

Techniques d'élaboration et de caractérisation

II.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons présenter des généralités sur les couches minces et les différentes méthodes de leur dépôt et les techniques de caractérisation.

II .2. Généralités sur les couches minces :

II.2.1. Définition d'une couche mince :

Par principe, une couche mince d'un matériau donné est un élément de ce matériau dont l'une des dimensions qu'on appelle l'épaisseur, a été fortement réduite, de telle sorte qu'elle varie de quelques nanomètres "nm" à quelques micromètres " μm ". [1] Cette très faible distance entre les deux surfaces limites entraîne une perturbation de la majorité des propriétés physiques. La différence essentielle entre le matériau à l'état massif et à l'état de couches minces est en effet liée au fait que, dans l'état massif, on néglige, généralement, le rôle des limites dans les propriétés, tandis que, dans une couche mince, ce sont au contraire les effets liés aux surfaces limites qui sont prépondérants. Il est assez évident que plus l'épaisseur sera faible et plus cet effet de bi dimensionnalité sera exacerbé, et qu'inversement lorsque l'épaisseur d'une couche mince dépassera un certain seuil l'effet des limites deviendra minime et le matériau retrouvera les propriétés bien connues du matériau massif [2].

II.2.2. Intérêt et caractéristiques des couches minces :

L'intérêt accordé aux couches minces provient essentiellement de l'utilisation économique des matériaux en rapport avec les propriétés physiques et de la simplicité des technologies mise en œuvre pour leur réalisation (élaboration facile, peu coûteuse...) [1]. Une Grande variété de matériaux est utilisée pour produire ces couches minces, on peut citer les Métaux, alliages, oxydes, les polymères... [2].

La seconde caractéristique essentielle d'une couche mince est quelle que soit la procédure employée pour sa fabrication, une couche mince est toujours solidaire d'un substrat sur lequel elle est construite.

Ainsi une couche mince d'un même matériau, de même épaisseur pourra avoir des propriétés Physiques sensiblement différentes selon qu'elle sera déposée sur un substrat isolant amorphe tel le verre, ou un substrat monocristallin de silicium par exemple [1][2].

II.2.3. Mécanismes de croissance des couches minces :

Tous les procédés d'élaboration de films minces se font en trois étapes :

- La production des espèces ioniques, moléculaires, atomiques appropriées.
- Le transport de ces espèces vers le substrat.
- Condensation sur ce même substrat : la nucléation, coalescence puis la croissance.

Les procédés de déposition de couches minces sont illustrés dans la figure suivante :

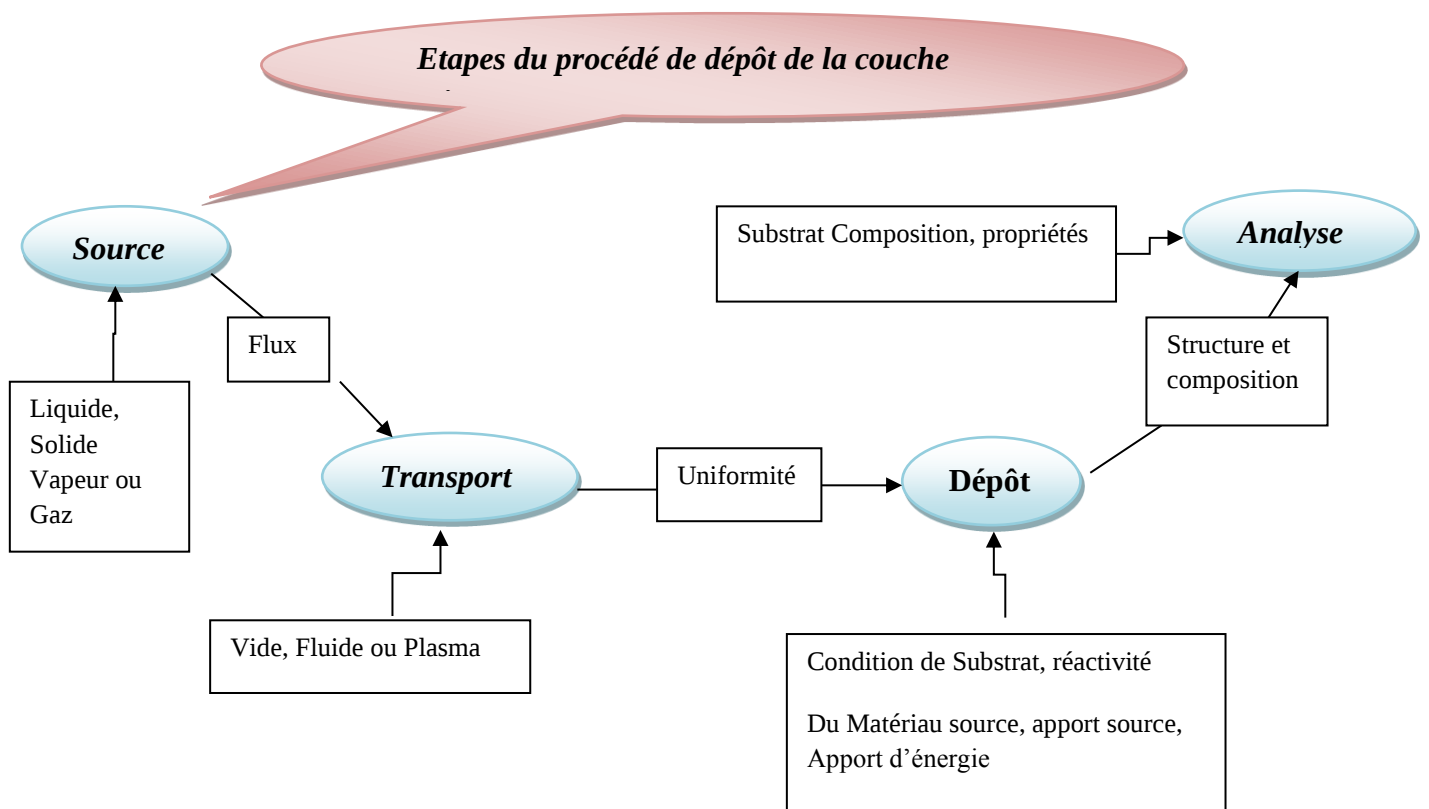


Figure. II.1 : Diagramme des étapes du procédé de fabrication de couches minces.

b) Nucléation :

C'est le phénomène qui accompagne les changements d'état de la matière et qui consiste en l'apparition, au sein d'un milieu donné, de points de transformation à partir desquels se développe une nouvelle structure physique ou chimique. Les espèces pulvérisées arrivant sur le substrat ne sont pas thermodynamiquement en équilibre avec le substrat et se déplacent sur toute la surface de celui-ci. Dans cet état, elles interagissent entre elles et forment ce que l'on appelle de "clusters". [3] Ces "clusters" appelés également nuclei ou îlots, sont instables et tendent à se désorber.

Toutefois, si les paramètres de dépôt sont tels que les îlots entrent en collision les uns avec les autres, ils se développent dans les trois dimensions. Pour une certaine taille, les îlots deviennent thermodynamiquement stables, on dit alors que le seuil critique de nucléation a été franchi [4].

