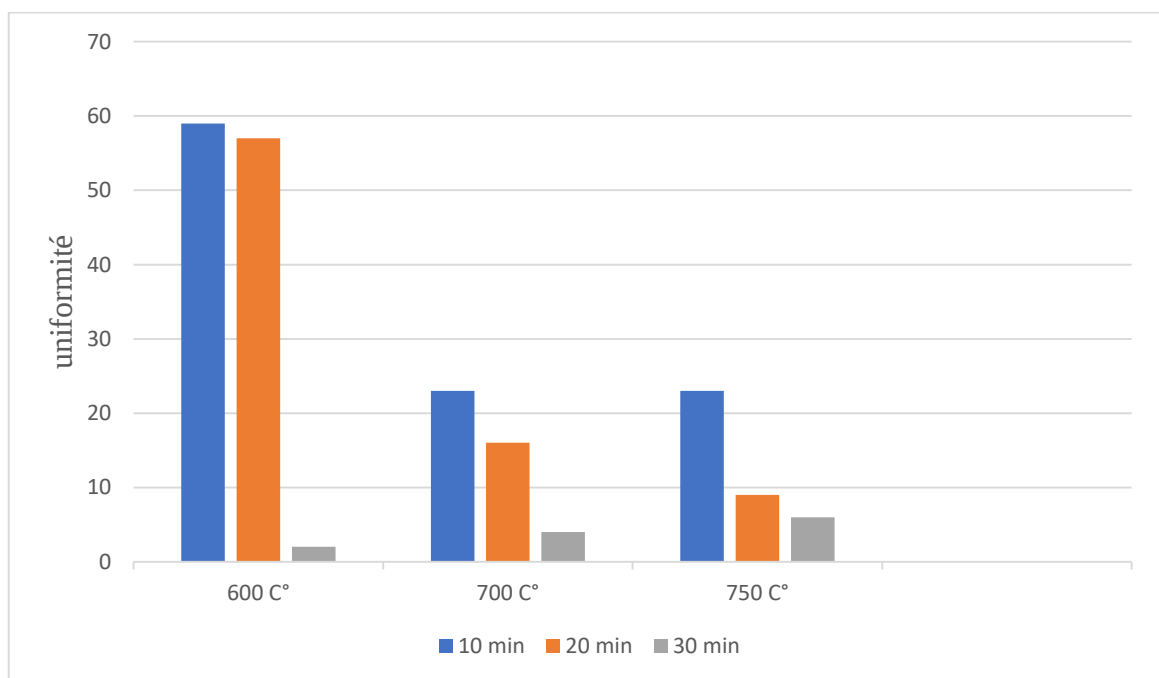


Figure III. 12 Influence de température et la durée de pré dépôt sur uniformité.

III.4.2.1 Interprétation de résultats

D'après notre résultat la température de diffusion et la durée de pré dépôt sont des paramètres très importantes dans la procédure de diffusion, l'influence de la température et la

durée de pré dépôt sur la résistance moyenne et uniformité sont illustré dans les figures III.10, III.11.

Nous observons une diminution de la résistance moyenne avec une augmentation de température et la durée de pré dépôt, une augmentation de température de recuit permet une diffusion plus importantes de phosphore ce qui conduit à une résistance faible.

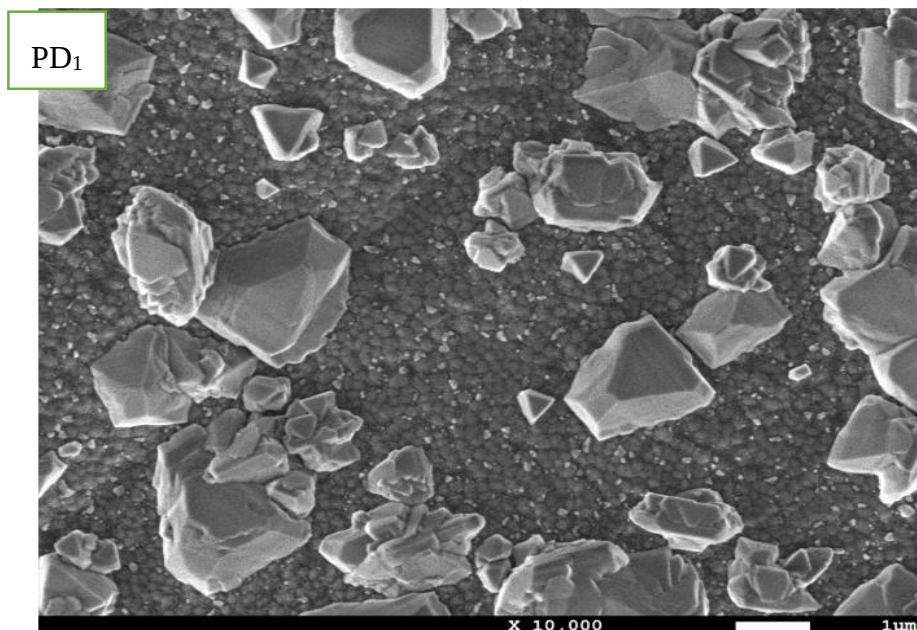
Uniformité diminue quand augmente les paramètres de recuit c'est ta dire que la surface des plaquette dépôt peut entraîner une modification du profil de dopage peut entraîner une augmentation des impuretés et des défauts, ce qui peut réduire l'uniformité.

Après avoir fixé le temps de recuit à 30 min et varier la température on remarque une stabilité dans l'uniformité et la résistance moyenne.

III.5 Le microscope électronique à balayage (MEB)

Les figures III.12 et III.13 et la figure III.14 obtenues par la microscopie électronique à balayage (MEB), présentent des images de la surface des couches minces dopé de phosphore.

Tous les échantillons indiquent que les couches sont couvertes par une structure agrégat non uniforme dont les grains sont très petits et micrométriques. Les grains peuvent se relie entre eux pour créer une forme d'agrégat. Ces grains leur taille entre (0.3 et 0.7 μm) aussi les grandes tailles des grand sont des cristaux.



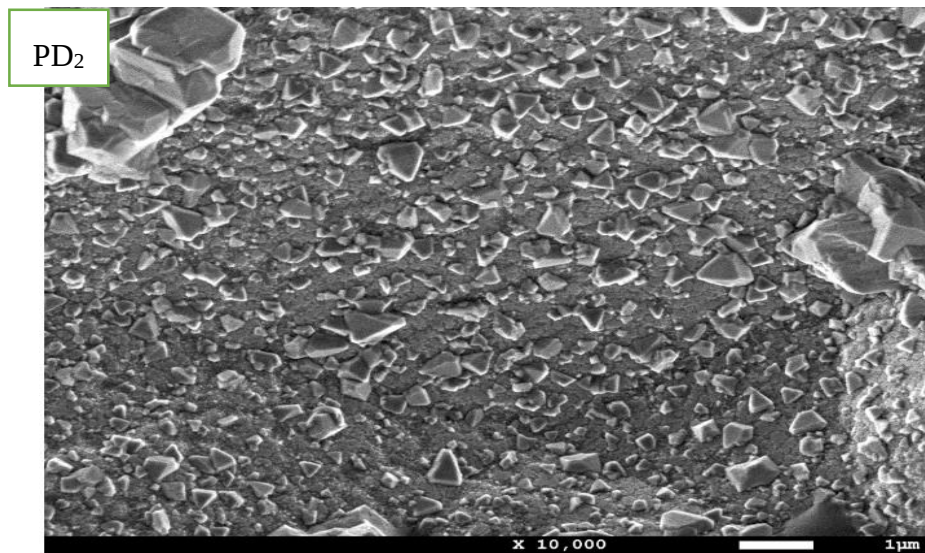
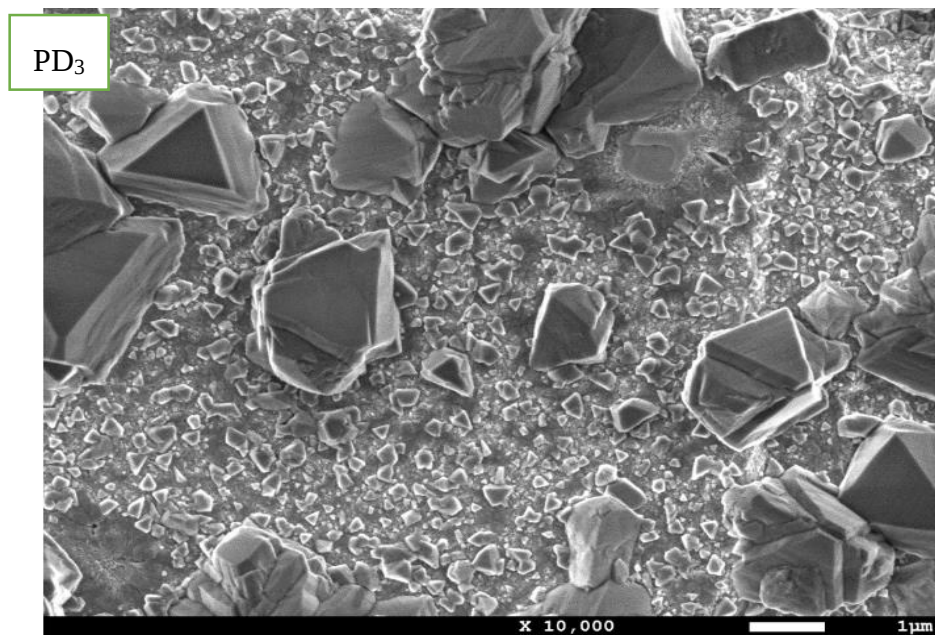


Figure III. 13 Images obtenus par MEB des couches PSG/Si-mc pour les échantillons PD₁ et PD₂.



