

ELABORATIONS DE COUCHES MINCES

Introduction :

Le dépôt de couches minces est une technologie clé pour de multiples applications industrielles. Pendant des années l'utilisation industrielle était principalement pour l'optique et la décoration.

1- Définition d'une couche mince

Une couche mince est une fine pellicule d'un matériau déposé sur un support appelé « substrat » dont l'épaisseur est inférieure à $(1 \text{ à } 2) \mu\text{m}$ (ce sont des couches de 10...100 nanomètres). Cette faible distance entre les deux surfaces limites entraîne une perturbation des propriétés physiques.

La différence entre un matériau à l'état massif on néglige 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.

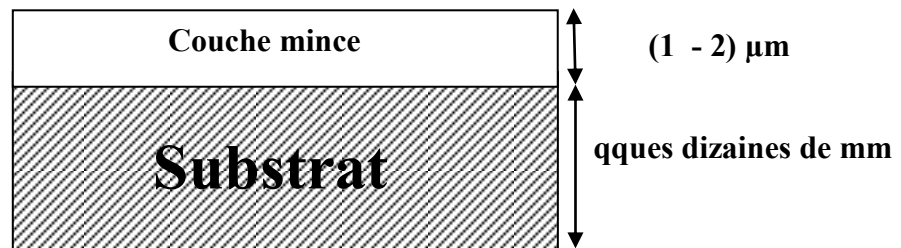


Figure 1 : Définition d'une couche mince

2- Applications des couches minces

Les premières modifications de surface avaient un but esthétique (peinture, plaquage d'or, émaillage) tandis que des applications plus technique concernant la métallurgie (cémentation ; nitruration). Au cours de ces dernières décennies les applications plus pointues se sont diversifiées dans les domaines suivants : la décoration, la défense, l'énergie photovoltaïque, l'essai mécanique, l'horlogerie, le médical, la microélectronique, l'optique

et la rénovation des bâtis. Pourquoi cette révolution? Cette « r »-évolution va s'amplifier dans les années à venir et tend à devenir une technologie incontournable dans tous les secteurs.

a- Décoration

Le dépôt de couches minces sur un support (métallique, plastique ou bien en verre) est une technologie propre, jolie et attractive pour le grand public. Elles permettent de produire de : miroirs décoratifs, objets cosmétiques, réflecteurs pour éclairages, accessoires de robinetterie...



b- La défense

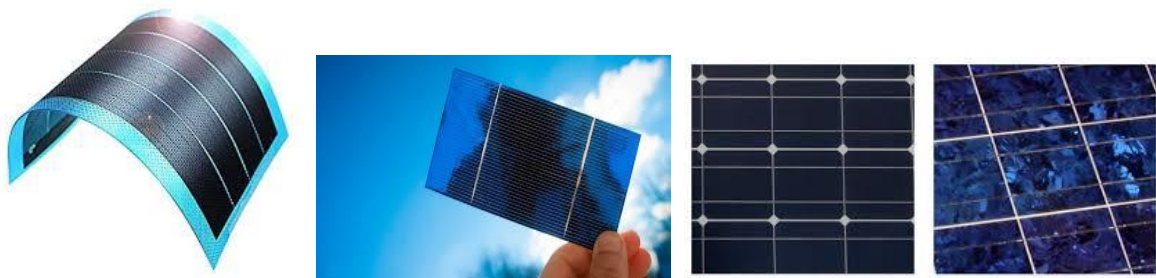
Les applications liées à la défense ont permis le développement des technologies couches minces. Aujourd'hui encore les applications militaires demeurent un secteur prépondérant à l'utilisation de cette technologie. A titre d'exemple les capteurs quels qu'ils soient doivent leur développement et leur diversification au secteur militaire.



c- L'énergie photovoltaïque

L'écologie propulse l'énergie au cœur des préoccupations communes.

Actuellement 95% du marché des cellules photovoltaïques est basé sur la filière silicium qui est également le matériau de base du semi-conducteur. Du fait de la croissance du domaine, l'augmentation de la demande en silicium ainsi que le besoin de réduction des coûts de production, ouvrent d'autres voies : couches minces de silicium, silicium de "qualité photovoltaïque", CdTe, AsGa, CIGS.... Aujourd'hui les cellules photovoltaïques basées sur la technologie de dépôt de couches minces CIGS (Cu, In, Ga, Se) promettent des rendements de l'ordre de 20% soit bien supérieurs à la filière silicium conventionnelle.