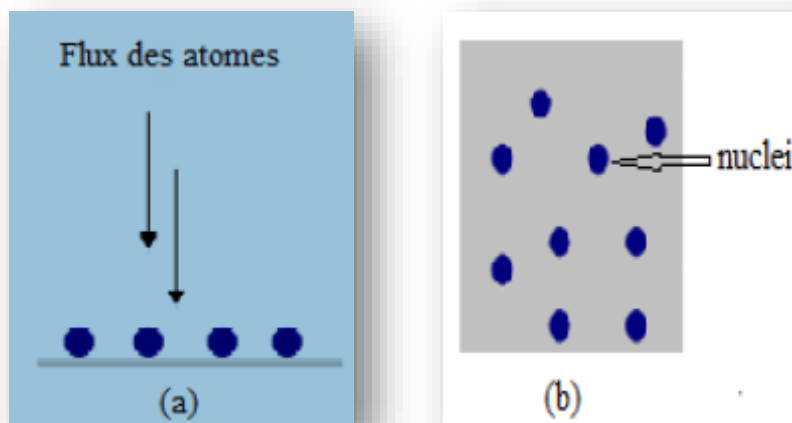


Figure. II.2: Schéma de la nucléation des couches minces.

(a) : l'arrivée des atomes sur un substrat. (b) : la morphologie du substrat [5].

a) Coalescence :

Les nucleus croissent en taille mais aussi en nombre jusqu'à atteindre une densité maximale de nucléation. Celle-ci ainsi que la taille moyenne de ces nucleus aussi appelés îlots dépendent d'un certain nombre de paramètres tels que l'énergie des espèces pulvérisées, le taux de pulvérisation, l'énergie d'activation, d'adsorption, de désorption, de la diffusion thermique, de la température du substrat, de la topographie et de la nature chimique des substrats [3,6].

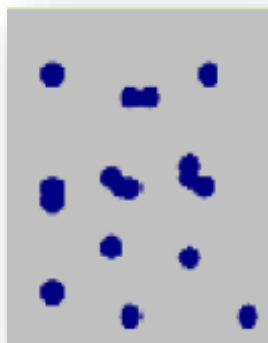


Figure. II.3 : schéma qui représente la coalescence des couches minces [5].

c) Croissance :

La dernière étape dans le procédé de fabrication du film est l'étape de coalescence dans laquelle les îlots commencent à se regrouper. Cette tendance à former des îlots plus grands est améliorée par la croissance de la mobilité de surface des espèces adsorbées. Cette amélioration est obtenue en augmentant la température du substrat. Ces plus grands îlots croissent encore, en laissant des canaux et des trous sur le substrat. La structure du film dans cette étape change passant d'un type d'îlots discontinus en un type de réseaux poreux. Un film continu est formé en remplissant les canaux et les trous [5,6].

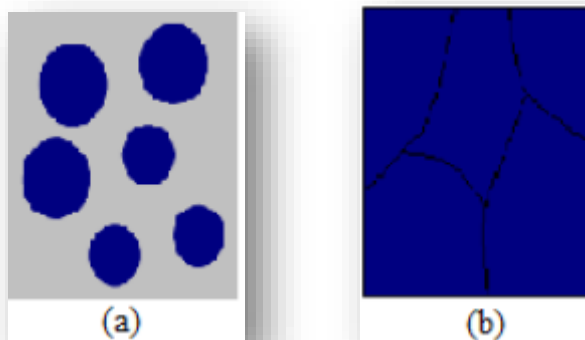


Figure. II.4: la croissance des couches minces. (a): étape après coalescence. (b) : la Croissance [5].

II.3. Techniques de dépôt des couches minces :

Il existe de nombreuses techniques de dépôt de la couche mince qui sont réparties en méthodes chimiques et méthodes physique. Les méthodes chimiques se scindent en deux avec les dépôts en solution et les dépôts en phase vapeur, pour les méthodes physiques on retrouve les techniques de dépôts classiques comme la pulvérisation sous toutes ses formes l'évaporation, l'ablation laser. La classification des méthodes est présentée sur le schéma de la figure II.5.

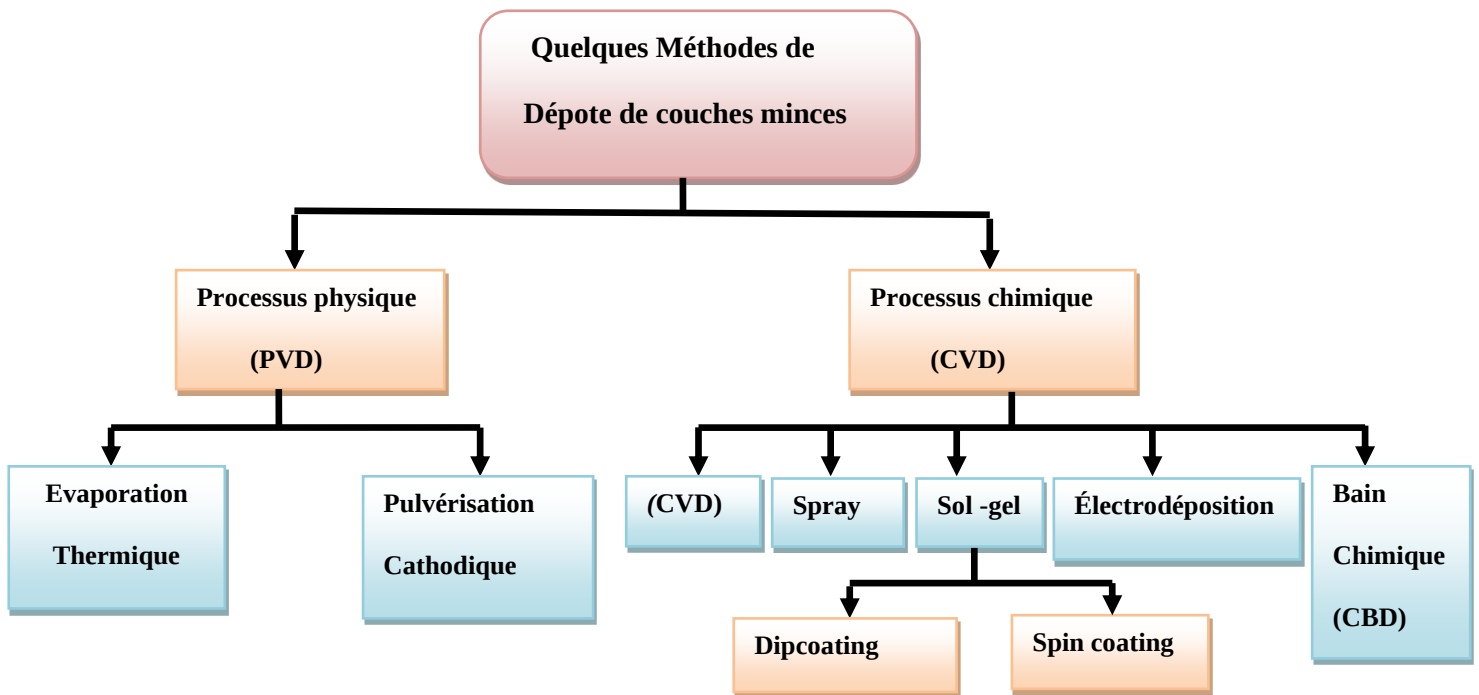


Figure. II.5 : Méthode générales de dépôt des couches minces sous vide.