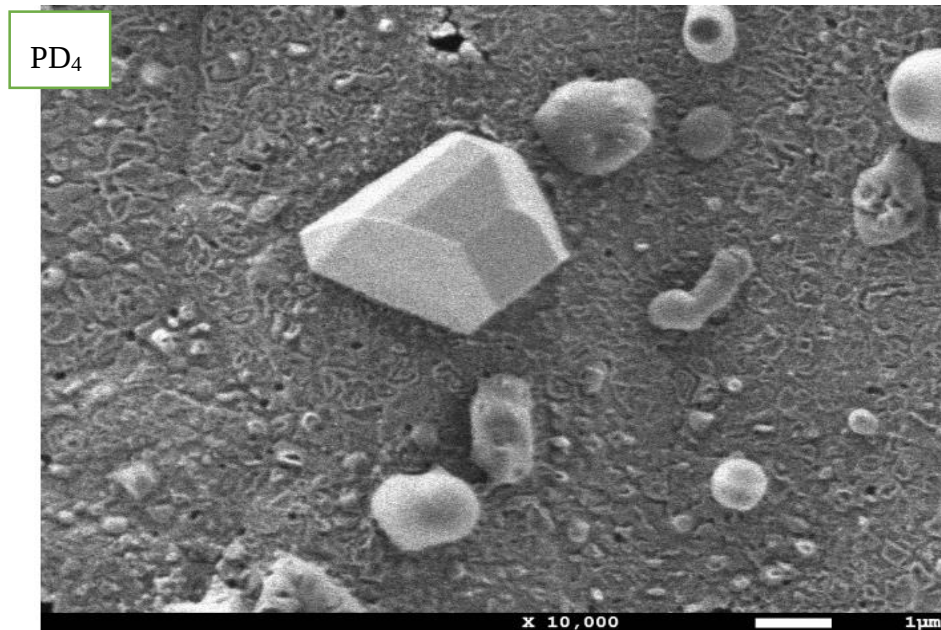
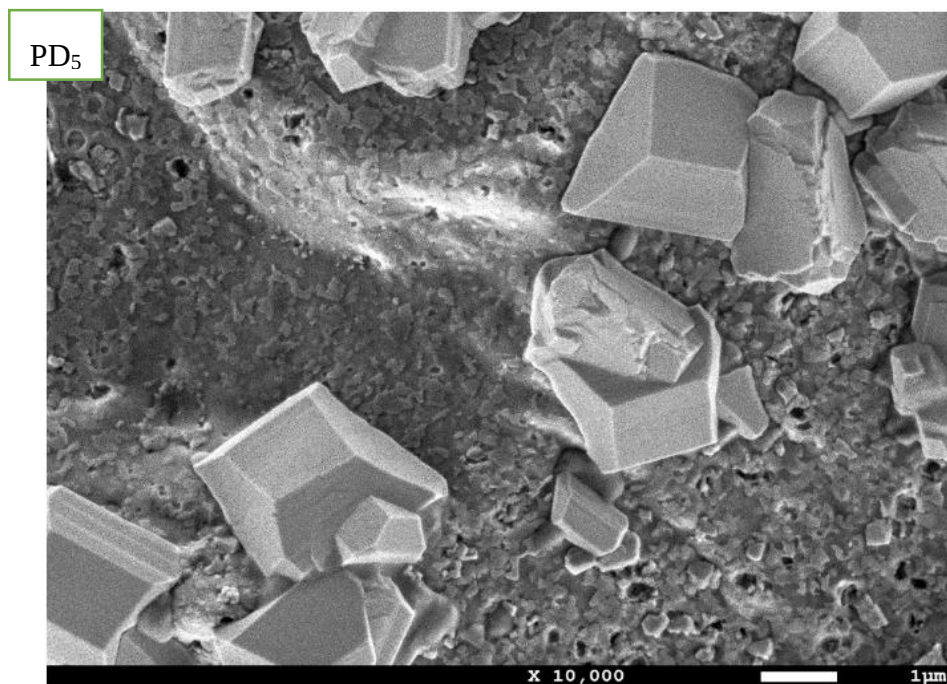


Figure III. 14 Images obtenus par MEB des couches PSG/Si-mc pour les échantillons PD₃ et PD₄.



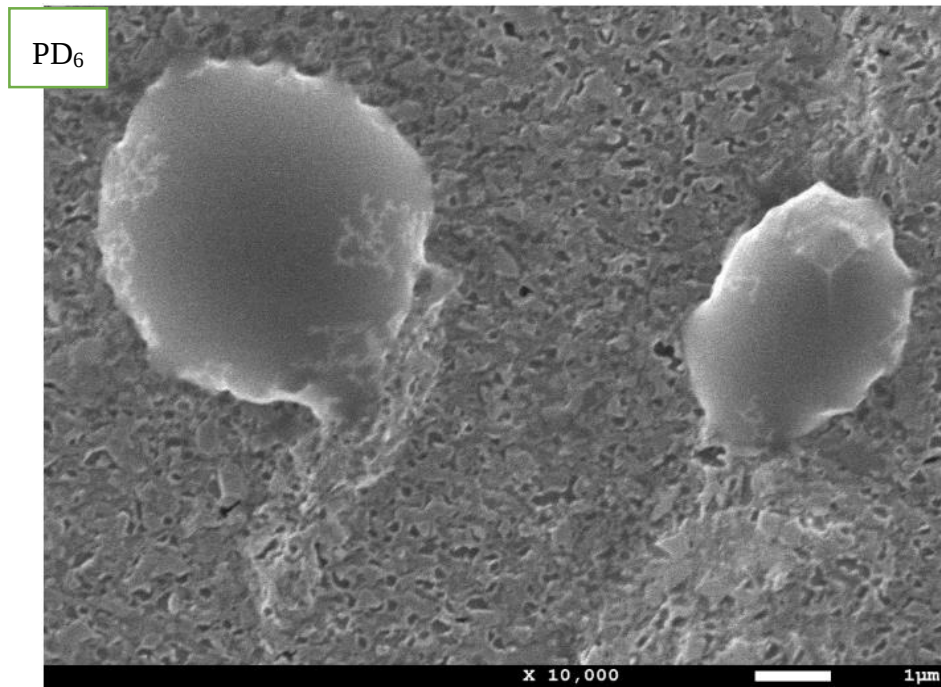
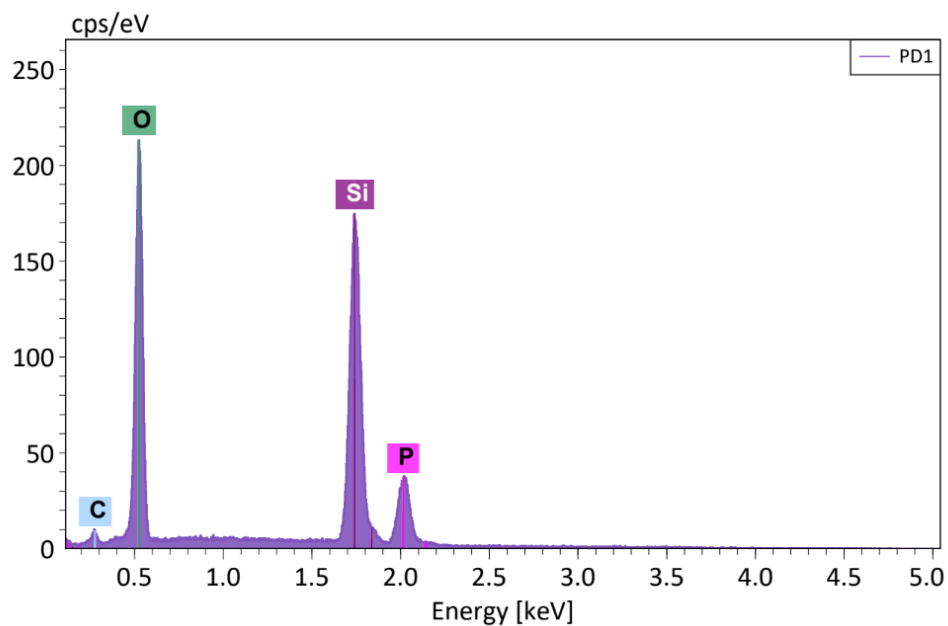


Figure III. 15 Images obtenus par MEB des couches PSG/Si-mc pour les échantillons PD₅ et PD₆.

III.6 La spectroscopie de rayons X à dispersion d'énergie (EDS)

Les figures suivantes obtenu par la spectroscopie de rayon X (EDS) utilisé pour étudier la morphologie de la surface des couches et la détermination de la composition chimique et leur constituant.



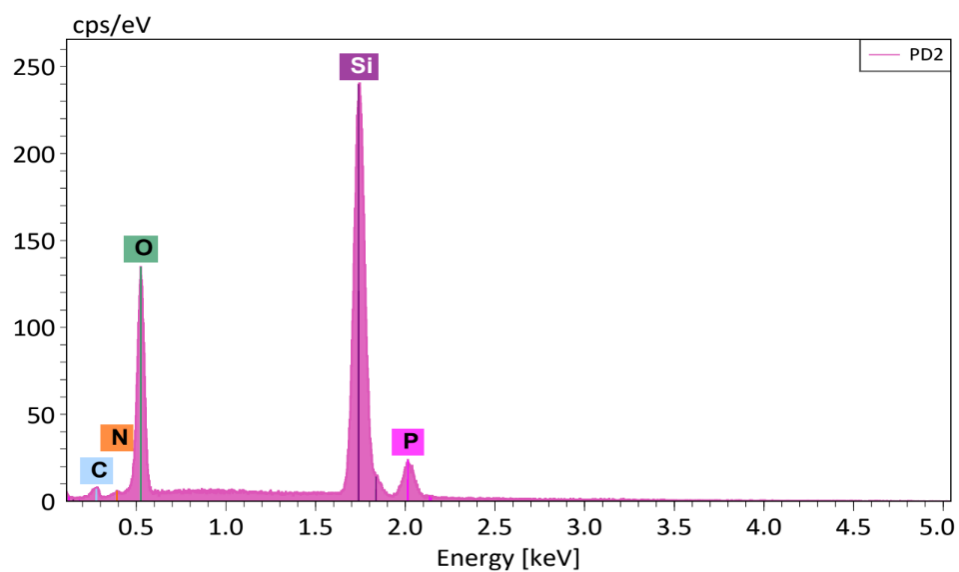


Figure III. 16 Spectres EDS d'une couche PSG déposée sur Si-mc pour les échantillons PD₁ et PD₂.

