

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE de BLIDA 1

Faculté de Technologie

Département de Génie des procédés



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

Pour l'obtention du diplôme de master

EN GENIE DES PROCEDES

Spécialité : Génie des polymères.

THEME:

Elaboration et caractérisation des nano-composites PBI/EVA
pour une application en photovoltaïque

Réalisée par :

M^{elle}. GUENZET Chahrazed et M^{elle}. ZEBIRI Yasmine.

DEVANT LE JURY

Président :	Pr. BENMAAMER	Univ. Saad dahleb Blida 1
Promotrice :	Dr. MEZINE Z	CRTSE
Co-promotrice :	Pr. HAMITOUCH H	Univ. Saad dahleb Blida 1
Examineur :	Dr. MOKDED	Univ. Saad dahleb Blida 1

Année universitaire 2022/2023.

الملخص :

إن الانعطاف التنازلي (LDS) هو نهج بصري مطبق في العديد من تقنيات الخلايا الكهروضوئية (PV) لتحسين التطابق الطيفي بين الخلايا الشمسية وتوزيع ضوء الشمس. تتكون طبقة LDS من لوح بوليمر مثل بوليمر أسيتات فينيل الإيثيلين (EVA) مع جزيئات الإنارة المضمنة ، والتي يمكنها امتصاص فوتونات الطول الموجي القصير (λ) ، حيث تستجيب الخلية الكهروضوئية بشكل سيئ ($\lambda < 400$) نانومتر وتعيد إصدار الفوتونات في الطيف المرئي ، حيث تكون استجابته الطيفية أكبر بكثير ويقع الهدف من هذا العمل ضمن هذا الإطار. لذلك نحتاج إلى تجميع وتوصيف طبقات LDS ، القادرة على تحويل الطاقة المفقودة في النطاق فوق البنفسجي إلى النطاق المرئي من أجل استغلالها . في البداية ، قمنا بتطوير دراسة تجريبية حول تركيب أفلام PBI / EVA المركبة. بعد ذلك ، تميزت الأفلام المنتجة بمسح المجهر الإلكتروني (SEM) و XPS و FTIR والأشعة فوق البنفسجية المرئية والتألق الضوئي. أبرزت النتائج التي تم الحصول عليها شكل قضيب للجسيمات النانوية PBI ، وكذلك أظهر تحليل XPS دمج الجسيمات النانوية PBI في مصفوفة EVA. أظهر تحليل الأشعة تحت الحمراء المجموعات الوظيفية المختلفة الموجودة داخل المركب ، والنفاذية الضوئية للمركب التي تم الحصول عليها بحجم 0.8 مل أكبر من 95%. أخيرًا ، تمت دراسة الطبيعة الضوئية للمركب عن طريق التألق الضوئي وتظهر النتائج التي تم الحصول عليها أن PBI مادة مرشحة للتطبيق في الخلايا الكهروضوئية.

الكلمات الدالة: مركب نانوي ، طاقة ، تحويل لأسفل، تغلي، الايثيلين فينيل اسيتات، ثنائي أميد بيريلين.

Résumé :

Luminescent Down-Shifting (LDS) est une approche optique appliquée dans plusieurs technologies photovoltaïques (PV) pour améliorer l'adéquation spectrale entre les cellules solaires et la distribution de la lumière solaire. La couche LDS est constituée d'une feuille de polymère comme le polymère d'éthylène-acétate de vinyle (EVA) avec des molécules luminescentes intégrées, qui peuvent absorber les photons de courte longueur d'onde (λ), où la cellule PV répond mal ($\lambda < 400$ nm) et réémettent des photons dans le spectre visible, où sa réponse spectrale est beaucoup plus importante et l'objectif de ce travail s'inscrit dans ce cadre. IL nous faut donc synthétiser et caractériser des couches LDS, capable de convertir l'énergie perdante dans la gamme Ultra-Violette vers la gamme du visible afin de l'exploiter.

Au départ, nous avons développé une étude expérimentale sur la synthèse des films composites du PBI/EVA. Par la suite, les films élaborés ont été caractérisés par microscopie électronique à balayage (MEB), XPS, FTIR, UV-visible et la photoluminescence.

Les résultats obtenus mis en évidence une forme de bâtonnets pour les nanoparticules du PBI, ainsi que l'analyse XPS a montré l'incorporation des nanoparticules du PBI dans la matrice de l'EVA. L'analyse IR a montré les différents groupes fonctionnels qui se trouve au sein du composite. La transmittance optique du composite obtenu à un volume de 0.8ml est

supérieur à 95%. Enfin le caractère photoluminescent du composite est étudié par la photoluminescence et les résultats obtenus montrent que le PBI est matériaux candidat pour une application en photovoltaïque.

Mots clés : PBI-EVA, Nano-composite, luminescence down shifting, polymères, Encapsulation

Abstract:

Luminescent Down-Shifting (LDS) is an optical approach applied in several photovoltaic (PV) technologies to improve the spectral match between solar cells and the distribution of sunlight. The LDS layer is made of a polymer sheet like ethylene-vinyl acetate polymer (EVA) with embedded luminescent molecules, which can absorb short wavelength (λ) photons, where the PV cell responds poorly ($\lambda < 400$ nm) and re-emit photons in the visible spectrum, where its spectral response is much greater and the objective of this work falls within this framework. We therefore need to synthesize and characterize LDS layers, capable of convert the energy lost in the ultraviolet range to the visible range in order to exploit it. Initially, we developed an experimental study on the synthesis of PBI/EVA composite films. Subsequently, the films produced were characterized by scanning electron microscopy (SEM), XPS, FTIR, UV-visible and photoluminescence. The results obtained highlighted a rod shape for the PBI nano particles, as well as the XPS analysis showed the incorporation of the PBI nanoparticles into the EVA matrix. The IR analysis showed the different functional groups found within the composite. The optical transmittance of the composite obtained at a volume of 0.8ml is greater than 95%. Finally, the photoluminescent nature of the composite is studied by photoluminescence and the results obtained show that PBI is a candidate material for an application in photovoltaics.

Keywords: PBI-EVA, Nano-composite, luminescence down shifting, polymers, Encapsulation

Remerciement

Ce travail a été accompli au sein de centre de recherche en technologies des semi-conducteurs pour l'énergétiques CRTSE au laboratoire de recherche des semi-conducteurs, sous la direction de Mme .MeZINE, à qui nous exprimons notre profonde gratitude et nos sincères remerciements et pour nous avoir permis de préparer notre mémoire dans des meilleures conditions, ses conseils, ces encouragements et la patience qu'il nous a accordée tout au long de ces mois et de nous avoir données la chance de profiter de son expérience.

Nous souhaitons nous adresser nos remerciements aux enseignante du département de génie des procédés, Mme. HAMITOUCH pour ses conseils et ses orientations, leurs disponibilités dans toutes nos démarches.

Nous remercions l'ensemble de membres du jury monsieur Pr. BENMAAMER et madame Dr. MOKDED, de nos avoir fait l'honneur d'assurer la présidence du jury.

Dédicace

Je dédie ce travail

A tous les membres de ma famille pour leurs sacrifices, leurs encouragements et pour leur soutien moral plus précisément à ma maman et mon petit frère Yanis qui sont la cause principale de mes succès.

A mes merveilleux amis surtout ma copine Ikram ainsi que ma chère Mammon et ma sœur Amel qui n'ont cessé de m'aider et de me conseiller pour accomplir ce travail.

Youssra, Safaa, Nasrine, Amina, Nadjet, Fatma.

Sans oublier tous mes camarades.

En fin à tous ceux qui m'ont aidé de prêt ou de loin.

Dédicace

À mes parents et à mes proches,

Je tiens à vous exprimer ma profonde gratitude pour votre soutien inconditionnel tout au long de mon projet de fin d'études. Votre amour, vos encouragements et votre présence ont été des sources essentielles de motivation et de force.

À mes chers parents, vous avez été mes premiers enseignants et mes plus grands soutiens. Votre dévouement à mon éducation et votre croyance en mes capacités ont été les fondations de ma réussite. Je vous suis infiniment reconnaissant(e) pour votre amour et vos sacrifices.

À vous mes sœurs Ikram, Abir, Wissem, et mon frère Oussama mon amie Meriem et mon cher binôme Chahra, votre soutien constant et votre confiance en moi ont été une source d'inspiration. Vos encouragements et votre présence dans ma vie ont été précieux et ont contribué à ma réussite. Je vous remercie du fond du cœur pour votre soutien indéfectible.

Ce projet de fin d'études est le fruit de notre collaboration et de notre engagement collectif. Je suis honoré(e) de vous avoir à mes côtés pendant ce parcours. Votre amour et votre soutien ont été ma plus grande motivation.

Je vous suis infiniment reconnaissant(e) pour tout ce que vous avez fait pour moi. Votre présence dans ma vie a été un cadeau précieux et je suis fier(e) de pouvoir partager ce succès avec vous.

Avec tout mon amour et ma gratitude,

yasmine

TABLE DES MATIERES

Résumé

Mots clés

Liste des tableaux

Liste des figures

Introduction générale 01

Chapitre I : GENERALITE SUR L'ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAIQUE

I. L'énergie solaire.....	04
I.1. Le rayonnement solaire.....	04
I.2. L'énergie solaire photovoltaïque.....	05
I.3. Les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque.....	06
I.3.1. Les avantages de l'énergie photovoltaïque.....	06
I.3.2. Les inconvénients de l'énergie photovoltaïque	06
I.4. Module photovoltaïque	07
I.5. Evolution de construction des systèmes de production.....	07
I.5.1. Constituants d'un module photovoltaïque.....	08
I.5.2. Lamination des modules photovoltaïques.....	09
I.6. Cellule photovoltaïque	09
I.6.1. Type de cellules photovoltaïques	10
I.6.1.a. Cellule au silicium monocristallin.....	10
I.6.1.b. Cellule au Silicium poly-cristallin.....	11
I.6.1.c. Cellule au Silicium nanocristallin et amorphe.....	11
I.6.2. Encapsulation de cellules solaires	12
I.7. L'éthylène vinyle acétate EVA.....	12
I.7.1. Rôle de l'EVA.....	13

I.7.2. L'Encapsulation par EVA.....	14
I.7.3. Phénomène de dégradation d'EVA.....	15
I.8. Nano composites.....	16
I.8.1. Différents types de nano composites polymères.....	16
I.8.2. Pérylène diimide PDI ou pérylène biimide PBI.....	16
I.8.3. Propriétés de PBI.....	17
I.8.4. Eva dopé par PBI.....	17
I.9. Down-shifting.....	18
I.9.1. Le down-shifting avec des colorants organiques ou de nanoparticules.....	19
I.9.2. Comment réaliser le down-shifting des modules photovoltaïques ?.....	21
I.10. Conclusion	21

Chapitre II : Les Techniques de Caractérisations

I. mode opératoire.....	23
I.1.les produits.....	23
I.2. Dissolution de l'EVA.....	23
I.3. Préparation de la solution du dopant PBI.....	24
I.4. Préparations des films	25
II. Les techniques de caractérisation.....	26
II.1. Microscopie Electronique à Balayage (MEB).....	26
II.1.1. Constitution du microscope électronique à balayage	26
II.1.2. Principe de fonctionnement.....	26
II.2. Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR).....	29
II.2.1. Principe de fonctionnement.....	29
II.3. La photoluminescence.....	30
II.3.1. La fluorescence et la phosphorescence.....	31

II.3.2. Domaine d'application de la photoluminescence.....	32
II.4. UV-Visible.....	33
II.5. Spectrométrie de photoélectrons X (XPS)	35
II.5.1. Le principe de base.....	35

Chapitre III : Résultats et discussions

I. Résultats et Discussion.....	37
I.1. Caractérisation morphologique.....	37
I.2. Analyse par XPS.....	38
I.2.1. Analyse XPS du composite PBI/EVA.....	39
I.3. Analyse par Spectroscopie infrarouge.....	40
I.4. Analyse par UV-visible.....	42
I.5. Analyse par la photoluminescence.....	43
I.5.1. Photoluminescence de L'EVA.....	43
I.5.2. Analyse par photoluminescence du composite PBI/EVA.....	44
Conclusions.....	46
Perspectives	46
Références bibliographiques	

LISTE DES TABLEAUX ET FIGURE

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1. Spectre électromagnétique	04
Tableau II.1. Concentrations de PBI choisi.....	25

LISTE DES FIGURES

Chapitre I : GENERALITE SUR L'ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAIQUE

Figure I.1. Composantes du rayonnement solaire : extraterrestre, global = direct + diffus + albédo	05
Figure I.2. Module photovoltaïques Silicium monocristallin	07
Figure I.3. Chaîne de fabrication des panneaux photovoltaïques.....	08
Figure I.4. Composants d'un module photovoltaïque	09
Figure I.5. Description d'une cellule photovoltaïque.....	10
Figure I.6. Cellule au Silicium monocristallin.....	11
Figure I.7. Cellule au Silicium poly cristallin	11
Figure I.8. Cellule au Silicium amorphe.....	12
Figure I.9. Structure de l'éthylène vinyle acétate EVA.....	12
Figure I.10. Granulés d'EVA conçus pour être mis en forme.....	13
Figure I.11. Machine de laminage sous vide.....	14
Figure I.12. Types de dégradation de l'EVA.....	15
Figure I.13. Structure de PBI.....	17
Figure I.14. Schéma de la technique down-shifting.....	19
Figure I.15. Schéma de down-shifting avec des colorants organiques.....	20
Figure I.16. Schéma de l'absorption des photons pour le down-shifting.....	20

Chapitre II : Les Techniques de Caractérisations (matérielles et méthodes)

Figure II.1. Granulés de l'EVA à 40% de VA.....	24
Figure II.2. EVA liquide.....	24
Figure II.3. Poudre du dopant PBI.....	25
Figure II.4. Échantillons de différentes concentrations de PBI.....	25
Figure II.5. Différentes particules qui résultent de l'impact d'un faisceau électrique sur une surface solide.....	27
Figure II.6. Schéma de principe du microscope électronique à balayage.....	28
Figure II.7. Modes vibrationnels infrarouge d'une liaison CH.....	30
Figure II.8. Représentation schématique du principe de la photoluminescence.....	31
Figure II.19. Diagramme énergétique montrant l'absorption de la lumière et les processus impliqués dans l'émission de la lumière sous forme de fluorescence et de phosphorescence.....	32
Figure II.10. Diagramme d'orbitale moléculaire et transition électronique.....	34
Figure II.11. Principe fondamentale de bombardement et de fonctionnement de XPS.....	35

Chapitre III : Résultats et discussions

Figure III.1. Image MEB de PBI : (a) PBI à 1µm, (b) PBI à 10µm.....	37
Figure III.2. Spectre XPS de l'EVA.....	38
Figure III.3. Spectre XPS du carbone à haute résolution.....	38
Figure III.4. Spectre XPS de l'oxygène à haute résolution.....	38
Figure III.5. Spectre XPS (1) de BPI/EVA.....	39
Figure III.6. Spectre XPS (1) de BPI/EVA.....	40
Figure III.7. Spectre XPS (1) de BPI/EVA.....	40
Figure III.8. Spectre XPS (1) de BPI/EVA.....	40

Figure III.9. Spectre infrarouge de référence EVA	41
Figure III.10. Spectre d'échenillons de PBI/EVA.....	42
Figure III.11. Spectre d'échenillons de PBI/EVA.....	42
Figure III.12. Spectre d'échenillons de PBI/EVA.....	42
Figure III.13. Spectre d'échenillons de PBI/EVA.....	42
Figure III.14. Spectre UV-visible du film PBI/EVA.....	43
Figure III.15. Spectre de la photoluminescence de l'EVA.....	44
Figure III. 16. Spectre de la photoluminescence de la poudre PBI.....	.44
Figure III. 17. Spectre photoluminescence du PBI /EVA à différentes concentrations.....	44

LISTE DES ABREVIATIONS

EVA : Ethylène acétate de vinyle

PBI : Pérylène biimide

PVB : Polyvinylbutyral

PBI : Pérylène biimide

PV : Photovoltaïque

IR : Infrarouge

UV : Ultraviolet

WVTR : Taux de transmission de la vapeur d'eau

HOMO : Bande de valence

LUMO : Bande de conduction

OPV : Photovoltaïques organiques

DEL : Diodes électroluminescentes

LFC : Lampes fluorescentes compactes

INTRODUCTION

La demande mondiale d'énergie à partir de sources d'énergie propres pour diverses applications a augmenté à un rythme effréné [1]. Les sources d'énergie primaires telles que les combustibles fossiles, le gaz naturel et le charbon sont largement utilisées pour satisfaire les besoins énergétiques domestiques et commerciaux existants [2]. Toutefois, ces sources d'énergie sont limitées et s'épuiseront dans un avenir proche. Il est donc nécessaire de développer des sources d'énergie alternatives pour résoudre ces problèmes. Les chercheurs ont commencé à s'intéresser aux ressources dites " renouvelables " dont la source est le soleil.

