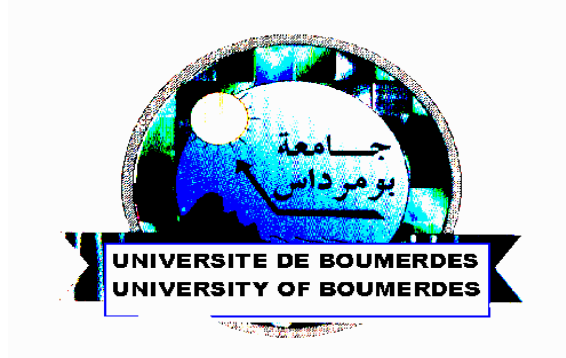


République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA
BOUMERDES

FACULTE DES HYDROCARBURES ET DE LA CHIMIE



Département de Transport et Equipements des Hydrocarbures

Mémoire de Magister

Spécialité : *Génie mécanique*

Option : *Tribologie et Maintenance Industrielle*

THEME

**CONTRIBUTION A LA CARACTERISATION MECANIQUE ET THERMIQUE
DES REVETEMENTS D'ALUMINE ET DE CARBURE DE TUNGSTENE
OBTENUS PAR PROJECTION PLASMA**

Présenté par : **Youcef SMAÏLI**

Devant le jury composé de :

ADJERID. S	Maître de Conférences	(UMBB)	Président
HANCHI. S	Maître de Conférences	(EMP)	Examineur
AOUACHRIA. S	Docteur	(SONATRACH)	Invité
GUEBLA. A	Chargé de cours	(UMBB)	Examineur
BALISTROU. M	Maître de Conférences	(UMBB)	Rapporteur

Soutenu le :

Boumerdès 2006

REMERCIEMENTS

J'adresse l'expression de ma vive gratitude à Monsieur ADJERID S., Maître de conférences à l'université de Boumerdes, pour avoir voulu présider ce jury.

Je remercie vivement les membres du jury, Messieurs , S. AOUACHRIA , A. GUEBLA et S. HANCHI pour l'honneur qu'ils me font de juger ce travail.

Je remercie Monsieur BALISTROU Mourad, pour avoir su m'initier à la recherche, par ses précieux conseils, son expérience et sa disponibilité.

Tous mes remerciements vont également à tous ceux et celles qui m'ont apporté une aide à l'élaboration de ce mémoire.

Résumé

L'obtention d'un revêtement à caractéristiques contrôlées demande encore aujourd'hui un travail de mise au point important qui nécessite plusieurs heures de projection et de caractérisation des dépôts.

En effet, la projection plasma est une technique mal connue avec un grand nombre de paramètres non indépendants par rapport aux transferts de chaleur et de quantité de mouvement entre le plasma et les particules. Des méthodes de mesure et des modélisations sur la caractérisation des dépôts se sont développées afin d'une part de mieux connaître l'influence des paramètres de projection et d'autre part d'alimenter et de valider les modèles avec des valeurs expérimentales. Le problème à résoudre est de trouver le revêtement le mieux adapter pour une pièce en acier inoxydable, entretoise d'accouplement d'une pompe de transfert d'eau immergée, afin d'augmenter sa durée de vie.

Deux études ont été développées. D'une part, la caractérisation de l'adhérence des revêtements et leurs duretés après dépôt, et d'autre part, la simulation des gradients de température dans le substrat sachant que la projection thermique génère des contraintes thermiques.

Les résultats obtenus sur les différents dépôts testés à savoir le carbure de tungstène et l'alumine sur la chemise en acier inoxydable Z3CND17-12 sont encourageants.

Le modèle thermique mis en place nous a permis de prévoir le champ de température. Les résultats obtenus ont été validés par des mesures expérimentales.

Ces résultats constituent une contribution à l'étude des dépôts obtenus par projection plasma.

Mots clés : plasma, revêtement, adhérence, particule, usure, contrainte, transfert thermique, pulvérisation thermique

Abstract

Projection plasma is considered as one of the most universal techniques of coatings. In order to obtain a coating with controlled characteristics, request till today an important development work which requires several hours of projection and characterization of the deposits. Indeed, projection plasma is a badly known technique with a great number of parameters non independent compared to the heat transfer and momentum between plasma and the particles. Methods of measurement and modelling on the deposits characterization were developed in order to know the influence of the parameters of projection and also to feed and validate the models with experimental values. The problem to be solved is to find the adequate coating to adapt for a stainless steel piece, spacer of coupling of a transfer water pump immersed, in order to increase its lifespan. For that, the assessment of the means used so far in the field of thermal projection, was established. Two studies were developed. On the one hand, the characterization of the coating adherence and their hardnesses after deposit, and in the other side, the simulation of the temperature gradients in the substrate knowing that thermal projection generates thermal stresses. The results obtained on the various deposits tested with tungsten carbide and alumine on the stainless steel shirt Z3CND17-12 are encouraging. The thermal model set up enabled us to envisage the field of temperature. The results obtained were validated by experimental measurements. These results constitute a contribution to the study of the deposits obtained by projection plasma.

Word Keys : plasma, coating, adherence, particle, wear, stress, thermal transfer, thermal spraying

ملخص

تعد المقذوفات البلاسمية من تقنيات التغطية الشاملة. إن الحصول على تغطية ذات ميزة مضبوطة لا يزال حالياً يتطلب تركيز هام يحتاج إلى عدة ساعات للقذف و تمييز الثقافات. لا تزال المقذوفات البلاسمية مجهولة، و كذا عدة من البرمتر غير مستقلة بالنسبة إلى تحويلات الحرارة و كذا التحركات بين البلاسما و الجزئيات. لقد توسعت أنماط القياس و كذلك النماذج الخاصة بتمييز الثقافات للتعرف أكثر على مدى تأثير معالم المقذوفات من جهة، و من جهة أخرى تموين و تثبيت النماذج، كل هذا باستعمال قيم تجريبية. المسألة المطروحة تتعلق بمحاولة إيجاد تغطية تتلائم مع قطعة فولاذية غير قابلة للتأكسد، تسمح باقتران و تشابك مضخة لنقل المياه الغائصة و هذا لمد مدة صلاحياتها. لذا، وضع تقييم للوسائل المستعملة لحد الآن في ميدان القذف الحراري و تم إنجاز دراستين حول الموضوع. تختص الأولى بتمييز انضمام أو (التصاق) التغطية و مدى صلابتها بعد الإيداع. و تختص الثانية بتنشيط التغييرات التدريجية للحرارة داخل القوام بإعتبار أن القذف الحراري يولد قيوداً حرارية. إن النتائج المحصل عليها بخصوص المقذوفات المتعددة و المختبرة، لاسيما كربور التنغستين و أكسيد الألمنيوم (الألومين) على الغلاف الفولاذي الغير القابل للتأكسد Z3CND 17-12 هي نتائج مشجعة. إن النموذج الحراري المعين مكن من توقع نطاق الحرارة و تمت المصادقة على النتائج المحصل عليها بمقاييس تجريبية. تعد هذه النتائج بمثابة مساهمة لدراسة الثقافات المحصل عليها عن طريق القذف البلاسمي.

الكلمات الأساسية :

بلاسما، تغطية، إلتحام، جزئية، قيوداً حرارية، تآكل، تحويل الحرارة، سحق حراري.

SOMMAIRE

INTRODUCTION	1
CHAPITRE I - ETAT ACTUEL DES TECHNIQUES	3
I.1 PROJECTION THERMIQUE	3
I.1.1 PRINCIPE DE LA PROJECTION THERMIQUE	3
I.1.2 PROJECTION A LA FLAMME ORDINAIRE OU A HAUTE VITESSE	4
I.1.3 PROJECTION A L'ARC ELECTRIQUE	6
I.1.4 PROJECTION AU CANON A DETONATION	6
I.2 PROJECTION PAR PLASMA	7
I.2.1 PROJECTION PAR PLASMA D'ARC	8
I.2.1.1 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT	8
CHAPITRE II - ETAT GENERAL DES CONNAISSANCES SUR LES PROJECTIONS PLASMA	10
II.1 PROJECTION PLASMA	10
II.1.1 GENERALITES SUR LA TORCHE PLASMA	10
II.1.2 CHAMP DE TEMPERATURE DU JET PLASMA	11
II.1.3 CHAMP DE VITESSE DU JET PLASMA	12
II.2 INTERACTION PARTICULE/PLASMA	14
II.2.1 VITESSE DES PARTICULES	14
II.2.2 FUSION ET TEMPERATURE DES PARTICULES	14
II.3 FORMATION DU DEPOT	15
II.3.1 ECRASEMENT DES PARTICULES	16
II.3.2 SOLIDIFICATION ET REFROIDISSEMENT DES PARTICULES	16
II.4 PARAMETRES CONTROLANT LA PROJECTION PLASMA	19
II.5 PREPARATION DES SURFACES AVANT DEPOT	21
II.6 GENESE DES CONTRAINTES RESIDUELLES DURANT LA PROJECTION PLASMA	22
II.6.1 CONTRAINTES INTRINSEQUES	23
II.6.2 CONTRAINTES THERMIQUES	23
II.6.3 CONTRAINTES RESIDUELLES	24
II.7 CARACTERISATION DE L'ETAT MICROSTRUCTURAL DES DEPOTS PLASMA	25
II.7.1 POROSITE	25
II.7.2 FISSURES	26
II.8 CARACTERISATION DE L'ETAT MECANIQUE	26
II.8.1 L'ADHERENCE DES REVETEMENTS PLASMA ET QUALIFICATION DE TESTS MECANQUES D'ADHERENCE	26
II.8.2 TESTS D'ADHERENCE	27
II.8.2.1 LES TESTS D'ADHERENCE EXISTANTS	27
II.9 DOMAINE D'UTILISATION	29
II.9.1 PROTECTION CONTRE LA CORROSION	30
II.9.1.1 CORROSION SECHE	30
II.9.2 CORROSION HUMIDE	30
II.9.3 PROTECTION CONTRE L'USURE	30
II.9.4 USURE PAR FROTTEMENT	31
II.9.5 USURE PAR ABRASION	31

II.9.6	USURE PAR CORROSION	31
II.9.7	USURE PAR FRETTEING	31
II.9.8	USURE PAR ADHESION	31
II.9.9	APPLICATIONS AERONAUTIQUES	31
II.9.10	APPLICATIONS D'ISOLATION PAR LES BARRIERES THERMIQUES	32
II.9.10.1	LA FONCTION BARRIERE THERMIQUE	32
II.9.10.2	REVELEMENTS UTILISES COMME BARRIERES THERMIQUES	32
CHAPITRE III	- ETUDE EXPERIMENTALE	33
III.1	METHODES D'EXPERIMENTATION	33
III.2	INSTALLATION DE PROJECTION PLASMA	33
III.3	PARAMETRES DE PREPARATION DU SUBSTRAT	35
III.4	PARAMETRES DE PROJECTION	35
III.5	TEST DE DURETE	36
III.5.1	ECHANTILLONS UTILISES	36
III.5.2	RESULTATS DE LA MICRO DURETE	36
III.5.3	INTERPRETATIONS	39
III.6	TEST D'ADHERENCE	39
III.6.1	ECHANTILLONS UTILISES	39
III.6.2	PROCEDURES EXPERIMENTALES	40
III.6.3	RESULTATS ET INTERPRETATIONS DU TEST D'ARRACHEMENT	41
III.7	CONCLUSION	44
CHAPITRE IV	- MODELISATION THERMIQUE DU SUBSTRAT	45
	INTRODUCTION	45
IV.1	ELEMENTS FINIS EN TRANSFERT DE CHALEUR	45
IV.1.1	FORMULATION INTEGRALE ET RESIDUS PONDERES	45
IV.1.2	FONCTIONS D'APPROXIMATION ET POLYNOMES D'INTERPOLATION	46
IV.1.3	REPRESENTATION MATRICIELLE ET ASSEMBLAGE EN UN SYSTEME GLOBAL	47
IV.1.4	METHODE DE RESOLUTION	48
IV.1.4.1	CAS STATIONNAIRE	48
IV.1.4.2	CAS NON STATIONNAIRE	48
IV.1.5	RESOLUTION NUMERIQUE DE L'EQUATION DE LA CHALEUR PAR ELEMENTS FINIS	48
IV.1.5.1	ETUDE DU CAS STATIONNAIRE	49
IV.2	FORMULATION PAR ELEMENTS FINIS	51
IV.2.1	LA FORME MATRICIELLE GENERALISEE	53
IV.3	RESOLUTION DU PROBLEME POSE	54
IV.4	ETAPES DE LA MODELISATION	56
IV.4.1	DESCRIPTION DU MODELE GEOMETRIQUE	56
IV.4.2	CONDITIONS AUX LIMITES	57
IV.4.3	DEFINITION DES PARAMETRES DE CONVECTION	58
IV.4.4	CHOIX DE L'ELEMENTS DE MAILLAGE	59
IV.5	CHOIX DE L'INCREMENT DE TEMPS	59
IV.6	LA DEMARCHE DE LA MODELISATION	60
IV.7	RESULTATS ET INTERPRETATIONS	61
	CONCLUSION GENERALE	62
	BIBLIOGRAPHIE	63

NOTATIONS UTILISEES

d_2	: Diamètre de la particule après écrasement
d_1	: Diamètre de la particule avant encrassement
E_d	: Module de Young du dépôt
F	: Vecteur global des sollicitations
g	: Accélération de pesanteur
h_c	: Coefficient de convection
H_v	: Dureté Vickers
h_i	: Coefficient de transfert thermique inter-facial
K	: Matrice de rigidité
k	: Conductivité thermique
$\langle N \rangle$	: Vecteur constitué de fonctions d'interpolation
q_c	: Flux de chaleur dû à la radiation
q_s	: Flux de chaleur d'une source environnante
Q	: Quantité de chaleur
s	: Epaisseur de la particule
T_s	: Température moyenne du substrat en cours de projection
T	: Température du corps
T_a	: Température ambiante
T_f	: Température de fusion
T_r	: Température du milieu recevant la radiation
U	: Ensemble de fonctions
V_d	: Vitesse d'impact
Y	: Solution
∇	: Opérateur différentiel
N_u	: Nombre de Nusselt
R_a	: Nombre de Rayleigh
G_r	: Nombre de Grashof
B_i	: Nombre de Biot

NOTATIONS GRECQUES

ρ	: Densité de la particule fondue
λ_d	: Conductivité thermique du dépôt
α_d	: Coefficient de dilatation du dépôt
α_s	: Coefficient de dilatation du substrat
σ	: Constante de BOLTZMAN
σ_r	: Contrainte résiduelle
σ_{tr}	: Contrainte de trempe
σ_{th}	: Contrainte thermique
ϕ	: Fonction d'excitation
ψ	: Fonction de pondération
δu	: Variable quelconque de la fonction u
ε	: Emissivité du corps
Γ	: Frontière du domaine
ν	: Viscosité cinématique
ΔT	: Variation de température
ξ, η	: Coordonnées du point correspondant à l'élément de référence

INTRODUCTION

La technique de projection à la flamme a pris son essor après la seconde guerre mondiale. Les applications étaient alors des revêtements pour la protection contre la corrosion et le rechargement de pièces usagées. Elle a été suivie vers les années 60 de la projection au plasma d'arc, développée par une industrie de pointe, l'aéronautique, et plus précisément les motoristes.

Le principe consiste à introduire de fines particules solides dans le plasma (gaz partiellement ionisé) qui y sont fondues et accélérées en direction de la pièce à revêtir. Le dépôt se forme par empilement de particules étalées qui constituent ainsi une structure lamellaire. Le jet de plasma dont la température est supérieure à 10000 K permet de fondre tout type de matériaux métalliques ou céramiques. La condition nécessaire cependant pour former un dépôt est de pouvoir fondre le matériau avant de l'évaporer. Certains auteurs considèrent un matériau projetable si sa température de fusion est au moins inférieure de 300K à sa température d'évaporation ou de décomposition.

La projection par torche à plasma est actuellement en plein essor et est utilisée dans les industries les plus diverses, que ce soit l'aéronautique, le nucléaire, la mécanique ou le domaine médical. Ces applications concernent les protections anti-usure, anti-corrosion, les revêtements à propriétés électriques ou magnétiques contrôlées et les barrières thermiques.

Le développement de cette technique ne s'est cependant fait que de façon empirique et l'obtention d'un revêtement à caractéristiques contrôlées (propriétés mécaniques, densité, caractéristiques cristallines...) demande encore aujourd'hui un travail de mise au point important qui nécessite plusieurs heures de projection et de caractérisation des dépôts. En effet, la projection plasma est une technique mal connue avec un grand nombre de paramètres non indépendants par rapport aux transferts de chaleur et de quantité de mouvement entre le plasma et les particules (puissance de l'arc, nature et débit du gaz plasmagène, injection de poudre...).

Certains auteurs dénombrent pas moins de 50 paramètres. Il existe maintenant au niveau universitaire et industriel une volonté de mieux maîtriser la technique. Ainsi, apparaissent des programmes de recherche sur la caractérisation et sur la modélisation du plasma et des particules.

Parallèlement à la modélisation, se sont développées des méthodes de mesures afin d'une part de mieux connaître l'influence des paramètres de projection et d'autre part d'alimenter et de valider les modèles avec des valeurs expérimentales.

C'est dans ce contexte que la SONELGAS soucieuse d'améliorer les performances de la chemises (entretoise d'accouplement) d'une pompe de transfert d'eau de mer immergée à 2 étages, initialement importée (coût de revient très élevé) et suite à l'utilisation des divers techniques de traitement de surface comme le traitement électrolytique (chromage) et le traitement chimique (nitruration) avec lesquels elle n'a pas eu des résultats satisfaisant, décide de se pencher sur l'utilisation de la technique de projection thermique.

Le problème à résoudre est de trouver le revêtement le mieux adapté pour cette pièce en acier inoxydable afin d'augmenter sa durée de vie.

C'est dans cette optique que nous avons orienté notre étude en faisant le bilan des moyens utilisés jusqu'à ce jour dans le domaine de la projection thermique.

Nous nous sommes intéressés au problème de la caractérisation de l'adhérence des revêtements et leurs duretés après dépôt. La méthode que nous avons retenue est celle du test d'arrachement (test de traction) suivant la norme NF 30-062.

D'autre part, nous nous sommes penchés sur la simulation des gradients de température dans le substrat sachant que la projection thermique génère des contraintes résiduelles dans les principales sont d'origine thermique.

Toutes ces recherches et leurs résultats obtenues sur les différents dépôts testés à savoir le carbure de tungstène et l'alumine sur la chemise en acier inoxydable (Z3CND17-12) sont décrits dans ce mémoire composé de quatre chapitres.

Dans Le premier chapitre, nous présentons l'état actuel des techniques de projection thermique, et particulièrement la technique de projection par plasma.

Dans le deuxième chapitre, l'état général des connaissances sur la projection plasma sont présentés, ainsi que la caractérisation de l'état structural et mécanique des dépôts. Une sélection de quelques techniques de mesures d'adhérence est proposée vu que l'adhérence du dépôt sur le substrat est la caractéristique essentielle à contrôler. Nous avons signalé aussi dans ce chapitre les effets thermiques qui engendrent les contraintes résiduelles.

Le troisième chapitre présente les résultats expérimentaux des tests de dureté et d'adhérence ainsi que la modélisation des gradients de températures dans le substrat. Les revêtements ont été élaborés dans des conditions reproductibles sur une installation automatisée et robotisée (METCO-SULZER) au sein de la société M.E.I M'sila filiale de SONELGAZ.

Le quatrième chapitre traite l'évolution de la température lors du dépôt dans le substrat.

Nous avons terminé notre travail par une conclusion générale qui regroupe les différents résultats obtenus, ce qui nous a permis de proposer quelques perspectives de ce travail.

CHAPITRE I - ETAT ACTUEL DES TECHNIQUES

I.1 LA PROJECTION THERMIQUE

I.1.1 Principe de la projection thermique

La projection thermique définit l'ensemble des techniques de projection d'un matériau sous forme de fil ou de poudre par l'emploi d'une source de chaleur (figure I-1).

