

Généralités sur les
Kesterites

Dans ce chapitre nous allons rappeler les différents types des semi-conducteurs et nous allons décrire l'état de l'art du CZTS, ses propriétés principales et les diverses applications de ce matériau.

I.1. Les semi-conducteurs

Un semi-conducteur, est un matériau qui n'est ni tout à fait un conducteur d'électricité, ni tout à fait un isolant. Il peut être soit l'un, soit l'autre selon diverses conditions. Le caractère conducteur ou isolant prend sa source dans la structure même des atomes, chaque élément du tableau périodique possède un agencement électronique sous la forme de couches différent selon les éléments, qui est responsable de la conductivité électrique. On peut schématiser l'ensemble sous la forme de bandes. Sur le schéma suivant, on a représenté les bandes d'électrons de valence et d'électrons de conduction [4].

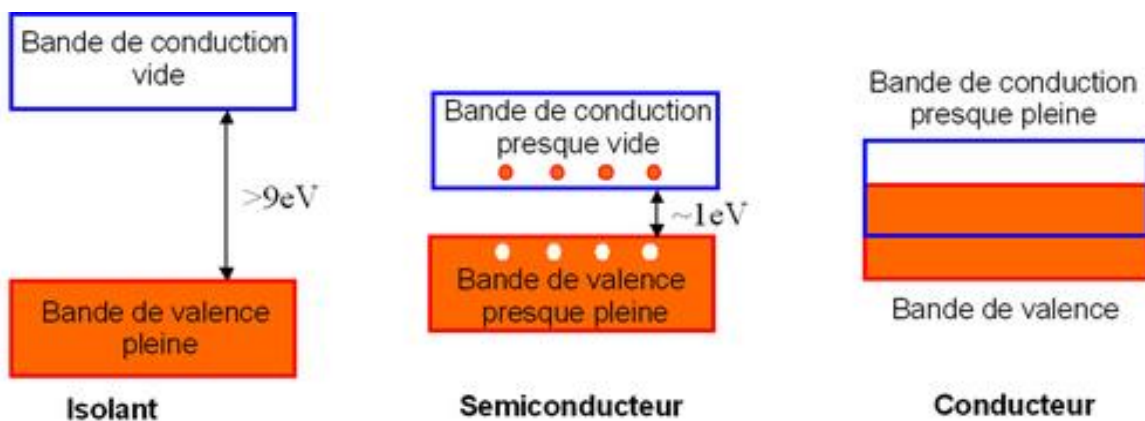


Figure I. 1.. Représentation des bandes d'énergies

Un semi-conducteur peut être "intrinsèque" ou bien "extrinsèque".

I.1.1. Semi-conducteur intrinsèque

Un semi-conducteur est dit intrinsèque, lorsqu'il est pur ou ne comporte aucune impureté chimique, c'est un semi-conducteur parfait, sans défauts structuraux avec un nombre d'électrons dans la bande de conduction est égal au nombre de trous dans la bande de valence.

I.1.2. Semi-conducteur extrinsèque

La présence d'éléments dopants dans la matrice du composé modifie ses propriétés électriques on distingue deux types:

a) Semi-conducteur type n

Les atomes dopants (les donneurs) se substituent avec des atomes du réseau et fournissent un électron à la bande de conduction. L'augmentation de la concentration en électrons libres engendre un déplacement du niveau de Fermi du matériau vers la bande de conduction figure I.2.

b) Semi-conducteur type p

Les éléments dopants (les accepteurs) présentent un manque d'électron par rapport à la matrice et captent un électron de la bande de valence, ce qui leurs permettent d'accroître le nombre de trous dans la bande de valence et le niveau de Fermi se déplace vers la bande de valence. Le dopage introduit des niveaux donneurs E_d ou accepteur E_a comme il est montré sur la figure I.2.

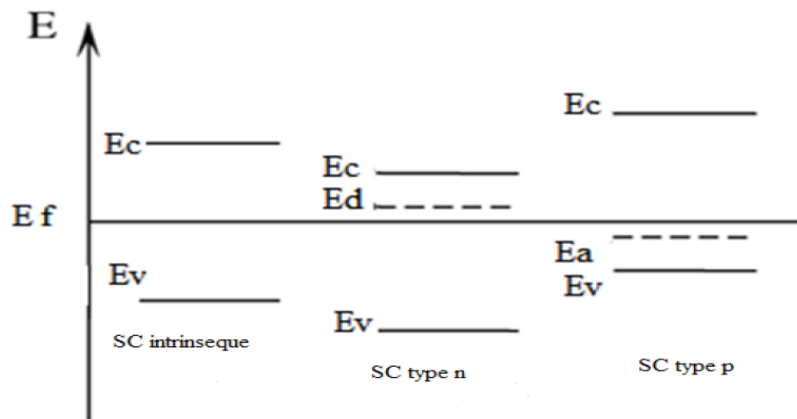


Figure I. 2. Diagramme de bande pour un semi-conducteur intrinsèque et extrinsèque

1.2.Généralités sur la Kasterite CZTS

La CZTS ($\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$) est un semi-conducteur quaternaire à gap direct du type $\text{I}_2\text{-II-IV-VI}_4$, il est composé de matériaux abondants, non toxiques et peu coûteux. La disponibilité de cuivre, de zinc, de l'étain et du soufre sur la croûte de notre terre sont de 50 ppm, 75 ppm, 2,2 ppm et 260 ppm respectivement. Pendant ce temps, la disponibilité de l'indium est de 0,049 ppm sur la croûte de la terre qui est relativement très faible par rapport au zinc et de l'étain.[5]

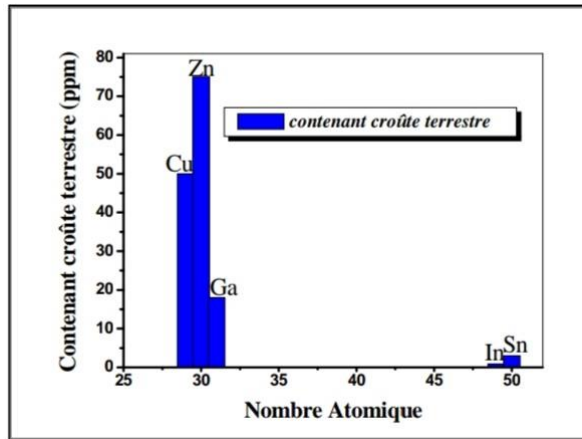


Figure I. 3. Eléments utilisés dans la cellule solaire à base de CIS et CZTS Existant dans la croûte terrestre.

