

## Métallisation par impact (Revêtements par projection thermique)

### Introduction

L'apparition des revêtements par projection thermique date de 1909 avec l'invention de **Schoop** portant sur la projection de plomb fondu à l'aide d'un vaporisateur, puis de plomb en poudre à travers une flamme. Les premières applications industrielles sont apparues en **1914** dans le domaine militaire (projection d'étain sur la face arrière d'obus), dans celui de l'anticorrosion (dépôts d'aluminium), ou encore en décoration (dépôts de bronze). Dès 1914 également des essais de projection par arc électrique furent réalisés.

C'est après la Seconde Guerre mondiale que le domaine d'application de la projection thermique s'est élargi à l'**industrie mécanique** (apport de revêtement d'acier dans le cadre de **rénovation de pièces usagées**), puis à l'**industrie aéronautique**.

La recherche de propriétés de surface spécifiques sur les pièces en service, dont les conditions d'emploi sont de plus en plus sévères, a permis le développement de nouveaux procédés [**plasma, canon à détonation, HVOF High Velocity Oxygene Fuel...**] et de nouveaux matériaux associés (**céramiques, carbures, composites, superalliages...**). Aujourd'hui les objectifs techniques et économiques des industriels de tous les secteurs vont dans le sens de la réduction des coûts et de l'amélioration des performances. Les pièces constitutives de machines ou équipements, de dimensions de plus en plus réduites, doivent résister à des sollicitations nombreuses :

- **sollicitations internes** : contraintes mécaniques, fatigue, fluage... ;
- **sollicitations externes** : frottement, abrasion, température, érosion, fretting... ;
- **sollicitations environnementales** : corrosion, oxydation, attaque chimique, chaleur...

La projection thermique va permettre de conférer à chaque zone la propriété de surface nécessaire à son fonctionnement, tout en autorisant des choix de matériaux de base compatibles avec les propriétés à cœur recherchées. Tous les secteurs d'activité sont aujourd'hui concernés par la projection thermique. Si la **protection anticorrosion** reste le cas d'application le plus fréquent, certains secteurs comme l'**automobile** présentent des applications multiples parmi lesquelles on peut citer à titre d'exemples :

- **soupapes, segments de piston, anneaux de synchro, disques d'embrayage, sondes lambda, cylindres, pompes, platines d'alternateurs, plaquettes de freins...**

### I. Principe général de la projection thermique

La projection thermique regroupe l'ensemble des procédés grâce auxquels un matériau d'apport est fondu ou porté à l'état plastique grâce à une source de chaleur, puis il est projeté sur la surface à revêtir sur laquelle il se solidifie (voir figure 1).

- La surface de base ne subit ainsi aucune fusion.
- L'adhérence du dépôt est mécanique.

La figure 1 présente le principe général de la projection thermique : la matière à déposer, sous forme de poudre, de fil, de cordon ou de baguette est fondue totalement ou partiellement dans une source de chaleur (flamme, arc électrique, plasma). Un gaz vecteur permet une pulvérisation de la matière, et le transport des gouttelettes ainsi formées jusqu'à la surface à revêtir.

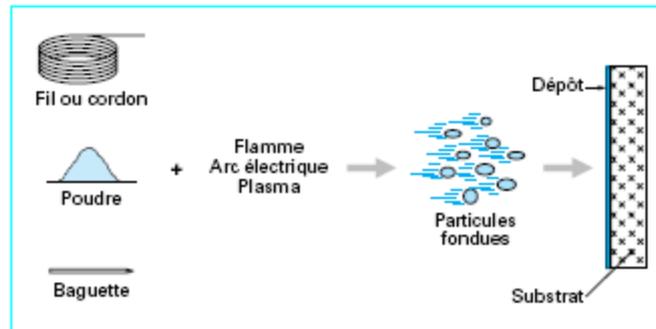


Figure 1 - Principe fondamental de la projection thermique

### I.1. Formation et structure des dépôts

Les dépôts formés par projection thermique sont obtenus par empilements successifs de gouttelettes de matériau fondu ou à l'état pâteux. La structure ainsi formée est du type lamellaire (voir figure 2)