L'utilisation des cellules solaires a débuté dans les années 40 et a pris son essor avec la conquête spatiale. Les recherches d'après-guerre ont permis d'améliorer leurs performances et leur taille mais ce n'est qu'aux années soixante-dix que les gouvernements et les industriels investissent dans la technologie photovoltaïque (PV) et ses applications terrestres [3].

Le photovoltaïque est la plus jeune des énergies renouvelables, il a l'avantage d'être non polluant et fiable. Il permet alors d'éviter l'installation de groupes électrogènes qui posent des problèmes de fiabilité et d'approvisionnement en carburant [4].

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule.

La cellule photovoltaïque est composée d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique et cette cellule est encapsulée par un composite pour améliorer sa performance.

L'encapsulation des cellules (et des panneaux) solaires est un problème critique pour la bien performance à long terme de ces appareils. En principe, la plupart des matériaux actifs des cellules solaires sont sensibles, par exemple, à l'oxygène et à l'humidité ambiante, aux rayons UV, à la chaleur et même aux menaces mécaniques de l'environnement, et les couches actives doivent être protégées de ces phénomènes par une encapsulation appropriée. En plus de la fonctionnalité de protection, les matériaux d'encapsulation des cellules solaires doivent

être transparents du côté des cellules solaires où la lumière est incidente sur les cellules solaires. Ils doivent être peu coûteux et viables sur le plan industriel, et parfois la flexibilité est une propriété souhaitée. Ils doivent supporter les contraintes environnementales mentionnées ci-dessus et atteindre une stabilité à long terme, de préférence sur des périodes de plus de 20 ans [5].

Le matériau utilisé dans l'encapsulation des cellules photovoltaïques est le poly (éthylène acétate de vinyle) (EVA), il est important et largement utilisé dans l'isolation électrique, l'encapsulation des cellules photovoltaïques, malgré ces avantages qu'il contient, il présente des inconvénients tels que l'absorption des rayons UV et sa dégradation ce qui entrave ses performances, afin d'améliorer ses dernières et augmenté sa durée de vie, les chercheurs ont introduit la notion de dopage.

Le dopant utilisé dans notre travail est le pérylène biimide (PBI) qui présente de bonnes absorptions lumineuses et des propriétés de transport de charges favorables ce qui améliore les performances optiques de l'EVA et permet de récupérer l'énergie dans le domaine du visible.

Le manuscrit s'articule autour de trois chapitres, le premier chapitre est consacré à une synthèse bibliographique qui présente des notions sur l'énergie solaire photovoltaïque avec ses avantages et inconvénients et la cellule photovoltaïque avec ses différents types, puis la deuxième partie présente les constituants d'un module photovoltaïque, l'encapsulation de cellules solaires et nano-composites avec ses différents types.

Par la suite, nous avons parlé : de la notion du down-shifting, de l'éthylène vinyle acétate (EVA) et son rôle dans l'encapsulation, son phénomène de dégradation. Ainsi qu'on a discuté le pérylène bis imide PBI avec ses différentes propriétés.

Le deuxième chapitre est dédié à la partie expérimentale, ou nous avons cité le mode opératoire de la préparation du film PBI/EVA, ainsi que les techniques utilisées pour caractériser les nano-composite PBI/EVA.

Le troisième chapitre est consacré aux résultats obtenus et à l'interprétation de ces derniers. Ce travail se termine par une conclusion générale.

CHAPITRE I
GENERALITE SUR L'ENERGIE SOLAIRE
PHOTOVOLTAIQUE

Dans ce chapitre nous allons introduire dans la première partie des notions de base sur l'énergie solaire, puis des généralités sur l'énergie photovoltaïque et le principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques.

Nous présenterons ensuite dans la deuxième partie l'intérêt de l'étape de l'encapsulation des cellules solaire, puis le down-shifting et les nano composites. Enfin, nous finirons par les matériaux utilisés pour cette application.

I.L'énergie solaire

Le rayonnement solaire constitue la ressource énergétique la mieux partagée sur la terre et la plus abondante. La quantité d'énergie libérée par le soleil et captée par la planète terre pendant une heure pourrait suffire à couvrir les besoins énergétiques mondiaux pendant un an. Le soleil décharge continuellement une énorme quantité d'énergie radiante dans le système solaire, la terre intercepte une toute petite partie de l'énergie solaire rayonnée dans l'espace. Une moyenne de 1367 Watts atteint chaque mètre carré du bord externe de l'atmosphère terrestre pour une distance moyenne terre-soleil de 150 millions de km, c'est ce que l'on appelle la constante solaire qui est égale à 1367 W/m². La partie d'énergie reçue sur la surface de la terre dépend de l'épaisseur de l'atmosphère à traverser [6].

I.1 Le rayonnement solaire

Le spectre de la radiation solaire peut approximativement se diviser en ultraviolet (UV), lumière visible, infrarouge (IR) et de grandes longueurs d'ondes (chaleur).

Tableau I.1 : Spectre électromagnétique [7]

Les rayons		Gamme de longueur d'onde
Rayons X		0.01 à 1 Å
UltraViolet	UV extrême	1 à 100 Å
	UV éloigné	10 à 100 nm
	UV moyen	100 à 200 nm
	UV proche	200 à 300 nm
Rayons Gamma		300 à 400 nm
Lumière visible		400 à 770 nm
Infrarouge	IR proche	770 à 2500 nm
	IR moyen	2,5 à 30 µm
	IR éloigné	30 à 300 µm

Le Soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0,22 à 10 µm.

Il existe quatre types de rayonnement :

- **Rayonnement direct (I) :** rayonnement reçu directement du soleil. Il peut être mesuré par un pyrhéliomètre.
- **Rayonnement diffus (D) :** rayonnement provenant de toute la voûte céleste. Ce rayonnement est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie de rayonnement solaire par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages. Il peut être mesuré par un pyranomètre avec écran masquant le soleil.
- **Rayonnement solaire réfléchi ou l'albédo du sol :** le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige).
- **Rayonnement global (G) :** la somme de tous les rayonnements reçus, y compris le rayonnement réfléchi par le sol et les objets qui se trouvent à sa surface. Il est mesuré par un pyranomètre ou un solorimètre sans écran.

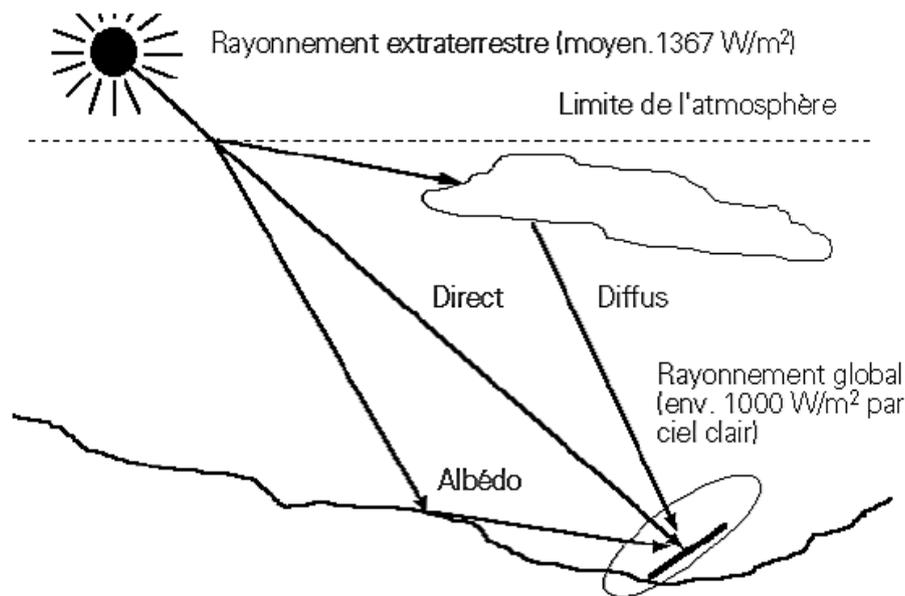


Figure I.1 : Composantes du rayonnement solaire: extraterrestre, global = direct + diffus + albédo [7,8].

I.2 L'énergie solaire photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est obtenu par absorption des photons dans un matériau semi-conducteur qui génère alors une tension électrique. Les cellules photovoltaïques produisent de courant continu à partir de rayonnement solaire, qui peut être utilisé pour alimenter un appareil ou recharger une batterie. Les panneaux photovoltaïques composés des cellules photovoltaïques à base de silicium ont la capacité de transformer les photons en électrons. Quand l'énergie nécessaire dépasse la quantité fournie par une seule cellule, les cellules sont regroupées pour former un module photovoltaïque, parfois désigné de manière ambiguë sous

le terme de panneau solaire. De tels modules ont été dans un premier temps utilisé pour alimenter des satellites en orbite, puis des équipements électriques dans des sites isolés. Enfin, la baisse des coûts de production élargit le champ d'application de l'énergie photovoltaïque à la production de l'électricité sur les réseaux électriques [9].

I.3 Les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque

I.3.1 Les avantages de l'énergie photovoltaïque

- L'énergie photovoltaïque offre de multiples avantages:
- La production de cette électricité renouvelable est propre. Elle n'est pas toxique.
- Les systèmes photovoltaïques sont fiables.
- L'énergie photovoltaïque est particulièrement attractive pour les sites urbains, dus à leur petite taille, et leur opération silencieuse.
- La lumière du soleil étant disponible partout, l'énergie photovoltaïque est exploitable aussi bien en montagne dans un village isolé que dans le centre d'une grande ville.
- L'électricité photovoltaïque est produite au plus près de son lieu de consommation, de manière décentralisée, directement chez l'utilisateur.
- Les matériaux employés (verre, aluminium) résistent aux pires conditions climatiques notamment à la grêle).
- La durée de vie des panneaux photovoltaïques est très longue. Certains producteurs garantissent les panneaux solaires pour une durée de 25 ans [10].

I.3.2 Les inconvénients de l'énergie photovoltaïque [11].

- Production d'énergie qui dépend de l'ensoleillement, toujours variable,
- Faible rendement de conversion. S'il faut stocker l'énergie avec des batteries, le coût de l'installation augmente.
- Pollution à la fabrication.
- Le coût très élevé.

I.4 Module photovoltaïque :

Afin d'augmenter la tension d'utilisation, les cellules PV sont connectées en série. La tension nominale du module est habituellement adaptée à la charge, les modules ont généralement 36 cellules. De plus fragilité des cellules à la corrosion exige une protection

envers leur environnement et celles-ci sont généralement encapsulées sous verre ou sous composé plastique. Le tout est appelé un module photovoltaïque [12].



Figure I.2 : Module photovoltaïques Silicium monocristallin.

I.5 Evolution de construction des systèmes de production :

Elles sont au nombre de quatre : la cristallisation de lingots de silicium de grade solaire, leur découpe en plaquettes (plus connue sous le nom de « wafers »), la réalisation des cellules et enfin leur mise en module. Cette dernière étape consiste à assembler les cellules et à les protéger des agressions extérieures par un procédé d'encapsulation.



Figure I.3 : Chaîne de fabrication des panneaux photovoltaïques.

I.5.1 Les constituants d'un module photovoltaïque

Le verre : C'est un verre trempé de 4 mm d'épaisseur, défini comme "verre solaire", en raison de sa faible teneur en fer qui lui permet une meilleure transmission optique. En générale, la transmission optique de ce verre est de l'ordre de 95 % dans la gamme utile du spectre solaire (380 nm à 1 200 nm). La face extérieure du verre traitée à l'acide fluosilicique (H_2SiF_6) est recouverte de nano pores qui piègent la lumière incidente et réduisent la réflexion en surface à une valeur inférieure à 8 %. En face intérieure, le verre est microstructure, augmentant ainsi le rendement par éclairage diffus.

L'encapsulant : est une résine transparente EVA ou PVB enrobant les cellules photovoltaïques. Ces résines sont utilisées car elles présentent de grandes propriétés adhésives, diélectriques, thermiques et d'étanchéité. Bien entendu, elles présentent aussi une excellente transmission optique.

Le mylar : est un film polymère transparent qui est utilisé pour isoler électriquement les connexions de sortie de la face arrière des cellules. Ce film présente un constant diélectrique très élevée lui permettant d'être un très bon isolant électrique.

Le Tedlar : est un polymère fluoré utilisé dans un module photovoltaïque pour assurer la protection de surface. En effet, le TEDLAR résiste particulièrement bien aux agressions extérieures (UV, variations de température, atmosphères corrosives...), à l'abrasion ainsi qu'aux produits chimiques.

Cadre en aluminium : se justifie par la haute résistance à l'humidité ainsi qu'aux chocs mécaniques. Le cadre en aluminium peut être anodisé. L'anodisation est un traitement de surface qui permet de protéger une pièce en aluminium par oxydation anodique (couche électriquement isolante de 5 à 50 micromètres). Elle octroie aux matériaux une meilleure résistance à l'usure, à la corrosion et à la chaleur [13].

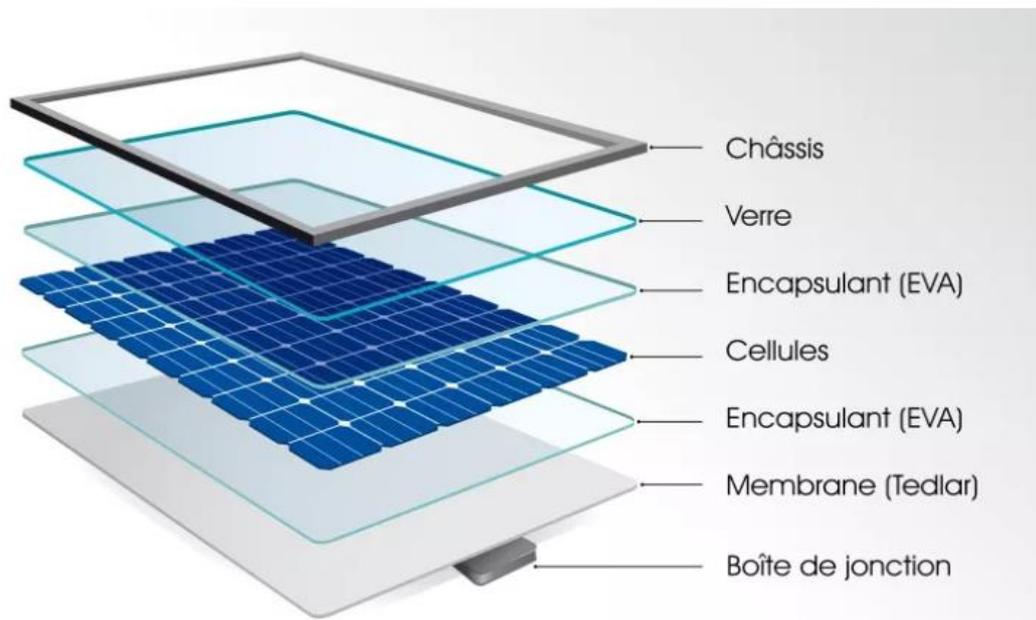


Figure I.4: Composants d'un module photovoltaïque.

I.5.2 Lamination des modules photovoltaïques

Le processus de lamination consiste à chauffer les modules et en même temps à les plaquer pour qu'ils deviennent très fins et sous vide. La lamination se fait en deux phases :

- Dans une première phase, on procède au pompage de l'air se trouvant à l'intérieur de la chambre inférieure contenant le laminât et ce durant 5 minutes. Le niveau du vide atteint est alors de 0.1 mmHg, il sera maintenu durant les opérations de lamination et de polymérisation.
- Dans une deuxième phase, alors que la chambre supérieure maintenue sous vide à 0.1 mmHg durant ces 5 minutes, elle sera mise sous pression atmosphérique pour une minute. A ce stade, l'action conjuguée de la pression exercée par le diaphragme et l'effet de l'aspiration conduit à chasser l'air résiduel se trouvant dans le laminât qui marque la fin du cycle de lamination.