La technique consiste à projeter en fines particules sur une surface préalablement préparée, un matériau d'apport solide.

Ce dernier chauffé, fondu ou ramolli, accéléré puis projeté en direction du substrat (pièce à revêtir) par l'intermédiaire d'un pistolet ou d'un chalumeau approprié à grande vitesse où il forme un dépôt de gouttelettes étalées (figure I-2).

Notons que les particules provenant de la pulvérisation sont véhiculées à de grandes vitesses à savoir [13] :

100 à 200 m/s : pour les pistolets à gaz

300 à 800 m/s : pour les pistolets à plasma d'arc

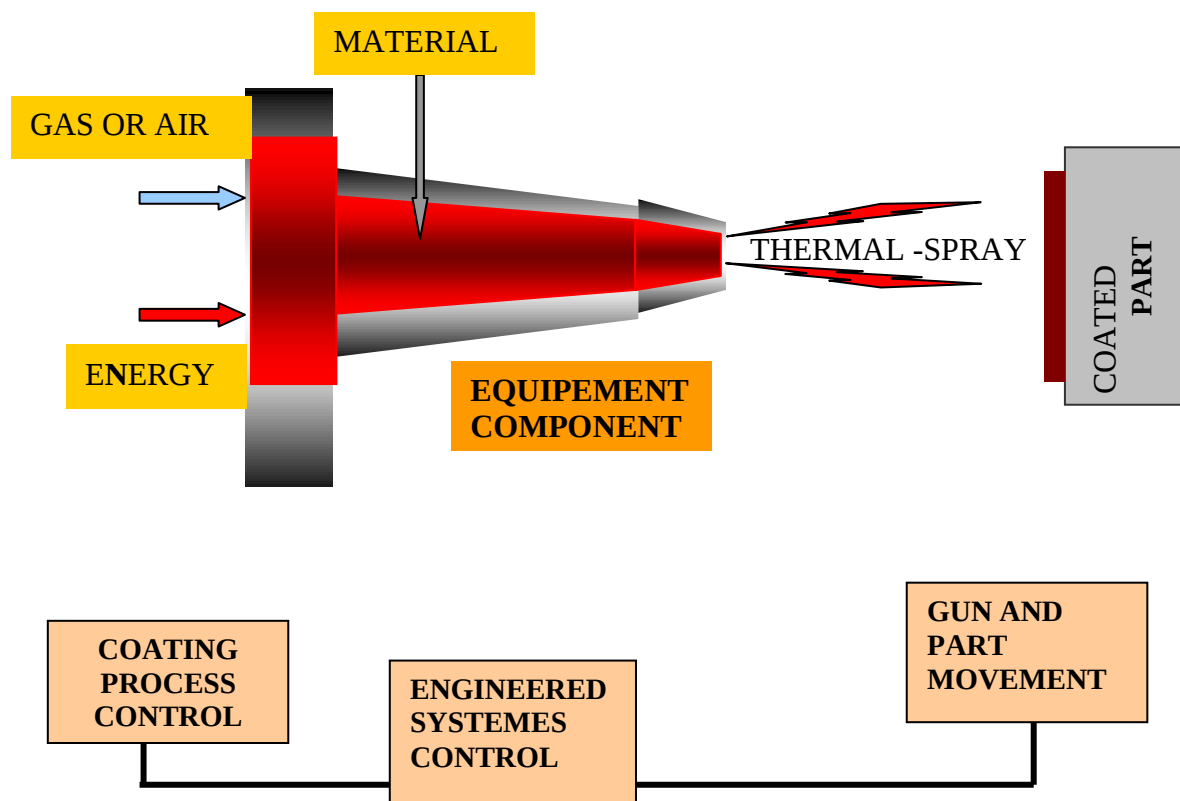


Fig I-1 – Principe général de la projection thermique

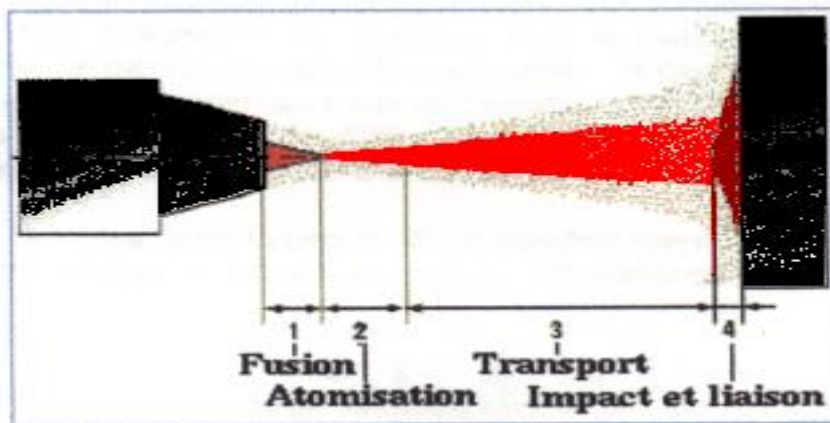


Fig I-2 : Phases thermiques du processus de projection

Les techniques comprises dans cette appellation sont :

1. La projection à la flamme ordinaire ou à haute vitesse (HVOF : High Velocity Oxyflame). La source de chaleur est une flamme de combustion.
2. La projection à l'arc électrique. La source de chaleur est un arc électrique.
3. La projection au canon à détonation. La source de chaleur résulte de la combustion d'un mélange de gaz en régime détonant.
4. La projection au plasma d'arc. La source de chaleur est un jet de plasma créé par un arc.

Après un survol des techniques 1 à 3, nous décrirons en détail la technique 4 basée sur le plasma.

I.1.2 La projection à la flamme ordinaire ou à haute vitesse

Son origine remonte à l'observation en 1909 par le Dr SCHOOP de l'incrustation de plomb consécutive au tir d'une balle contre un mur en ciment. En 1914, les premiers pistolets à flamme projetant de la poudre ou du fil de plomb apparaissent. La technique est alors appelée le SCHOOPAGE [22].

Son principe repose sur l'introduction d'un matériau sous forme de poudre ou de fil dans la flamme d'un chalumeau où il est fondu et accéléré pour venir se déposer sur la pièce à revêtir.

Les gaz les plus couramment utilisés sont les mélanges acétylène-oxygène et hydrogène-oxygène [11], qui donnent respectivement des flammes d'une température d'environ 2700°C et 3000°C [34].

Ces températures limitent l'emploi de cette technique à des matériaux dont le point de fusion est inférieur à la température de la flamme.

Etant données les propriétés de la flamme ordinaire (faible vitesse, basse température), les dépôts réalisés par cette technique présentent en général des taux de porosité élevés (15-20%).

Cette technique est cependant utilisée dans beaucoup d'industries et permet de résoudre des problèmes d'abrasion, de corrosion, d'usure, d'isolation thermique ou électrique à moindre coût. Des exemples typiques sont :

- le rechargement de poinçons dans les verreries, la réparation de pièces pour les voitures de chemin de fer.

La technique de la flamme à haute vitesse est récente puisqu'elle a été inventée il y a 15 ans par BROWNING qui a développé le procédé JET KOTE [31] (Figure I-3). Depuis, d'autres sociétés ont développé leur propre procédé (Diamond Jet : METCO) ; le plus récent étant celui développé par PLASMA TECHNIK : le **CDS (control déposition spray)**. Ceux-ci sont basés sur le principe de combustion d'un gaz d'hydrocarbure avec de l'oxygène pour former un jet à haute vitesse. Après la combustion, les gaz chauds produits sont conduits le long d'un nez de projection. Le rapport élevé entre le produit du débit de gaz chaud (six fois supérieur à celui de la flamme classique), de la puissance de combustion (soit approximativement 60 kW) et le diamètre du nez de projection, permet au gaz d'atteindre la vitesse du son (Mach 1) juste à la sortie du nez [29]. A cet endroit, la pression du gaz est supérieure à la pression atmosphérique et celui-ci sort dans une succession de détentes et compressions (ondes de Mach) donnant à la flamme un dessin caractéristique. Le gaz combustible peut être du propylène, du propane ou de l'hydrogène. La poudre de projection est injectée axialement à l'endroit même de la combustion (Figure I-4).

Ce procédé permet d'obtenir des dépôts à forte densité, à dureté élevée et avec une bonne adhésion.

Les principaux matériaux déposés sont : WC-Co, WC-Ni, (WTi)C-Ni, TiC-Ni, CoCrMoSi

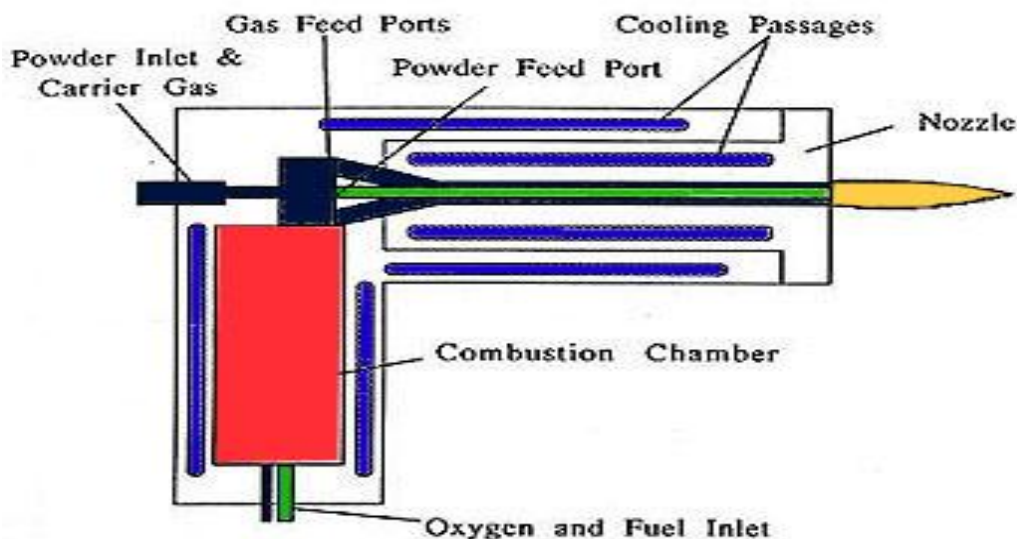


Fig I-3 : Schéma du pistolet à flamme haute vitesse JET KOTE.

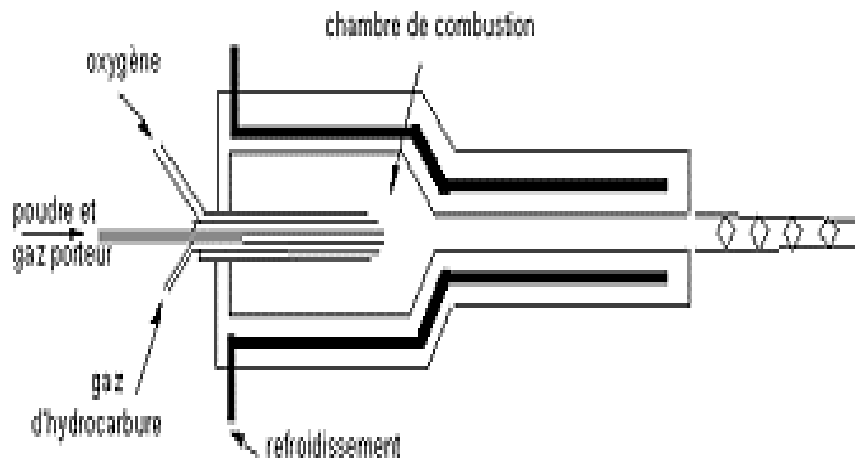


Fig I-4: Schéma du pistolet à flamme haute vitesse CDS

I.1.3 La projection à l'arc électrique

Son principe consiste à entretenir un arc électrique entre deux électrodes constituant le métal d'apport. Un jet de gaz introduit au niveau de l'arc projette les parties de métal fondu sur la pièce. Les fils sont entraînés automatiquement par des molettes qui assurent ainsi la continuité et la stabilité de l'arc (Figure I-5). Les pistolets à arc permettent de déposer de grandes quantités de matière (entre 8 et 30 kg/h) [20].

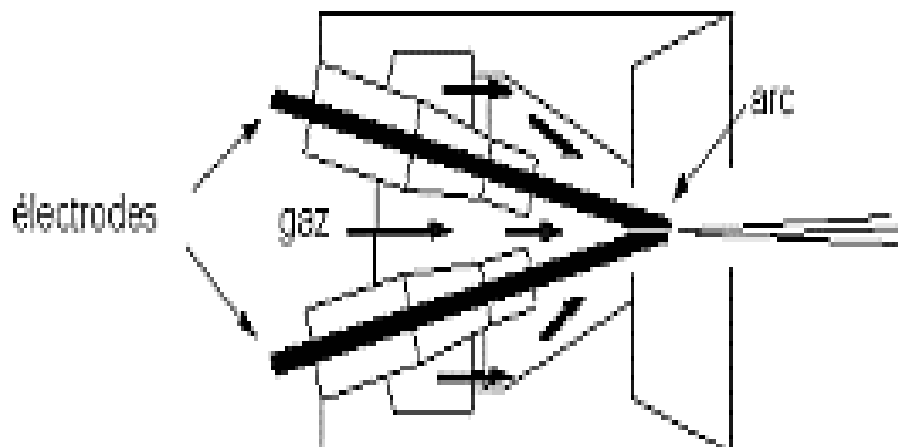


Fig I-5 : Schéma d'un pistolet de projection à arc électrique

Les applications sont principalement :

- métalliques, de coques de bateaux à base de revêtement anti-corrosion de structures Zinc et Aluminium ;
- fabrication de moules pour la réalisation de pièces en plastique ;
- rechargement de pièces mécaniques.

I.1.4 La projection au canon à détonation

C'est une technique qui a été développée en 1955 par UNION CARBIDE. Son principe repose sur l'utilisation contrôlée de la détonation de mélanges d'oxygène et d'acétylène dans une chambre spéciale (Figure I-6).

Après avoir introduit le mélange gazeux dans la chambre, une étincelle est produite sur la bougie d'allumage et provoque une combustion localisée des gaz, puis une détonation qui comprime le gaz et élève sa température. L'onde de choc qui en résulte produit une accélération rapide du gaz en sortie du tube. La poudre est injectée à l'arrière du tube dans la zone de combustion. Elle est entraînée à haute vitesse (environ 800m/s) et chauffée par le gaz. Cette opération est répétée environ 8 fois par seconde. Entre chaque allumage, un balayage est pratiqué avec un gaz neutre (azote) pour chasser les résidus de combustion [14,3].

Cette technique s'est surtout développée depuis les années 70 pour l'obtention de dépôts denses.

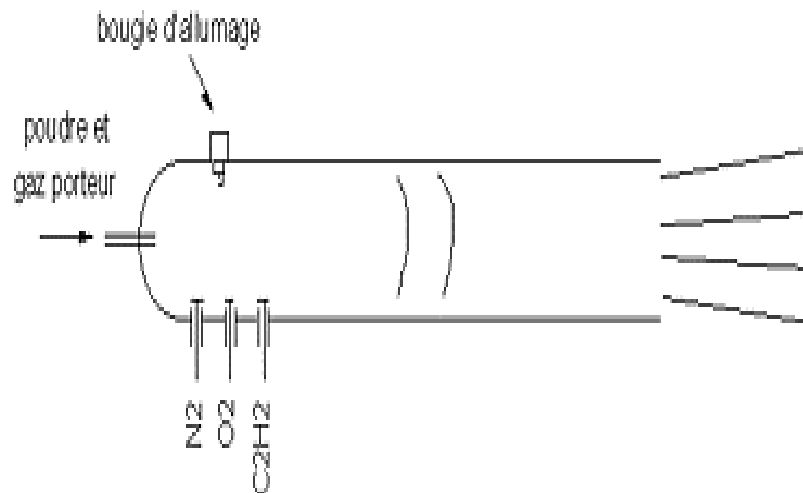


Figure I-6 : Schéma d'un canon à détonation

Les principales applications se situent dans :

- le domaine nucléaire : mécanismes dans les systèmes de contrôle de centrales nucléaires (WC_x ,...), composants de pompes (CrO_2), pièces de réacteurs rapides, revêtement de pièces de vannes ;
- le domaine aéronautique : aubes mobiles de turbines, nageoires d'aubes.

De nombreuses applications industrielles diverses comme des revêtements de lames de couteaux, de garnitures métalliques, de pièces d'usure de pétrochimie.

I.2 LA PROJECTION PAR PLASMA

Le plasma fut identifié pour la première fois par le physicien américain LANGMUIR Prix Nobel en 1932. Il est parfois baptisé le quatrième état de la matière, dans l'échelle de température. Il fait suite aux trois états conventionnels : solide, liquide et gaz. On estime que 99 % de la matière de l'univers est sous forme de plasma, pourtant ce quatrième état de la matière n'existe pas naturellement sur terre [9].

C'est un milieu obtenu à des températures supérieures à 3000°C à la pression atmosphérique. Il se compose d'un grand nombre d'espèces chimiques : ions, électrons et d'espèces excitées (atomes-molécules). C'est un milieu très réactif. Il permet l'obtention de produits uniquement stables à haute température. Les molécules sont dissociées et excitées. Elles donnent lieu à des mélanges d'espèces physico-chimiques artificielles, instables et complexes : les PLASMAS.

Pour générer un plasma, les trois éléments fondamentaux sont nécessaires :

- une source de puissance (générateur à courant continu) ;
- une décharge ionisant le gaz (générateur haut fréquence) ;
- un couplage assurant le contact entre deux électrodes via le gaz plasma.

I.2.1 La projection par plasma d'arc

La technologie de la projection par plasma est un perfectionnement de la métallisation à la flamme décrite précédemment. Le critère de développement de cette technologie a été d'augmenter la puissance de la source d'énergie et aussi d'obtenir des températures plus élevées (qui étaient limitées à 2700°C pour la flamme oxyacétylénique). La solution a été la création d'un jet de plasma (gaz ionisé) par le passage d'un gaz au travers d'un arc électrique entretenu par une source de courant continu. Le jet, d'une température supérieure à 10 000 K, permet ainsi de fondre tous types de matériau.

En France, ce développement a commencé dans les années 50 par la SNECMA pour la réalisation de revêtements sur les tuyères de fusées. Cette société a mis au point une torche de projection refroidie par eau garantissant une durée de fonctionnement normal de 200 heures sans changement d'électrodes [31]. La SNECMA avait déposé un brevet qui fut ensuite exploité par la société Suisse PLASMA TECHNIK [brevet français N°1369537 du 4 Juillet 1963 [31,34].

La technique se développe aussi aux USA vers les années 60 par la société METCO qui fournit à l'industrie aéronautique des installations permettant de revêtir de façon manuelle les chambres de combustion de moteurs d'avion. C'est alors le plus gros marché des revêtements plasma.

Vers les années 70 apparaissent les mouvements automatiques de la torche et les robots de projection assurant ainsi une parfaite reproductibilité des dépôts [33].

I.2.1.1 Principe de fonctionnement

Le jet de plasma dans une torche, est créé par le passage d'un gaz ou mélange de gaz au travers d'un arc électrique. Les molécules du gaz sont dissociées et les atomes ionisés par l'énergie thermique de l'arc formant alors le plasma. Celui-ci s'écoule dans la tuyère de la torche et forme le jet visible en sortie de torche (Figure I-7).

L'arc éclate entre deux électrodes :

- une cathode cylindrique en tungstène thorié. L'ajout de thorine (ThO_2) (3%) abaisse légèrement le potentiel d'extraction des électrons. Ces électrons sont émis par une petite tache cathodique en fusion de quelques dixièmes de mm^2 ;
- une anode en cuivre, appelée aussi tuyère ou buse dans laquelle s'écoule le jet de plasma.