I.3. Propriétés du Cu_2ZnSnS_4

I.3.1. Propriétés structurales

Le matériau Cu_2ZnSnS_4 cristallise généralement dans la structure Kësterite (groupe d'espace I-4), ou la structure stannite (groupe d'espace I-42m). Ces deux modèles structuraux sont très proches et de structures tétraogonales, la première différence est la répartition des cations Cu^+ et Zn^{2+} dans les plans perpendiculaires à l'axe 'c' : alternance de plans (Cu-Sn)/(Cu-Zn) dans la structure kestërite, alternance de plans (Zn-Sn)/(Cu-Zn) dans la structure stannite. L'anion S^{2-} se trouve sur une position particulière (x, x, z) dans la stannite, alors qu'il occupe une position générale (x, y, z) dans la kestërite[6] . (voir figure I-4).

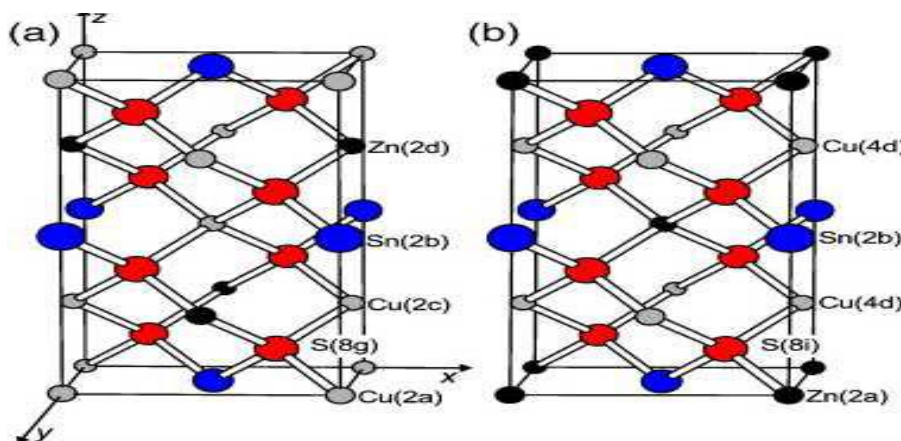


Figure I. 4. Structures cristallographiques de Cu_2ZnSnS_4 selon les modèles kestërite (à gauche) et stannite (à droite)

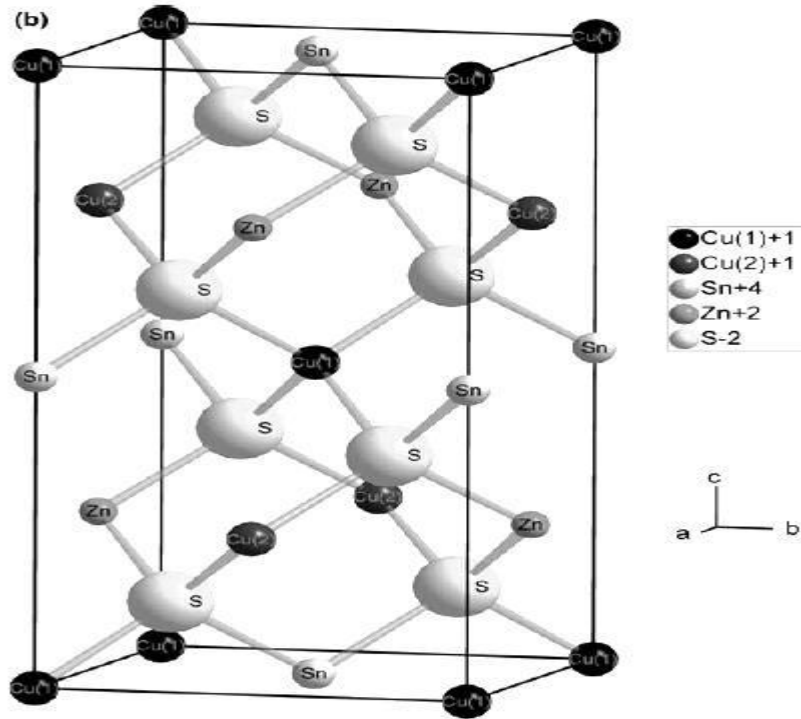


Figure I. 5. Maille élémentaire de CZTS [3].

Atome	Notation Wyckoff	Position
Cu	2a	(0, 0, 0)
	2c	(0, 1/2, 1/4)
Zn	2d	(1/2, 0, 1/4)
Sn	2b	(1/2, 1/2, 0)
S	8g	(1/4, 1/4, 3/8)
		(3/4, 3/4, 3/8)
		(1/4, 3/4, 3/8)
		(3/4, 1/4, 3/8)
		(1/4, 1/4, 5/8)
		(3/4, 3/4, 5/8)
		(1/4, 3/4, 7/8)
		(3/4, 1/4, 7/8)

Tableau I. 1. Coordonnées des atomes de la maille élémentaire de CZTS [7].

1.3.2 Propriétés électriques

Les principales caractéristiques électriques des matériaux semi-conducteurs résultent des déplacements des porteurs de charge sous l'effet d'un champ électrique, ou magnétique (conductivité électrique, effet Hall, photoconductivité,...). Pourtant, ces déplacements sont gouvernés par les collisions des porteurs de charge avec les ions, les impuretés ou les défauts du réseau cristallin [7,8].