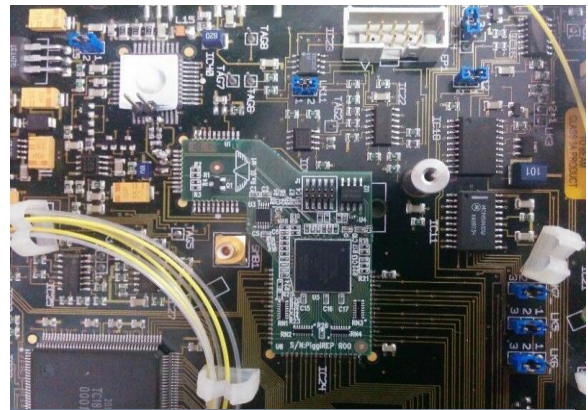
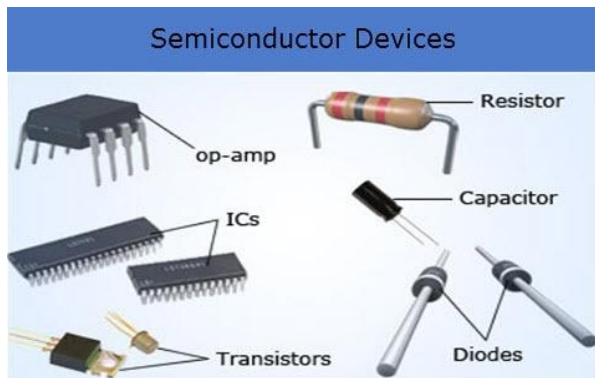
d- Domaine du Médical

Les couches minces dans le milieu médical sont un élément clé dans la fabrication de certains implants. La tolérance du corps humain aux éléments extérieurs est limitée et demande une grande attention et un grand savoir-faire. Par exemple, le succès d'une greffe repose entre-autres sur la préparation d'implant permettant de le rendre biocompatible afin de réduire le risque de rejet. C'est pourquoi les couches minces biocompatibles rencontrent un succès grandissant.



e- Microélectronique

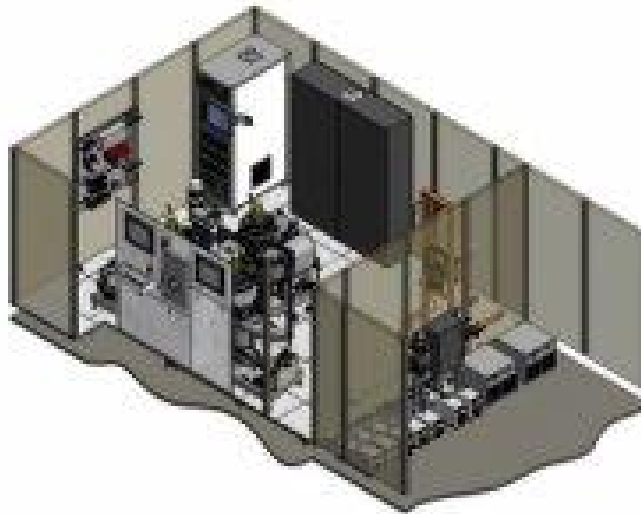
Les exigences technologiques demandent une miniaturisation des équipements modernes. Cette filière a pu se développer à partir des années 1960 grâce à la mise en œuvre de couches de plus en plus minces conductrices et isolantes et on peut les trouver sous types de couches passives (contact électronique), jonction PN, diode, transistor, matériau piézoélectrique, lampe LED ; supraconducteur...Par ailleurs, l'explosion des moyens de communication présente une aubaine pour les technologies couches minces. Téléphones portables, Smartphones, tablettes, ordinateurs, disques durs, mémoires flash et autres écrans LCD sont des bijoux de technologie qui bénéficient tous de la miniaturisation.



f- Rénovation

Les raisons de vouloir rénover un système existant peuvent être multiples :

- **Budget** : budget insuffisant pour acheter un système neuf.
- **Performances** : réduire les pertes de performances liées à des composants usés et retrouver celles qui vous ont fait acheter cet équipement.
- **Nouveautés** : bénéficier de nouvelles fonctionnalités en installant des composants plus récents.
- **Pérennisation** : prévenir le risque de panne à cause de composants obsolètes pour lesquels le support constructeur n'est plus assuré.
- **Conformité et sécurité** : remise en conformité électrique ainsi qu'au niveau sécurité opérateur.
- **Maintenance** : maîtriser les coûts de maintenance qui augmentent avec le temps.