Les gaz, dit "plasmagènes", sont injectés entre la cathode et l'anode soit axialement, soit en vortex (avec une composante de vitesse radiale) afin de stabiliser la zone d'accrochage de l'arc. Sous l'action du jet cathodique émanant de la pointe de la cathode, une partie du gaz plasmagène froid va être pompé dans le jet qui va se développer, puis se détendre en sortie de tuyère. Les gaz froids qui ne participent pas à la formation du plasma passent en péripétie de la colonne d'arc assurant ainsi sa stabilité par la formation d'une couche limite froide le long de la paroi de l'anode [31].

Le jet cathodique orienté dans la direction de l'axe de la torche ne peut donc pas venir chauffer directement l'anode. L'accrochage sur la paroi de cuivre refroidie par eau ne peut se faire qu'avec une forte constriction de la colonne et ce d'autant plus que le gaz périphérique

qu'elle traverse est froid. Les fluctuations forcées (vortex) et naturelles du pied d'arc assurent la répartition du flux thermique sur une zone assez grande de la tuyère et réduit son érosion.

Au-delà de la zone d'accrochage de l'arc sur l'anode, l'énergie emmagasinée dans le gaz plasma diminue graduellement. Le processus dominant dans cette région est l'intense neutralisation des espèces ionisées et la recombinaison des atomes. Lors de l'écoulement du jet de plasma en sortie de torche, il y a aussi un pompage du gaz ambiant qui contribue à refroidir le plasma. Cette dilution peut être plus ou moins importante suivant le type de gaz et suivant le type d'écoulement (laminaire ou turbulent).

Les caractéristiques du jet de plasma sont les températures élevées (14000 à 15000K en sortie de tuyère) et une vitesse importante (600 à 800 m/s en sortie de tuyère), ce qui permet de fondre les matériaux les plus réfractaires. La poudre de projection est injectée dans le jet de plasma soit à la sortie de la tuyère, soit dans la tuyère même, perpendiculairement à la direction d'écoulement [25].

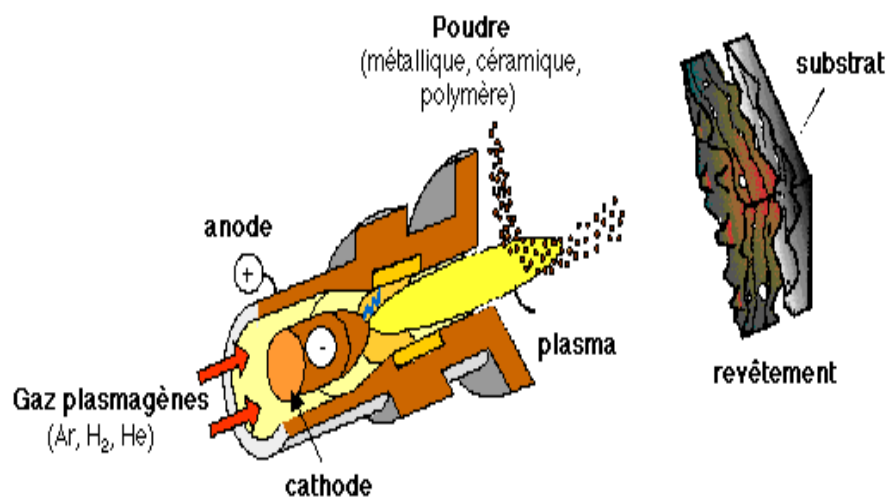
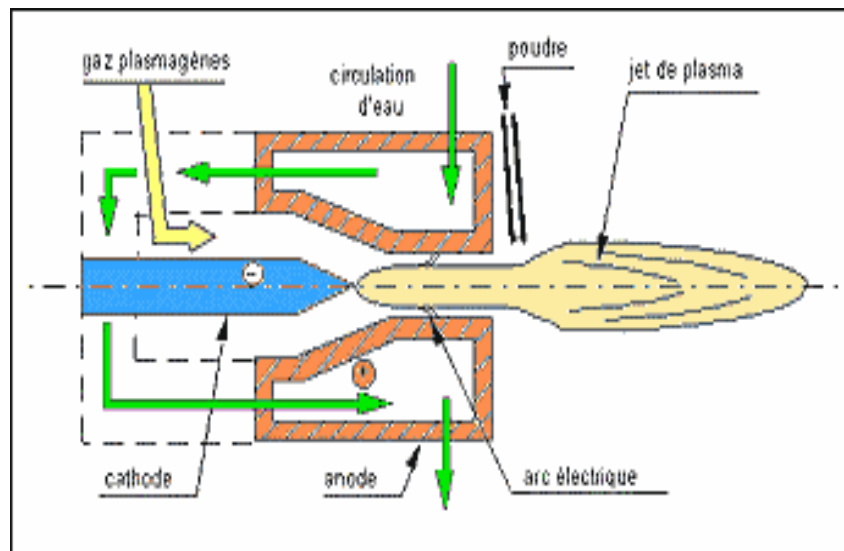


Fig I-7 : Schéma d'une torche à plasma

CHAPITRE II - ETAT GENERAL DES CONNAISSANCES SUR LES PROJECTIONS PLASMA

II.1 LA PROJECTION PLASMA

La projection plasma est une technique à arc électrique. Elle consiste à introduire des particules solides dans un jet de plasma produit par un arc, afin de les fondre et de les accélérer avant qu'elles ne viennent s'écraser sur un substrat où elles forment un dépôt de structure lamellaire [4].

L'une des caractéristiques principales de la projection plasma est que la source d'énergie peut être maintenue à des températures contrôlées, ce qui permet de réaliser des projections sur des substrats à bas points de fusion (par exemple des substrats en polymère) [4].

Par rapport à la projection par flamme, cette technique se caractérise par des températures de gaz nettement plus élevées (pouvant aller jusqu'à 14 000K, et permettant de fondre même les matériaux réfractaires) et par des vitesses de particules importantes. Tous les matériaux dont le point de fusion est séparé d'au moins 300 K du point de décomposition ou d'évaporation peuvent être projetés [16].

La figure II-1 montre l'allure générale de la structure. Le dépôt est formé par couches successives de lamelles écrasées.

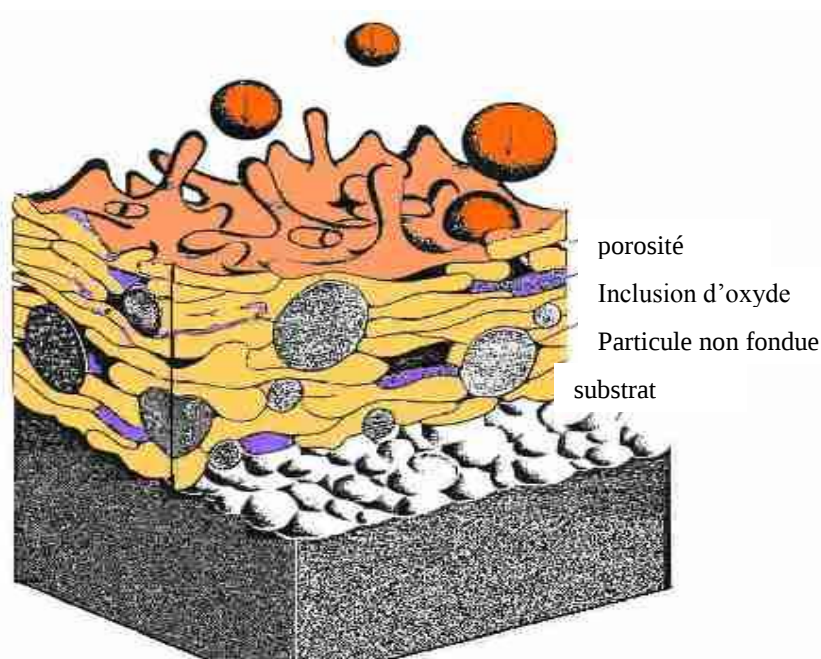


Fig.II-1 : Formation d'un dépôt sur un substrat, par projection plasma.

II.1.1 Généralités sur la torche plasma

Un schéma représentant un pistolet à arc plasma est présenté en figure II-2. Dans les différentes torches de projection, le principe est toujours le même ; l'arc éclate entre une cathode en tungstène thorié (thermoémissive) de type tige et une tuyère anode en cuivre électrolytique fortement refroidie.

Un gaz plasmagène constitué par un mélange d'un gaz primaire (argon ou azote) et d'un gaz secondaire (hydrogène ou hélium) est introduit dans la chambre à arc.

L'hydrogène ou l'hélium sont ajoutés au gaz plasma afin d'augmenter le transfert thermique plasma/particules [31,39]. Les mélanges utilisés sont généralement des mélanges argon-hydrogène, argon-hélium ou encore azote-hydrogène.

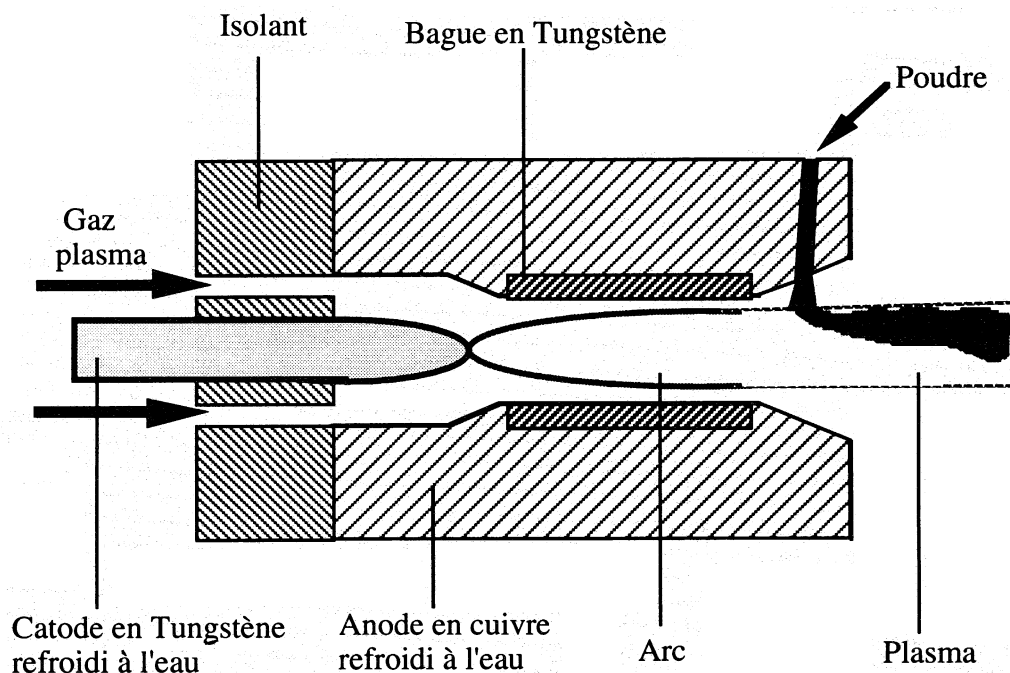


Fig.II-2 : schéma d'un pistolet à arc plasma.

Les jets de plasma obtenus ont un diamètre en sortie de tuyère, compris entre 5 et 10 mm. Les températures maximales sur l'axe peuvent atteindre 13 000K à 14 000K avec des gradients radiaux de l'ordre de 4000K/mm. Cela est illustré sur la figure II-6 pour un plasma de projection N₂-H₂ de 30 kW s'écoulant à l'air libre [36].

La poudre est injectée en aval du pistolet (fig. II.2), soit perpendiculairement à l'axe de projection soit avec une inclinaison, elle est alors entraînée par les gaz et projetée sur le substrat.

Les particules en vol interfèrent chimiquement et physiquement avec les gaz plasma et le gaz ambiant pompé par le jet plasma qui sort de la buse, ce qui conduit à dire que le dépôt obtenu n'a pas nécessairement la même composition que les particules de départ.

II.1.2 Champ de température du jet plasma

Pour connaître et définir l'échange thermique avec les particules véhiculées et le substrat, il est important de connaître le champ thermique dans la flamme plasma. Ce champ thermique étant très affecté par la structure du jet, il est nécessaire d'évaluer les propriétés thermiques tel que la capacité spécifique et la conductivité thermique du plasma, qui sont fonction de la température et de la composition des gaz [39].

Les figure II-3 et II-4 donnent la variation de la viscosité, et la conductibilité thermique de certains mélanges plasmagènes en fonction de la température [36].

Le développement des mesures spectroscopiques automatisées permet aujourd'hui de mesurer rapidement les isothermes des jets plasma [36, 39]. Sur la figure II-6 est représenté les isothermes d'un gaz plasma azote-hydrogène, à la pression atmosphérique.

On remarque que la longueur du jet thermique est assez faible, en effet les zones dont la température est supérieure à 5000K n'excèdent pas 50 mm sur l'axe de la torche. La forme et la longueur des isothermes dépendent fortement de la géométrie des tuyères et de l'injection du gaz plasma, de la nature des gaz plasmagènes et de la puissance du générateur [24].

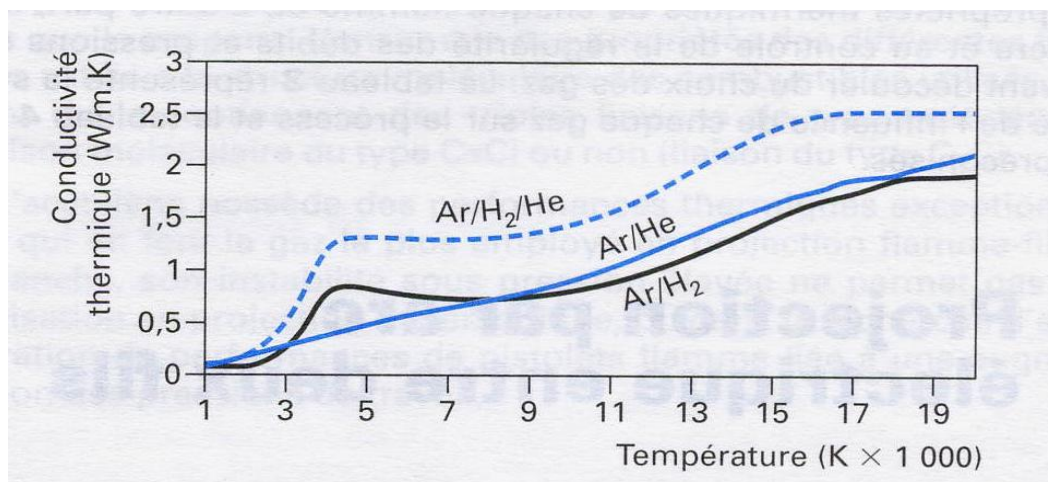


Fig.II-3 : Viscosité de certains mélanges plasmagènes

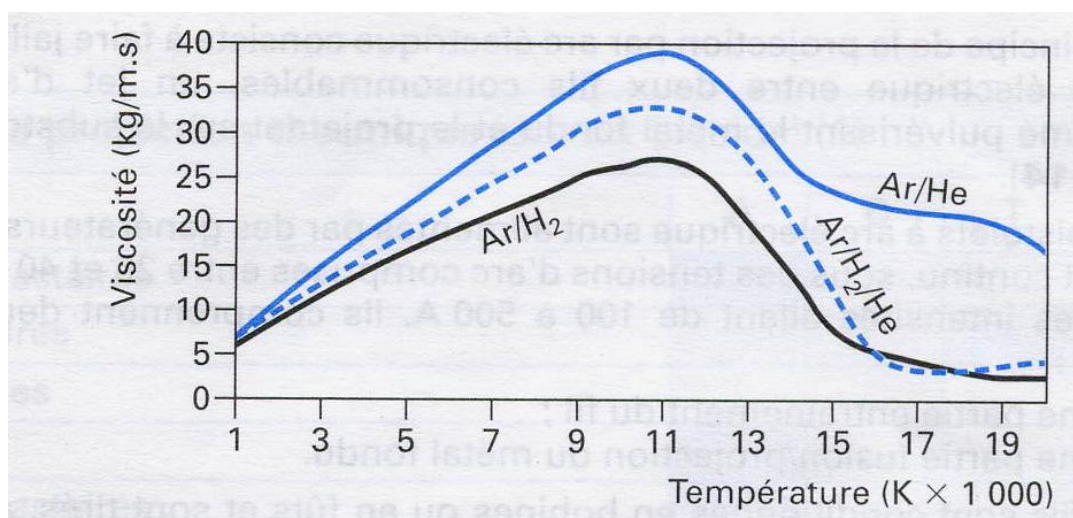


Fig.II-4 : Conductibilité thermique de certains mélanges plasmagènes.

II.1.3 Champ de vitesse du jet plasma

L'échange thermique entre la flamme plasma et le substrat, en grande partie se fait par convection. Pour définir le coefficient de convection, il est nécessaire de connaître le champ de vitesse des gaz plasma.

Dans la plupart des cas, les méthodes utilisées pour mesurer les vitesses des gaz plasma sont basées sur l'effet Doppler [31].

Un exemples de mesure de vitesses de gaz plasma est montré sur la figure II-5, pour un gaz plasma azote-hydrogène, à la pression atmosphérique et de puissance 30 kW.

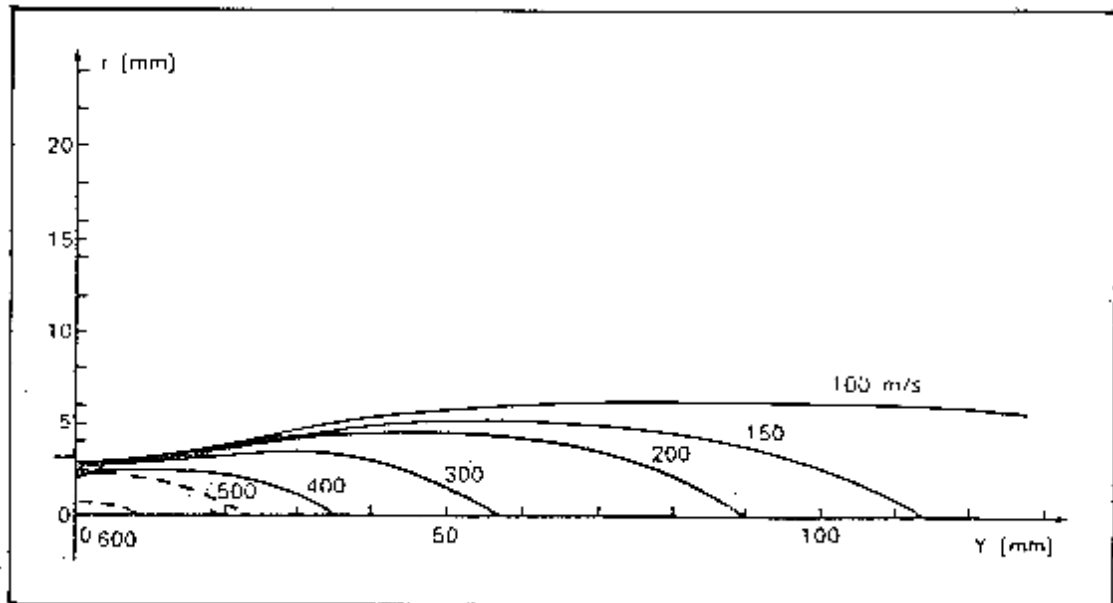


Fig.II-5 : Champ de vitesses pour un gaz plasmagène **azote-hydrogène** de puissance **30 kW** .