La plupart des valeurs rapportées de la résistivité de CZTS varient de $\sim 10^{-3} \text{ cm} \cdot \Omega$ à $10^1 \text{ cm} \cdot \Omega$, mais il y a aussi des valeurs de résistivité plus élevées que $10^4 \text{ cm} \cdot \Omega$ ont été également rapportées. On a rapporté que la concentration des porteurs de charge varie entre 10^{16} cm^{-3} à 10^{21} cm^{-3} . Les résultats de mesure de l'effet de hall ont prouvé que la mobilité dans les couches de CZTS a changé simplement de $0.1 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ à $30 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, alors que la plupart des valeurs éditées étaient dans la gamme de $1 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ à $10 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$. [7]

Densité de porteur (cm^3)	Mobilité (cm^2/Vs)	Résistivité ($\Omega \text{ cm}$)	Méthodes	Références
8.2×10^{18}	6.3	0.16	Pulvérisation Cathodique	[9]
8.0×10^{18}	6.0	0.13	Sulfuration	[10]

Tableau I. 2.. Les propriétés électriques des composés CZTS.

1.3.3 Les propriétés optiques

La $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ dans sa phase Kesterite présente un gap de 1.5 eV et un coefficient d'absorption supérieur à 10^4 cm^{-1} . Expérimentalement, on montre cependant que l'énergie du gap du matériau CZTS n'a pas une valeur précise fixe, mais dépend plutôt de la méthode d'élaboration et surtout de la pureté du composé final. [11]

1.4. Avantages et inconvénients des entités photovoltaïques à base de CZTS

1.4.1. Les avantages de CZTS

- Un gap de 1.5 eV.

- L'indice de réfraction est de 2.07.
- Le coefficient d'absorption est de l'ordre de 10^4 cm^{-1} .
- Des éléments constitutifs de CZTS sont abondants et donc à faible coût et non-toxiques.

I.4.2. L'inconvénient majeur

- Seul le faible rendement des cellules CZTS pose actuellement le problème.

I.5. Les applications de CZTS

La $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ est un semi-conducteur à gap direct dont l'énergie de la bande interdite est de 1,4 eV à 1,5 eV, proche de la valeur optimale pour les applications photovoltaïques. Son coefficient d'absorption optique élevé ($\alpha > 10^4 \text{ cm}^{-1}$) et sa conductivité de type p, c'est un matériau prometteur pour les cellules solaires en couches minces. Les cellules photovoltaïques à bases de CZTS sont constituées de plusieurs couches. La structure la plus couramment rencontrée est représentée sur la figure I.6 [12]. La technologie à base de CZTS utilise des matériaux qui permettent d'éviter les métaux lourds et sont facilement disponibles à coût moindre.

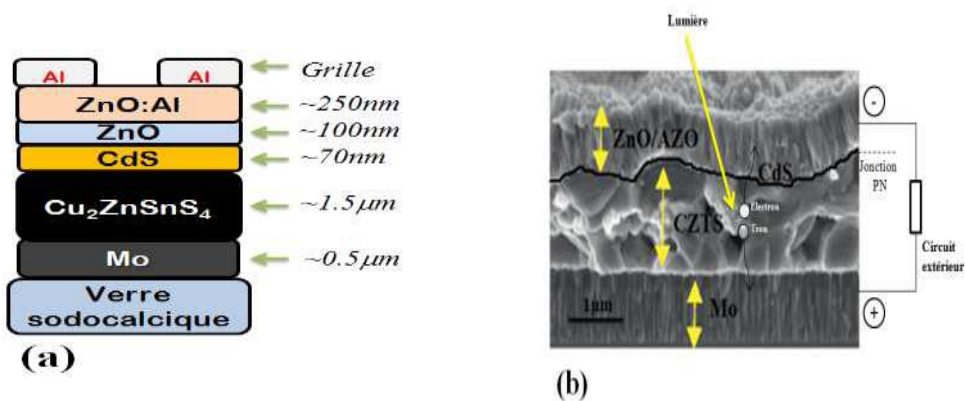


Figure I. 6. Structure classique en coupe d'une cellule solaire en couches minces à base de CZTS:(a) schéma, (b) Image au microscope à balayage (MEB).

*Chapitre II : Le procédé
Sol-Gel et Spray-Pyrolyse*

Pratiquement, il y a deux grandes méthodes de dépôt de films minces: les méthodes physiques, telles que la pulvérisation, l'évaporation et les méthodes chimiques, comme la chemical vapour deposition (CVD). La classification des méthodes est présentée sur le schéma de la figure II.1.

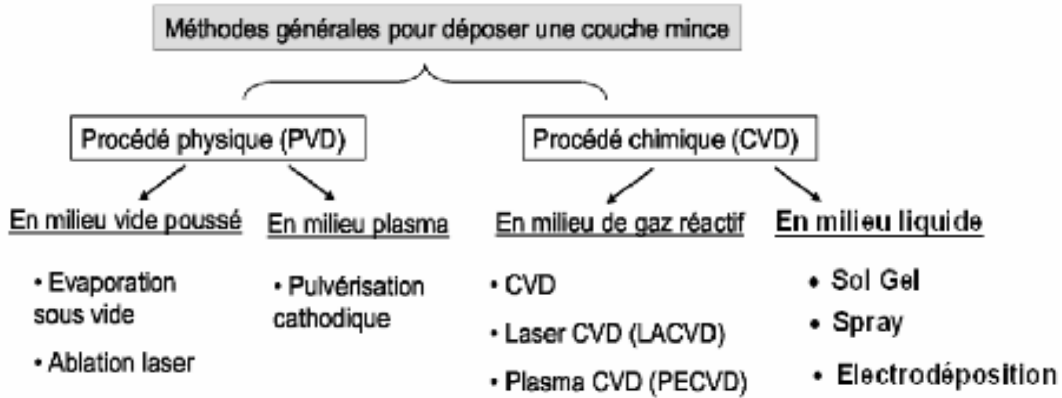


Figure II. 1. Processus de dépôt de couches minces.