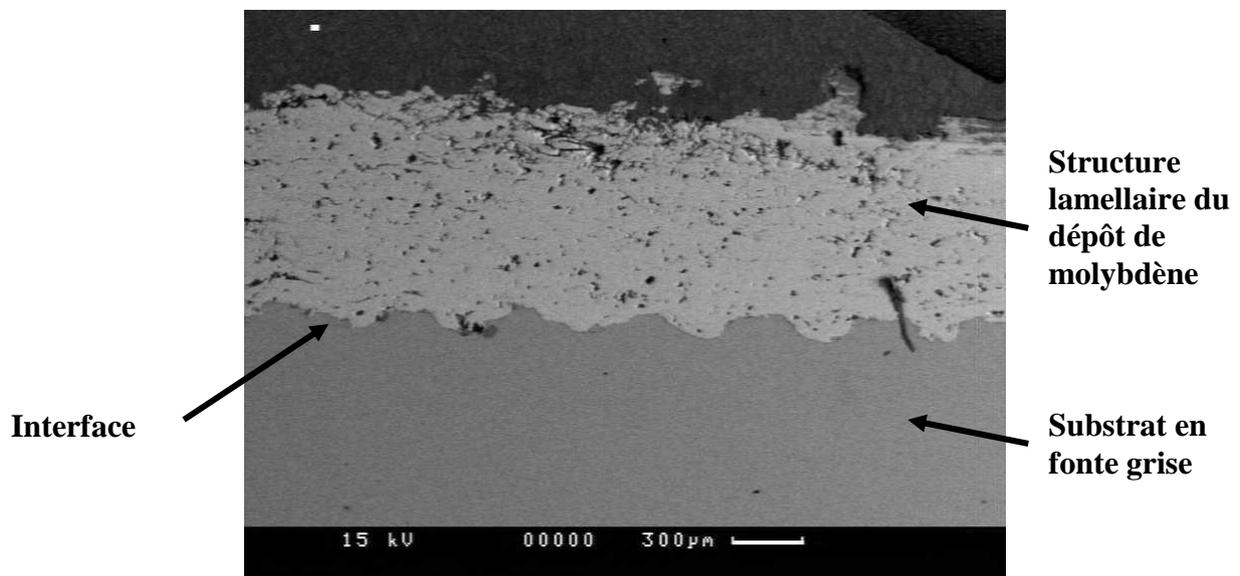


Figure 2. M.E.B Dépôt du molybdène sur substrat en fonte grise obtenu par projection flamme-fil [1]

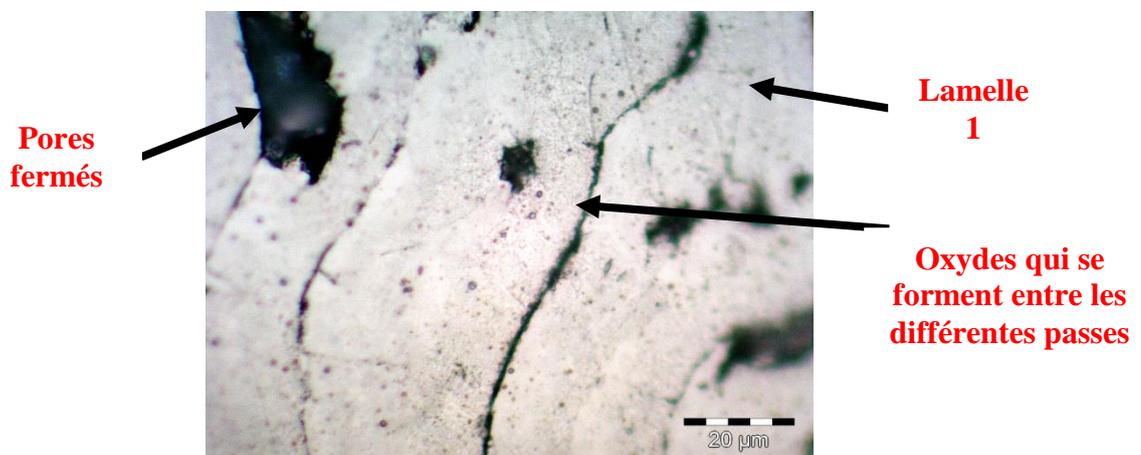


Figure 3. Vue d'ensemble par microscopie optique du dépôt de molybdène [1]  
[1]. Photos prises à partir des résultats M.Z.TOUHAMI, S.TLILI/Thèse doctorat

Afin de réaliser un bon accrochage mécanique, la surface des pièces à revêtir est préalablement préparée pour en augmenter la rugosité et permettre aux particules de s'ancrer dans les irrégularités de surface.

La formation du dépôt présente deux étapes caractéristiques:

- l'écrasement de chaque gouttelette ;
- la formation d'une couche de matériau, résultant de la cinématique liée au process (mouvements relatifs torche/pièce).

Ce mécanisme **d'écrasement** est un mécanisme complexe dépendant d'une part des caractéristiques des particules elles-mêmes (vitesse, composition chimique, température, degré de fusion), et d'autre part de celles du substrat (nature, rugosité, température).

Deux types de structures existent après impact/

- une **structure « fragmentée »**, constituée d'un disque central de faible diamètre et de ramifications dirigées vers l'extérieur (voir fig.4a).
- une **structure en forme de disque**, constituée à partir d'un écoulement continu et stable du liquide, allant du point d'impact de la particule vers la périphérie ((voir fig.4b).

