



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



**UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID -
TLEMEN**

MEMOIRE

Présenté à :

FACULTE DES SCIENCES – DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

MASTER EN PHYSIQUE

Spécialité : Physique énergétique

Par :

Mr. IBRIR SOULEYMANE CHAMSEDDINE

Sur le thème

Etude de l'effet du dépôt de couches minces d'oxyde de carbone sur cellule photovoltaïque

Soutenu publiquement le 25 juin 2023 à Tlemcen devant le jury composé de :

Mr Sofiane Ammara	Professeur	Université de Tlemcen	Président
Mme Bouayed Siham	Docteur	Université de Tlemcen	Encadrante
Mr Chiali Aniss	Maitre de conférence	Université de Tlemcen	Examineur

Ibrir Souleymane Chamseddine /2023

Remerciement

*Le grand remerciement à notre dieu créateur qui nous a aidés en nous donnant
la force et le courage durant ce travail.*

Je tiens à exprimer mon respect aux membres du jury.

*Je souhaite en premier lieu à montrer toute ma gratitude à mon encadrant,
Madame KHEDIM SIHAM, J'ai pu bénéficier de votre encadrement et
apprécier vos qualités scientifiques et humaines. Merci pour la bonne démarche
que vous m'avez offert pendant la réalisation de ce mémoire, vos précieux
conseils, votre orientation et surtout votre patience.*

*Je tiens également à remercier **Mr. AMARA SOFIANE**, vous me faites un grand
honneur en acceptant de présider ce jury. J'ai pu apprécier l'étendue de vos
connaissances et vos grandes qualités humaines. Veuillez accepter, Professeur,
mes sincères remerciements et mon profond respect.*

*Mes remerciements s'orientent ensuite vers **Mr. CHIALI ANISS**, qui m'a fait
l'honneur d'avoir accepté d'examiner et juger ce travail. J'ai eu le grand
privilège de bénéficier de votre enseignement lumineux durant mes années
d'étude. Veuillez cher maître, trouver dans ce travail, le témoignage de ma
gratitude et mon profond respect.*

Merci

Dédicace

Je dédie ce mémoire à mes chers parents qui ont été toujours à mes côtés et m'ont toujours soutenu tout au long de ces longues années d'études.

En signe de reconnaissance, qu'ils trouvent ici, l'expression de ma profonde gratitude pour tout ce qu'ils ont consenti d'efforts et de moyens pour me voir réussir dans mes études.

A toute ma famille mon chère frère Youcef et mes chères sœurs

Et A toutes mes amis,

Et surtout Chérif et Amine.

Liste des figures

FIGURE 1- 1 : SPECTRE SOLAIRE RELEVÉ DANS PLUSIEURS CONDITIONS SELON LA CONVENTION AM.[4].	14
FIGURE I- 2 : UN SCHEMA PRESENTE LE PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UNE CELLULE SOLAIRE [11].	16
FIGURE I- 3 : SCHEMA ELECTRIQUE EQUIVALENT D'UNE CELLULE SOLAIRE IDEALE. [10]	17
FIGURE I- 4 : SCHEMA EQUIVALENT D'UNE CELLULE SOLAIRE REELLE [20]	18
FIGURE I- 5 : CARACTERISTIQUE COURANT-TENSION D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE [22].	19
FIGURE I- 6 :PART DE MARCHE DES DIFFERENTES TECHNOLOGIES SOLAIRES	21
FIGURE I- 7 : CELLULES AU SILICIUM MONOCRISTALLIN (GAUCHE) ET DES CELLULES AU SILICIUM POLYCRISTALLIN (DROITE) [28]	22
FIGURE I- 8 : CELLULE SOLAIRE CZTS (GAUCHE) CELLULE SANS SILICIUM EN COUCHE MINCE CIS / CIGS (DROITE) [31]	22
FIGURE I-9 : CELLULE A BASE DE PEROVSKITE	23
FIGURE I - 10 : MONTRE L'EVOLUTION DES RENDEMENTS RECORD DES PRINCIPALES FILIERES PHOTOVOLTAÏQUES ACTUELLES.	24
FIGURE I- 11 : REPRESENTATION SCHEMATIQUE DES HYBRIDATIONS SP ET SP2 ET SP3 DU CARBONE	25
FIGURE I-12 : LA STRUCTURE DU GRAPHITE [35].	26
FIGURE I-13 : LA STRUCTURE DU DIAMANT [37].	26
FIGURE I-14 : STRUCTURE DE DLC	27
FIGURE I-15 : SCHEMA REPRESENTATIF DES DEUX GRANDES FAMILLES DES DLC.	27
FIGURE II -1 : TECHNIQUES DE DEPOT DES COUCHES MINCES [2]	35
FIGURE II-2 : SCHEMA D'UN PULVERISATEUR CATHODIQUE [5]	36
FIGURE II -3 : SCHEMA DU DISPOSITIF D'EVAPORATION THERMIQUE [7].	37
FIGURE II-4 : PRINCIPE DE L'ABLATION LASER [9]	38
FIGURE II-5 : SCHEMA DE PRINCIPE DE DEPOT EN PHASE VAPEUR CHIMIQUE (CVD) [12].	39
FIGURE II-6 : DISPOSITIF EXPERIMENTAL DE DEPOT PAR SOL-GEL [15]	40
FIGURE II-7 : A : SCHEMA DE FONCTIONNEMENT D'UN DIFFRACTOMETRE DE RAYONS X. B : PRINCIPE DE LA DIFFRACTION DE RAYONS X (DRX) PAR UN RESEAU CRISTALLIN.	41
FIGURE II-8 : MICROSCOPE ELECTRONIQUE A BALAYAGE.	42
FIGURE II-9 : MESURE DE LA RESISTIVITE D'UNE ELECTRODE PAR LA METHODE DES 4 POINTES (A) OU LA METHODE DE VAN DER PAUW (B). MESURE EFFET HALL (C).[26]	44
FIGURE III-1 : PHOTOGRAPHIE DES ECHANTILLONS A BASE DE GRAPHENE....	52
FIGURE III-2 : PHOTOGRAPHIE DES ECHANTILLONS A BASE DE GRAPHITE	52
FIGURE III-3 : PHOTOGRAPHIE DES ECHANTILLONS A BASE D'OLEO EUROPEAE.....	52

<u>FIGURE III-4 : EVOLUTION DE L'ÉPAISSEUR DE LA COUCHE DEPOSÉE EN FONCTION DE LA MASSE DU CARBONE POUR LES ÉCHANTILLONS DE GRAPHÈNE.</u>	56
<u>FIGURE III-5 : EVOLUTION DE L'ÉPAISSEUR DE LA COUCHE DEPOSÉE EN FONCTION DE LA MASSE DU CARBONE POUR LES ÉCHANTILLONS DE GRAPHITE.</u>	56
<u>FIGURE III-6 : EVOLUTION DE L'ÉPAISSEUR DE LA COUCHE DEPOSÉE EN FONCTION DE LA MASSE DU CARBONE POUR LES ÉCHANTILLONS DE CARBONE NATUREL.</u>	57
<u>FIGURE III-7 : SCHEMA EXPLICATIF DU PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU SPECTROPHOTOMETRE UTILISE.</u>	57
<u>FIGURE III-8 : SCHEMA REPRESENTATIF DE LA PLAGE ETUDIEE EN SPECTROSCOPIE UV- VIS- NIR</u>	58
<u>FIGURE III-9 : PHOTOGRAPHIE REPRESENTANT UN SPECTROPHOTOMETRE.</u>	59
<u>FIGURE III-10 : SPECTRE DE TRANSMISSION DES COUCHES MINCES A BASE DE GRAPHÈNE POUR DIFFÉRENTES CONCENTRATIONS DE CARBONE.</u>	60
<u>FIGURE III-11 : SPECTRE DE REFLEXION DES COUCHES MINCES A BASE DE GRAPHÈNE POUR DIFFÉRENTES CONCENTRATIONS DE CARBONE.</u>	60
<u>FIGURE III-12 : SPECTRE DE TRANSMISSION DES COUCHES MINCES A BASE DE GRAPHITE POUR DIFFÉRENTES CONCENTRATIONS DE CARBONE.</u>	61
<u>FIGURE III-13 : SPECTRE DE REFLEXION DES COUCHES MINCES A BASE DE GRAPHITE POUR DIFFÉRENTES CONCENTRATIONS DE CARBONE.</u>	61
<u>FIGURE III-14 : SPECTRE DE TRANSMISSION DE COUCHES MINCES A BASE DE SOURCE DE CARBONE NATURELLE POUR DIFFÉRENTES CONCENTRATIONS DE CARBONE</u>	62
<u>FIGURE III-15 : SPECTRE DE REFLEXION DE COUCHES MINCES A BASE DE SOURCE DE CARBONE NATURELLE POUR DIFFÉRENTES CONCENTRATIONS DE CARBONE.</u>	62
<u>FIGURE III-16 : PHOTOGRAPHIE DU MONTAGE UTILISE POUR LA CARACTERISATION ELECTRIQUE DE CELLULE SOLAIRE REVETUE DE COUCHES MINCES A BASE DE CARBONE.</u>	63
<u>FIGURE III-17 : COURBE REPRESENTANT LA VARIATION DE LA TENSION GENEREE PAR LA CELLULE SOLAIRE SUR LAQUELLE ON A DEPOSE UNE COUCHE MINCE A BASE DE GRAPHÈNE.</u>	65
<u>FIGURE III-18 : COURBE REPRESENTANT LA VARIATION DE LA TENSION GENEREE PAR LA CELLULE SOLAIRE SUR LAQUELLE ON A DEPOSE UNE COUCHE MINCE A BASE DE GRAPHITE.</u>	66
<u>FIGURE III-19 : COURBE REPRESENTANT LA VARIATION DE LA TENSION GENEREE PAR LA CELLULE SOLAIRE SUR LAQUELLE ON A DEPOSE UNE COUCHE MINCE A BASE DE CARBONE NATUREL.</u>	66
<u>FIGURE III-20 : COURBE REPRESENTANT LA VARIATION DE L'INTENSITE DU COURANT GENERE PAR LA CELLULE SOLAIRE SUR LAQUELLE ON A DEPOSE UNE COUCHE MINCE A BASE DE GRAPHÈNE.</u>	67
<u>FIGURE III-21 : COURBE REPRESENTANT LA VARIATION DE L'INTENSITE DU COURANT GENERE PAR LA CELLULE SOLAIRE SUR LAQUELLE ON A DEPOSE UNE COUCHE MINCE A BASE DE GRAPHITE.</u>	67

**FIGURE III-22 : COURBE REPRESENTANT LA VARIATION DE L'INTENSITE DU
COURANT GENERE PAR LA CELLULE SOLAIRE SUR LAQUELLE ON A
DEPOSE UNE COUCHE MINCE A BASE DE CARBONE NATUREL..... 68**

Liste des tableaux

<u>TABLEAU I-1 : LES PRINCIPALES PROPRIETES DES DLC ET DU DIAMANT SELON LEUR COMPOSITION ET LEUR STRUCTURE [43].</u>	28
<u>TABLEAU III-1.1 : RESUME DES DIFFERENTS ECHANTILLONS PREPARES DU GRAPHENE</u>	51
<u>TABLEAU III-1.2 : RESUME DES DIFFERENTS ECHANTILLONS PREPARES DU GRAPHITE</u>	51
<u>TABLEAU III-1.3 : RESUME DES DIFFERENTS ECHANTILLONS PREPARES DU CARBONE NATUREL</u>	51
<u>TABLEAU III-2.1: MESURE DE LA MASSE DE LA COUCHE DEPOSEE POUR CHAQUE ECHANTILLON DE GRAPHENE</u>	53
<u>TABLEAU III-2.2: MESURE DE LA MASSE DE LA COUCHE DEPOSEE POUR CHAQUE ECHANTILLON DE GRAPHITE</u>	53
<u>TABLEAU III-2.3 : MESURE DE LA MASSE DE LA COUCHE DEPOSEE POUR CHAQUE ECHANTILLON DE CARBONE NATUREL</u>	54
<u>TABLEAU III-3.1 : VALEURS RELEVees DE L'INTENSITE DU COURANT ELECTRIQUE ET DE LA TENSION AUX BORNES DE LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE POUR LE GRAPHENE</u>	64
<u>TABLEAU III-3.2 : VALEURS RELEVees DE L'INTENSITE DU COURANT ELECTRIQUE ET DE LA TENSION AUX BORNES DE LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE POUR LE GRAPHITE</u>	64
<u>TABLEAU III-3.3 : VALEURS RELEVees DE L'INTENSITE DU COURANT ELECTRIQUE ET DE LA TENSION AUX BORNES DE LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE POUR LE CARBONE NATUREL</u>	65

Table des matières

<i>Remerciement</i>	1
<i>Dédicace</i>	3
Liste des figures	4
Liste des tableaux	7
Table des matières	8
Introduction générale.....	10

Chapitre I

Généralité sur les cellule solaire et état de l'art sur le carbone

I.1.Introduction	13
I.2.Rayonnement solaire.....	13
I .3. Cellule Solaire Photovoltaïque	14
I .3.1. Historique	14
I.3.2. Description	15
I .3.3. Fonctionnement d'une cellule solaire	15
I .3.4. Modélisation d'une cellule photovoltaïque.....	17
I .3.5. Caractéristique d'une cellule photovoltaïque	18
I .4. Évolutions des cellules solaires.....	20
I .4.1. Première génération :	21
I.4.2. Deuxième génération :	22
I.4.3. Troisième génération :	23
I.5.1. Le carbone	25
I.5.2. Les formes cristallines de carbone	25
I.5.3. La forme amorphe de carbone	27
I.5.4. Les applications de la couche mince de carbone.....	28
Les références	30

Chapitre II

Les Méthodes de dépôt et Techniques de Caractérisations

II .1. Introduction	34
II .2. Différentes techniques de dépôt des couches minces.....	34
II .2.1. Procédé physique	35
II .2.2. Procédé chimique	38

II .3. Techniques de Caractérisations	40
II .3.1. Caractérisation structurale	40
II .3.2. Caractérisations optiques	43
II .3.3. Caractérisations électriques	43
II .4. Conclusion	45
Références	46

Chapitre III

Procédure et résultats expérimentaux

III.1. Introduction	49
III.2. Procédure expérimentale	49
III.3. Préparation des échantillons	50
III.4. Etudes des caractéristiques des couches minces déposées	52
III .4.1. Analyse morphologique	52
III.4.2. Calcul de l'épaisseur des couches déposées	53
III .4.3. Caractérisation optique par spectroscopie	57
III .4.4. Caractérisation électrique	63
III .5. Conclusion	69
Conclusion générale	70
Résumé	74

Introduction générale

La progression des sources d'énergie renouvelable est un défi majeur pour les générations futures, car l'énergie fossile représente 80 % de la production énergétique mondiale, qui posent des problèmes d'approvisionnement et de pollution. Il est donc urgent de combiner la réduction de la consommation avec le développement d'énergies renouvelables et propre, comme l'énergie photovoltaïque qui convertit directement la lumière solaire en électricité. Les systèmes photovoltaïques sont fiables, faciles à entretenir et émettent peu de CO₂, ce qui en fait une solution propre et durable pour satisfaire les demandes énergétiques de demain

Notre travail vise à déposer une fine couche de carbone sur une cellule solaire, puis à caractériser cette couche.

Le carbone est un matériau doté de propriétés mécaniques, électriques et optiques très intéressantes, ce qui en fait un choix courant pour les revêtements de surface dans l'industrie. Ses propriétés mécaniques, telles que sa résistance à l'usure et sa dureté, peuvent contribuer à prolonger la durée de vie de la cellule solaire revêtue et à réduire les problèmes de corrosion et d'adhérence. Par ailleurs, les propriétés optiques du carbone permettent à la couche de revêtement d'être Non opaque aux rayonnements solaires incidents et d'augmenter le piégeage de ces rayonnements à la surface de la cellule solaire, ce qui peut améliorer son rendement.

Notre mémoire est structuré de la manière suivante :

Le premier chapitre est une introduction qui présente le rayonnement solaire, ainsi que l'évolution des cellules photovoltaïques au fil du temps. Il aborde également le développement technologique des différentes générations de cellules photovoltaïques. Cette partie se termine par une présentation des couches minces de carbone, avec une discussion sur leurs propriétés et leurs applications.

Le deuxième chapitre présente un état de l'art sur les méthodes de dépôt et les techniques de caractérisation, telles que la caractérisation structurale, optique et électrique. Cette section est importante car elle permet de comprendre les méthodes et les outils qui ont été utilisés pour réaliser et caractériser le dépôt de couche mince de carbone sur la cellule solaire.

Le troisième et dernier chapitre décrit les résultats obtenus et les discussions qui en découlent. Il présente la procédure expérimentale utilisée pour obtenir le revêtement appliqué sur une cellule solaire commerciale. Les résultats sont ensuite analysés et discutés pour évaluer l'impact du dépôt de couche mince de carbone sur les performances de la cellule solaire.

Chapitre I

Généralité sur les cellule solaire et état de l'art sur le carbone

I.1.Introduction

Les couches minces de carbone ont des propriétés optiques qui les rendent idéales pour être utilisées dans les cellules solaires. En raison de leur transparence à la fois dans l'infrarouge et dans le visible, les couches minces de carbone peuvent être appliquées en tant que couches optiques antireflets dans les cellules solaires. Cette fonctionnalité permet d'augmenter la quantité de lumière solaire absorbée par la cellule, ce qui améliore son efficacité de conversion en électricité.

Ce chapitre offre une introduction sur le rayonnement solaire et ses caractéristiques, ainsi que la description et l'évolution des cellules photovoltaïques au fil du temps. Nous mentionnons en particulier le développement technologique des différentes générations de cellules photovoltaïques. Enfin, nous avons consacré une partie de ce chapitre à des rappels théoriques sur les nanomatériaux et les couches minces de carbone en abordant leurs propriétés et leurs applications.

I.2.Rayonnement solaire

Le Soleil libère en permanence une immense quantité d'énergie rayonnante dans le système solaire, composée d'ondes électromagnétiques dont une partie atteint constamment la limite supérieure de l'atmosphère terrestre. Cette énergie rayonnante s'étend sur la plage de longueurs d'onde de la lumière visible, allant de l'ultraviolet à l'infrarouge lointain en raison de la température de surface du Soleil (environ 6000 K). [1]

En moyenne, chaque mètre carré de la couche atmosphérique externe reçoit 1367 watts d'énergie solaire. Cependant, l'intensité et la distribution spectrale de l'énergie solaire qui arrivent au sol sont considérablement altérées en raison de la diffusion et de l'absorption atmosphériques. Les puissances rayonnantes relatives à une unité de mesure dépendent largement de la longueur du trajet des rayons solaires dans l'atmosphère terrestre. Le terme "intensité de la masse d'air" (AM) est souvent utilisé pour décrire le rapport entre le chemin optique et le chemin normal au niveau de la mer par jour sans nuages. En se déplaçant à travers les différents niveaux de l'atmosphère, une partie de l'énergie solaire s'atténue en raison de l'influence de la couche atmosphérique traversée, ce qui affecte à la fois son intensité et sa composition spectrale. Les gaz atmosphériques comme l'ozone (O₃), le dioxygène (O₂), la vapeur d'eau (H₂O), le dioxyde de carbone (CO₂), le protoxyde d'azote (N₂O) et le méthane (CH₄) absorbent sélectivement certaines longueurs d'onde de la lumière solaire (Figure I-1), ce qui peut causer des conséquences importantes sur le climat et les écosystèmes terrestres [2].

Malgré cela, la quantité d'énergie solaire qui atteint la surface de la Terre en une heure représente 8000 à 10000 fois la quantité totale d'énergie consommée par la population mondiale en une année. Cela souligne le potentiel de l'énergie solaire comme source d'énergie renouvelable et non polluante pour l'avenir. Cependant, il est important de développer des technologies efficaces pour la capturer et la stocker, ainsi que de réduire notre consommation d'énergie globale [3].

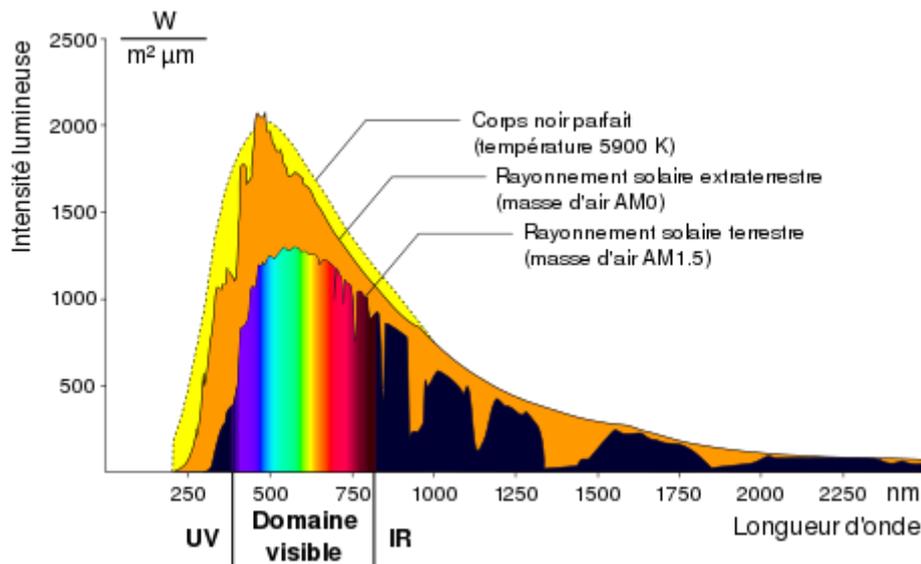


Figure 1- 1 : spectre solaire relevé dans plusieurs conditions selon la convention AM. [4].

I.3. Cellule Solaire Photovoltaïque

I.3.1. Historique

En 1839, le physicien Alexandre Edmond Becquerel a fait une découverte remarquable connue sous le nom d'effet photovoltaïque. Cette découverte a révélé la capacité d'un matériau à convertir l'énergie contenue dans le rayonnement solaire en énergie électrique. Becquerel a observé que lorsque deux électrodes plongées dans un électrolyte liquide sont éclairées, une différence de potentiel apparaît entre elles. Cette découverte a jeté les bases de la technologie solaire moderne et a ouvert la voie à la recherche et aux développements futurs dans le domaine de l'énergie solaire.[6].

En 1883, les scientifiques Charles Fritts, William Adams et Richard Day ont réalisé une avancée importante dans le domaine de l'énergie solaire en développant la première cellule solaire à base de sélénium. [7].