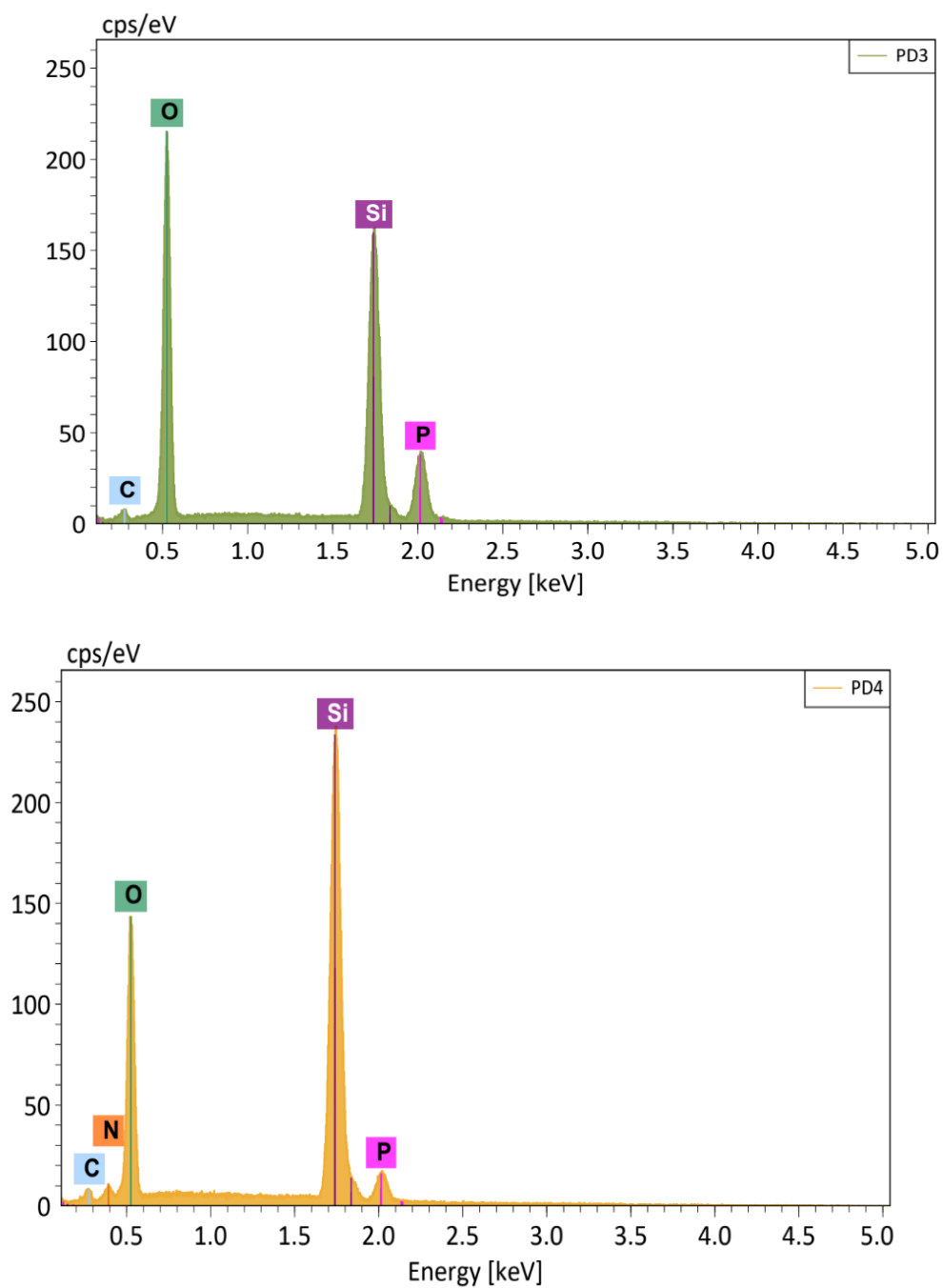


Figure III. 17 Spectres EDS d'une couche PSG déposée sur Si-mc pour les échantillons PD₃ et PD₄.

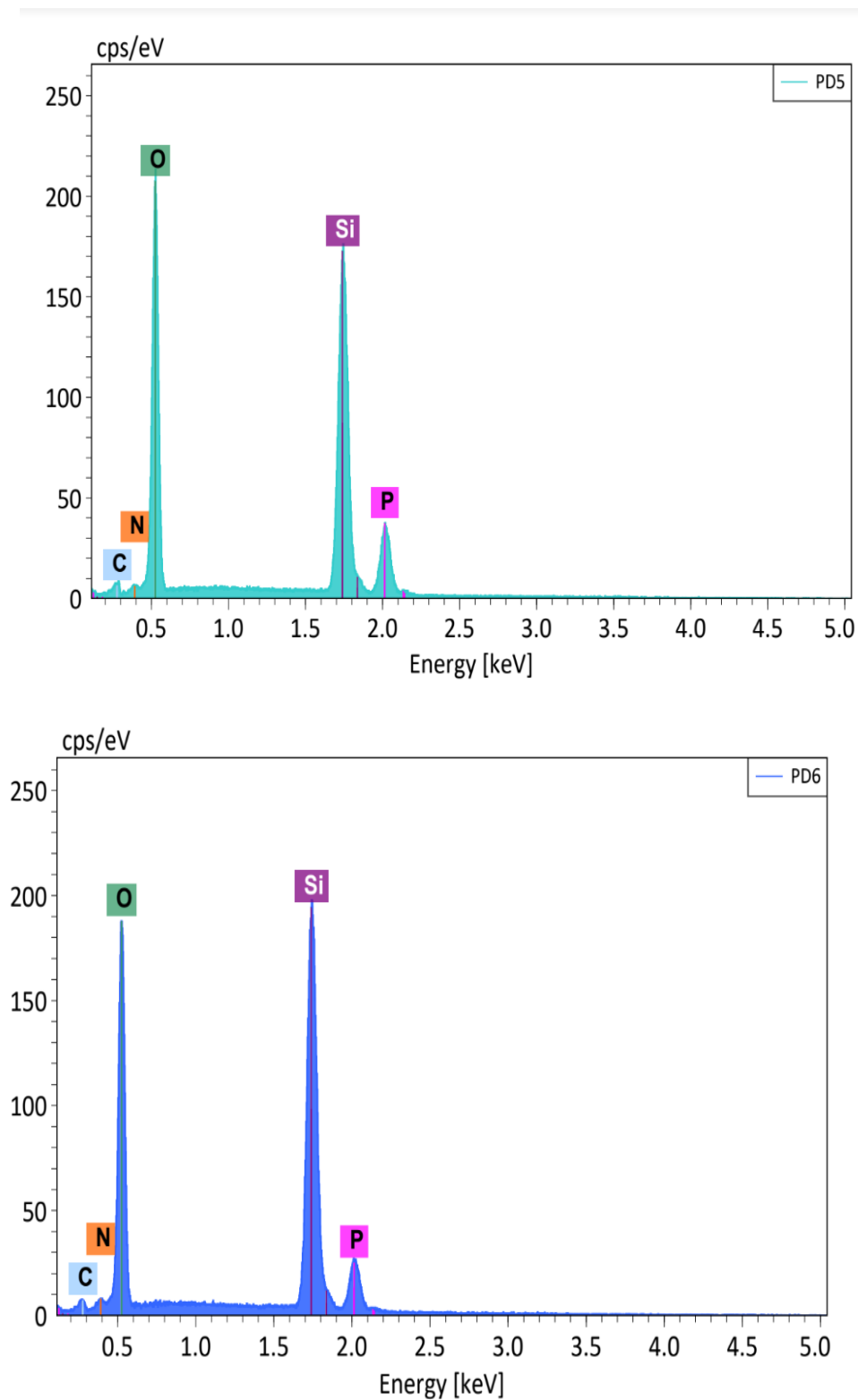


Figure III. 18 Spectres EDS d'une couche PSG déposée sur Si-mc pour les échantillons PD₅ et PD₆.

Tableau III. 5 Les éléments chimiques et leur concentration dans les échantillons étudiés

Les éléments chimiques Échantillons	Si (%)	O ₂ (%)	P (%)	C (%)	N (%)
PD ₁	44.18	45.78	7.07	2.97	
PD ₂	62.29	31.13	4.29	1.94	0.35
PD ₃	43.25	47	8.20	1.55	
PD ₄	59.06	33.44	2.86	1.84	2.80
PD ₅	44.64	45.22	7.25	2.30	0.59
PD ₆	50.02	42.56	5.16	1.34	0.92

III.6.1 Interprétation de résultats

Après les résultats de La spectroscopie de rayons X à dispersion d'énergie (EDS) nous observons les différents éléments chimiques suivants (oxygène O₂ azote N₂ silicium Si phosphore P carbone C).

On remarque la présence de silicium dans tous les échantillons à un pourcentage allant de 43 à 62 % ce qui Sa présence est attendue et indique que les plaquettes sont bien formées., on remarque également la présence d'oxygène en pourcentage de 31 à 47 % Sa présence peut être due à diverses sources, telles que l'oxygène atmosphérique, est également due à l'oxydation de la couche déposée , et le phosphore de 2 jusqu'au 8 % Sa présence est attendue et indique que le dopage a été effectué correctement. , L'existence de ces dernières confirme la formation de couche PSG .

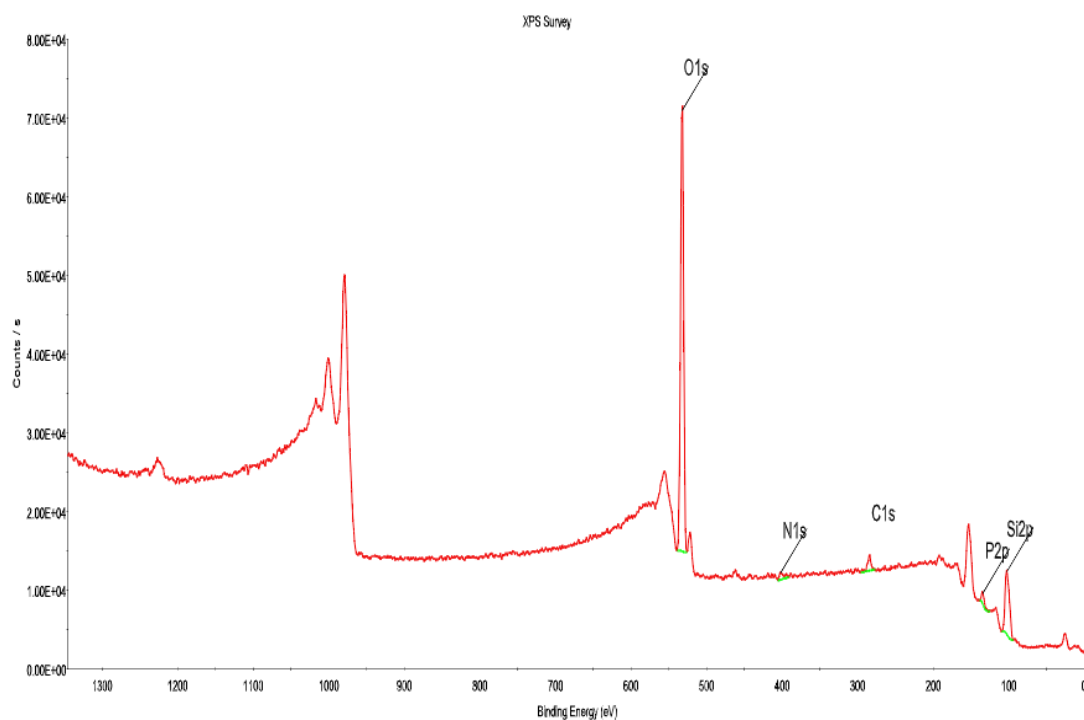
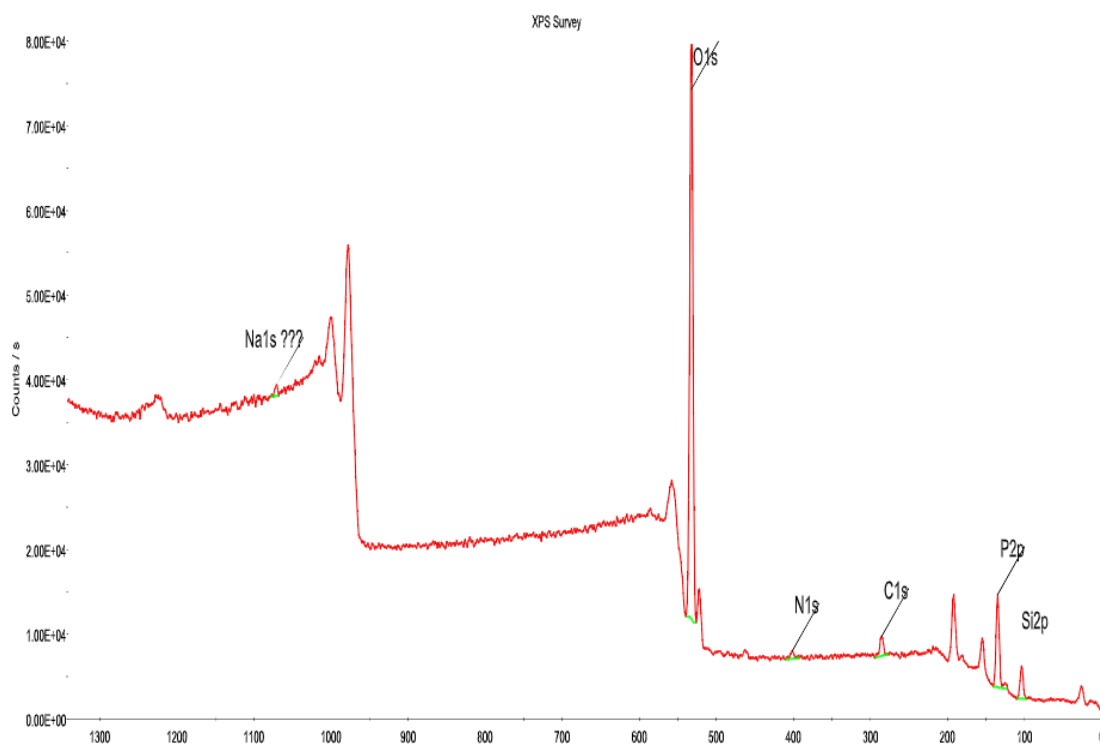
Les autres éléments comme l'oxygène et le carbone et l'azote ont considéré comme des impuretés dans les réactions chimiques pendant la diffusion.