II.3.1. Processus physique :

II.3.1.1. Pulvérisation cathodique :

La pulvérisation cathodique est une technique qui consiste à bombarder une cible (cathode) à l'aide d'un gaz neutre (en général l'argon) de manière à ce que les espèces éjectées de la cible viennent se déposer sur un substrat. Le bombardement a lieu sur la cible qui est placée sur la cathode attirant les ions positifs générés dans un plasma de gaz à basse pression [4,7].

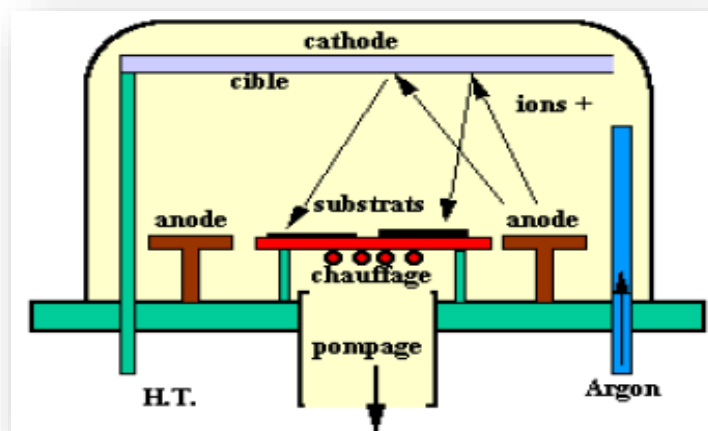


Figure. II.6 : Bâti de dépôt par pulvérisation cathodique [8].

En pulvérisation cathodique, on distingue la pulvérisation simple et la pulvérisation réactive [9].

Cette technique permet le dépôt de tous types de matériaux, simples ou composés, réfractaires, conducteurs ou diélectriques sur tous types de substrats qui acceptent une mise sous vide et un léger échauffement (60-70°C) [10].

II.3.1.2. L'évaporation thermique :

Cette méthode consiste simplement à évaporer ou à sublimer le matériau à déposer dans un creuset sous vide en le chauffant à haute température. Le matériau évaporé est déposé par condensation sur le substrat à recouvrir et pour ainsi former une couche sur le substrat [11].

L'évaporation du matériau source peut être obtenue, soit par effet joule, par induction de chaleur, par bombardement ionique ou électronique ou par faisceau laser.

Plus la pression est basse, plus les trajectoires des particules vaporisées seront rectilignes. Cette technique nécessite l'utilisation d'une puissance suffisante pour mettre en vapeur les composés les plus réfractaires [12].

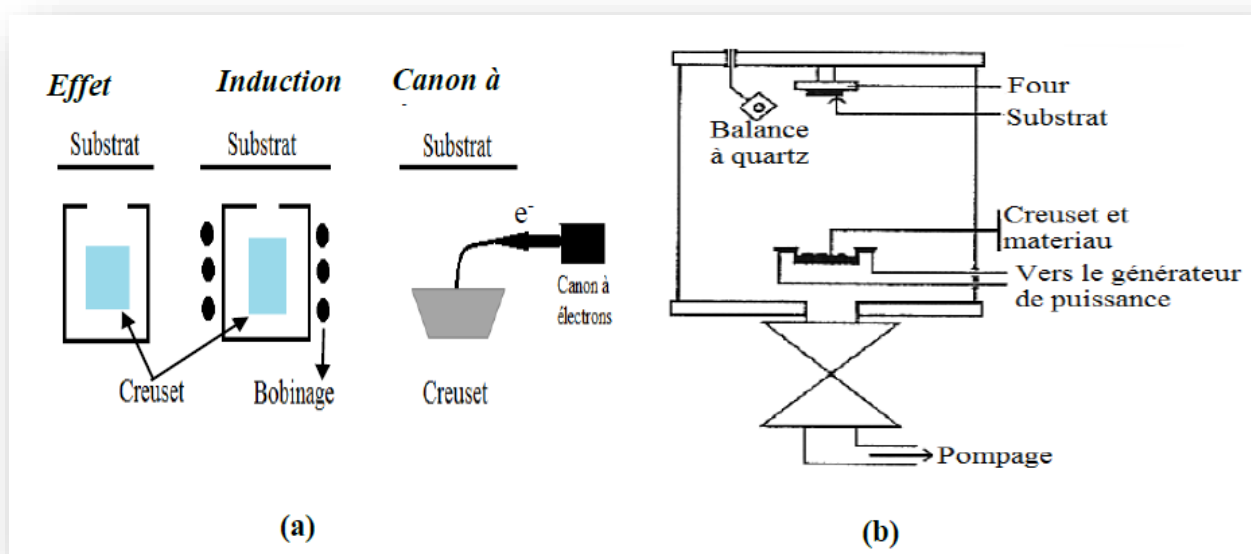


Figure : II.7: (a) Méthodes d'évaporation, (b) Bâti de dépôt par évaporation thermique [4].

II.3.2. Processus Chimique :

II.3.2.1. Dépôt par bain chimique (CBD) :

Le dépôt par bain chimique (Chemical Bath Déposition ; CBD) se rapporte au dépôt des films sur un substrat solide par une réaction produite dans une solution aqueuse. Le dépôt par bain chimique peut se produire de deux façons selon le mécanisme de dépôt : par nucléation homogène en solution ou par hétéro nucléation sur un substrat. Dans la nucléation hétérogène, les particules, ou même les ions individuels, peuvent adsorber sur le substrat.

L'énergie exigée pour former une interface entre les particules et le substrat solide est souvent inférieure à celle exigée pour la nucléation homogène. La nucléation hétérogène est donc énergétiquement préférée à la nucléation homogène [13].

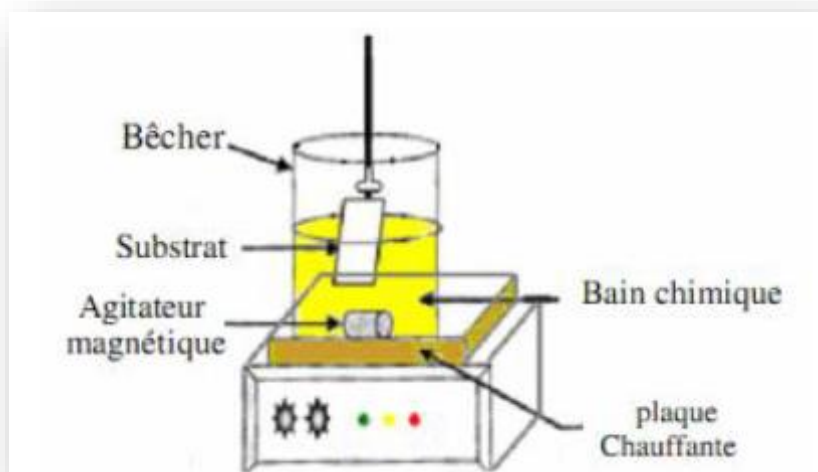


Figure. II.8: Schéma représentatif d'un équipement de dépôt par bain chimique [13].