Tout à fait, en 1905, les scientifiques Max Planck et Albert Einstein ont présenté la définition du photon et ont expliqué l'effet photovoltaïque, qui est la capacité d'un matériau à convertir l'énergie contenue dans le rayonnement solaire en énergie électrique. Cette découverte a permis une compréhension plus approfondie de la technologie photovoltaïque. L'énergie d'un photon est donnée par la relation suivante [8] :

$$E = h \nu = \frac{hc}{\lambda} \quad \text{I. 1}$$

Avec :

ν : fréquence de radiation.

h : constante de Planck ($h=6.62 \cdot 10^{-34} \text{J.s}$).

c : vitesse de la lumière ($c=3 \cdot 10^8 \text{m/s}$).

λ : longueur d'onde du rayonnement.

En 1954, la première cellule solaire au silicium a été développée avec succès par D.M. Chapin, C.S. Fuller et G.L. Pearson, marquant le début de la production d'énergie photovoltaïque. Appliqué pour la première fois aux satellites spatiaux en 1958, il a fallu attendre les années 1970 pour que le photovoltaïque connaisse une croissance rapide en raison d'investissements massifs du gouvernement et de l'industrie pour réduire les coûts de production et permettre des applications terrestres. Cette expansion a conduit à la mise en place d'une réglementation favorisant l'utilisation des énergies renouvelables. [9]

I.3.2. Description

Une cellule photovoltaïque est un dispositif électronique qui convertit l'énergie lumineuse en électricité grâce à l'effet photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semi-conducteurs dopés avec des impuretés pour créer une différence de potentiel électrique. Lorsque la lumière du soleil frappe la surface de la cellule, elle libère des électrons qui créent un courant électrique. Ce courant est collecté par des électrodes et utilisé comme source d'énergie.[5].

I.3.3. Fonctionnement d'une cellule solaire

Le fonctionnement d'une cellule solaire repose sur la conversion photovoltaïque et peut être résumé en trois étapes [10]

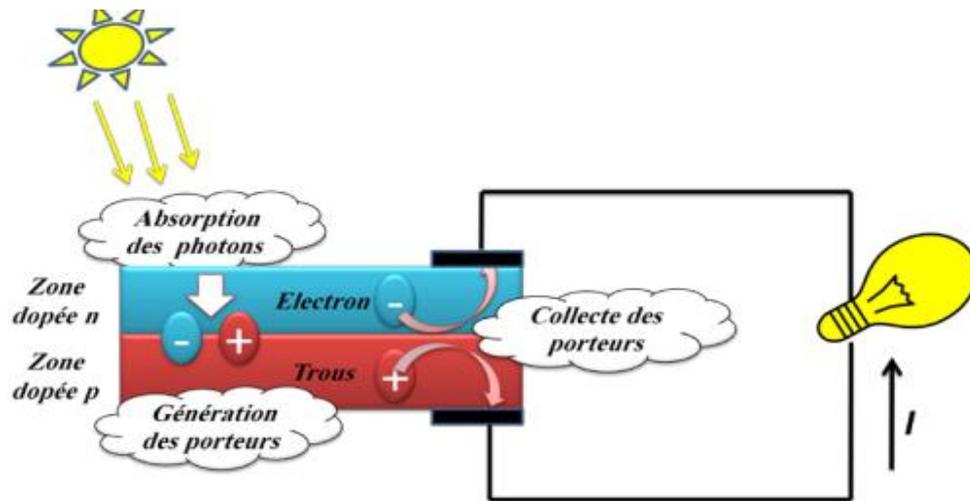


Figure I- 2 : un schéma présente le principe de fonctionnement d'une cellule solaire [11].

a) Absorption de la lumière et création de paires électron-trou

L'absorption de la lumière par le matériau semi-conducteur crée des paires électron-trou. Lorsqu'un photon de lumière est absorbé, il transfère son énergie à un électron du matériau, qui est alors libéré de sa position stable dans la matière et peut se déplacer librement. Cela laisse derrière lui un trou, qui peut être considéré comme une charge positive mobile. Ensemble, l'électron et le trou créent une paire électron-trou qui modifie temporairement la conductivité du matériau. Ces paires électron-trou sont des porteurs de charge qui contribuent à la génération de courant électrique dans la cellule photovoltaïque.[12].

b) Séparation des charges électriques

Lorsque des photons sont absorbés, cela crée des charges électriques qui doivent être séparées pour produire un courant électrique. Cette séparation est rendue possible grâce à la création d'un champ électrique permanent, qui est établi au niveau d'une jonction entre deux semi-conducteurs de types n et p. Cette jonction crée un champ électrique fort et permanent qui entraîne les électrons vers le côté n et les trous vers le côté [13].

c) Collecte des charges électriques

Après leur séparation, les électrons et les trous sont collectés respectivement par les électrodes négative et positive de la cellule photovoltaïque, grâce à des contacts métalliques. Les électrodes sont reliées à un circuit externe, créant ainsi un courant électrique continu qui peut être utilisé pour alimenter des appareils électriques ou être stocké dans des batteries.[14].

I.3.4. Modélisation d'une cellule photovoltaïque

La modélisation précise des cellules photovoltaïques nécessite une compréhension approfondie de la configuration physique et des caractéristiques électriques de chaque élément de la cellule, ainsi qu'un choix judicieux des circuits électriques équivalents. Les cellules photovoltaïques présentent un comportement non linéaire en raison de leurs jonctions semi-conductrices, ce qui nécessite le développement de modèles mathématiques spécifiques pour les représenter de manière précise. Les modèles utilisés pour calculer la tension et le courant du module photovoltaïque peuvent différer en fonction des procédures mathématiques et du nombre de paramètres impliqués. Une modélisation précise est essentielle pour optimiser la performance des cellules photovoltaïques et leur utilisation dans des applications pratiques.[15].

Le modèle à une diode, également appelé modèle simple exponentielle, et le modèle à deux diodes, également appelé modèle double exponentielle, sont les modèles les plus couramment utilisés et le choix dépend de la configuration physique et des caractéristiques électriques de la cellule.[16]

a) Le modèle idéal

C'est le modèle le plus simple pour représenter la cellule solaire. Il ne tient compte que du phénomène de diffusion. Le circuit équivalent de ce modèle est représenté sur la Figure I-6.[17].

Le courant est donné par la relation [18]:

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{qV}{KT}\right) - 1 \right] \quad \text{I. 2}$$

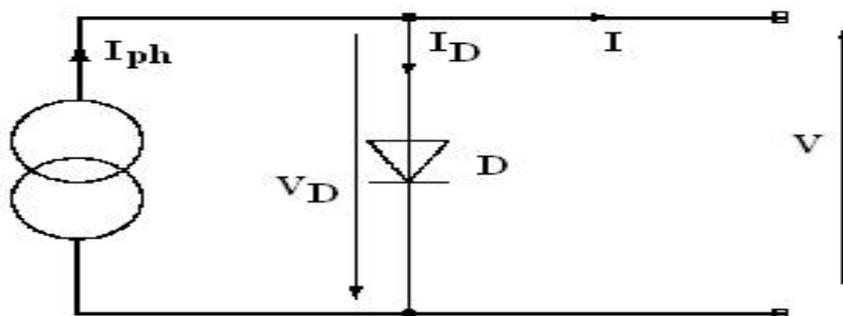


Figure I- 3 : Schéma électrique équivalent d'une cellule solaire idéale. [10]

b) Le modèle réel

Ce modèle est celui d'une cellule solaire réelle (figure 1.5). L'expression de la caractéristique courant -tension sous éclairement s'écrit [19]:

$$I = I_{ph} - I_{01} \left[\exp \left(\frac{I(V+IR_s)}{nKT} \right) - 1 \right] - I_{02} \left[\exp \left(\frac{I(V+IR_s)}{nKT} \right) - 1 \right] - \frac{V+IR_s}{R_{sh}} \quad \text{I- 3}$$

I_{ph} étant le photo courant dû aux photons incidents, les deux termes exponentiels représentent séparément le courant de saturation de diffusion (I_{01}) et le courant de saturation génération recombinaison (I_{02}), respectivement. Le dernier terme de l'équation reflète les pertes par la résistance shunt (R_{sh}), appelé courant de fuite, et par la résistance série (R_s) qui modélise les résistances des différentes couches et contacts que le courant rencontre sur son parcours [20].

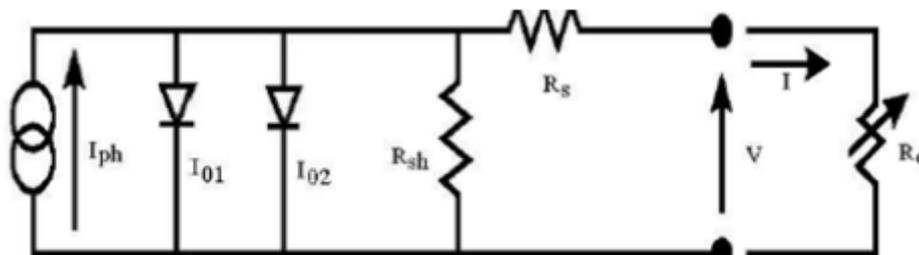


Figure I- 4 : Schéma équivalent d'une cellule solaire réelle [20]

I.3.5. Caractéristique d'une cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque génère de l'électricité sous forme de puissance, qui est le produit de la tension et du courant qu'elle produit. Les valeurs de courant et de tension dépendent des propriétés électriques de la cellule ainsi que de la charge électrique à ses bornes. Les propriétés électriques de la cellule sont représentées par une courbe appelée caractéristique courant-tension (*Figure I- 9*). Cette courbe est unique pour chaque dipôle électrique, y compris la cellule photovoltaïque. Elle permet de déterminer les valeurs de courant et de tension optimaux pour maximiser la puissance générée par la cellule [21].

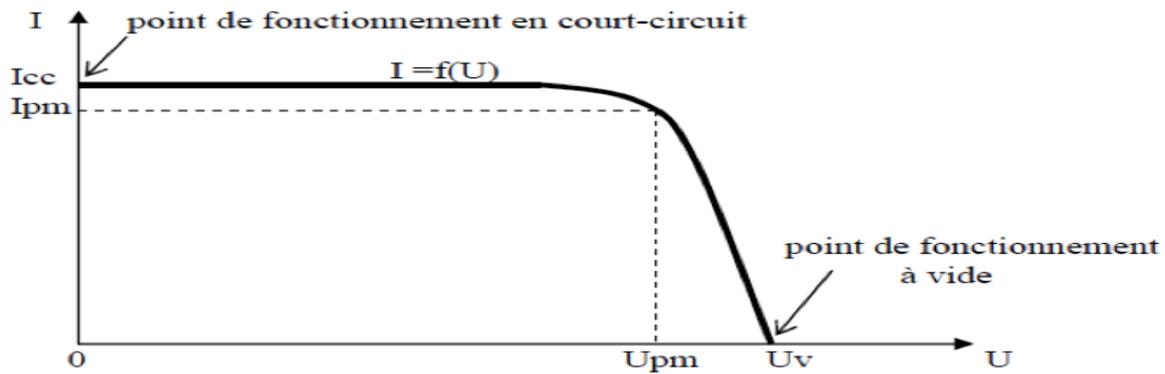
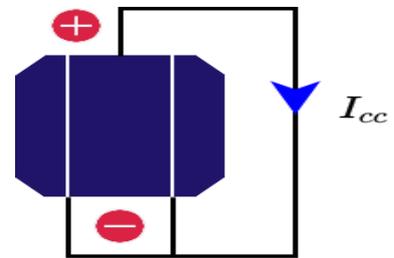


Figure I- 5 : Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque [22]

Voici quelques caractéristiques importantes de la courbe I-V d'une cellule solaire :

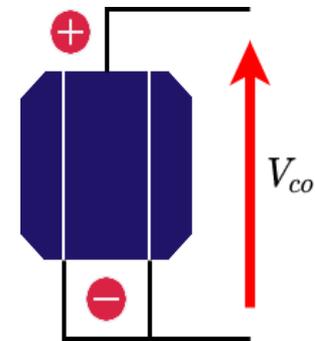
a) Courant de court-circuit I_{cc}

Il s'agit du courant qui traverse la cellule photovoltaïque lorsque celle-ci est court-circuit, c'est-à-dire lorsque le pôle (+) est relié au pôle (-) (la tension A ses bornes est alors nulle). Dans ce cas, la puissance fournie par la cellule $P = V \times I$ est nulle. [23].



b) Tension de circuit ouvert

Il s'agit de la tension aux bornes de la cellule photovoltaïque lorsqu'elle est en circuit ouvert, c'est-à-dire lorsque la borne positive (+) et la borne négative (-) sont électriquement isolées de tout autre circuit électrique (le courant traversant la cellule est alors nul). Dans cette situation, la puissance fournie par la cellule, qui est le produit de la tension et du courant, est nulle car il n'y a pas de courant qui circule à travers la cellule. Ainsi, la formule de la puissance $P = V \times I$ donne une valeur de puissance nulle dans ce cas. [23]



c) Puissance maximale P_{max}

La puissance maximale d'une cellule photovoltaïque sous illumination est un indicateur crucial qui représente le maximum de puissance produite par la cellule. Elle peut être calculée à partir de la courbe courant-tension en trouvant le point où la production de puissance est maximale sur cette courbe comme suit [23] :

$$P_m = I_m \times V_m \quad \text{I. 4}$$

P_m : Puissance mesurée aux bornes de la cellule photovoltaïque en W.

V_m : Tension maximale mesurée aux bornes de la cellule photovoltaïque en V.

I_m : Intensité maximale mesurée aux bornes de la cellule photovoltaïque en A .

d) Facteur de forme FF

Le facteur de forme mesure l'efficacité de la cellule à convertir l'énergie lumineuse en énergie électrique, plus il est proche de 1, plus la cellule est performante [24]

$$FF = \frac{P_m}{I_{cc} \times V_{co}} = \frac{I_m \times V_m}{I_{cc} \times V_{co}} \quad \mathbf{I.5}$$

e) Le rendement η

Le rendement d'une cellule photovoltaïque décrit la quantité d'énergie électrique produite par rapport à la quantité d'énergie lumineuse reçue. Il est généralement exprimé en pourcentage et est obtenu en divisant la puissance maximale délivrée par la cellule par la puissance du rayonnement solaire qui arrive sur la cellule [25] :

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{I_m \times V_m}{S \times G} \quad \mathbf{I.6}$$

Avec :

S : surface de la cellule solaire (m^2)

G : éclairement

I.4. Évolutions des cellules solaires

Le développement de la technologie des cellules solaires vise à produire des cellules solaires peu coûteuses, à haut rendement, stables et de longue durée de vie pour remplacer la production d'énergie à partir de combustibles fossiles. Différentes filières technologiques existent (Figure I- 6), notamment la filière à base de silicium cristallin, la filière des couches minces, la filière des cellules organiques et hybrides, et la filière des cellules solaires à pérovskite. Des recherches sont en cours pour améliorer l'efficacité, la durabilité et la rentabilité des cellules solaires, et pour intégrer la technologie dans l'architecture des bâtiments. Les avancées dans les technologies de stockage de l'énergie permettent également de maximiser l'utilisation de l'énergie solaire produite. [3]

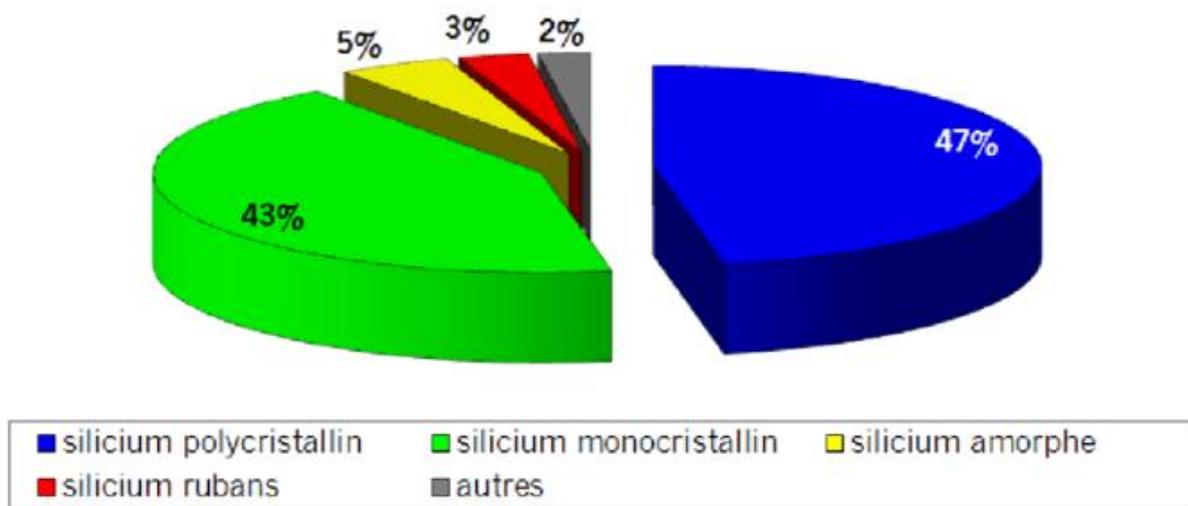


Figure I- 6 :part de marché des différentes technologies solaires

I .4.1. Première génération :

La filière silicium représente aujourd'hui l'essentiel de la production mondiale des panneaux photovoltaïques. Cette filière comporte deux technologies : le silicium monocristallin et le silicium multi cristallin. [26]

a) Le silicium mono cristallin

Le silicium monocristallin offre un rendement élevé, mais sa production est coûteuse car elle nécessite une pureté très élevée et plusieurs étapes de purification délicates. Malgré son rendement supérieur, le coût élevé du silicium monocristallin est un obstacle à son adoption à grande échelle [27],

b) Silicium multi cristallin

Est devenu la technologie la plus utilisée dans l'industrie solaire, représentant près de 50% du marché. Les cellules solaires multi cristallines sont obtenues par coulage de cristaux de silicium, ce qui rend leur structure hétérogène et leur rendement légèrement inférieur à celui des cellules monocristallines, compris entre 10% et 14% selon les fabricants [2].

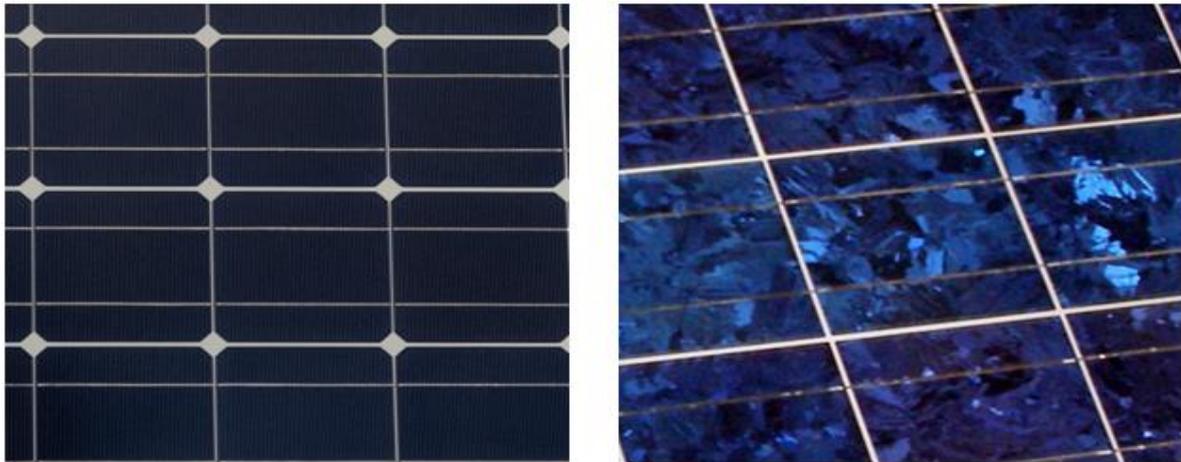


Figure I- 7 : cellules au silicium monocristallin (gauche) et des cellules au silicium polycristallin (droite) [28]

I.4.2. Deuxième génération :

Les cellules solaires à couche mince sont des revêtements qui ont une épaisseur allant de quelques couches atomiques à une dizaine de micromètres. Cette technologie utilise la quantité minimale de matériau photosensible pour absorber l'essentiel du rayonnement solaire, ce qui les rend peu gourmandes en matériaux de fabrication et facilement adaptables aux supports flexibles. Bien que les cellules solaires à couches minces aient des coûts de production plus bas et des rendements élevés, elles ont également des inconvénients tels que l'utilisation de matériaux rares et coûteux comme l'indium, ou hautement toxiques comme le cadmium [29].

Les cellules solaires à couche mince sont utilisées dans plusieurs technologies, telles que le tellure de cadmium (CdTe), le diséléniure de cuivre indium gallium (CIGS), le silicium amorphe à couches minces (a-Si, TF-Si) et les kesterites (CZTSSe) [30].

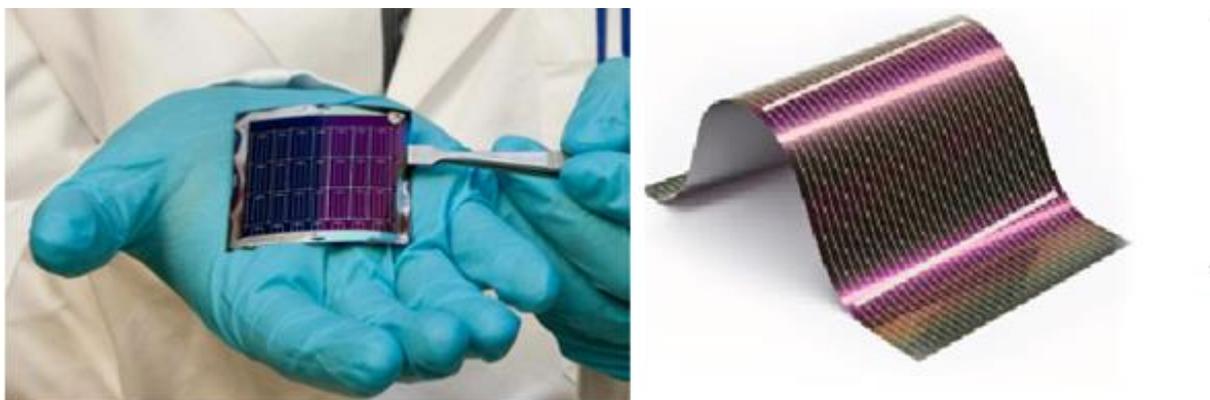


Figure I- 8 : Cellule solaire CZTS (gauche) Cellule sans silicium en couche mince CIS / CIGS (droite) [31]

I.4.3. Troisième génération :

Les cellules solaires de troisième génération sont en cours de développement pour améliorer l'efficacité et la durabilité des cellules solaires. Elles se divisent en plusieurs catégories, notamment les cellules organiques, les cellules à base de pérovskite, les cellules à points quantiques, les cellules à colorant et les cellules à nanotubes de carbone. Les cellules organiques sont légères, flexibles et peu coûteuses à produire, mais ont une faible mobilité des porteurs de charge et une faible durée de vie. Les cellules à base de pérovskite ont un potentiel élevé en termes d'efficacité, mais leur stabilité à long terme reste un défi majeur. Les cellules à points quantiques, à colorant et à nanotubes de carbone sont en cours de développement pour améliorer l'efficacité et la durabilité des cellules solaires [11].