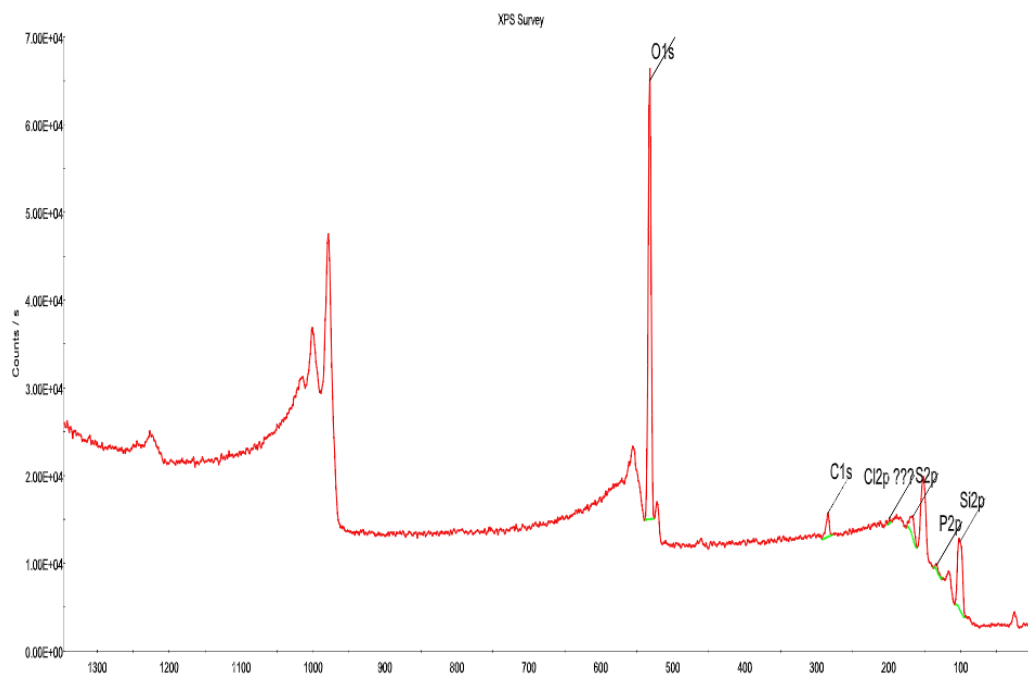
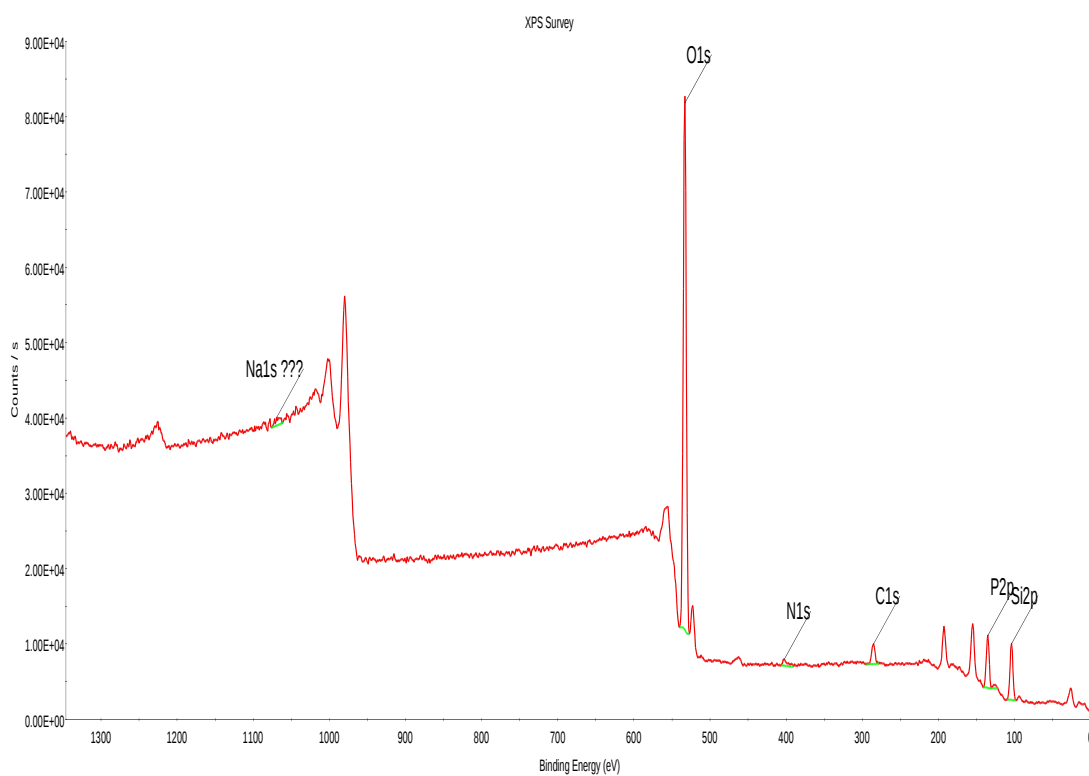
III.7 La spectrométrie XPS (X-Ray Photo-electron Spectroscopy)

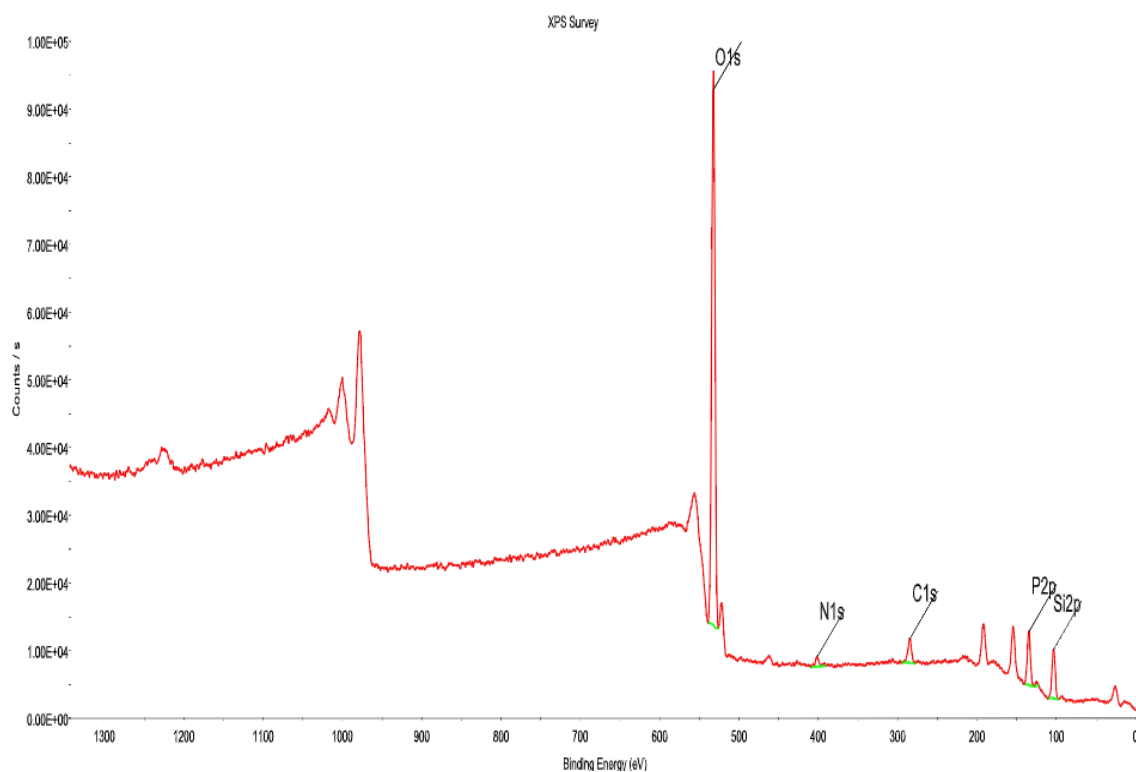
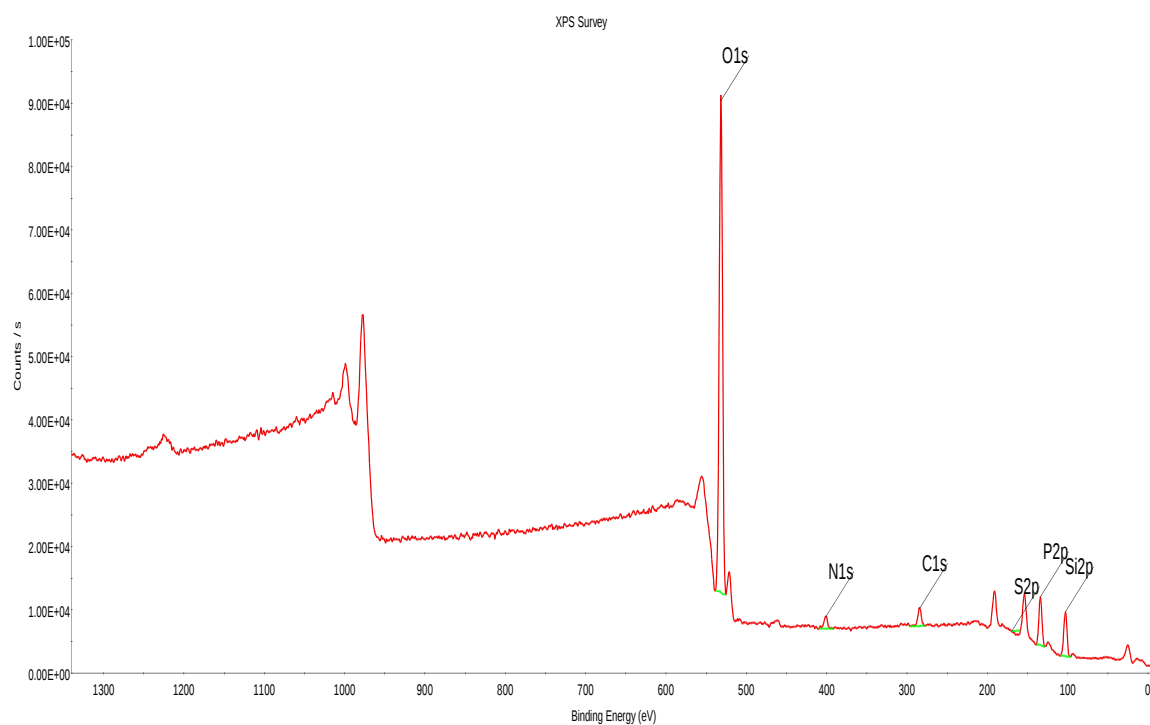
Ces analyses ont été effectuées en utilisant une spectrométrie de photoélectrons XPS ce spectre s'étale sur une plage d'énergie de liaison de 0 à 1400 eV sur ce spectre apparaissent les éléments constitutifs (O1s Si2p C1s N1s P2p Na1s Cl2p) de nos échantillons. Les éléments chimiques détectés par XPS sont : O1s (Oxygène), Si2p (Silicium), C1s (Carbone), N1s (Azote), P2p (Phosphore), Na1s (Sodium) et Cl2p (Chlore).

