

I – NOTIONS GENERALES

Différentes techniques de dépôt permettent d'apporter un matériau à la surface d'une pièce pour en changer les propriétés de sa surface. Parmi les techniques les plus utilisées, nous pouvons citer : l'électrodéposition, les dépôts chimiques, l'immersion dans un bain de métal en fusion, les dépôts physiques ou chimiques en phase vapeur et la projection thermique. Les applications de ces dépôts concernent essentiellement la protection contre l'usure et la corrosion, la décoration ou la réalisation de dépôts à propriétés physiques spécifiques (électrique, magnétique, thermique...) [24]

Les dépôts confèrent au matériau traité des fonctionnalités particulières en surface (esthétique, conductivité électrique, barrière chimique, résistance à la corrosion, à l'usure ...) tout en préservant les propriétés intrinsèques (mécanique notamment) du massif [63].

1 – Principe de revêtement

Le dépôt des couches minces sur les différents substrats est une étape essentielle dans la majorité des domaines de la technologie moderne. Il existe plusieurs méthodes pour fabriquer des matériaux (semi-conducteurs, métaux, isolants, et oxydes,...etc.). Le principe de déposition repose sur trois composantes essentielles : substrat, matériau de dépôt et milieu (Fig.1)

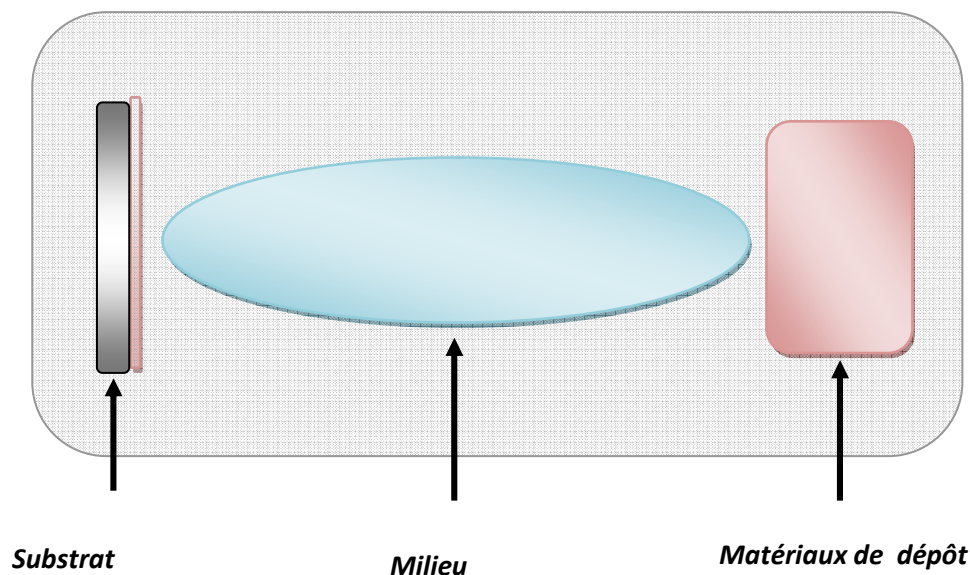


Fig.1 : Principe du dépôt des couches minces [29].

Le dépôt est formé à partir d'espèces constitutives (atomes, molécules, particules solides, particules liquides...). Ces espèces viennent d'une source et sont par la suite transportées vers un substrat au travers d'un milieu du type :

- ↗ Passif (vide ou basse pression, air à pression atmosphérique, atmosphère inerte...),
- ↗ Actif (plasma, gaz réactif, liquide...) [29]

2 – Méthodes de dépôt

Les principales méthodes utilisées pour fabriquer des couches minces sous vide font appel à la technique de dépôt chimique en phase vapeur (CVD : Chemical Vapor Deposition) [49] et de dépôt physique en phase vapeur (PVD : Physical Vapor Deposition) [50]. La classification des méthodes est présentée sur le schéma de la figure 2.