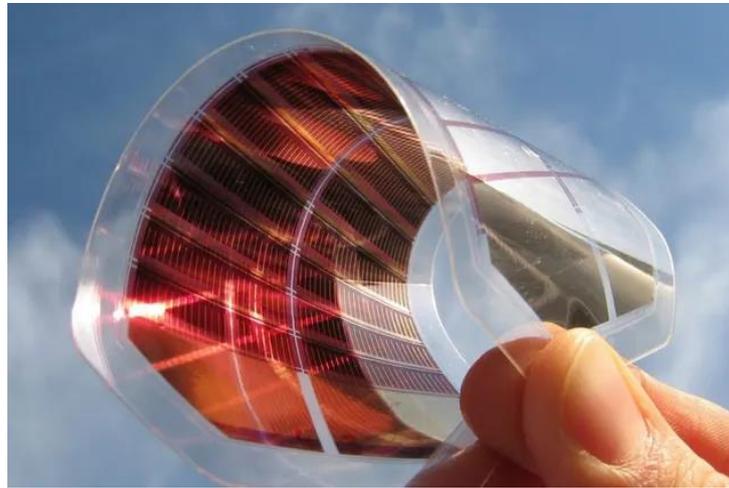


Figure I-9 : cellule à base de pérovskite

Chaque filière photovoltaïque a ses avantages et ses inconvénients en termes de coût, d'efficacité, de durabilité et de flexibilité. Le choix de la filière dépendra des besoins spécifiques du projet, ainsi que des conditions économiques et environnementales locales.

La Figure I-11 : montre l'évolution des rendements record des principales filières photovoltaïques actuelles. On s'aperçoit immédiatement de la multitude de filières de cellules photovoltaïques.

I.5. Les films à base de carbone

I.5.1. Le carbone

Le carbone est présent en abondance sur notre planète et joue un rôle crucial dans notre vie quotidienne et dans les technologies modernes. Il est un élément clé de la structure moléculaire des organismes vivants, des produits chimiques, des médicaments et des produits nutritionnels, qui sont essentiels à notre santé et notre bien-être. De plus, le carbone est l'élément principal de certains matériaux intelligents, comme le DLC, qui possèdent des propriétés particulières.

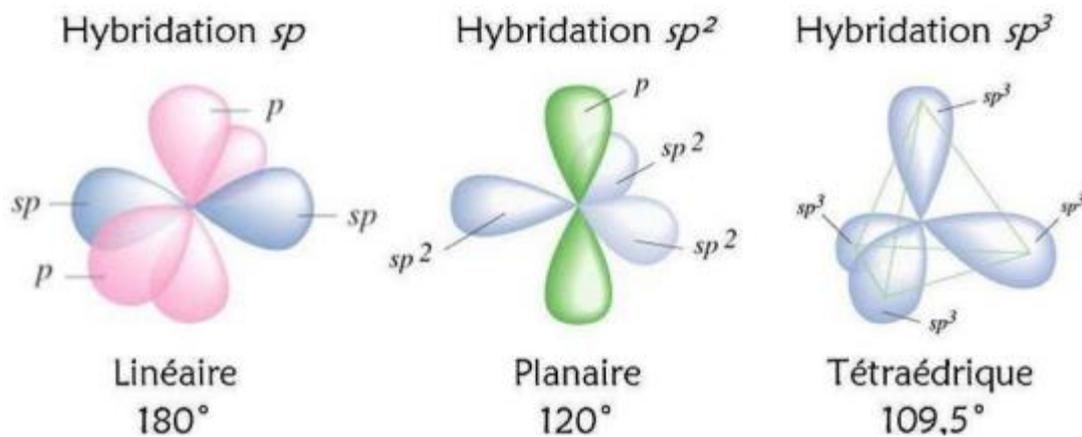


Figure I- 11 : Représentation schématique des hybridations sp et sp^2 et sp^3 du carbone

Effectivement, outre les formes cristallines du carbone telles que le graphite et le diamant, il existe également des formes amorphes, qui sont hautement désordonnées. Ces formes amorphes sont un mélange de sites à trois liaisons de type graphite et à quatre liaisons de type diamant, ce qui leur confère des propriétés intermédiaires entre ces deux formes cristallines [33].

I.5.2. Les formes cristallines de carbone

a) Carbone hybride sp^2 : graphite

Le carbone graphitique est un matériau très conducteur électriquement, composé exclusivement d'atomes de carbone hybridés sp^2 .

Chaque atome de carbone est lié à trois autres atomes de carbone par trois liaisons covalentes σ et une liaison non covalente π , ce qui lui donne sa structure en feuilles hexagonales plates et sa texture douce et feuilletée. Cependant, la faiblesse de la liaison non covalente π explique la faible dureté et le clivage facile du graphite. Ce matériau est utilisé dans diverses

applications, notamment les électrodes de batteries, les lubrifiants, les matériaux composites et les revêtements [34].

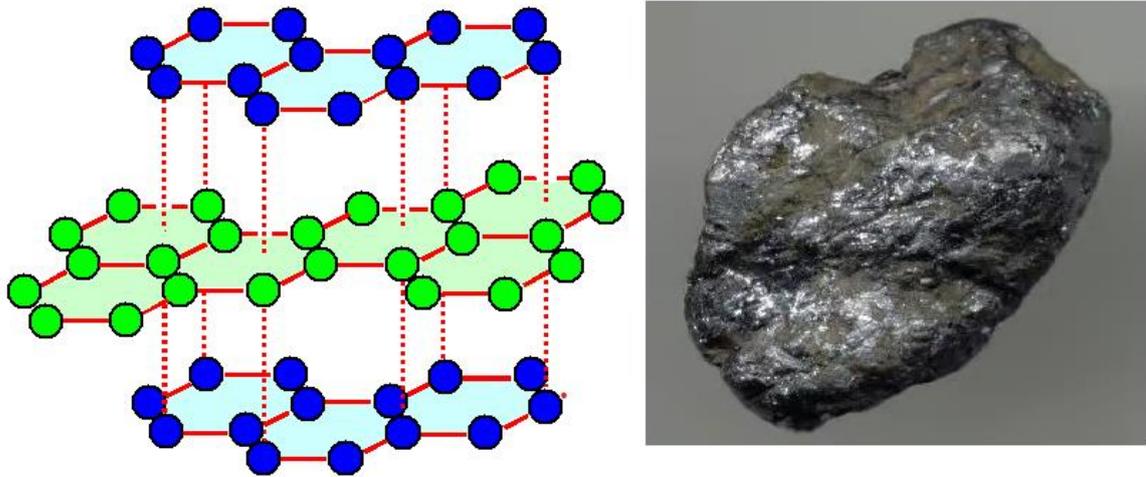


Figure I-12 : La Structure du graphite [35].

b) Carbone hybride sp^3 : diamant

Le diamant est constitué d'un complexe de carbone de type sp^3 , avec une structure cristalline cubique. Chaque atome de carbone est lié à quatre autres atomes de carbone de manière covalente, ce qui lui confère une dureté et une résistance mécanique exceptionnelles. Le diamant est également très inerte chimiquement et a une faible adhérence aux autres solides, ce qui lui donne un faible frottement et une usure limitée. En raison de la mobilité réduite des électrons localisés dans les liaisons, le diamant est un très mauvais conducteur d'électricité, mais un excellent conducteur de chaleur. Ses propriétés uniques en font un matériau précieux pour les applications telles que les outils de coupe, les instruments chirurgicaux et les bijoux [36].

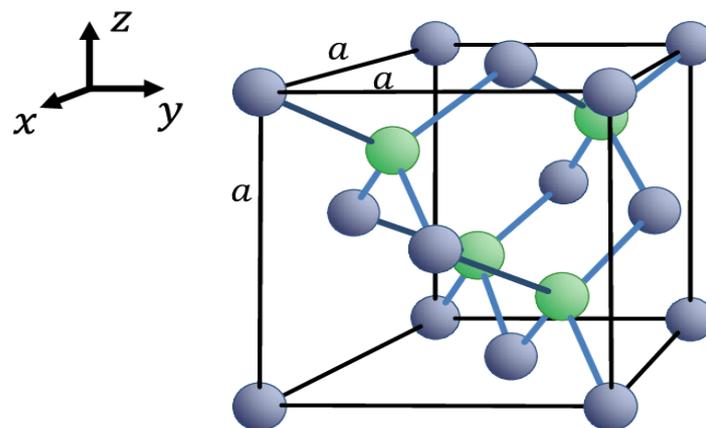


Figure I-13 : La Structure du diamant [37].

I.5.3. La forme amorphe de carbone

a) Carbone type diamant (DLC)

Le carbone de type diamant, également connu sous le nom de DLC ou carbone adamantin, est une forme métastable du carbone amorphe qui contient principalement du carbone hybridé sp^3 . Les DLC sont des semi-conducteurs qui possèdent une grande dureté mécanique, une inertie chimique et une bonne transparence optique, entre autres propriétés uniques [38].

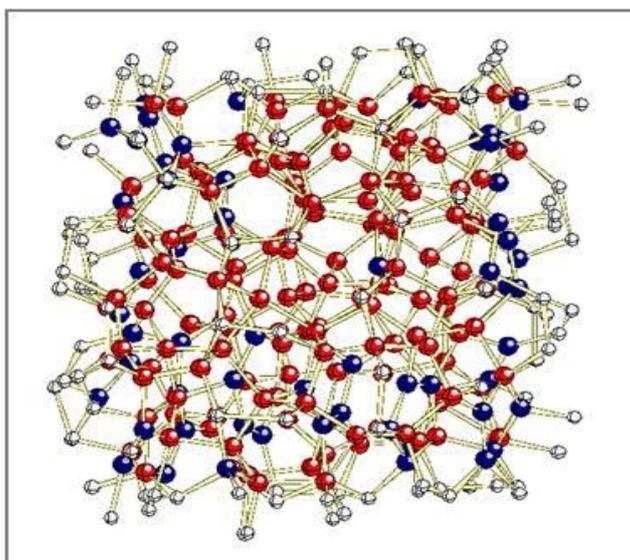


Figure I-14 : Structure de DLC

Effectivement, le DLC est divisé en deux familles principales en fonction de la présence ou de l'absence d'hydrogène : la famille du carbone amorphe hydrogéné et la famille du carbone amorphe non hydrogéné. La figure I.12 illustre les différents types de DLC [39].

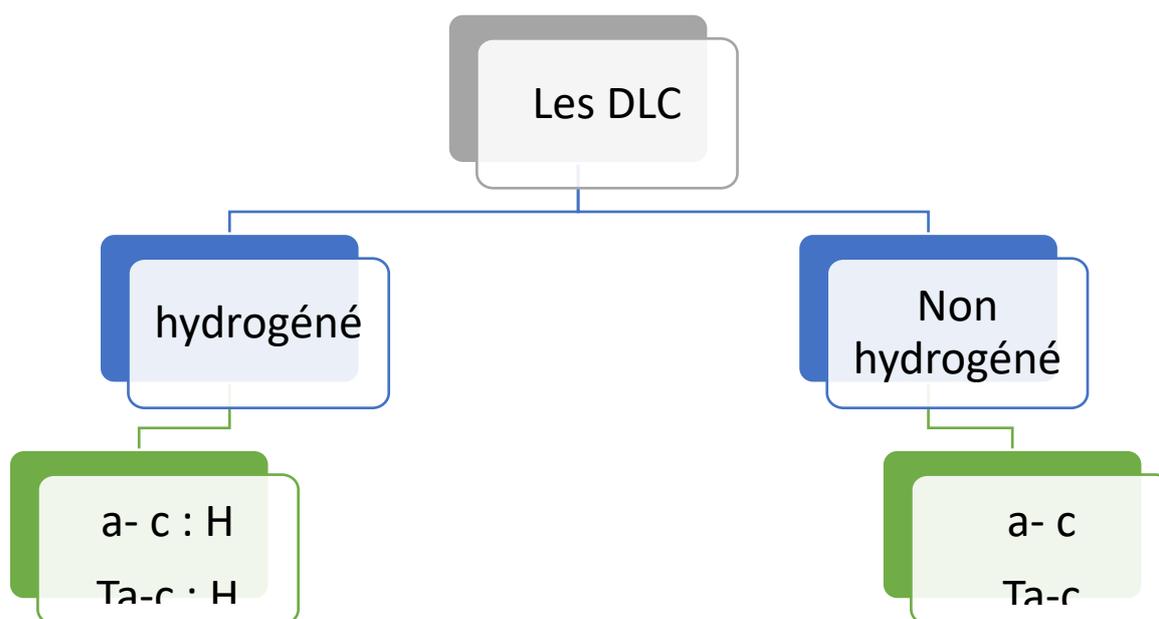


Figure I-15 : Schéma représentatif des deux grandes familles des DLC

Dans la famille des hydrogénés, on distingue deux types de DLC : les a-C:H et les Ta-C:H. Les a-C:H sont des couches de carbone amorphe contenant une proportion importante de carbone graphitique, tandis que les Ta-C:H sont des couches de carbone amorphe contenant une majorité de liaisons sp^3 tétraédral [40].

Dans la famille des non hydrogénés, on trouve également deux types de DLC : les a-C et les Ta-C. Les a-C sont des couches de carbone amorphe contenant une proportion importante de carbone graphitique, tandis que les Ta-C sont des couches de carbone amorphe contenant une proportion supérieure à 70% de liaisons sp^3 tétraédral [41].

b) Propriétés fondamentales des DLC

Les DLC présentent une grande variété de compositions chimiques qui leur confèrent des propriétés différentes, pouvant s'approcher plus ou moins de celles du diamant. En effet, les propriétés des DLC peuvent être modulées en fonction de leur composition, de leur structure et de leur méthode de dépôt [42].

Le tableau I.3 résume les principales propriétés des DLC et du diamant selon leur composition et leur structure [43].

Propriétés Inerte	DLC	Diamant
Structure	Amorphe	Cubique
Stabilités chimique	Inerte	Inerte
Dureté (GPa)	5-80	90-116
116 Coefficient de frottement	0.001-0.7	0.1-1
Optique	Transparence (IR Visible)	Transparence (IR Visible-UV-X)
Résistivités électrique (Ω/cm)	102 -1016	1013
Constante diélectrique	< 4	5.5
Largeur de bande interdite	1.0-4.0 Ev	5.45 Ev

Tableau I-1 : les principales propriétés des DLC et du diamant selon leur composition et leur structure [43].

I.5.4. Les applications de la couche mince de carbone

Les couches minces de carbone trouvent de nombreuses applications dans différents domaines en raison de leurs propriétés uniques, telles que leur résistance à l'usure, leur dureté, leur conductivité électrique et thermique, leur transparence et leur biocompatibilité. Voici quelques exemples d'applications de couches minces de carbone [44][45][46][47] :

- Applications mécaniques et tribologiques : les couches minces de carbone sont largement utilisées pour améliorer la résistance à l'usure et la durabilité de pièces mécaniques, telles que les engrenages, les roulements, les outils de coupe, les revêtements de freins, etc.

- Stockage magnétique de données : les couches minces de carbone sont également utilisées comme revêtements pour les disques durs et les têtes de lecture, en raison de leur dureté, leur résistance à l'usure et leur conductivité électrique.

- Électronique : les couches minces de carbone sont utilisées comme électrodes pour les dispositifs électroniques, tels que les transistors, les diodes, les cellules solaires, les capteurs, etc., en raison de leur conductivité électrique et leur transparence.

- Biologie et médecine : les couches minces de carbone sont également utilisées dans les applications biomédicales, telles que les implants, les revêtements pour prothèses, les équipements d'analyse médicale, etc., en raison de leur biocompatibilité et leur capacité à Encourager la prolifération cellulaire.

- Énergie : les couches minces de carbone sont utilisées dans les cellules solaires pour améliorer leur efficacité de conversion, comme revêtements pour les fenêtres infrarouges, comme électrodes pour les piles à combustible, etc.

Ces exemples montrent que les couches minces de carbone ont des applications diverses et variées dans différents domaines, et Leur usage se généralise grâce aux progrès technologiques.

I.6. Conclusion

En conclusion, ce chapitre nous a permis en premier lieu de donner une description de l'énergie solaire et ces différentes gammes de rayonnement. En second lieu nous avons présenté un aperçu historique sur les cellules solaires et leurs évolutions en décrivant ces différentes filières. Nous avons également souligné l'importance des nanomatériaux et des couches minces de carbone dans l'amélioration de l'efficacité et de la rentabilité de la technologie solaire.

Les références

- [1] W. El-Huni, « Modélisation de cellules solaires multi-tandem bas coût et très haut rendement à base de nitrures des éléments III-V », These de doctorat, Université Paris-Saclay (ComUE), 2016.
- [2] M. Dankassoua, S. Madougou, et A. Aboubacar, « Etude du rayonnement solaire global à Niamey de la période de pré-mousson et de la mousson de l'année 2013 (mai à octobre) », *Rev. Energ. Renouvelables*, vol. 20, n° 1, p. 131-146, 2017.
- [3] A.-A. Kanoun, « Etude théorique et prédictive des nouveaux matériaux pour conception des cellules solaires et applications photovoltaïques. », Thesis, 16-02-2020, 2019.
- [4] R. Dambreville, « Nowcasting and very short term forecasting of the global horizontal irradiance at ground level : application to photovoltaic output forecasting », 2014.
- [5] A. Z. Bouchelaghem, F. Z. Meriai, H. (Encadreur) Haoues, et H. (Co-encadreur) Bouridah, « Étude et simulation d'une cellule photovoltaïque à base de silicium nanocristallin : effet des propriétés électroniques de la couche active. », Thesis, Université de Jijel, 2022.
- [6] H. Zouaoui, « Impact des conditions météorologiques sur le rendement d'un panneau solaire PV », Mémoire de Master, Université Larbi ben M'hidi Oum el Bouaghi, 2020.
- [7] M. B. Z. Nadjoua et M. O. Amina, « Etude d'un Système de production d'énergie photovoltaïque à base d'un CVS Boost. », Mémoire de Master, Université -Ain-Temouchent- Belhadj Bouchaib, 2021.
- [8] Z. E. Jouad, « Réalisation et caractérisation des cellules photovoltaïques organiques », These de doctorat, Université Bretagne Loire, 2017.
- [9] G. M. □ B. Mayar, « Simulation et modélisation d'une cellule photovoltaïque sous Matlab », Thesis, faculté des sciences et de la technologie univ bba, 2022.
- [10] S. CHEBLI et W. FERHATI, « L'effet de la température et de l'éclairement sur la caractéristique électrique I(V) d'une cellule solaire », Mémoire de Master, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, 2021.
- [11] W. Douba, « Élaboration et caractérisation de cellules photovoltaïques à base de silicium multicristallin Si-mc », UNIVERSITÉ DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE HOUARI BOUMEDIENE U.S.T.H.B, 2022.
- [12] G. Meriem et H. Badr, « Etude et Simulation D'une Cellule Photovoltaïque à Pérovskite », Mémoire de Master, Université Larbi Bun M'Hidi O.E.B, 2021.
- [13] E. Bruhat, « Développement de cellules photovoltaïques silicium à homojonction industrialisables à contacts passivés », These de doctorat, L'Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Lyon, 2019.
- [14] J. Bernos, « Elaboration de jonctions tunnel magnétiques et de jonctions métal/oxyde/semi-conducteur pour l'étude du transport et de la précession de spin d'électrons chauds », These de doctorat, Ecole doctorale EMMA U.F.R. Sciences et Technologies, 2010.
- [15] M. AHIRI et M. BOUAB, « Etude de la station photovoltaïque d'AIN SKHOUNA », Mémoire de Master, Université de Saida– Dr. Moulay Tahar, 2022.
- [16] H. Ramzi et G. Fares, « Commande et modélisation de l'énergie photovoltaïque interconnecté au réseau électrique », Mémoire de Master, Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued, 2020.
- [17] kamelia helali, « Modélisation D'une Cellule Photovoltaïque : Etude Comparative », UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU. Consulté le: 1 juin 2023. [En ligne]. Disponible sur:

- <https://www.ummtto.dz/dspace/bitstream/handle/ummtto/607/Helali%20Kamelia.pdf?sequence=1>
- [18] A. HASNAOUI, « Modélisation et Simulation d'une Cellule Solaire Uni-Couche par logiciel ComsolMultiphysics », NIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA, 2018. Consulté le: 1 juin 2023. [En ligne]. Disponible sur: <http://dspace.univ-medea.dz:8080/bitstream/123456789/5723/1/M118132.pdf>
- [19] R. Khezzar et M. Zereg, « Comparaison entre les différents modèles électriques et détermination des paramètres de la caractéristique I-V d'un module photovoltaïque », *Rev. Energ. Renouvelables*, vol. 13, n° 3, p. 379-388, 2010.
- [20] W. C. Benmoussa, « Etude comparative des modèles de la caractéristique courant-tension d'une cellule solaire au silicium monocristallin », *Rev. Energ. Renouvelables ICRES-07 Tlemcen*, p. 301-306, 2007.
- [21] D. Hadjadj, « Etude des Caractéristiques d'un Capteur Solaire Photovoltaïque et Evaluation de ses Performances Sous Différentes Conditions Climatiques. », Mémoire de Master, Université 8Mai 1945 – Guelma, 2022.
- [22] N. Guerd, N. Nouadri, et S. Benkara, « Elaboration et étude des propriétés des couches minces à base d'oxydes semiconducteurs », Université Oum El Bouaghi, 2022.
- [23] Y. Boubaa, « Etude de l'effet des propriétés d'une couche TCO sur le rendement et les caractéristiques d'une cellule solaire à base de GaAs. », UNIVERSITE MOHAMED SEDDIK BEN YAHIA - JIJEL, 2021.
- [24] D. M. Hadjab, P. I. Bouchama, et P. N. Guermat, « Simulation et optimisation des cellules solaires hybrides CH₃NH₃PbI₃/CIGS par le logiciel SCAPS », These de doctorat, NIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, 2021.
- [25] Z. DJESSAS, « EXTRACTION DES PARAMETRES PHYSIQUES D'UNE CELLULE SOLAIRE A DEUX EXPONENTIELS PAR LA METHODE DES ALGORITHMES GENETIQUES », Mémoire de Master, Université Ferhat Abbas–SETIF UFAS (ALGERIE), 2020.
- [26] R. Ahmed, « D'étude d'un Fauteuil Roulant Electrique Adapté par Panneau Solaire », Mémoire de Master, Université Mohamed Khider de Biskra, 2020.
- [27] Z. Said-Bacar, « Elaboration et caractérisations de silicium polycristallin par cristallisation en phase liquide du silicium amorphe », These de doctorat, UNIVERSITE PARISSUD, 2012.
- [28] D. Berrian et S. BOUZAGHOU, « Developpement des modeles mathematiques d'un generateur photovoltaque defectueux », THÈSE DE DOCTORAT, L'Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Lyon, 2015.
- [29] M. A. Slimani, « Cellules solaires pérovskites imprimées et optimisation des couches pérovskites pour les cellules tandems », ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE UNIVERSITÉ DU QUÉBEC, 2019.
- [30] A. R. LATROUS, « Contribution à l'étude des cellules photovoltaïques en couches minces à base de matériaux CZTS », doctoral, Université de Batna 2, 2022.
- [31] D. S. BENMANSOUR, « Etude sur les matériaux Bi₂S₃ et CZTS contribuant à l'obtention de meilleurs rendements photovoltaïques », Mémoire de Master, NIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID - TLEMCEN.
- [32] « National Renewable Energy Laboratory (NREL) Home Page ».
- [33] C. Castro, « Mécanismes de croissance de nanotubes de carbone alignés : relation catalyseur - nanotube », These de doctorat, UNIVERSITE PARIS XI UFR SCIENTIFIQUE D'ORSAY, 2010.
- [34] N. Jha, P. Ramesh, E. Bekyarova, M. E. Itkis, et R. C. Haddon, « High Energy Density Supercapacitor Based on a Hybrid Carbon Nanotube-Reduced Graphite Oxide Architecture », *Adv. Energy Mater.*, vol. 2, n° 4, p. 438-444, avr. 2012.