Cette combinaison d'élément avec la présence de contaminants en surface comme le carbone, le sodium et le chlore.

Nous observons le pic Si2p correspond au silicium cristallin du substrat et le pic O1s peut provenir de plusieurs sources Oxyde de silicium (SiO_2) à la surface ou contaminants organiques contenant de l'oxygène et le pic Ce pic correspond au phosphore introduit par dopage dans le substrat de silicium, Le sodium l'azote et le chlore sont probablement un contaminant de surface provenant de l'environnement.

PD1 :**PD2 :****Figure III. 19** Spectre large d'XPS de large d'échantillons PD₁ et PD₂

PD3 :**PD4****Figure III. 20** Spectre large d'XPS de large d'échantillons PD₃ et PD₄

PD5 :**PD6 :****Figure III. 21** Spectre large d'XPS de large d'échantillons PD₅ et PD₆

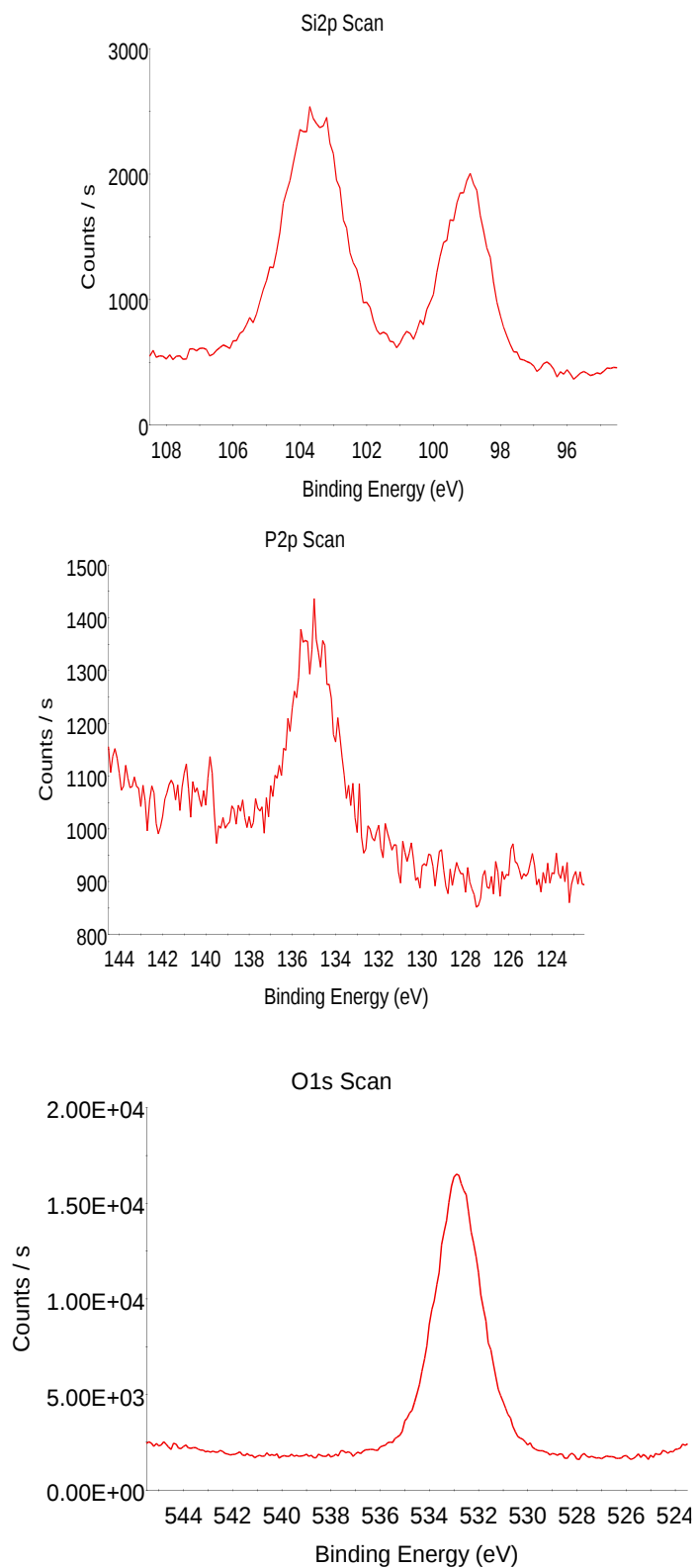


Figure III. 22 Détermination de la position PSG de l'échantillon PD-1 : Si_{2p} (eV):102/106; P_{2p} (eV) O1s (eV):535/539.

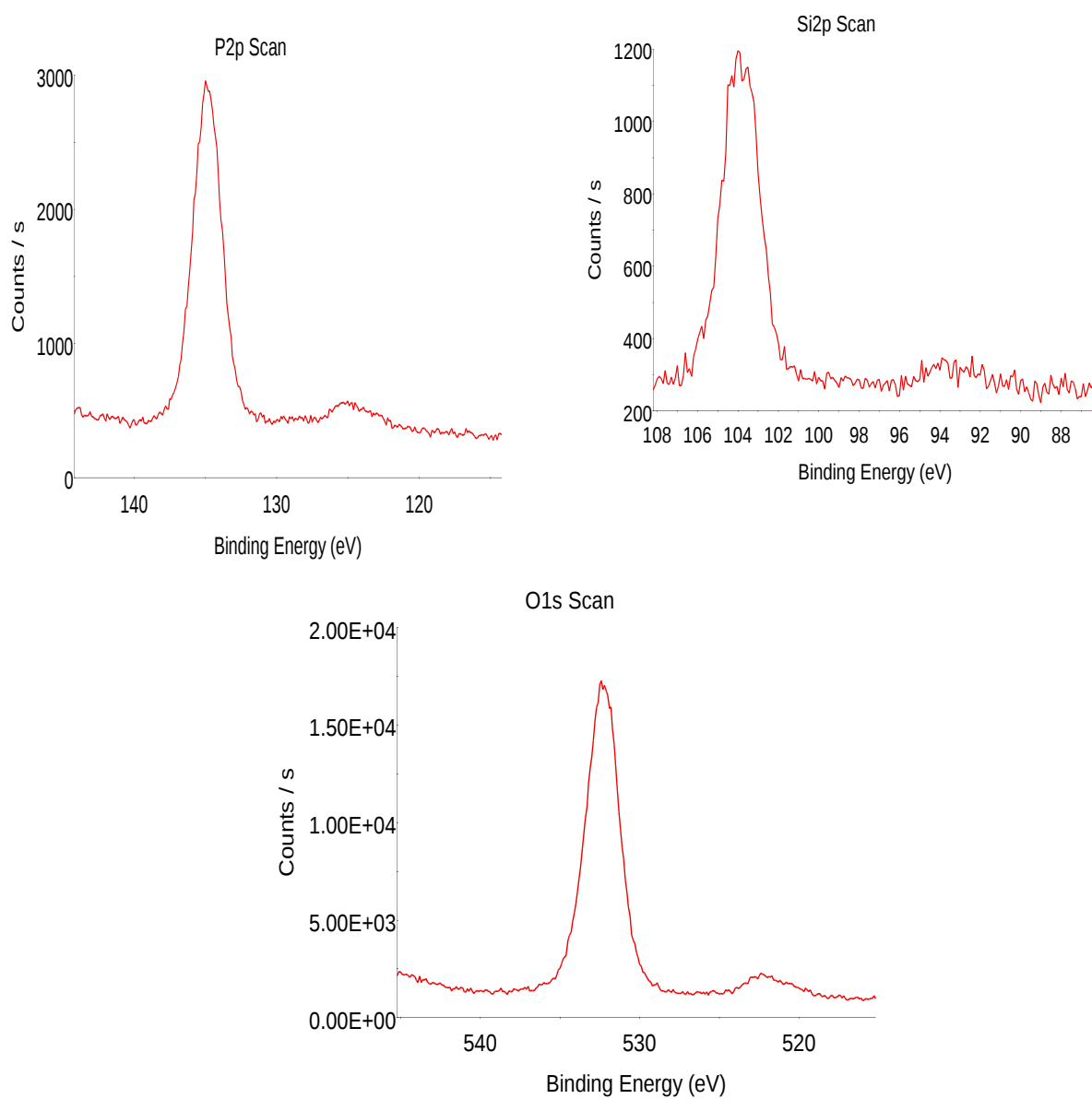


Figure III. 23 Détermination de la position PSG de l'échantillon PD-2 : Si₂p (eV):102 /106; P₂p (eV):130.1 /139.5; O1s (eV):535/539.