3- Mécanismes de formation d'une couche mince

La formation d'une couche mince s'effectue par une combinaison de processus de nucléation et de croissance. Les espèces, au moment de l'impact sur le substrat sont absorbées physiquement sur la surface du substrat. Initialement, les espèces absorbées ne sont pas en équilibre thermodynamique avec le substrat, et se déplacent donc sur sa surface. Pendant ces déplacements, lorsqu'elles arrivent dans des sites favorables, elles créent des amas (clusters).

Ces amas, que l'on appelle îlots ou noyaux, sont thermodynamiquement instables et tendent naturellement à désorber. Lorsqu'ils atteignent une certaine taille, les îlots deviennent thermodynamiquement stables. On dit que le seuil de nucléation a été franchi. Cette étape, de formation d'îlots stables, chimisorbés, et d'une dimension suffisante, s'appelle la nucléation.

Les îlots continuent à croître en nombre et en dimension jusqu'à ce qu'ils atteignent une densité de nucléation dite la saturation. Un îlot peut croître parallèlement à la surface du substrat par diffusion superficielle des espèces absorbées ou perpendiculaire par impact direct des espèces incidentes sur l'îlot. En général, la vitesse de croissance latérale est bien plus grande que la vitesse de croissance perpendiculaire.

L'étape suivante dans le processus de formation de la couche mince s'appelle la coalescence. Les îlots commencent à s'agglomérer les uns aux autres en réduisant la surface du substrat non recouverte. La coalescence peut être accélérée en augmentant la mobilité de surface des espèces adsorbées, par exemple en augmentant la température du substrat. Les îlots deviennent des îles qui continuent à croître, ne laissant que des trous ou des canaux de faibles dimensions entre elles. Dans cette étape, la structure de la couche passe du type discontinu au type poreux. Peu à peu, une couche continue se forme lorsque les trous et les canaux se remplissent.

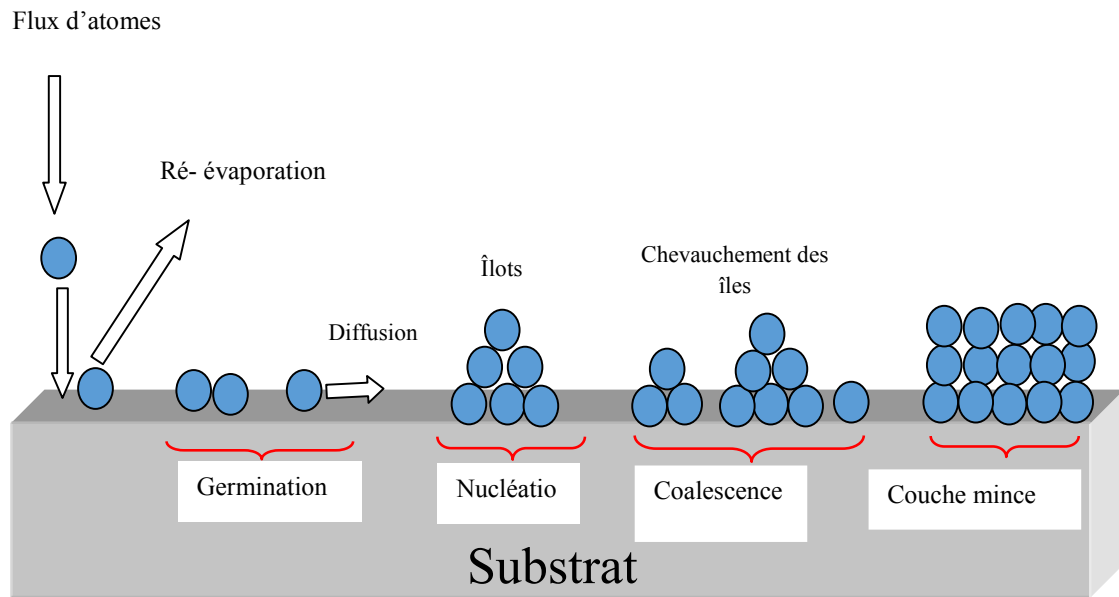


Figure 2 : Croissance d'une couche mince

4- Procédures de dépôts de couches minces

Les procédées d'élaborations sont, d'une manière générale, classés en deux grandes catégories de dépôt de films minces : les méthodes physiques et les méthodes chimiques. Le dépôt se fait en trois étapes :

Le premier est de produire des espèces ionique, moléculaire ou atomique. La seconde étape est de transporter ces espèces vers le substrat et la 3^{ème} étape est de condenser ces espèces sur ce même substrat afin de former un dépôt solide.