- [35] Z. U. Khan, A. Kausar, et H. Ullah, « A Review on Composite Papers of Graphene Oxide, Carbon Nanotube, Polymer/GO, and Polymer/CNT: Processing Strategies, Properties, and Relevance », *Polym.-Plast. Technol. Eng.*, vol. 55, n° 6, p. 559-581, avr. 2016.
- [36] M. Matthieu, « Nano-films de Diamond-Like Carbon : Elaboration par pulvérisation cathodique magnétron et caractérisations de l'influence des paramètres de dépôt sur leurs structures et leurs propriétés », These de doctorat, UNIVERSITE GRENOBLE ALPES, 2021.
- [37] M. Bouabdellaoui, « Épitaxie, condensation et gravure des nanostructures Si/Si_{1-x}Ge_x pour des applications photoniques et microélectroniques. », 2018.
- [38] A. Zeng, V. F. Neto, J. J. Gracio, et Q. H. Fan, « Diamond-like carbon (DLC) films as electrochemical electrodes », *Diam. Relat. Mater.*, vol. 43, p. 12-22, mars 2014.
- [39] D. K. Rajak, A. Kumar, A. Behera, et P. L. Menezes, « Diamond-Like Carbon (DLC) Coatings: Classification, Properties, and Applications », *Appl. Sci.*, vol. 11, n° 10, p. 4445, mai 2021.
- [40] N. Vedovotto, « Les couches minces de carbone amorphe hydrogéné : durcissement et traitement antireflet à 10,6µm des optiques de germanium », These de doctorat, Lyon 1, 1988.
- [41] A. PASTOL, « Caracterisation de plasmas de methane : application au depot de couches minces de carbone amorphe hydrogene », These de doctorat, Nantes, 1989.
- [42] A. Ernesto, « Colloidal lubrication of DLC contacts: from steady state to transient state: Application to the piston-rings-cylinder contact », PhD Thesis, Ecole Centrale de Lyon, 2014.
- [43] B. I. ZERAOULA Boutheina, « laboration et caractérisation des couches minces de carbone obtenues par électrodéposition », Mémoire de Master, Université 8 Mai 1945 Guelma, 2021.
- [44] F. Meunier, « Modélisation des mécanismes de croissance des couches minces de carbone dur amorphe obtenues par CVD assistée plasma. Application à la réalisation de revêtements anti-usure multicouches TiN+Ti(C,N)+TiC+carbone », These de doctorat, Limoges, 1996.
- [45] A.-S. Loir *et al.*, « Élaboration de couches minces de carbone par ablation laser femtoseconde pour application aux biomatériaux implantables », *J. Phys. IV Proc.*, vol. 127, p. 193-197, juin 2005.
- [46] A. Lelong, « Élaboration et caractérisation de couches minces nanocomposites cuivre/carbone: application à la dégradation de colorant en solution aqueuse », Université de Picardie Jules Verne.
- [47] J. Tranchant, « Etude de couches minces déposées par pulvérisation magnétron postionisée pour l'ingénierie de contraintes - cas du MoCr et de nano-canaux de carbone », These de doctorat, UNIVERSITÉ DE NANTES.

Chapitre II

Les Méthodes de dépôt et Techniques de Caractérisations

II .1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons passer en revue les différentes méthodes de dépôt de couches minces disponibles, ainsi que les techniques de caractérisation structurale, optique et électrique qui sont utilisées pour évaluer leurs propriétés. Cette compréhension approfondie est essentielle pour saisir les applications potentielles des couches minces dans divers domaines et pour concevoir de nouveaux matériaux et dispositifs qui peuvent bénéficier de ces technologies.

II .2. Différentes techniques de dépôt des couches minces

L'élaboration d'une couche mince est cruciale car les propriétés du matériau dépendent fortement de la méthode de dépôt et des conditions du processus. Les propriétés de la couche mince, comme la texture cristalline, la morphologie de surface, la densité, la conductivité électrique et thermique, la résistance à l'usure et à la corrosion, sont influencées par la composition chimique de la couche, l'épaisseur, le substrat et les méthodes de dépôt. Pour obtenir des performances optimales de la couche mince, il est essentiel de contrôler et d'optimiser les conditions du processus, comme la température et la pression. Une compréhension approfondie des propriétés des matériaux et des méthodes de dépôt est donc nécessaire pour concevoir et élaborer des couches minces avec des propriétés optimales pour différentes applications [1].

Les méthodes d'élaboration peuvent être classées en deux catégories :

- Méthodes physiques.
- Méthodes chimiques.

Le diagramme suivant représente les techniques les plus utilisées de dépôts des couches minces :

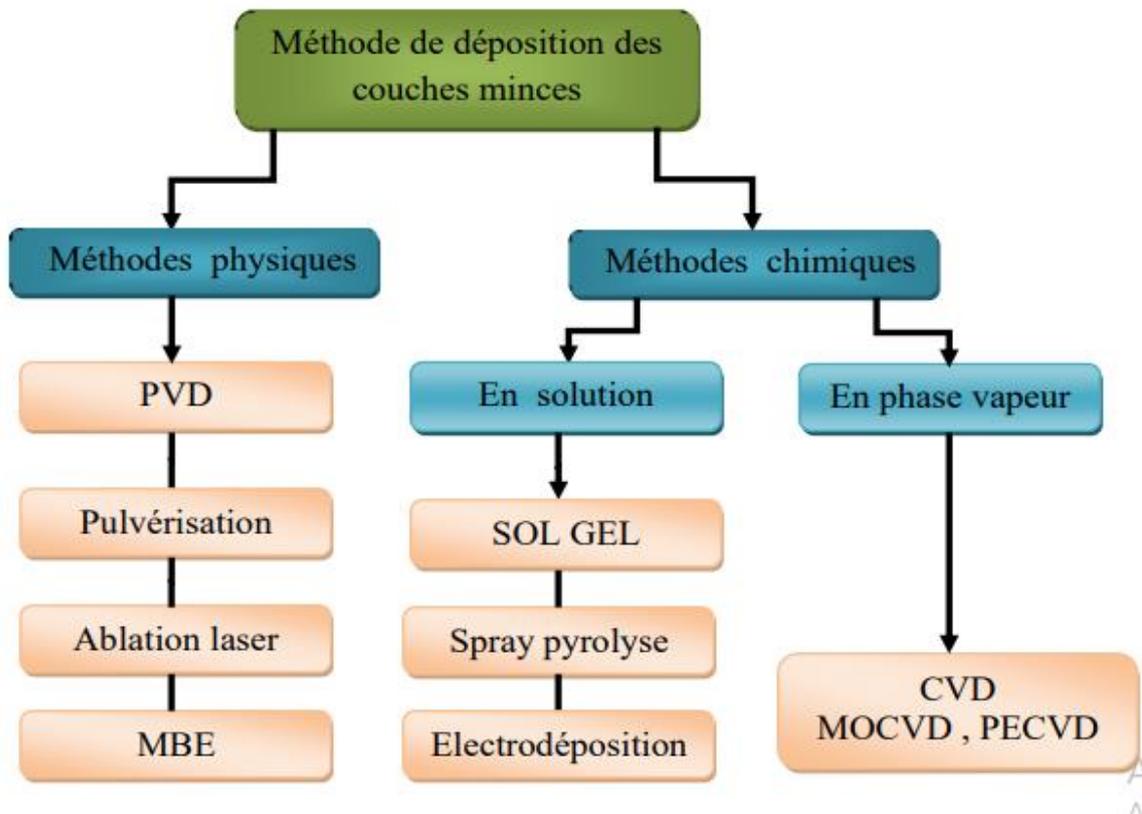


Figure II -1 : Techniques de dépôt des couches minces [2]

II .2.1. Procédé physique

a) La pulvérisation cathodique

Le principe de la pulvérisation cathodique est basé sur la création d'un plasma dans une chambre de vide et l'utilisation de ce plasma pour éjecter des atomes ou des molécules d'un matériau cible et les déposer sur une surface de substrat pour former un revêtement [3].

Le processus de pulvérisation cathodique implique les étapes suivantes [4] :

1. Une chambre de vide est utilisée pour maintenir une pression inférieure à la pression atmosphérique. Cette chambre est remplie d'un gaz inerte, comme l'argon.
2. Une cible métallique est placée dans la chambre de vide. Cette cible est généralement composée du matériau que l'on souhaite déposer sur la surface du substrat.
3. Un courant électrique est appliqué à la cible métallique, qui est utilisée comme cathode. Les ions de gaz inerte frappent la cible et éjectent les atomes ou les molécules du matériau cible.
4. Les atomes ou les molécules éjectés du matériau cible se déplacent dans la chambre de vide et se condensent sur la surface du substrat pour former un revêtement.

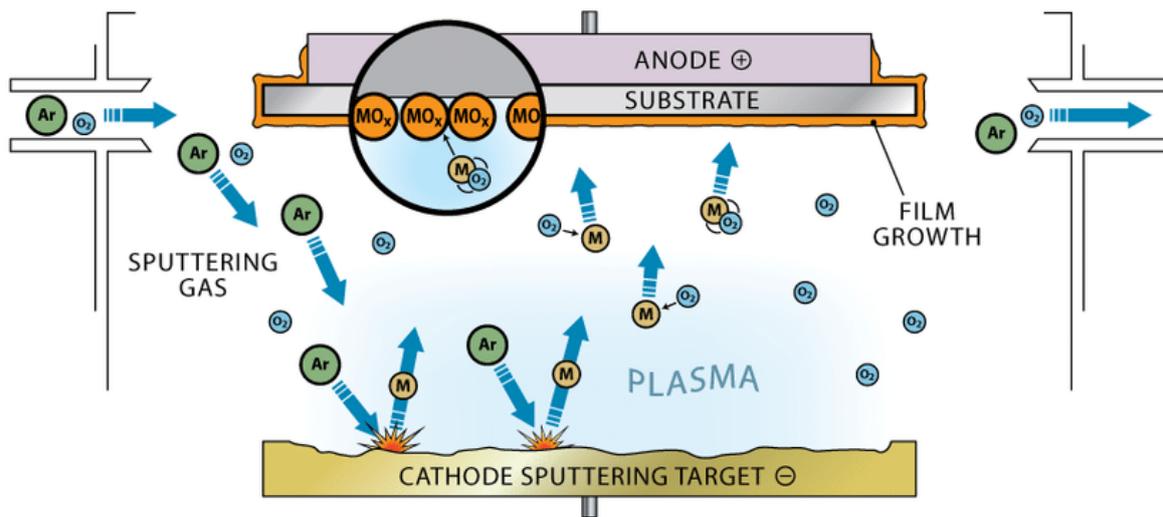


Figure II-2 : Schéma d'un pulvérisateur cathodique [5]

b) L'évaporation sous vide

Le principe de l'évaporation sous vide est basé sur la vaporisation d'un matériau solide dans un environnement sous vide pour former une couche mince sur un substrat. Le processus d'évaporation sous vide implique les étapes suivantes [6] :

1. Le matériau à évaporer est placé dans une enceinte sous vide appelée évaporateur, qui est équipé d'une source de chauffage.
2. La pression dans l'enceinte est réduite à un niveau très bas à l'aide d'une pompe à vide pour éviter la contamination par l'air ambiant.
3. Le matériau est chauffé à une température suffisamment élevée pour qu'il se vaporise.
4. Les molécules de matériau vaporisé se déplacent librement dans l'enceinte sous vide et se déposent sur un substrat froid pour former une couche mince solide.
5. La température du substrat est généralement maintenue à une valeur inférieure à celle du matériau à évaporer pour favoriser la condensation des molécules de matériau vaporisé sur le substrat.

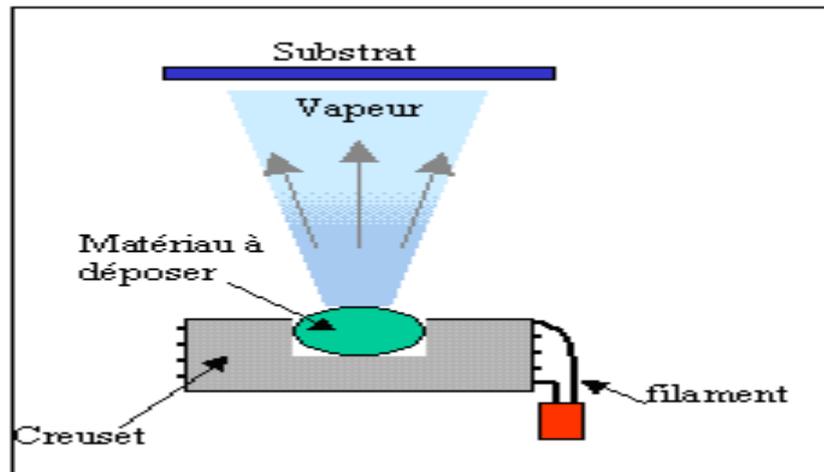


Figure II -3 : Schéma du dispositif d'évaporation thermique [7].

c) Le dépôt par ablation laser

Vous avez parfaitement décrit le principe de la croissance par ablation laser pour le dépôt de couches minces. Je peux compléter en ajoutant que la croissance par ablation laser est une méthode de dépôt en phase vapeur qui est utilisée pour produire des couches minces de matériaux sur un substrat. Le processus de croissance par ablation laser implique les étapes suivantes [8] :

1. Une cible solide est placée dans une chambre de croissance sous vide.
2. Un faisceau laser pulsé est focalisé sur la surface de la cible à l'aide d'une lentille pour produire une vapeur à partir de la matière de la cible.
3. Le plasma formé par l'interaction laser-cible se propage en formant une plume perpendiculaire à la surface de la cible.
4. La matière vaporisée se condense finalement sur le substrat pour former une couche mince solide.

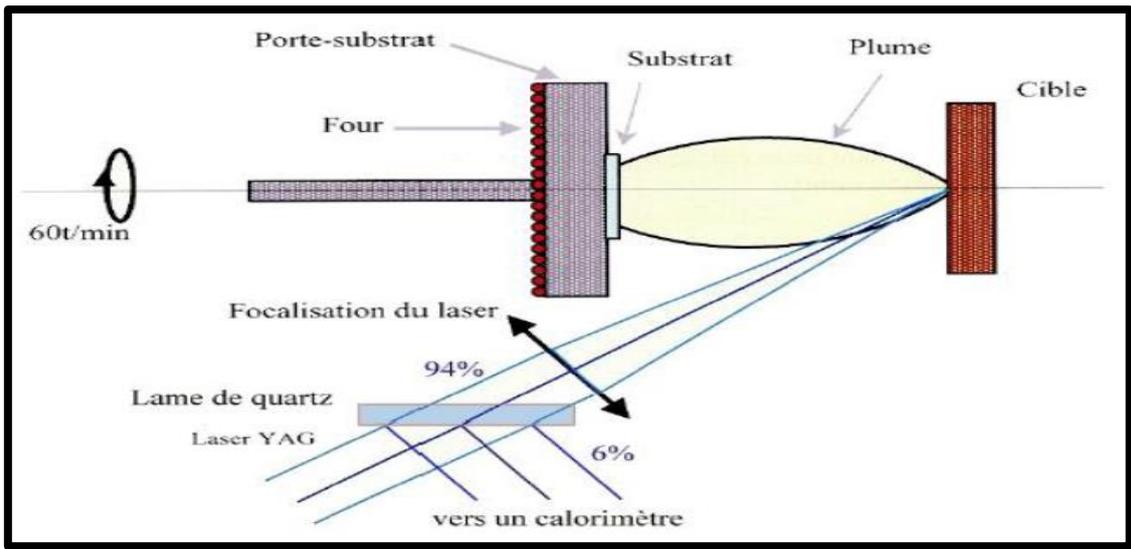


Figure II-4 : Principe de l'ablation laser [9]

II .2.2. Procédé chimique

a) Dépôt chimique en phase vapeur CVD

Le dépôt chimique en phase vapeur (CVD) est un processus de synthèse de matériaux qui implique l'introduction de précurseurs volatils dans une chambre de réaction sous vide. Ces précurseurs réagissent pour former un matériau solide sur la surface d'un substrat chauffé à une température appropriée. Les principes de base du processus CVD sont les suivants [10] :

1. Les précurseurs volatils sont introduits dans une chambre de réaction sous vide.
2. Les précurseurs se décomposent ou subissent une réaction chimique dans la phase vapeur, produisant des espèces réactives.
3. Les espèces réactives se déposent sur la surface d'un substrat chauffé, réagissant ensemble pour former un matériau solide.
4. Le dépôt se poursuit jusqu'à ce que la couche de matériau atteigne l'épaisseur souhaitée.
5. Les gaz résiduels sont évacués de la chambre de réaction et le substrat avec la couche de matériau solide est récupéré.

Les propriétés de la couche de matériau peuvent être contrôlées en ajustant les paramètres du processus CVD, tels que la température du substrat, la pression, les précurseurs utilisés et les gaz porteurs. Le processus CVD est utilisé dans de nombreuses applications, notamment pour

la production de dispositifs électroniques, optiques, céramiques, métalliques et autres applications nécessitant des couches minces uniformes, pures et à faible rugosité de surface [11]

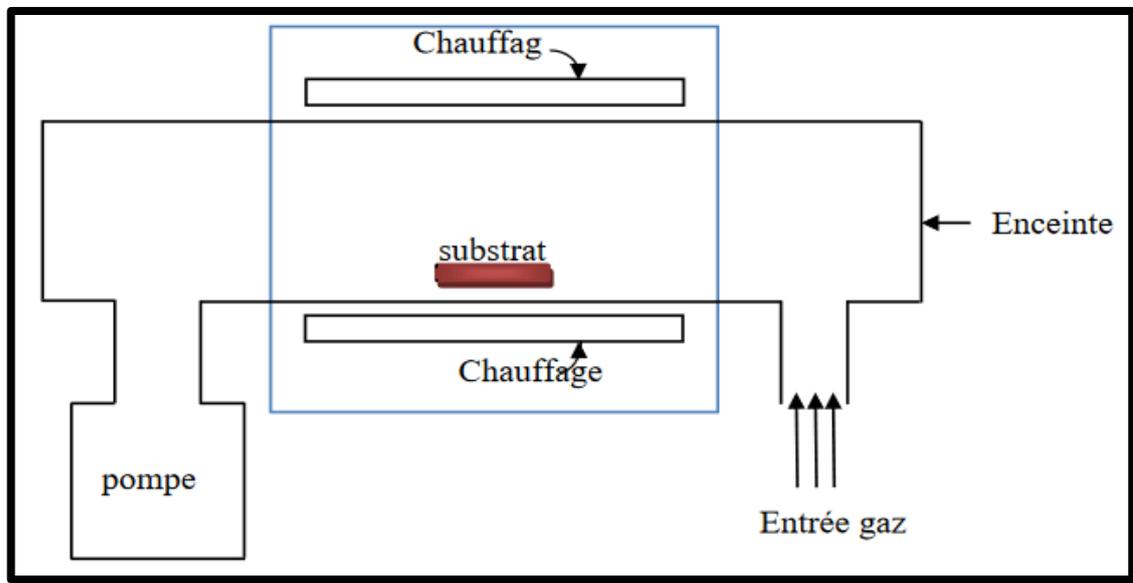


Figure II-5 : Schéma de principe de dépôt en phase vapeur chimique (CVD) [12]

b) Sol-gel

Le procédé Sol-gel repose sur la transformation d'une solution liquide (sol) en un solide inorganique (gel) via une série de réactions chimiques. Les étapes typiques du processus Sol-gel comprennent [13] :

1. La préparation du sol : Des précurseurs moléculaires, tels que des alcoxydes métalliques, sont dissous dans un solvant organique pour former une solution homogène. Cette solution est souvent appelée sol.

2. La gélification : La solution est traitée pour initier la réaction de polymérisation des précurseurs et former un réseau tridimensionnel. Cette réaction peut être initiée par la chaleur, la lumière, les acides ou les bases selon le type de précurseur.

3. La maturation : Les réseaux tridimensionnels nouvellement formés sont maintenus dans des conditions spécifiques pour permettre une maturation complète. Cette étape est importante pour assurer une structure solide et homogène.