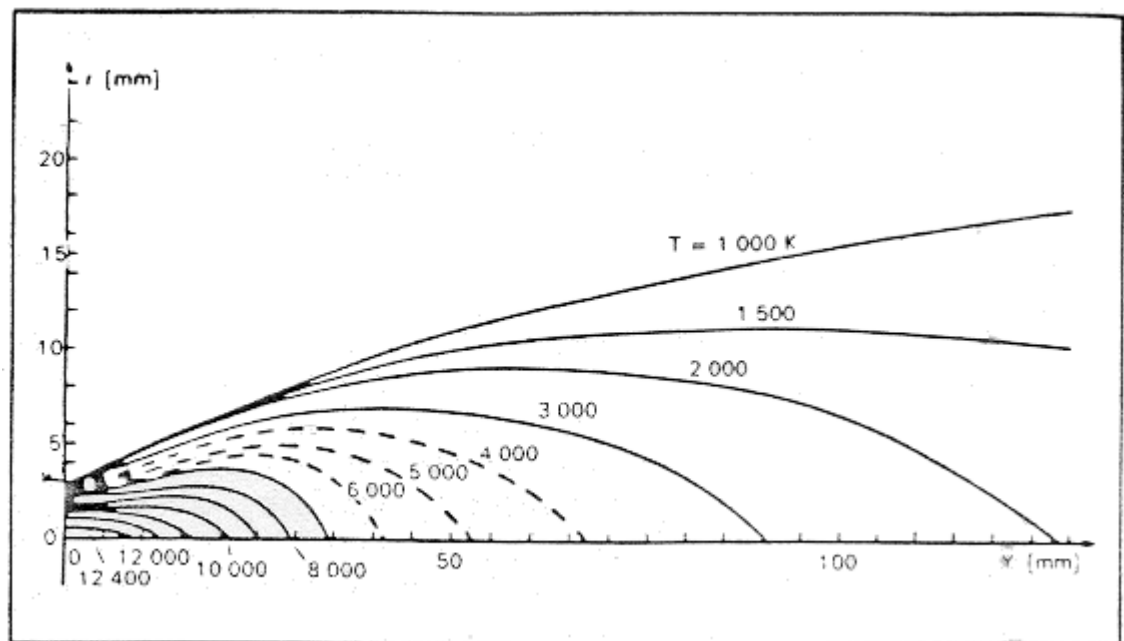


Fig.II-6: Champ de température pour un gaz plasmagène **azote-hydrogène** de puissance **30 kW**

II.2 INTERACTION PARTICULE/PLASMA

Un gaz porteur, généralement de l'argon, est utilisé pour injecter la poudre à l'intérieur de la flamme plasma, à travers un injecteur en aval de la torche (figure II-2). Les particules sont alors entraînées et accélérées par le jet plasma.

Un échange de quantité de mouvement et de chaleur s'opère alors entre le jet plasma et les particules, cela conditionne les vitesses, les trajectoires et l'état de fusion des particules. Les particules sont alors fondues par la chaleur du jet plasma avant de venir s'écraser avec une grande vitesse sur le substrat. Seule une partie des particules projetées forme le revêtement (rendement de la projection). En effet, l'autre partie des particules n'est pas complètement fondue au moment de l'impact, ou n'atteint pas sa cible, ou encore est éjectée du jet plasma [17].

Pour avoir une bonne qualité de revêtement, il est indispensable que les particules soient bien fondues au moment de l'impact, ou du moins très ramollies. Les paramètres de projection (tableau II-1) sont en général optimisés, d'une part pour améliorer la qualité du revêtement (bonne adhérence, faible porosité. etc.), et d'autre part pour augmenter le rendement.

Le tableau II-1, regroupe les principaux paramètres de projection sur lesquels on peut agir directement, ou indirectement.

Le matériau projeté	– La dimension moyenne des grains et leur forme. – Les propriétés physiques et chimiques de la poudre (conductivité thermique, point de fusion..... etc.).
Le support (ou le substrat)	– Les propriétés physiques et chimiques du matériaux support (coefficient de la dilatation thermique, coefficient de conductivité thermique.....etc.). – L'état de surface du support (rugosité). – Sa température au cours de la manipulation.
La source d'énergie	– La puissance fournie. – La nature du gaz plasmagène. – Le débit du gaz. – La géométrie de la torche.
Le distributeur de poudre	– La nature et le débit du gaz porteur. – Le débit de poudre. – La vitesse des poudres au niveau de l'injection (vitesse d'injection).
Le mode opératoire de projection	– La distance de la torche au substrat. – Le mouvement relatif substrat/torche. – L'atmosphère de projection (à l'air libre ou en atmosphère contrôlée). – La nature du système de refroidissement du substrat.

Tableau II -1 : Paramètres de projection

II.2.1 Vitesse des particules

Le matériau à projeter est introduit sous forme pulvérulente dans le jet plasma qui, du fait de sa grande vitesse, l'entraîne vers la pièce à revêtir. La vitesse des particules à l'intérieur du jet dépend de la vitesse d'injection, de la granulométrie et de la position de la particule dans le jet plasma.

En effet pour que les particules arrivent à pénétrer dans le jet plasma, elles sont introduites avec une vitesse de pénétration. Si l'énergie cinétique n'est pas suffisante, les particules n'arrivent pas à pénétrer le jet plasma, et restent en périphérie où les températures du gaz plasma sont faibles et ne fondent pas. De même, si les vitesses sont trop grandes les particules traversent le jet plasma, et elles ne sont pas fondues. En fait, la pression d'injection doit permettre aux particules d'atteindre le centre du jet avec la plus faible vitesse possible, pour pouvoir être entraînées suivant l'axe dans les régions les plus chaudes de la flamme.

Nous pouvons observer sur la figure II-7, l'influence de la vitesse d'injection sur les vitesses de particules d'Alumine de 18 μm dans un jet de plasma azote-hydrogène ($P = 29 \text{ kW}$) [36].

Il est clair que la vitesse des particules influence directement le temps de séjour à l'intérieur de la flamme, et donc la température des particules.

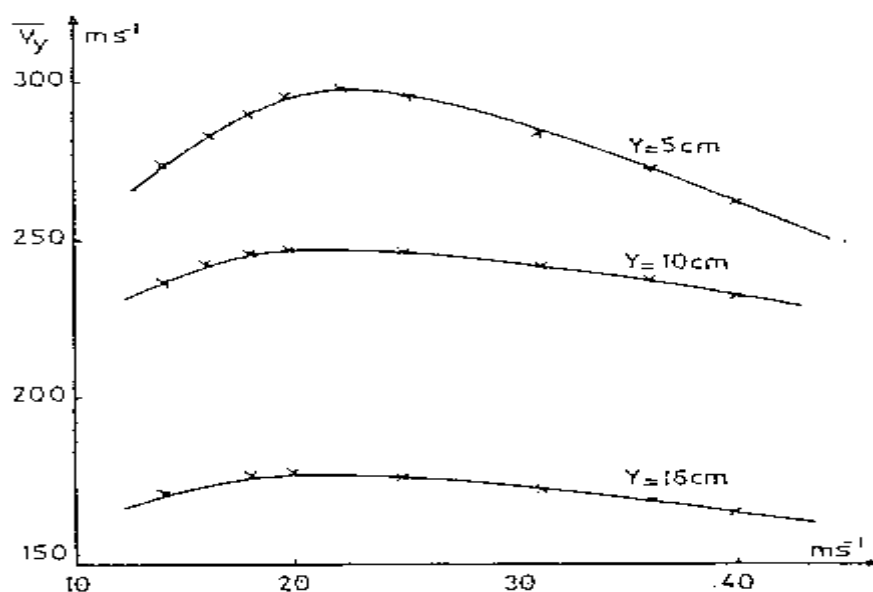


Fig.II-7: Vitesse de particules d'Alumine dans un gaz plasma $\text{N}_2\text{-H}_2$ en fonction de la vitesse d'injection

II.3 FORMATION DU DEPOT

Le dépôt obtenu est formé par le mécanisme d'adhésion inter-particules et particule-substrat. Il est en général le résultat de plusieurs mécanismes de liaisons opérant simultanément, ce qui donne une structure lamellaire. Pour aider à la compréhension, Les schémas (figure II-8 b) montrent les différentes phases de projection.

L'écrasement d'une nouvelle particule sur celle précédemment déposée intervient toute les 10^{-2} à 10^{-1} s alors que la solidification de la lamelle dure au plus 10^{-5} s .

Le contact entre lamelles et/ou entre les lamelles et le substrat va en grande partie conditionner les propriétés thermiques et mécaniques des dépôts.

L'accrochage d'une particule sur celle précédemment déposé et/ou sur le substrat est réalisé par différents mécanismes [7, 35] :

- l'accrochage mécanique : c'est le mécanisme le plus important pour les dépôts céramiques. Ce type d'accrochage est très amélioré par le sablage préalable des substrats.

Les lamelles suivent les contours des aspérités et les serrent en se contractant au refroidissement (figure II-8 a).

- l'adhésion chimique : ce type d'adhésion est observé dans le cas où le substrat et le matériau projeté présentent une affinité chimique avec la formation d'un alliage ou d'un composé intermétallique.

- l'adhésion physique : contrôlée par le phénomène diffusionnel, qui a lieu lorsque le substrat est maintenu à température élevée, comme lors de la projection sous vide.

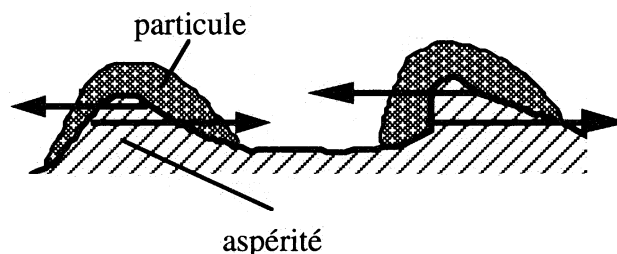


Figure II-8 a: écrasement de particules sur des aspérités

Après écrasement, l'énergie thermique contenue dans la particule est extraite par le substrat, d'où un refroidissement très rapide des particules de l'ordre de 10^5 à 10^6 K/s. Ce refroidissement brutal induit des tailles de grains très fines (moins de $1\ \mu\text{m}$) favorables aux propriétés mécaniques, mais provoque l'apparition de phases métastables, voir vitreuses. Par exemple pour l'Alumine, il y a l'apparition de la phase γ [7].

II.3.1 Ecrasement des particules

L'écrasement des particules dépend de leur vitesse et de leur viscosité au moment de l'impact. Cet écrasement se fera d'autant mieux que les particules fondues sont chaudes pour augmenter leur mouillabilité et donc leur capacité à remplir les trous dus au recouvrement.

Certains auteurs ont étudiés (MADJESKI) cet écrasement et ont défini un degré d'écrasement qui est le rapport du diamètre de la particule avant et après écrasement :

$$\frac{d_2}{d_1} = 1,29 \times \left(\rho \times \frac{V_d}{\mu} \right)^{0,2}$$

d_2 : Diamètre de la particule après écrasement (disque)

d_1 : Diamètre de la particule avant écrasement

ρ : Densité de la particule fondue

μ : Viscosité de la particule fondue

V_d : Vitesse d'impact

Il a été vérifié que pour la projection plasma ce rapport est de 3 à 7 [36].

II.3.2 Solidification et refroidissement des particules

La vitesse de refroidissement a été estimée à 10^5 - 10^6 K/s. En effet, la chaleur est rapidement extraite au travers de l'interface substrat/particule, ce qui implique une grande vitesse de refroidissement [38].

Le nombre de Biot est utilisé pour caractériser ce processus :

$$Bi = \frac{h_i \times s}{\lambda_d}$$

h_i : coefficient de transfert thermique inter-facial

s : épaisseur de la particule

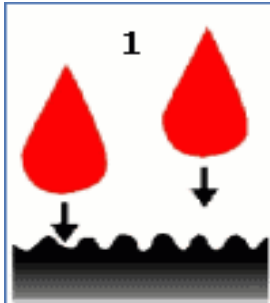
λ_d : conductivité thermique

Si $Bi \ll 1$, le transfert de chaleur est dominé par le coefficient inter-facial d'échange thermique et les gradients thermiques dans le dépôt et le substrat sont faibles (refroidissement Newtonien, système mince).

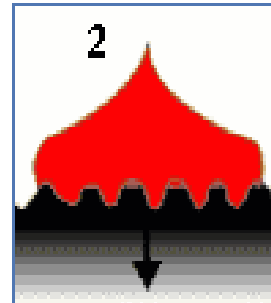
A l'opposé, quand $Bi \gg 1$, le transfert de chaleur est contrôlé par les propriétés thermiques du substrat et de la particule (refroidissement idéal, système épais).

Les paramètres qui influencent la vitesse de refroidissement ont été étudiés et ont fait l'objet d'une investigation numérique par Ruhl [32], qui a conclu que l'épaisseur de la particule et le coefficient de transfert thermique interfacial sont les paramètres les plus importants.

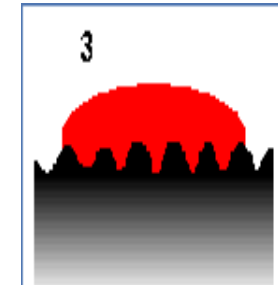
Très peu de travaux ont été consacrés pour étudier systématiquement les coefficients de transfert thermique dans les différents types de projection thermique.



Transport du matériau liquide du revêtement



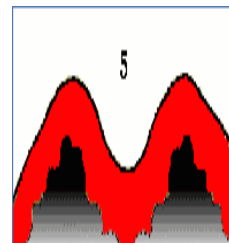
Impact sur la surface



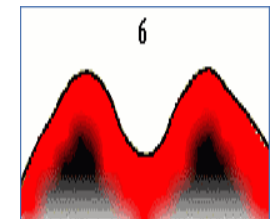
Transfert de chaleur de la particule au métal de base



Solidification et contraction du matériau de revêtement



Liaison mécanique



Fusions locales

Figure II-8 b : Processus de formation du dépôt

II.4 PARAMETRES CONTROLANT LA PROJECTION PLASMA

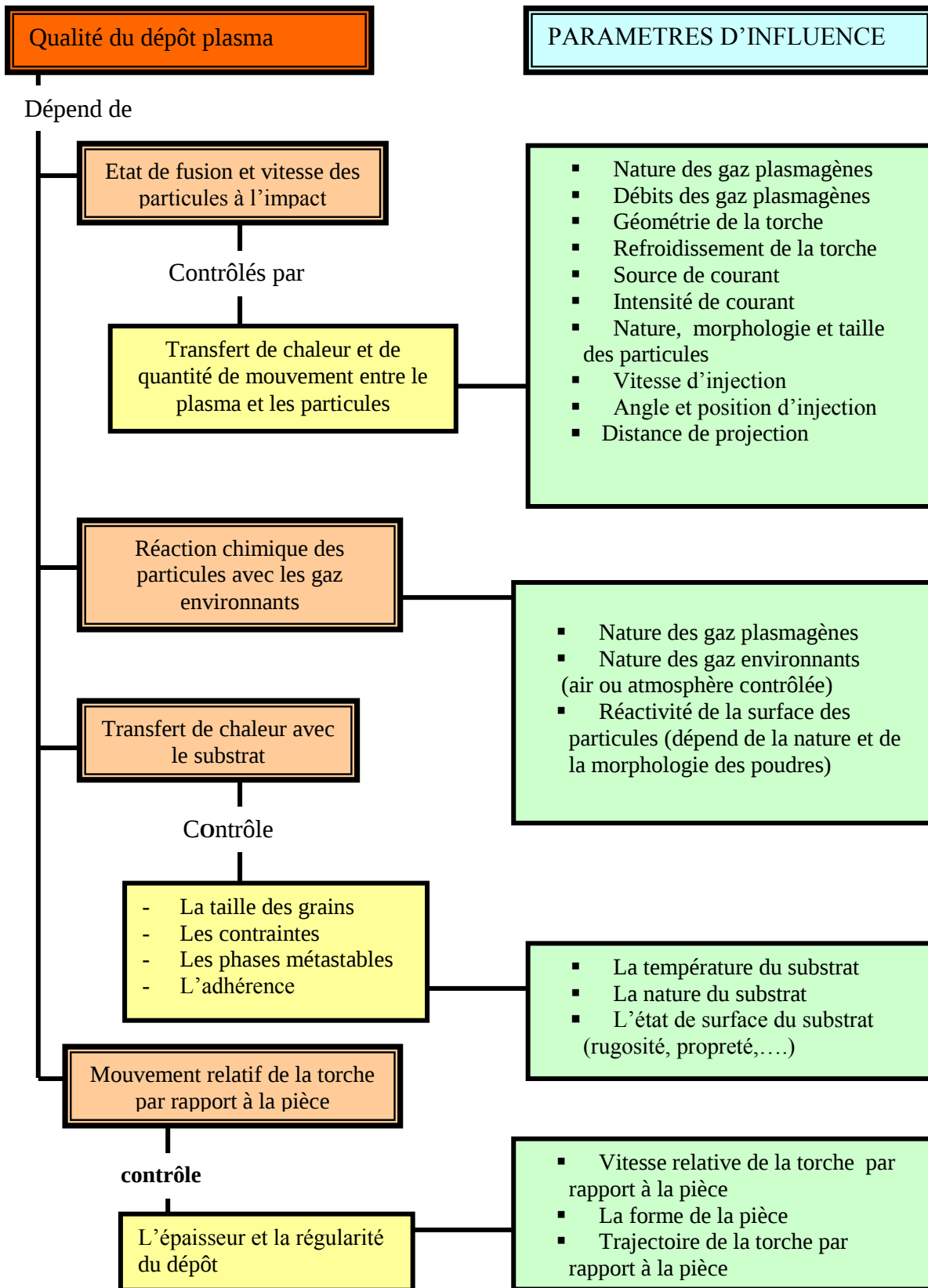
Selon le type de l'application, le contrôle en permanence de la plupart des paramètres de projection est indispensable pour l'obtention d'une bonne qualité de dépôt. Le tableau suivant énumère la plupart de ces paramètres [31].

Tandis que la qualité d'un revêtement de projection plasma est influencée par plus de 50 paramètres interdépendants, ce qui rend l'optimisation des conditions de projection difficile. Le tableau suivant énumère la plupart de ces paramètres.

La sélection et l'optimisation des paramètres ne peuvent être accomplies que si les effets des variations des conditions sont parfaitement connus. Cette connaissance s'est essentiellement développée de façon empirique faute de moyens de diagnostic appropriés aux jets de plasma et aux particules en vol.

Les efforts actuels dans les milieux universitaires et industriels devraient permettre de mieux comprendre et maîtriser la technique de projection plasma et ainsi d'accroître la qualité des dépôts.

II.4.1 Paramètres de qualité d'un revêtement plasma



II.4.2 Conditions pour l'obtention d'un bon dépôt

L'obtention d'un revêtement dense et adhérent exige que [15] :

- une fraction importante des particules injectées soient dans un état liquide ou semi pâteux lorsqu'elles atteignent le substrat ou les particules précédemment déposées ;
- les particules fondues aient une vitesse suffisante pour s'étaler et couler sur les irrégularités du substrat ou sur les particules précédemment déposées ;
- une forte adhérence inter particules et particule-substrat soit établie ;
- une sous-couche d'accrochage est souvent projetée avant la projection du dépôt pour permettre une adhésion du revêtement sur le substrat.

Une attention toute particulière doit évidemment être portée à la fusion des particules.

Cette fusion dépendra :

- du niveau de température de la flamme, fonction du mélange de gaz employé ;
- de la quantité de chaleur disponible dans cette flamme ;
- du point d'injection de la poudre dans la flamme ;
- de la vitesse d'injection des particules ;
- du temps de séjour de la particule dans la flamme, qui lui-même dépend de la vitesse du gaz, de la dimension, de la forme et de la densité des particules. La forme et la dimension des particules étant fonction du mode d'élaboration de la poudre. Il est nécessaire, pour effectuer un choix correct, de s'intéresser aux techniques de sa fabrication et à son mode d'élaboration car ils influencent directement les propriétés du revêtement.

II.5 PREPARATION DES SURFACES AVANT LE DEPOT

Des contaminants oxydés ou carbonés en faible épaisseur (10 à 100 Angströms) empêchent une bonne adhésion. La préparation des surfaces avant l'étape de projection est un point clé pour la bonne tenue des revêtements.