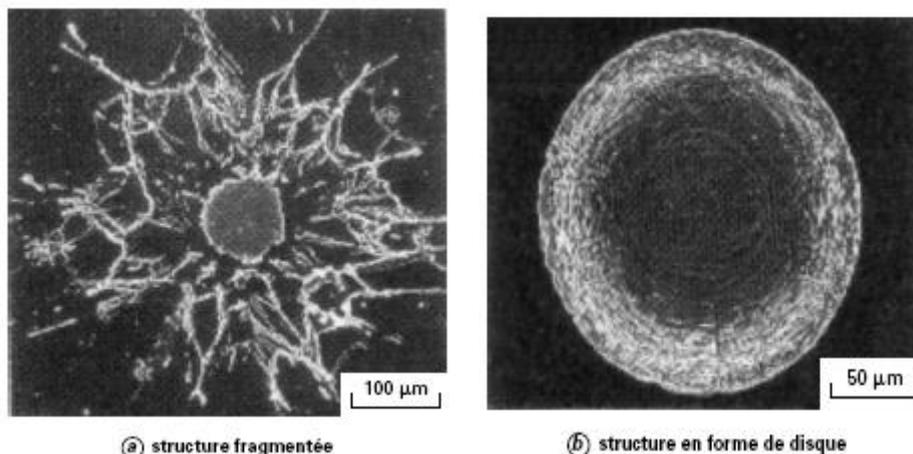


Figure 4(a, b). Mécanismes d'écrasement des particules

Les expérimentations récentes montrent qu'en dessous d'une **température appelée température de transition** la structure obtenue est du type « **fragmentée** ». Ce phénomène est attribué à un temps de germination plus important quand l'interface particule/substrat est maintenue à une certaine température. L'état liquide est ainsi conservé pendant toute la durée de l'impact.

D'autres facteurs, tels que la **mouillabilité et la conductibilité thermique du matériau** de base, influent également sur cette structure. La vitesse de refroidissement des particules au contact du métal de base est généralement supérieure à  $10^6$  K/s, le temps de solidification étant compris entre 0,5 et 2,5  $\mu$ s.

**La formation d'un dépôt résulte de la combinaison du phénomène d'écrasement et de solidification rapide de particules fondues sur le substrat et du balayage de la surface à traiter.** La réaction chimique des particules avec les gaz environnants et les transferts de chaleur avec le substrat (ou la couche précédemment déposée) vont affecter la qualité du dépôt, et en particulier le taux de porosité, le taux d'impuretés, les contraintes résiduelles et la structure métallurgique.

## I.2. Caractéristiques générales des dépôts

### 1.2.1. Structure métallurgique

Les dépôts sont généralement stratifiés, s'ils ne sont pas traités a posteriori. Ils sont poreux, la porosité provenant soit de **microcavités dues à un empilage imparfait des gouttelettes**, soit de **gaz enfermés pendant la solidification**. Le taux de porosité varie de moins de 1 % à 25 % suivant les procédés et les matériaux utilisés. Les dépôts comportent des inclusions telles que des **oxydes** ou encore **d'autres matériaux provenant des chalumeaux eux-mêmes**, des particules infondues ou partiellement fondues n'ayant pas subi un cycle thermique complet (en raison de leur taille ou de leur cheminement dans la source de chaleur).

La figure 5 représente la coupe d'un dépôt. En raison de la très grande vitesse de refroidissement des particules au contact du substrat, leur structure métallurgique est du type trempée, généralement à phase unique. Ceci permet d'expliquer que la structure d'origine du matériau peut se trouver modifiée après dépôt. À titre d'exemple, on peut citer le cas de l'alumine, projetée sous forme alpha et qui se retrouve sous forme gamma dans le dépôt. Une autre conséquence de ces cycles thermiques sévères est la présence possible de microfissures intragranulaires à l'intérieur des dépôts. Enfin, lors des projections réalisées dans l'air, les particules et les substrats sont soumis au phénomène d'oxydation. Il n'est ainsi pas rare de constater une augmentation du taux d'oxygène pendant la projection (par exemple, le tungstène projeté par plasma atmosphérique à partir de poudre contenant 200 ppm d'oxygène voit ce taux passer à 5000 ppm dans le dépôt).

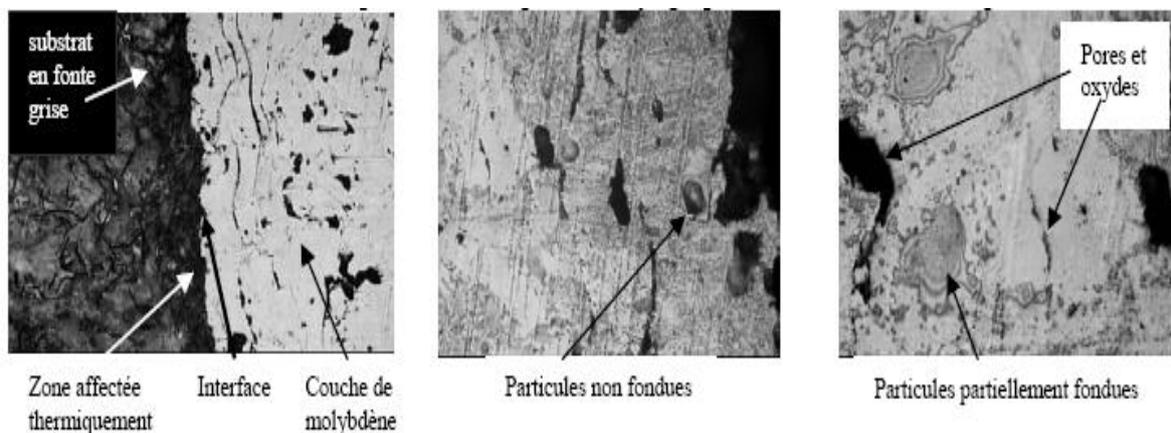


Figure 5 (a, b, c). Micrographies optiques

a) Dépôt de la couche de molybdène et du substrat (e=1mm)

(b,c)- Micrographies montrant la couche de molybdène ainsi que les défauts

### 1.2.2. Adhérence

Les dépôts adhèrent au substrat par un phénomène mécanique. Suivant les procédés et les matériaux, l'adhérence varie de 20 à 115 MPa. Dans les cas où elle s'avère insuffisante (cas des projections d'oxydes par exemple), on utilise des sous-couches d'accrochage, parmi lesquelles on peut citer l'aluminure de nickel, le molybdène, ou encore les alliages du type NiCr (80/20) ou MCrAlY (M désignant Ni, Co ou NiCo).