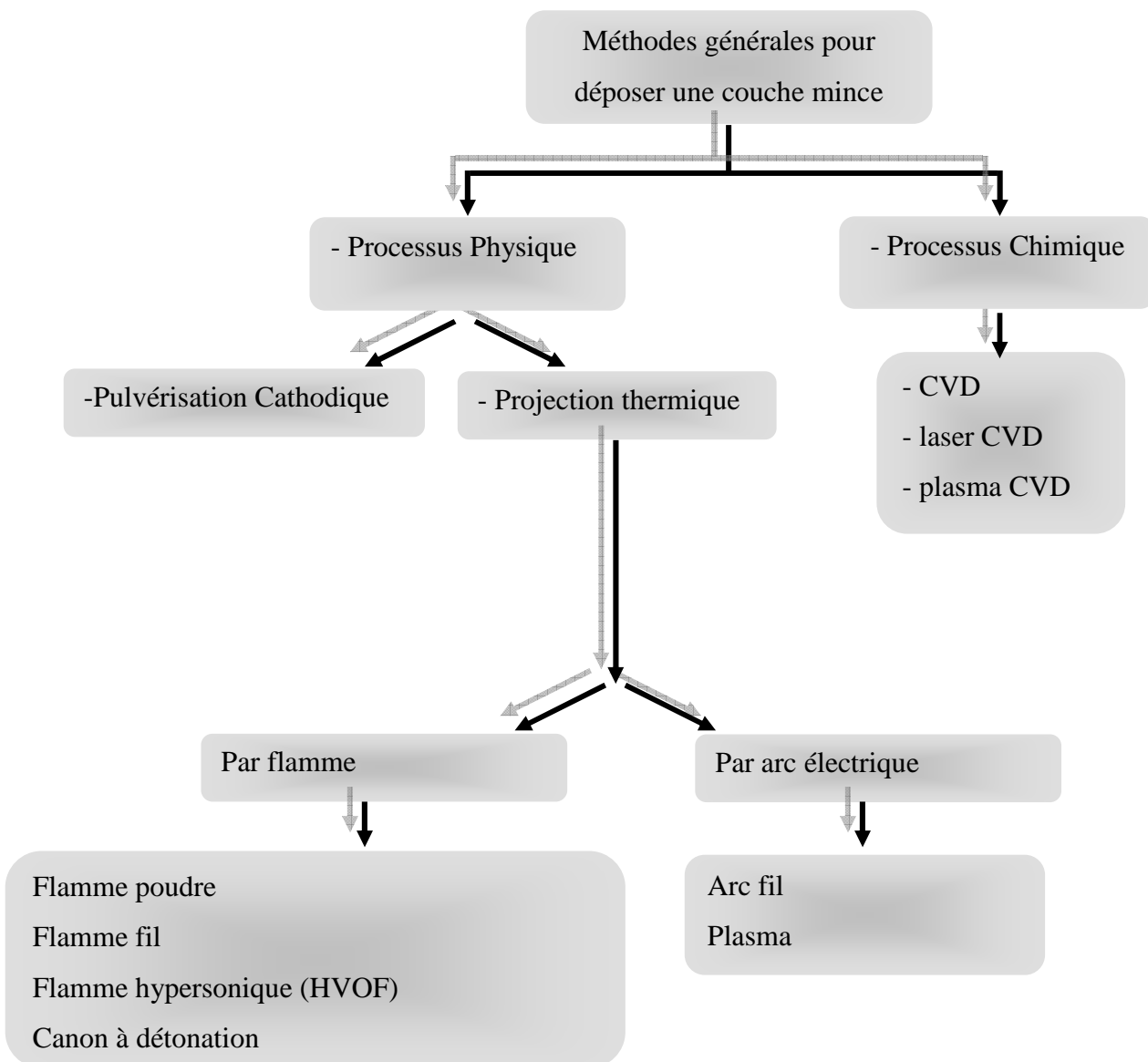


Fig.2 : Méthodes générales de dépôt de couches minces

II – Techniques de déposition

1 – Déposition en phase vapeur

1-1- Dépôt chimique en phase vapeur (CVD)

Le procédé de dépôt chimique en phase vapeur consiste à mettre un composé volatil du matériau à déposer en contact soit avec un autre gaz au voisinage de la surface à recouvrir, soit avec la surface elle-même (Fig.3). On provoque alors une ou plusieurs réactions chimiques, donnant au moins un produit solide. Les autres produits de réaction doivent être gazeux afin d'être éliminés hors de réacteur. Les dépôts se font à pression variable, mais il faut systématiquement un apport énergétique pour favoriser ces réactions. La réaction est activée par la température du substrat qui doit être chauffé à une température en rapport avec le matériau déposé [41].

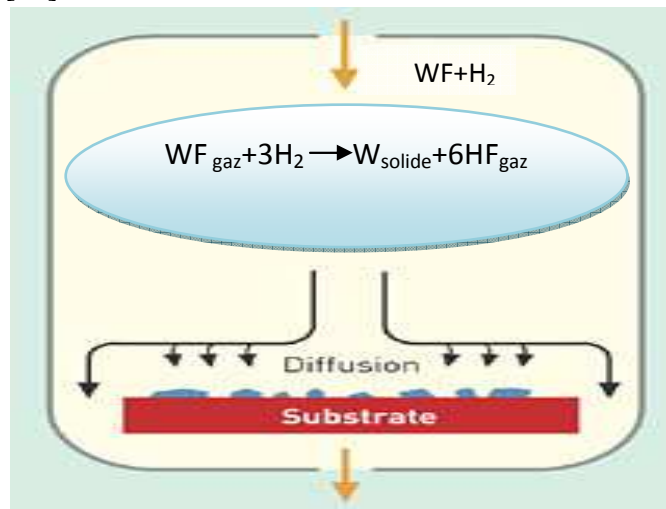
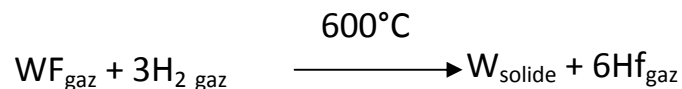


Fig.3: Schéma de principe de dépôt chimique en phase vapeur (CVD).

A titre d'exemple, le dépôt d'un film de tungstène très réfractaire peut se faire à l'aide d'une méthode décrite par l'équation suivante :



Cette formule implique que si l'on mélange deux gaz WF et H_2 , une couche mince de tungstène peut être obtenue. Avec la méthode CVD, il est possible de déposer des matériaux métalliques, diélectriques... etc.

La réaction chimique peut être également activée à l'aide d'un plasma. Cette méthode s'appelle « CVD plasma » ou PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition). Dans ce cas, il y a création en plus des particules énergétiques [42].

1-2- Dépôt physique en phase vapeur (PVD)

Le développement de la technologie de vide a progressé considérablement pendant les trois dernières décennies et cela a permis le développement des techniques de dépôt sous vide telles que les techniques de base de la PVD sont : l'évaporation et la pulvérisation sous toutes ces formes. Ces techniques de dépôts permettent l'obtention d'une large variété de matériaux à température de dépôt relativement basse ($< 500^{\circ}\text{C}$), par exemple [41].

- ✓ Films métalliques (Al, Cu, Ti...etc.) et leurs alliages.
- ✓ Films des métaux réfractaires (Mo, Ta, W,...etc.).
- ✓ Films d'oxydes (ZrO_2 , SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 ,...etc.).
- ✓ Films de nitrures, de siliciures, de carbures, de borures et de fluorures.

Ces techniques ont été largement utilisées pour l'obtention des revêtements réfractaires résistants à l'érosion et à l'usure, [44-45], comme par exemple Al_2O_3 , Acier inoxydable.

Le dépôt physique en phase vapeur (PVD) présente beaucoup d'avantages par rapport au dépôt chimique en phase vapeur, par exemple les films sont denses, le processus est facile à contrôler et il n'y a pas de pollution [46].

2-Pulvérisation cathodique

Le phénomène de pulvérisation a été découvert en 1852 par Grove [37]. Dans un tube à décharge, il observe la création d'un dépôt du métal constituant les électrodes sur les parois du tube. Pour des raisons technologiques, l'utilisation intensive de la pulvérisation comme moyen de production de couches minces date seulement des années 50.

La pulvérisation repose sur un principe simple : l'éjection d'atomes d'une cible sous l'impact d'atomes ionisés. Une partie des atomes éjectés se dépose à la surface d'un substrat sur lequel croît une couche mince. Dans la technique de pulvérisation cathodique, les ions proviennent d'un plasma créé par l'application d'une différence de potentiel entre deux électrodes. Le gaz utilisé pour la création du plasma est appelé gaz plasmagène ou gaz de décharge. Généralement c'est un gaz neutre, le plus souvent de l'argon pour les raisons suivantes :

- Faible énergie d'ionisation (facilité d'amorçage du plasma).
- Masse moyenne des atomes d'argon (le transfert d'énergie entre atomes lors d'une collision est maximal si les masses des atomes sont proches).
- Très faible réactivité chimique.
- Faible prix.

En pulvérisation cathodique nous distinguons la pulvérisation simple et la pulvérisation réactive. Dans la pulvérisation simple l'atmosphère de la décharge est chimiquement neutre, c'est-à-dire que l'on produit un vide de 10^{-6} torrs. On injecte ensuite le gaz d'argon pur pour créer le plasma. Dans le cas de la pulvérisation cathodique réactive l'atmosphère du plasma est réactive, c'est-à-dire que l'on introduit un certain pourcentage de gaz actif dans l'argon, par exemple de l'oxygène O_2 ou de l'azote N_2 . Dans chacun de ces cas, la cible peut être constituée d'un élément simple ou bien d'un composé. Il existe différents types de systèmes de pulvérisation cathodique, suivant le mode de création du plasma ou la nature de la cible (conductrice ou isolante) : diode à courant continu, triode à courant continu, ou haute fréquence.