La classification des méthodes est présentée sur le schéma de la figure 3.

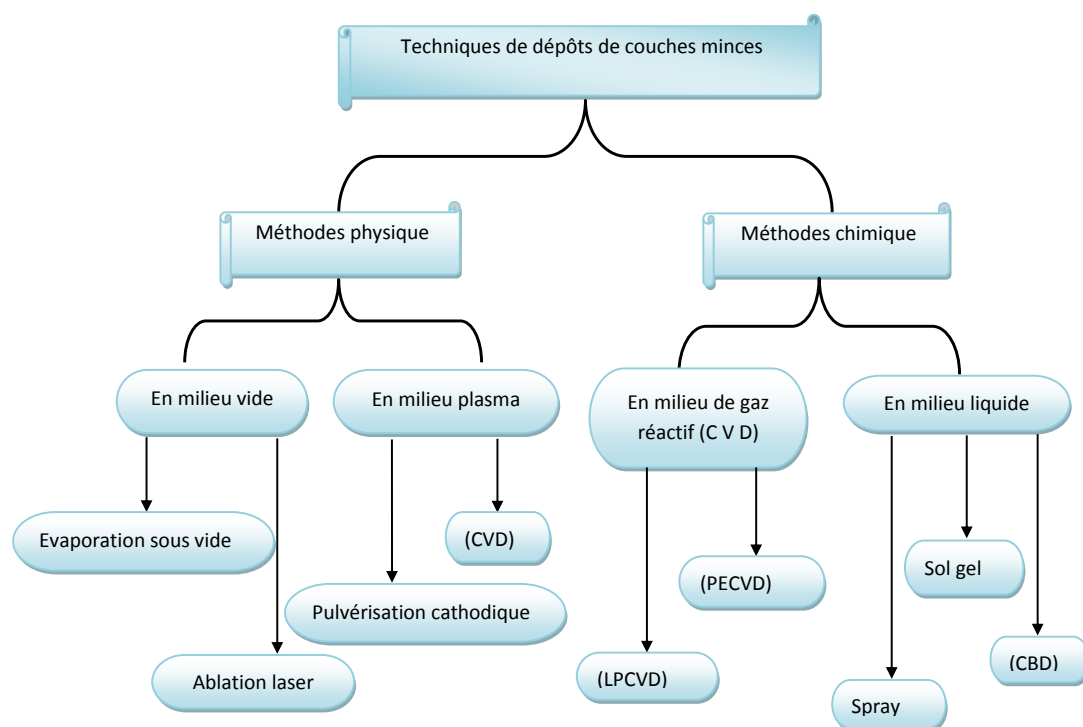


Figure 3: Techniques de dépôts de couches minces

Dans ce qui suit, nous donnerons une brève définition des techniques d'élaboration les plus utilisées pour le dépôt des couches minces.

i- L'évaporation sous vide

Dans le processus d'évaporation, la vapeur du matériau à déposer est produite par le chauffage de ce matériau à une température telle que sa pression de vapeur soit supérieure à la pression résiduelle dans l'enceinte à vide où se déroule le procédé. Les évaporations sont toujours réalisées à des vides secondaires de l'ordre de 10^{-6} Torr.

Le procédé de chauffage des matériaux à évaporer sont multiples : chauffage par résistance (effet Joule), par bombardement électronique, par induction magnétique (couplage d'un générateur haute fréquence).