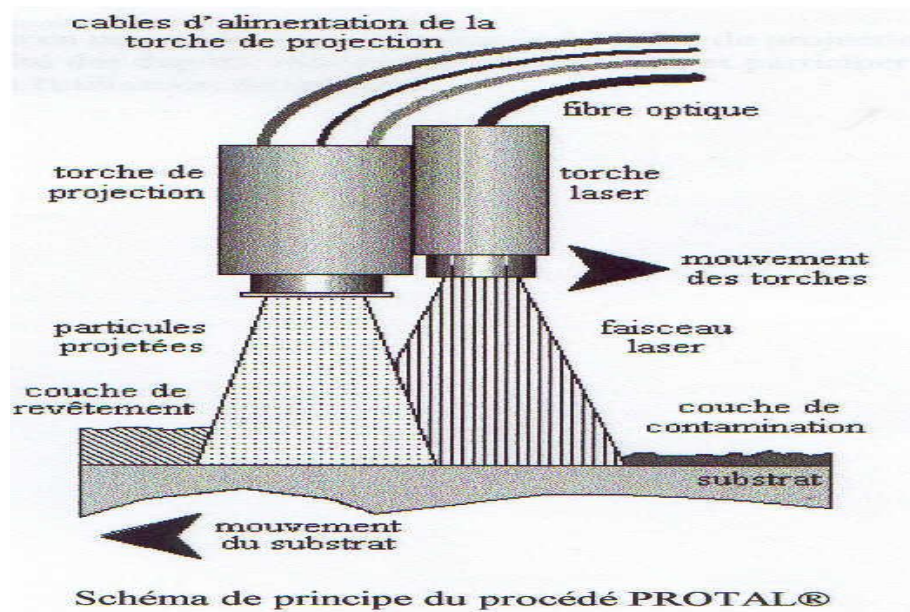
Le mode principal de l'adhérence des dépôts réalisés par projection thermique est l'ancrage mécanique. Ceci impose une préparation spécifique de la surface à revêtir avec une étape de dégraissage pour éliminer les graisses et les huiles, suivie d'une étape de sablage visant à générer une micro géométrie (rugosité) favorable de la surface.

La technique du sablage permet aisément de réaliser cette rugosité en créant, par projection de particules dures, des déformations plastiques localisées. L'optimisation des conditions de sablage pour la projection plasma a été étudiée par R. APPS [1, 7].

Toute fois deux inconvénients majeurs peuvent être relevés dans ce procédé, d'une part suite à l'utilisation des solvants et autres produits chimiques et leurs impacts néfastes sur l'environnement et les opérateurs, d'autre part l'opération de sablage laisse très souvent des résidus d'abrasifs ancrés dans le substrat (les quantités sont d'autant plus importantes que le substrat est ductile). Ces résidus altèrent l'adhérence du revêtement et réduisent l'endurance du substrat[1,7].

Afin d'éviter ces inconvénients, plusieurs techniques ont été mises en place telles que l'érosion au jet d'eau, le décapage, l'électroérosion ou le sablage à la glace ; mais elles demeurent très coûteuses et d'efficacité réduite. Par contre le procédé PROTAL actuellement utilisé pour des prestations industrielles de projection plasma chez Sulzer-Metco [10].

Le procédé PROTAL fait référence à une technique permettant simultanément de préparer la surface à revêtir et de revêtir cette surface. Ceci est obtenu par l'association à la torche de projection avec une torche laser.



L'arrangement géométrique entre les deux torches est réalisé de manière que le traitement laser se superpose avec la phase de dépôt, et ainsi les particules fondues arrivent sur un substrat vierge d'oxydes et de polluants. Les effets de l'irradiation laser sont d'éliminer les films de contamination et les couches d'oxydes et d'engendrer un état de surface favorable à l'adhérence du dépôt, et de limiter la recontamination au cours du process.

II.6 GENESE DES CONTRAINTES RESIDUELLES DURANT LA PROJECTION PLASMA

Les contraintes résiduelles sont les contraintes qui subsistent dans le matériau en l'absence de toute sollicitation extérieure.

Il a été prouvé par plusieurs études, que dans les dépôts plasma, les contraintes résiduelles jouent un rôle direct pour les performances et la tenue en service du revêtement.

Les dépôts plasma peuvent être soumis à des contraintes résiduelles de traction ou de compression parfois très élevées, et souvent supérieures aux limites de rupture du matériau [40].

Ces contraintes résiduelles sont dues au refroidissement très rapide et à la solidification du dépôt durant la projection. Plusieurs mécanismes existent durant la projection plasma, et qui provoquent le développement de ces contraintes résiduelles [29, 20, 18].

Certains auteurs [2, 28] ont utilisé différentes techniques pour diminuer ou optimiser ces contraintes résiduelles (utilisation de sous-couches, refroidissement du substrat, etc.).

Selon l'échelle d'observation, deux ordres de contraintes peuvent être définies :

- contraintes d'ordre I : ce sont les contraintes intrinsèques (de trempe, transformation de phases, etc.).
- contraintes d'ordre II : ce sont les contraintes thermiques dues aux différences des coefficients de dilatation thermique.

Dans ce paragraphe, nous allons décrire le mécanisme de genèse des contraintes résiduelles dans un dépôt plasma. Pour cela, nous considérons les hypothèses suivantes [20] :

- comportement élastique durant le refroidissement ;
- contact inter faciale parfait ;
- l'épaisseur du dépôt est négligeable devant celle du substrat ;
- le substrat est maintenu à une température T durant la projection ;
- le dépôt passe à la température T instantanément.

II.6.1 Contraintes intrinsèques

Ce sont les contraintes d'élaboration, qu'on ne peut attribuer aux différences entre les coefficients de dilatations thermiques, et elles peuvent avoir plusieurs origines, parmi lesquelles :

1) Transformation de phases

Le refroidissement rapide du revêtement peut créer des phases intermédiaires métastables et parfois amorphes. Ces phases se transforment en général en une phase cristalline plus compact d'où contraction et apparition de contraintes de traction.

2) Gradient thermique

Pendant la projection plasma, des gradients thermiques existent dans les couches superficielles. Il apparaît alors des contraintes de tractions associées à ces gradients [20] :

$$\sigma = E \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (1)$$

3) Contraintes de trempe

Juste après l'impact des particules sur le substrat, celles ci refroidissent rapidement et passent d'une température proche de la température de fusion, à la température moyenne du substrat durant la projection.

Ce refroidissement très rapide provoque une contraction. Cette contraction est accompagnée par l'apparition de contraintes de trempe.

On peut évaluer ces contraintes par un calcul simple, dans le cas d'un dépôt qui passe instantanément de la température de fusion vers la température moyenne du substrat pendant la projection.

En gardant les hypothèses définies plus haut, la contrainte de trempe à la température ambiante s'exprime comme suit :

$$\sigma_{tr}(T_a) = E_d(T_a) \cdot \sigma_d \cdot (T_f - T_s) \quad (2)$$

Les contraintes de trempe sont toujours en traction, et peuvent être très importantes. Par exemple, pour un dépôt d'Alumine qui subit une variation de température de 100K, la contrainte de trempe est de l'ordre de 100 MPa [20].

Il existe alors, forcément des mécanismes de relaxation pour ces contraintes. Parmi ces mécanismes, le plus important est certainement la micro fissuration des dépôts [8, 29, 18].

II.6.2 Contraintes thermiques

Généralement, il existe toujours une différence entre les coefficients de dilatations thermiques du substrat et du dépôt. Quand l'ensemble refroidi d'une température moyenne T_s vers la température ambiante, des contraintes se produisent alors dans le substrat et le dépôt. Ces contraintes peuvent être de traction ou de compression suivant que le coefficient de dilatation du dépôt est plus élevé ou plus faible que celui du substrat.

Il est possible de contrôler en partie ces contraintes en agissant sur la température du substrat avec un refroidissement approprié de façon à contrôler T_s . En effet, la température du

substrat peut être maintenue à moins de 100°C avec un refroidissement, alors qu'elle peut atteindre 400 à 500 °C sans refroidissement [8].

Le calcul de ces contraintes thermiques dans le cas simple d'un modèle élastique uni axiale avec refroidissement isotherme s'expriment comme suit [7] :

$$\sigma_{th}(T_a) = E_d(T_a) (\alpha_d - \alpha_s) (T_s - T_a) \quad (3)$$

II.6.3 Contraintes résiduelles

Si nous considérons uniquement la contrainte due à la trempe comme contrainte intrinsèque, on peut évaluer à partir des équations (2) et (3) par un calcul simple la contrainte résiduelle dans le dépôt avec les hypothèses énumérées précédemment [18] :

$$\sigma_r(T_a) = \sigma_{tr}(T_a) + \sigma_{th}(T_a) \quad (4)$$

Ce qui conduit à l'expression de la contrainte résiduelle suivante :

$$\sigma(T_a) = \left[\frac{\sigma_{tr}(T_s)}{E_d(T_s)} + (\alpha_d + \alpha_s) \times (T_s - T_a) \right] \times E_d(T_a) \quad (5)$$

Du fait que les contraintes de trempe sont toujours de traction, les contraintes thermiques qui dépendent des coefficients de dilatations thermiques définissent donc le sens des contraintes résiduelles dans un dépôt plasma. Le tableau II-2 et la figure II-9 donnent le sens et l'allure des contraintes.

Type de contrainte	Sens des contraintes suivant les valeurs des coefficients de dilatation thermique		
	$\alpha_d < \alpha_s$	$\alpha_d = \alpha_s$	$\alpha_d > \alpha_s$
Contrainte de trempe	+	+	+
Contrainte thermique	-	0	+
Contrainte résiduelle	+ ou -	+	+

(+) contrainte en traction, (-) contrainte en compression

Tableau II-2: Sens des contraintes résiduelles dans un dépôt plasma

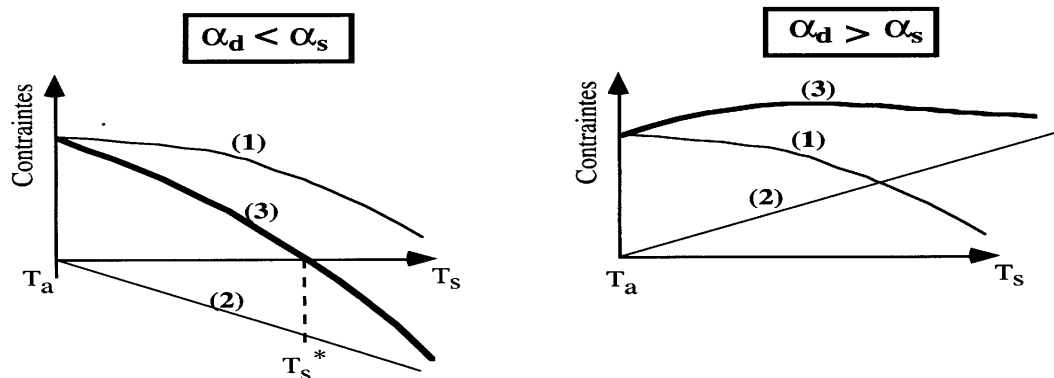


Figure II-9 : Schématisation des contraintes de trempe et des contraintes thermiques

(1) : contraintes intrinsèques ; (2) : contraintes thermiques (3) : contraintes résiduelles totales. La valeur de T_s^* peut être calculée à partir de la relation (5) pour $\sigma_r(T_s^*) = 0$.

II.7 CARACTERISATION DE L'ETAT MICROSTRUCTURAL DES DEPOTS PLASMA

II.7.1 Porosité

Dans les matériaux projetés par plasma, apparaissent toujours des porosités.

Lors de la projection, les particules ont toutes la même direction moyenne, d'où l'existence de l'effet "d'ombre", entraînant des porosités. Ces porosités dépendent de l'état de fusion des particules lors de l'impact, ainsi que de leur mouillabilité qui conditionnent leur aptitude à remplir les vides et à accommoder les irrégularités de la surface du substrat et/ou des particules déjà déposées.

Ces deux propriétés sont directement liées à la température et à la vitesse des particules, et donc à la puissance de la torche et à sa distance de la cible. Cela a été mis en évidence par plusieurs auteurs. Sur la (figure II-10), on voit l'influence de la distance torche/substrat, et de la puissance de la torche sur le taux de porosité. Le mélange plasmagène utilisé est de l'argon - hydrogène.

Le taux de porosité est fonction des conditions de projection [21], mais aussi de la taille des particules et de leurs morphologies. Il varie généralement de 5 à 20 %.

Les pores sont classés selon leur taille en deux catégories [29]:

Type I : 3 - 10 μm .

Type II : $\approx 0,1 \mu\text{m}$.

Type I : ce type de porosité a pour origine un remplissage incomplet lors du dépôt traduisant généralement une fusion incomplète.

Type II : caractéristique des revêtements céramiques, cette porosité peut être due à un contact inter lamellaire incomplet [26]. Ce contact a été évalué à 20 % de la surface totale par Mc Person [25]. Ce type de porosité est inhérent au procédé et à la nature du matériau et ne peut être évité, mais peut être réduit par un choix judicieux des paramètres de projection.

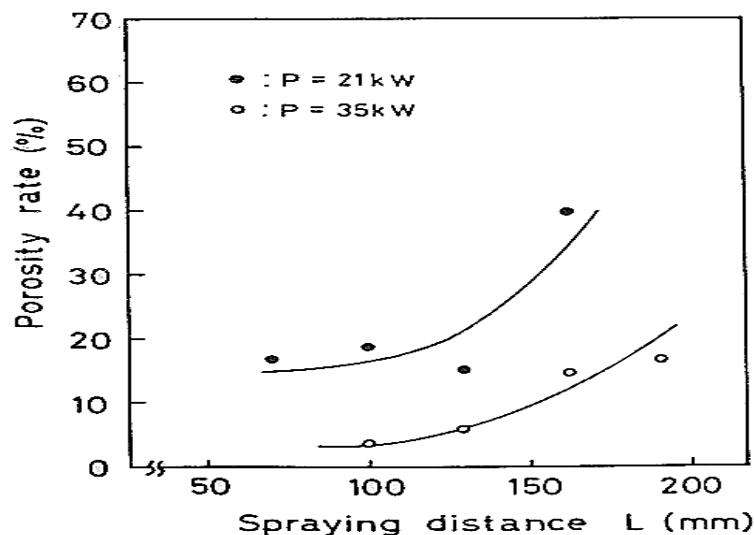


Figure II-10: Variation du taux de porosité en fonction de la puissance de la torche et de la distance de projection [16]

La porosité a des influences néfastes sur les propriétés thermiques et mécaniques des revêtements [29] :

- chute de plus de 75 %, de la valeur du module de Young par rapport au matériau dense ;
- diminution de la dureté et de la résistance à la traction ;

- aide à la diffusion d'oxygène, donc à l'oxydation de l'interface ;
- initiation de fissures à cause des concentrations de contraintes au voisinage des pores.

Par contre, la porosité améliore :

- la tenue aux chocs thermiques ;
- la durée de vie en fatigue thermique.

II.7.2 Fissures

Le procédé plasma induit, lors de la réalisation de revêtement en matériaux de nature fragile, un phénomène de fissuration. Ainsi, de nombreux auteurs ont observés des réseaux de fissures à la surface des revêtements céramiques [7, 37]. L'étude des fissures est un point très important pour caractériser l'état microstructural des dépôts en céramique.

La compréhension des phénomènes de création des fissures, et l'influence des paramètres de projection plasma sur le taux de fissuration doivent permettre une meilleure analyse de la structure du revêtement.

II.8 CARACTERISATION DE L'ETAT MECANIQUE

D'après les travaux de P.Fauchais [17], les propriétés mécaniques du dépôt sont fonction de son épaisseur, expérimentalement il a conclu qu'au delà de 0,3 mm d'épaisseur, le dépôt est dur. Les résultats des duretés obtenus pour les dépôts ZrO₂, Al₂O₃ et TiO₂ sont de 700 à 2000 Hv.

II.8.1 Adhérence des revêtements plasma et qualification de tests mécaniques d'adhérence

Les revêtements sont utilisés pour améliorer la résistance à la corrosion, à l'usure et/ou à la fatigue. Cependant quelle que soit la fonction d'un revêtement, celui-ci n'est bien efficace que si sa cohésion et son adhérence au substrat est suffisante [5].

Les forces qui assurent la cohésion des solides sont à l'origine de l'adhésion qui exprime les interactions qui s'exercent entre le substrat et le dépôt [5,6].

Le mécanisme d'adhésion prépondérant est d'origine mécanique. L'adhérence d'un dépôt projeté sur une surface polie est très limitée. Pour favoriser l'accrochage mécanique du dépôt, il est nécessaire de créer une rugosité adéquate à la surface de la pièce à revêtir par le procédé de sablage [23].

D'après les travaux de P.Fauchais [18], l'adhésion des dépôts céramiques est essentiellement du type mécanique et elle varie pratiquement linéairement avec la rugosité de surface. De plus les différences de coefficients de dilatation céramique –substrat entraînent des contraintes importantes dans les dépôts.

L'adhérence des revêtements de Cr₂O₃ sur de l'acier XC 38 obtenue par canon à détonation (environ 80 MPa) est nettement supérieurs à celle des revêtements élaborés par projection plasma (environ 55 MPa) du fait que le canon à détonation confère aux particules projetées une grande vitesse . La liaison avec le substrat ou entre particule est plus souvent métallurgique [23].

Au delà de l'identification du phénomène élémentaire de rupture des liaisons inter faciales, la détermination de l'adhérence présente de véritables difficultés expérimentales.

Plusieurs méthodes sont proposées dans la littérature pour évaluer l'adhérence, et de nouvelles méthodes sont fréquemment proposées. Cependant leur domaine d'application est en général limité au traitement de problèmes particuliers.

1. Définition de la cohésion

Un dépôt peut connaître des défauts de cohésion entre ses couches ou entre ses particules. La cohésion est la propriété d'un revêtement à supporter un champ de contraintes sans subir une destruction dans son épaisseur [23-30].

2. Définition de l'adhésion

La structure dépôt /substrat soulève le problème de l'adhérence du dépôt à son substrat.

L'adhérence est la propriété d'un revêtement à supporter un champ de contraintes sans se désolidariser de son substrat [23-30].

II.8.2 Tests D'adhérence

II.8.2.1 Les tests d'adhérence existants

Pour apprécier et/ou mesurer l'adhérence des revêtements déposés sur un substrat plusieurs méthodes d'essai existent. Les principaux essais ont un caractère destructif et on pourra distinguer les essais qualitatifs des essais quantitatifs.

II.8.2.1.1 Tests qualitatifs

Ces tests donnent une appréciation de l'adhérence, mais ne permettent en aucun cas une mesure proprement dite de l'adhérence [5 -24].

II.8.2.1.1.1 Essai de résistance au choc

L'essai consiste à faire tomber une masse en chute guidée sur le panneau à tester. L'appréciation de l'adhérence se fait par la détermination de la hauteur minimale provoquant le craquellement ou le décollement du revêtement [24-23].

II.8.2.1.1.2 Essai de pliage

Appelé aussi test de flexion, l'essai consiste à faire plier sur un mandrin cylindrique un panneau revêtu jusqu'à l'apparition de craquelures ou de décollement [30]. L'appréciation de l'adhérence se fait soit par la détermination de l'angle à partir duquel apparaît la première craquelure, soit en considérant le diamètre minimal du cylindre sur lequel l'éprouvette peut être pliée d'un angle de 180° sans que l'on constate l'apparition de craquelures, ou encore en observant l'aspect du revêtement après l'essai et en analysant le réseau de fissures obtenu :

- espacement ;
- type de fissure ;
- décollement ou non d'un morceau du revêtement.

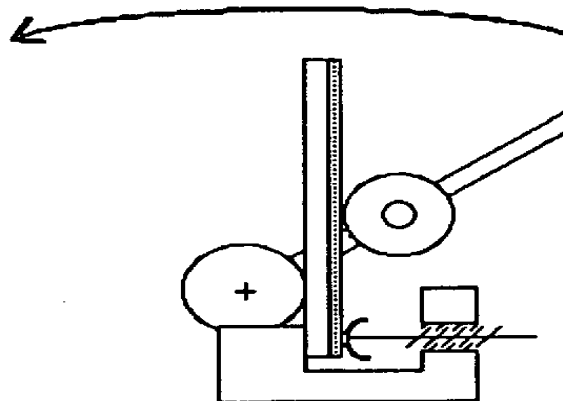


Fig. II-11 : Schéma de principe de l'essai de pliage

II.8.2.1.2 Tests quantitatifs

Ces tests, à la différence des précédents, permettent de mesurer une grandeur physique plus ou moins liée directement aux forces d'adhérence

II.8.2.1.2.1 Test de rayure

Ce test, destiné à évaluer l'adhérence des revêtements métalliques minces, consiste à rayer la surface de la pièce revêtue à l'aide d'une pointe très dure sur laquelle on applique une force connue.