## II. Présentation des différents procédés

Les techniques de traitements de surface se répartissent en quatre familles :

- ❖ les revêtements par voie sèche ou humide ;
- ❖ les traitements de conversion (réaction superficielle entre le matériau d'apport et le substrat) ;
- ❖ les traitements de diffusion (le matériau d'apport diffuse dans le substrat) ;
- ❖ les transformations structurales (modification de la structure métallurgique du substrat).

La figure 6 présente les principales techniques utilisées en traitement de surface. Le choix d'un procédé est directement issu d'un certain nombre de facteurs parmi lesquels on peut citer :

- les conditions en service de la pièce traitée ;
- la forme de la pièce ;
- la nature du matériau de base ;
- la nature du matériau d'apport le plus performant.

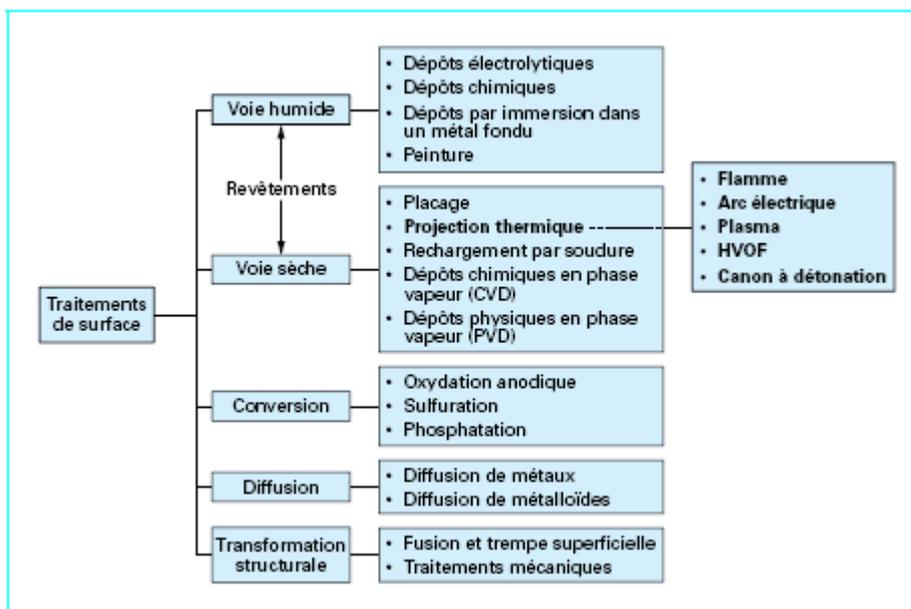


Figure 6. Les principales techniques utilisées en traitement de surface

### II.1. Les procédés de projection thermique

Tous les procédés utilisent le même principe : fondre un matériau d'apport, puis le projeter grâce à un gaz vecteur.

Deux types d'énergie sont utilisés comme source de chaleur :

- ❖ la flamme ;
- ❖ l'arc électrique.

L'autre caractéristique commune à l'ensemble des procédés est la liaison avec le substrat qui est entièrement mécanique, avec cependant, dans quelques cas particuliers, interdiffusion entre dépôt et substrat. Le tableau 1 résume les principales caractéristiques de ces procédés.

Type de dépôt		Principe	Liaison	Épaisseur (mm)	Porosité moyenne (%)	Interaction avec le substrat
Électrolytique		Réduction par courant électrique	Mécanique	0,02 à 0,2	0	Non
Chimique		Réduction chimique dans un sel dissous	Mécanique	0,1	0	Non
Par immersion		Métal en fusion	Mécanique	0,03	0	Non
Placage		Laminage	Mécanique	5 à 10	0	Non
Projection thermique	Flamme (§ 2)	Fusion matériau d'apport + projection	Mécanique	0,05 à 2	5 à 15	Non
	Arc électrique (§ 3)	Fusion matériau d'apport + projection	Mécanique	0,5 à 3	5 à 15	Non
	Plasma (§ 4)	Fusion matériau d'apport + projection	Mécanique	0,1 à 1	2 à 10	Non
	HVOF (§ 2.5.2)	Fusion matériau d'apport + projection	Mécanique	0,1 à 1	< 3	Non
	Canon à détonation (§ 2.5.1)	Fusion matériau d'apport + projection	Mécanique	0,1 à 1	< 3	Non
	Projection avec refusion (§ 2.4)	Refusion sur support après projection	Mécanique + diffusion	0,5 à 1,5	< 2	Diffusion
Soudage	Flamme	Fusion métal apport	Métallurgique	1 à 2	0	Fusion
	Arc, atmosphère réductrice	Fusion métal apport	Métallurgique	2 à 7	0	Fusion
	Arc, atmosphère inerte	Fusion métal apport	Métallurgique	2 à 7	0	Fusion
	Plasma, arc transféré	Fusion métal apport	Métallurgique	1 à 5	0	Fusion
Phase vapeur	PVD	Évaporation métal d'apport	Diffusion	0,01	0	Non
	CVD	Évaporation métal d'apport	Diffusion	0,005	0	Non