4. Le séchage : Le sol-gel est ensuite séché pour éliminer le solvant organique et produire un solide inorganique.

5. La calcination : Le solide inorganique est souvent chauffé à des températures élevées pour éliminer les résidus organiques et renforcer la structure. Cette étape peut être effectuée sous atmosphère contrôlée ou sous vide.

Le processus Sol-gel offre une grande flexibilité pour la conception de matériaux, car il permet de contrôler la composition chimique, la morphologie et la taille des particules. Cette méthode est utilisée dans de nombreuses applications, telles que la production de revêtements, de céramiques, de verres, de matériaux pour la production d'énergie solaire et pour la médecine régénérative [14].

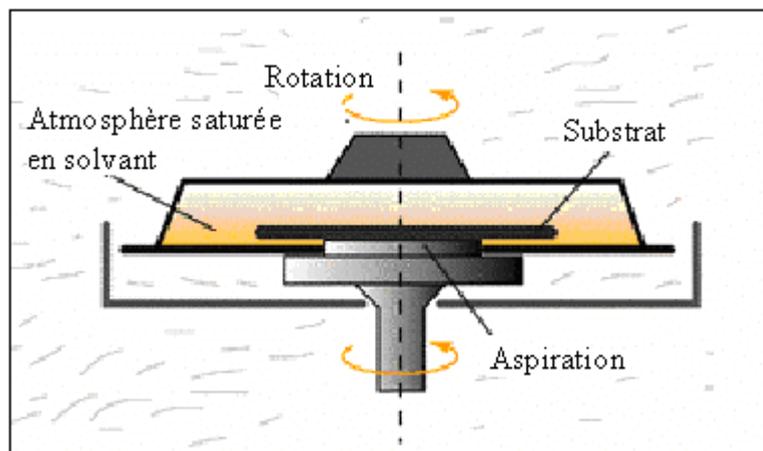


Figure II-6 : Dispositif expérimental de dépôt par sol-gel [15]

II .3. Techniques de Caractérisations

II .3.1. Caractérisation structurale

a) Diffraction de rayon X(DRX)

La diffraction des rayons X est une technique puissante pour l'analyse de la structure des matériaux solides, qu'ils soient cristallins ou amorphes. Elle permet d'identifier les phases, l'orientation du cristal, la composition des couches minces et plusieurs paramètres structuraux tels que la cristallinité, la taille moyenne des grains, la tension et les défauts des cristaux. [16].

Lorsqu'un rayon X interagit avec la matière, il peut donner naissance à plusieurs phénomènes, notamment ceux mentionnés dans la question [17] :

1. Absorption : Lorsqu'un rayon X est absorbé par la matière, il transfère de l'énergie aux atomes. Cette énergie est ensuite transformée en chaleur, ce qui peut causer des modifications dans les propriétés du matériau.

2. Transmission : Certains rayons X traversent le matériau sans subir d'interaction significative avec les atomes. Ces rayons peuvent être utilisés pour produire des images, par exemple en radiographie ou en tomographie.
3. Fluorescence : Lorsqu'un rayon X interagit avec un atome, il peut provoquer l'émission d'un rayonnement, généralement de plus basse énergie que le rayon X incident. Cette émission de rayonnement est appelée fluorescence et peut être utilisée pour l'analyse chimique ou pour produire des images.
4. Diffusion : Lorsqu'un rayon X interagit avec un atome, il peut être diffusé, c'est-à-dire qu'il change de direction. Il existe deux types de diffusion : la diffusion élastique de Rayleigh, où le rayon X est diffusé sans perdre d'énergie, et la diffusion inélastique de Compton, où le rayon X perd de l'énergie lorsqu'il est diffusé.

Lorsqu'un faisceau de rayons X heurte un cristal, il peut être diffracté selon des angles spécifiques. Les interférences entre les ondes diffractées par les plans cristallins du matériau peuvent être soit constructives, soit destructives, en fonction de l'angle de diffraction et de la longueur d'onde des rayons X.

La loi de Bragg énonce que les interférences seront constructives lorsque la différence de marche δ entre les ondes diffractées par deux plans cristallins sera un multiple entier de la longueur d'onde λ des rayons X. Cette loi est exprimée par l'équation de Bragg, qui est donnée par :

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad \text{II-1}$$

Où d est la distance entre les plans cristallins, θ est l'angle de diffraction, n est un entier (1, 2, 3, ...) et λ est la longueur d'onde des rayons X. (figure II-7. B)

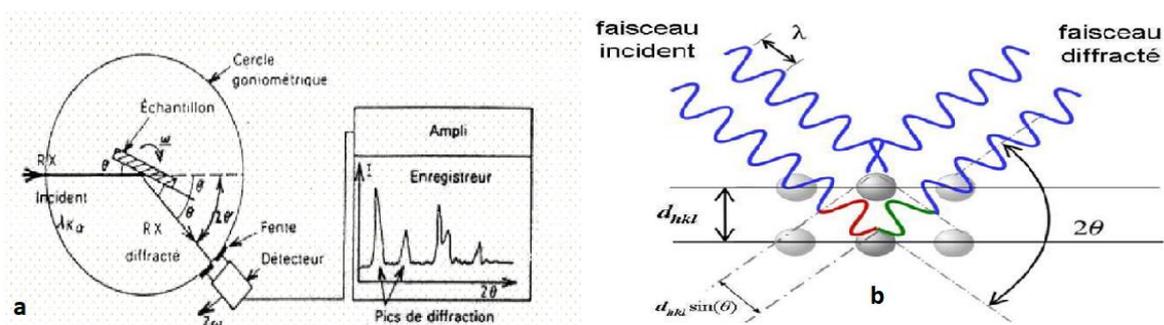


Figure II-7 : a : Schéma de fonctionnement d'un diffractomètre de rayons X. b : Principe de la diffraction de rayons X (DRX) par un réseau cristallin.

Les pics de diffraction (figure II-7. a) correspondant aux directions dans lesquelles les interférences sont constructives sont observés lors de l'analyse de la diffraction des rayons X sur un cristal. Ces pics de diffraction fournissent des informations sur la structure cristalline du matériau, notamment sur la distance interatomique et l'orientation des plans cristallins, ce qui permet d'identifier la phase cristalline du matériau [18].

b) La microscopie électronique à balayage (MEB)

La microscopie électronique à balayage (MEB) est une technique de microscopie qui utilise un faisceau d'électrons pour produire des images de haute résolution de la surface d'un échantillon. Cette technique permet d'obtenir des images à des échelles de l'ordre du nanomètre, ce qui permet une observation détaillée de la topographie, de la morphologie, de la composition et de la structure des échantillons [19].

Le MEB fonctionne en envoyant un faisceau d'électrons sur la surface de l'échantillon, ce qui provoque l'émission de différents types de signaux, tels que des électrons rétrodiffusés, des électrons secondaires et des rayons X caractéristiques. Ces signaux sont collectés par des détecteurs et utilisés pour créer une image de la surface de l'échantillon [20].

Le MEB peut être utilisé pour analyser une grande variété d'échantillons, tels que des matériaux, des cellules biologiques, des tissus, des minéraux et des métaux. Cette technique peut également être utilisée pour étudier des échantillons en 3D en utilisant des techniques de tomographie électronique à balayage [21].

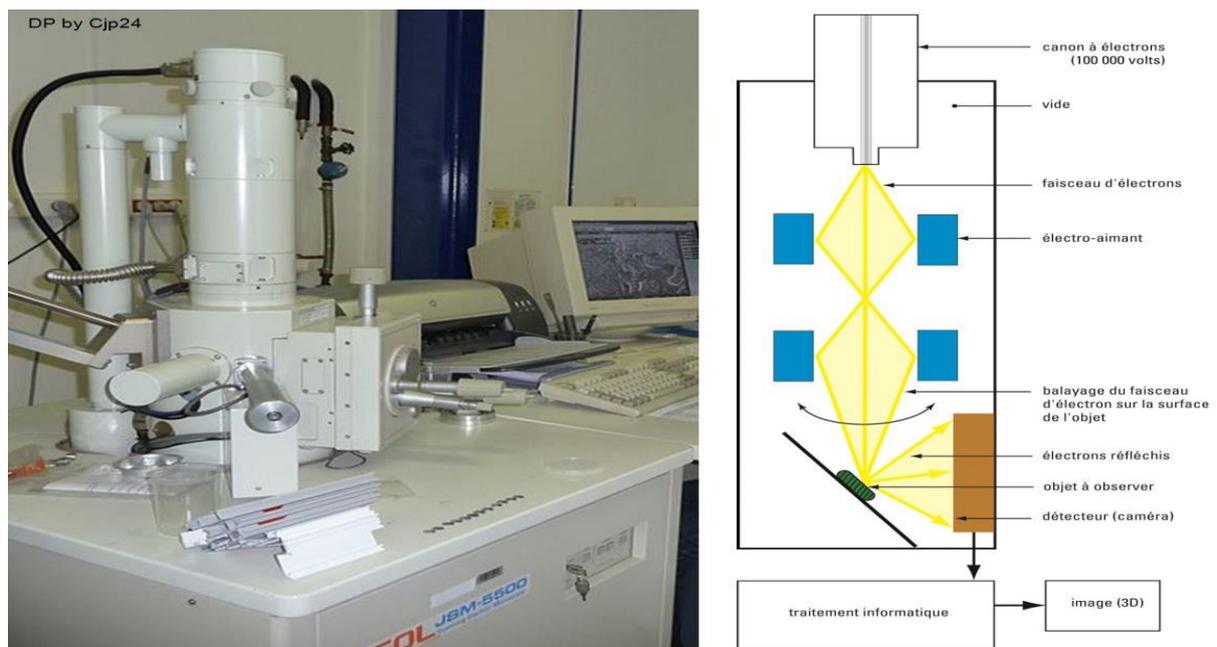


Figure II-8 : Microscopie Electronique à Balayage

II .3.2. Caractérisations optiques

a) La spectrophotométrie UV-Visible

La spectrophotométrie UV-Visible est une technique de spectroscopie qui utilise des photons dans la gamme de l'ultraviolet (UV) et du visible pour mesurer l'absorption ou la réflectance des échantillons. Cette technique permet d'étudier les transitions électroniques des molécules, des ions ou des complexes, qui se produisent lorsque ces substances absorbent la lumière dans cette plage de longueurs d'onde [22].

Le spectre électronique obtenu par spectrophotométrie UV-Visible représente l'intensité lumineuse absorbée en fonction de la longueur d'onde. Il peut être présenté sous la forme d'une courbe d'absorbance ou du coefficient d'extinction molaire en fonction de la longueur d'onde [23].

b) La spectroscopie d'absorption optique

La spectroscopie d'absorption optique mesure l'absorption de la lumière par un échantillon en fonction de sa longueur d'onde. Elle est largement utilisée dans de nombreux domaines tels que la chimie, la biochimie, la médecine, l'industrie pharmaceutique, l'environnement et la science des matériaux. Pour les couches minces, cette technique permet de caractériser leurs propriétés optiques, notamment l'indice de réfraction, l'épaisseur, la rugosité et la composition. Les spectres d'absorption obtenus dépendent de la composition et de la structure de la couche mince. La spectroscopie d'absorption optique est rapide, précise et non destructive, et peut être réalisée avec différentes configurations expérimentales telles que la transmission, la réflexion ou l'absorption totale de la lumière [24].

II .3.3. Caractérisations électriques

a) La spectroscopie d'impédance électrique

La spectroscopie d'impédance électrique est une méthode de caractérisation électrique qui analyse la réponse électrique d'un matériau à différentes fréquences. Elle permet de mesurer la résistivité, la permittivité et la conductivité ionique des matériaux. Cette méthode utilise un circuit électrique à deux ou trois électrodes pour appliquer une tension alternative à l'échantillon et mesurer sa réponse électrique. La spectroscopie d'impédance électrique est une technique non destructive qui peut être utilisée pour caractériser une grande variété de matériaux, tels que les métaux, les semi-conducteurs, les polymères, les céramiques et les électrolytes. Elle est couramment utilisée dans les domaines de la science des matériaux, de la chimie, de la physique

et de l'électronique pour optimiser les performances des dispositifs électroniques basés sur ces matériaux [25].

b) La mesure de la résistivité électrique

La mesure de la résistivité électrique d'une électrode peut être effectuée par différentes méthodes, telles que [26] :

La méthode des 4 points et la méthode de Van der Pauw sont des techniques qui permettent de déterminer la résistivité d'un matériau avec une grande précision, en minimisant les erreurs de mesure. La méthode des 4 points utilise quatre électrodes disposées en deux paires pour minimiser les effets des résistances de contact et de la résistance interne de l'échantillon, tandis que la méthode de Van der Pauw utilise une plaque mince et quatre électrodes pour éliminer les effets de la forme et de la taille de l'échantillon.

La mesure de l'effet Hall est une technique de mesure de la conductivité électrique et de la mobilité des porteurs de charge dans un matériau, tels que les électrons ou les trous. La technique utilise un champ magnétique appliqué à l'échantillon et mesure la différence de potentiel induite par l'effet Hall, qui est proportionnelle à la densité de courant et au champ magnétique appliqué. Cette méthode est utilisée pour caractériser les propriétés électriques des semi-conducteurs et des métaux, et pour mesurer la densité de porteurs de charge dans les matériaux.

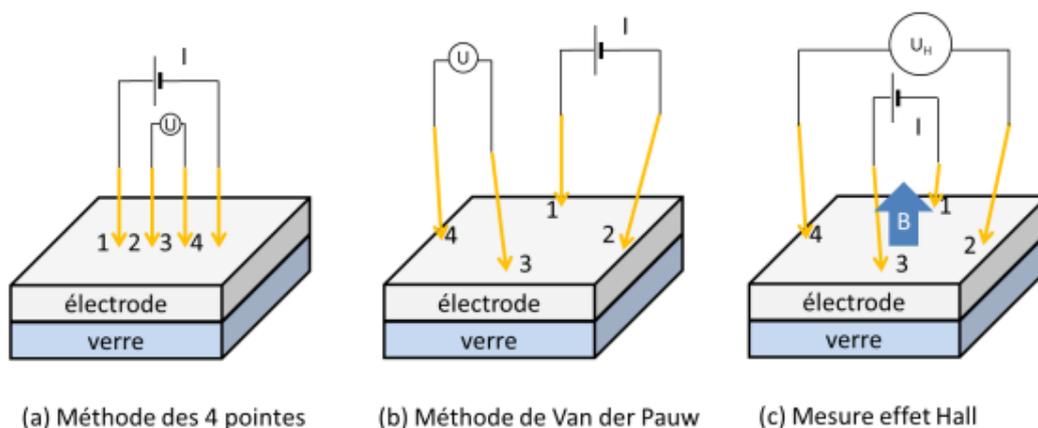


Figure II-9 : Mesure de la résistivité d'une électrode par la méthode des 4 pointes (a) ou la méthode de Van der Pauw (b). Mesure effet Hall (c).[26]

II .4. Conclusion

En conclusion, ce chapitre souligne l'importance de la compréhension des méthodes de dépôt de couches minces et des techniques de caractérisation structurale, optique et électrique. La sélection de la méthode de dépôt la plus appropriée dépend des propriétés du matériau, de la qualité requise du film mince et de la complexité du dispositif à fabriquer. De plus, les techniques de caractérisation structurale, optique et électrique sont essentielles pour évaluer les propriétés des films minces, assurant ainsi la qualité et les performances des dispositifs fabriqués.

Les références

- [1] K. Rahmouni, « Etude structurale, mécanique et tribologique de multicouches de Zr-N/TaN pour des applications biomédicales », These de doctorat, Paris, HESAM, 2022.
- [2] L. SAUZE, « Élaboration et caractérisation de couches minces de LiNbO₃ obtenues par pulvérisation cathodique et ablation laser pulsée. », These de doctorat, Thèse de doctorat. Université Polytechnique Hauts-de-France., 2022.
- [3] Y. Yang, Y. Zhang, et M. Yan, « A review on the preparation of thin-film YSZ electrolyte of SOFCs by magnetron sputtering technology », *Separation and Purification Technology*, vol. 298, p. 121627, oct. 2022.
- [4] F. BARTOLI, « Croissance de films minces piézoélectriques de ScxAl_{1-x}N par pulvérisation cathodique pour la réalisation de dispositifs à ondes élastiques confinées, destinés à des applications haute-température. », THÈSE DE DOCTORAT, t. CentraleSupélec., 2019.
- [5] m YAZLI, « Pulvérisation cathodique et caractérisation des couches minces TiO_x déposées sur verre plat MFG (Doctoral dissertation », Ecole Nationale Supérieure des Mines et de la Métallurgie. Amar Laskri. Annaba)., 2021.
- [6] Sarra. MEDDAD, « Effet de la température de recuit sur les propriétés Physiques des couches minces ZnO-Mg-Ag réalisées par évaporation thermique sous vide. », These de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines et de la Métallurgie. Amar Laskri. Annaba., 2020.
- [7] Labidi Herissi, « Élaboration par pulvérisation pyrolytique et caractérisation de couches minces semiconductrices et transparentes d'oxyde de zinc : Perfectionnement du système de dépôt », 2008.
- [8] A.-S. Loir *et al.*, « Élaboration de couches minces de carbone par ablation laser femtoseconde pour application aux biomatériaux implantables », *Journal de Physique IV (Proceedings)*, vol. 127, p. 193-197, juin 2005.
- [9] N. Jaber, « Combinatorial thin films of BiFeO₃-GaFeO₃ grown by pulsed laser deposition : structural, piezoelectric and ferroelectric properties », These de doctorat, université François – Rabelais de Tours, 2015.
- [10] P. Fenetaud, « Dépôt CVD sur fil SiC chauffé par micro-ondes à partir de précurseurs non halogénés pour application aéronautique », These de doctorat, Bordeaux, 2022.
- [11] S. LAÂLOUCHE, « Élaboration et caractérisation physico-chimique des couches minces de ZnO: Sn élaborées par spray ultrasonique. », UNIVERSITE Mohamed Khider Biskra, 2020.
- [12] O. BERKANI, « et GUEMINI, Rebai. Etude comparative de deux methodes d'élaboration de couches minces. », Mémoire de Master, niversité larbi ben M'hidi Oum el Bouaghi, 2020.
- [13] B. WARDA, « Synthèse et Caractérisation physicochimiques De la pérovskite LaAlO₃. », These de doctorat, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA., 2020.

- [14] I. Azzouz, « Elaboration de revêtements et substituts osseux à base de verres bioactifs : Caractérisation physico-chimique, mécanique et tribologique », These de doctorat, Reims, 2022.
- [15] Abdelkader Hafdallah, « Étude du Dopage des Couches Minces de ZnO Élaborées par Spray Ultrasonique », Magister, UNIVERSITE MENTOURI-CONSTANTIN, 2007.
- [16] Mabrouk. BOURENNANE, « Les techniques de la DRX utilisées dans la caractérisation des structures cristallines. », Mémoire de Master, UNIVERSITE Mohamed Khider Biskra, 2019.
- [17] M. Allain, « Études structurales par diffraction des rayons X appliquées à des cages supramoléculaires et à des conducteurs moléculaires », Doctoral dissertation, Université de Rennes, 2022.
- [18] F. Lauraux, « Etudes nano-mécaniques in situ de nanostructures métalliques utilisant le rayonnement synchrotron », These de doctorat, Aix-Marseille, 2020.
- [19] S. Abbad, « Etude de l'effet du dopage et des parametres de synthese de poudres nanocristallines de tio2 preparees par sol-gel sur les proprietes physiques et photocatalytiques », These de doctorat, Angers, 2022.
- [20] P. Doumalin, « Microextensométrie locale par corrélation d'images numériques. Application aux études micromécaniques par microscopie électronique à balayage. », phdthesis, Ecole Polytechnique X, 2000.
- [21] A. Delvallée, « Métrologie dimensionnelle de nanoparticules mesurées par AFM et par MEB », phdthesis, ENSTA ParisTech, 2014.
- [22] MERIKHI Chahinez, « Etude de la stabilité et validation d'une méthode de dosage du phloroglucinol et Kétoprofène par UV-visible. », These de doctorat, université de jijel., 2022.
- [23] J. Piard, A. Brion, R. Perrin, L. Shi, C. Doré, et G. Clavier, « Utilisation d'un tampon universel pour l'étude d'indicateurs colorés acido-basiques (par spectrophotométrie UV-visible) », 2019.
- [24] Z. Zhou, « Optical and Electrical Properties of Two-Dimensional Materials », These de doctorat, Université de Lorraine, 2021.
- [25] P. Bonin, « Analyse par spectroscopie d'impédance électrochimique en température de l'effet barrière et de la mobilité moléculaire lors du cloquage de tôles prélaquées », phd, 2022.
- [26] Y. Murat, « Nouvelles structures électroluminescentes organiques pour applications signalétiques et petits afficheurs », phdthesis, Université de Bordeaux, 2017.

Chapitre III

Procédure et résultats expérimentaux

III.1. Introduction

Le but de notre travail est de réaliser un dépôt de couche mince de carbone sur une cellule solaire et caractériser ce dépôt.

Le carbone tel que nous l'avons décrit dans le chapitre I possède des caractéristiques mécaniques, électriques et optiques très intéressantes, ce qui rend les revêtements à base de carbone très utilisés dans l'industrie, présentant une solution technologique pour applications mécaniques et tribologiques permettant de limiter les frottements à la surface et de réduire les corrosions. En fait, sa haute résistance à l'usure et sa dureté élevée donnent à la cellule solaire revêtue une durée de vie rallongée (On peut trouver cette application sur tous les types de pièces d'usure en mécanique).

Aussi ce type de revêtement sur une cellule solaire forme une couche protectrice contre la corrosion, et permet aussi de répondre à des problèmes d'adhésion sur sa surface.

Quant aux propriétés optiques de carbone, elles rapportent à la couche de revêtement à la fois la transparence aux rayonnements incidents, mais aussi augmentent d'avantage le piégeage du rayonnement à la surface augmentant ainsi le rendement de la cellule solaire.

Dans cette partie du chapitre nous décrivons la procédure expérimentale pour réaliser le dépôt de couches minces de carbone sur un substrat en verre pour permettre la caractérisation de la couche ainsi déposée.

III.2. Procédure expérimentale

Nous avons préparé nous-même la poudre de carbone utilisée dans la préparation des échantillons.

Nous avons choisi trois sources différentes de carbone :

- Un bâtonnet de graphite pur.
- Du graphène synthétique commercial.
- Une source naturelle de carbone obtenue à partir de plantes naturelles d'olea europeae

Pour chaque source de carbone, nous avons utilisé la méthode de broyage mécanique suivi d'un système de filtrage adapté pour obtenir une très fine poudre volatile pour répondre aux exigences souhaitées.