3- Projection thermique

Les procédés de projection thermique conventionnels consistent à projeter, à l'aide d'un gaz vecteur, un matériau d'apport, métallique ou non métallique, sous forme de poudre, de fil ou de baguette totalement ou partiellement fondue à condition que sa température de fusion soit inférieure d'au moins 573 K de sa température d'ébullition ou de décomposition pour qu'il ne se vaporise pas ou ne se décompose pas avant d'atteindre le substrat [30]

3-1- Projection par flamme

Dans ce type de projection thermique, une réaction chimique est utilisée comme source d'énergie. Les matériaux à projeter sont introduits soit sous forme de poudre soit sous forme de fil, de tige ou de cordon (pour les céramiques dans ces deux derniers cas). Dans le premier cas, la température de fusion ne peut dépasser 0,7 à 0,8 fois la température de la flamme alors que dans le second, il est possible de fondre des matériaux dont le point de fusion est de 0,95 fois la température de flamme. Les matériaux déposés par cette technique sont usuellement des métaux, des alliages, des cermets ou des céramiques à basse température de fusion [33].

3-1-1- Projection par flamme poudre

Le matériau à projeter est introduit sous forme de poudre dans une flamme oxygène-gaz combustible, les particules sont accélérées grâce au gaz porteur ou à une injection d'air. Les dépôts réalisés présentent une faible adhérence (de 20 à 40 MPa) et une porosité élevée (10 à 20 %), ceci est essentiellement dû aux faibles vitesses d'impact des particules (de l'ordre de 30 m. s^{-1}) [33].

3-1-2- Projection par flamme fil

Les matériaux d'apport sont introduits sous forme de fil pour les matériaux ductiles ou de cordon ou baguette pour les matériaux céramiques. La flamme sert uniquement à fondre l'extrémité du fil ou cordon. L'entraînement des matériaux fondus vers le substrat est assuré par un jet d'air comprimé [33].

3-1-3- Projection par flamme hypersonique (HVOF)

Le schéma de la torche HVOF est montré sur la (Fig.4). Un gaz de combustion brûle dans l'oxygène dans une chambre de combustion mise sous une pression importante comprise entre $p = 2$ et 10 MPa. Cette dernière valeur correspond à une torche moderne type de JP-5000. La combustion crée un jet supersonique qui sort par une buse dans l'atmosphère. La poudre est injectée à l'intérieur de la buse dans le jet. Cette injection est radiale dans certaines torches ou axiale dans d'autres [29].

Les gaz combustibles sont l'acétylène, le kérosène, le propane, le propylène, l'hydrogène, méthane, gaz naturel ou le mélange méthylacétylène-propadiène (MAPP).

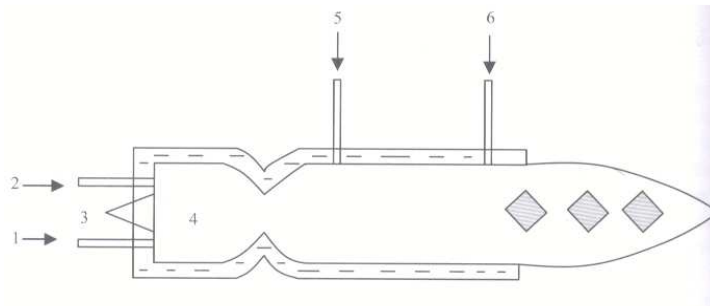


Fig.4 : Schéma d'une torche HVOF : 1, oxygène ; 2, gaz combustible ; 3, allumage de combustion ; 5, injection de poudre ; 6, refroidissement à l'eau [29].

Les poudres utilisées dans le procédé HVOF sont typiquement d'une taille comprise entre 5 et 45 μm . la majorité des poudres projetées sont des composites de carbures (WC , Cr_3C_2) dans une matrice de métaux ou alliages (Co , Ni , Ni20Cr) [29].

3-1-4-Projection par canon à détonation

Dans ce procédé, le matériau est projeté grâce à l'énergie de détonation d'un mélange gazeux qui est le plus communément, un mélange oxygène-acétylène. Le mélange est injecté dans le canon en même temps que la poudre d'apport véhiculée par un gaz inerte. Le canon est constitué d'un log cylindre fermé à une de ses extrémité et refroidi à l'eau. L'onde de

détonation, créée par une étincelle dans le mélange détonnant, chauffe et accélère les particules, injectées à mi-longueur du canon, jusqu'à la sortie du canon où elles sont éjectées à une vitesse élevée (jusqu'à 900-1300 m/s) vers la surface du substrat à traiter. Entre chaque tir le tube est balayé par un jet de gaz neutre (azote). Au maximum dix tirs peuvent être effectués par seconde. L'énergie cinétique élevée des particules à l'impact sur le substrat conduit à l'édification d'un revêtement dense et adhérent (porosité inférieure à 1% et adhérence supérieure à 80 MPa). Les matériaux généralement utilisés sont les carbures de chrome ou de tungstène avec un liant métallique (Ni, Co) [30]. Le régime de projection est discontinu. Les particules impactent dans un état plastique avec une oxydation très faible (moins de 0,1% en poids)(Fig.5) [24].

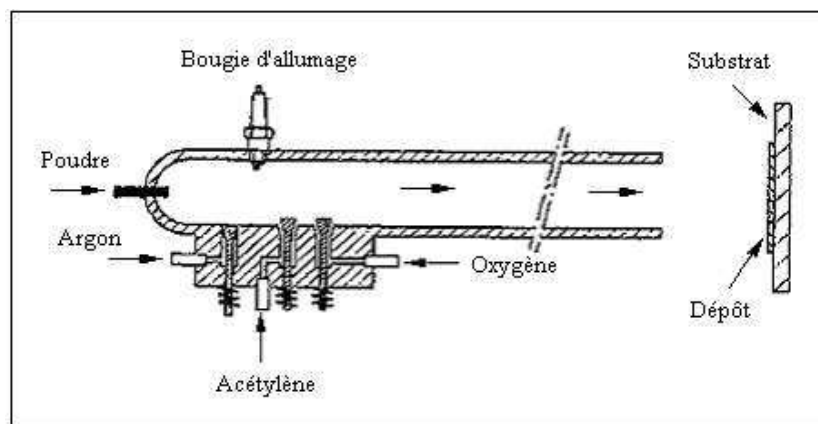


Fig. 5 : projection par canon à détonation [24]

3-2- Projection par arc électrique

3-2-1- Arc-fil

La projection arc-fil est une technique de revêtement de surface relativement économique qui compte de nombreuses applications industrielles. Elle est utilisée industriellement en Europe depuis 1945.