II.3.2.2. Le dépôt par spray :

Le spray est une technique de dépôt utilisée pour préparer les films minces et épais. Une méthode très simple, n'exige pas de produits chimiques de haute qualité. Même des films multicouches peuvent être facilement préparés en utilisant cette technique [14,15].

L'équipement typique du spray se compose d'un atomiseur, une solution de précurseur, réchauffeur de substrat et un régulateur de température. Les atomiseurs ultrasoniques sont utilisés dans la technique de spray.

Le dépôt de couches minces par la technique spray se traduit par la pulvérisation d'une solution d'un sel de métal sur un substrat chauffé. Les gouttelettes arrivant sur le substrat conduisent à la formation d'un dépôt après décomposition et réaction chimique en surface [15].

II.3.2.2.1. Principe de la méthode spray :

Cette méthode consiste à pulvériser une solution sur un substrat chauffé à l'aide d'un atomiseur [10]. La température du substrat permet l'activation de la réaction chimique entre les composés. L'expérience peut être réalisée à l'air (si les matériaux utilisés sont inoffensifs) et peut être préparée dans une enceinte (ou bien une chambre de réaction).

La description de la formation des films par la méthode spray pyrolyse peut être résumée comme suit :

- Formation des gouttelettes à la sortie du bec.
- Décomposition de la solution des précurseurs sur la surface du substrat chauffé par réaction de pyrolyse [1].

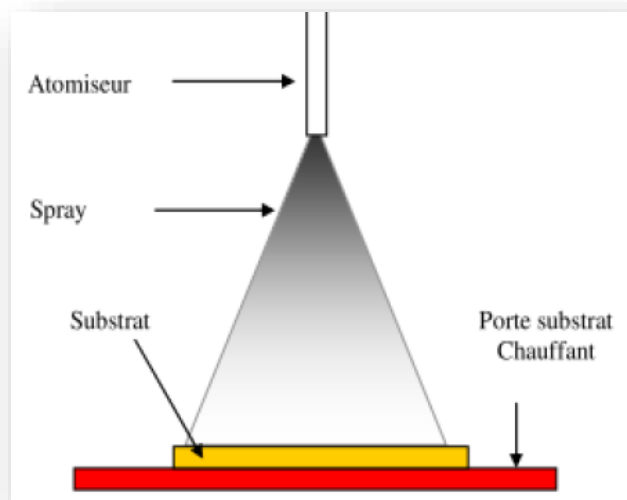


Figure. II.9: Schéma synoptique d'un équipement de dépôt par spray [15].

II.3.2.3. Le procédé sol-gel :

La première utilisation industrielle date des années 1930 par la firme allemande Schott, avec un brevet sur la fabrication de rétroviseur en 1939 [16].

Le principe de base du procédé sol-gel (correspondant à l'abréviation de « solution-gélification ») est le suivant : une solution à base de précurseurs en phase liquide, se transforme en un Solide par un ensemble de réactions chimiques de type polymérisation à basse température [17].

Le procédé sol-gel est l'une des méthodes de préparation des matériaux de type oxyde métallique tels que les céramiques et les verres [4].

Le processus sol-gel comprend trois étapes :

- Préparation de la solution de dépôt.
- Formation des couches minces par la méthode de trempage ou bien par la méthode de tournette.
- Traitement thermique [18].

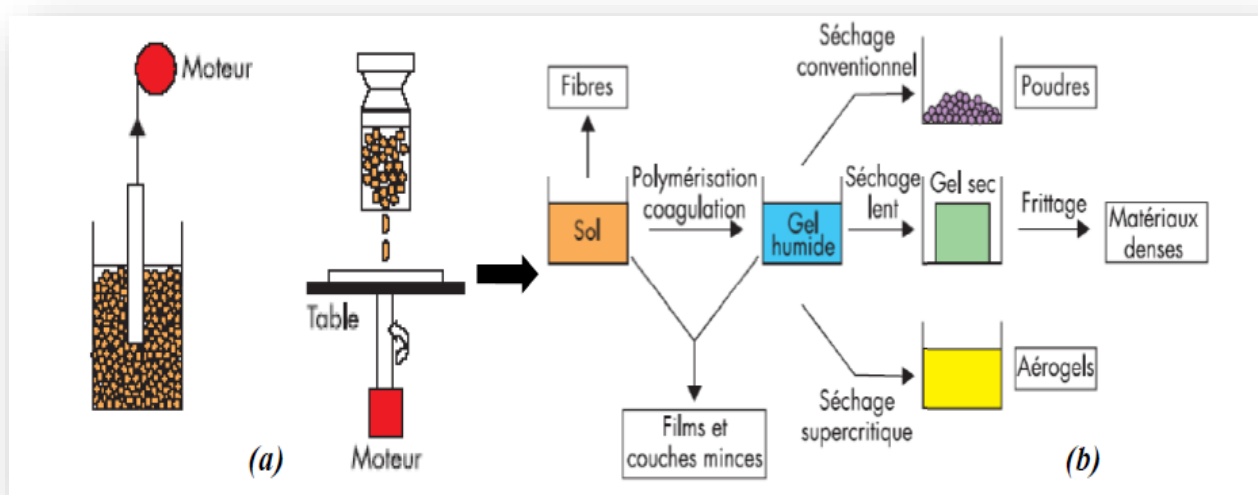


Figure. II.10: (a) Dip-coating et Spin-coating, (b) xérogel : séchage classique (évaporation Normale) [4].

II.3.2.3.1. Le dépôt par dip-coating :

Le principe est de plonger le substrat dans une solution contenant le précurseur. Après chaque trempage, le substrat est séché et recuit sous air ou sous atmosphère d'oxygène, ces deux opérations (trempage et recuit) sont répétées plusieurs fois afin d'obtenir des couches épaisses [18].

Les principaux paramètres qui affectent l'épaisseur du dépôt par ce procédé sont : la vitesse d'extraction, la concentration ainsi que la viscosité de la solution et le temps d'immersion. L'épaisseur du film s'accroît avec l'augmentation de ces derniers quatre paramètres cités précédemment, des conditions techniques, telles que la régularité du déplacement ou l'inclinaison du substrat, peuvent influencer dans des proportions plus ou moins importantes l'épaisseur des dépôts [19].