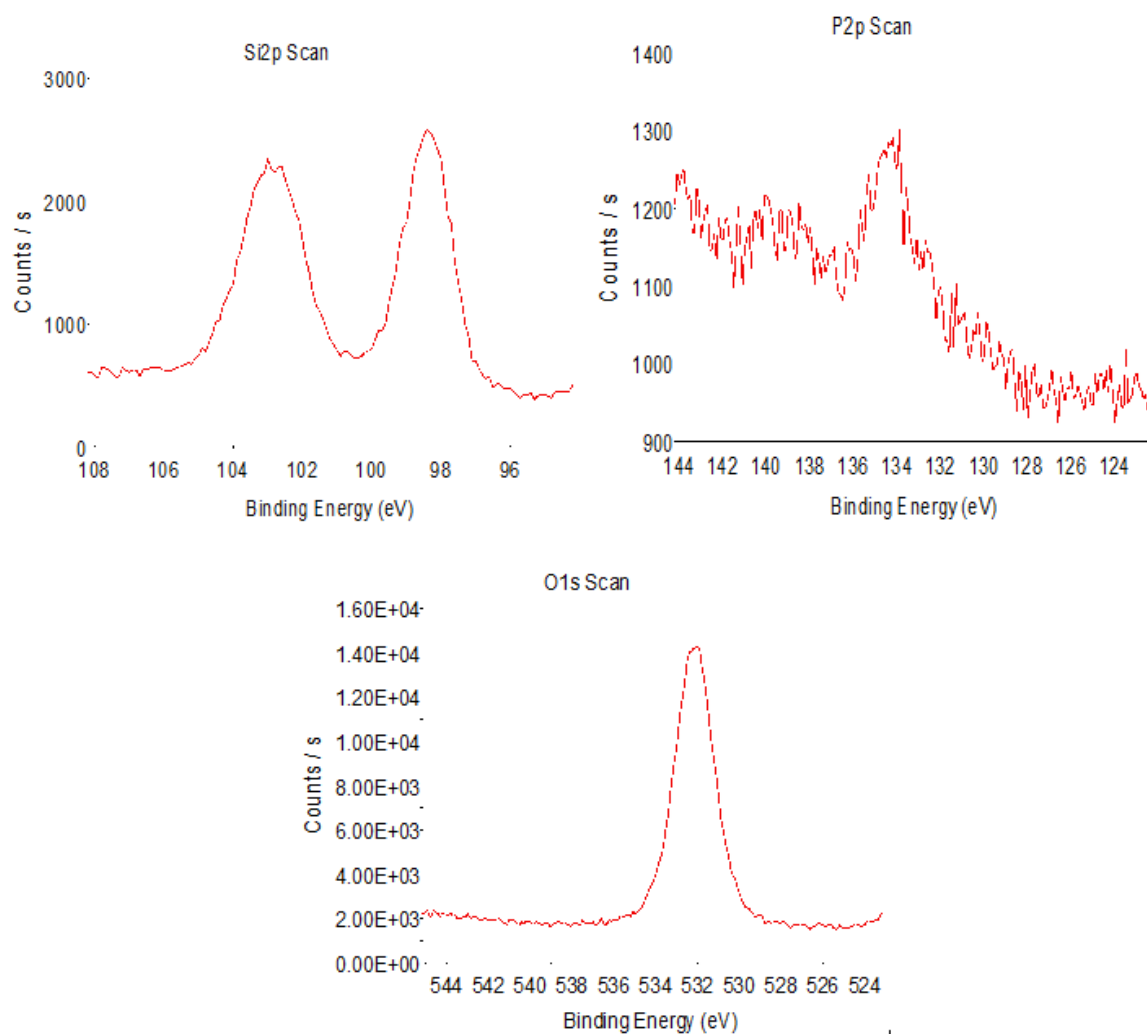


Figure III. 24 Détermination de la position PSG de l'échantillon PD-3 : Si_{2p} (eV):102 /106; P_{2p} (eV):130.1 /139.5; O_{1s} (eV):535/539.

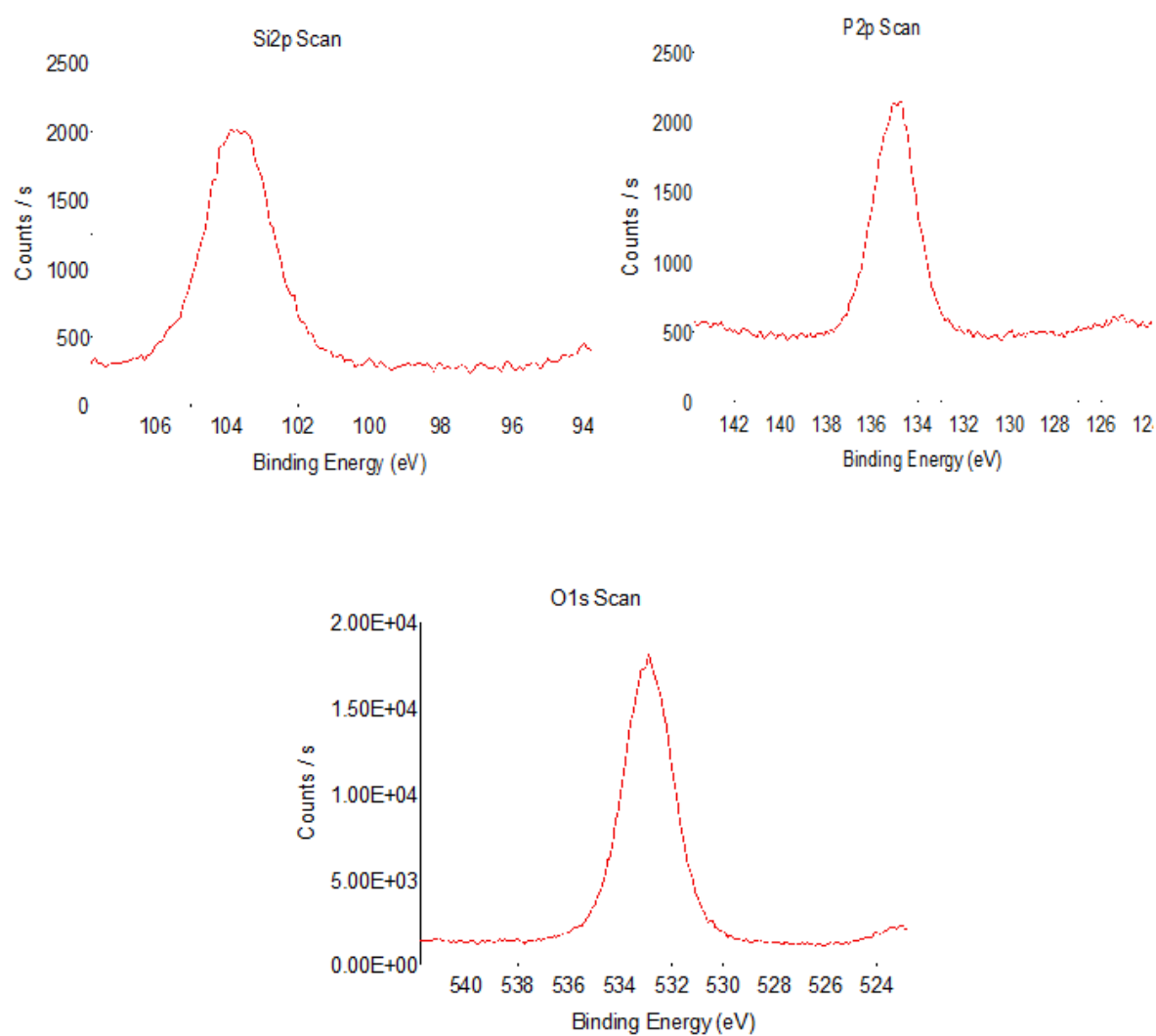


Figure III. 25 Détermination de la position PSG de l'échantillon PD-4 : Si_{2p} (eV):102 /106; P_{2p} (eV):130.1 /139.5; O1s (eV):535/539.

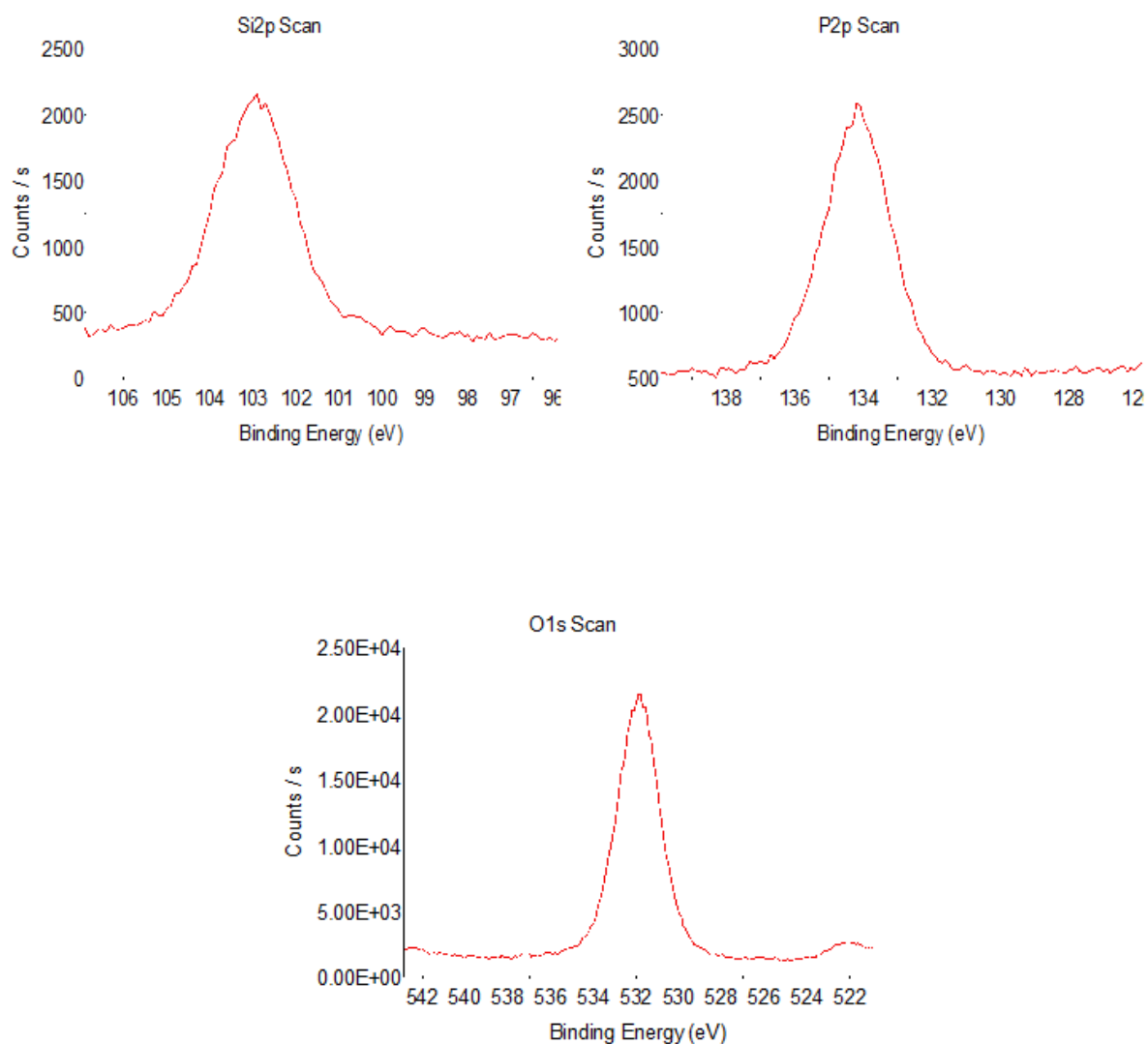


Figure III. 26 Détermination de la position PSG de l'échantillon PD-5 : Si_{2p} (eV):102 /106; P_{2p} (eV):130.1 /139.5; O_{1s} (eV):535/539.