I.6 Cellule photovoltaïque :

La cellule PV est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semi-conducteurs de type P-N qui produisent un courant électrique sous l'effet des photons lumineux. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants :

- Absorption des photons par le matériau constituant le dispositif
- Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, Ce qui correspond à la création des paires d'électrons/trous dans le matériau semi-conducteur
- Collecte des particules générées dans le dispositif.

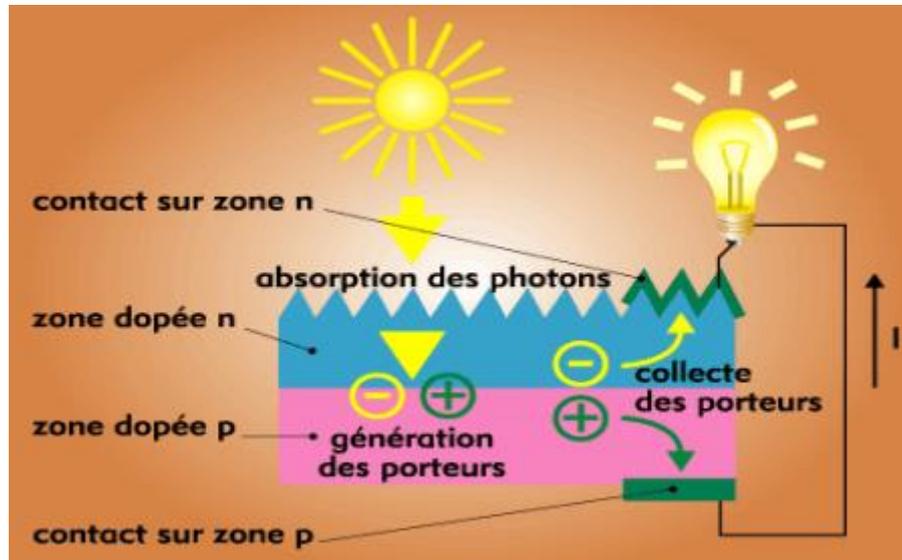


Figure I.5 : Description d'une cellule photovoltaïque [14].

I.6.1 Type de cellules photovoltaïques :

Il existe différentes sortes de cellules photovoltaïques. Même si elles fonctionnent globalement de la même manière, elles ont chacune leurs spécificités. On peut distinguer trois grands types de cellules solaires :

I.6.1.a Cellule au silicium mono-cristallin :

Pour ce genre d'applications technologiques, le Silicium pur est obtenu à partir de la Silice de Quartz ou de sable par transformation chimique métallurgique. Le Silicium a un rendement électrique et une durée de vie de l'ordre de deux fois celle du Silicium amorphe, mais il est nettement plus cher.

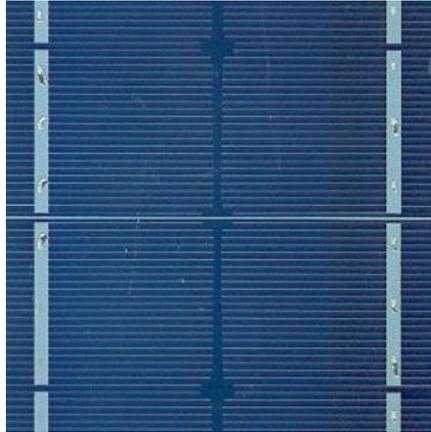


Figure I.6 : Cellule au Silicium monocristallin.

I.6.1.b. Cellule au Silicium poly-cristallin

Le Silicium poly-cristallin est un matériau composé de cristaux juxtaposés obtenus par moulage. Ce matériau est moins coûteux (que le mono-cristallin). Les cellules carrées ou rectangulaires sont faciles à utiliser [15].

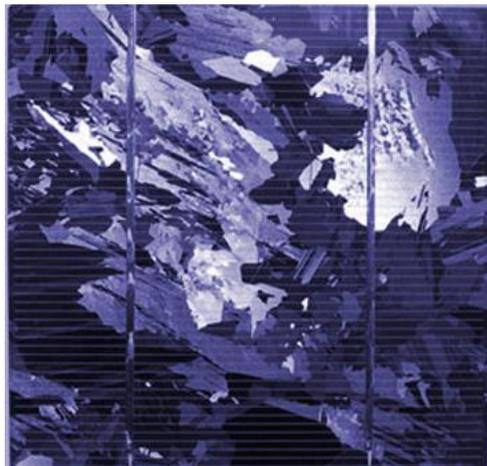


Figure I.7 : Photo représentant la cellule au Silicium poly-cristallin.

I.6.1.c Cellule au Silicium nanocristallin et amorphe

Le Silicium absorbe le rayonnement solaire jusqu'à 100 fois mieux qu'en état cristallin, les cellules sont constituées par des couches très minces.

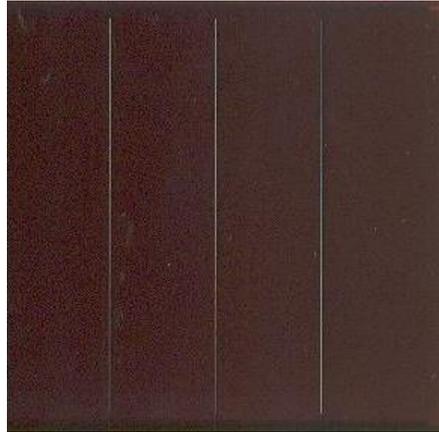


Figure I.8 : Photo représentent la cellule au Silicium amorphe.

I.6.2 Encapsulation de cellules solaires

Il existe actuellement trois méthodes d'encapsulation couramment utilisées :

- Encapsulation de copolymère d'acétate de vinyle d'éthylène (EVA).
- Encapsulation Téflon (Téflon R)
- Encapsulation en résine coulée.

Le matériau qui s'est imposé, de par ses performances et son faible coût, a été le copolymère d'éthylène et d'acétate de vinyle (EVA). Il est très difficile pour un matériau alternatif de remplacer l'EVA comme encapsulant "standard" (Goodrich et al., 2013) [16].

I.7 l'éthylène vinyle acétate EVA

L'éthylène-acétate de vinyle ou EVA (de l'anglais Ethylene-vinylacetate) sert à désigner le copolymère de l'éthylène et de l'acétate de vinyle.

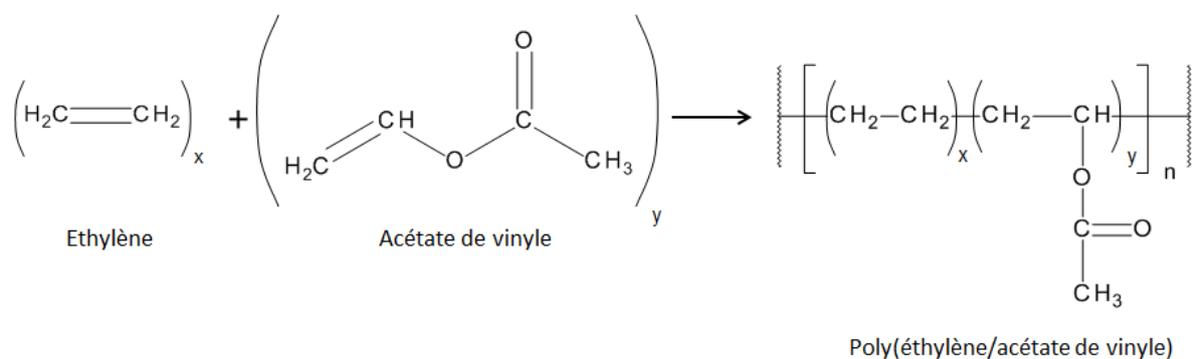


Figure I.9: Structure de l'éthylène vinyle acétate EVA.

Les EVA contiennent à peu près 20 % en masse de Co monomère acétate de vinyle. Leurs propriétés adhésives sont en étroite relation avec la polarité de ce dernier.

Cette résine présente un caractère plus élastomère que le polyéthylène. En effet, l'introduction du motif acétate diminue la cristallinité, par conséquent la rigidité. Cela permet plus de flexibilité et une meilleure tenue aux chocs, même à basse température.

Les polymères thermoplastiques EVA sont à la base de la fabrication des colles thermo fusibles (colles hot melt), de films étirables transparents et de gants souples, est un matériau doté d'une bonne transmissibilité des radiations solaires tout en résistant bien aux ondes UV émises par le soleil. C'est un polymère thermoplastique utilisé comme agent encapsulant pour les panneaux solaires. Une fois chauffé, il forme une fine couche de colle hermétique autour des cellules. L'EVA empêche l'air et l'humidité d'atteindre la cellule tout en résistant longtemps aux radiations solaires.



Figure I.10: Granulés d'EVA conçus pour être mis en forme.

I.7.1 Le rôle de l'EVA

1) Encapsuler la cellule solaire pour empêcher l'environnement extérieur d'affecter ses performances électriques.

2) Améliorer la transmission de la lumière du panneau solaire.

3) Associer la cellule solaire, le verre trempé et le TPT pour obtenir une certaine force de liaison.

Remarque : Bien que l'EVA puisse fonctionner comme panneau solaire encapsulant, il absorbe l'eau.

I.7.2 L'Encapsulation par EVA

Dans le processus de production des modules PV, les matériaux d'encapsulation déterminent le processus d'encapsulation. Le durcissement de la résine époxy peut être réalisé à température ambiante ou sous chauffage sans laminage. Le durcissement de l'EVA peut être réalisé par la technologie de laminage sous vide, tandis que le durcissement du PVB peut être réalisé par la technologie de laminage sous vide ou la technologie de l'autoclave. Le processus d'encapsulation le plus courant est la technologie de stratification sous vide basée sur le matériau EVA.



Figure I.11: machine de laminage sous vide

L'EVA est appliquée sur un module en silicium sous forme de film via un processus de stratification qui se compose de quatre étapes principales avec des températures, pressions et durées différentes :

- 1) chauffer l'encapsulant de manière homogène pour assurer un durcissement homogène de l'encapsulant.
- 2) appliquer du vide pour éliminer les bulles d'air et les impuretés indésirables
- 3) appliquer une pression pour assurer un contact de surface et une adhérence appropriés entre l'encapsulant et d'autres parties du module.
- 4) Le réticulant (doit être activé thermiquement, chimiquement ou avec de la lumière UV).

I.7.3 Le phénomène de dégradation d'EVA

Pour les modules PV, une durée de vie totale d'au moins 20 ans est prévue. Les modules sont exposés à diverses contraintes (par exemple, le rayonnement UV, la température, les gaz et polluants atmosphériques, les cycles thermiques diurnes et annuels), qui peuvent diminuer la stabilité et les performances des modules. Des pertes supplémentaires de performance peuvent être causées par la pluie, la poussière, le vent, la grêle, la condensation et l'évaporation de l'eau, ainsi que par des déséquilibres d'expansion thermique [17].

L'utilisation d'un matériau d'encapsulation en EVA présente donc encore certaines limites, à savoir que le polymère a tendance à se dégrader cependant multiples propriétés Par exemple la décoloration (jaunissement/brunissement), ce qui entraîne une diminution de la transmission de la lumière et donc une réduction de la puissance de sortie des cellules solaires dit Czanderna et Pern, 1996, Rajput et al., 2019, Son taux de transmission de la vapeur d'eau (WVTR) est plutôt faible par rapport à celui de certains autres encapsulant proposés par Cattaneo et al., 2014'', mais d'autre part, son taux de diffusion de l'eau est élevé, entraînant une dégradation potentiellement significative au cours de la durée de vie du module ''Kempe, 2006'' [18-19-20].



Figure I.12: les types de dégradation de l'EVA.

Un mécanisme de dégradation de l'EVA est la décomposition du groupe acétate de vinyle (VA) du polymère en acide acétique, aussi entraînant une décoloration, cela peut se produire lorsqu'EVA est exposée à l'eau ou aux rayons UV. L'acide acétique résultant peut

également provoquer une corrosion par contact électrique (Kraft et al., 2015). En plus de provoquer la décomposition de l'EVA, la pénétration d'eau dégrade le module solaire en provoquant un délaminage et une corrosion des contacts métalliques [21].

A cet effet, plusieurs chercheurs ont essayé d'améliorer les propriétés de l'EVA en introduisant des nano matériaux dans la matrice de cette dernière afin d'obtenir des nano-composites à base de l'EVA.

I.8 Les nano composites

Les nano-composites sont des amalgames de matériaux divers, combinés ensemble à l'échelle nanométrique. Cette technologie utilise les caractéristiques les plus fortes de différents éléments et les combinés en une seule entité pour obtenir la fonctionnalité la plus efficace [22]. L'amélioration des propriétés par l'addition de particules peut être obtenue par une bonne interaction entre les nanoparticules et la matrice et une bonne dispersion des nanoparticules dans la matrice.

I.8.1 Les différents types de nano composites polymères

De nombreux nano composites sont élaborés à partir d'un polymère dans lequel sont été dispersées des nanoparticules. En effet, l'incorporation de nano charges au sein de matériaux polymères permet de modifier leurs propriétés mécaniques, thermiques, électriques ou magnétiques et ainsi d'élargir leur domaine d'application. On distingue quatre types de nano composites polymères :

- 1- Nano composites polymères à base de matériaux inorganiques
- 2- Nano composites polymères à base de matériaux métalliques
- 3- Nano composites polymères à base de matériaux métalliques

I.8.2 Pérylènediimide PDI ou pérylènebiimide PBI

Les diimides d'acide pérylène-3,4,9,10-tétracarboxylique (PDI) sont des matériaux organiques et leurs dérivés représentent l'une des classes les plus prometteuses de matériaux accepteurs d'électrons, en raison de leurs propriétés exceptionnelles (stabilité chimique, thermique et photochimique) de leur affinité électronique et de leur capacité à capter la lumière solaire, notamment une mobilité électronique élevée et des coefficients d'absorption molaire élevés. Leur noyau aromatique rigide et fusionné favorise les interactions

intermoléculaires π - π , ce qui leur confère des propriétés semi-conductrices de type n utiles pour les applications optoélectroniques. La modification chimique de la structure des PBI peut être facilement réalisée en introduisant des substituant alkyles ou aryles aux positions N et/ou aux positions du noyau de la baie, générant ainsi des PBI solubles aux propriétés électroniques et optiques optimisées [23].

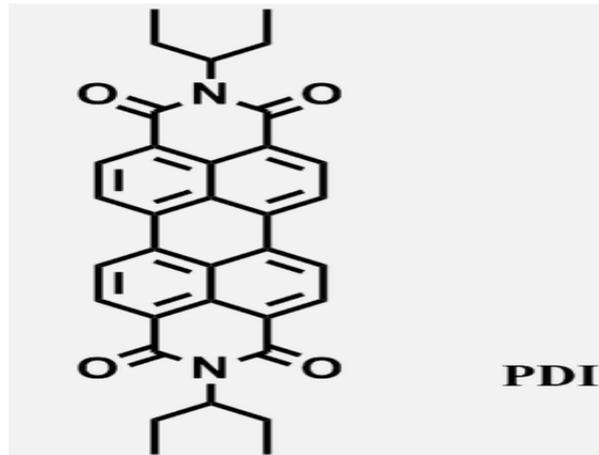


Figure I.13 : Structure de PBI

I.8.3 Les propriétés de PBI

Les pérylènebiimides (PBI) possèdent de nombreuses propriétés qui les rendent particulièrement bien adaptés aux applications photovoltaïques.

Les PDI possèdent des niveaux d'HOMO et de LUMO profonds, ce qui les rend résistants à la photo oxydation [24-25].

Récemment, les dérivés du biimide de pérylène (PBI) étaient attrayantes en tant que matériaux accepteurs déficients en électrons dans les cellules solaires organiques sans fullerène, Les molécules de PBI présentent une absorption optique importante dans la région spectrale du visible au proche infrarouge et présentent des propriétés de transport de charge significative [26].

I.8.4 EVA dopé par PBI

Des encapsulant EVA (éthylène acétate de vinyle) dopés au pérylène diimide (PDI) ont été étudiés pour une utilisation dans des dispositifs photovoltaïques organiques (OPV). Le PDI est un matériau accepteur d'électrons couramment utilisé dans les dispositifs OPV en raison de sa grande affinité électronique et de sa stabilité.