II.1. Le procédé sol gel

La synthèse des couches minces de CZTS basée sur l'approche sol-gel a été rapportée pour la première fois en 2007 par Tanaka et al. [13]. C'est une technique qui consiste à déposer sur un substrat une solution contenant des précurseurs moléculaires dissous dans un solvant. Trois étapes sont impliquées dans la synthèse des couches minces de CZTS par cette approche. Il s'agit dans un premier temps de la préparation d'une solution de précurseurs contenant des ions. Cette solution est ensuite déposée sur un substrat préalablement nettoyé. Le spin coating et le dip coating sont les deux procédés généralement utilisés pour le dépôt de la solution préparée sur le substrat. La dernière étape consiste à effectuer un recuit sous une atmosphère de soufre ou de sélénium afin d'obtenir des couches minces de CZTS ou de CZTSe.

II.1.1. Principe

Cette technique s'effectue dans des conditions de chimie douce à des températures plus basses que celles des voies classiques de synthèse. Ces procédés peuvent être utilisés dans différents domaines d'élaborations de matériaux permettant la synthèse de céramique et de verre. La transition sol-gel est l'étape du changement de phase, d'un état liquide vers un état solide. Sous l'effet des réactions d'hydrolyse et de condensation, il consiste tout d'abord à

former une suspension stable (sol) à partir de précurseurs chimiques en solution. Ces sols vont évoluer au cours de l'étape de gélification par une suite d'interactions entre les espèces en suspension et le solvant pour donner naissance à un réseau solide tridimensionnel. Le système est alors dans l'état gel « humide ». Ensuite ce gel est transformé en matière sèche et amorphe soit par évacuation des solvants dans des conditions supercritiques conduisant à la formation d'un aérogel, soit par simple évaporation sous pression atmosphérique menant à la formation d'un xérogel qui est généralement plus dense qu'un aérogel. A partir d'une même solution, le matériau obtenu prend des différentes formes dépendant du mode de séchage du gel (poudres, fibres, composites, couches minces, (Figure II.2) [14].

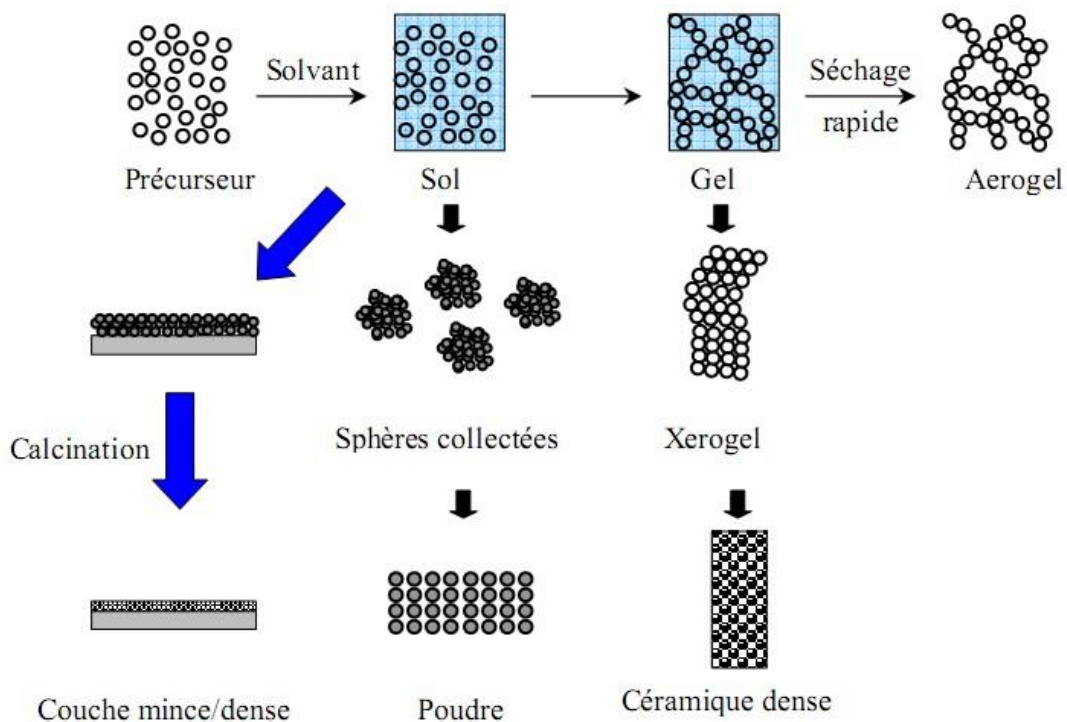


Figure II. 2. Diversité des matériaux sol-gel et de leur mise en forme [15].

II.1.2. Réactions mises en jeu

Les réactions chimiques fondamentales dans le procédé 'Sol-Gel' sont l'hydrolyse et la condensation.

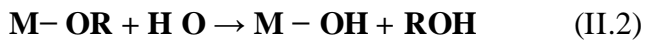
II.1.2.1. L'hydrolyse

Le précurseur est hydrolysé par **la réaction simplifiée** suivante:

- Précurseur inorganique:

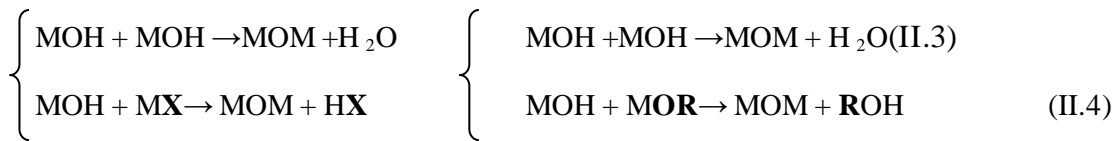


- Précurseur organo-métallique



II.1.2.2 . Condensation

Cette étape est suivie par la réaction de l'hydrolyse, et permet la formation de liaisons M-O-M ou M-OH-M et construisent ainsi progressivement le réseau de l'oxyde métallique [16] Les réactions de condensation, peuvent alors se produire entre deux ions métalliques hydrolysés ou entre un ion métallique hydrolysé et un alcoxyde (ou un sel inorganique) non hydrolysé [17].