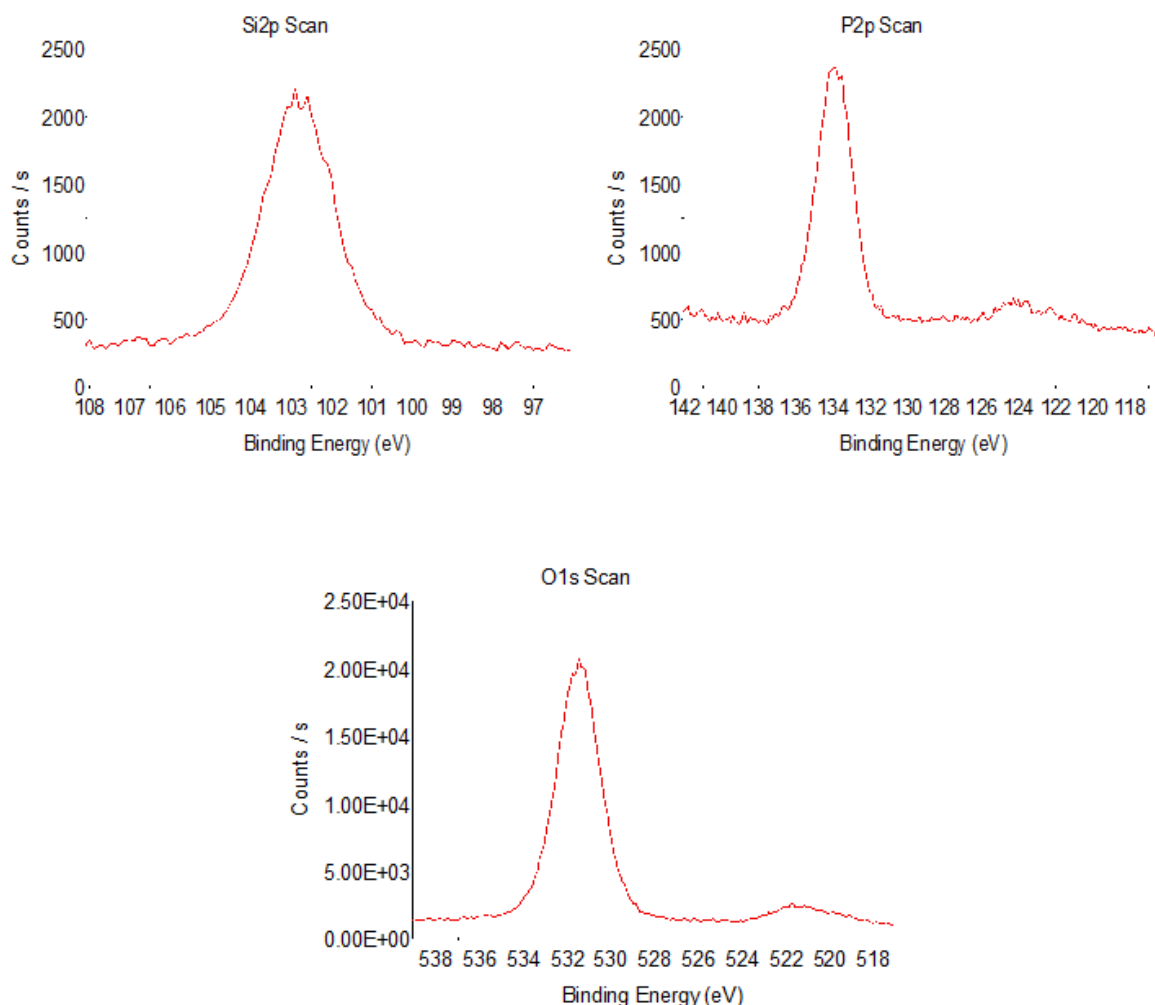


Figure III. 27 Détermination de la position PSG de l'échantillon PD-6 : Si_{2p} (eV):102 /106; P_{2p} (eV):130.1 /139.5; O1s (eV):535/539.

III.7.1 Interprétation des résultats

Nous observons à l'analyse XPS de nos échantillons, la présence des pic intéressants tel que l'oxygène avec une grande énergie de liaison d'une valeur de 531 et 532 ev et des plus petits pics d'énergie comme le phosphore avec une énergie de liaison entre 133 et 135 ev et le silicium présent par une énergie de 100 et 104 ev .

La présence conjointe des pics P_{2p} et O1s caractéristiques des phosphates et des liaisons Si-O-P indique la formation d'une couche de phosphosilicate de verre (PSG) à la surface de l'échantillon.

III.8 Conclusion

D'après le traitement du dépôt des couches PSG (Phospho Silicate Glass) par la diffusion du phosphore dans le silicium multi-cristallin (type p) à partir des sources préformées (sources solides), nous avons retenu les conclusions suivantes :

L'étude de l'effet de la température et du temps de diffusion sur les propriétés du PSG. Dans cette étape, nous avons augmenté la température (Ramp-up) de 400°C à 600°C, 700°C, et 750°C avec une différence de durée comprise entre 10, 20 et 30 minutes. Les flux d'azote et d'oxygène sont maintenus constants, respectivement 2,75 SLM et 0,75 SLM.

La résistance carrée diminue de 167.4 à 76.7 Ω/cm à mesure que la température du pré-dépôt augmente de 600°C à 750°C. Aussi, La résistance carrée diminue également légèrement lorsque le temps de diffusion augmente de 10 minutes à 30 minutes.

La réalisation des jonctions n+ par la diffusion (pré dépôt) du phosphore à partir des couches PSG obtenues dans la partie précédente dépend de paramètres expérimentaux étudiés à savoir la température et le temps de pré dépôt.

Nous avons évalué les résultats obtenus en mesurant la résistance par carrée et les profils de diffusion et on a pu obtenir les valeurs des résistances carrées avec une bonne uniformité égales à 59,57, 2,23, 16,4, 23,9 et 6 $\Omega/\text{carré}$, respectivement.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif de ce travail consistait en premier lieu à étudier la formation de la couche PSG (phosphorus-silicate-glass ou verre-silicaté-phosphore) à partir des sources préformes (sources solides), puis de voir les étapes technologiques à suivre et les techniques utilisées pour faire les techniques de caractérisations pour les échantillons des couches minces tout en passant par un prés-dépôt dont laquelle se forme la couche PSG riche en phosphore.

Réalisation des jonctions n^+ par la diffusion (pré dépôt) du phosphore à partir des couches PSG et enfin de savoir l'effet de la température et de la durée du processus pour pouvoir déterminer le paramètre influant sur la diffusion du phosphore dans les échantillons en faisant varié ces deux paramètres lors de procédés.

Nous avons pu réaliser des émetteurs pn^+ par diffusion de phosphore à partir d'une source solide (sources préformes) aussi que du processus de drive in pour des températures élevées et des temps de pré dépôt fixe, permettant une diffusion efficace du phosphore et une pénétration plus profond dans les échantillons.

L'augmentation de la température de diffusion entraîne une diminution de la résistance carrée de 354,58 jusqu'à 48,09 ohm/carré

Les spectres FTIR nous permettent de présenter les pics de la présence des liens phosphoreux organiques et minéraux dans la couche formée, les bandes d'absorption autour de 1250-1300 cm^{-1} dans les spectres FTIR indiquent la présence de liaisons $\text{P}=\text{O}$ dans le verre PSG

L'analyse EDS confirme les propriétés et la composition chimique des couche PSG par la présence de phosphore attendue 8.20 % et indique que le dopage a été effectué correctement et la spectrométrie XPS on a déterminé de la position PSG : $\text{Si}2p$ (eV) :102 /106 ; $\text{P}2p$ (eV) :130.1 /139.5; $\text{O}1s$ (eV):535/539.

Le microscope électronique à balayage MEB nous permet de visualiser et d'analyser les caractéristiques des couches PSG et à déterminer la taille des grains entre 0.3 et 0.7 μm

La température de dépôt a un effet significatif sur la qualité et la composition de la couche PSG. Des températures de dépôt plus élevées conduisent à des films plus denses et plus stables, avec une meilleure réaction de surface et une meilleure composition.

La durée de pré-dépôt influence également les propriétés de la couche PSG. Une durée de pré-dépôt plus longue permet une meilleure diffusion du phosphore dans le silicium et la formation d'une couche PSG plus homogène et mieux définie.

L'étude a mis en évidence l'importance des paramètres de température et de durée de pré-dépôt sur les caractéristiques de la couche PSG, un matériau clé dans la fabrication des dispositifs à semi-conducteurs.

Ces résultats permettront d'optimiser les procédés de dépôt de la couche PSG pour améliorer les performances des composants électroniques.

Le processus de drive-in est une étape essentielle proposer dans la fabrication des cellules PERC et PERT car il permet une diffusion plus efficace de phosphore pour former l'émetteur ce processus doit être soigneusement contrôler pour éviter tout dommage thermique aux couches et substrats causé par des température supérieur à 800 C°

Références bibliographiques

Bibliographie introduction générale

[1] Article Évaluation des besoins en technologies et plans d’actions technologiques pour L’atténuation des changements climatiques.

Bibliographie chapitre I

[1] Thèse de doctorat Thomas Mambrini Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d’implantation et en fonction des différentes technologies 2015

[2] Livre Energie solaire photovoltaïque Anne Labouret Michel Villos

[3] Mémoire Fin d’étude Alouache naima Etude de l’effet des divers paramètres sur le rendement photovoltaïque d’une cellule solaire à base du mono-silicium 2018

[4] Article PrimeEnergytechnics

[5] Mémoire Fin d’étude Rouag Ilyas Etude de comportement de la capacité d’une diode polycristalline latérale

[6] Thèse de doctorat Mekemeche Abdelkader Modélisation à deux dimensions des propriétés physiques de cellules solaires au silicium à base de substrat de type n. Étude de quelques cas particuliers de cellules innovantes.2017

[7] Thèse de doctorat Nichapour OleKsiy (simulation, fabrication et analyse de cellule photovoltaïque à contacte arrières interdigités) L’institut national des sciences appliquées de Lyon 2005.