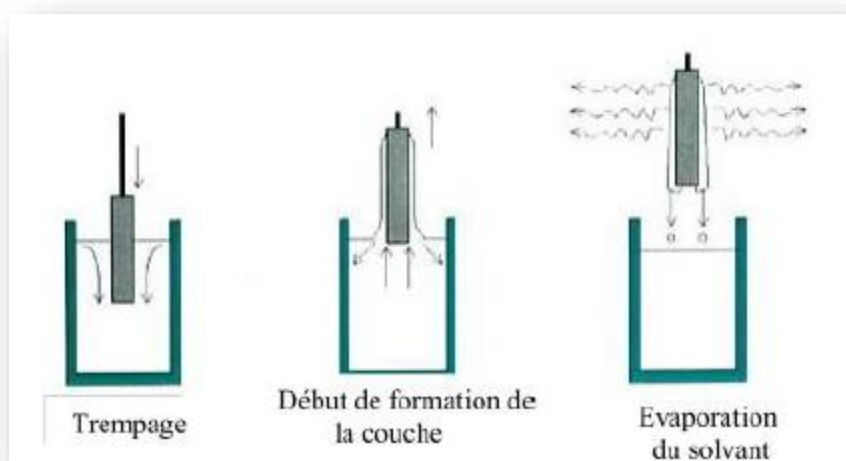


Figure. II.11 : Les différentes étapes de l'obtention d'un dépôt lors du dip-coating [18].

II.3.2.3.2. Le dépôt par Spin-coating :

Le procédé de centrifugation consiste à épandre une goutte de la solution (gélifiée) sur un substrat tournant. La solution est versée au centre du substrat manuellement ou mécaniquement. Cette technique repose sur l'équilibre entre les forces centrifuges contrôlées par la vitesse de rotation du substrat et les forces de viscosité déterminées par la viscosité de la solution. Le spin-coating est utilisé pour la fabrication de couches minces inférieures à $1\ \mu\text{m}$ [17].

- **Les étapes d'élaboration des couches minces par Spin-coating :**

Cette technique est réalisée généralement en quatre étapes principales suivant :

-1^{ère} étape : le dépôt de la solution.

Habituellement, la quantité déposée sur le substrat est de quelques gouttes. Il est important dans cette étape de s'assurer que la quantité du sol déposée est suffisante pour recouvrir toute la surface du substrat, et par la suite éviter la présence des zones non recouvertes en matière.

-2^{ème}étape : le début de la rotation.

Cette étape est caractérisée par l'expulsion de la solution de la surface vers l'extérieur par le mouvement de rotation.

-3^{ème} étape : la rotation à vitesse constante permet l'éjection de l'excès de liquide sous forme de gouttelettes et la diminution de l'épaisseur du film de façon uniforme.

-4^{ème}étape : l'évaporation des solvants les plus volatils qui accentue la diminution de l'épaisseur du film déposé [2, 20].

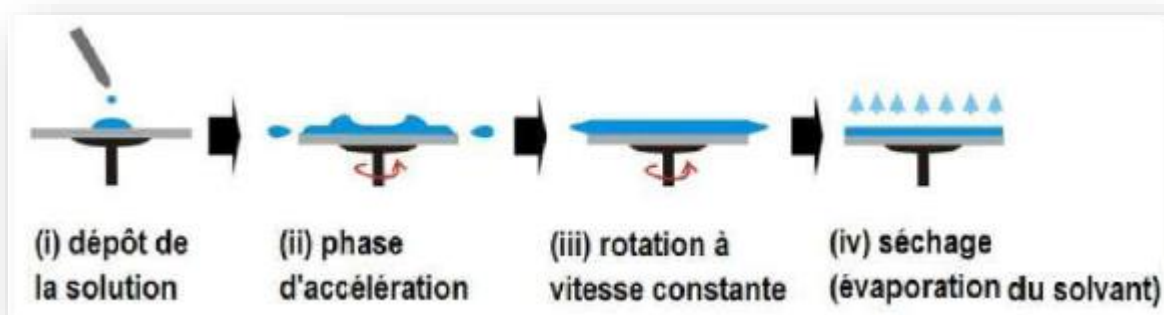


Figure. II.12 : les quatre étapes du dépôt de couches minces par spin casting [21].

.II.4. Techniques de caractérisations des couche minces :

La caractérisation des couches minces s'appuie sur des méthodes fortes variées dans ce chapitre, on va présenter les différentes techniques que nous avons souhaité utiliser pour caractériser nos échantillons, à savoir :

- La Microscopie Electronique à Balayage.
- La diffraction de rayons X (DRX).
- La spectrophotométrie UV-Visible.
- La technique des quatre pointes.

II.4.1. Microscopie électronique à balayage (MEB) :

La microscopie électronique à balayage (MEB) est peut-être la technique la plus utilisée dans le domaine des couches minces et leur caractérisation. Cet outil est utilisé pour une étude morphologique des couches minces [22].

II.4.1.1. Principe :

Le microscope à balayage utilise un faisceau d'électrons très fin qui balaye point par point la surface de l'échantillon. L'interaction du faisceau avec l'objet crée différentes émissions de particules qui sont analysées à l'aide de détecteur approprié : électrons secondaires, électrons rétrodiffusés, électrons transmis, émission de rayons X captée de façon synchrone avec le balayage du faisceau sur l'échantillon, l'intensité de chacun de ces signaux module la luminosité d'écran de télévision donnant des images noir et blanc que l'on peut mixer entre elles [23].

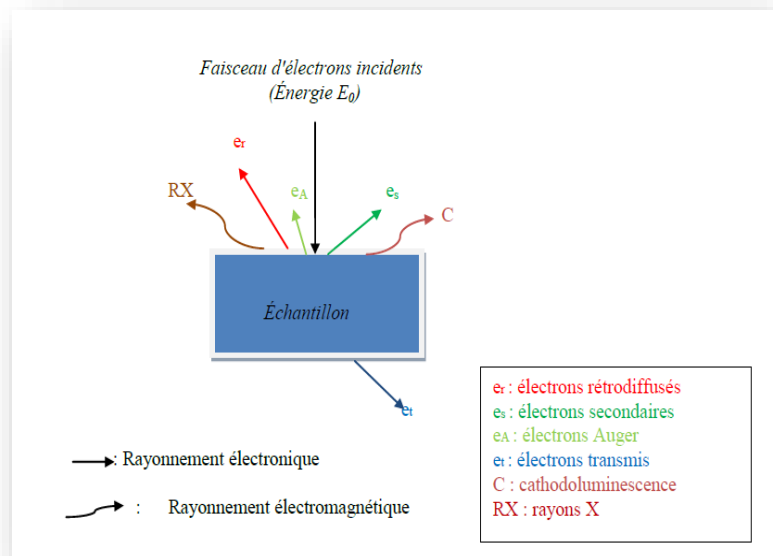


Figure. II.13: Représentation schématique de l'interaction entre un faisceau d'électron et la Surface d'un échantillon [23].

❖ L'électronique à balayage possède 3 détecteurs :

- Les électrons secondaires.
- Les électrons rétrodiffusés.
- Les Rayons X (ou photons X) [24].

II.4.2: Diffraction de rayon X :

La diffraction des rayons X est couramment utilisée pour la caractérisation structurale des matériaux. [10] Elle permet de déterminer les phases cristallines qui sont présentes dans l'échantillon et d'évaluer la cristallinité de ces phases. Elle fournit des informations sur les directions de croissance cristallographique des films [2].

II.4.2.1. Principe :

Lorsqu'un faisceau de rayons X monochromatique est dirigé sur un matériau polycristallin, il est en partie réfléchi par les plans atomiques de certains cristaux.