La force appliquée peut être constante ou croissante de façon continue. Lors du test, l'adhérence est évaluée par la charge critique correspondant à l'apparition de la décohésion à l'interface dépôt-substrat. Cette décohésion étant contrôlée à posteriori par microscope optique ou électronique [5,23].

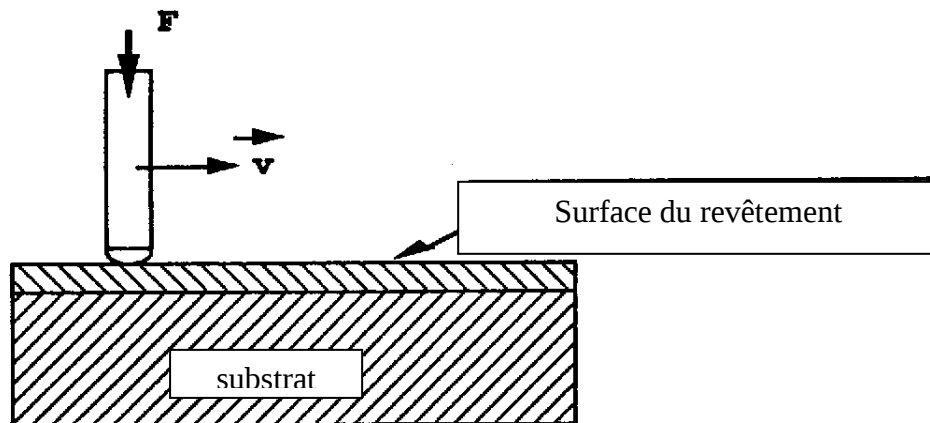


fig. II-12 : Schéma de principe du test de la rayure

II.8.2.1.2.2 Essai d'indentation

Ce test est proposé comme étant un test non destructif. Il peut être adopté pour caractériser l'adhérence sur des dépôts de faible dureté.

Ce test consiste à présenter un indentateur sur le revêtement perpendiculairement à la surface. Les contraintes de tension s'exerçant autour de la zone de contact peuvent conduire à une décohésion au niveau de l'interface, ceci permet de quantifier l'adhésion et non la cohésion du dépôt dans son épaisseur [5].

Il existe un autre test d'indentation destructif, où l'indentateur est présenté à l'interface dépôt/substrat (sur une section).

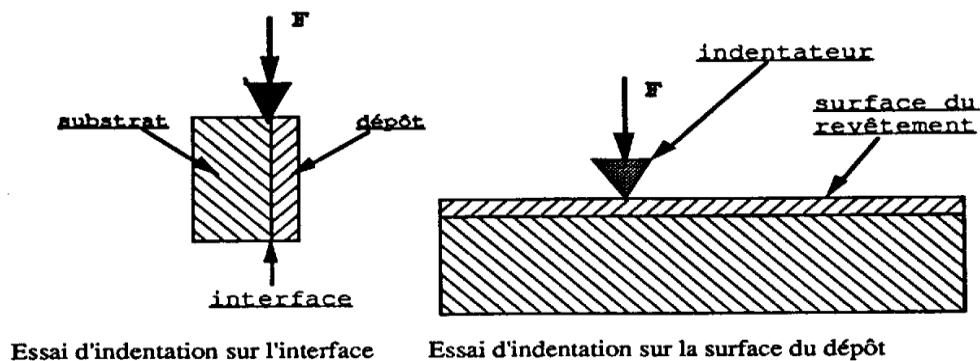


fig. II-13 : Schémas de principe du test d'indentation

II.8.2.1.2.3 Test d'arrachement

Le test d'arrachement consiste à exercer progressivement un effort de traction sur un picot collé directement sur un revêtement. L'adhésion ou la cohésion sont quantifiées par la contrainte correspondant à la force nécessaire pour arracher le picot [5].

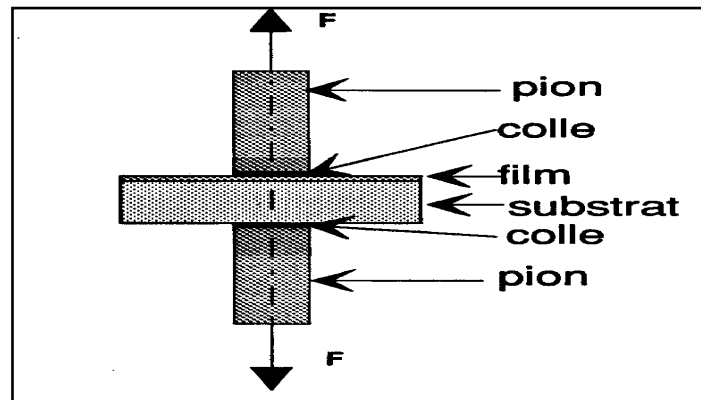


Fig. II-4 : Schéma de principe du test d'arrachement

Signalons qu'il existe une norme (AFNOR : NF 30-062 et NF A 91-202) sur le rechargement par projection à chaud qui spécifie les propriétés et caractéristiques des revêtements obtenus et qui fixe les méthodes d'essais permettant de contrôler ces caractéristiques. Cette norme concerne uniquement les revêtements métalliques [6-40].

II.9 DOMAINE D'UTILISATION

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 synchroniseur, disques d'embrayage, cylindres, pompes, platines d'alternateurs, plaquettes de freins.

Les domaines d'application des dépôts projetés par plasma ne cessent de s'élargir avec la réalisation de multi matériaux d'avenir tels que des dépôts métalliques sur des pièces en polymères [7,15].

La projection plasma a débouché sur la sonde à oxygène des pots catalytiques. Uniquement pour cette application, 130 tonnes de spinelles ont été utilisées dans le monde en 1997.

La technique de cette projection possède une panoplie très étendue de matériaux d'apport, ce qui va lui permettre d'intervenir dans de nombreux cas d'applications décrites dans les exemples suivants :

II.9.1 Protection contre la corrosion

Le terme de corrosion désigne l'ensemble des phénomènes physico-chimique qui altère la surface des pièces métalliques placées dans des ambiances agressives. Quand il s'agit de protéger des métaux, et plus particulièrement les aciers, la projection thermique joue un rôle primordial.

On distingue deux sortes de corrosion :

- la corrosion sèche ;
- la corrosion humide.

II.9.1.1 Corrosion sèche [7]

Elle s'apparente à une attaque chimique et le plus souvent une oxydation. La projection à chaud apporte des solutions, soit par application de dépôts d'alliages auto-fusibles du type (Ni, Cr, B, Si) qui sont étanches par opération de refusions, soit de dépôts rendus étanches après projection par des traitements thermiques, mécaniques, chimiques, ou par application de peintures ou de résines.

On peut citer, par exemple, le traitement thermique de couches d'aluminium sur acier qui, sous l'effet de la température (400°C), forment avec le fer des aluminures de fer ayant de très bonnes propriétés d'inoxidabilité

Des traitements mécaniques peuvent également densifier des revêtements de métaux relativement malléables : usinage de ces dépôts par tournage, moletage ou compactage par projection sur la surface de particules sphériques métalliques ou céramiques (verre, zircone par exemple).

II.9.2 Corrosion humide

Dans ce cas, le milieu humide joue le rôle d'électrolyte et des différences de potentiel peuvent s'établir entre le métal et son oxyde, entre deux zones oxygénées différemment, ou plus simplement entre les différents métaux d'un assemblage. Il y a alors formation d'une pile et consommation de l'anode.

La parade à ce genre de corrosion consiste à déposer sur les surfaces métalliques à protéger des revêtements de métaux plus anodiques. Dans le cas de l'acier, le zinc et l'aluminium sont les plus utilisés ; un mélange des deux (85 Zn-15 Al) permet de bénéficier des avantages des deux métaux.

II.9.3 Protection contre l'usure [7]

L'usure des surfaces métalliques est la perte progressive du matériau à sa surface lorsqu'il est soumis au frottement. Elle est dommageable, sauf pendant le rodage et limite la durée de fonctionnement des machines.

L'usure d'un mécanisme ne ressort pas uniquement du rôle joué par la lubrification, la pression et la vitesse, mais relève aussi de nombreux autres facteurs tels que la technologie de l'ensemble et de chaque pièce prise séparément, de leur métallurgie et en particulier des traitements de surface, de leurs tolérances de fabrication et des conditions d'environnement climatiques telles que la température, la corrosivité, l'humidité et l'abrasivité.

Le problème de l'usure est présent dans presque tous les montages mécaniques et les ressources de la projection thermique permettent souvent de trouver des solutions à ce problème. Les revêtements sont choisis en tenant compte de leur nature, leur dureté et leurs qualités de surface brute de dépôt ou usinée. Le choix est fait surtout après avoir étudié la cause de l'usure.

II.9.4 Usure par frottement

Elle s'exerce sur deux pièces en contact et en mouvement l'une par rapport à l'autre et peut se faire dans une ambiance lubrifiée ou non.

On la combat en choisissant :

- des métaux antagonistes ayant les plus faibles coefficients de frottement (utilisation du molybdène par exemple) ;
- des matériaux durs (utilisation des carbures de tungstène ou des alliages auto-fusibles) ;
- des matériaux qui allient les deux qualités déjà citées (utilisation d'oxyde de chrome).

II.9.5 Usure par abrasion

Cette forme d'usure se produit quand le frottement se fait en présence de particules abrasives. Ce sont les matériaux durs qui combattent le mieux cette usure, tels que des céramiques ou des alliages auto-fusibles chargés de carbures métalliques.

II.9.6 Usure par corrosion

Elle se manifeste sous l'effet d'un jet de particules entraînées à grande vitesse par un fluide liquide ou gazeux. Dans ce cas, il est possible que des matériaux très durs ou très tendres puissent apporter une solution. Les matériaux très durs sont les mêmes que ceux cités aux paragraphes précédant ; quant aux matériaux très tendres, on peut signaler par exemple le plomb.

II.9.7 Usure par fretting

C'est l'usure provoquée à l'interface de deux pièces en contact par des vibrations de faible amplitude. La notion de fatigue de surface intervient et les revêtements susceptibles de convenir doivent présenter une bonne cohésion inter granulaire. Les alliages auto-fusibles (Ni, Cr, B, Si) ou (Co, Cr, B, Si) donnent de bons résultats sur des montages peu sollicités. Dans le cas de sollicitations plus importantes, les carbures de tungstène avec matrice cobalt ou les carbures de chrome avec matrice nickel-chrome sont mieux adaptés.

II.9.8 Usure par adhésion

C'est le type d'usure le plus couramment rencontré. Elle est due au cisaillement par frottement des micro soudures ou jonctions qui se forment entre deux aspérités en contact direct métal/métal. En effet, lorsque les deux surfaces sont en mouvement relatif, l'énergie thermique dissipée par frottement, alliée aux très fortes pressions ponctuelles, suffit pour provoquer un écoulement plastique localisé du métal et souder les aspérités en contact. Les deux surfaces dénudées adhèrent, soit par solubilité et diffusion : on dit alors qu'il y a soudure chaude, soit par adsorption solide : c'est la soudure froide.

II.9.9 Applications aéronautiques

Dans les moteurs à turbine d'avion, de nombreuses pièces font appel à la projection thermique en générale et à la projection par torche plasma en particulier comme :

- les surfaces des aubes de turbine ;
- la chambre de combustion ;
- les joints labyrinthes ;
- les staturs rotors de compresseurs ;
- les fixations d'aubes ;
- les chemins de roulement de volets.

II.9.10 Applications d'isolation par les barrières thermiques [29].

II.9.10.1 La fonction barrière thermique

Elle est utilisée par les dépôts des matières très réfractaires. Ces dépôts sont employés partout où se rencontre une corrosion à chaud très agressive (matériel de four, pièces de moteurs thermique, moules, etc.). Les plus gros utilisateurs sont les constructeurs de moteurs d'avion qui l'utilisent dans leurs ateliers intégrés ou dans des ateliers agréés.

II.9.10.2 Revêtements utilisés comme barrières thermiques

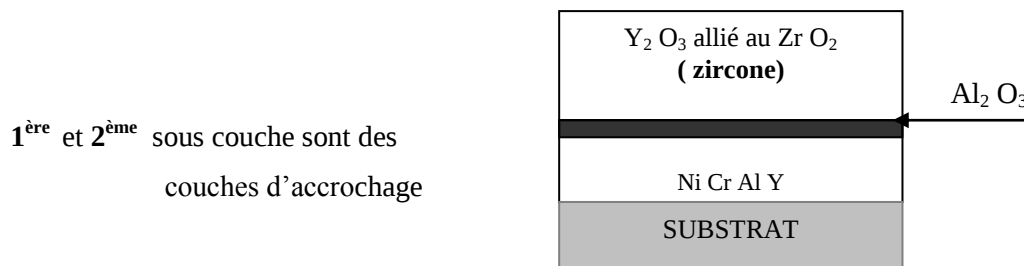
La réalisation de couche pour l'isolation thermique des matériaux est un des grands domaines d'application des techniques de projection par procédé plasma. Ainsi, VOLVO

FLYGMOTOR a développé cette technique pour générer des dépôts céramiques de ZrO_2 - Y_2O_3 utilisés comme barrières thermiques.

Une barrière thermique doit regrouper les qualités suivantes :

- résistance à l'oxydation ;
- faible conductivité thermique ;
- stabilité thermique ;
- coefficient de dilatation thermique proche de celui de la couche d'accrochage ou du substrat.

Une barrière thermique est constituée de la façon suivante :



Le matériau céramique (Zr O_2), allié à l'oxyde ($\text{Y}_2 \text{O}_3$), est souvent utilisé pour réaliser des revêtements qui jouent le rôle de barrière thermique pour ses qualités d'isolant thermique et sa bonne résistance à l'oxydation couplé à une couche d'accrochage en (Ni Cr Al Y). Pour obtenir les caractéristiques mécaniques requises par les conditions d'utilisation et pour avoir une durée de vie aussi longue que possible du revêtement, il est nécessaire de bien connaître le matériau ainsi que les spécifications structurales induites par le procédé de génération du dépôt. Une étude en service est d'autre part indispensable pour bien comprendre les mécanismes d'endommagement et pouvoir ainsi optimiser les caractéristiques du revêtement.

CHAPITRE III - PARTIE EXPERIMENTALE

La présente étude répond à un souci de la SONEGAS d'améliorer la durée de vie de ses pièces par l'utilisation d'autres types de revêtements.

Dans le chapitre II, nous avons vu qu'un revêtement plasma présente une microstructure poreuse. Cette microstructure détermine les propriétés thermique et mécanique. Il est donc nécessaire d'étudier l'adhérence du dépôt sur le substrat et les profils de température en cours de projection.

Concernant l'étude de l'adhérence et de dureté, les essais ont été établis sur un acier inoxydable Z3CND17 12, utilisé pour la fabrication de chemise servant pour l'accouplement des arbres d'une pompe immergée dans l'eau de mer.

Lors du pompage, l'usure de la chemise est due essentiellement à la présence de sable entre le palier en graphite et la chemise en acier inoxydable avec un revêtement dont la dureté est de 800 Hv selon les tests effectués sur les pièces d'origines.

Compte tenu du coût en devise de la pièce de rechange, la société a procédé à une modification en effectuant un traitement de nitruration avec un palier en PTFE donnant une durée de vie égale à celle des pièces non traitées, environ 8 mois. Un second traitement a été effectué en utilisant le chromage (dépôt de 0,1 mm) avec un palier en PTFE. Cette modification a permis l'amélioration de la durée de vie, soit 22 mois.

Nous nous sommes intéressés au revêtement par projection plasma, du fait que la torche plasma présente les avantages suivants selon les travaux de Z. Emonet [44] :

- moindre oxydabilité des particules dans le jet de l'arc du fait de l'utilisation de gaz neutre ;
- plus grande température de la flamme, donc plus grand échauffement de la poudre et meilleure compacité de dépôt ;
- plus grande pression des gaz de projection, donc plus grandes vitesses des particules conduisant à un meilleur dépôt ;
- plus grande fiabilité dans les conditions de projection et dans la reproductibilité du tir
- possibilité de projeter des fines poudres de quelques microns.

III.1 METHODES D'EXPERIMENTATION

Les matériaux d'apport étudiés sont l'alumine et le carbure de tungstène. Pour la sous-couche d'accrochage, on utilise du molybdène.

Notre choix est justifié par le fait que parmi les matériaux céramiques, les oxydes métalliques sont les plus utilisés. D'après les travaux de **A Vardelle** [36] les oxydes ont une excellente stabilité, de bonnes propriétés mécaniques (dureté, résistance à l'usure) et thermiques. Les carbures ont une grande dureté et constituent d'excellents revêtements protecteurs contre l'usure.

III.2 INSTALLATION DE PROJECTION PLASMA

L'installation de projection plasma SULZER-METCO du complexe MEI M'Sila (fig.III-1) est entièrement automatisée d'une puissance de 80 kW. Elle comprend les éléments principaux suivants :

- une source de chaleur (générateur électrique courant continu) ;
- une torche de projection (9MB) dans laquelle sont réalisées les opérations de fusion du matériau projeté et d'acquisition d'énergie cinétique par les particules ;
- un dispositif de régulation et de contrôle de l'énergie calorifique (simples débitmètres pour une installation de base) ;
- un dispositif d'alimentation en produit d'apport ;
- un système de refroidissement de la torche.