II.1.3. Procédés de dépôt

Le dépôt des couches minces élaborées par voie sol-gel peut être réalisé de deux manières différentes :

II.1.3.1. La technique « dip-coating » ou trempage-retrait

Elle consiste à tremper le substrat verticalement et directement dans la solution à déposer, ensuite le revêtement s'effectue par tirage lent avec une vitesse constante dans, des conditions contrôlées.

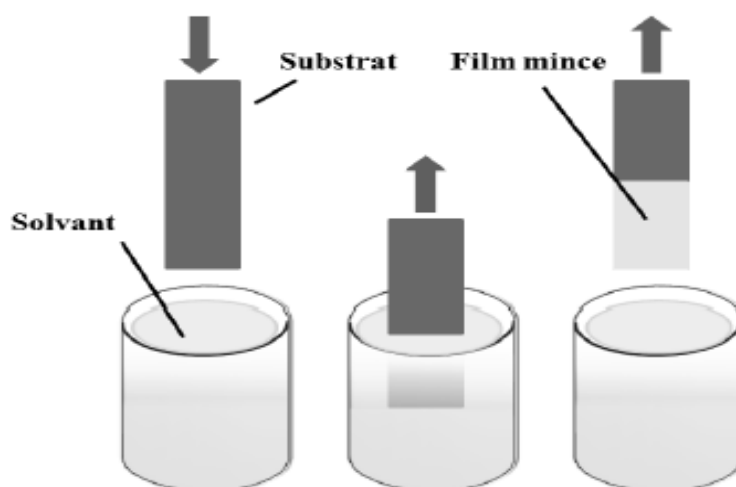


Figure II. 3. Dépôt de couches minces par trempage-tirage [18].

Cette technique a l'avantage d'être facile à réaliser, elle nous permet de réaliser en une seule opération des dépôts sur les deux faces et d'obtenir un film d'épaisseur uniforme [19]. L'évolution de l'épaisseur du film dépend de la vitesse de tirage, la viscosité du sol et les conditions de dépôt (la température et l'humidité).

II.1 .3.2. Spin-coating ou Centrifugation

Le " spin-coating " (figure II.4) : consiste à verser le sol ou le gel sur un substrat mis en rotation par une tournette. Le liquide en excès est éjecté sous l'action de la force centrifuge. L'épaisseur du dépôt est fonction de la vitesse de rotation du substrat et du temps de dépôt. Cette technique a l'avantage d'être facilement mise en œuvre; elle donne d'excellents résultats sur les substrats plans de petites surfaces (quelques cm²) [20].

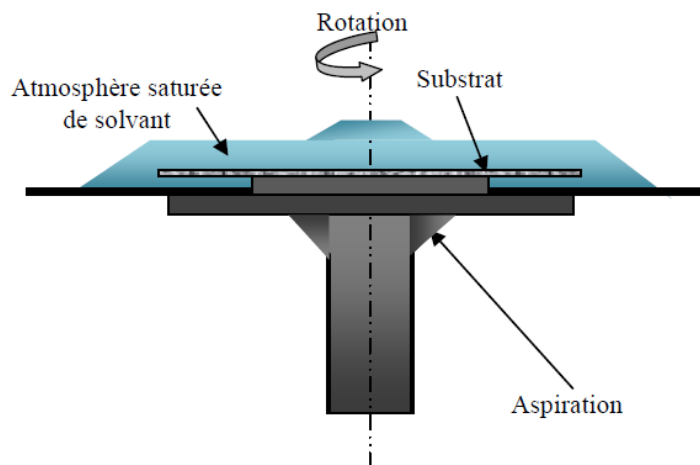


Figure II. 4 Dépôt de couches minces par centrifugation.

II.1 .4. Avantage et inconvénient du procédé sol-gel

a) Les avantages du procédé sol-gel sont

- Processus à basse température qui peut être utilisé pour déposer des films d'oxydes minéraux sur des fonds sensibles à la chaleur.
- Présente l'avantage d'être assez simple à mettre en œuvre: permet d'élaborer des matériaux de différentes formes (nanoparticules, nano-fils ou nano-tiges, couche mince, massif) ;
- La facilité d'ajuster la quantité des différents constituants des films pour la méthode du dosage des précurseurs.

b) Les inconvénients du procédé sol-gel sont

- Utilisation d'une grande quantité du solvant.
- Le procédé est difficile à contrôler et le temps de processus est long.
- L'épaisseur de dépôt faible. Ainsi une itération des étapes d'étalement et d'évaporation des solvants doit être effectués afin d'obtenir une épaisseur de plusieurs couches, ce qui multiplie les risques d'éclatement car les premières couches subissent tous les recuits successifs d'évaporation.

II.2. Spray-pyrolyse

Le spray pyrolyse est l'une des premières techniques hors vide, tentée pour le dépôt des couches minces de CZTS.

II.2.1. Principe de base de la technique spray-pyrolyse

Le spray-pyrolyse, consiste à entraîner un aérosol, créé à partir d'une solution chimique contenant les précurseurs, sur un substrat chaud, une couche mince sera déposée par réaction chimique après impact de l'aérosol sur la surface du substrat. La différence entre les techniques sprays, provient de la génération de l'aérosol. **Un aérosol:** est un ensemble de particules, solides ou liquides, d'une substance chimique en suspension dans un milieu gazeux ; dans notre cas, il s'agira de fines gouttelettes de solvant(liquide)contenant les précurseurs chimiques que l'on souhaite a cheminer jus qu'au substrat. Dans la plupart des cas, la solution mère consiste à mettre un composé organométallique en solution dans un solvant.

II.2.2. principe de spray ultrasonique

Une génération ultrasonique d'aérosol créé un brouillard en soumettant la solution chimique initiale à des vibrations hautes fréquences générées par un transducteur ultrasonique, pour générer les aérosols souhaités. La taille des gouttelettes obtenues, est très souvent distribuée avec des diamètres s'étalant de 1 à 10 μm [22].Il s'agit d'un bâti réalisé au laboratoire DAC de l'université de sétif-1, pour déposer des couches minces « spray pyrolyse ultrasonique ». Ce dernier est construit à partir de dispositifs simples auxquels nous avons apporté certaines modifications. Le schéma de principe du système de dépôt que nous avons utilisé est montré sur la figure II.5.