Il a été démontré que l'ajout de PDI aux encapsulant EVA améliore l'efficacité globale et la stabilité des dispositifs OPV. Les molécules de PDI peuvent agir comme des pièges à électrons, empêchant l'accumulation de charges piégées et réduisant la probabilité de recombinaison de charges à l'interface EVA/PDI. Cela peut conduire à une mobilité améliorée des porteurs de charge et à une réduction de la probabilité de dégradation due à des facteurs environnementaux tels que l'oxygène et la vapeur d'eau.

Plusieurs études ont examiné les propriétés des films d'encapsulation d'EVA dopés avec des PBI. Par exemple, une étude de Wang et al. (2019) a montré que l'ajout de 0,25% de PBI dans l'EVA a considérablement amélioré l'efficacité de conversion de la lumière par une cellule solaire organique. Les résultats ont montré que le dopage avec des PBI a permis d'améliorer la transmission de la lumière et de réduire la réflexion de la lumière sur la surface de la cellule solaire [27].

Une autre étude menée par Park et al. (2015) a montré que l'ajout de PBI dans l'EVA a permis de réduire la réflexion de la lumière solaire dans les modules photovoltaïques, ce qui a amélioré l'efficacité de conversion de l'énergie solaire. Les résultats ont également montré que le dopage avec des PBI a amélioré la stabilité thermique et la résistance à la dégradation UV des films d'encapsulation d'EVA [28].

Cependant, il convient de noter que l'utilisation d'encapsulant EVA dopés au PDI peut également présenter certains défis, tels que le potentiel de modifications des propriétés optiques et mécaniques du matériau d'encapsulation. Une optimisation minutieuse de la composition EVA/PDI et des paramètres de traitement est donc nécessaire pour obtenir les performances et la stabilité souhaitées de l'appareil [29].

Dans l'ensemble, l'utilisation d'encapsulant EVA dopés au PDI est prometteuse pour améliorer les performances et la stabilité des dispositifs OPV, et des recherches supplémentaires dans ce domaine sont en cours.

I.9 Down-shifting

Les modules photovoltaïques produisent une quantité d'énergie qui dépend directement de la quantité de lumière qui les touche. Le down-shifting a pour but d'augmenter leur efficacité en utilisant des filtres spéciaux pour déplacer la lumière du spectre UV vers le spectre visible [30].

Le down-shifting est une technique utilisée dans les applications d'éclairage pour convertir une partie du rayonnement émis par une source lumineuse à une longueur d'onde plus courte et donc plus énergétique en une longueur d'onde plus longue et donc moins énergétique. Cette technique permet d'augmenter l'efficacité énergétique des systèmes d'éclairage en améliorant l'utilisation de la lumière émise et en réduisant la quantité de lumière perdue.

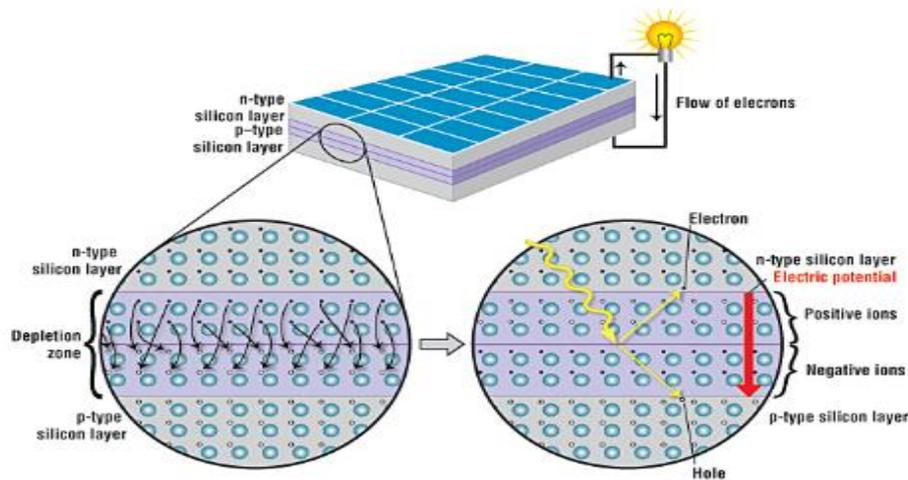


Figure I.14: Schéma de la technique down-shifting

Dans les applications d'éclairage, le down-shifting est souvent réalisé à l'aide de matériaux tels que les phosphores. Les phosphores sont des matériaux qui peuvent absorber de la lumière à une longueur d'onde spécifique et réémettre cette lumière à une longueur d'onde plus longue. Les phosphores peuvent être utilisés pour convertir la lumière émise par des sources lumineuses telles que les diodes électroluminescentes (DEL) ou les lampes fluorescentes compactes (LFC) en une lumière plus appropriée pour l'application souhaitée.

I.9.1 Le down-shifting avec des colorants organiques ou de nanoparticules

Le down-shifting est une technique qui utilise des molécules organiques pour convertir une partie du rayonnement émis par une source lumineuse à une longueur d'onde plus courte en une longueur d'onde plus longue.

Les avantages du down-shifting avec des colorants organiques comprennent une augmentation de l'efficacité lumineuse, une réduction de la chaleur générée par les sources lumineuses et une amélioration de la qualité de la lumière. De plus, les colorants organiques sont souvent moins chers et plus facilement disponibles que d'autres matériaux de down-shifting.

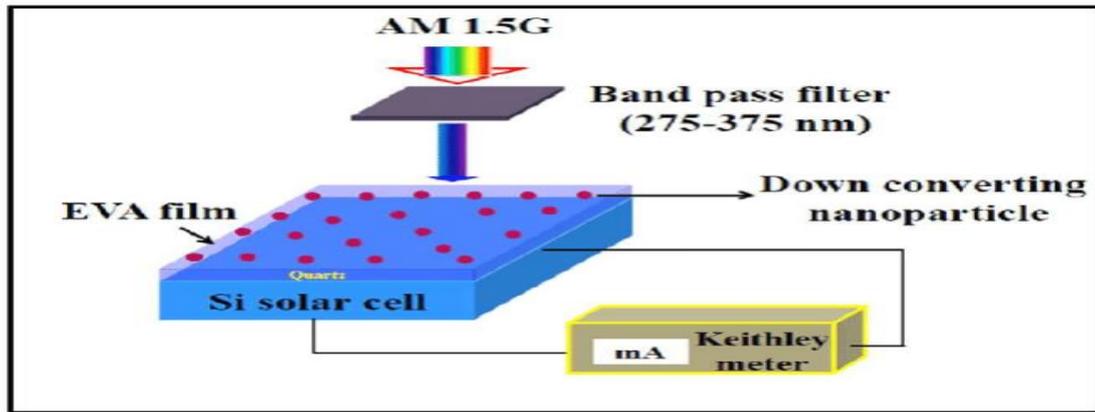


Figure I.15 : Schéma de down-shifting avec des colorants organiques

Cependant, il y a des inconvénients potentiels à l'utilisation de colorants organiques pour le down-shifting, tels que la dégradation de la performance à long terme des molécules organiques et la possibilité de changements de couleur indésirables au fil du temps.

Des études ont montré que les colorants organiques peuvent être utilisés efficacement pour le down-shifting dans les applications d'éclairage. Par exemple, une étude a montré que l'utilisation de colorants organiques dans une couche de conversion de longueur d'onde pour des diodes électroluminescentes (DEL) a entraîné une amélioration significative de l'efficacité lumineuse [31]. Une autre étude a montré que l'utilisation de colorants organiques dans des revêtements de conversion de longueur d'onde pour des lampes fluorescentes a entraîné une augmentation de l'efficacité lumineuse et une amélioration de la qualité de la lumière [32].

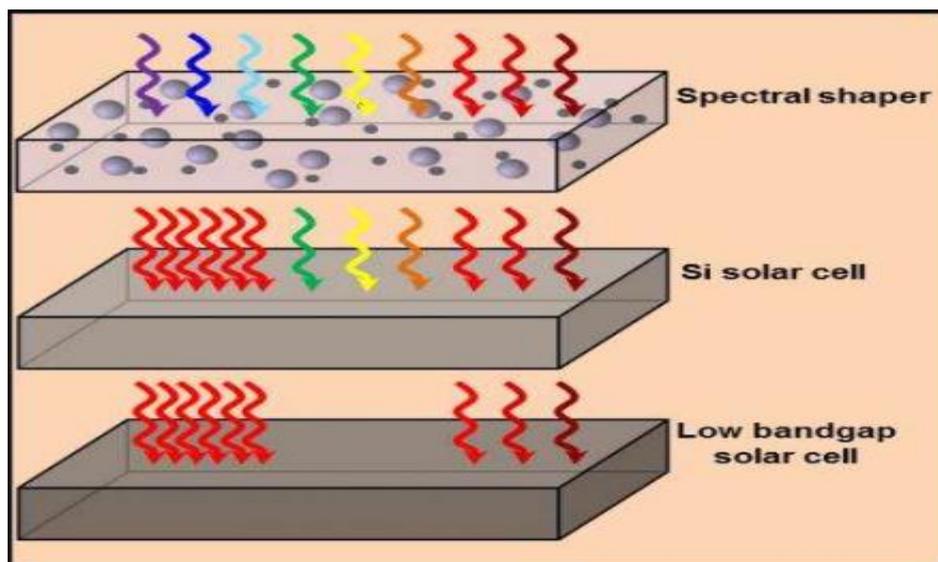


Figure I.16 : Schéma de l'absorption des photons pour le down-shifting

I.9.2 Comment réaliser le down-shifting des modules photovoltaïques ?

- 1- Choisir le bon filtre en fonction de la température et de la longueur d'onde de la lumière.
- 2- Ajuster les panneaux pour maximiser la quantité de lumière atteignant les filtres.
- 3- Installer les filtres en utilisant des matériaux résistants aux UV et à la chaleur [33].

En fait, dans ce chapitre, nous avons développé une étude bibliographique relative à notre thème de recherche. Cette étude nous a éclairé pour résumer les différentes propriétés des composés étudié ainsi que leurs applications en photovoltaïque.

CHAPITRE II

Partie Expérimentale

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressées dans la première partie à la préparation des films d'EVA-PBI à différentes concentrations. En ce qui concerne la deuxième partie, elle est consacrée pour les différentes méthodes de caractérisations et techniques expérimentales utilisées au cours de ce travail. Nous présenterons les diverses techniques d'analyses employées et leurs principales caractéristique et leurs principes de fonctionnement afin de caractériser au mieux nos échantillons.

I. Mode opératoire

La préparation des films d'éthylène acétate de vinyle (EVA) + pérylène biimide (PBI) à différentes concentrations nécessite 3 étapes.

- 1- la dissolution du polymère EVA,
- 2- préparation de la solution du dopant BPI,
- 3- préparations des films,

I.1. Les produits

Les produits que nous allons utiliser dans notre travail sont :

- 1- Le polymère ethylène-acétate de vinyle (EVA) sous forme de granulaire (wt = 40%)
- 2- Chloroforme (solvant)
- 3- Perylène diimide poudre (PBI)

I.2. La dissolution de l'EVA

La dissolution de l'EVA s'effectue en présence du solvant chloroforme.

Au préalable on pèse une masse de 4.3g de l'EVA granulés (40% de VA), ainsi qu'un volume de 20ml de chloroforme.

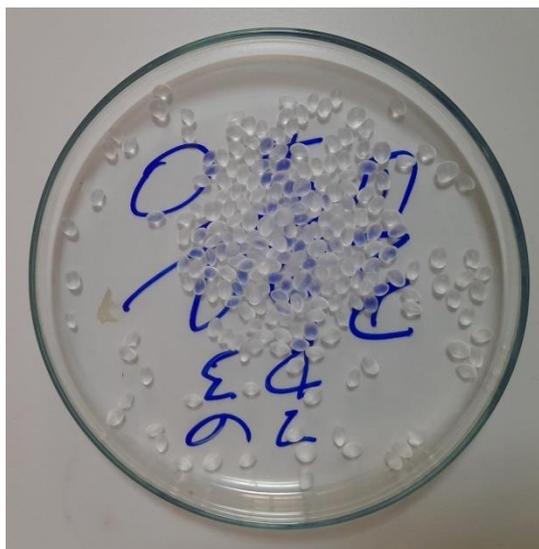


Figure II.1: granulés de l'EVA à 40% de VA.

Dans un bécher on mélange les 2 produits puis l'aide d'une plaque chauffante on chauffe le mélange avec une agitation pendant 30min. après cette durée on remarque que le EVA s'est dissous et le chloroforme s'est évaporé et on obtient un liquide transparent visqueux de EVA.

Cette étape est répétée 4 fois afin de préparer 4 échantillons.

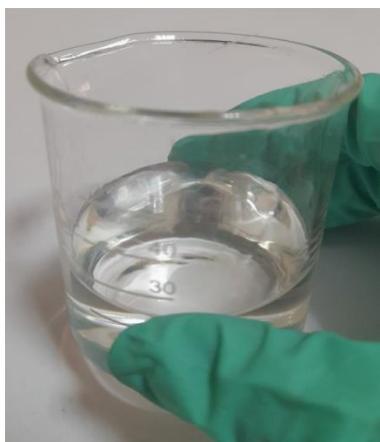


Figure II.2 : EVA liquide.

I.3. la préparation de la solution du dopant PBI

Pour la préparation de la solution mère de PBI, nous avons pesé une masse de PBI poudre de 0.003g ainsi qu'un volume de 20ml de chloroforme et on effectue une agitation de 20min.

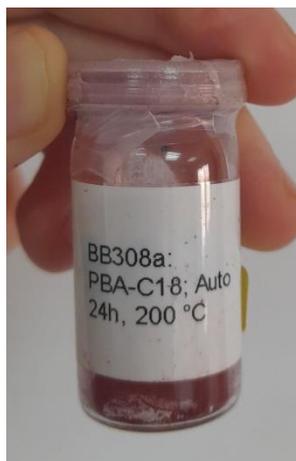


Figure II.3: poudre du dopant PBI.

Ensuite on prépare 4 échantillons de PBI à différentes concentrations, le tableau suivant représente les concentrations de PBI prises.

Tableau II.1: les volumes du PBI choisi.

Les échantillons	Volume du PBI (ml)
1	0.2
2	0.4
3	0.6
4	0.8

I.4. préparations des films

Pour la préparation des films EVA+PBI, on mélange les 2 préparations préalablement préparé de l'EVA et PBI puis on les verse dans des plaques en verre et pour éviter le débordement de notre mélange nous avons utilisé du téflon.

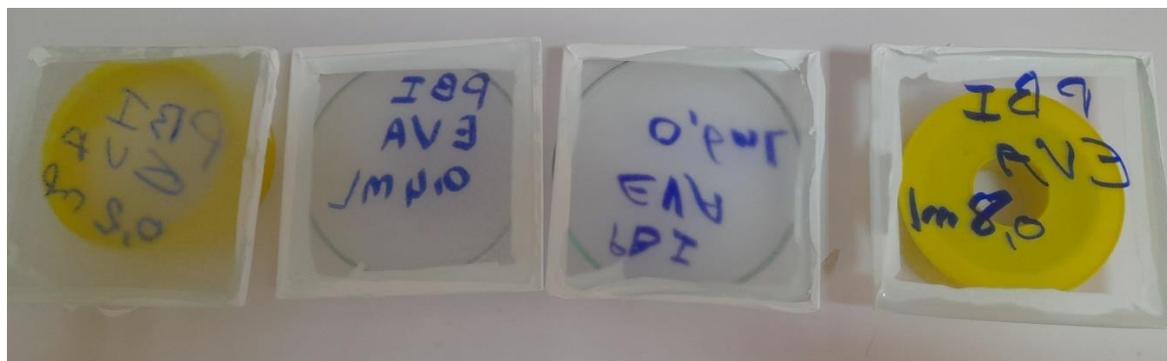


Figure II.4: les échantillons de différentes concentrations de PBI.

On laisse les 4 mélanges sécher pendant 24h afin d'obtenir un film.

II. Les techniques de caractérisation

II.1. Microscopie Electronique à Balayage (MEB)

Un microscope électronique à balayage (MEM) est une technique de microscopie électronique qui utilise le principe de l'interaction électron-matière pour créer des images à haute résolution de la surface d'un échantillon. Il permet la création d'images haute résolution de la surface de l'échantillon avec une plus grande profondeur de champ que la microscopie optique. On utilise un faisceau d'électrons très fin qui balaye point par point la surface de l'échantillon [34].