Le principe consiste à faire éclater un arc électrique entre deux fils ductiles consommables et à atomiser le matériau aussi fondu par un jet de gaz comprimé (généralement de l'air) qui le projette sur le substrat (Fig.6). Les pistolets à arc électrique sont alimentés par des générateurs à courant continu avec des tensions d'arc comprises entre 25 et 40 V, pour des intensités de courant allant de 100 à 500 A. Ils sont essentiellement constitués de deux parties :

- La première sert à l'entraînement des fils,
- La seconde assure la fusion et la projection du métal fondu [24],

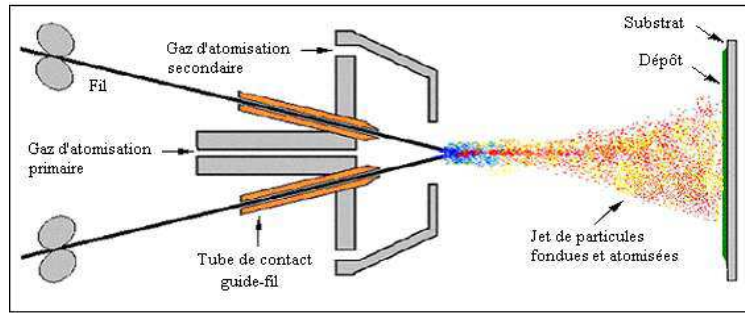


Fig.6 : Schéma de principe d'un dispositif de projection à l'arc électrique [24]

3-2-1-Projection plasma

Les techniques de projection thermique à plasma ont été utilisées dans l'industrie avec succès depuis de nombreuses années en vue de former un revêtement résistant à la corrosion, à l'oxydation, à l'usure etc. Le procédé de formation des revêtements constitue un problème multi-physique ; il inclut l'impact de particules fondues sur le substrat, le transfert thermique entre les particules et le substrat, l'écrasement et la solidification des particules (Fig.7) [53]

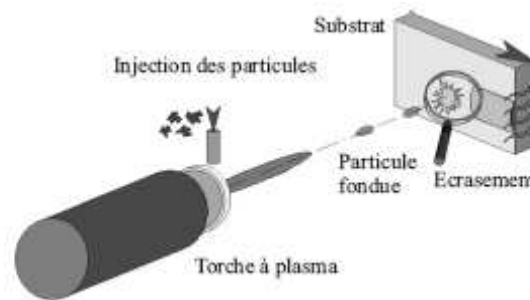


Fig.7 : procédé de projection plasma

III – Projection plasma

Ce procédé utilise des matériaux métalliques, céramiques ou cermets sous forme de poudre avec des particules de taille inférieure à 100 μm . Ces particules sont déposées dans un état fondu ou semi fondu sur des substrats préalablement préparés. La source de chaleur est un jet de plasma produit par arc électrique ou une décharge radiofréquence [61].

1- Torches à plasma d'arc

Dans la plupart des cas, la torche à plasma constituée d'une tuyère anode et d'une pointe cathode, fonctionne dans l'air à la pression atmosphérique. Ce procédé est appelé APS (Atmosphérique Plasma spraying).

La différence de potentiel aux bornes de la cathode et de l'anode provoque l'éclatement d'un arc entre la pointe de la cathode et la paroi de l'anode (Fig.8). Cet arc est ensuite entretenu par le courant de forte intensité. La partie du gaz chauffée par effet Joule forme un volume de gaz ionisée ou plasma appelé colonne d'arc. Cette colonne d'arc quitte la torche en formant un dard ou cœur du jet [34].

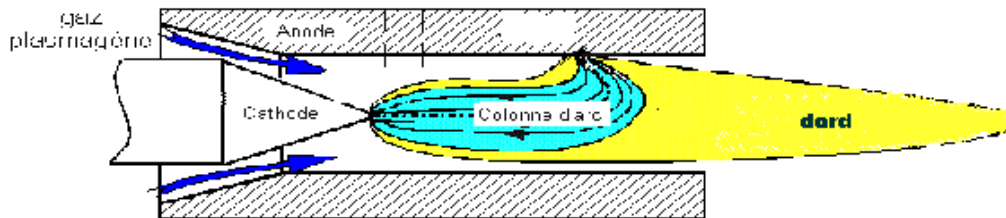


Fig.8 : Schéma type de la formation de l'arc dans la tuyère plasma [34]

Les torches à plasma d'arc sont alimentées en courant continu. Elles sont divisées en deux catégories, (Fig.9) :

- Les plasmas d'arc soufflé,
- Les plasmas d'arc transféré,

Elles comprennent :

- Une cathode où sont émis les électrons,
- Un système d'injection du gaz plasmagène,
- Une tuyère pour canaliser le plasma,

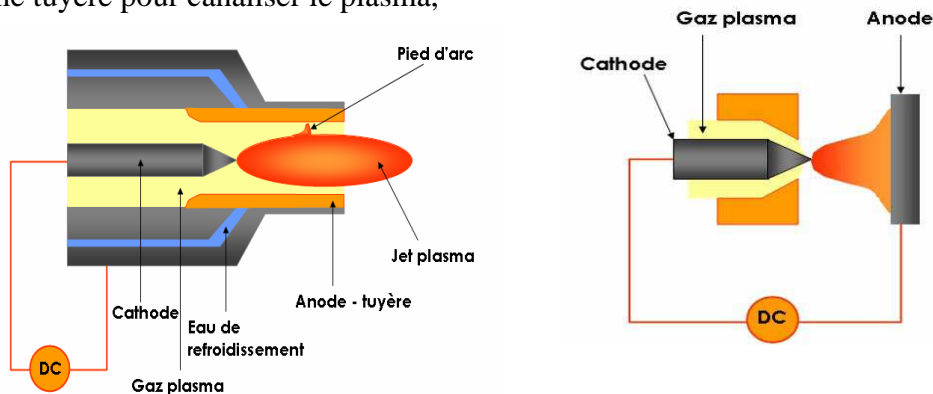


Fig.9 : Principe des torches à plasma d'arc (gauche : arc soufflé, droite : arc transféré) [31]

L'arc est initié entre la cathode et l'anode et ionise le gaz plasmagène. La température du plasma varie de 8 000 K (périphérie du plasma) à 15 000 K (cœur du plasma) ce qui permet des applications hautes températures (utilisation des propriétés thermiques du plasma). Un

plasma d'arc est un milieu extrêmement conducteur ($I = 50 - 600 \text{ A}$). Le gaz est hautement ionisé est la densité électronique est de l'ordre de $3 \times 10^{23} \text{ m}^{-3}$ [31].