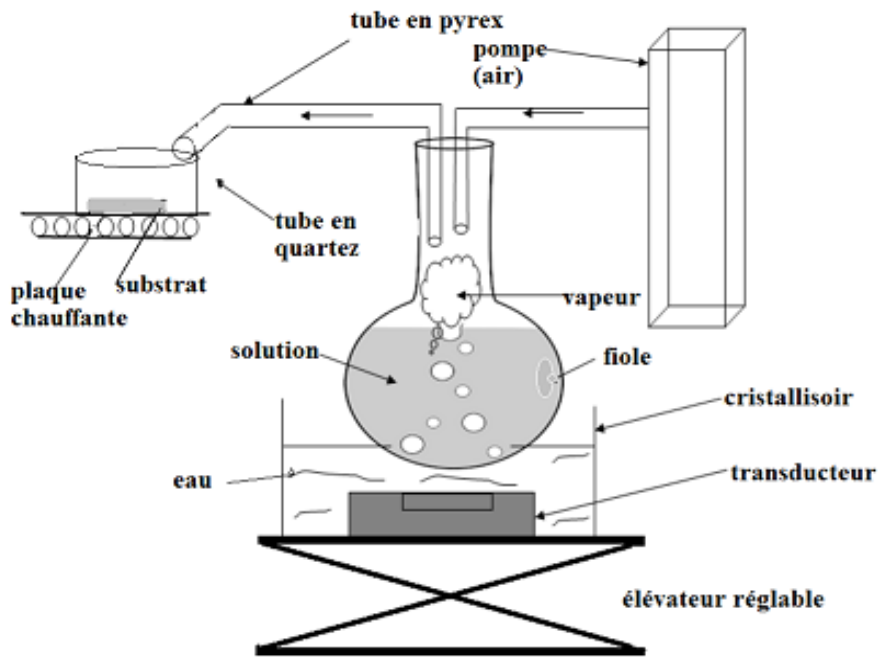


Figure II. 5. Schéma du dispositif de la technique Spray pyrolyse ultrasonique monté au laboratoire [21].

Les principaux éléments du montage sont:

Un compresseur: (dans notre cas c'est une pompe) qui permet de comprimer le gaz porteur (dans notre cas c'est l'air). Celle-ci assure la poussée de l'aérosol jusqu'au bec.

Une enceinte: Un ballon qui sert à porter la solution ayant deux orifices, l'un relié au compresseur (la pompe) est assure l'arrivée de l'air, sur l'autre en fait sortir un tube en quartz se termine par bec d'éjection de gouttelettes plongé jusqu'au substrat.

Un atomiseur: qui, sous l'effet de la pression, permet de transformer l'aérosol de départ en jet de gouttelettes très fines.

Un porte substrat: formé par une plaque chauffante dont la température peut être régulée à l'aide d'un thermorégulateur et un thermocouple.

II.2.3. principe de spray pneumatique

Dans ce cas, c'est l'effet de la pression du gaz porteur qui provoque la pulvérisation du liquide en fines gouttelettes.

*Chapitre III : Les
techniques de
caractérisation.*

L'objet de ce chapitre est de décrire les différentes méthodes expérimentales ayant permis la caractérisation des couches minces de CZTS. Ainsi seront successivement décrits les équipements utilisés et les différentes méthodes de caractérisations.

III.1. Diffraction des Rayon X(DRX)

Le principe 'DRX' est fondé sur la diffraction des rayons X sur la matière qu'on veut analyser. Les interférences des rayons diffusés peuvent être alternativement constructives ou destructives. La condition de diffraction est satisfaite que dans le cas où ces interférences sont constructives, les directions dans le cas de ces interférences sont appelées pics de diffraction. Les directions peuvent être déterminées facilement par l'intermédiaire de la loi de Brag donnée par

$$2d_{hkl} \sin\theta = n\lambda \quad (\text{III.1})$$

λ : est la longueur d'onde du faisceau monochromatique incident (en Å)

θ : représente le demi-angle de déviation (en rad) et d_{hkl} correspond à la distance inter-réticulaire (en Å) entre deux plans cristallographiques successifs aux indices (h, k,l).

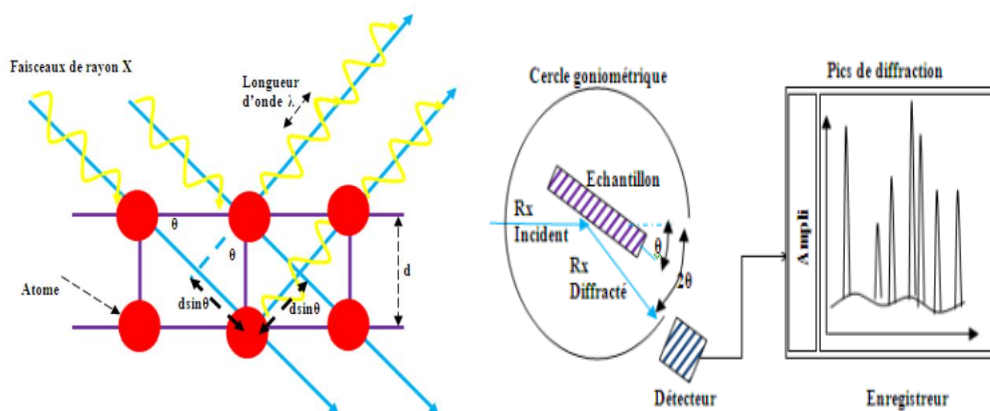


Figure III. 1.Principe de la diffraction des rayons X par un réseau cristallin [23].