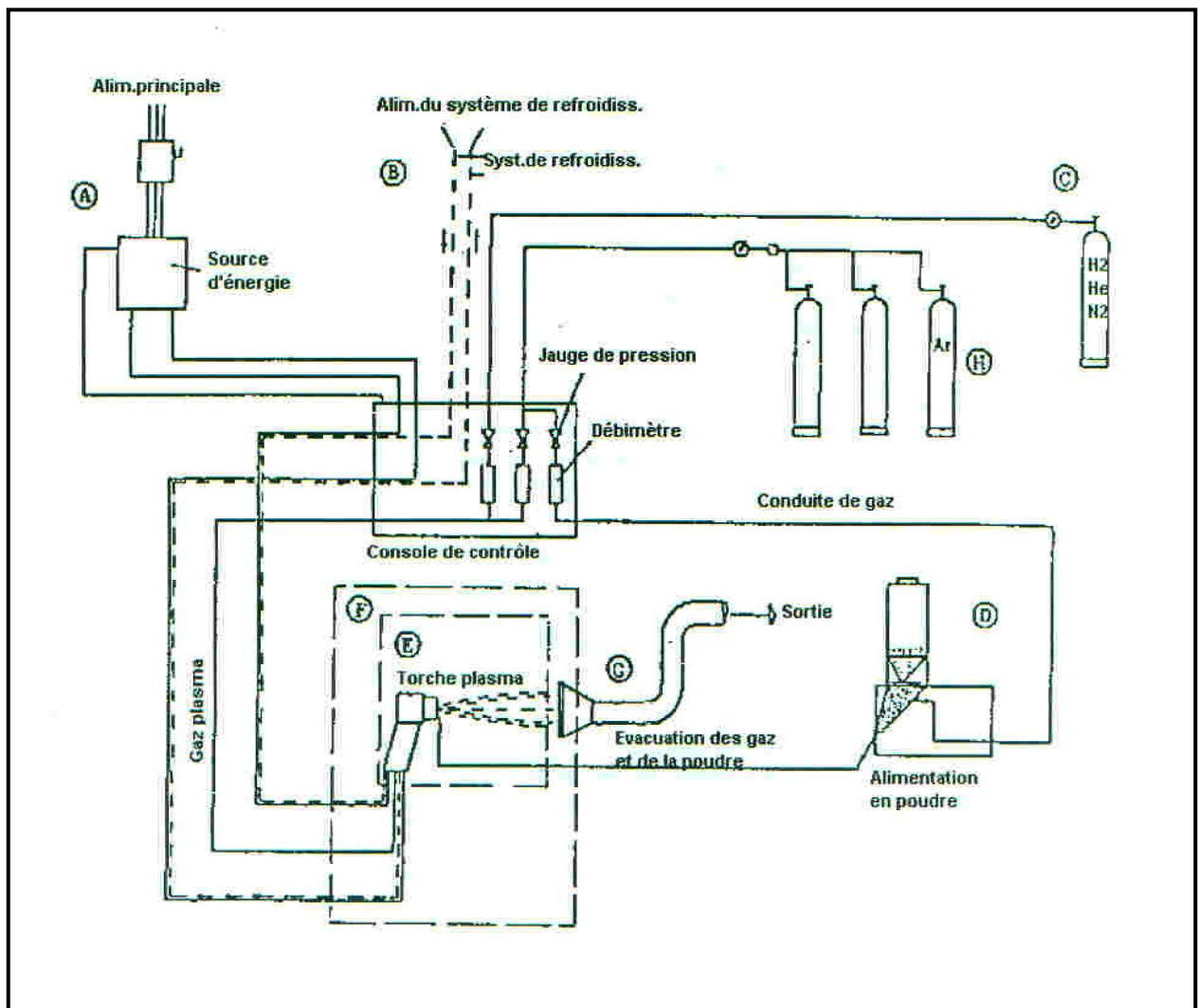


Fig. III-1 : Installation de la projection plas

III.3 PARAMETRES DE PREPARATION DU SUBSTRAT

Pour tous les substrats, nous avons utilisé les mêmes paramètres de préparation à savoir :

Nature de matériau abrasif	Granulométrie (mm)	PRESSION DE SABLAGE	Temps de sablage (mn/m)	Distance de sablage (mm)	Angle d'incidence de jet	Temps entre sablage et projection
Corindon	1,2	7 bars	600	10	30°	3 à 5 min

III.4 PARAMETRES DE PROJECTION

Nous avons utilisé les mêmes conditions de projection pour l'ensemble des dépôts : le carbure de tungstène et l'alumine.

a) Paramètres de projection de la poudre

Débit de poudre (gr/min)	Nature de gaz porteur	Débit de gaz
136	N ₂ (azote)	100

b) Paramètres de projection torche

Nature et conception de la torche	Nature des gaz plasmas		Débit des gaz		refroidissement
			N ₂	H ₂	
9 MB	N ₂	H ₂	100	19,5	L'eau froide

c) Déplacement de la torche

Distance de projection (mm)	Epaisseur du dépôt obtenu (mm)	Angle d'inclinaison
110	0,4	20°

III.5 TEST DE DURETE

Les essais de dureté ont été menés à l'aide d'un appareil électronique type micro duromètre automatique. Le dispositif permet d'avoir une mesure directe sur écran. La dureté a été mesurée sous une charge de 1000 g pendant 20s.

L'appareil utilise un pénétrateur en diamant, de la forme d'une pyramide quadrangulaire droite à base carrée. L'angle formé par deux arêtes opposées est de 136° .

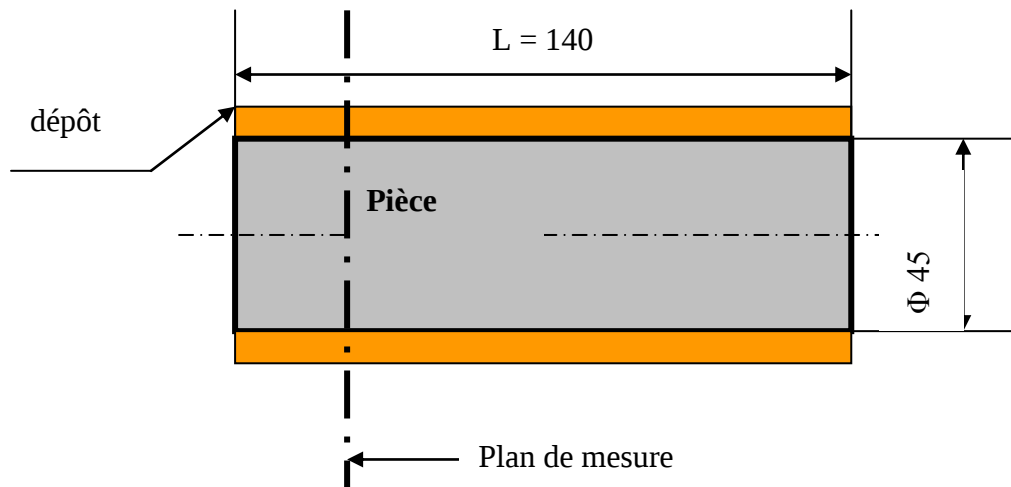
III.5.1 Echantillons utilisés

Les revêtements ont été réalisés sur des pièces cylindriques de diamètre 45 mm avec un dépôt de 0,4 mm pour l'alumine et le carbure de tungstène. Par contre, pour les échantillons avec une sous couche d'accrochage, le dépôt de molybdène est de 0,1 mm.

La distance entre deux mesures est de 0,05 mm environ. Les échantillons sont définies comme suit :

- **ALSSC** : alumine sans sous couche
- **ALASC** : alumine avec sous couche
- **WCSSC** : carbure de tungstène sans sous couche
- **WCASC** : carbure de tungstène avec sous couche

Pour les essais, nous avons utilisé le modèle géométrique suivant :

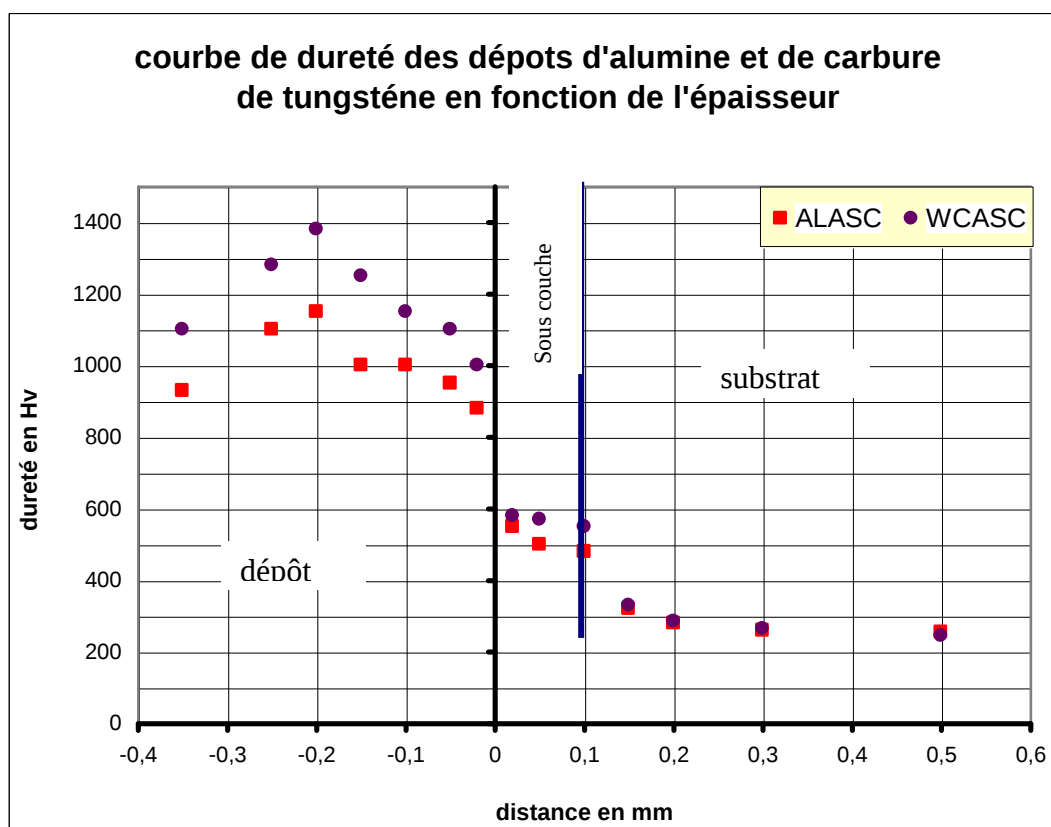
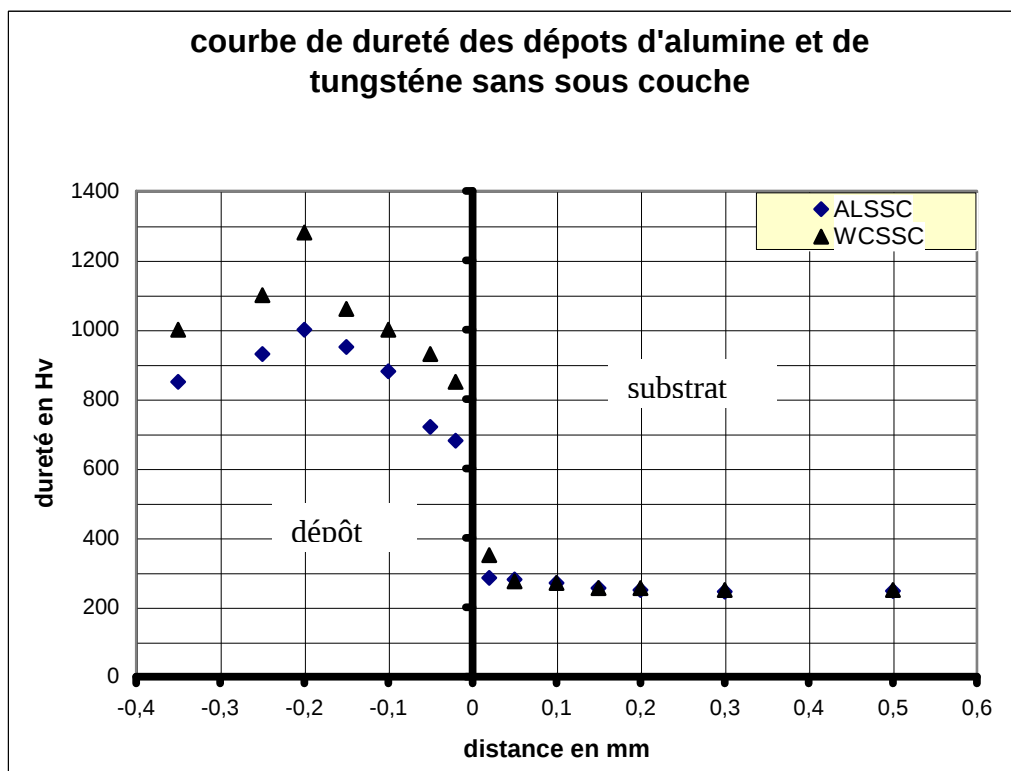


III.5.2 Résultats des différents dépôts réalisés

Le tableau suivant donne les résultats de la dureté obtenus pour différents dépôts en fonction de l'épaisseur.

Distance en mm	Dureté en Hv			
	ALSSC	ALASC	WCSSC	WCASC
0,5	247	255	250	245
0,3	245	260	250	265
0,2	250	280	255	285
0,15	255	320	255	330
0,1	270	480	270	550
0,05	280	500	275	570
0,02	350	550	355	600
-0,02	700	900	850	1000
-0,05	720	950	930	1100
-0,1	880	1000	1000	1150
-0,15	950	1000	1060	1250
-0,2	1000	1150	1280	1380
-0,25	930	1100	1100	1280
-0,35	850	930	1000	1100

Les représentations graphiques qui suivent donne l'évolution de la dureté en fonction de l'épaisseur pour les différents dépôts réalisés.



III.5.3 Interprétations

A partir des profils obtenus, on remarque que :

- la dureté augmente à l’approche de l’interface, ceci est probablement dû au sablage du substrat avant dépôt. De 280 Hv, on passe à 350 Hv ;
- la dureté dans la sous-couche semble constante, environ 550 Hv ;
- dans l’épaisseur du dépôt, la dureté passe par un maximum, au milieu de l’épaisseur du revêtement, pour chuter aux bords de la surface libre et de l’interface ;
- la dureté est meilleure dans les dépôts avec une sous-couche d’accrochage. On trouve 1380 Hv pour le carbure de tungstène et 1150 Hv pour l’alumine, soit une augmentation respective de 100 Hv et 150 Hv par rapport au dépôt sans sous-couche.

III.6 TEST D’ADHERENCE

Parmi les différents tests énumérés dans le chapitre II, nous retenons l’essai d’arrachement. Notre choix est basé sur :

- l’existence de plusieurs normes AFNOR NF30 062, NFA91-202 et DIN50160 établies pour la caractérisation de l’adhérence [41].
- la majeure partie des tests tel que le test de la rayure et de l’indentation ne constitue que des essais comparatifs et dont l’interprétation des résultats est délicate [42].

III.6.1 Echantillons utilisés

Quatre types de revêtements ont été réalisés pour l’essai de traction :

- **ALSSC** : alumine sans sous couche
- **ALASC** : alumine avec sous couche
- **WCSSC** : carbure de tungstène sans sous couche
- **WCASC** : carbure de tungstène avec sous couche

Les échantillons utilisés sont des éprouvettes cylindriques (fig.III-2) de diamètre 20 mm. Les épaisseurs des revêtements sont :

- de 0,4 mm pour dépôt à base d’alumine ;
- de 0,4 mm pour dépôt à base de carbure de tungstène ;
- de 0,1 mm pour la sous-couche d’accrochage à base de molybdène.

Pour chaque type de revêtement, cinq éprouvettes seront soumises au test d’arrachement.

Pour le collage, il est important d’utiliser une colle adéquate. Elle doit permettre, d’une part une destruction du dépôt (adhésive ou cohésive) sans qu’il y ait rupture du film de colle, d’autre part, la colle doit être assez visqueuse pour qu’elle ne pénètre pas dans les pores du revêtement afin de ne pas renforcer artificiellement la résistance du dépôt.

L’effort doit être exercé perpendiculairement à la surface du film afin que la répartition des contraintes soit homogène. Cette condition est expérimentalement très difficile à réaliser et justifie en grande partie la dispersion des mesures relative à cette méthode. L’utilisation de la colle présente aussi un inconvénient en raison, d’une part de sa force de collage qui limite l’application de la méthode à l’étude des couches peu adhérentes, et d’autre part, de son influence sur la répartition des efforts qu’elle doit transmettre intégralement au revêtement.

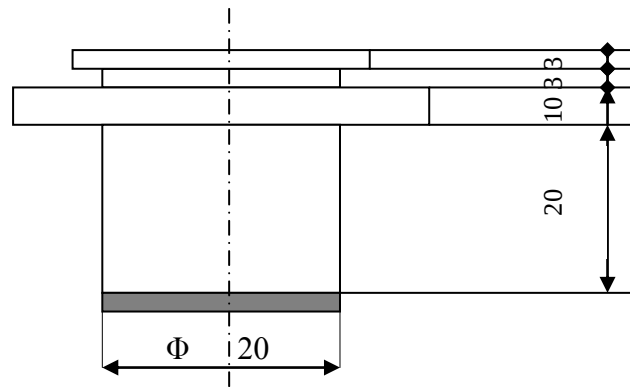


Fig.III-2 : Echantillons utilisés pour le test d'arrachement

III.6.2 Procédures expérimentales

Pour le collage, la colle utilisée pour tous les essais est un adhésif à base de résine époxyde associée à un durcisseur HV 988 avec une contrainte maxi de 75 MPa, selon le constructeur.

Pour obtenir un assemblage correct, les surfaces ont été nettoyées avec un solvant (acétone) avant collage.

Conditions de collage : après application d'un film de colle (0,5mm environ), les éprouvettes sont positionnées dans des V et maintenues serrés par des pinces étau, et mis dans une étuve à 150° pendant 45 minutes.

Les essais de traction sont réalisés sur la machine de traction INSTRON, modèle 1185. Cette machine nous permet de réaliser une traction à vitesse imposée. Durant l'essai, la vitesse utilisée est de $V = 0,5 \text{ mm/mn}$.

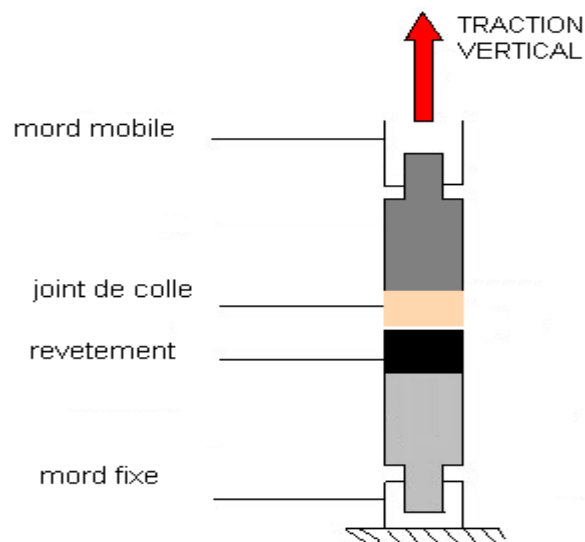


Fig.III.3 : Montage de traction pour le test d'arrachement

III.6.3 Résultats et interprétations du test d'arrachement

Pour chaque essai, nous obtenons l'effort maximal pour lequel nous calculons la contrainte $\sigma_{\max}$ tout en observant le type de rupture obtenue, adhésive ou cohésive. Les résultats des tests sont consignés dans les tableaux suivants :

a) Alumine sans sous couche (ALSSC)

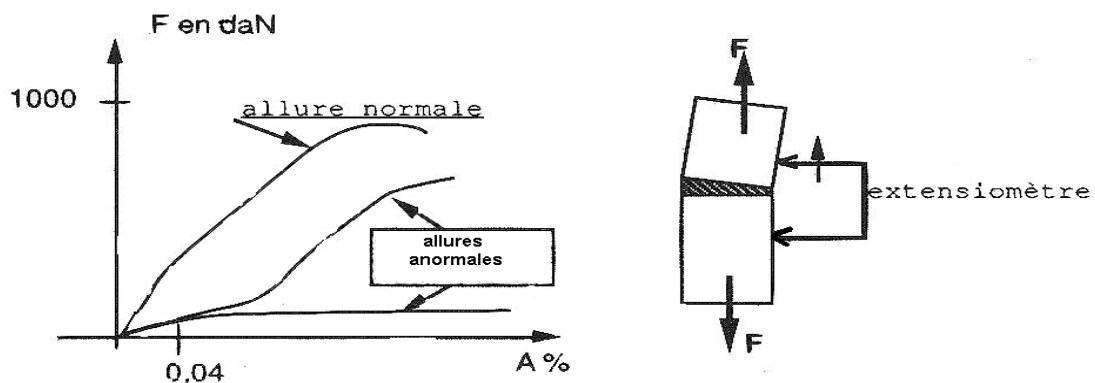
Essai	Force maxi en (daN)	Contrainte σ en (MPa)	Observation du type de rupture
1	992	31,6	Adhésivité totale
2	--	--	Mauvais collage
3	383	12,2	Rupture dans la colle
4	1083	33	Adhésivité totale
5	--	--	Mauvais collage

ANALYSE :

- Pour les essais (2) et (5), il y a eu rupture juste au démarrage de l'essai de traction (film de colle faible).
- Pour les essais (1) et (4), la rupture est adhésive totale ; les contraintes obtenues sont respectivement de 31,6 et 33 Mpa, soit une moyenne de **32 Mpa**. Cette valeur semble être la plus caractéristique de la résistance intrinsèque du revêtement.
- Pour l'essai (3), une flexion est observée (mauvais positionnement des parties collées), ce qui explique une faible valeur de la contrainte 12,2 Mpa.