1-1- Plasma d'arc soufflé

Le principe du procédé de projection par plasma d'arc soufflé peut se décomposer en quatre phases importantes :

1. génération de la source thermique, c'est-à-dire du jet de plasma, grâce à une torche à plasma,
2. injection des poudres dans l'écoulement plasmagène à l'aide d'un injecteur interne ou/et externe,
3. traitement des particules dans le jet plasma grâce aux interactions plasma-particules,
4. impact des gouttes sur substrat préalablement préparé, formation des lamelles (splats) et empilement de ces dernières c'est-à-dire génération du dépôt.

Chaque phase du procédé plasma est critique du point de vue de la construction du dépôt. Cela nécessite par conséquent une très bonne compréhension des mécanismes et des phénomènes intervenant durant la projection (Fig.10) [32].

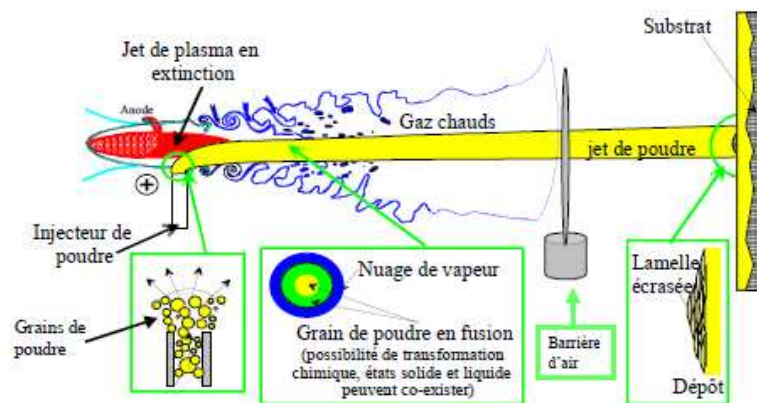


Fig.10 : Principe d'élaboration des dépôts par projection plasma [32]

P. Fauchait, V. Rat, J.-F. Coudert, R. Etchart-Salas, G. Montavon [38], ont fait des études sur les mécanismes et les phénomènes durant la projection, ces études sont résumées dont la (Fig.11)

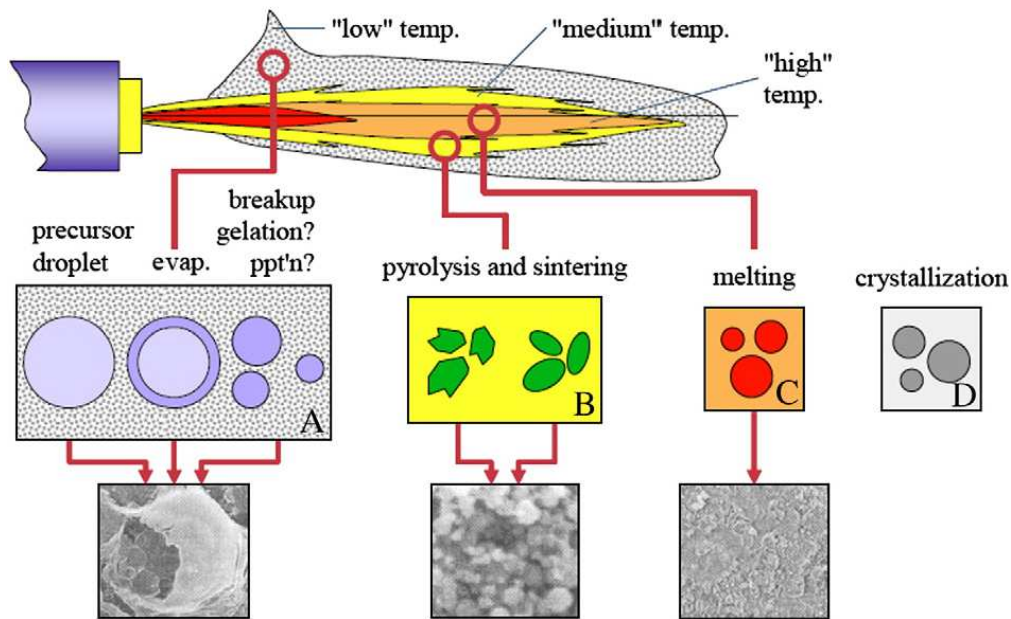


Fig.11 : Processus de revêtement par plasma en fonction de temps [38]

Les gouttelettes sont obtenues à partir des particules (poudre injectée) chauffées jusqu'à la fusion (obtenue du plasma).

On distingue plusieurs intervalles de température et chacun correspond à une morphologie de poudre.

Cas A : la forme de particule fondue est plus ou moins poreuse selon la nature de solution, pour les plus petites gouttelettes ($d_1 < 5 \text{ mm}$), la solution projetée comporte des gouttelettes entières,

Cas B : par contre les particules les plus grandes sont fragmentées selon leurs pressions intérieures et leurs caractéristiques mécaniques.

Les particules transportées dans le cœur chaud du courant de plasma (les mécanismes A, B et C), les mécanismes qui présentent le transport des particules au bord de jet de plasma sont A et B (les plus probables)

Le cas D les gouttelettes sont solidifiées et cristallisées

1-2- Plasma d'arc transféré (PTA)

Le principe de dépôt par plasma à l'arc (appelé aussi rechargement plasma) est montré sur la (Fig.12). L'arc « pilote » est initié entre la cathode de tungstène thorié et l'anode de cuivre, refroidie à l'eau. L'arc chauffe le gaz plasmagène qui est typiquement de l'argon. Ensuite, la torche est approchée du substrat et l'arc transféré s'allume entre la cathode et le substrat. Cet arc fond localement le substrat. La poudre est alors introduite dans le bain en

créant le dépôt, le bain est protégé contre l'influence de l'atmosphère ambiante par un gaz inerte [29]

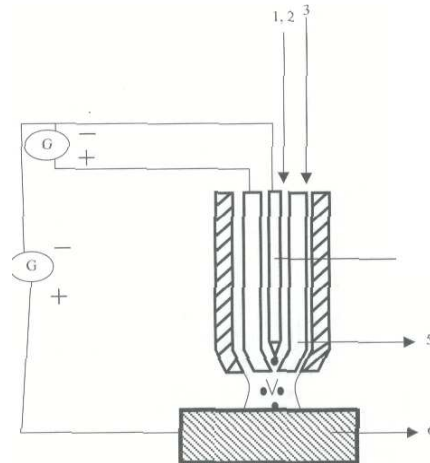


Fig.12 : Schéma du procédé de rechargement plasma : 1, gaz plasmagène ; 2, injection de la suspension de poudre dans un gaz porteur ; 3, gaz protecteur ; 4, cathode ; 5, anode ; 6, substrat [29]

Les revêtements obtenus par la technique PTA sont principalement des aciers, des alliages à base de nickel ou de cobalt (stellites). Leur qualité dépend surtout des paramètres de :

- la torche,
- la poudre,
- la position de la torche par rapport au substrat [29].