[8] International Technology Roadmap for Photovoltaic Ninth Edition. 2018.

[9] D.-H. Neuhaus and A. Münzer. Industrial Silicon Wafer Solar Cells. Advances in OptoElectronics, 2007 :1–15, 2007.

[10] S. N. Singh and G. C. Jain. Effect of the back-surface field on the open-circuit voltages of p⁺-n-n⁺ and n⁺-p-p⁺ silicon solar cells. Solar Cells, 5(2) :143–172, 1982.

[11] A. W. Blakers, A. Wang, A. M. Milne, J. Zhao, and M. A. Green. 22.8% efficient silicon solar cell. Applied Physics Letters, 55(13) :1363–1365, 1989.

[12] M. D. Lammert and R. J. Schwartz, "The interdigitated back contact solar cell : A silicon solar cell for use in concentrated sunlight," IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 24, pp. 337–342, Apr. 1977.

[13] Thèse de doctorat Félix Gérenton Procédés innovants adaptés aux cellules photovoltaïques PERC en couches minces de silicium cristallin 2016

[14] Front Surface Field Formation And Diffusion Profiles For INDUSTRIAL INTERDIGITATED BACK CONTACT Solar Cells 2012

[15] Optimization of Front Diffusion Profile in Bifacial Interdigitated Back Contact Solar Cell 2020

chapitre 2 [16] Mebarki Mourad, Rapport de titularisation. « Réalisation d'émetteurs uniformes et homogène par la technique LYDOP (Leakting Yield Doping) : Application aux émetteurs sélectifs ». CRTSE, Octobre (2014).

Bibliographie chapitre II

[1] Thèse de doctorat Dalila HOCINE Élaboration de films minces de TiO₂ par APCVD : optimisation des propriétés optoélectroniques et structurales pour applications photovoltaïques 2013

[2] Thèse de doctorat Ilham CHADLI Synthèse et caractérisation des sels précurseurs Par la méthode sol gel 2017

[3] Thèse de Doctorat Bakha Yamna : " Propriétés optoélectroniques de l'oxyde de zinc préparé chimiquement, phénomènes d'adsorption et application à la détection des gaz", (2013).

[4] Thèse de doctorat CHRIS LEROUX Analyses cristallographiques et spectroscopiques par microscopie électronique de matériaux innovants à matrice oxyde ou oxysulfure en vue d'applications multiferroïques en luminescentes 2023

[5] Thèse de doctorat Nouvelles approches d'utilisation de la spectroscopie de photoélectrons à rayons X (XPS) pour le développement et le contrôle des technologies FDSOI avancées Laurent Fauquier 2017

Bibliographie chapitre III

[1] BOUHAFS Djoudi, thèse doctorat, « Contribution au développement de cellules solaires au silicium multi cristallin par gettering au phosphore et atomisation d'émulsions dopantes ». Université M'Hamed Bougara-Boumerdes, 2009.

I. 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 (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%.

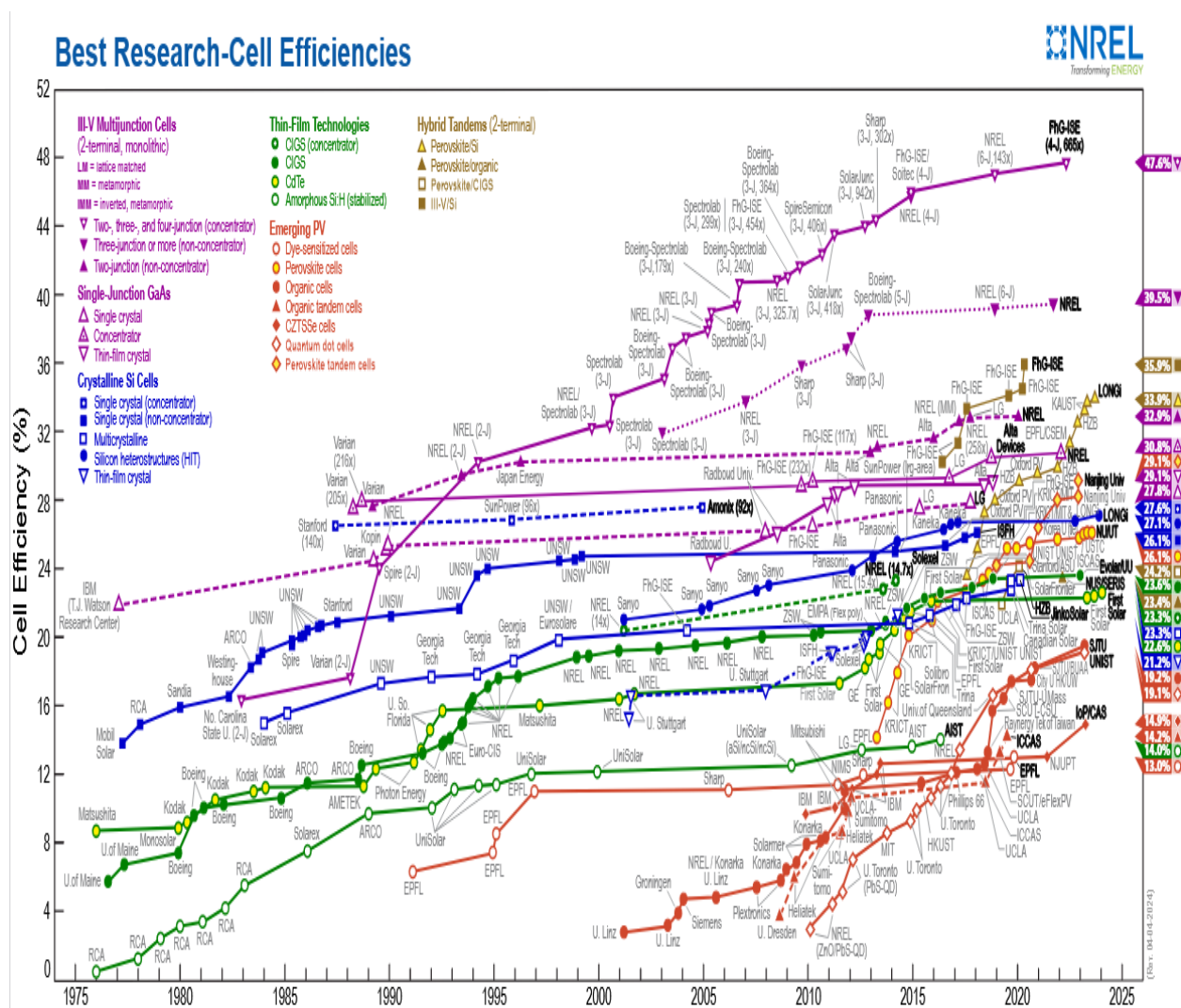


Figure A.1 Diagramme montrant les différentes technologies et l'évolution des rendements des cellules au niveau de laboratoire (Source. NREL, 2024).

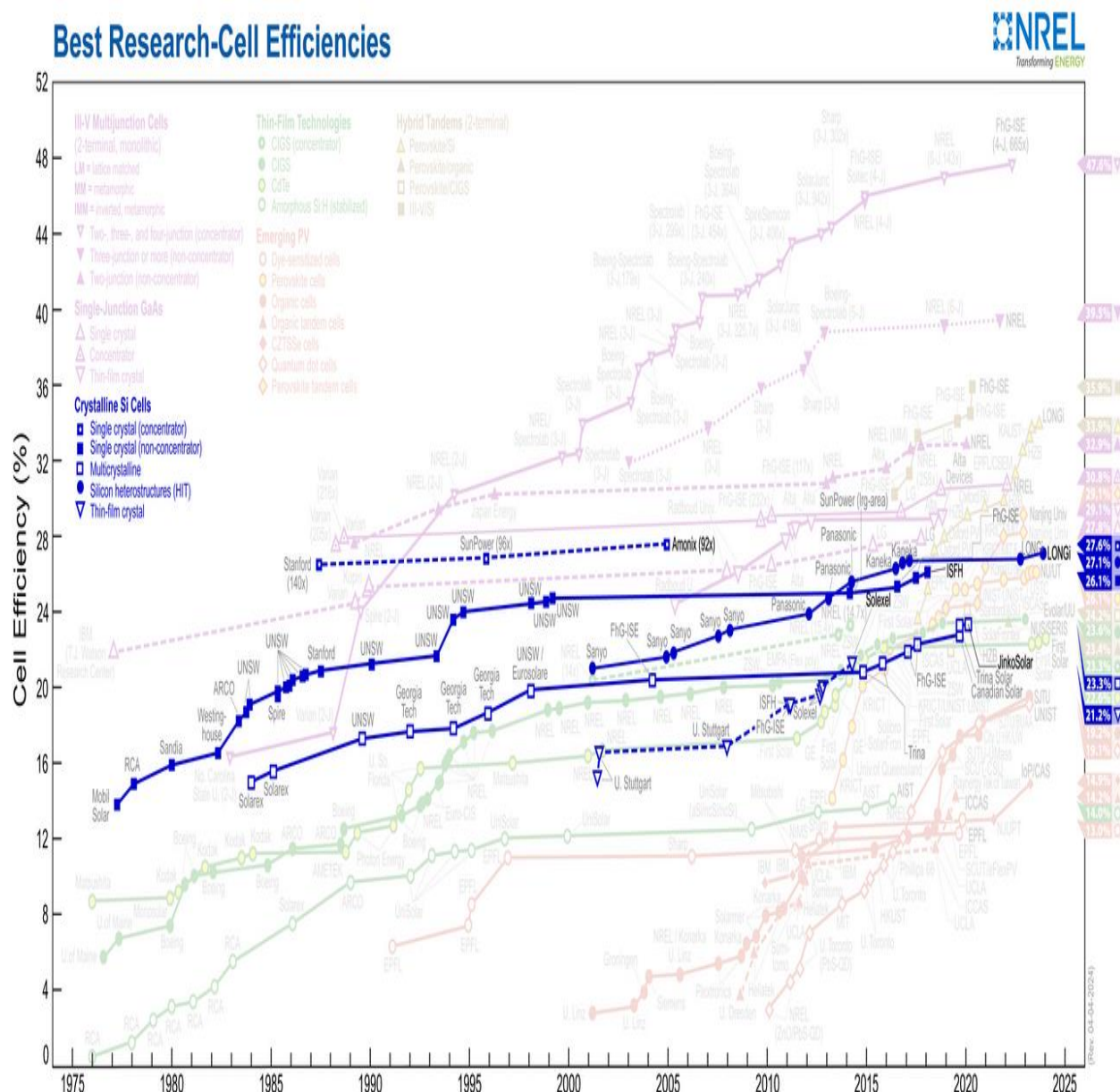


Figure A.2 Diagramme montrant les différentes technologies et l'évolution des rendements des cellules au niveau de laboratoire (Source. NREL, 2024).