Cette méthode fournit des informations sur la morphologie et la structure des couches minces étudiées. En utilisant la vue d'origine, nous pouvons obtenir l'épaisseur des couches avec une précision relative. Donc le Microscope Electronique à Balayage est un instrument de base pour l'étude des surfaces. Au sein de centre de recherche CRTSE on a utilisé un Microscope électronique à effet de champ.

II.1.1. Constitution du microscope électronique à balayage:

Nous n'allons pas attarder sur chaque type nous allons présente les composés généraux d'un seul type, le plus fréquent aujourd'hui, à savoir le MEB à effet de champ, il se compose de:

- Un canon à électrons qui comprend un système anode-cathode d'émission et d'accélération des électrons incidents ainsi qu'une lentille objective de focalisation.
- Un système de balayage du faisceau.
- Un porte-objet.
- Un scintillateur permettant de détecter les électrons secondaires [35].

II.1.2. Principe de fonctionnement

Son principe de fonctionnement est basé sur l'interaction électron-matière qui résulte du bombardement de l'échantillon par un faisceau électrique très fin à une tension élevée (quelques dizaines de kV). L'interaction entre ces électrons et l'échantillon va émettre de nouveaux électrons et des rayons X, qui vont être captés par des détecteurs spécifiques disposés autour de l'échantillon [36-37].

Ce faisceau d'électrons balaie point par point la surface de l'échantillon. Sous l'impact d'électrons accélérés, des électrons rétrodiffusés et des électrons secondaires émis par

l'échantillon (figure II.5) sont recueillis sélectivement par des détecteurs qui transmettent un signal à un écran cathodique dont le balayage est synchronisé avec le balayage sur l'échantillon.

La figure II.5 présente les différentes particules qui résultent de l'impact d'un faisceau électronique sur la surface solide. L'échantillon balayé émet les informations qui sont transformées en signal électrique servant à moduler le faisceau d'un tube cathodique à balayage synchrone. Les informations fournies de l'échantillon après avoir été bombardé peuvent varier d'un point à l'autre de la surface, d'où la nécessité de vérifier l'homogénéité de l'échantillon.

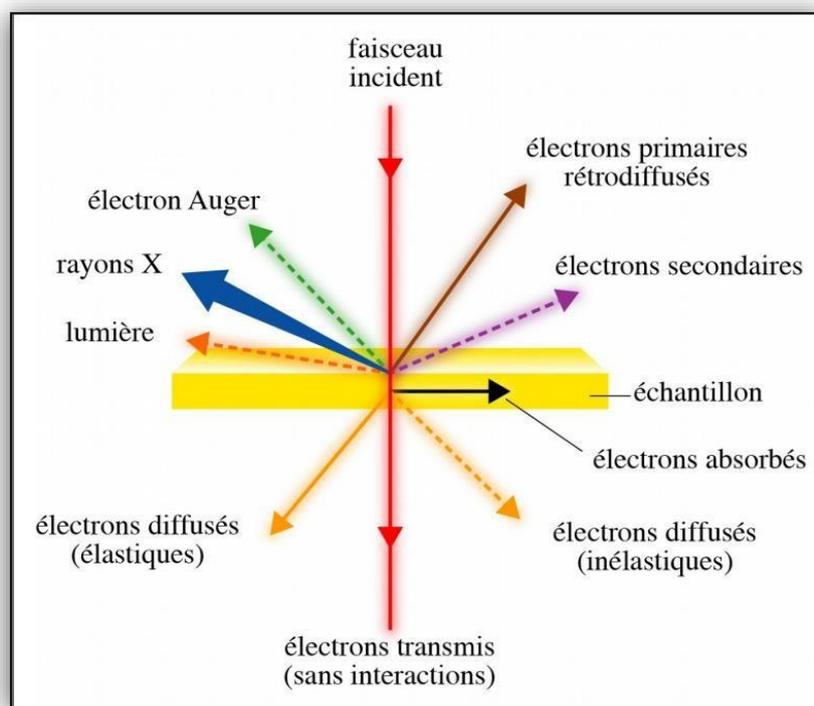


Figure II.5: différentes particules qui résultent de l'impact d'un faisceau électrique sur une surface solide.

La Figure II.6 présente le schéma du MEB. Parmi la vaste gamme de signaux, on peut distinguer :

- Les électrons secondaires proviennent des couches superficielles de l'échantillon et permettent d'obtenir des images caractéristiques de sa surface (contour, morphologie, etc.)
- Les électrons rétrodiffusés, qui sont sensibles à la nature des atomes qui constituent l'échantillon, permettent de distinguer sur les images des zones de composition chimique différente.

- Les électrons Auger permettent de faire une analyse quantitative de la composition chimique de la surface de l'échantillon.
- les rayons X (ou photons X) permettent de faire une analyse quantitative de la composition chimique élémentaire de l'échantillon (microanalyse X).

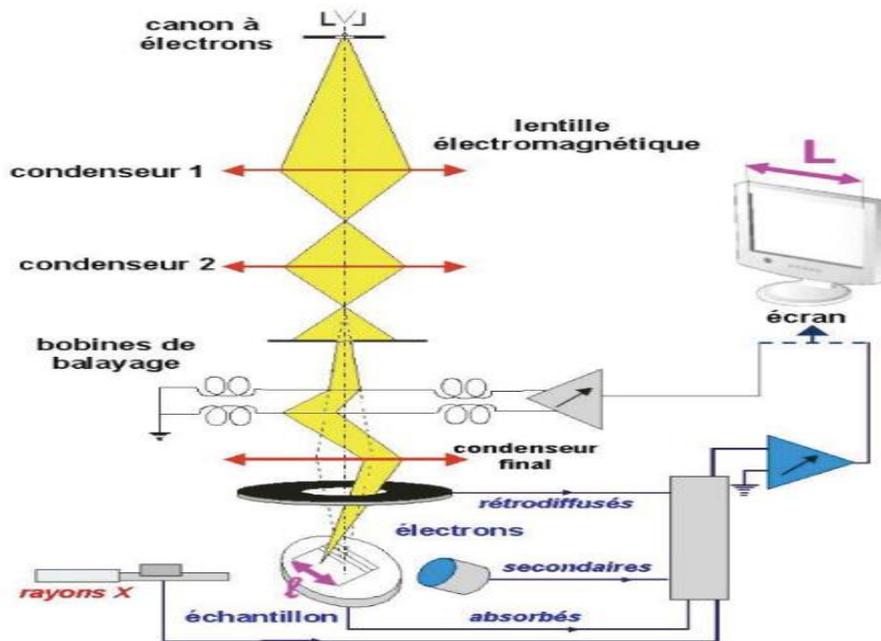


Figure II.6 : schéma de principe du microscope électronique à balayage

Comme le schématise la figure II.6, un microscope électronique à balayage est constitué Principalement par :

- une colonne maintenue sous un vide secondaire
- une source d'électrons appelée canon et d'un dispositif de haute tension, accélérateur des électrons [38-39-40].
- un ensemble de lentilles électromagnétiques appelés condenseurs destiné à former un pinceau fin et intense.
- une lentille électromagnétique finale appelée « objectif » qui permet de focaliser le faisceau sur la surface à examiner.
- un diaphragme objectif.
- un dispositif de déflexion piloté par un générateur de balayage.
- une platine porte-objet mobile
- des détecteurs.
- un système de visualisation d'image couplé de manière synchrone au même générateur de balayage.

II.2. Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR)

La spectroscopie d'absorption infrarouge est considérée comme une technique analytique très puissante car elle peut détecter de manière fiable un grand nombre d'espèces chimiques, telles que tous les composés chimiques (à l'exception des atomes et des molécules diatomiques symétriques).

La spectroscopie infrarouge est une méthode d'analyse de divers composés chimiques. Une bonne connaissance des fréquences d'absorption et des forces d'oscillateur des groupes fonctionnels rend cette méthode particulièrement utile pour l'identification et la caractérisation des matériaux.

II.2.1.Principe de fonctionnement

Le principe du FTIR repose sur l'absorption du faisceau incident, lorsque sa fréquence correspond à l'une des fréquences vibrationnelles des molécules ou groupes de molécules présentes dans l'échantillon.

La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) permet d'enregistrer simultanément une large gamme de spectre infrarouge. Le signal acquis est décomposé en une série de Fourier et traité mathématiquement pour supprimer autant de bruit de fond que possible (par exemple, le spectre de H₂O). Le spectromètre

FTIR se compose de trois composants principaux :

- une source lumineuse dont la sortie correspond à une certaine gamme constante de longueurs d'onde infrarouges.

- Interféromètre.

- Détecteur.

Il existe deux principaux types de vibrations : les élongations (stretching) le long de l'axe de la liaison, et les déformations (bending) occasionnant une modification de l'angle entre deux liaisons adjacentes, dans le plan ou hors du plan. Ces élongations et déformations peuvent être symétriques ou asymétriques. Elles sont illustrées figure II.6 en prenant pour exemple la liaison C-H.

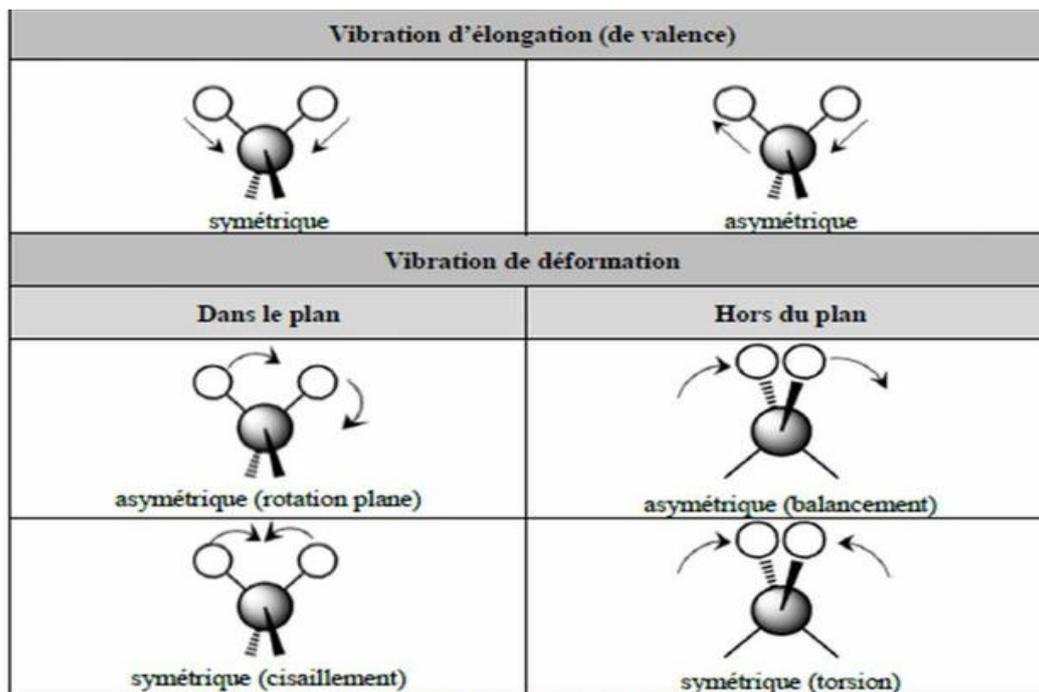


Figure II.7 : Modes vibrationnels infrarouge d'une liaison CH

II.3. Photoluminescence

La photoluminescence est une technique d'analyse largement utilisée pour étudier les propriétés optiques des matériaux. Elle permet de caractériser la structure électronique, la bande interdite, les impuretés, les défauts et d'autres propriétés luminescentes des matériaux [41].

Le principe de la photoluminescence repose sur l'absorption de photons par un matériau, suivi de l'émission de lumière. Le rayonnement émis par une molécule ou un solide qui, après avoir absorbé de l'énergie provenant d'une source externe, a absorbé de l'énergie, et a été transféré dans un état électronique excité, revient à son état électronique de base.

Les étapes générales du processus de photoluminescence résument par suite :

- **Absorption de photons** : Lorsqu'un matériau est exposé à une source de lumière, telle que la lumière visible ou ultraviolette, certains photons sont absorbés par le matériau. L'énergie des photons est transférée aux électrons présents dans le matériau, les faisant passer à un niveau d'énergie plus élevé.
- **États excités** : Les électrons excités par l'absorption de photons se trouvent dans des états d'énergie plus élevés et instables. Ces états excités peuvent être des bandes

d'énergie électroniques, des niveaux d'énergie quantifiés ou des états électroniques excités d'impuretés.

- **Relaxation** : Les électrons excités tendent à revenir à leur état fondamental stable, ce qui se produit généralement rapidement. Pendant cette relaxation, l'énergie excédentaire est généralement libérée sous forme de chaleur, mais une partie peut également être émise sous forme de lumière.
- **Émission de lumière** : Dans certains matériaux, l'énergie excédentaire est émise sous forme de lumière au lieu d'être dissipée sous forme de chaleur. Cette émission de lumière est appelée photoluminescence. La lumière émise peut avoir une longueur d'onde différente de celle de la lumière incidente, ce qui signifie qu'elle peut être d'une couleur différente [42].

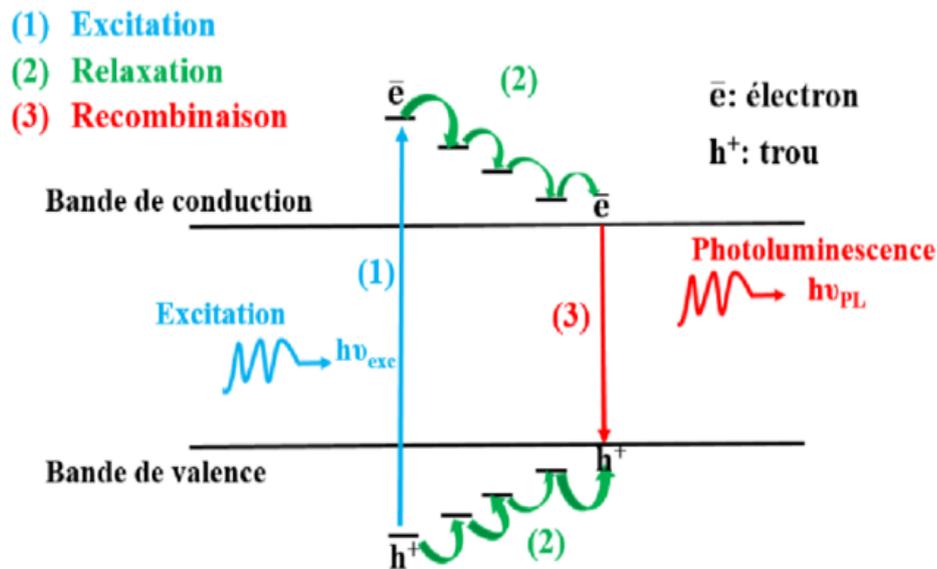


Figure II.8 : Représentation schématique du principe de la photoluminescence.

II.3.1 Fluorescence et la phosphorescence

La photoluminescence se compose de deux types principaux : la fluorescence et la phosphorescence, la distinction entre les deux est généralement phénoménologique, mais comme nous le verrons plus loin, une distinction plus théorique peut être proposée.

- **La fluorescence** se produit lorsque les électrons excités reviennent rapidement à leur état fondamental, émettant de la lumière pendant cette transition. La durée de vie de l'état excité est généralement très courte, de l'ordre de nanosecondes.

- **La phosphorescence** se produit lorsque les électrons excités restent dans leur état excité pendant une période de temps plus longue avant de revenir à leur état fondamental. Cette émission retardée peut durer de l'ordre de microsecondes à plusieurs heures [43].