Ensuite nous avons mélangé la poudre de carbone ainsi obtenue à un polymère fluide et transparent pour permettre un revêtement parfait sur des lamelles de verre, pour former ainsi nos échantillons.

Nous avons choisi plusieurs concentrations de carbone pour chaque source utilisée.

III.3. Préparation des échantillons

Pour commencer, il faut bien choisir le substrat, c'est à dire vérifier l'état de la surface du substrat, qui ne doit présenter aucune rayure, ni défaut de planéité.

La préparation des substrats, dans notre cas le substrat est en verre, est essentielle pour permettre l'élaboration de couches minces de bonne qualité. Leur nettoyage est donc une étape très importante car la moindre impureté peut engendrer les craquelures et la formation de fissures dans les couches déposées : il faut éliminer toute trace de graisse et de poussière.

Avant de commencer l'expérience, nous avons lavé la verrerie utilisée avec de l'eau savonneuse afin d'éliminer la présence de toutes impuretés. Nous l'avons rincé avec de l'eau distillée, ensuite avec de l'acétone puis une deuxième fois rincée avec de l'eau distillée.

Nous avons ensuite préparé les lamelles de verre qui vont servir comme substrat pour le dépôt de couches minces à base de carbone.

Nous avons lavé chaque substrat dans un bain d'eau distillée chauffée à 50°C en utilisant un agitateur magnétique durant 15min pour éliminer toutes les impuretés sur la surface, retirée de ce bain, la lamelle est ensuite plongée dans un autre bain d'eau distillée, cette fois à température ambiante et utilisant l'agitateur thermique durant 15min encore, après on la plonge dans un bain d'acétone et l'agitateur magnétique durant 5min. La lamelle est ensuite réservée dans une boîte hermétique spéciale pour cet effet, pour la protéger des dépôts de poussières.

Nous avons préparé aussi le fluide polymère-poudre de carbone suivant les concentrations résumées dans le tableau III.1 ci-dessous.

Chaque échantillon est obtenu par le dépôt de 10 gouttes du fluide (polymère-poudre de carbone) en utilisant une tournette à 400 trs/min, cette vitesse nous permet d'étaler le fluide et d'obtenir une fine couche homogène sur la surface de la lamelle.

L'opération du séchage des couches minces est une étape à la fois importante et délicate, à cause des tensions internes qui apparaissent pouvant entraîner la formation des craquelures de la couche déposée et ou du substrat.

Chapitre III : Procédure et résultat expérimentaux et discussions

Dans notre cas, le séchage s'effectue juste après le dépôt, pendant 30 minutes sous des conditions conventionnelles (à l'air libre).

Chaque échantillon est ensuite caractérisé et étudié.

Dans les tableaux III.1, nous résumons les différentes concentrations des préparations utilisées.

Graphène

	Echant 1	Echant 2	Echant 3	Echant 4	Echant 5	Echant 6
Nom. Échant	C/M ₁	C/M ₂	C/M ₃	C/M ₄	C/M ₅	C/M ₆
Masse de carbone (g)	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3
Masse du polymère (g)	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0

Tableau III-1.1 : Résumé des différents échantillons préparés du graphène

Graphite

	Echant 1	Echant 2	Echant 3	Echant 4	Echant 5	Echant 6
Nom. Échant	P/M ₁	P/M ₂	P/M ₃	P/M ₄	P/M ₅	P/M ₆
Masse de carbone (g)	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3
Masse du polymère (g)	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0

Tableau III-1.2 : Résumé des différents échantillons préparés du graphite

Carbone naturel

	Echant 1	Echant 2	Echant 3	Echant 4	Echant 5	Echant 6
Nom. Échant	O/M ₁	O/M ₂	O/M ₃	O/M ₄	O/M ₅	O/M ₆
Masse de carbone (g)	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3
Masse du polymère (g)	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0

Tableau III-1.3 : Résumé des différents échantillons préparés du carbone naturel

III.4. Etudes des caractéristiques des couches minces déposées

III .4.1. Analyse morphologique

Nous avons fait ce premier test à l'œil nu, c'est-à-dire qu'après le séchage nous observons si l'échantillon ne présente aucun défaut visible

Ci-dessous une photographie des échantillons obtenus classés par source de carbone utilisée et par concentration de celui-ci.

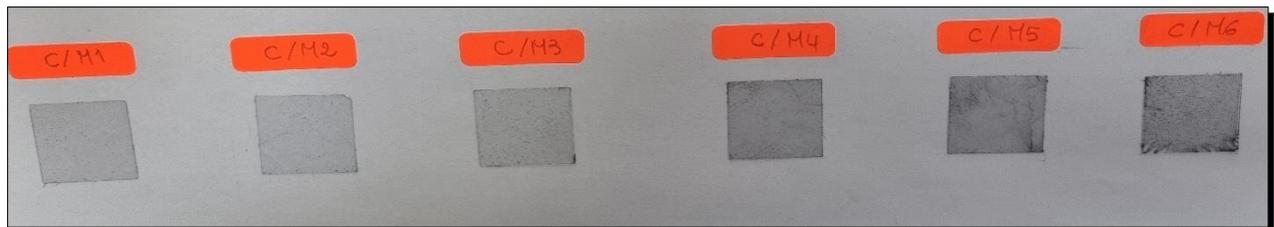


Figure III-1 : photographie des échantillons à base de graphène

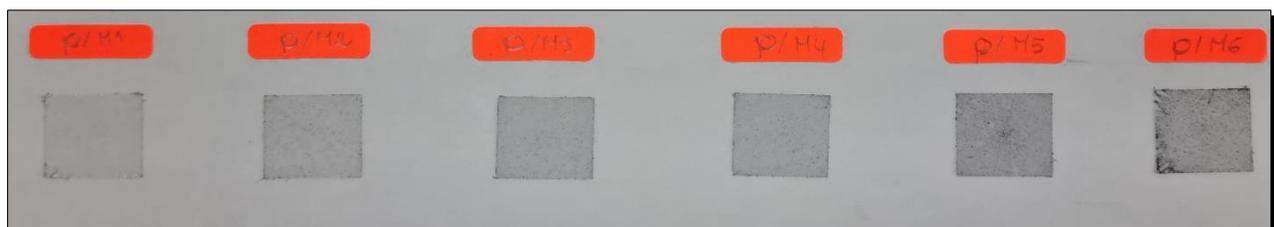


Figure III-2 : photographie des échantillons à base de graphite

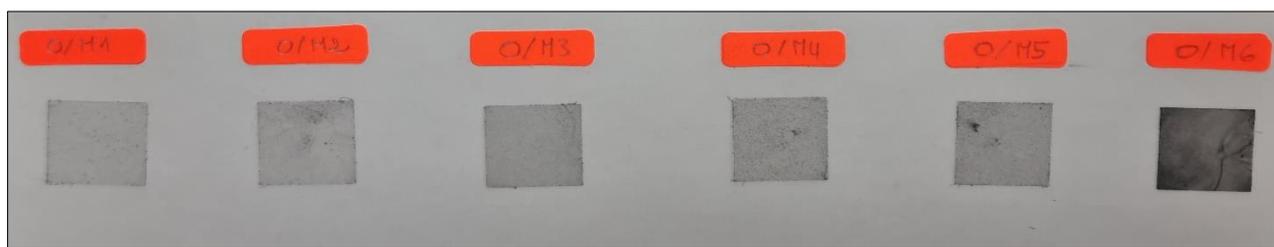


Figure III-3 : photographie des échantillons à base d'oleo europeae

III.4.2. Calcul de l'épaisseur des couches déposées

Pour faire ce calcul nous avons besoin de mesurer la masse du dépôt réalisé.

m_i : représente la masse de la lamelle en verre avant dépôt.

m_f : représente la masse de la lamelle en verre après dépôt.

Δm : représente la masse de la couche déposée et est calculée comme suit,

$$\Delta m = m_f - m_i$$

Les Tableaux III.2: présente Mesure de la masse de la couche déposée pour chaque échantillon.

Graphène

	Echant1 C/M₁	Echant 2 C/M₂	Echant 3 C/M₃	Echant 4 C/M₄	Echant 5 C/M₅	Echant 6 C/M₆
m_i (Masse du substrat avant dépôt) (g)	0.1730	0.1730	0.1730	0.1730	0.1730	0.1730
m_f (Masse du substrat après dépôt) (g)	0.1758	0.1765	0.1774	0.1783	0.1792	0.1802
Δm (Masse du dépôt réalisé) (g)	0.0028	0.0035	0.0044	0.0053	0.0062	0.0072

Tableau III-2.1 : Mesure de la masse de la couche déposée pour chaque échantillon de graphène

Graphite

	Echant1 P/M₁	Echant 2 P/M₂	Echant 3 P/M₃	Echant 4 P/M₄	Echant 5 P/M₅	Echant 6 P/M₆
m_i (Masse du substrat avant dépôt) (g)	0.1730	0.1730	0.1730	0.1730	0.1730	0.1730
m_f (Masse du substrat après dépôt) (g)	0.1770	0.1778	0.1786	0.1792	0.1801	0.1810
Δm (Masse du dépôt réalisé) (g)	0.0040	0.0048	0.0056	0.0062	0.0071	0.0080

Tableau III-2.2 : Mesure de la masse de la couche déposée pour chaque échantillon de graphite

Carbone naturel

	Echant1 O/M ₁	Echant 2 O/M ₂	Echant 3 O/M ₃	Echant 4 O/M ₄	Echant 5 O/M ₅	Echant 6 O/M ₆
m_i (Masse du substrat avant dépôt) (g)	0.1730	0.1730	0.1730	0.1730	0.1730	0.1730
m_f (Masse du substrat après dépôt) (g)	0.1751	0.1758	0.1765	0.1775	0.1783	0.1789
Δm (Masse du dépôt réalisé) (g)	0.0021	0.0028	0.0035	0.0045	0.0053	0.0059

Tableau III-2.3 : Mesure de la masse de la couche déposée pour chaque échantillon de carbone naturel

L'épaisseur des couches déposées sur les différents échantillons est calculée en utilisant la relation suivante :

$$e = \frac{\Delta m}{\rho \cdot S} \quad \text{III-1}$$

Où :

e (cm) : représente l'épaisseur du dépôt.

ρ : représente la masse volumique du matériau déposé (dans notre cas le graphite : $\rho = 2.25 \text{ g.cm}^{-3}$)

S (cm²) : représente la surface de la couche déposée ($S = 4.84 \text{ cm}^2$).

Δm (g) : représente la masse du dépôt.

Les Tableaux III.3: présente L'épaisseur de la couche déposée pour chaque échantillon.

Graphène

	Echant1 C/M ₁	Echant2 C/M ₂	Echant3 C/M ₃	Echant4 C/M ₄	Echant5 C/M ₅	Echant6 C/M ₆
Δm (g)	0.0028	0.0035	0.0044	0.0053	0.0062	0.0072
e (µm)	2.57	3.21	4.04	4.86	5.69	6.61

Graphite

	Echant1 P/M ₁	Echant2 P/M ₂	Echant3 P/M ₃	Echant4 P/M ₄	Echant5 P/M ₅	Echant6 P/M ₆
Δm (g)	0.0040	0.0048	0.0056	0.0062	0.0071	0.0080
e (μm)	3.67	4.40	5.14	5.69	6.51	7.34

Carbone naturel

	Echant1 O/M ₁	Echant2 O/M ₂	Echant3 O/M ₃	Echant4 O/M ₄	Echant5 O/M ₅	Echant6 O/M ₆
Δm (g)	0.0021	0.0028	0.0035	0.0045	0.0053	0.0059
e (μm)	1.92	2.57	3.21	4.13	4.86	5.41

Nous avons tracé sur la figure III.1, figure III.2 et figure III.3, les courbes de l'évolution de l'épaisseur de la couche mince déposée en fonction de la masse du carbone pour chaque échantillon.

Nous remarquons que l'épaisseur de la couche mince déposée varie sensiblement avec la concentration du carbone. Les courbes montrent que nous avons obtenu une épaisseur qui varie entre 2.57 et 6.61(μm) pour les couches minces à base de graphène, aussi l'épaisseur varie entre 3.67 et 7.37 (μm) pour les couches minces à base de graphite, alors que l'épaisseur varie entre 1.92 et 5.41 (μm) pour les couches minces à base de carbone naturel. Ceci est dû à la taille des granulés utilisés dans les poudres de graphène, de graphite ou de carbone naturel.

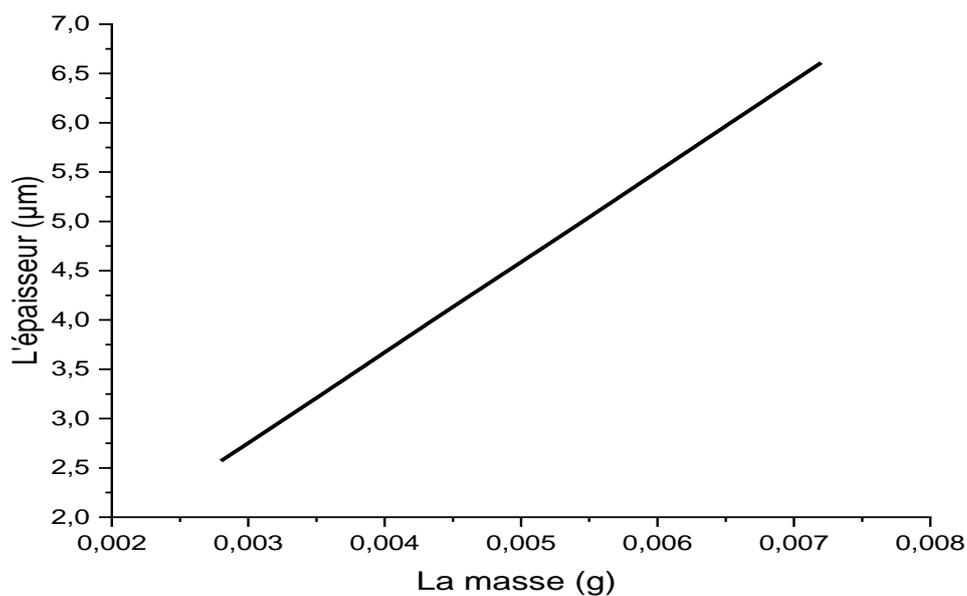


Figure III-4 : Evolution de l'épaisseur de la couche déposée en fonction de la masse du carbone pour les échantillons de Graphène.

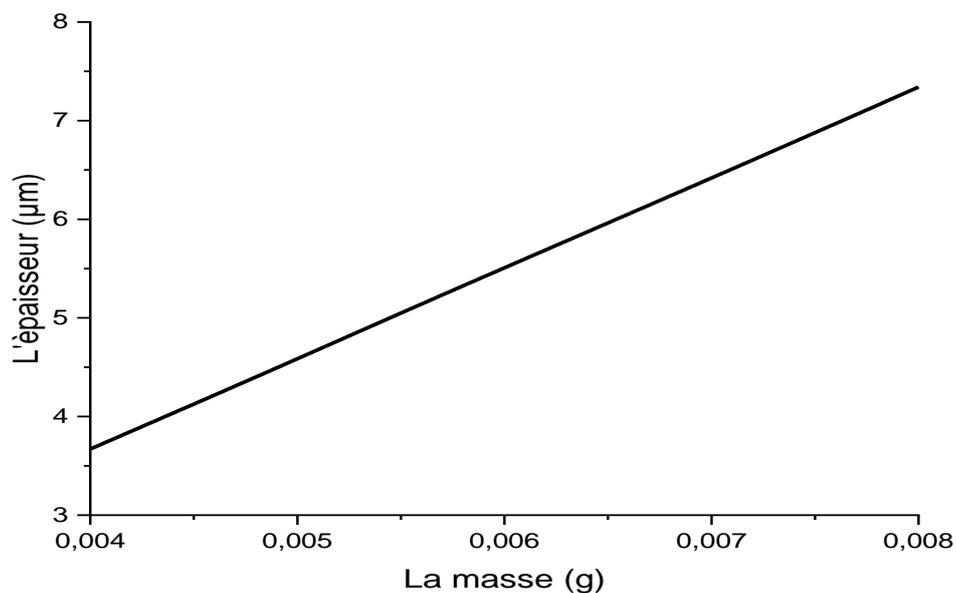


Figure III-5 : Evolution de l'épaisseur de la couche déposée en fonction de la masse du carbone pour les échantillons de Graphite.

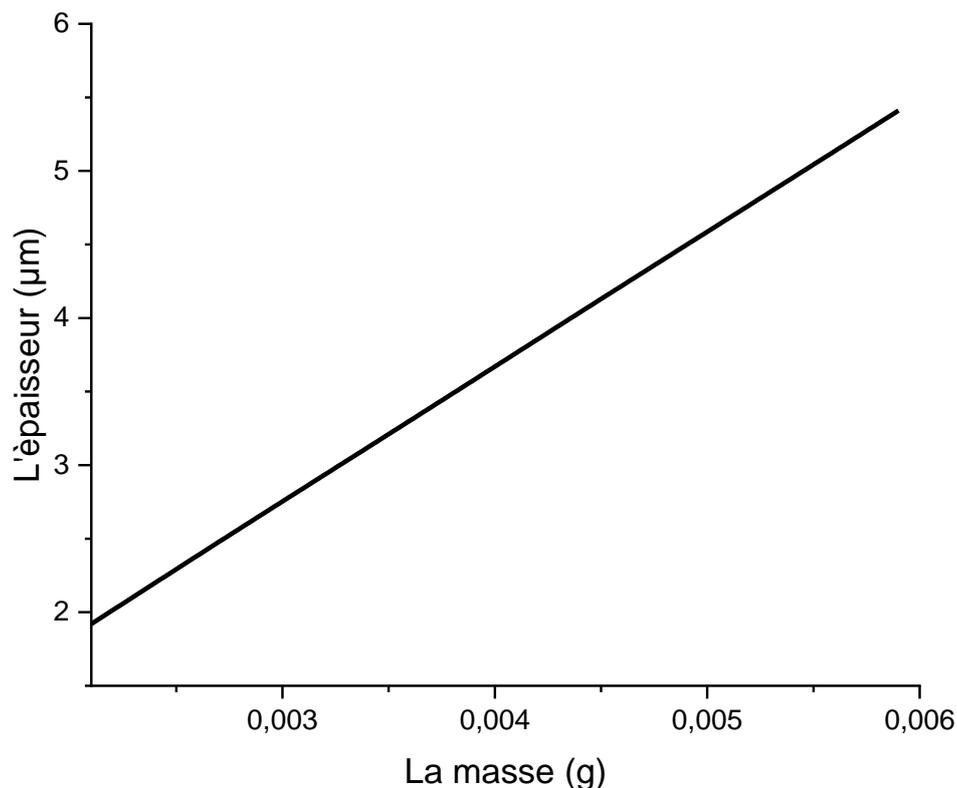


Figure III-6 : Evolution de l'épaisseur de la couche déposée en fonction de la masse du carbone pour les échantillons de carbone naturel.

III .4.3. Caractérisation optique par spectroscopie

La technique de caractérisation par spectrophotométrie est basée sur les propriétés intrinsèques de la matière, et plus particulièrement de certains atomes ou molécules à réfléchir, transmettre ou d'absorber certaines longueurs d'ondes du spectre UV-visible. Cette technique permet de réaliser une étude structurale des complexes par l'étude des spectres.

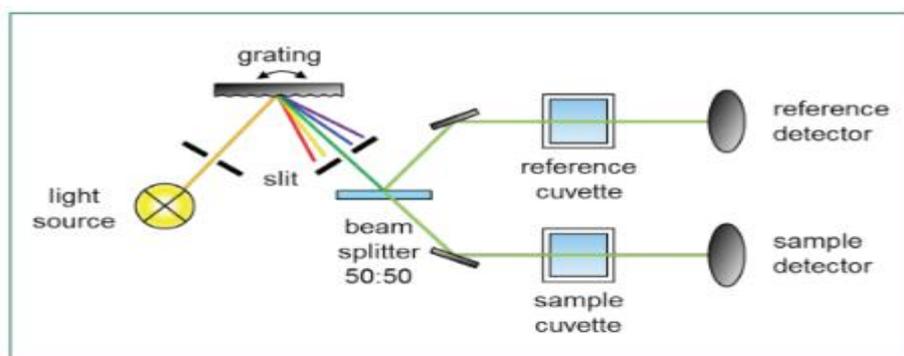


Figure III-7 : Schéma explicatif du principe de fonctionnement du spectrophotomètre utilisé.

Cette méthode est basée sur l'utilisation d'un spectrophotomètre qui détermine l'absorption, la réflectance, ou la transmittance d'un échantillon ou d'une solution pour une longueur d'onde donnée ou pour une plage de longueurs d'ondes judicieusement choisie.

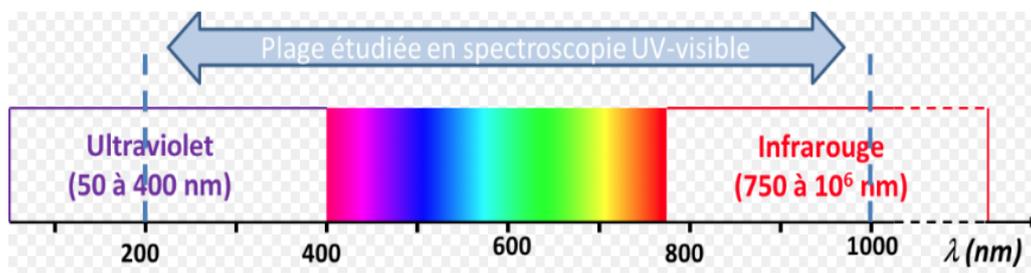


Figure III-8 : Schéma représentatif de la plage étudiée en spectroscopie UV- VIS- NIR

La spectrophotométrie nous permet d'étudier les propriétés optiques des échantillons à analyser comme la transmission, la réflexion ou l'absorption de la lumière. Elle nous permet aussi d'estimer la valeur du gap optique et nous renseigne sur la taille des cristallites. Elle peut aussi nous renseigner dans certains cas sur l'épaisseur de l'échantillon et même de remonter à ses constantes optiques.

Le principe de la spectroscopie repose sur l'interaction de la lumière source avec l'échantillon à analyser. Une partie du faisceau incident sera absorbée, transmise ou réfléchi par l'échantillon. Lorsqu'un échantillon absorbe de la lumière dans le domaine de l'ultraviolet et du visible, l'énergie absorbée provoque des perturbations dans la structure électronique des atomes, ions ou molécules. Un ou plusieurs électrons absorbent cette énergie pour sauter d'un niveau de basse énergie à un niveau de plus haute énergie. Ainsi une réponse spectrale est enregistrée.