Caractéristiques	Projection flamme-poudre	Projection flamme-fil	Arc électrique	Plasma	HVOF	Canon à détonation
Source de chaleur	flamme oxyacétylénique	flamme oxyacétylénique	arc électrique	plasma	flamme oxyacétylénique	flamme oxyacétylénique
Température de flamme..... (°C)	3 000	3 000	6 000	12 000	3 000	3 000
Transport des particules	gaz flamme	air comprimé	air comprimé	gaz plasma (Ar/H)	gaz flamme	gaz flamme
Vitesse des particules..... (m/s)	40	150	250	200	700	950
Forme du produit d'apport	poudre	fil-cordon	fil	poudre	poudre	poudre
Taux horaire de dépôt..... (kg/h)	1 à 3	1 à 20	5 à 30	1 à 4	3 à 5	3 à 5
Rendement moyen (1)(%)	50	70	80	70	70	70
Force d'adhérence..... (MPa)	20 à 40	20 à 40	40	30 à 70	50 à 80	50 à 80
Taux de porosité..... (%)	10 à 20	10 à 20	8 à 15	1 à 10	0,5 à 2	0,5 à 2
Épaisseur déposée ..... (mm)	0,1 à 1,5	0,1 à 1,5	0,2 à 3	0,05 à 1,5	0,05 à 1	0,05 à 1
Exemples de matériaux d'apport	- métaux - céramiques - carbures dans matrice métallique	- métaux - céramiques - carbures dans matrice métallique	- métaux	- métaux - céramiques - carbures	- métaux - carbures	- carbures - céramiques

(1) Pourcentage de poudre projetée qui adhère au matériau.

## II.2. Projection thermique flamme

### II.2.1 Principe général

La projection thermique utilisant l'énergie calorifique provenant de la combustion de gaz est connue sous le nom de **projection flamme**. La température d'une flamme oxycombustible varie de 2800°C (oxypropane) à 3150°C (oxyacétylène) (voir fi.7). Les matériaux qui fondent à une température inférieure à 2800°C, et qui ne se subliment pas, peuvent être projetés à la flamme.

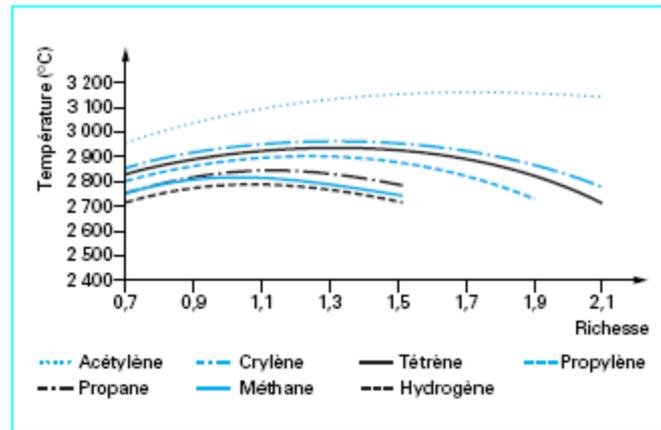


Figure 7. Température de flamme oxycombustible (doc Air Liquide)

## II.3 Projection flamme-poudre

### II.3.1 Principe

On désigne généralement sous le nom de projection flamme-poudre le procédé de projection thermique le plus ancien, consistant à introduire un matériau sous forme de poudre dans une flamme oxycombustible et à le véhiculer grâce à l'énergie cinétique transmise par les gaz de combustion (figure 7).

Il existe deux types de moyens de projection de la matière fondue en utilisant une torche à gaz qui sont des chalumeaux oxygaz équipés d'un récipient contenant la poudre (voir fig.8a). Les pistolets flamme-poudre sont de deux types (voir fig.8b):

- à réservoir de poudre intégré, la poudre tombant par gravité puis étant aspirée par un des gaz de combustion ;
- à réservoir séparé, relié au pistolet par un flexible, la poudre étant véhiculée par un gaz porteur (gaz neutre, air...).