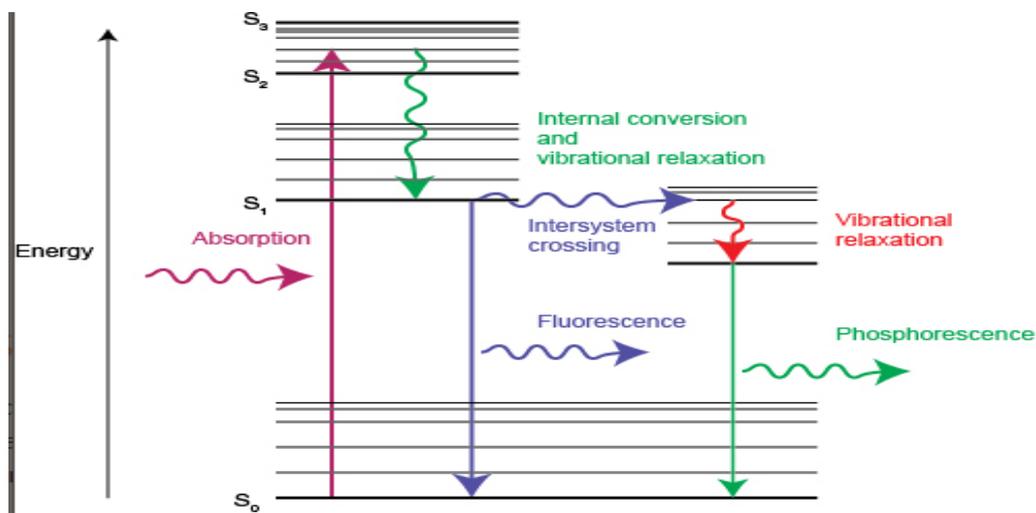


Figure II.9: Diagramme énergétique montrant l'absorption de la lumière et les processus impliqués dans l'émission de la lumière sous forme de fluorescence et de phosphorescence.

II.3.2. Domaine d'application de la photoluminescence

- **Caractérisation des semi-conducteurs** : La photoluminescence est largement utilisée pour étudier les propriétés des semi-conducteurs tels que la structure de bande, la mobilité des porteurs de charge et les défauts structuraux

- **Étude des matériaux luminescents** : La photoluminescence permet de caractériser les propriétés optiques des matériaux luminescents tels que les phosphores, les matériaux organiques et les nanomatériaux.

- **Identification des impuretés et des défauts** : détecter et caractériser les impuretés et les défauts dans les matériaux, y compris les défauts de cristallographie et les impuretés dopantes

- **Développement de dispositifs optoélectroniques** : évaluer les performances des dispositifs optoélectroniques tels que les diodes électroluminescentes (LED), les cellules solaires et les lasers.
- **Caractérisation des matériaux nanométriques** : La photoluminescence est utilisée pour étudier les propriétés optiques des nanomatériaux, y compris les nanoparticules, les nano fils et les nanotubes.
- Pour la Caractérisation des propriétés optiques des nanoparticules La photoluminescence est utilisée pour étudier :
- **Les propriétés optiques des nanoparticules** telles que la taille, la structure cristalline, la composition chimique et les interactions électroniques.
- **Émission de lumière des nanoparticules** : caractériser les mécanismes d'émission de lumière dans les nanoparticules, y compris la recombinaison radiative des porteurs de charge et les processus de transfert d'énergie.
- **Dopage et impuretés dans les nanoparticules** : étudier les effets du dopage et des impuretés sur les propriétés optiques des nanoparticules.
- **Applications des nanoparticules luminescentes** : l'imagerie biologique, les capteurs optiques et l'éclairage.
- **Synthèse et caractérisation des nanoparticules luminescentes** : caractériser les propriétés optiques des nanoparticules lors de leur synthèse [44-45-46-47-48-49-50-51-52-53].

II.4. UV-Visible

La spectroscopie d'absorption de l'ultraviolet et du visible couvre le domaine spectral allant du proche ultraviolet au visible. Ce pendant, la plupart des spectromètres commerciaux couvrent le domaine allant de 185 à 900 *nm* et certains peuvent aller jusqu'à 1100 *nm*. Un spectrophotomètre mesure la réponse spectrale d'un échantillon illuminé par une source monochromatique. Le principe de la réflexion diffuse repose sur la réflexion, la dispersion et la transmission par le matériau-échantillon de la lumière incidente. La lumière diffuse réfléchie et dispersée est ensuite collectée par un accessoire qui la dirige vers un détecteur. L'absorbance des composés chimiques dans le domaine UV-visible est associée à des transitions entre les niveaux d'énergie électronique. Les transitions électroniques

correspondent au passage des électrons des orbitales moléculaires liantes ou non liantes remplies, vers des orbitales moléculaires anti-liantes non remplies. Selon le diagramme d'orbitales moléculaires, les transitions prévisibles sont présentées dans la Figure II.10.

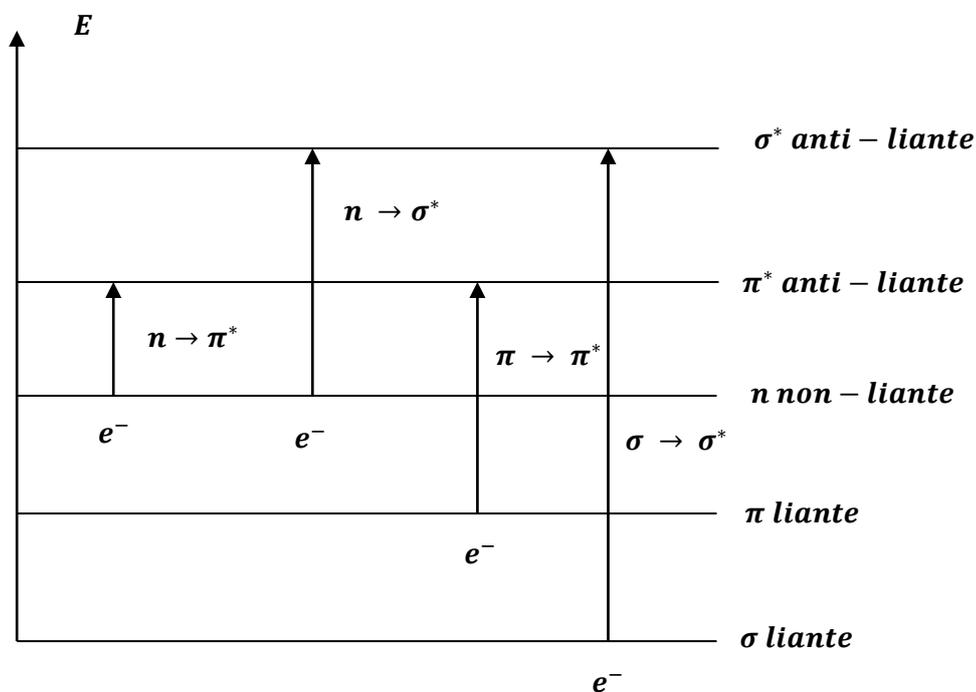


Figure II.10 : Diagrammes d'orbitales moléculaires et transitions électroniques

Ainsi, un spectre UV-Visible présente le tracé de l'absorbance en fonction de la longueur d'onde λ (nm). La bande d'absorption est caractérisée par sa position en longueur d'onde (λ_{max}) et son intensité reliée au coefficient d'extinction molaire ϵ_{max} selon la loi de Lambert-Beer):

$$(A = \epsilon lc)$$

Où l est le parcours ou trajet optique (correspond à la largeur de la cellule) et C , la concentration en solution de l'espèce absorbante. La valeur de ϵ peut renseigner si la transition est permise ou interdite.

II.5. Spectrométrie de photoélectrons X (XPS) :

La spectrométrie de photoélectrons XPS (X-ray Photo électron Spectroscopie), également connue sous le nom de spectroscopie de photoélectrons à rayons X, est une technique d'analyse de surface qui permet de déterminer la composition chimique et la structure électronique des matériaux [54].

II.5.1. Le principe de base

La technique XPS repose sur l'émission d'électrons par le film EVA dopés sous l'effet d'un rayonnement X. L'échantillon est bombardé par des rayons X de haute énergie, ce qui provoque l'éjection d'électrons de niveaux d'énergie proches de la surface du matériau. Les électrons émis sont ensuite analysés en termes de leur énergie cinétique, ce qui permet d'obtenir des informations sur les éléments chimiques présents et leur état de liaison [55].

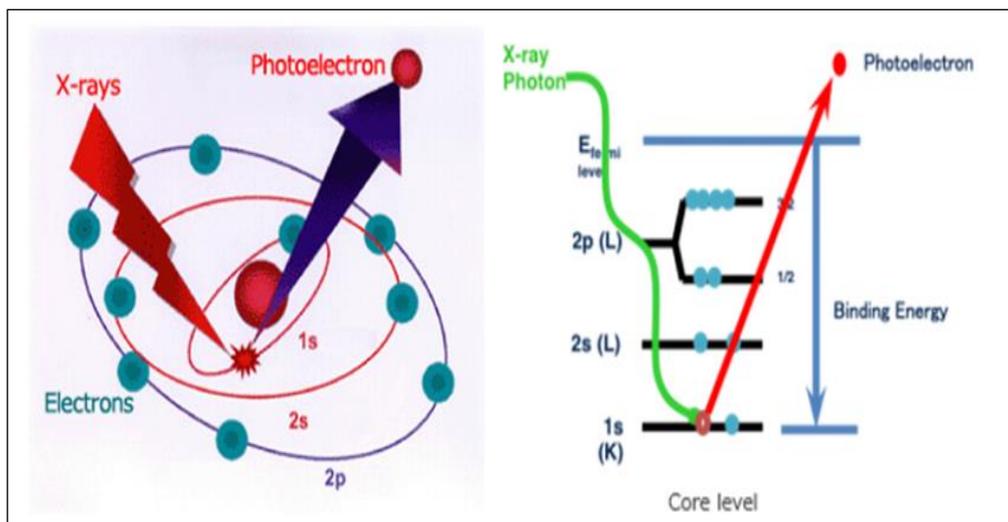


Figure II.11 : principe fondamentale de bombardement et de fonctionnement de XPS

Chapitre III

Résultats et discussions

Il s'agit pour nous de préparer des films composites à base du PBI/EVA pour ensuite les caractérisés et de voir leur fiabilité, notamment en photovoltaïque.

Pour ce faire, après la mise au point du solvant convenable pour la solubilité de l'EVA et le PBI, nous avons élaboré les films composites PBI/EVA et ces derniers ont été analysés par la : Microscopie électronique à balayage (MEB), XPS, FTIR, UV-Visible et la photoluminescence (PL).

➤ **Choix du solvant**

Le choix du solvant joue un rôle important dans l'élaboration des films PBI/EVA. En effet, à la lumière de l'état des connaissances présentes dans le premier chapitre, plusieurs solvants ont été utilisés pour l'élaboration des composites PBI/EVA : toluène, chloroforme, cyclohexane...etc.

En ce qui concerne la présente étude, nous avons utilisé le chloroforme pour l'élaboration des films composites. Par la suite, les films déposés ont été caractérisés par le MEB, XPS, FTIR, UV-visible et la photoluminescence. Les résultats obtenus ont été discutés dans la partie qui suit.

I. Résultats et Discussion

I.1 Caractérisation morphologique

La figure III.1 présente les images MEB du PBI à différents grossissements. On remarque sur ces images que les nanoparticules du PBI présentent une forme de bâtonnets, figure III.1a, et une forme feuilletée dans la figure III.1b, avec la présence des pores.

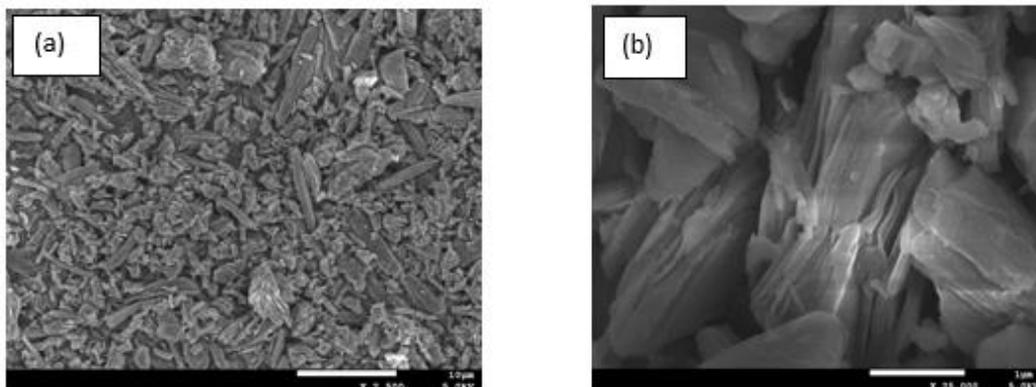


Figure III.1 : Image MEB de PBI : (a) PBI à 1µm, (b) PBI à 10µm

I.2. Analyse par XPS

Afin de déterminer la composition chimique et les différentes liaisons dans l'EVA et PBI, une analyse XPS est effectuée.

La figure III.2 présente le spectre XPS de l'EVA, wide scan, On note sur le spectre la présence des pics de l'oxygène et du carbone. La figure.III.3 présente le spectre XPS du carbone à haute résolution, on note l'existence des liaisons carbone-carbone à une énergie de liaison 315 eV et la liaison carbone-oxygène à E=308 eV. La figure. III.4 présente le spectre XPS de l'oxygène à haute résolution, on observe l'apparition de deux pics, le premier correspond à O²⁻ et le deuxième à la liaison C-O à des énergies 560 eV et 557 eV respectivement [56-57].

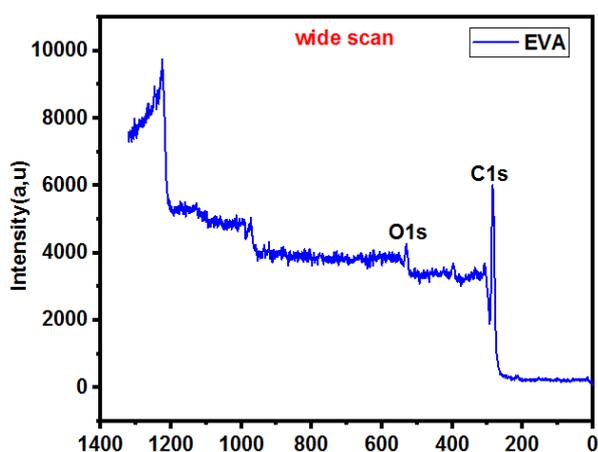


Figure. III.2 : Spectre XPS de l'EVA

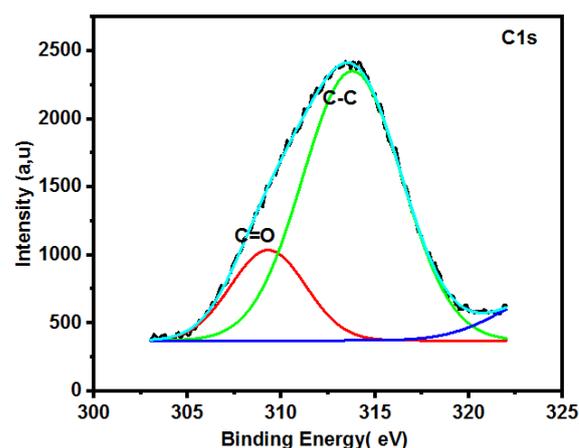


Figure III.3 : Spectre XPS du carbone à haute résolution

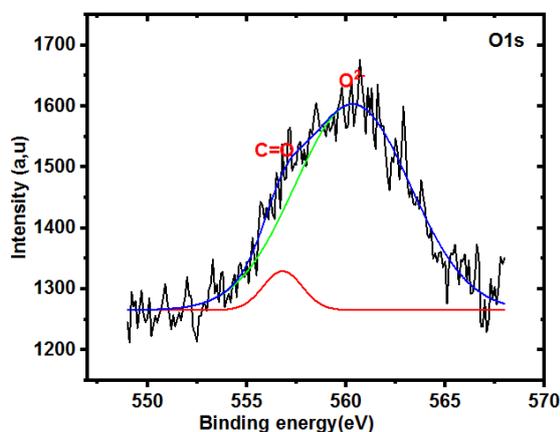


Figure.III.4 : Spectre XPS de l'oxygène à haute résolution

I.2.1. Analyse XPS du composite PBI/EVA

La figure.III.5 représente le spectre XPS du composite PBI/EVA (wide scan), on note sur la figure l'apparition des pics de C1s, O1s et l'azote (N1s). La figure .III.6 présente le spectre XPS à haute résolution du pic N1s. La deconvolution du pic N1s révèle l'apparition des pics de la liaison N-H à 401 eV, La liaison C=N à 398 eV. [58-59]