Les interférences des rayons diffusés vont être alternativement constructives ou destructives, selon la direction de l'espace, on va donc avoir un flux important de photons X, ou un autre flux faible. Ces variations dépendent des directions qui forment le phénomène de diffraction des rayons X. [25] Un détecteur reçoit le faisceau de rayons X diffracté par cet échantillon et enregistre l'intensité en fonction de l'angle de diffraction 2θ . Lorsque la loi de Bragg est vérifiée, un pic de diffraction correspondant à la famille de plans considérée est obtenu sur le diffractogramme [26].

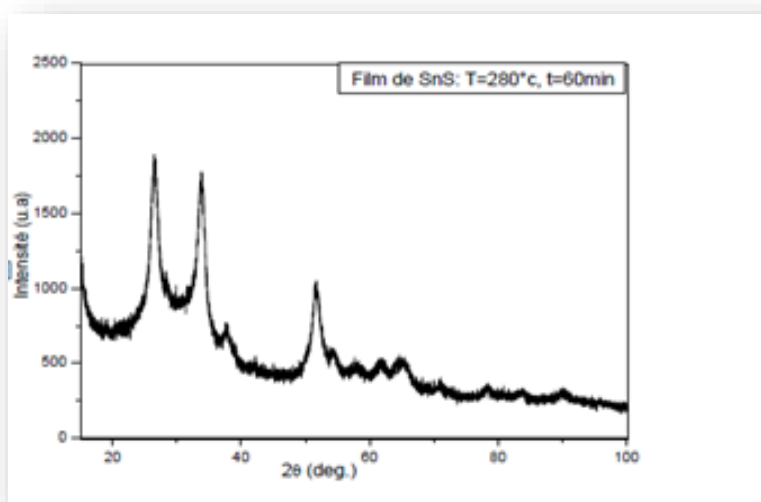


Figure. II.14: Spectre de diffraction des rayons-X (DRX) d'une couche mince [27].

II.4.2.2. La loi de Bragg :

Les directions dans lesquelles les interférences sont constructives, appelées "pics de diffraction" peuvent être déterminé par la loi de Bragg donnée par l'équation suivante [27] :

$$2d_{hkl}\sin(\theta_{hkl}) = n.\lambda$$

Avec :

θ_{hkl} : L'angle entre le faisceau incident et les plans diffractant d'indices de Miller (hkl).

d_{hkl} : la distance inter-réticulaire entre les plans diffractant.

λ : La longueur d'onde du faisceau incident.

n : L'ordre de la diffraction [27].

L'étude du diffractogramme permet de remonter à un grand nombre d'informations :

- Les phases cristallines (position et intensité des raies diffractées)
- Les défauts d'empilement (forme des pics)
- La taille des grains (les largeurs des pics à mi-hauteur)
- L'orientation des cristallites (l'absence ou présence de réflexions) [28].

Pour l'identification des pics observés sur les spectres de diffraction, nous utilisons les fiches JCPDS.

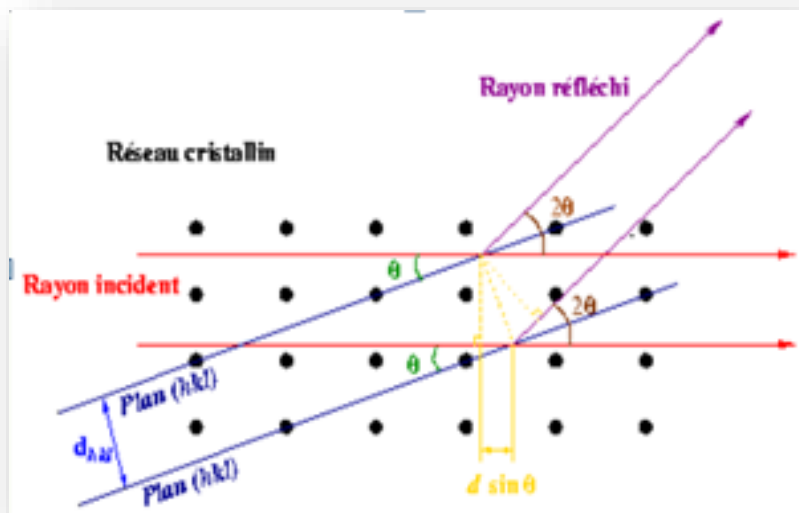


Figure II.15. : Principe de la loi de Bragg [15].

II.4.2.3 : Détermination de la taille des grains :

A partir des spectres de diffraction, il est possible de calculer les tailles cristallites des phases des dépôts en utilisant la formule de Scherrer donnée par la relation [22] :

$$D = \frac{(0,9.\lambda)}{\beta.\cos\theta}$$

Où :

D : est la taille moyenne des cristallites.

β : est la largeur à mi-hauteur exprimée en radian de la raie diffractée d'angle 2θ

θ : est l'angle de diffraction en degrés.

λ : est la longueur d'onde du faisceau de rayon X (Å) [25].

La figure II.16, montre la largeur à mi-hauteur β de l'échantillon de SnS déposé à partir de chlorure d'étain à une température de 350 °C pendant un temps de 30 min, où $\Delta(2\theta)$ et sont la largeur à mi- hauteur et l'angle de diffraction relatif au pic (111) respectivement [27].

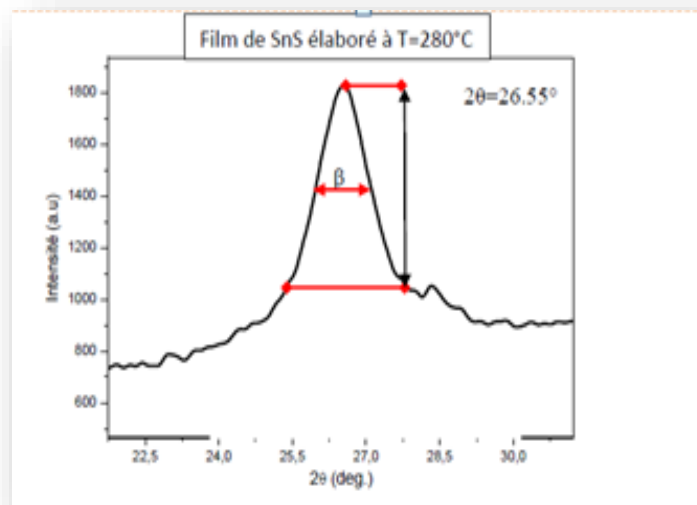


Figure. II.16 : Illustration montrant la définition de β à partir de la courbe de diffraction des Rayons X [27].

II.4.3. Spectroscopie UV-Visible :

Les domaines de la spectroscopie sont généralement distingués selon l'intervalle de longueurs d'ondes dans lequel les mesures sont réalisées. On peut distinguer les domaines suivants : ultraviolet-visible, infrarouge et micro-onde. Dans notre cas, nous avons utilisé un spectrophotomètre enregistreur à doubles faisceaux, dont le principe de fonctionnement est représenté sur la figure II-17, par lequel nous avons pu mesurer des courbes représentant la variation de la transmittance, en fonction de la longueur d'onde dans le domaine de l'UV Visible (200-800nm). En exploitant ces courbes, il est possible d'estimer l'épaisseur du film, et de déterminer ses caractéristiques optiques ; tels que : le seuil d'absorption optique, le coefficient d'absorption, la largeur de la bande interdite et l'énergie d'Urbach [29].