III.2. Spectroscopie Raman

La spectroscopie Raman utilise le principe de la diffusion inélastique de la lumière par la Matière. Ce phénomène de diffusion correspond à la création, par l'onde électromagnétique Excitatrice, d'un dipôle induit qui rayonne. Ce dipôle induit est lié à la polarisabilité de la molécule et correspond à une déformation de son nuage électronique. Pour qu'il y ait diffusion Raman, il faut qu'il y ait une variation de la polarisabilité de la molécule (en

quelque sorte, que le nuage électronique de l'édifice moléculaire se déforme) lors de la vibration. L'excitation est monochromatique, et possède donc une énergie fixe, supérieure en ordre de grandeur à celle des vibrations moléculaires. Lors de l'interaction, la molécule est portée dans un état énergétique élevé et de courte durée de vie: il est appelé « état virtuel », figure III.2. Lors de la désexcitation de la molécule, trois cas peuvent être envisagés.

- La désexcitation se fait à la même fréquence que l'excitation: c'est la diffusion Rayleigh élastique.
- La désexcitation se fait à une fréquence inférieure à celle de l'excitation : c'est la diffusion Raman inélastique Stokes.
- La désexcitation se fait à une fréquence supérieure à celle de l'excitation: c'est la diffusion Raman inélastique anti-Stokes.

Pour les deux derniers cas, la différence énergétique correspond à un écart d'énergie vibrationnelle.

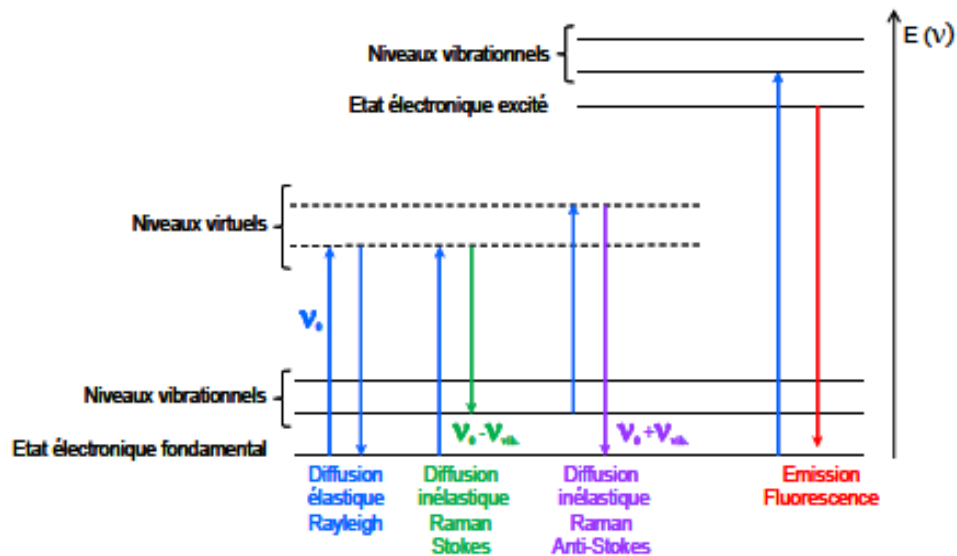


Figure III. 2 Différentes transitions énergétiques pouvant avoir lieu lors d'une analyse Raman.

III.3. Microscopie électronique à balayage MEB

C'est une technique qui permet l'observation de la topographie de la surface de l'échantillon sous forme d'image lumineuse, avec une très haute résolution de l'ordre du nanomètre. Le principe de cette technique est comme suit, le faisceau d'électron est produit par un canon à électron qui joue le rôle d'une source, ce faisceau est réduit par des lentilles électromagnétiques, qui permettent de former un faisceau d'électron monocinétique très fin (10 Å à 200 Å). Pour exciter l'échantillon à étudier le faisceau d'électron est focalisé sur la surface de l'échantillon sous forme d'une tache 'Spot' de quelque nanomètre appelé 'sonde électronique' à l'aide de bobines défectrices qui sont disposées convenablement, permet de déplacer le faisceau et de balayer la surface de l'échantillon.



Figure III. 3. Microscopie électronique à balayage MEB

Les différents signaux émis sont captés par des détecteurs spécifiques, après l'amplification de signal, une image est reconstruite point par point de la surface de l'échantillon sur l'écran de visualisation [24].

III.4. Spectrophotomètre UV-VIS

La spectrophotométrie UV-Visible, est une technique permettant d'étudier les propriétés optiques des couches minces. Elle consiste à envoyer un faisceau de rayons lumineux monochromatique sur la couche et à mesurer l'intensité du rayon transmis ou réfléchi. Avant d'atteindre la couche, le rayon est préalablement séparé en deux. Ainsi, l'un des deux rayons ainsi obtenus servira de référence, afin d'évaluer le pourcentage de lumière transmis par la couche [25].

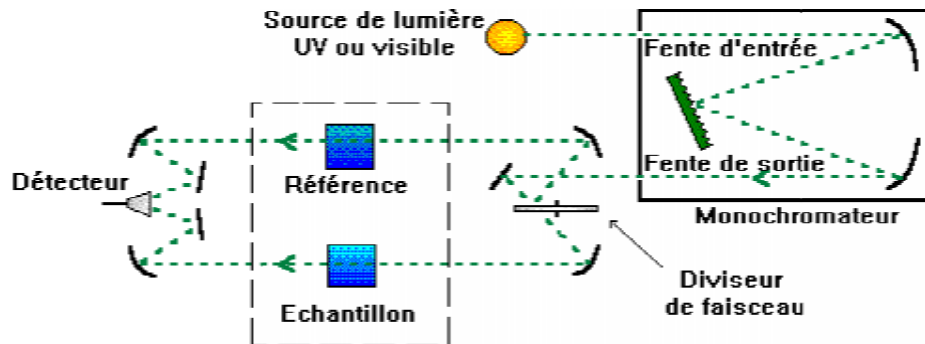


Figure III. 4 Principe de la spectroscopie UV.VIS.