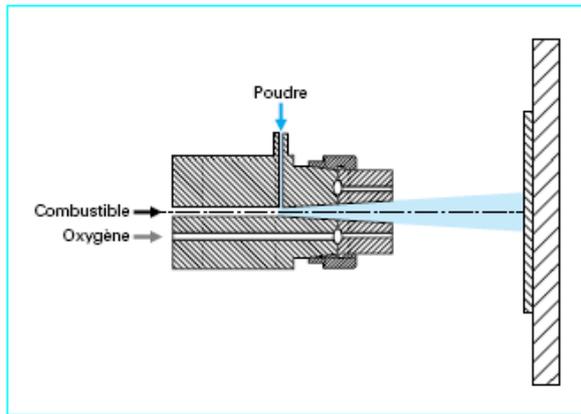
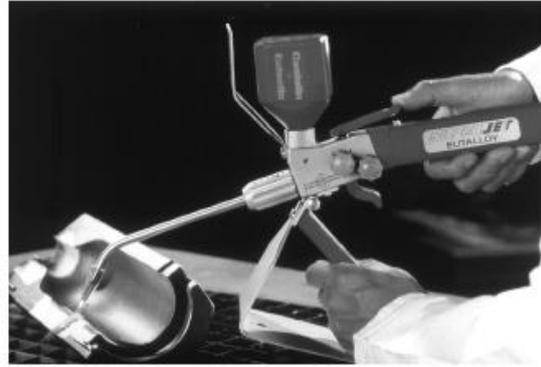


Figure 8 (a, b). a) schéma de principe d'une torche flamme-poudre  
b) Projection flamme-poudre sur moule de verrerie

La vitesse des particules projetées est faible (30 m/s) et la distance entre buse et substrat est comprise entre 100 et 200 mm (afin que la poudre ait un temps de séjour suffisamment long pour être fondue). Ce procédé permet des dépôts de quelques dixièmes de millimètre d'épaisseur, à des taux horaires de dépôt d'environ 2 à 3 kg/h, sans échauffement important du substrat. Les matériaux les plus utilisés restent les alliages auto fusibles, la refusion après projection permettant d'améliorer l'adhérence et de diminuer la porosité. La projection d'aciers, d'alliages à bas point de fusion, de céramiques ou de polymères est également possible.

## II.4 Projection flamme-fil

### II.4.1 Principe

Contrairement au procédé flamme-poudre, la flamme ne sert en projection flamme-fil qu'à fondre le métal d'apport, introduit sous forme **de fil, de cordon, ou de baguette**, en son centre. Une fois fondu, le matériau d'apport est projeté sur le substrat par un courant d'air comprimé (fig. 9a).

### II.4.2 Pistolets flamme-fil

Les pistolets de projection flamme-fil se composent de deux parties (fig. 9b) :

- une partie chalumeau dans laquelle le matériau d'apport est fondu et pulvérisé ;
- une partie entraînement de fil.

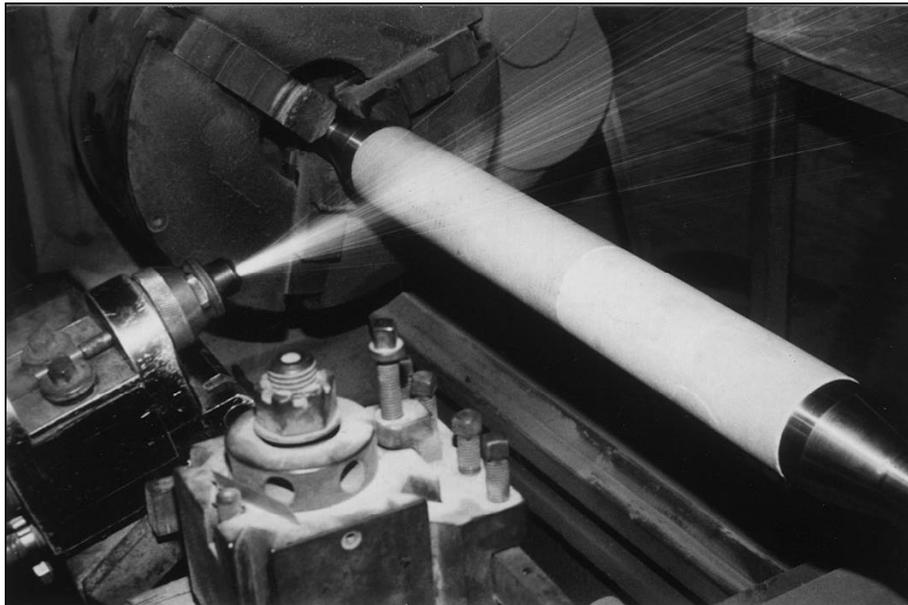


Figure 9a - Projection flamme de cordon d'alumine (doc. SNMI)

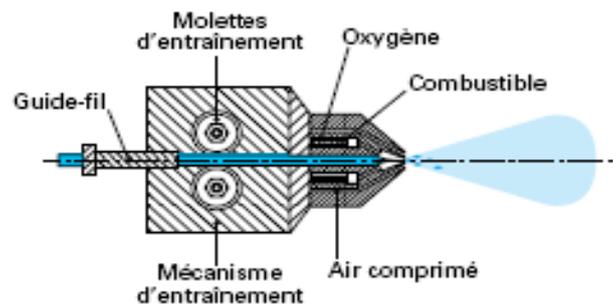


Figure 9b- Principe de fonctionnement d'un pistolet flamme-fil (doc AREGA)

La vitesse des particules est d'environ 150 m/s et la distance entre buse et substrat est comprise entre 100 et 200 mm. Les épaisseurs déposées peuvent aller de quelques dixièmes de millimètre à quelques millimètres, à des taux horaires très variables suivant les matériaux, les diamètres de fil utilisés, et les propriétés de dépôts recherchées : de 1 kg/h, pour certaines céramiques préparées sous forme de cordon souple ou de baguette, à plus de 30 kg/h pour des fils anticorrosion tels que le zinc.