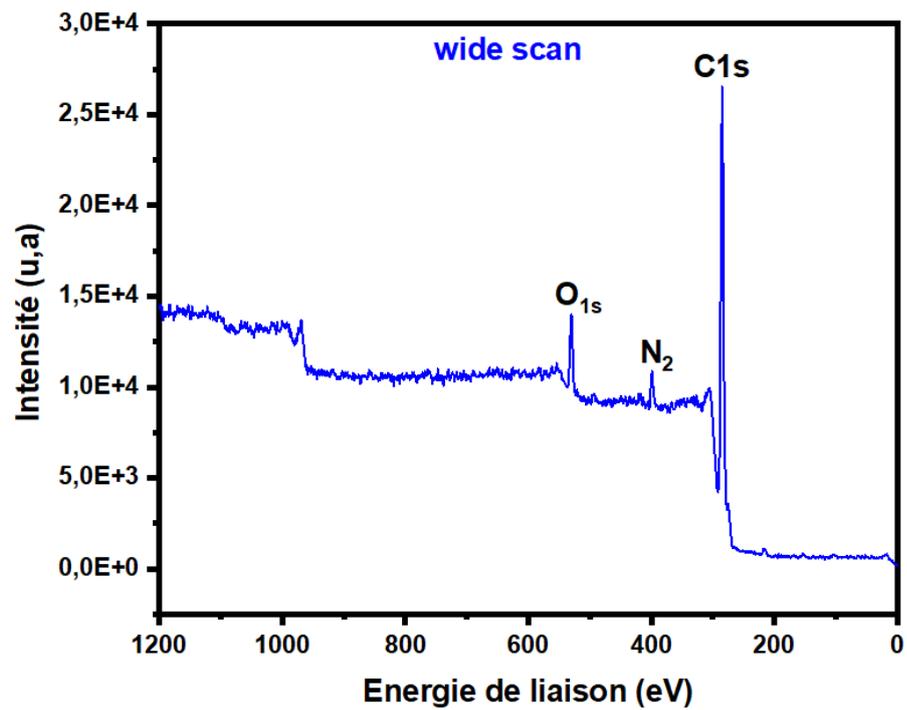


Figure III.5 : spectre XPS (1) de BPI/EVA

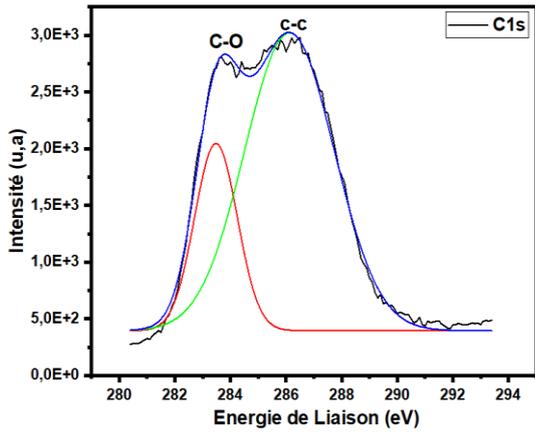


Figure III.6 : spectre XPS (1) de BPI/EVA

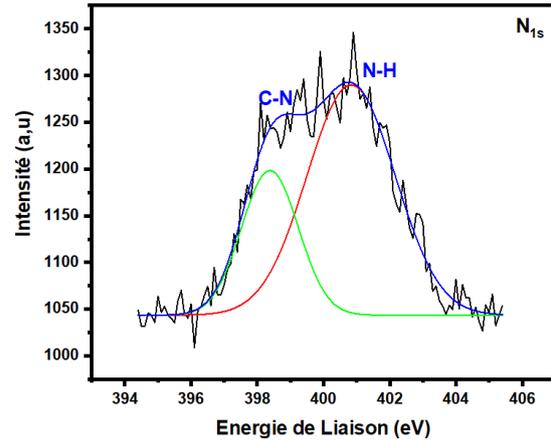


Figure III.7 : spectre XPS (1) de BPI/EVA

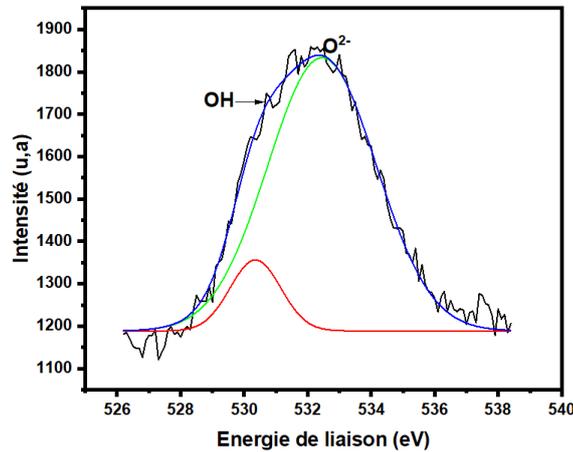


Figure III.8 : spectre XPS (1) de BPI/EVA

I.3. Analyse par Spectroscopie infrarouge

La figure. III.9. Présente le spectre infrarouge du film de l'EVA pure et l'EVA dopé par PBI avec différents quantité. On note sur la figure que les spectres infrarouges du composite présentent une même allure (10-13). De plus, on note l'apparition d'un pic à un nombre d'onde de 3400cm^{-1} qui correspond à la liaison N-H dans le PBI/EVA uniquement, Par la suite, deux pics apparaissent à des nombre d'onde 2916.41 et 2842.5cm^{-1} correspondant à la liaison C-H dans le méthylène et méthyle respectivement. Les pics observés à des nombres d'onde 1728.70cm^{-1} correspond à la liaison C=O dans l'ester et le PBI, les pics observés à $1468,11\text{ cm}^{-1}$ correspond à la liaison O-C=O dans le groupe carboxylique. Les pics enregistrés

à 1232.5cm^{-1} correspond à la liaison C-H dans le méthylène et 1163.75cm^{-1} correspond à la liaison C=O et C-H dans l'acétate. Les pics enregistrés à 1019.47cm^{-1} correspondent au groupe éther (C-O-C) et les pics enregistrés aux nombres d'onde 720.18cm^{-1} et $607,15\text{cm}^{-1}$ à la liaison C-H dans le méthylène. Les pics enregistrés à 1693 et 1654cm^{-1} correspondent au groupement imide dans le PBI. [60-61]

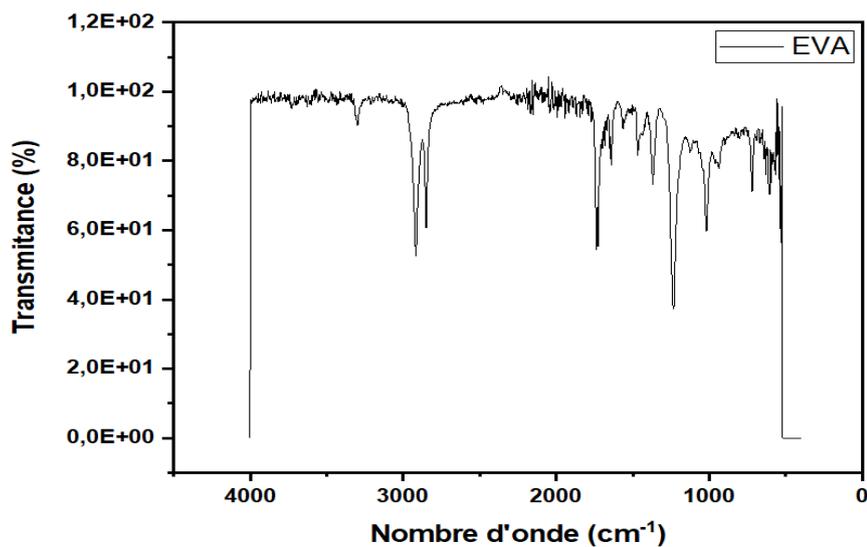


Figure III.9 : Spectre infrarouge de référence EVA

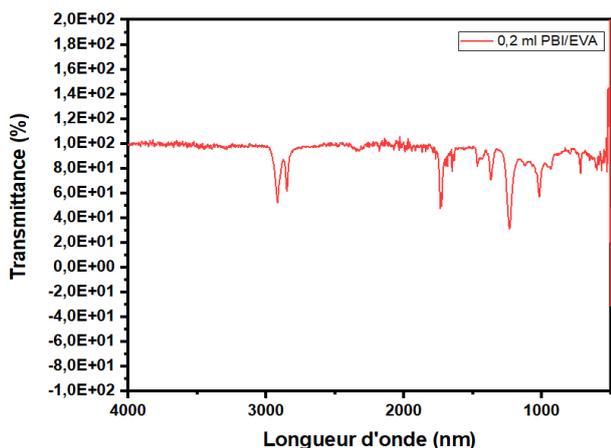


Figure III.10 : Spectre d'échenillons de PBI/EVA

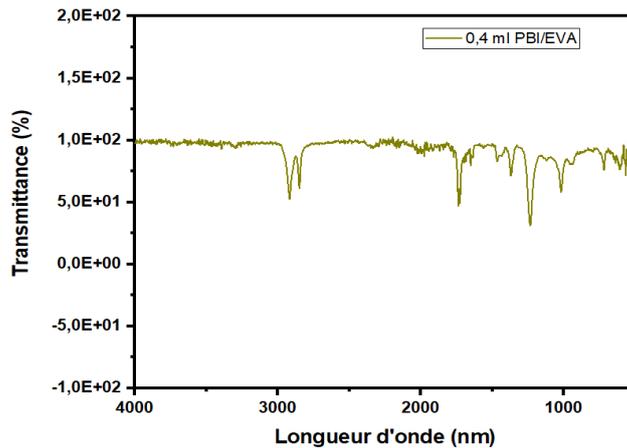


Figure III.11 : Spectre d'échenillons de PBI/EVA

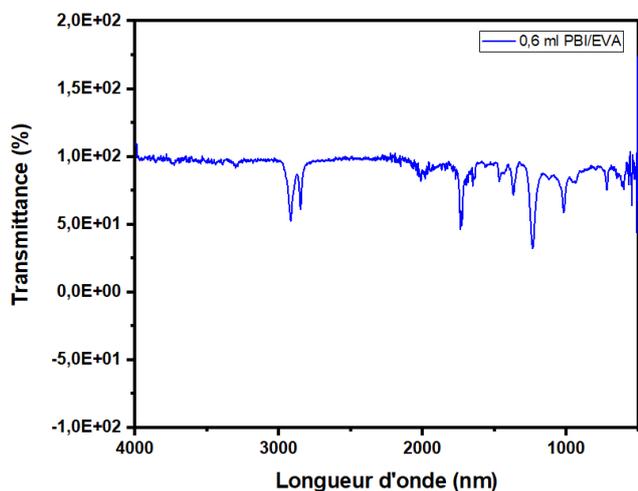


Figure III.12 : Spectre d'échenillons de PBI/EVA

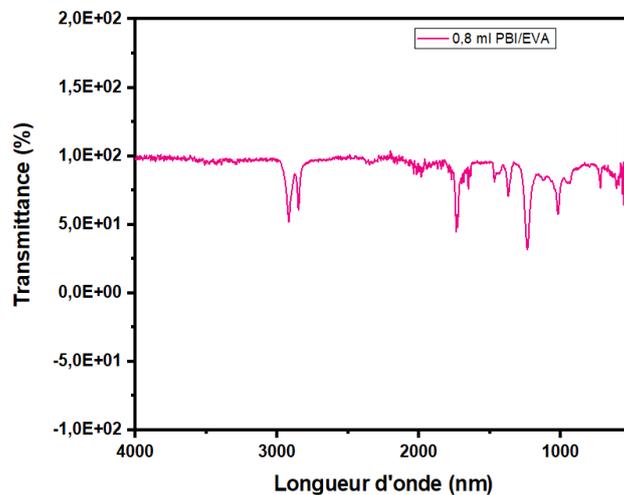


Figure III.13 : Spectre d'échenillons de PBI/EVA

III.4. Analyse par UV-visible

La figure.III.14 présente la transmittance du composite PBI/EVA à différents volumes. On observe sur la figure que les films composites préparé à 0.2ml de PBI/EVA présente une transmittance $> 65\%$ dans la gamme du visible et dans la gamme infrarouge est supérieur à 60% . Et pour le volumes 0.4ml la transmittance diminue dans la gamme 450-600nm ce qui peut être attribué à la répartition des nanoparticules de PBI ainsi que sa morphologie poreuse par lasuite, dans la gamme 600-800nm ,on note l'augmentation de la transmittance à une valeur $> 90\%$. Pour le volume 0.6ml, la transmittance enregistré est $> 85\%$ et pour le 0.8ml,

la transmittance optique est environ de 98%. De plus, on voit clairement que lorsque la concentration augmente le taux de la transmittance augmente, ce qui signifie le caractère photoluminescent du PBI est activé lorsqu'il a subi une irradiation lumineuse.

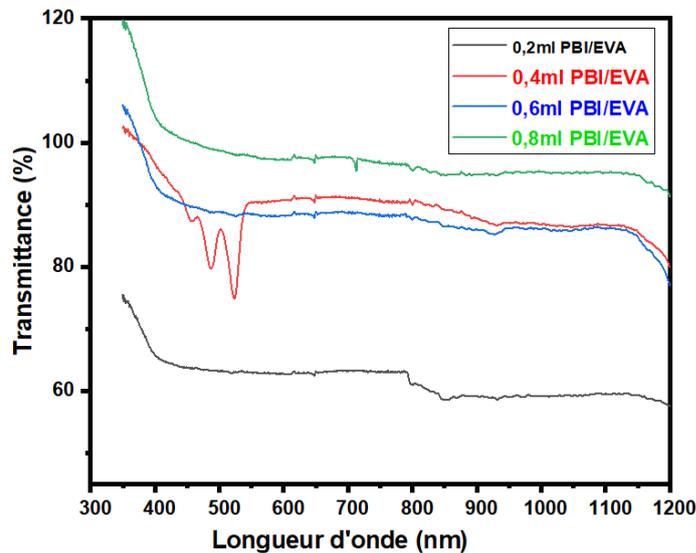


Figure III .14 : spectre UV-visible du film PBI/EVA

I.5. Analyse par la photoluminescence

I.5.1. Photoluminescence de L'EVA

La figure.III.15. Présente le spectre de la photoluminescence de l'EVA, on note sur la figure que l'EVA absorbe à 420nm. Par la suite, La figure. III.16.Présente le spectre photoluminescent du film PBI, on note sur la figure l'apparition des pics d'absorption à des longueurs d'onde 400, 450nm et 600nm par la suite il réémit de la lumière entre 650et 850nm.

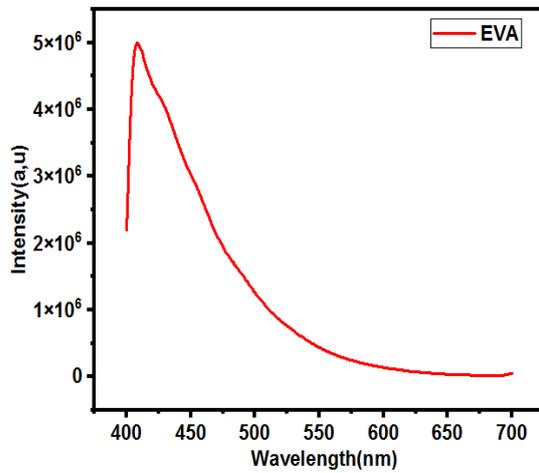


Figure III.15 : spectre de la photoluminescence de l'EVA

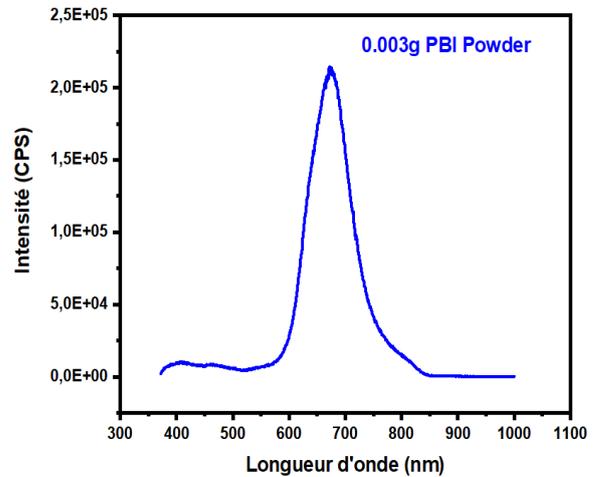


Figure III.16: Spectre de la photoluminescence de la poudre PBI

I.5.2. Analyse par photoluminescence du composite PBI/EVA

Le PBI est soluble dans le chloroforme, il présente une forte propriété photoluminescence et ce résultat a été observé lors de la caractérisation du composite PBI/EVA par la photoluminescence en faisant varier la concentration du PBI dans la matrice du polymère de 0.2ml, 0.4ml, 0.6ml et 0.8ml respectivement. La figure III .17 présente le spectre PL du composite PBI/EVA, on note sur la figure que les spectres enregistrés présentent une même allure avec de l'apparition de plusieurs pics dont le premier à 381nm suivi de 399, 475nm, 570nm, 617nm, 685 et 758nm. De plus, on note que l'intensité des pics enregistrés augmente avec l'augmentation de la quantité du PBI dans la matrice de l'EVA.