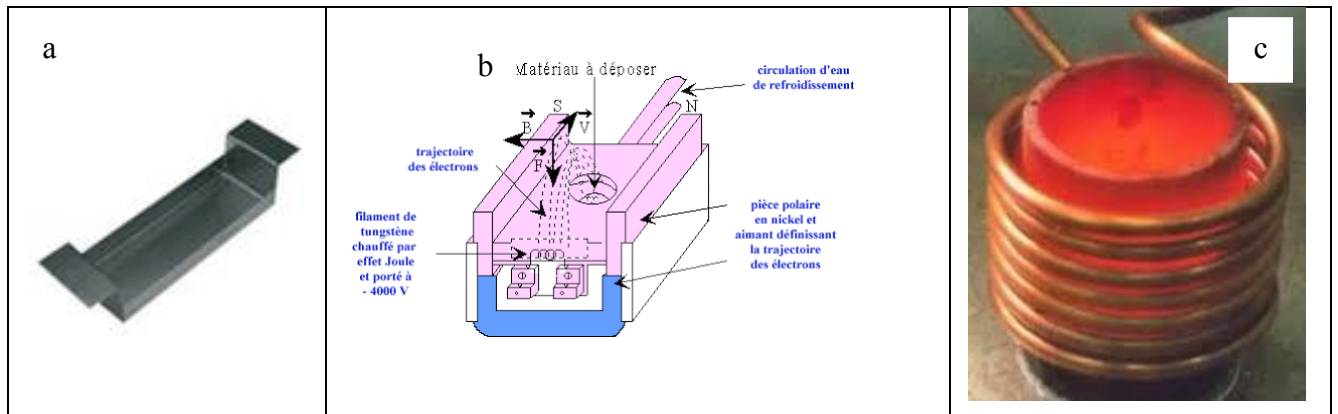


Figure 4 : Procédés de chauffage des matériaux :

- a- chauffage par résistance (effet Joule)
- b- bombardement électronique
- c- induction magnétique (RF)

Le matériau à déposer est placé dans la nacelle (W, Mo, Ta) et portée à haute température (effet Joule) de sorte qu'un flux d'atomes évaporés ou sublimés est émis. Une partie de ce flux est dirigé sur le substrat où va croître le film par condensation. Le chauffage se fait grâce au passage du courant continu à travers la nacelle.

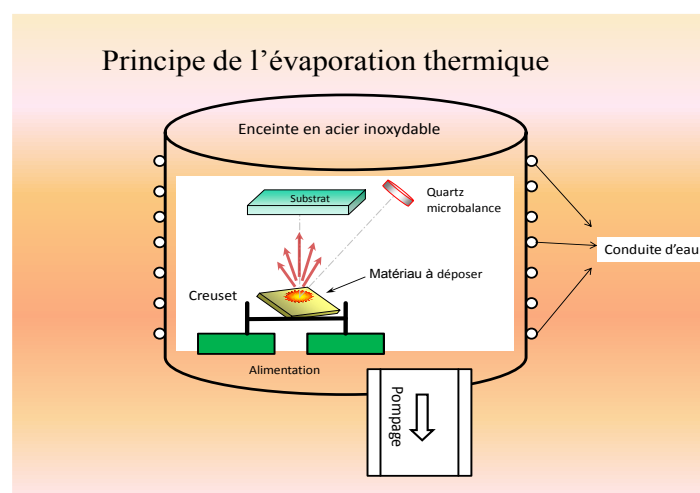


Figure 5 : Principe de l'évaporation thermique sous vide

Lorsque la pression n'est pas suffisamment basse les dépôts sont peu adhérents et souvent amorphes.

L'évaporation reste toutefois une méthode particulièrement appréciée car on élabore ainsi des matériaux très purs. Cependant, elle ne convient pas à la fabrication de films hors équilibre thermodynamique.

ii- La pulvérisation cathodique (Sputtering) :

Mise en évidence par Grove en 1852 cette méthode consiste à bombarder la surface de la cible qui représente le matériau à déposer (cathode) par des ions non réactifs (généralement des ions d'argon Ar^+). L'effet de pulvérisation est dû essentiellement au transfert de l'énergie des ions incidents aux atomes de la surface du matériau bombardé. L'arrachage d'atomes superficiels se produira lorsque l'énergie effectivement transférée dépassera l'énergie de liaison des atomes. Les atomes arrachés se condensent sur un substrat (anode) porté à haute température pour former la couche. Ces ions sont produits dans un plasma par application d'une décharge électrique (continu ou en radiofréquence (r.f)) sous basse pression (0.02-0.2 torr). Cette technique permet de déposer quasiment tous les matériaux, d'obtenir des couches minces de composition identique à celle de la cible et offre la possibilité de préparer des dépôts à grandes surfaces.