Cette technique de projection permet de réaliser les grandes familles de dépôts suivantes :

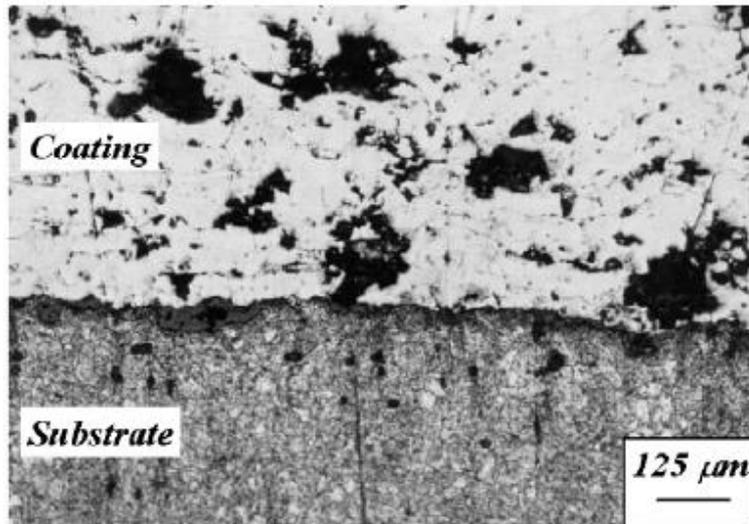
- Métaux : Zn, Al, Cu, Sn, Pb, Ni, Mo, aciers, aciers inoxydables ;
- Alliages de base Zn, Cu, Ni ou Sn ;
- Céramiques sous forme de cordon ou de baguette : NiAl, NiCrBSi,  $Al_2O_3$ ,  $Al_2O_3-TiO_2$ ,  $Cr_2O_3$ ,  $ZrO_2-CaO$ .



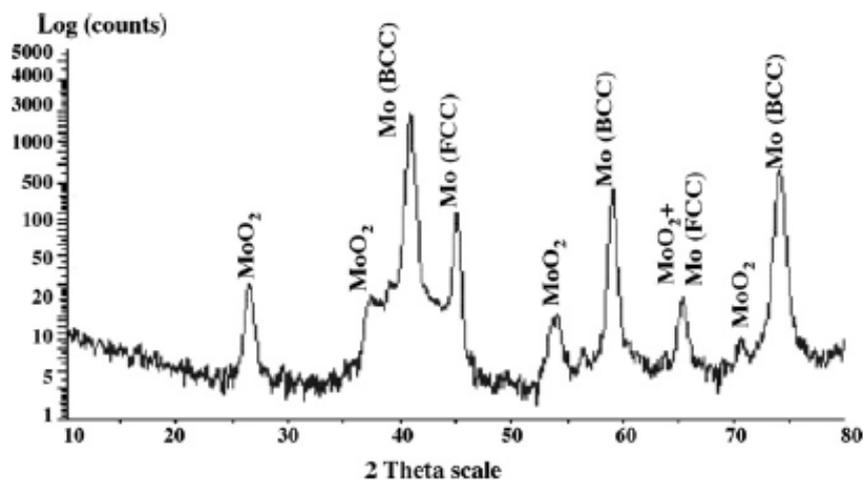
Exemple/ Echantillon en fonte grise revêtue d'une couche de molybdène utilisant la projection flamme-fil -Expérience réalisée à M.E.I M'SILA



Projection flamme de fil en molybdène ((Atelier M.E.I. M'Sila



Micrographie optique montrant le dépôt de molybdène (99E) déposé sur l'acier 35CD4 [Laribi ]



Spectre de diffraction RX du dépôt de molybdène [Laribi]

### Projection hypersonique

Deux procédés présentent ce type de caractéristiques :

- la projection hypersonique à tir discontinu ;
- la projection hypersonique à tir continu.

### Projection hypersonique à tir discontinu

Cette technique de projection consiste à introduire le matériau d'apport (sous forme de poudre) dans un tube appelé **canon à détonation** (Voir Fig.11), en même temps que le gaz de combustion (oxygène, acétylène). Ce mélange explose grâce à une étincelle, à la fréquence de 8 allumages par seconde. La poudre est ainsi chauffée et éjectée à très grande vitesse (950 m/s) par l'onde de choc créée. Le régime de projection est donc discontinu. Entre chaque tir, un balayage avec un gaz neutre est pratiqué. Ce type d'installation permet d'obtenir des dépôts de caractéristiques remarquables du point de vue de la compacité (porosité inférieure à 1 %), de l'adhérence (souvent supérieure à **80 MPa**) et de la rugosité (**Ra = ± 3 mm**), à des taux horaires de dépôts compris entre 3 et 5 kg/h. Les épaisseurs de dépôts sont en général limitées à **0,2 mm**.

Les matériaux les plus fréquemment utilisés sont les carbures de Cr ou de W avec liant métallique Ni ou Co, l'alumine, l'oxyde de chrome. Ce type de matériel n'est utilisé que pour les travaux de sous-traitance, principalement en raison des contraintes de mise en œuvre (dimension du canon, bruit...), dans les domaines de l'aéronautique, la sidérurgie, la chimie ou le textile.