Dans cette partie de la caractérisation, nous avons utilisé un spectrophotomètre UV/VIS/NIR de type JASCO V-570, la gamme spectrale s'étale sur le domaine du visible allant de 400 nm à 800 nm.



Figure III-9 : Photographie représente un spectrophotomètre.

Les spectres de transmission et de réflexion optique des échantillons investis dans le cadre de notre travail sont représentés sur les figures numérotées de III.7 à III.12.

La figure III.7 représente les spectres de transmission des couches minces des échantillons préparés à base de la poudre de graphène pour différentes concentrations de carbone. La transmission pour ces échantillons est comprise entre 60% et 95%.

La figure III.8 représente les spectres de réflexion des couches minces des échantillons préparés à base de la poudre de graphène pour différentes concentrations de carbone. La réflexion pour ces échantillons est comprise entre 60% et 95%.

La figure III.9 représente les spectres de transmission des couches minces des échantillons préparés à base de la poudre de graphite pour différentes concentrations de carbone. La transmission pour ces échantillons est comprise entre 80% et 95%.

La figure III.10 représente les spectres de réflexion des couches minces des échantillons préparés à base de la poudre de graphite pour différentes concentrations de carbone. La réflexion pour ces échantillons est comprise entre 80% et 95%.

La figure III.11 représente les spectres de transmission des couches minces des échantillons préparés à base de la poudre de carbone naturel pour différentes concentrations de carbone. La transmission pour ces échantillons est comprise entre 30% et 95%.

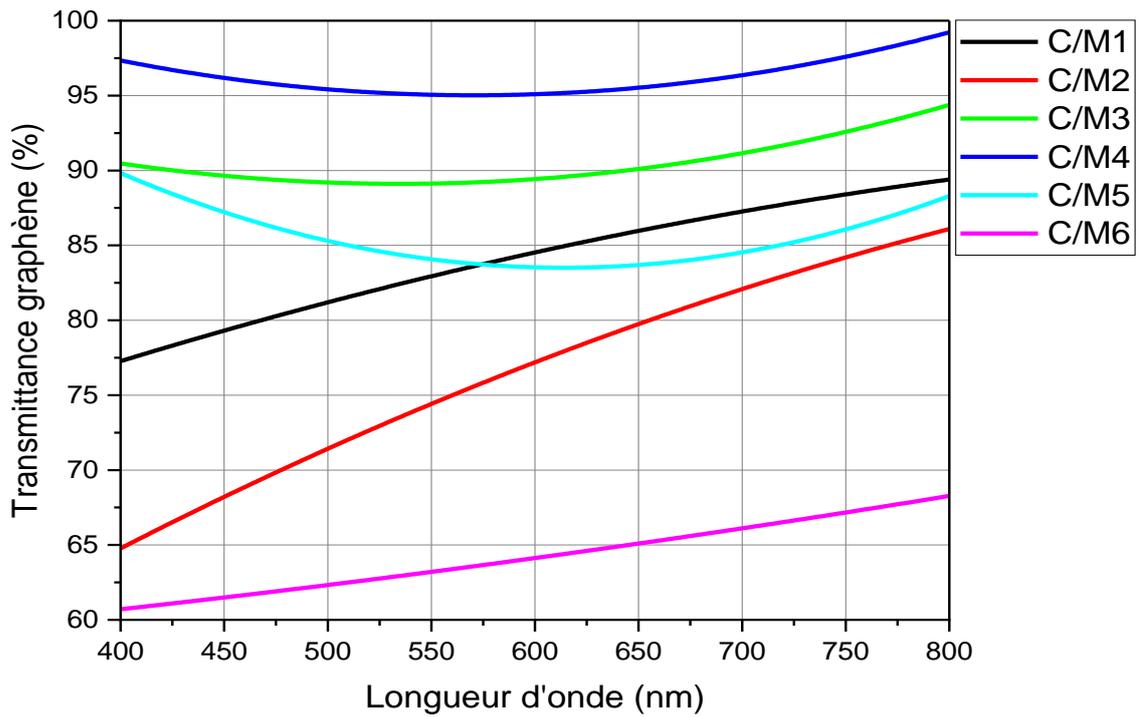


Figure III-10: Spectre de transmission des couches minces à base de graphène pour différentes concentrations de carbone.

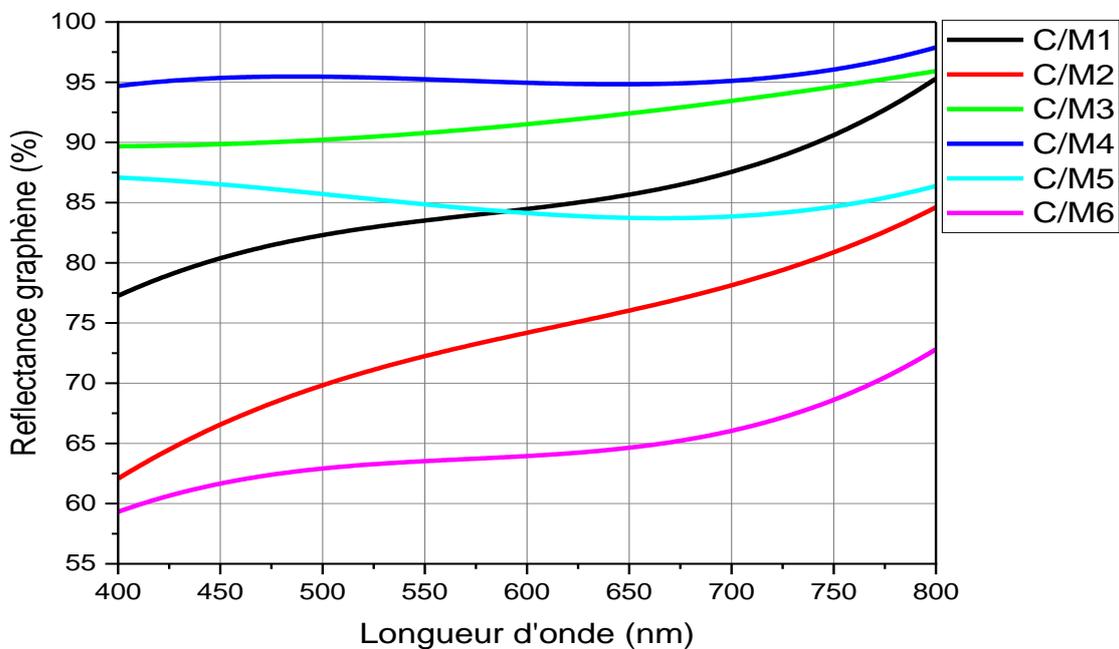


Figure III-11 : Spectre de réflexion des couches minces à base de graphène pour différentes concentrations de carbone.

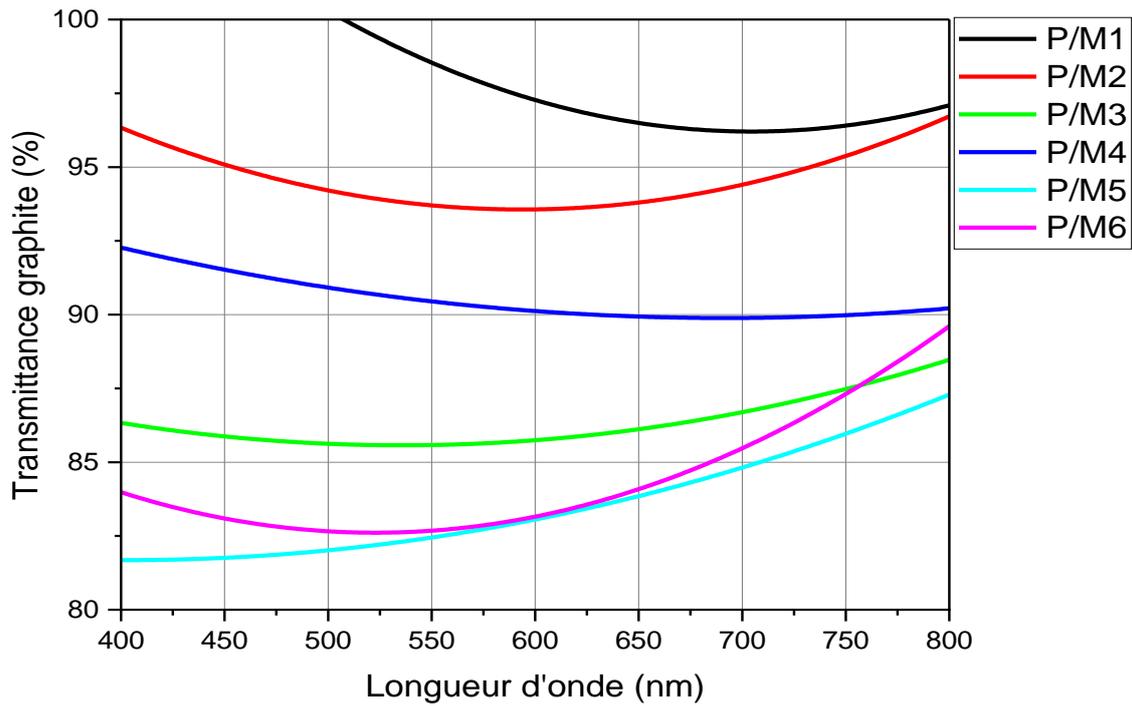


Figure III-12 : Spectre de transmission des couches minces à base de graphite pour différentes concentrations de carbone.

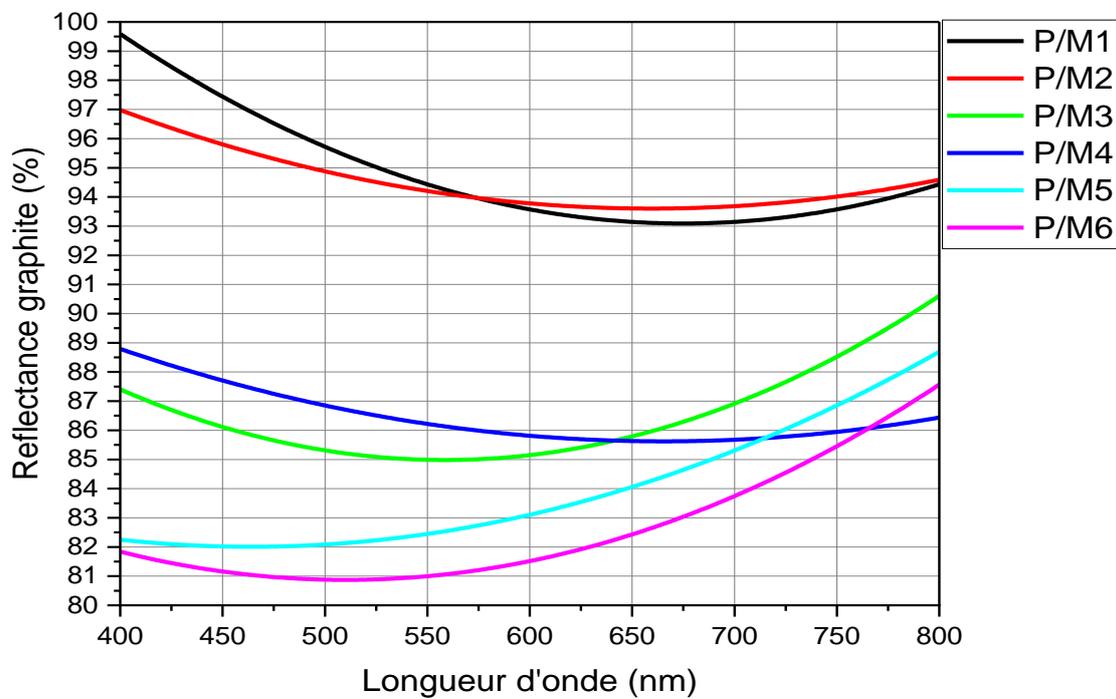


Figure III-13 : Spectre de réflexion des couches minces à base de graphite pour différentes concentrations de carbone.

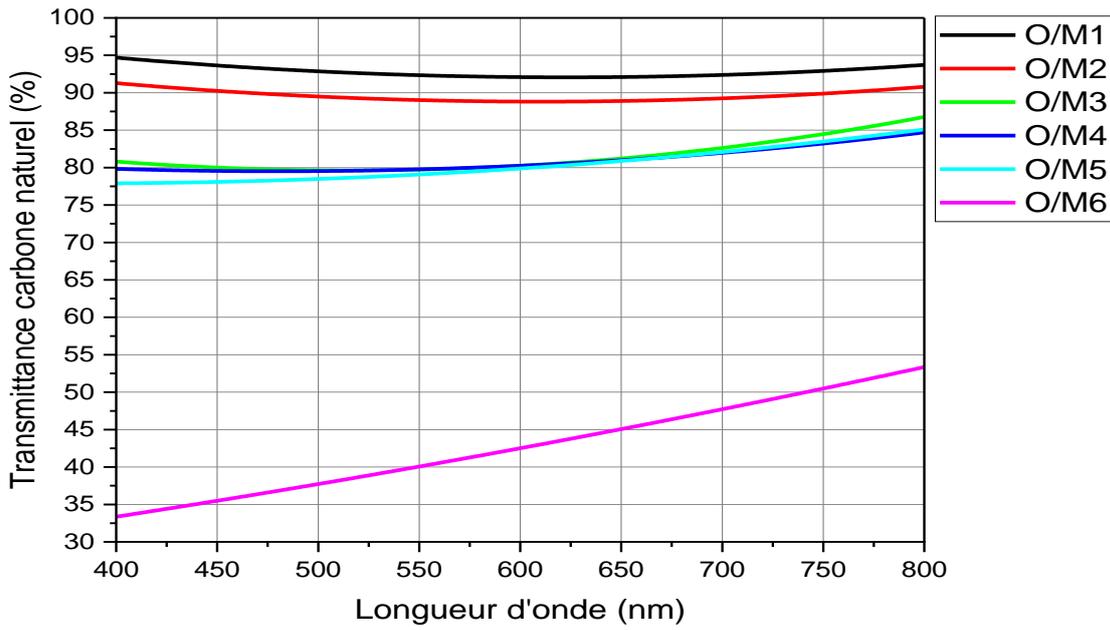


Figure III-14 : Spectre de transmission de couches minces à base de source de carbone naturelle pour différentes concentrations de carbone

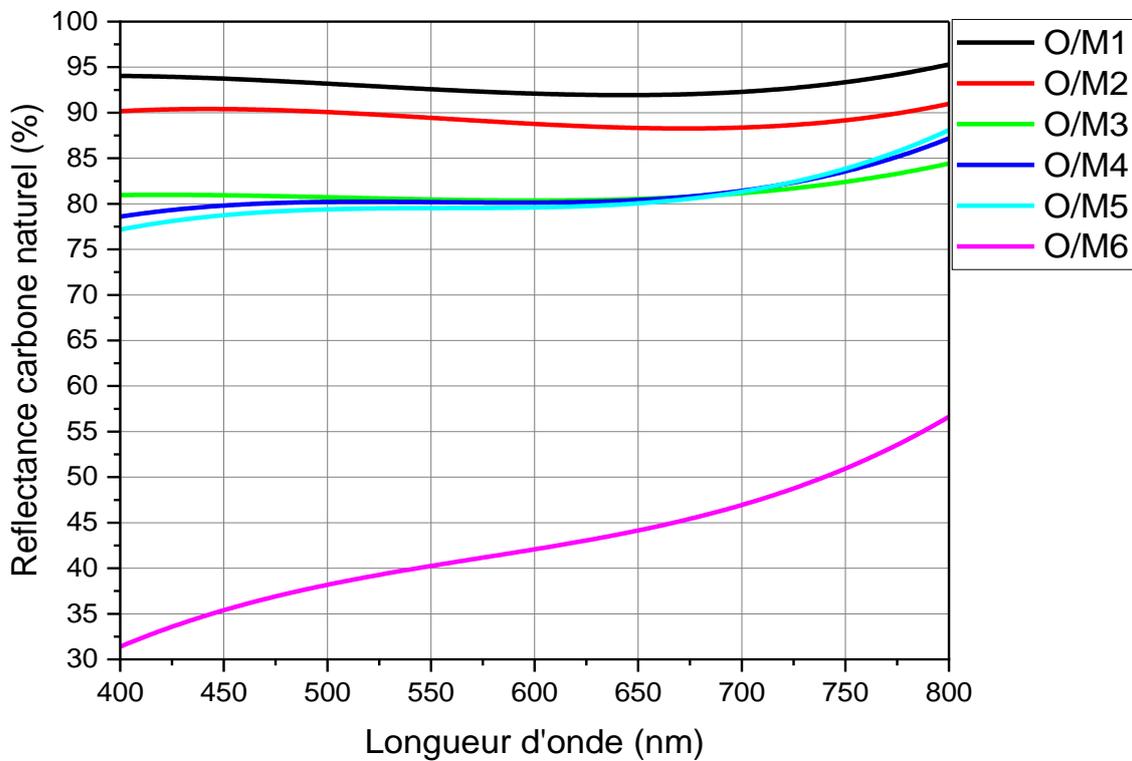


Figure III-15 : Spectre de réflexion de couches minces à base de source de carbone naturelle pour différentes concentrations de carbone.

La figure III.12 représente les spectres de réflexion des couches minces des échantillons préparés à base de la poudre de carbone naturel pour différentes concentrations de carbone. La réflexion pour ces échantillons est comprise entre 30% et 95%.

Notons que pour un creux dans le spectre de réflectance correspond un pic dans le spectre d'absorbance.

D'après tous ces spectres, nous remarquons que plus la concentration de carbone augmente plus les taux obtenus de transmittances baissent, et ceci est justifié par le fait que l'augmentation de la concentration assombrit le substrat en verre transparent.

III .4.4. Caractérisation électrique

Dans cette partie, nous nous intéressons à l'effet du dépôt des couches minces de carbone sur le fonctionnement et le rendement des cellules solaires.

Nous avons utilisé des cellules photovoltaïques commerciales, dont la tension de sortie $V = 1.2 \text{ volts}$ et la puissance fournie $P = 0.06 \text{ Watts}$, sur lesquelles nous avons déposé les couches minces à base de carbone décrits précédemment.

La cellule photovoltaïque alimente une petite batterie de stockage en présence de lumière à travers un circuit électronique, en l'absence de lumière, la batterie alimente une lampe LED.

Le montage utilisé est représenté dans la photographie de la figure III.13.

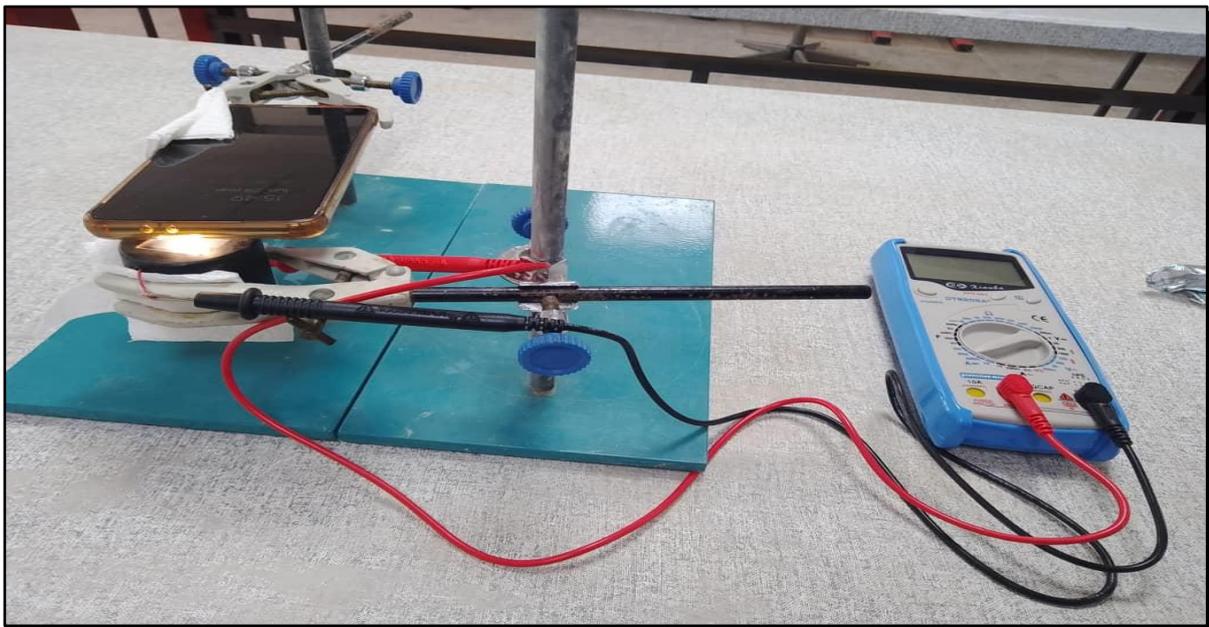


Figure III-16 : Photographie du montage utilisé pour la caractérisation électrique de cellule solaire revêtue de couches minces à base de carbone.

Chapitre III : Procédure et résultat expérimentaux et discussions

Nous avons utilisé une lampe comme source lumineuse pour éclairer la cellule solaire, aussi nous avons mesuré le flux lumineux incident reçu par la cellule, qui est de

Nous avons utilisé un multimètre pour les mesures de la tension et du courant générés par la cellule. Toutes ces mesures sont résumées dans le tableau III.3

En raison des propriétés structurales du carbone, on s'attend à ce que les granules de carbone dans les couches minces déposées aux propriétés très réfléchissantes vont contribuer à piéger d'avantage la lumière à la surface de la cellule.

Les Tableau III.3 : Valeurs relevées de l'intensité du courant électrique et de la tension aux bornes de la cellule photovoltaïque.