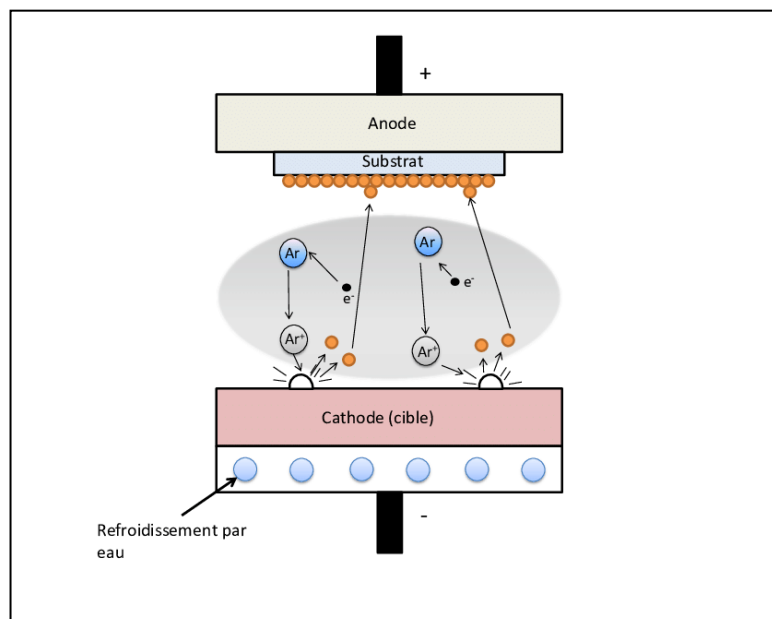


Figure 6 : Principe de la pulvérisation cathodique

iii- Dépôt chimique en phase vapeur (CVD) :

Cette technique s'applique au corps gazeux et nécessite l'utilisation d'un substrat porté à température élevée. En effet, la méthode consiste à introduire les éléments constituant le dépôt sous forme de gaz dans une chambre sous vide (basse pression). Les vapeurs de gaz réagissent chimiquement avec la surface du substrat pour former le dépôt. Les principaux paramètres à contrôler lors des dépôts CVD sont : la nature et la température du substrat, la composition chimique des produits de départ, la pression totale et la géométrie de la chambre de réaction. Parmi les méthodes de synthèse on distingue : le dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma (PECVD), le CVD à pression atmosphérique (AP-CVD) et le CVD à basse pression (LP-CVD). Les dépôts peuvent être soit conducteurs ou semi-conducteurs soit isolants

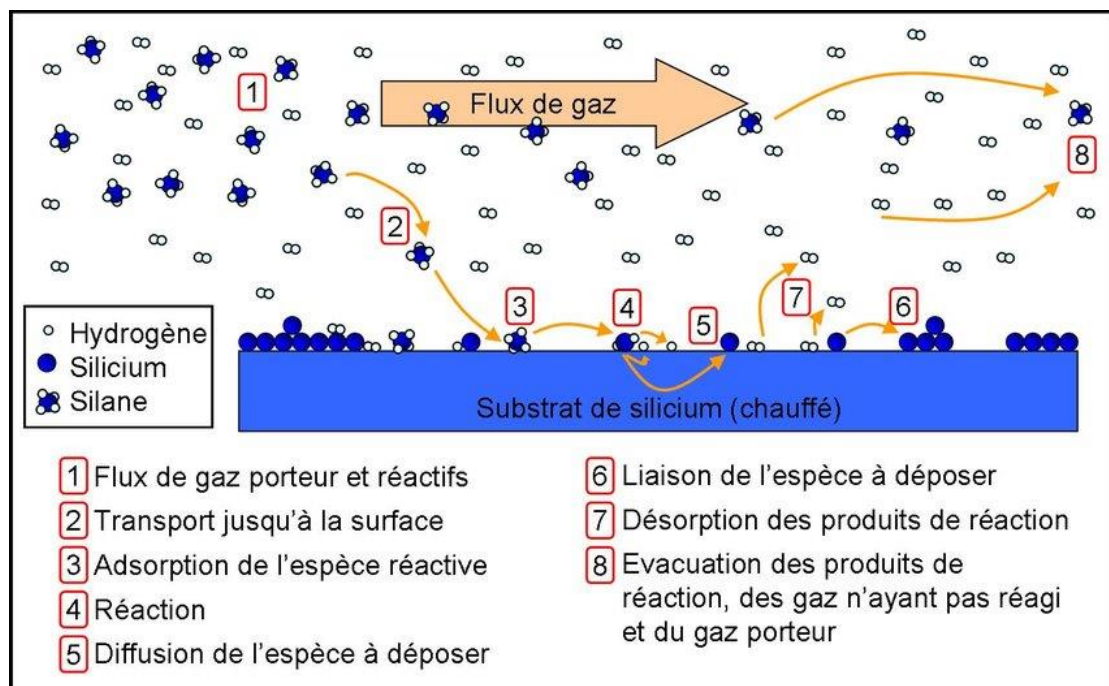


Figure 7 : Mécanisme de croissance d'une couche mince par voie chimique (CVD)