A partir des résultats obtenus dans cette partie, on peut conclure que l'incorporation du PBI dans la matrice de l'EVA a provoqué le décalage spectral vers le rouge, autrement dit, vers des longueurs d'onde plus grande.

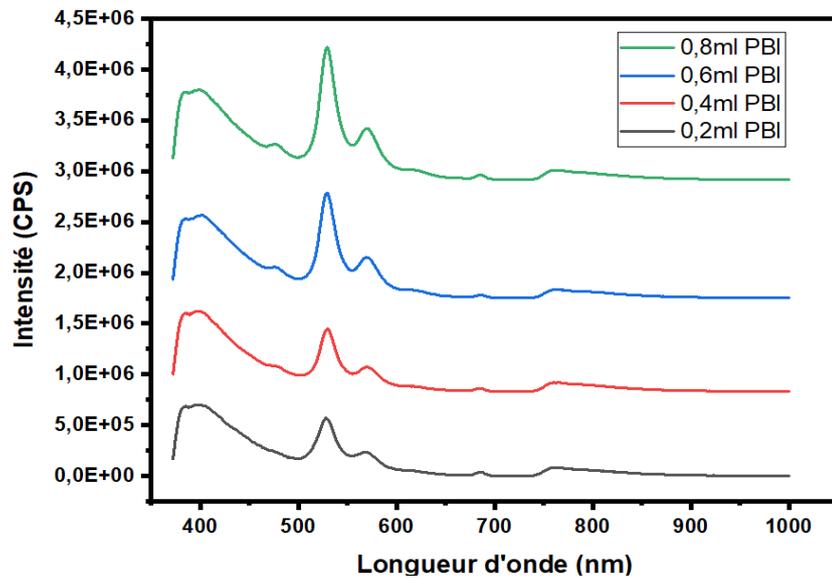


Figure III.17: Spectre photoluminescence du PBI /EVA à différentes concentrations

- ✓ Les résultats obtenus mettent en évidence l'amélioration des propriétés optiques de l'EVA en présence du PBI
- ✓ Les résultats obtenus montrent que les nano particule de PBI sont bien imprégner dans la matrice de l'EVA. Notamment l'XPS l'apparition de la liaison N-H et C=N
- ✓ La concentration du PBI dans la matrice du polymère a une influence sur les propriétés du composite obtenu.

CONCLUSIONS

Le travail développé dans le cadre de ce mémoire consistait en Synthèse et caractérisation des nano-composites PBI/EVA pour une application en photovoltaïque. Nous avons tout d'abord effectué l'élaboration des composites PBI/EVA à différentes concentrations en PBI. Par la suite une série de caractérisations est effectuée à savoir : MEB, XPS, FTIR, UV-visible et la photoluminescence.

- ✓ L'analyse morphologique met en évidence une forme de bâtonnets pour les particules de PBI pour des faibles grossissements et une forme feuilletée pour les forts grossissements.
- ✓ L'analyse XPS confirme l'incorporation des nanoparticules de PBI dans la matrice de l'EVA.
- ✓ L'analyse IR a montré les différents groupements fonctionnels qui se présentent au sein du composite PBI/EVA.
- ✓ L'analyse UV-visible montre un taux de transmittance très élevé pour le volume 0.8ml du PBI.

L'analyse par photoluminescence montre que le PBI est un matériau très photoluminescent et peut être un bon candidat pour une application en photovoltaïque comme couche Luminescente Down Shifting (LDS).

- ✓ Au regard des résultats présentés, on peut, en toute rigueur valider le choix du PBI comme matériaux photoluminescent pour une application en photovoltaïque.

Perspectives

- ✓ L'objectif initial de ce mémoire est atteint. Nous avons en effet réussi à synthétiser et caractériser les films composites à base du PBI/EVA.
- ✓ Vu que le PBI a confirmé sa capacité comme matériaux photoluminescent, il est intéressant de faire quelques tests photovoltaïques comme les mesures I (V).
- ✓ La durée de vie de la cellule photovoltaïque correspond à la durée de vie de l'encapsulant EVA

Références

- [1] AC. Lokhande, RBV. Chalapathy, He M, Jo E, M. Gang, SA. Pawar, CD. Lokhande, JH. Kim (2016) Development of Cu_2SnS_3 (CTS) thinfilmsolarcells by physicaltechniques: a statusreview. *Sol Energy Mater Sol Cells*153:84–107.
- [2] AC. Lokhande, KV. Gurav, Jo E, CD. Lokhande, JH. Kim (2016) Chemical synthesis of Cu_2SnS_3 (CTS) nanoparticles: a statusreview. *J AlloysCompd*656:295–310.
- [3] Dj. BELLALA «Contribution à l’Optimisation des Systèmes de Conversion d’Energie. Application aux Systèmes Photovoltaïques». Thèse de doctorat, Université de Batna, 2010.
- [4] J. R. FANCHI, "Energy:Technology and Directions for the Future", Edition Elsevier AcademicPress, 2004.
- [5] K. Aitolaun, G. Gava Sonaïb, M. Markkanenun, J.J. Kaschukc, X. Houun, K. Miettunenb, P. D.Lundun, Encapsulation of commercial and emergingsolarcellswith focus on perovskitesolarcells. *Solar Energy* 237 (2022) 264–283
- [6] M.Gratzel, « Conversion of sun light to electric power by nanocrystalline dyesensitizedSolarcells », *J.Photochem. Photobiol. A:Chem.* Vol. 164, n° 1-3, p.3-14, (2004).
- [7] T.LeBahers, “Optimisation des cellules solaires à colorants à base de ZnO par une approche combinée théorie/expérience », thèse doctorat, Univ .Pierre et Marie Curie, (2011).
- [8] M. Ghassemi, Solar Ressource from « SolarEnergy:RenewableEnergy and the Environment », page 20 et 21, 2010.
- [9] Magister en Physique Option : Conversions Photovoltaïques. Par MERAD FaizaSujet Conception d’un programme de calcul du rayonnement solaire, cas particulier de la région de Mostaganem. 2013

- [10] Cabal Cédric, Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque, Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2008.
- [11] Dr. Sofia BelaidLalouni, « Cours Energie Solaire Photovoltaïque », Université A.Mira de Bejaia, 2015.
- [12] ZENATA TAHER LICENCE Thème : Etude et Simulation D'un Système Photovoltaïque
- [13] S.AIT ALLAK, Fonctionnalisation d'un polymère encapsulant dans le domaine photovoltaïque, 2018, Université M'hamedBougara de Boumerdès, page 4
- [14] Antonio Luque and Steven Hegedus, Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, John Wiley& Sons Ltd, 2003.
- [15] Généralité sur les cellules photovoltaïque madame palaouane maitre de recherche BCRTSE 2022
- [16]Czanderna, A.W., Pern, F.J., 1996. Encapsulation of PV modules using ethylene vinyl acetate copolymer as a pottant: a critical review. Sol. Energy Mater. Sol. Cells 43,101–181.
- [17] A. W. Czanderna, F. J. Pern, Sol. Energ. Mater. Sol. Cells 1995, 43,101.
- [18] Rajput, P., Malvoni, M., Kumar, N.M., Sastry, O.S., Tiwari, G.N., 2019. Risk priority number for understanding the severity of photovoltaic failure modes and their impacts on performance degradation. Case Stud. Therm. Eng. 16, 100563
- [19] Cattaneo, G., Faes, A., Li, H., Galliano, F., Gragert, M., Yao, Y., Despeisse, M., Ballif, C., 2014. Lamination process and encapsulation materials for glass–glass PV module design. Photovoltaics Int. 1, 1–8.
- [20] Kempe, M.D., Miller, D.C., Wohlgemuth, J.H., Kurtz, S.R., Moseley, J.M., Nobles, D. I., Stika, K.M., Brun, Y., Samuels, S.L., Shah, Q.A., Tamizhmani, G., Sakurai, K., Inoue, M., Doi, T., Masuda, A., Vanderpan, C.E., 2016. Multi angle laser light scattering evaluation of field exposed thermoplastic photovoltaic encapsulant materials. Energy Sci. Eng. 4, 40–51.

- [21] Kraft, A., Labusch, L., Ensslen, T., Durr, I., Bartsch, J., Glatthaar, M., Glunz, S., Reinecke, H., 2015. Investigation of acetic acid corrosion impact on printed solar cell contacts. *IEEE J. Photovoltaics* 5, 736–743.
- [22] V. Kumar, M. Shah, S. Shahi, *Phytoremediation Technology for the Removal of Heavy Metals and Other Contaminants from Soil and Water*, Chapitre 16 «Role of nanomaterials in phytoremediation of tainted soil», 1st Edition - February 7, 2022
- [23] E. Kozma, M. Catellani. Perylene diimides based materials for organic solar cells. *Dyes and Pigments* 98(2013) 160-179.
- [24] Aaron K. Le, Jon A Bender, Dylan H. Arias, Daniel E. Cotton, Justin C. Johnson, and Sean T Roberts [25] *J. Am. Chem. Soc.*, Just Accepted Manuscript • DOI: 10.1021/jacs.7b11888 • Publication Date (Web): 14 Dec 2017 Downloaded from <http://pubs.acs.org> on December 14, 2017
- [26] Huang C, Barlow S, Marder SR. Perylene-3,4,9,10-tetracarboxylic acid diimides: synthesis, physical properties, and use in organic electronics. *J Org Chem* 2011;76:2386e407.
- [27] Wang, L., Li, J., Guo, W., Xu, G., & Sun, L. (2019). Enhanced light conversion efficiency in organic photovoltaics using PBI-doped EVA encapsulation. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 30(4), 3671-3679. [28] Park, J., Lee, S., Kim, J., Lee, S., Jeong, J., Lee, J., & Kim, H. (2015). Improving the performance of solar modules using a down-shifting PBI-doped EVA encapsulant. *RSC Advances*, 5(84), 68295-68300.
- [29] Y. Zhou, S. Liu, L. Liu, H. Chen et L. Chen, "Améliorer l'efficacité et la stabilité des cellules solaires organiques en ajoutant une couche d'encapsulation EVA dopée PDI", *Solar Energy*, vol. 206, p. 189-196, juil. 2020.
- [30] Babaei, M., et al. (2016). "Highly efficient down-shifting luminescent solar concentrator using earth-abundant silicon quantum dots for building integrated photovoltaics". *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 157, 1062-1069.
- [31] Kim, H. Y., Oh, J. H., Lee, S. Y., Cho, K. S., Lee, C. H., Kim, J. S., & Lee, Y. H. (2009). Highly efficient conversion of the emission wavelength of blue-

- emitting InGaN-based light-emitting diodes using organic wavelength conversion layers. *Applied Physics Letters*, 94(3), 033301.
- [32] Chen, L. Y., Yang, C. M., & Liao, W. H. (2012). Improving color rendering index of white light-emitting diodes with dye-sensitized quantum dot color converter. *Applied Physics Letters*, 100(22), 223901. [33] Ouvrage. Faas, S. (2011). "Light management in solar cells".
- [34] G. Boudarham, *Le microscope électronique à balayage en criminalistique*, Journal de la Criminalistique, No.7, Vol.1 .
- [35] L. REIMER « Scanning Electron Microscopy », Springer Series in Optical Sciences, Springer-Verlag, (1985).
- [36] L. REIMER « Scanning Electron Microscopy », Springer Series in Optical Sciences, Springer-Verlag, (1985).
- [37] G. Boudarham, *Le microscope électronique à balayage en criminalistique*, Journal de la Criminalistique, No.7, Vol.1
- [38] F. ROUSSEL-DHERBEY, *Les canons à électrons en microscopie électronique à balayage*, cet ouvrage Ecole d'été GNMEBA, Grenoble, (2006)
- [39] B. VU THIEN, *Les sources d'électrons*, Conférence, Réunion GN-MEBA des 2 et 3 décembre 2004, Paris, (2004)
- [40] J.I. GOLDSTEIN, D.E. NEWBURY, P.ECHLIN, D.C.JOY, A.D. ROMIG, C.E. LYMAN, C. FIORI, E. LIFSHIN, *Electron Optics, Scanning, Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis (Second Edition)*, Plenum Press, New York, 21-40, (1992)
- [41] *Photoluminescence: From Theory to Applications* " édité par Claude D. Weisbuch [42] "Photoluminescence: Advances in Research and Applications" edited by William T. Anderson (ISBN: 1536144381) [43] "Principles of Fluorescence Spectroscopy" by Joseph R. Lakowicz
- [44] Anpo, M., in "Handbook of Heterogeneous Catalysis," (G. Ertl, H. Knozinger, and J. Weitkamp, Eds.), Vol. 2, p. 664. VCH, Weinheim, 1997.
- [45] Anpo, M., *Shokubai (Catalysts & Catalysis)* 39, 45 (1997).

- [46] Anpo, M., and Matsuura, T. (Eds.), in "Photochemistry on Solid Surfaces." Elsevier, Amsterdam, 1989.
- [47] Anpo, M., and Yamashita, H., in "Surface Photochemistry," (M. Anpo, Ed.) p. 117. Wiley, London, 1996.
- [48] Anpo, M., Negishi, N., and Nishiguchi, H., Crit. Rev. Surf:Chem. 3, 131 (1993).
- [49] Calvert, J. G., and Pitts, J. N., Jr., "Photochemistry," New York, 1966.
- [50] Simons, J. P., "Photochemistry and Spectroscopy," WileyInterscience, London, 1971.
- [51] Turro, N. J., "MolecularPhotochemistry," Benjamin, New York, 1967.
- [52] Turro, N. J., "Modern MolecularPhotochemistry," BenjaminlCummings, Menlo Park, CA, 1978.
- [53] Demas, J. N., "Excited State LifetimeMeasurements," AcademicPress, New York, 1984.
- [54] ouvrage "Surface Analysis by XPS and AES" par John F. Watts et John Wolstenholme
- [55] ouvrage "X-ray Photoelectron Spectroscopy" par David Briggs et Michael P. Seah
- [56] Mansur AAP, do Nascimento OL, Mansur HS, Characterization of copolymerspoly(ethylene-co-vinylacetate) and evaluation of their effects in the modifiedmortarsproperties. In:Xth World Congress on CeramicTileQuality, Castellón, Spain; 10-13 February, 2008.
- [57] Dupuy N, Gaston F, Marque SRA, Barbaroux M, Dorey S. FTIR study of ageing of gamma-irradiatedbiopharmaceutical EVA based film. PolymerDegradation and Stability, 2016; 129: 19-25.
- [58] Wang, Y.; Tang, J.; Zheng, H.; Sun, W.; Jiao, J.; Wang, Y.; Huang, L.; Liu, J.; Wang, W.; Shen, W. Crystallization of Poly(ethyleneterephthalate) via SilicaNanoparticlesTetheredwith Short Diblock PEG-PET Copolymers. Sci. Adv. Mater. 2016, 8, 1603–1611.

- [59] Wang, A.; Wu, S.; Dong, J.; Wang, R.; Wang, J.; Zhang, J.; Zhong, S.; Bai, S. Interfacial facet engineering on the Schottky barrier between plasmonic Au and TiO₂ in boosting the photocatalytic CO₂ reduction under ultraviolet and visible light irradiation. *Chem. Eng. J.* 2021, 404, 127145.
- [60] J.R. Pels, F. Kapteijn, J.A. Moulijn, Q. Zhu, K.M. Thomas, Evolution of nitrogen functionalities in carbonaceous materials during pyrolysis, *Carbon* 33 (1995) 1641e1653.
- [61] J.C. Sanchez-Lopez, C. Donnet, F. Lefebvre, C. Fernandez-Ramos, A. Fernandez, Bonding structure in amorphous carbon nitride: a spectroscopic and nuclear magnetic resonance study, *J. Appl. Phys.* 90 (2001) 675e681