2- Caractéristiques du plasma et des particules en vol

2-1- Ecoulement du jet de plasma

La (Fig.13) schématise l'écoulement du jet de plasma dans l'atmosphère. Le jet formé dans la chambre d'arc (zone 1) sort avec une grande vitesse ($500 \text{ à } 2500 \text{ m.s}^{-1}$) et entre en contact avec le gaz environnant froid et au repos (zone 2). La différence de vitesse entre le jet et les gaz froids environnant engendre, à la frontière du jet, la formation de tourbillons d'instabilités, appelés « tourbillons de Kelvin-Helmoltz ». Ces tourbillons grossissent en ce déplaçant vers l'aval et l'écoulement devient turbulent. Ils engouffrent le gaz ambiant sous forme de bulles qui gardent, dans un premier temps, une masse volumique et une inertie supérieures (plus d'un ordre de grandeur) à celles du gaz plasmagène. Ces bulles, progressivement chauffées par le plasma, se cassent dans le jet en structures de plus en plus petites et augmentent le caractère turbulent au sein de l'écoulement (zone 3). Lorsque ces turbulences atteignent l'axe de jet, celui-ci perd son caractère laminaire. Il devient alors

pleinement turbulent et l'entraînement croissant du gaz ambiant contribue à réduire sa vitesse et son enthalpie (zone4) [33].

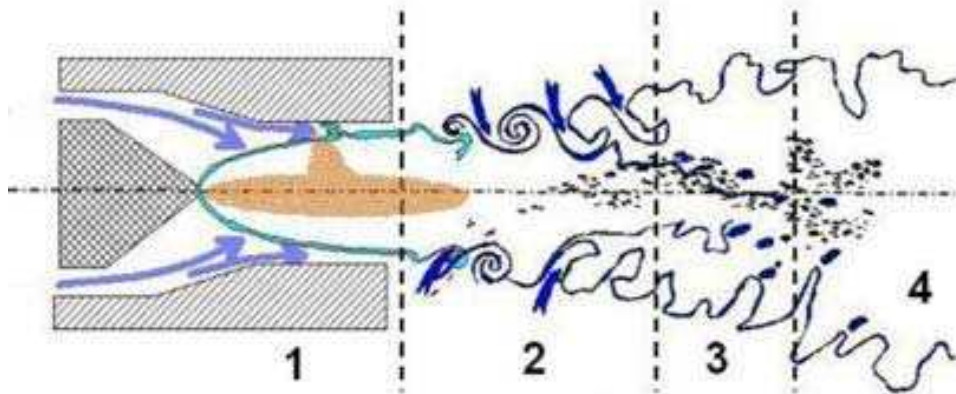


Fig.13 : Ecoulement du jet plasma dans le gaz environnant : 1. Ecoulement laminaire, 2. Début de développement de la turbulence, 3. Ecoulement cisailé turbulent, 4. Ecoulement pleinement développé [33].

2-2 -Injection des poudres dans le jet de plasma

Les paramètres d'injection de la poudre dans le jet de plasma déterminent les trajectoires et le traitement thermique des particules. Outre le fait que les particules aient une distribution granulométrique et le gaz porteur une distribution vitesse, les faibles dimensions de poudre ($\Phi < 150 \mu\text{m}$) et des injecteurs ($\Phi_{\text{interne}} < 2 \text{ mm}$) conduisent à des trajectoires de grains de poudres aléatoires dans l'injecteur du fait des collisions des particules entre elles et avec les parois de l'injecteur. Les particules les plus petites ont tendance plus que les autres à entrer en collision avec les parois de l'injecteur. Ceci conduit ainsi à l'abaissement de leur quantité de mouvement et à une composante radiale importante de leur vitesse. Elles ont donc plus de difficultés pour pénétrer dans le plasma, comparativement aux particules plus grosses. Ces grosses particules, suivent des trajectoires plus rectilignes et conservent alors une vitesse plus élevée. Du fait de la large distribution de vitesses d'injection, les particules vont suivre des trajectoires variées autour d'une trajectoire moyenne. On peut ainsi distinguer trois groupes de particules :

- celles qui possèdent une trop grande quantité de mouvement (généralement les particules de plus gros diamètre) et qui traversent presque perpendiculairement le jet sans subir de traitement thermique suffisant à cause d'un temps de vol trop court dans les zones chaudes du jet,

- celles dont la quantité de mouvement est adaptée pour pénétrer au cœur du plasma où elles sont fondues totalement ou partiellement, et accélérées vers le substrat,
- celles qui sont injectées avec une quantité de mouvement insuffisante pour pénétrer dans le jet (particules de petite taille) et qui restent en périphérie du plasma [7].

2-3- Interaction flamme particules

Le transfert de chaleurs et de quantité de mouvement du plasma vers une particule dépend essentiellement du temps de séjour de la particule dans le plasma et de la nature des gaz constituant ce dernier (généralement Ar-H₂ ou Ar-He ou Ar-He-H₂). Une particule injectée dans un plasma peut subir trois types d'interactions :

a – un transfert d'énergie cinétique plasma/particules (ou transfert de quantité de mouvement) qui permet d'accélérer les particules vers le substrat. En effet, du fait de sa quantité de mouvement, le plasma s'oppose à la pénétration des particules. Ceci explique la nécessité pour les particules d'avoir une quantité de mouvement de l'ordre de celle du plasma pour atteindre le centre du jet.

b – un transfert d'énergie thermique plasma/particule (ou transfert de chaleur) qui chauffe les particules et les porte éventuellement à l'état liquide voire les vaporise.

Les principaux paramètres qui interviennent pour le chauffage d'une particule immergée dans un plasma sont : les transferts par conduction à travers la couche limite qui entoure la particule (ce type de transfert qui est fonction de la conductivité thermique de la particule elle-même liée à sa morphologie et de la valeur relative de cette conductivité thermique par rapport à celle moyennée du plasma est le mécanisme majeur de chauffage), les transferts par convection qui représentent 10 à 20 % du transfert de chaleur, les transferts par rayonnement qui deviennent non négligeables dès que la température de surface de la particule s'approche du point d'ébullition surtout du fait des vapeurs métalliques alors continuer dans le plasma chargé de particules.

c – un transfert de masse qui peut avoir lieu soit du plasma vers les particules en vol si, par exemple, il y a une oxydation de surface des particules, soit des particules vers le jet s'il y a des particules en vol, soit les deux [7].