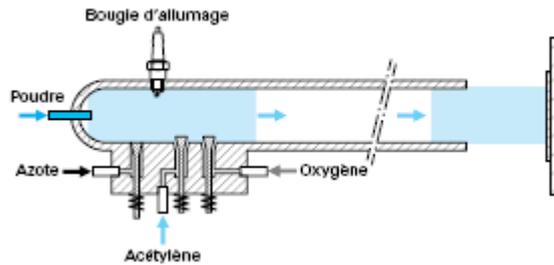


Figure 11 – Principe de fonctionnement d'un canon à détonation (doc. AREGA)

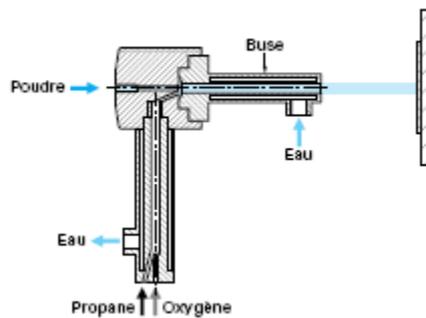


Figure 12 – Principe de fonctionnement d'un pistolet hypersonique à tir continu (doc. AREGA)

### Projection hypersonique à tir continu

Cette variante des procédés flamme classiques réside dans la vitesse très élevée acquise par les particules projetées grâce aux importantes pressions régnant dans la chambre de combustion.

Deux procédés sont développés, leur différence tenant essentiellement à des critères d'ordre économique :

- Le procédé *HVOF* : High Velocity Oxygen Fuel ;
- le procédé *HVAF* : High Velocity Air Fuel.

L'HVOF utilise la combustion de deux gaz : d'une part,  $O_2$  et, d'autre part, propane, propylène, tétrène ou hydrogène (figure 12). L'HVAF utilise quant à lui un mélange kérosène - air comprimé pour la combustion.

Les gaz de combustion pénètrent dans la chambre de combustion puis sont éjectés du pistolet sous l'effet de la pression élevée (5 à 7 bar). La poudre est injectée à l'aide d'un gaz neutre dans la flamme où elle est fondue et accélérée dans la tuyère à une vitesse proche de la vitesse hypersonique. Il convient de noter que la présence d'une flamme pilote (hydrogène-oxygène) est nécessaire à l'allumage de la flamme principale où elle est fondue et accélérée dans la tuyère à une vitesse proche de la vitesse hypersonique (figure 13). Il convient de noter que la présence d'une flamme pilote (hydrogène-oxygène) est nécessaire à l'allumage de la flamme principale.

### Projection par arc électrique entre deux fils

Le principe de la projection par arc électrique consiste à faire jaillir un arc électrique entre deux fils consommables, un jet d'air comprimé pulvérisant le métal fondu et le projetant sur le substrat (figure 14).

Les pistolets à arc électrique sont alimentés par des générateurs à courant continu, sous des tensions d'arc comprises entre 25 et 40 V, pour des intensités allant de 100 à 500 A. Ils comprennent deux parties :

- une partie entraînement du fil ;
- une partie fusion/projection du métal fondu.

Les fils sont conditionnés en bobines ou en fûts et sont tirés, au travers de gaines souples, par des molettes d'entraînement intégrées au pistolet et mues par des moteurs électriques ou par des turbines à air. Dans le cas de fils très rigides ou de grandes distances entre pistolet et bobines (supérieures à 6 m), il est nécessaire d'adjoindre à l'installation un système entraînement des fils par poussée, à l'entrée des gaines. Ce type d'équipement est communément appelé « push-pull ». À l'intérieur du pistolet, les fils sont guidés par deux tubes contact permettant, d'une part, le positionnement du fil avant entrée dans la zone de fusion et, d'autre part, la transmission du courant électrique aux fils.

L'application d'un courant électrique sur les fils génère un arc électrique qui permet de les fondre (température d'environ 6 000°C). Les fils fondus sont alors pulvérisés grâce à un jet d'air comprimé et projetés sur le substrat pour former le dépôt.

La température atteinte et l'énergie cinétique élevée acquise par les particules grâce au jet d'air comprimé ( $V = 250$  m/s) permettent des projections avec des caractéristiques de dépôts performantes :

- porosité de 5 à 10 % ;
- épaisseur des dépôts de 0,2 à 3 mm ;
- force d'accrochage : 20 à 40 MPa ;
- taux horaire de dépôt de 5 à 30 kg/h.

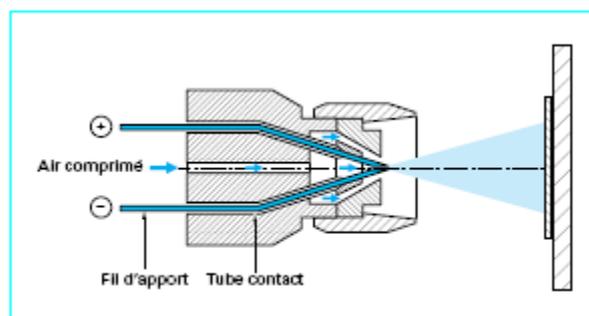


Figure 14 - Principe de fonctionnement d'un pistolet arc électrique