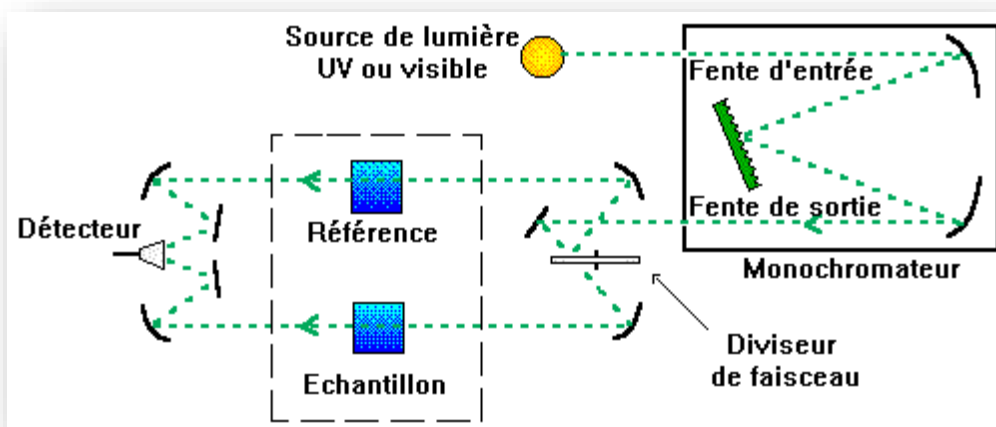


Figure II.17: Schéma représentant le principe d'un spectrophotomètre UV-Visible [11].

II.4.3.1 : Spectre de transmittance :

Les spectres obtenus donnent la variation relative de la transmittance T (%) en fonction de la longueur d'onde λ (nm). Sur les figures. II-18, nous avons rapporté l'allure typique d'un spectre de transmittance d'un film de SnS [27] :

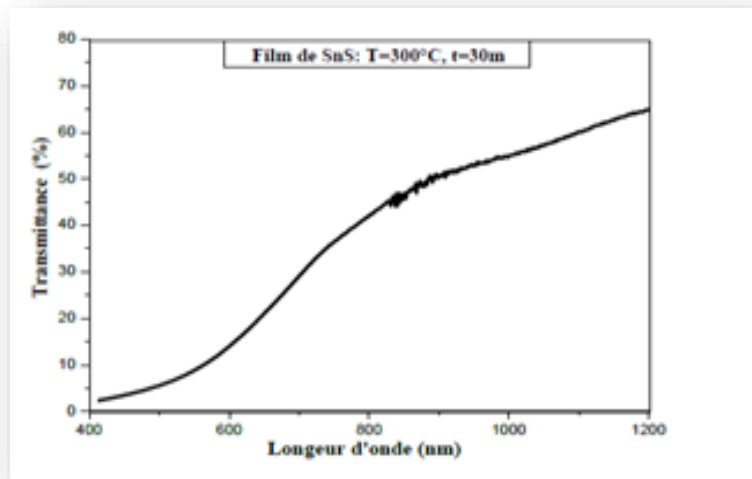


Figure. II.18: Spectres typiques de transmittance d'une couche mince de SnS préparé à 300°C pendant 30 min [27].

II.4.3.2. Détermination du coefficient d'absorption :

A partir du spectre de transmission d'une couche on peut calculer le coefficient d'absorption α et le coefficient d'extinction k du matériau qui la constitue, en utilisant la relation de Bouguer-Lambert-Beer ou souvent appelée tout simplement ; la loi de Beer :

$$T = e^{-\alpha d}$$

Si on exprime la transmittance T , en (%), les coefficients d'absorption et d'extinction sont donnés par :

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln \left(\frac{100}{T(\%)} \right) \quad \text{Et } k = \alpha \lambda / 4\pi$$

Où d est l'épaisseur du revêtement et T la transmittance.

Il faut noter que ce calcul sous-entend que $(1-T)$ est l'absorption de la couche, alors qu'en fait une partie de la lumière incidente n'est ni absorbée, ni transmise mais est réfléchie.

Cette approximation est d'autant moins valable que l'épaisseur de la couche est plus faible. Il faut donc être très prudent si on veut comparer α pour des épaisseurs de couche très différentes [25].

II.4.3.3. Mesure du gap optique E_g :

Nous rappelons que le SnS est un semi-conducteur à gap direct, donc son coefficient d'absorption α dans la gamme UV suit la formule :

$$\alpha = A (h\nu - E_g)^{1/2}$$

Avec h est la constante de Planck, ν est la fréquence d'irradiation, E_g est le gap optique et A est une constante.

Afin d'estimer le gap optique, nous traçons l'évolution du carré du coefficient d'absorption $(\alpha h\nu)^2$ en fonction de l'énergie du photon incident $(h\nu)$ on obtient une droite dont la pente est proportionnelle au gap optique (figure II.19) [27].

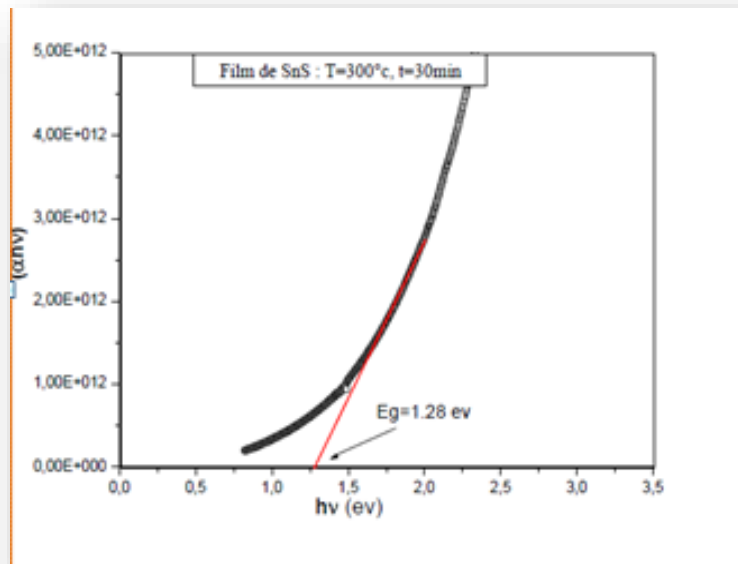


Figure. II.19: Détermination du gap d'énergie par la méthode d'extrapolation à partir de la Variation de $(\alpha h\nu)^2$ en fonction de $h\nu$ pour une couche mince de SnS [27].

II.4.4. La méthode des quatre 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 [30].