3- Interaction plasma substrat

Nourouzi [24] à fait des études sur l'interaction particule substrat et trouve que le dépôt présente une structure de forme des lamelles comme indique dont la (Fig.14)

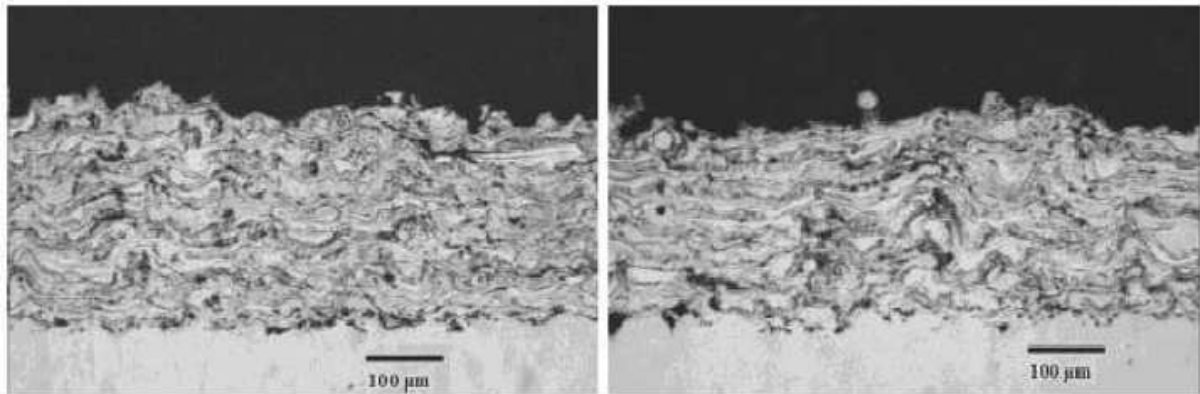


Fig.14 : Micrographie optique d'un dépôt de 316L réalisé par projection arc-fil

Les caractéristiques de revêtement (microstructure, rugosité, micro dureté, porosité, teneur en oxydes, adhérence des dépôts...) sont variés en fonction des paramètres opératoires, elles dépendent essentiellement de :

- l'état de fusion et de la température des particules à l'impact,
- leur vitesse,
- la nature des gaz d'atomisation et de l'atmosphère environnante,
- la vitesse relative pistolet-substrat,

L'état de fusion et la vitesse des particules dépendent notamment de leur taille à l'impact, elle-même conditionnée par la géométrie de buse d'atomisation et la nature du gaz d'atomisation utilisé ainsi que son débit et les propriétés physiques (masse volumique) et thermiques (chaleur spécifique, température de fusion,...) du matériau constituant le fil projeté [57-60].

4 -Caractéristiques mécaniques des revêtements

4-1- Contraintes dans les revêtements

Généralement les couches minces sont déposées sous contraintes, ces contraintes peuvent provoquer des fissures et des fragmentations aux surfaces et aussi la décohésion de la couche avec le substrat, donc pour régler ce problème il faut bien contrôler le processus de projection des couches minces et minimiser les contraintes au maximum ou soulager les contraintes après la déposition. La figure 15 illustre quelques origines mécaniques des contraintes selon Robert et C. Cammarata [39]

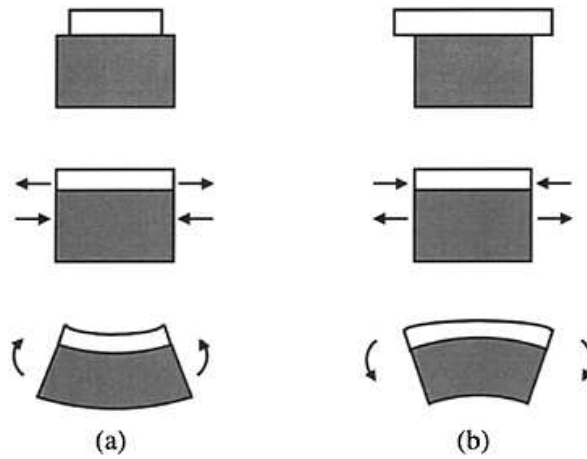


Fig.15 : contrainte dans les couches minces [39]

(a) Contraintes de compression

(b) Contraintes de décompression

4-2 -Usure des revêtements

De point de vue purement qualitatif, l'usure des différents dépôts peut être décrite par deux phases. Dans les premières minutes de l'essai, indépendamment du dépôt, l'usure consiste, comme le montre la figure 16-a en un polissage de la surface du revêtement (usure douce).

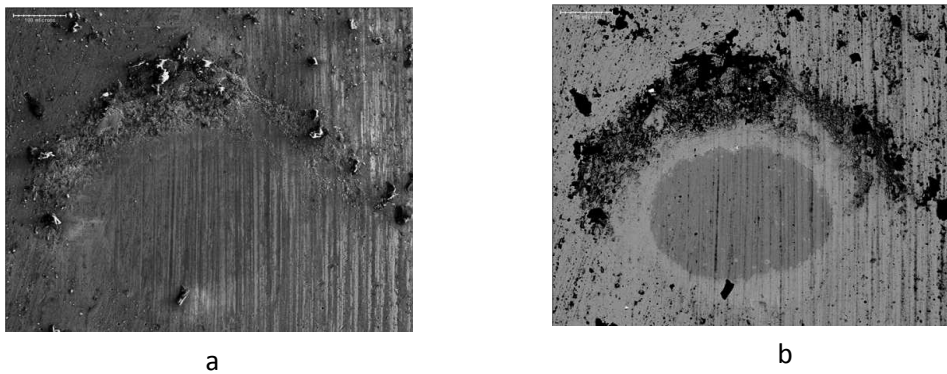


Fig.16 : Image MEB d'une trace d'usure d'un échantillon multicouche TiN/Cr, après 10 minutes de frottement. Image en mode électrons secondaires (SEI) (a) et électrons rétrodiffusés (BSE) (b) [48].

Les débris d'usure s'accumulent à l'avant du contact entre le plan et la bille. Ces derniers apparaissent en noir sur la micrographie réalisée en électrons rétrodiffusés (Fig.16-b) et sont donc composés d'éléments ayant une masse volumique moyenne plus faible que le dépôt,

probablement des oxydes. Lorsque le frottement se poursuit et après un temps variables, certains dépôts s'écaillent [48].

Pantelis et al [54] ont étudié le comportement tribologique d'un revêtement d'alumine par plasma dans des conditions d'usure sévère et a montré que l'usure d'un tel revêtement présente trois stades (Fig. 17).

Durant le premier stade, le taux d'usure décroît rapidement et le revêtement s'usé selon le mécanisme d'adhésion. Durant le deuxième stade, le taux d'usure est constant et l'usure de revêtement prend un mécanisme d'usure combinatoire (polissage, abrasion, fatigue) avec une formation des débris de petite dimension ($< 1\mu\text{m}$), Pour le dernier stade, le taux d'usure croît rapidement jusqu'à l'usure totale de la couche de céramique. La figure 18 présente l'endommagement d'une couche d'alumine déposée sur un substrat d'acier.