Graphène

	Echant1 C/M1	Echant2 C/M2	Echant3 C/M3	Echant4 C/M4	Echant5 C/M5	Echant6 C/M6
e (µm)	2.57	3.21	4.04	4.86	5.69	6.61
I (mA)	2.99	2.97	2.92	2.83	2.77	2.3
V (Volts)	2.31	2.3	2.29	2.28	2.26	2.2

Tableau III-3.1 : Valeurs relevées de l'intensité du courant électrique et de la tension aux bornes de la cellule photovoltaïque pour le graphène

Graphite

	Echant1 P/M1	Echant2 P/M2	Echant3 P/M3	Echant4 P/M4	Echant5 P/M5	Echant6 P/M6
e (µm)	3.67	4.40	5.14	5.69	6.51	7.34
I (mA)	3	2.95	2.89	2.87	2.7	2.64
V (Volts)	2.29	2.29	2.28	2.28	2.25	2.22

Tableau III-3.2 : Valeurs relevées de l'intensité du courant électrique et de la tension aux bornes de la cellule photovoltaïque pour le graphite

Carbone naturel

	Echant1 O/M1	Echant2 O/M2	Echant3 O/M3	Echant4 O/M4	Echant5 O/M5	Echant6 O/M6
e (µm)	1.92	2.57	3.21	4.13	4.86	5.41
I (mA)	3	2.89	2.72	2.59	2.33	1.98
V (Volts)	2.29	2.28	2.27	2.24	2.2	2.1

Tableau III-3.3 : Valeurs relevées de l'intensité du courant électrique et de la tension aux bornes de la cellule photovoltaïque pour le carbone naturel

e (µm) : représente l'épaisseur de la couche mince déposée.

I (mA) : représente l'intensité du courant généré par la cellule.

V (Volts) : représente la tension aux bornes de la cellule.

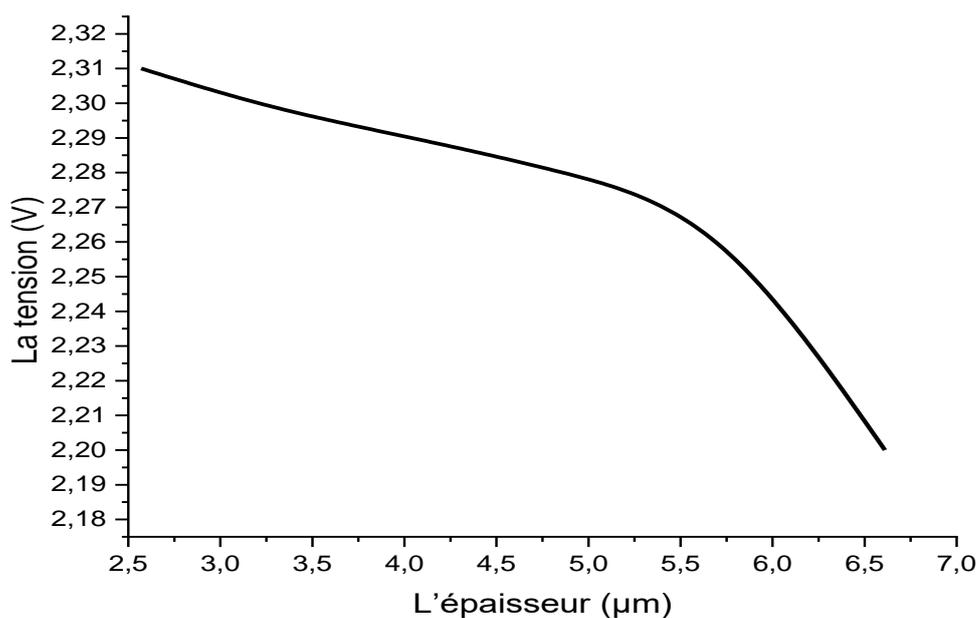


Figure III-17 : courbe représentant la variation de la tension générée par la cellule solaire sur laquelle on a déposé une couche mince à base de graphène.

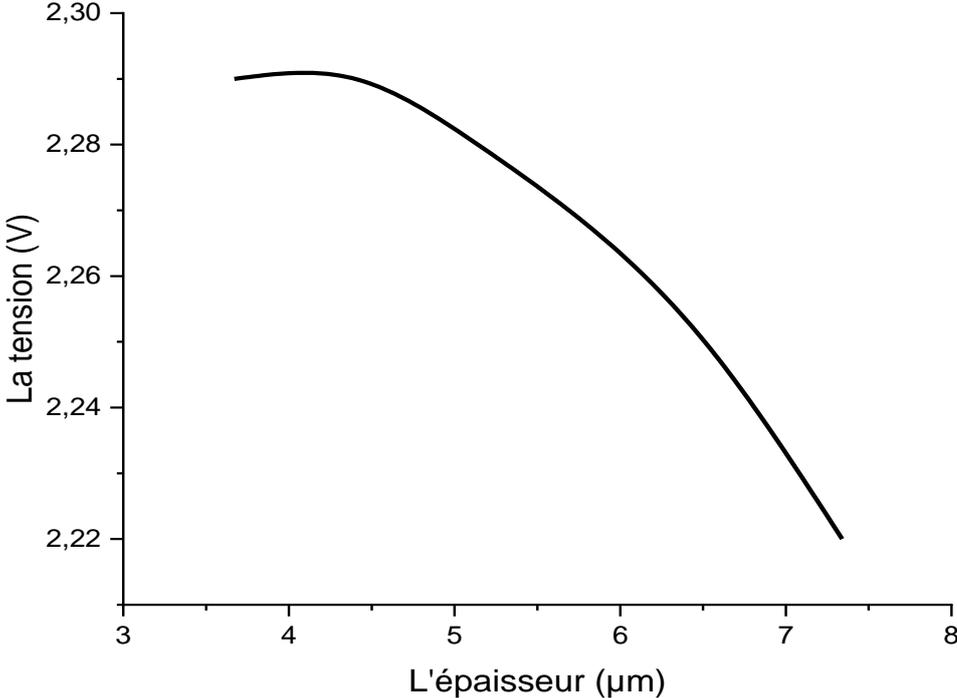


Figure III-18 : courbe représentant la variation de la tension générée par la cellule solaire sur laquelle on a déposé une couche mince à base de graphite.

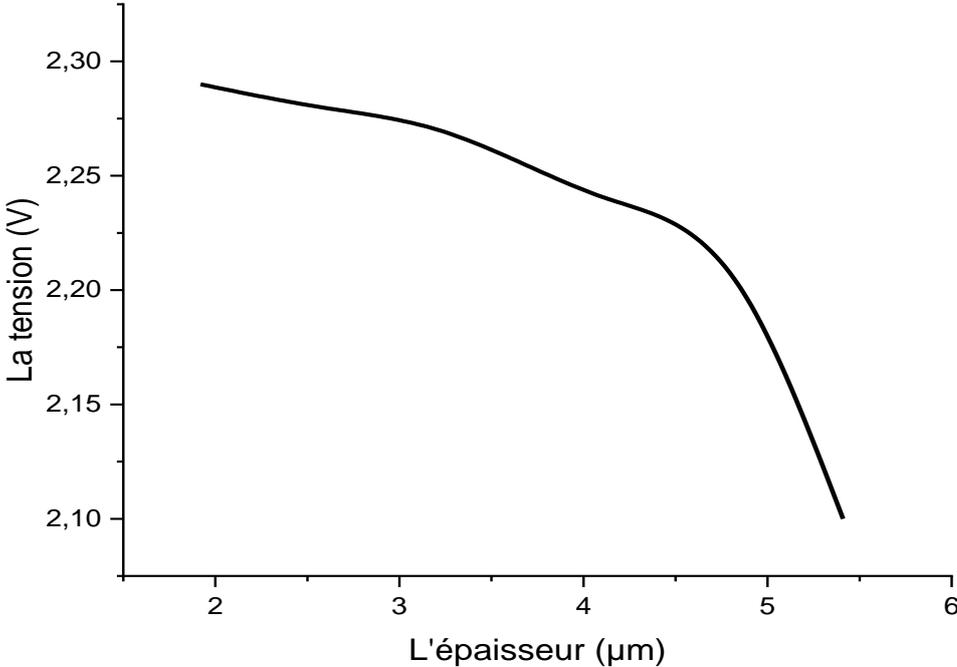


Figure III-19 : courbe représentant la variation de la tension générée par la cellule solaire sur laquelle on a déposé une couche mince à base de carbone naturel.

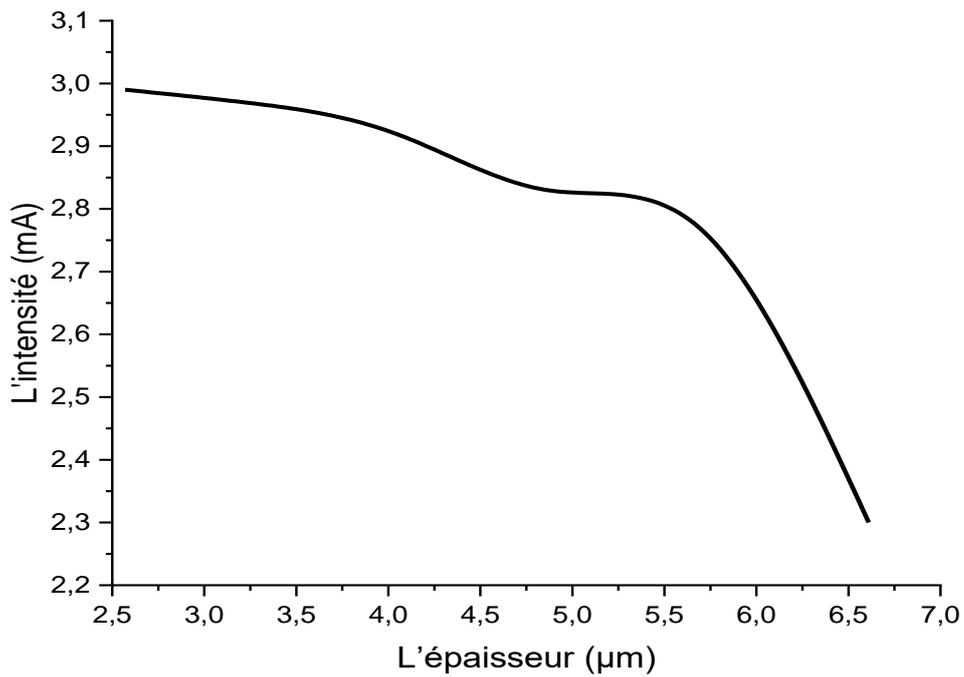


Figure III-20 : courbe représentant la variation de l'intensité du courant généré par la cellule solaire sur laquelle on a déposé une couche mince à base de graphène.

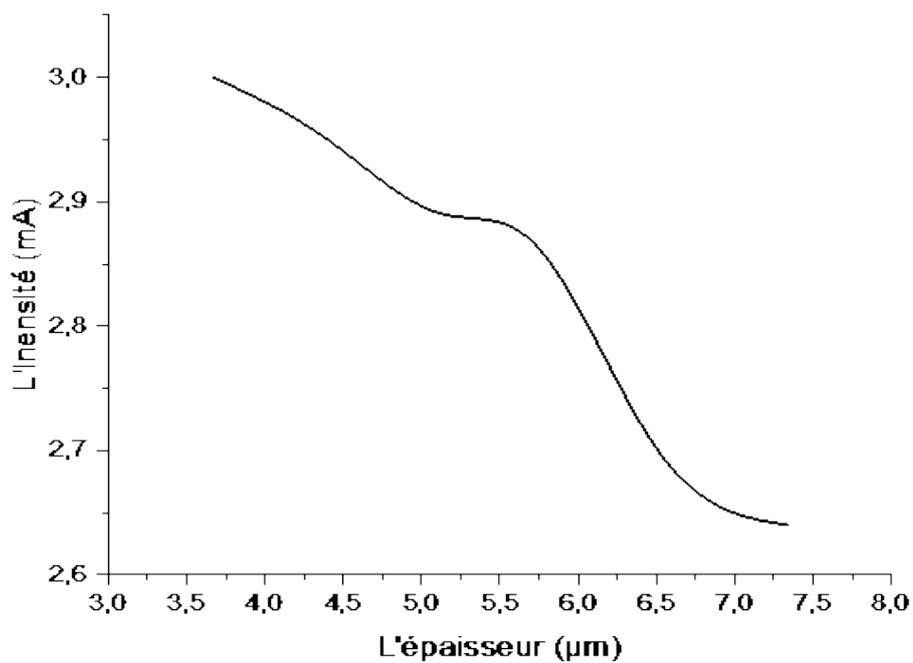


Figure III-21 : courbe représentant la variation de l'intensité du courant généré par la cellule solaire sur laquelle on a déposé une couche mince à base de graphite.

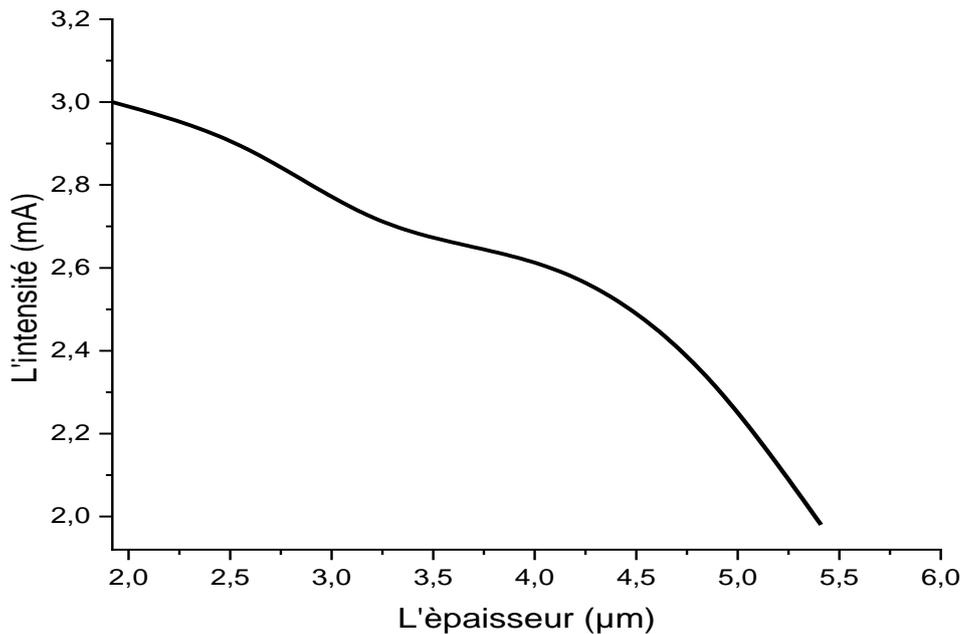


Figure III-22 : courbe représentant la variation de l'intensité du courant généré par la cellule solaire sur laquelle on a déposé une couche mince à base de carbone naturel.

Les figures III.14 à III.16 représentent le tracé de l'évolution de la tension aux bornes de la cellule en fonction de l'épaisseur de la couche mince à base de graphène, de graphite, et de carbone naturel respectivement. Les courbes montrent deux paliers distincts ; dans le premier, on remarque une faible diminution de la tension pour des épaisseurs de couches minces croissantes et un deuxième palier où la tension chute à partir d'un seuil.

Les figures III.17 à III.19 représentent le tracé de l'évolution de l'intensité du courant généré par la cellule en fonction de l'épaisseur de la couche mince à base de graphène, de graphite, et de carbone naturel respectivement. Là aussi, les courbes montrent deux paliers distincts ; dans le premier, on remarque une faible diminution de l'intensité du courant pour des épaisseurs de couches minces croissantes et un deuxième palier où l'intensité du courant chute à partir d'un seuil.

Pour expliquer ce phénomène observé, il faut noter que l'épaisseur de ces couches minces est étroitement lié à la concentration donc à la masse du carbone utilisée dans l'élaboration de la couche mince elle-même, il faut aussi noter que la concentration du carbone modifie le degré de transparence de la couche mince, et donc les couches minces à faible concentration de carbone ayant un degré de transparence plus élevé se situent dans le premier palier, à partir du quatrième échantillon où la concentration du carbone augmente et donc le

degré de transparence augmente sensiblement on a une chute rapide de la tension et de l'intensité du courant électrique et donc du rendement de la cellule.

III .5. Conclusion

En conclusion, nous avons réussi à élaborer des couches minces de carbone transparentes sur des substrats en verre en utilisant une tournette. Les analyses par spectrophotométrie UV-visible ont confirmé la transparence des films dans la région visible du spectre, ce qui les rend adaptés à une utilisation dans des dispositifs optoélectroniques.

Conclusion générale

Dans ce travail nous avons élaboré des couches minces de carbone, dans le but de les utiliser comme revêtement de cellules solaires pour améliorer leurs caractéristiques.

Nous avons choisi trois matériaux différents pour l'obtention de carbone ; à savoir, le graphène synthétique, le graphite pur, et une source naturelle à partir de plantes végétales. Pour chaque type de matériau nous avons broyé mécaniquement la matière et utilisé un système de filtrage adapté pour obtenir les poudres les plus fines possibles, ce qui n'était pas une tâche facile de part les propriétés mécaniques connues du carbone.

Nous avons mélangé la poudre des trois matériaux à des quantités de polymère transparent commercial dans des proportions bien déterminées pour obtenir six échantillons à des concentrations différentes de carbone, pour chacun des trois matériaux sources de carbone.

Pour chaque échantillon préparé, nous avons suivi un protocole bien détaillé dans le chapitre trois. Ensuite nous avons procédé au dépôt, en utilisant une technique tout à fait facile et peu coûteuse utilisant une tournette conventionnelle à 400 trs/min.

Grace à cette technique nous avons obtenu des couches minces dont l'épaisseur ne dépasse pas 7 micromètres.

Nous avons par la suite caractérisé les échantillons obtenus optiquement. Dans cette partie de la caractérisation, nous avons utilisé un spectrophotomètre UV/VIS/NIR de type JASCO V-570, la gamme spectrale s'étale sur le domaine du visible allant de 400 nm à 800 nm. Les spectres de transmission et de réflexion optique des échantillons investis montrent que pour le graphène synthétique la transmission optique des couches minces des échantillons est comprise entre 60% et 95%. La réflexion optique est comprise entre 60% et 95%.

Les spectres de transmission des couches minces des échantillons préparés à base de la poudre de graphite pure pour différentes concentrations de carbone montrent une transmission optique comprise entre 80% et 95%. La réflexion pour ces échantillons est comprise entre 80% et 95%.

Les spectres de transmission des couches minces des échantillons préparés à base de la poudre de carbone naturel pour différentes concentrations de carbone donnent une transmission optique comprise entre 30% et 95%. La réflexion pour ces échantillons est comprise entre 30% et 95%.

Notons que pour un creux dans le spectre de réflectance correspond un pic dans le spectre d'absorbance.

D'après tous ces spectres, nous remarquons que plus la concentration de carbone augmente plus les taux obtenus de transmittances baissent, et ceci est justifié par le fait que l'augmentation de la concentration assombrit le substrat en verre transparent. Et donc les taux de transmission et de réflexion sont modifiés.

Dans un second temps nous avons fait une caractérisation électrique.

Dans cette partie, nous nous sommes intéressés à l'effet du dépôt des couches minces de carbone sur le fonctionnement et le rendement des cellules solaires.

Nous avons utilisé des cellules photovoltaïques commerciales, sur lesquelles nous avons déposé les couches minces à base de carbone en suivant le même protocole décrits précédemment.

En raison des propriétés structurales du carbone, on s'attend à ce que les granules de carbone dans les couches minces déposées aux propriétés très réfléchissantes vont contribuer à piéger d'avantage la lumière à la surface de la cellule.

Le tracé des courbes de la tension aux bornes de la cellule en fonction de l'épaisseur ou encore l'intensité du courant électrique en fonction de l'épaisseur de la couche mince à base de graphène, de graphite, et de carbone naturel respectivement montrent deux paliers distincts ; dans le premier, on remarque une faible diminution de la tension pour des épaisseurs de couches minces croissantes et un deuxième palier où la tension chute à partir d'un seuil. Pour expliquer ce phénomène observé, il faut noter que l'épaisseur de ces couches minces est étroitement liée à la concentration donc à la masse du carbone utilisée dans l'élaboration de la couche mince elle-même, il faut aussi noter que la concentration du carbone modifie le degré de transparence de la couche mince, et donc les couches minces à faible concentration de carbone ayant un degré de transparence plus élevé se situent dans le premier palier, à partir du quatrième échantillon où la concentration du carbone augmente et donc le degré de transparence augmente sensiblement on a une chute rapide de la tension et de l'intensité du courant électrique et donc du rendement de la cellule.

En croisant le résultat des propriétés mécanique, optique et électriques, les échantillons ayant les plus faibles concentrations de carbone présentent de bons résultats pour répondre à la problématique de ce travail en offrant à la cellule solaire la protection contre la corrosion et la protéger du vieillissement, augmentant ainsi son rendement à travers le temps.

En perspectives, nous projetons d'améliorer la qualité des couches minces en synthétisant nous même le polymère transparent, faire d'autres types de caractérisation, à savoir

Conclusion générale

caractérisation des couches minces par le MEB, et par DRX.etc. Ceci est d'une part, et d'autre part investiguer d'autres applications pour ces couches minces à base de carbone.

Résumé

Le but de notre travail est de réaliser un dépôt de couche mince à base de carbone sur une cellule solaire et caractériser ce dépôt.

Pour la réalisation de ce travail nous avons choisi trois sources différentes à fortes teneur en particules de carbone : le graphène synthétique, le graphite pur, et une source naturelle à partir d'un traitement chimique d'un arbuste connu sous l'appellation botanique *Olea Europeae*.

Nous avons par la suite mélangé pour chaque type de source, la poudre de carbone soigneusement préparée avec un polymère transparent commercial, pour obtenir des fluides à différentes concentrations de carbone, prêts pour le dépôt.

Enfin, nous avons réalisé le dépôt de couches minces sur des lamelles en verre pour permettre la caractérisation de ces dernières, un autre dépôt est nécessaire directement sur les cellules photovoltaïques pour la caractérisation électrique.

Ce travail nous a permis d'étudier l'influence de la concentration de carbone dans les couches minces sur l'épaisseur des couches réalisées et sur le fonctionnement des cellules solaires. Tous les résultats sont discutés et comparés, ce qui nous a permis de conclure la concentration de carbone seuil dans les couches minces déposées et pour laquelle le rendement de la cellule solaire chute significativement.

Abstract

The goal of our work is to deposit a thin carbon layer onto a solar cell and characterize this deposit.

To carry out this work, we chose three different sources with high carbon particle content : synthetic graphene, pure graphite, and a natural source obtained through chemical treatment of a shrub known botanically as *Olea Europeae*.

We then mixed, for each type of source, the carefully prepared carbon powder with a commercial transparent polymer to obtain fluids with different carbon concentrations, ready for deposition.

Finally, we deposited thin layers onto glass slides for characterization and another deposition was necessary directly onto the photovoltaic cells for electrical characterization.

This work allowed us to study the influence of the carbon concentration in the thin layers on the thickness of the layers and on the functioning of the solar cells. All results are discussed and compared, which led us to conclude the threshold carbon concentration in the deposited thin layers at which the efficiency of the solar cell decreases significantly.