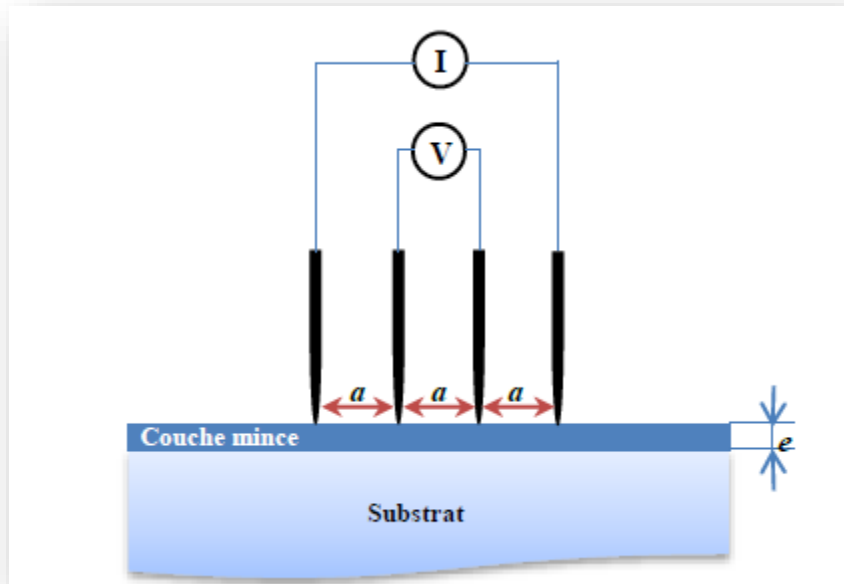


Figure II.20: Schéma représentatif du principe de la méthode des quatre pointes [30].

II.4. Conclusion :

À partir de ce chapitre nous avons essayé de donner une description qualitative sur les couches minces, et les différentes techniques d'élaboration et de caractérisation de ces derniers.

Références du chapitre II

- [1] Sana Hariech, « Elaboration et caractérisation des couches minces de sulfure de cadmium (CdS) préparées par bain chimique (CBD) », mémoire de magister, Université mentouri-Costantine, 2009.
- [2] Bouzidi Amel, « Etude de l'influence du dopage sur les propriétés structurales et optiques Des nanostructures d'oxyde de zinc élaborées par la technique sol-gel », mémoire de master Académique, université mohamedboudiaf-m'sila , 2017.
- [3] Zohra Brahmi, « Elaboration et caractérisation des couches minces CIS déposé par la Technique électrodéposition », mémoire de master, université echahid hamma lakhdar-Eloued, 2016.
- [4] Kenza Kamli « Etude et élaboration des composés binaires et ternaires destinés à des Applications photovoltaïques », mémoire de doctorat, université badjimokhtar-annaba ,2017.
- [5] Achour.Rahal, « Elaboration des verres conducteurs par déposition de ZnO sur des verres Ordinaires », mémoire de magister, université El Oued, 2013.
- [6] Hafdallah Abdelkader, « Étude du dopage des couches minces de ZnOélaborées par Spray ultrasonique », mémoire de magister,université mentouri-costantine, 2007.
- [7] SomiaGattal, « Synthèse et étude des propriétés physiques des couches minces de SnO_2 », mémoire de master, Université Larbi Tébessi – Tébessa, 2016.
- [8] A. Chennoufi, « L'effet de la molarité et de la température du substrat sur les propriétés Des couches minces d'oxyde d'Indium (In_2O_3) par spray ultrasonique », mémoire de Magister, université medkhider-biskra, 2012.
- [9] John Robertson, physical review B, Vol. 30, No. 6, pp. 3520-3522, (1984).
- [10] Younsi Ahmed Memdough , « Elaboration Et caractérisation des couches minces CuInSe_2 par électrodéposition (Effet De Recuit) » mémoire de magister, université ziane Achour-djelfa, 2015.
- [11] Bacha Rabie, « La synthèse des nano particules de CuO avec la méthode de précipitation sol_gel, en utilisant le précurseur CuCl_2 et l'étude de leurs propriétés structurales et optiques » mémoire de magister, université mentouri constantine -1, 2015.
- [12] A.Mennad,Revue des Energies Renouvelables vol 18 N°4 (2015) 713-719.
- [13] H. Moualkia, « Elaboration et caractérisation de couches minces de sulfure de cadmium (CdS) », thèse de doctorat, mentouri-constantine, 2010.
- [14] A. Zozime, thèse (Orsay/villetaneuse, 1977) pp. 3.

- [15] KENZA Kamli, « Elaboration et caractérisations physico-chimiques des couches minces de sulfure d'étain par spray ultrasonique : Effet des sources d'étain » Mémoire de Magister, université mohamed khider-biskra, 2013.
- [16] Livage, J. Revue verre, vol. 6, (2000).
- [17] Mr. Maache Mostefa « Elaboration de films minces d'oxydes semi-conducteurs par Voie sol-gel » Mémoire doctorat, université mohamed khider de biskra, 2014.
- [18] Farida Talbi Et lynda Ferhat, « Conception et réalisation d'un spin coater pour le dépôt en couches mince », mémoire de fin d'étude de master académique, université mouloud mammeri de tizi-ouzou, 2016.
- [19] H.K. Pulker, Coating on glass, Elsevier N.Y, (1984).
- [20] Attallah. Mourad, « Elaboration et caractérisation des couches minces d'oxyde de silicium, obtenues par voie sol-gel. », mémoire de magister, université mentouri constantine, 2010.
- [21] Banouh Tarek et Aoun Dyhia, « Elaboration des couches minces par le procédé sol-gel type spin coating », mémoire mastre académique, Université Akli Mohand Oulhadj- Bouira – 2017/2018.
- [22] KH, Bouchoureb, « Elaboration et caractérisation des couches minces CuInS_2 » Mémoire de magister, Université d'Orandes sciences et la technologie (Mohamed Boudiaf), 2015.
- [23] Benkhetta Youcef, « l'effet du débit de la solution sur les propriétés des couches minces d'oxyde de (ZnO) déposées par spray ultrasonique. », Mémoire de Master, Université Med khi der Biskra, 2012- 2013.
- [24] Mahroug Abdelhafid, « Etude de couches minces d'Oxyde de Zinc dopé Aluminium et Cobalt élaborées par le technique sol gel –spin casting. Application à la photo détection et au photo courant », thèse de doctorat, université frères Mentori- Constantine, 2015.
- [25] Faysal Ynineb, « Contribution à l'élaboration de couches minces d'oxydes Transparents Conducteurs (TCO) », mémoire de magister, Université Mentouri Constantine , 2010.
- [26] Saad Rahmane, « élaboration et caractérisation de couche minces par spray et pulvérisation magnétron », mémoire de Doctorat, Université Mohamed KH eider –Biskra, 2008.
- [27] Meriem Mess oudi, « Elaboration et Caractérisation de couches Minces SnS », thèse de doctorat, université des frères Mentouri Constantine , 2016.
- [28] Salah yahiaoui, « L'effet de la molarité des différentes sources d'étain sur les propriétés des couches minces d'oxyde d'étain SnO_2 élaborées par Spray Ultrasonique », Mémoire de magister, Université Mohamed KHider-Biskra, 2014.
- [29] Allag Abdlekrim, « Optimisation des conditions d'élaboration des couches minces d'oxyde d'étain SnO_2 par spray », thèse de Doctorat LMD, Université Mohamed Khi der-Biskra.

[30] M. Amara Saad, « Caractérisation optique et structurale des couches minces d'oxydes complexes pour applications photonique », thèse de Doctorat en Sciences, Université Ferhat Abbas Sétif 1 ,2015.