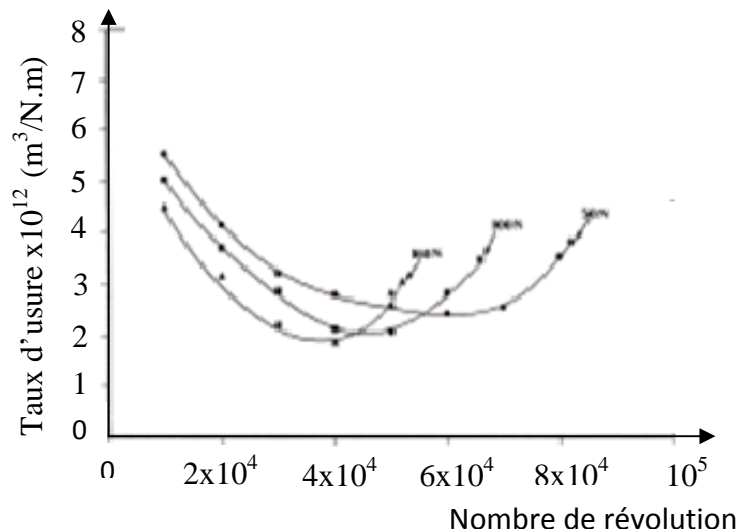


Fig.17 : taux d'usure en fonction de nombre de révolution pour trois charges normales appliquées 50, 100 et 160 N [54].

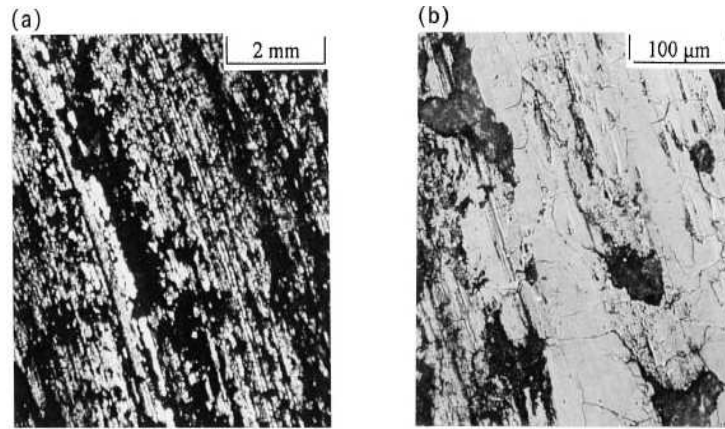


Fig.18 : Micrographie optique d'une usure de la couche de céramique Al_2O_3 [54]

4-3-Test de percussion

Christophe Mendibide [48] a fait des essais de percussion, ces essais consistent à réaliser sur chaque revêtement, des séries de 10 à 5000 chocs. Après chaque essai, la surface sollicitée est observée au MEB et une hiérarchie est établie en évaluant le nombre d'impacts nécessaire pour observer l'écaillage. Le faciès de fissuration est également systématiquement déterminé par des observations en coupe.

Les deux types de dépôts (TiN, CrN) subissent des endommagements différents (Fig.19)

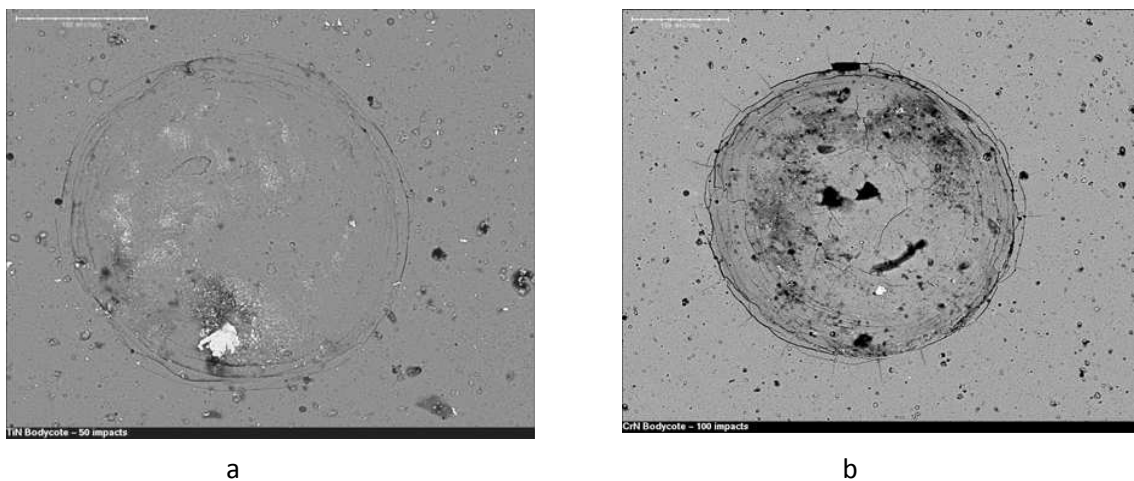


Fig.19 : Observation en électrons rétrodiffusés de la surface endommagée, pour un faible nombre d'impacts sur les dépôts TiN (a) et CrN (b) élaborés par évaporation à arc [48].

Durant la phase initiale, pour tous les dépôts, la zone proche de l'empreinte est lézardée de nombreuses fissures circulaires (Fig.19.a). Pour ce qui concerne CrN (Fig.19.b), des fissures distribuées de manière aléatoire sont également visibles au centre de l'empreinte, de même

qu'une fissuration radiale périodique. Ce dernier type a également été observé sur CrN déposé sur un acier M2 trempé revenu, plus dur, et dénote donc d'une fragilité intrinsèque du dépôt. Puisque la fissuration apparaît dès les premiers impacts pour tous les dépôts, le paramètre discriminant pour ces essais est le nombre d'impacts nécessaire pour obtenir l'écaillage (Fig.20) [48]

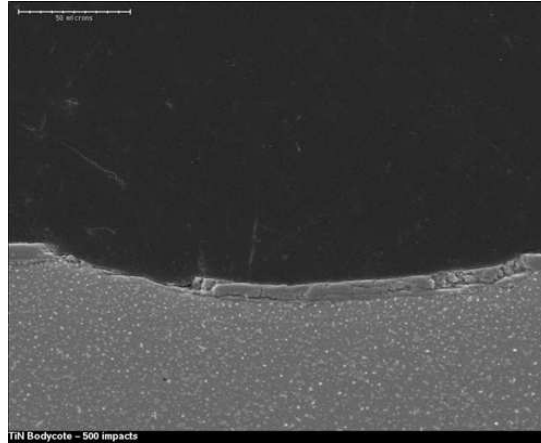


Fig.20 : Coupe métallographique (électrons secondaires), de l'empreinte laissée sur les échantillons de TiN déposé sur l'acier M2 après 500 impacts [48].