III.4 .1 Mesure de l'épaisseur

Nous avons utilisé la méthode des franges d'interférences (décrite ci-dessous) pour estimer les épaisseurs de nos échantillons les constantes physiques utilisées dans les calculs sont définies dans la figure III.5. n_0 est l'indice de l'air, T est la transmission, n et s sont les indices de réfraction du film et de substrat respectivement.

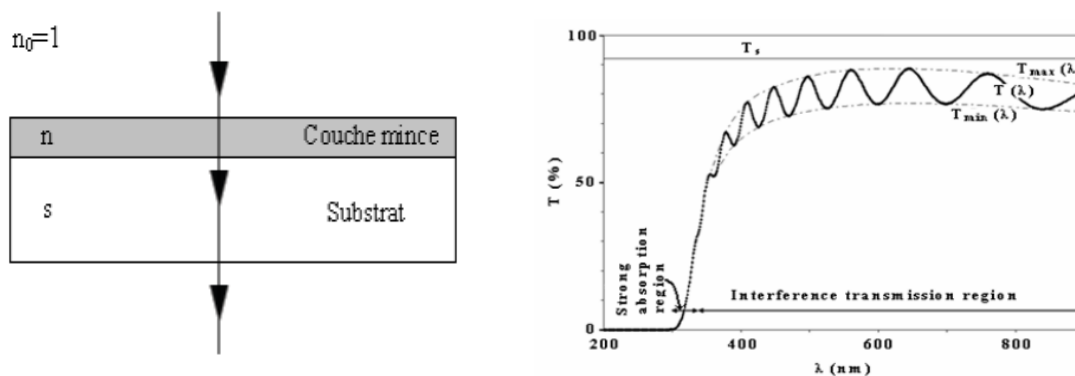


Figure III. 5 Couche mince absorbante déposé sur un substrat transparent épais

Dans le cas où la couche est épaisse et lisse, des réflexions multiples de la lumière se font entre la surface de la couche/ substrat et couche /air, ce qui provoque l'apparition, sur le spectre de transmission, des franges avec des minima et des maxima d'interférences en fonction de la longueur d'onde, (figure III.5.b). Soient n_1 et n_2 les indices de réfractons de la couche pour deux maximums adjacents correspondant aux longueurs d'onde λ_1 et λ_2 . L'épaisseur de la couche est donnée par

$$d = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2(\lambda_1 n_2 - \lambda_2 n_1)} \quad (\text{III.2})$$

n_1 et n_2 sont tirés de la relation

$$n_{12} = \sqrt{N_{12} + \sqrt{N_{12}^2 - S^2}} \quad (\text{III.3})$$

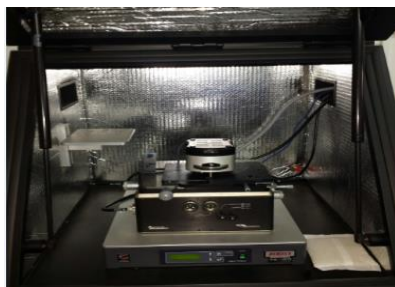
N peut être calculé par la relation

$$N_{12} = 2S \left[\frac{(T_{max12} - T_{min12})}{T_{max12} T_{min12}} \right] + \left(S^2 + \frac{1}{2} \right) \quad (\text{III.4})$$

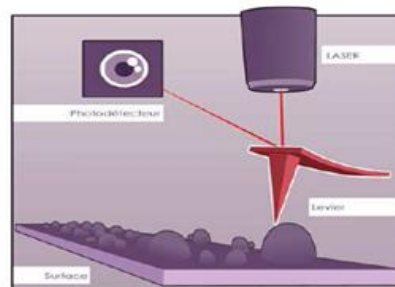
T_{min} et T_{max} : la transmission minimale et maximale respectivement pour la même longueur d'onde.

III.5. Microscopie à force atomique (AFM)

La microscopie à force atomique (AFM) est une technique permettant d'étudier la topographie de surface des échantillons. Il se base sur les interactions (le plus souvent répulsives, parfois attractives) entre les atomes d'une pointe fine et les atomes de la surface de l'échantillon. Les forces impliquées sont de l'ordre du nanonewton. La pointe, très fine, est reliée à un micro-levier. Grâce à un tube piézo-électrique qui déplace la pointe dans toutes les directions et de mesurer les forces d'interaction entre celle-ci et la surface de l'échantillon [24]. Cette force d'interaction est évaluée en mesurant la déflexion verticale du levier, La déflexion du micro-levier est mesurée par une détection optique. Un faisceau d'une diode laser est focalisé sur l'extrémité de celui-ci puis réfléchi dans une photodiode séparée en deux ou quatre quadrants. La déflexion du levier provoque un déplacement du faisceau réfléchi sur la diode et donc une variation de la différence de tension mesurée entre les différentes parties du photo-détecteur.



A



B

Figure III. 6A. Dispositif AFM (Sétif 1) B-Illustration du principe du microscope à Force Atomique.

III.6. Mesures de résistivité 4 pointes

C'est une méthode simple et rapide qui mesure la résistivité des couches minces. Elle est basée sur l'utilisation de quatre pointes (sondes) équidistantes en contact direct avec la surface de l'échantillon, placées soit linéairement, soit sous forme d'un carré. Le principe de la mesure est simple, il suffit d'injecter un courant (I) aux deux pointes extrêmes et de mesurer la tension (V) au niveau des deux pointes internes (figure III.7).



Figure III. 7 photo et Schéma représentatif du principe de la méthode des quatre pointes.

Puis, en exploitant la loi d'Ohm, nous pouvons déterminer directement la résistance carrée pour ensuite déduire la valeur de la résistivité. La formule utilisée pour le calcul est la suivante :

$$R_{\square} [\Omega] = C_f \frac{V}{I}$$

C_f : est un facteur qui traduit la dispersion des lignes de courant entre deux pointes, il dépend de la géométrie et les dimensions des matériaux.

Dans le cas général : $C_f \cong 4.532$ si les quatre pointes sont alignées, et $C_f \cong 9.06$ si les

4 pointes forment un carré [26].