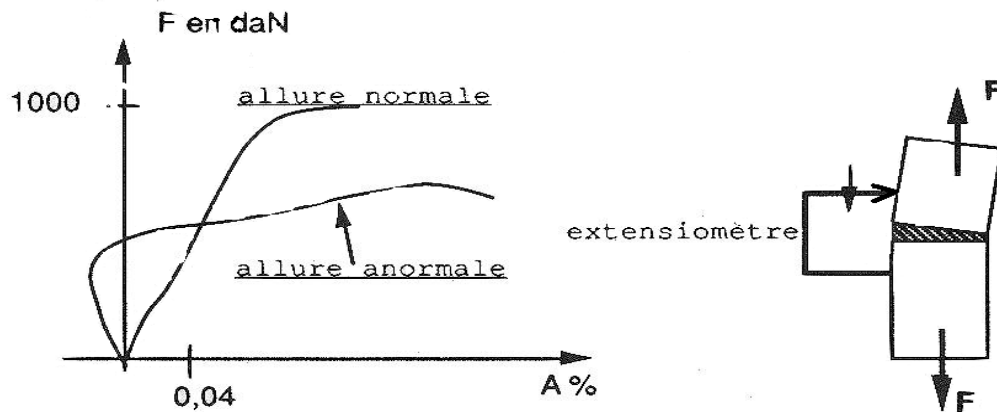
En présence de flexion, deux cas se présente [23] :

1^{er} cas :



Dès que l'on tire, on a tendance à redresser l'ensemble. L'extensomètre est sollicité en traction dès le départ, mais il enregistre un allongement rapide qui provoque la rupture très rapidement.

2^{ème} cas :



Dès que l'on tire dans ce cas, on a tendance à redresser l'ensemble. L'extensomètre est d'abord sollicité en compression avant de partir en traction.

b) Alumine avec sous couche (ALASC)

Essai	Force maxi en (daN)	Contrainte σ en (MPa)	Observation du type de rupture
1	320	10,2	Rupture dans la colle
2	1109	35,3	Adhésivité totale
3	1162	37	Adhésivité totale
4	647	20,6	Adhésivité partielle
5	1206	38,4	Adhésivité totale

ANALYSE :

- une mauvaise répartition de la colle dans les essais (1), ceci a provoqué une rupture dans la colle pour une faible force appliquée 320 daN.
- de même pour l'essai (4), on obtient une rupture adhésive partielle avec une flexion à observer, cela signifie que la contrainte peut être plus élevée ($> 20,6$ MPa).
- les chiffres les plus significatifs et qui caractérisent l'adhérence sont les essais (2), (3) et (5), soit une contrainte moyenne de 36,9 Mpa.

c) Carbure de tungstène sans sous couche (WCSSC)

Essai	Force maxi en (daN)	Contrainte σ en (MPa)	Observation du type de rupture
1	1979	63	Adhésivité totale
2	392	12,5	Rupture dans la colle
3	1926	61,3	Adhésivité totale
4	1954	62,2	Adhésivité totale
5	549	17,5	Rupture dans la colle

ANALYSE :

- Une flexion est observée pour les essais (2) et (5) avec une faible valeur de la contrainte 12,5 et 17,5 MPa dénotant un mauvais positionnement des parties collées.
- Une rupture adhésive totale est observée pour les essais (1), (3) et (4) avec une contrainte de 63 MPa, 61,3 MPa et 62,2 MPa, soit une moyenne de 62 Mpa. Cette valeur est la plus caractéristique de la résistance du revêtement.

d) Carbure de tungstène avec sous couche (WCASC)

Essai	Force maxi en (daN)	Contrainte σ en (MPa)	Observation du type de rupture
1	2073	66	Adhésivité totale
2	2023	64,4	Adhésivité totale
3	2142	68,2	Adhésivité totale
4	--	--	Mauvais collage
5	706	22,5	Rupture dans la colle

ANALYSE :

- Une rupture adhésive totale est observée pour les essais (1), (2) et (3) avec une contrainte de 66 MPa, 64,4 MPa et 68,2 MPa, soit une moyenne de 66,2 Mpa. Cette valeur est la plus caractéristique de la résistance du revêtement.
- Une flexion est observée pour l'essai (5) avec une faible valeur de la contrainte 22,5 et 17,5 MPa dénotant un mauvais positionnement des parties collées.

III.7 CONCLUSION

Les tests de la dureté et de l'adhérence, avec ou sans sous couche d'accrochage pour les différents dépôts utilisés, nous ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- la dureté augmente à l'approche de l'interface ;
- la présence d'une sous couche d'accrochage donne de meilleurs résultats que les dépôts sans sous couche. En dureté, nous obtenons 1380Hv pour le dépôt en carbure de tungstène, et 1150 Hv pour le dépôt d'alumine. En adhérence, nous obtenons 66Mpa pour le carbure de tungstène, et 36 Mpa pour le dépôt d'alumine ;
- la quantité de la colle et le soin apporté à l'opération de collage sont des facteurs importants dans la mise en œuvre des essais de traction.

CHAPITRE IV - MODELISATION THERMIQUE DU SUBSTRAT

INTRODUCTION

Le calcul des structures par éléments finis est une discipline née il y a environ 35 ans, où se mêlent étroitement les mathématiques, la mécanique, l'analyse numérique et le transfert de chaleur, d'où sa complexité.

Elle a longtemps été réservée à des petites équipes de spécialistes dans de grandes sociétés ou des laboratoires de recherche.

Les progrès réalisés ces dernières années en informatique, tant par la puissance de calcul que par une interactivité toujours plus grande et des interfaces homme/machine sans cesse améliorées, ont contribué à une large diffusion de la conception assistée par ordinateur (CAO) dans les bureaux d'études.

Les besoins de calcul sans cesse accrus des entreprises, l'amélioration des systèmes de pré et de post-traitement, les outils de maillage de plus en plus performant et les passerelles de plus en plus "transparentes" entre le besoin CAO et le maillage ont amené une grande diffusion des logiciels de calculs dans le monde industriel.

Pour l'utilisateur de code de calcul, les difficultés sont de quatre ordres :

La modélisation par elle-même, l'aspect numérique de la résolution, l'interprétation et la validation des résultats, enfin la syntaxe dans les conventions du code utilisé.

Les trois premières difficultés doivent être abordées d'un point de vue physique et le code ne doit être qu'un outil de résolution du problème mécanique.

IV.1 ELEMENTS FINIS EN TRANSFERT DE CHALEUR

IV.1.1 Formulation intégrale et résidus pondérés

Contrairement à la méthode des différences finies où la formulation des équations différentielles reste fondamentalement inchangée par l'introduction des dérivées discrètes, l'application de la méthode des éléments finis nécessite une reformulation des équations différentielles.

Nous devons en arriver à une formulation dite intégrale, basée sur les principes de calcul variationnels, afin de remplacer les variables inconnues par des fonctions d'approximations sur les sous domaines de géométrie connue appelée éléments finis.

La méthode la plus courante pour déterminer cette forme intégrale dans le cas des équations de transfert de chaleur, est la méthode des résidus pondérés [43]. Nous la définissons comme suite :

Un système d'équations aux dérivées partielles, stationnaires, linéaire ou non-linéaire, d'ordre n sur un domaine V .

$$\mathfrak{I}(Y) + \phi \varpi = 0$$

$\mathfrak{I}$: Opérateur différentiel

Y : solution

$\phi \varpi$: Fonction d'excitation

Les conditions aux limites s'écrivent :

$$\mathbf{X}(\mathbf{Y}) = \phi \sigma$$

La méthode des résidus pondérés consiste à déterminer des fonctions u qui annulent la forme intégrale suivante :

$$\int_V \psi [\beta(u) + f_V] dV = 0$$

où :

ψ : fonction de pondération

u : appartenant à un ensemble de fonctions admissibles satisfaisant les conditions aux limites et dérivables jusqu'à l'ordre "n"

Dans le cas d'un problème d'équilibre, comme par exemple la répartition de la température dans un corps en régime permanent, le problème physique est décrit par l'équation de **LAPLACE**.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0$$

La formule intégrale s'écrit :

$$W = \int_V \psi(x, y) \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) dV = 0$$

Où u est dérivable deux fois, et doit satisfaire toutes les conditions aux limites.

IV.1.2 Fonctions d'approximation et polynômes d'interpolation

Pour chacun des éléments reconstituants une approximation du milieu physique étudié, nous remplaçons la variable "u" par une fonction d'interpolation dépendante des valeurs aux nœuds et dont les coefficients sont indéterminés.

Pour un élément rectangulaire à 4 nœuds, une variable sera donc approximée par un polynôme du premier degré, soit [43] :

$$u(x) = \langle N \rangle \{ u_n \}$$

$$u(x) = \langle N_1(x), N_2(x), N_3(x), N_4(x) \rangle \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{Bmatrix}$$

Où :

N_1, N_2, N_3, N_4 : sont des fonctions d'interpolation

u_1, u_2, u_3, u_4 : les valeurs de la variable u aux nœuds de l'élément.

Un élément de base, appelé élément de référence peut être défini dans un espace de référence et être ramené à l'espace réel par transformation géométrique. Dans ce cas, la fonction d'interpolation s'écrit :

$$u(\xi, \eta) = \langle N_1(\xi, \eta), N_2(\xi, \eta), N_3(\xi, \eta), N_4(\xi, \eta) \rangle \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{Bmatrix}$$

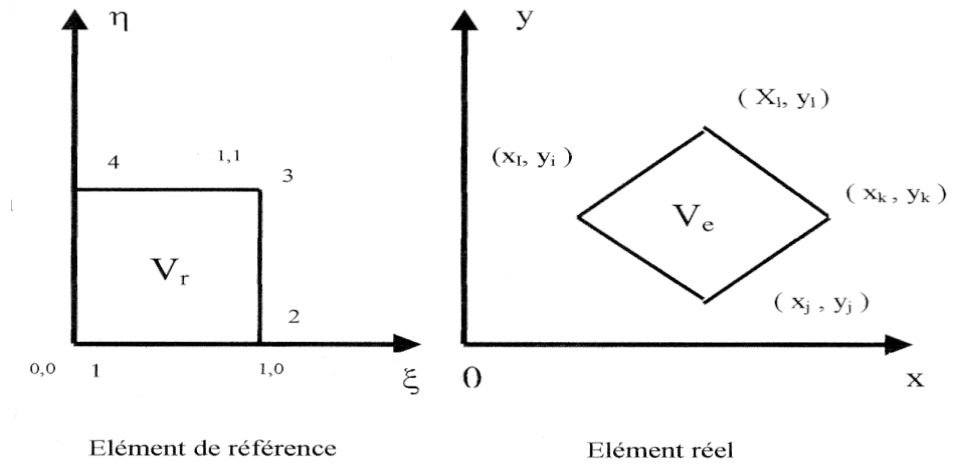
Avec :

$$N_1 = 1 - \xi - \eta$$

$$N_2 = \xi$$

$$N_3 = \xi + \eta$$

$$N_4 = \eta$$



IV.1.3 Représentation matricielle et assemblage en un système global

D'après la formulation intégrale de GALARKINE où l'on choisit :

$$\psi = \delta u$$

On trouve :

$$W = \int_V \delta u [\beta(u) + f_v] dV = 0$$

Où δu : variable quelconque de la fonction u .

On pourra remplacer cette intégrale par une somme d'intégrales sur chaque élément de volume V_e , soit de façon à introduire pour chaque élément les fonctions d'interpolations :

$$W = \sum_{e=1}^{V_e} W^e = \sum_{e=1}^n \int_{V_e} \delta u [\beta(u) + f_v] dV = 0$$

IV.1.4 Méthode de résolution

$$u = \langle N \rangle \{u_n\}$$

$$u = \langle N \rangle \{ \delta u_n \}$$

IV.1.4.1 Cas stationnaire

Le système d'équations linéaires final étant après intégration sous la forme matricielle :

$$[K] \{u\} = \{F\}$$

La résolution s'effectue par inversion de $[K]$, par la méthode de triangularisation (Gauss) ou bien de décomposition (Cholesky).

Dans le cas où la matrice K n'est plus linéaire, notre système final est de la forme :

$$[K(u)] \{u\} = \{F\}$$

On utilise des méthodes telles que celle de NEWTON-RAPHSON, la méthode de substitution et la méthode itérative pas à pas.

IV.1.4.2 Cas non stationnaire

Le système prend la forme :

$$[C] \left\{ \frac{\partial U}{\partial t} \right\} = [K(U)] \{U\} + \{F\}$$

Le problème se traite comme un problème de propagation en utilisant des méthodes de différences finis. Les méthodes les plus utilisées sont :

- . la méthode d'EULER explicite, implicite et semi – implicite ;
- . la méthode de prédiction-correction ;
- . la méthode explicite de type RUNGE-KUTTA.

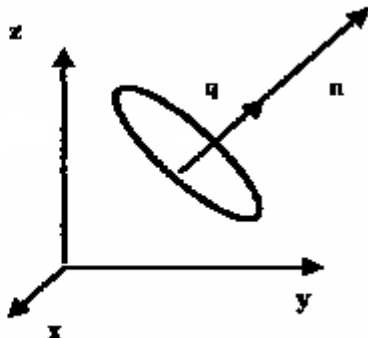
IV.1.5 Résolution numérique de l'équation de chaleur par éléments finis

On distingue deux états fondamentaux de transfert de chaleur :

- l'état stationnaire où toutes les conditions aux limites sont stables, ainsi que la température, en n'importe quel point du corps, est constante. La température dépend seulement des coordonnées spatiales ;
- l'état non stationnaire ou transitoire où une ou plusieurs conditions sont dépendantes du temps. La température est non seulement fonction des coordonnées spatiales, mais elle est aussi fonction du temps.

IV.1.5.1 Etude du cas stationnaire (présence de la torche)

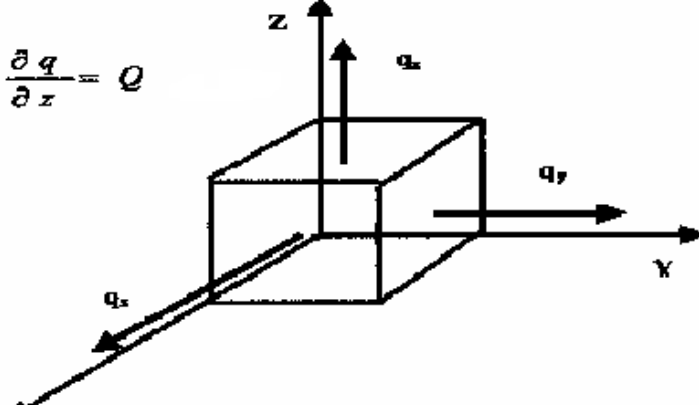
L'équation de base pour le calcul de la distribution de la température a été établie par Fourier en écrivant que le flux de chaleur généré par unité d'aire dépend du gradient de température.

$$\{q\} = \begin{Bmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \end{Bmatrix} = -k \begin{Bmatrix} \frac{\partial T}{\partial x} \\ \frac{\partial T}{\partial y} \\ \frac{\partial T}{\partial z} \end{Bmatrix} \quad (1)$$


The diagram shows a 3D coordinate system with axes x, y, and z. A small elliptical area element is depicted in a plane. A vector q is shown passing through the center of this area, and another vector n is shown perpendicular to the plane of the area, representing the normal vector.

k est la conductivité thermique.

Si Q est le flux de génération (ou d'extraction) de chaleur par unité de volume, et en tenant compte de la balance d'énergie, nous avons :

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = Q \quad (2)$$


The diagram shows a 3D cube centered at the origin of a coordinate system with axes x, y, and z. Three vectors representing heat flux are shown: q_x pointing along the positive x-axis, q_y pointing along the positive y-axis, and q_z pointing along the positive z-axis, each originating from a face of the cube.

En substituant (1) dans (2), l'équation de distribution de température s'écrit pour un milieu isotrope :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q = 0 \quad (3)$$

La résolution de cette équation différentielle sur un domaine est gouvernée par les conditions aux limites sur la frontière Γ du domaine.

a - Conditions aux limites

Nous distinguons deux types de conditions aux limites :

- 1- les conditions dites "essentielles" imposées sur la variable T ;
- 2- les conditions dites "naturelles" imposées au flux q sur une partie de la frontière.

b - Conditions aux limites essentielles

Sur une partie de frontière Γ_1 , la température T a une valeur fixe égale à T_1 . $T = T_1$ sur Γ_1 .

c - Conditions aux limites naturelles

Elles sont imposées sur une partie de frontière Γ_2 , elles se présentent comme suite [19]:

- La Convection

C'est le flux de chaleur par unité d'aire dû à la convection à travers la frontière, il est défini comme suit :

$$q_c = h_c (T - T_a)$$

T : température du corps

T_a : température de milieu environnant

h_c : coefficient de convection

- Le Rayonnement

C'est le flux de chaleur par unité d'aire dû à la radiation du corps au milieu environnant, ce flux s'écrit :

$$q_r = \sigma \varepsilon (T^4 + T_r^4)$$

T : température du corps

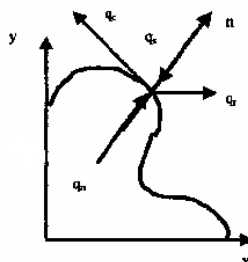
T_r : température du milieu recevant la radiation

σ : $5,670.10^{-8} \text{ W/m}^2.\text{K}^4$ est la constante de BOLTZMAN

ε : émissivité de la surface du corps

- Apport de Chaleur

Le corps peut aussi recevoir un flux de chaleur par unité d'aire, noté q_s d'une source environnante. Donc, pour les trois effets, nous avons :



$$-K \frac{\partial T}{\partial n} = q_n = q_c + q_r + q_s \quad (4)$$

IV.2 FORMULATION PAR ELEMENTS FINIS

Soit une plaque d'épaisseur h d'un matériau homogène et isotrope en équilibre thermique avec son milieu environnant.

La formulation des équations algébriques pour un élément, ayant pour fonction d'interpolation nodale $N_1, N_2, N_3, \dots, N_n$ peut se faire à ce stade sans préciser le type d'élément.

Nous allons nous en servir pour illustrer la formulation par un élément rectangulaire ou triangulaire. Comme l'élément triangulaire est le plus simple, on va l'utiliser pour faire cette formulation.

Pour un élément triangulaire, les fonctions d'interpolation nodales sont au nombre de trois :

$$\{N\} = \langle N_1 \ N_2 \ N_3 \rangle^T$$

La variable inconnue T peut être exprimée sur l'élément au moyen d'une interpolation nodale :

$$T = N_i T_i + N_j T_j + N_k T_k = \langle N \rangle \{a\}^e \quad (5)$$

Avec :

$$\{a\}^e = (T_i \ T_j \ T_k)^T$$

T_i, T_j, T_k : sont les valeurs inconnues de la température aux nœuds.

En utilisant la méthode de GALERKINE, l'intégrale du résidu pondéré de l'équation différentielle (3) s'écrit pour un élément :

$$\int_{A^e} \{N\} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + Q \right] dx dy = 0 \quad (6)$$

Après intégration par partie, en utilisant le théorème de **GREEN**, nous trouvons :

$$\begin{aligned} & \int_{\Gamma^e} \{N\} k \frac{\partial T}{\partial x} n_x d\Gamma - \int_{A^e} \frac{\partial \{N\}}{\partial x} k \frac{\partial T}{\partial x} dx dy \\ & + \int_{\Gamma^e} \{N\} k \frac{\partial T}{\partial y} n_y d\Gamma - \int_{A^e} \frac{\partial \{N\}}{\partial y} k \frac{\partial T}{\partial y} dx dy + \int_{A^e} \{N\} Q dx dy = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

n_x, n_y représentent les cosinus directeurs de la normale n à la portion de la frontière $d\Gamma$.

En rassemblant les deux intégrales sur la frontière Γ^e et en réarrangeant l'expression, nous avons :

$$\begin{aligned} & \int_{A^e} \left[\frac{\partial \{N\}}{\partial x} k \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial \{N\}}{\partial y} k \frac{\partial T}{\partial y} \right] dx dy \\ &= \int_{A^e} \{N\} Q dx dy + \int_{\Gamma^e} \{N\} k \left(\frac{\partial T}{\partial x} n_x + \frac{\partial T}{\partial y} n_y \right) d\Gamma \end{aligned} \quad (8)$$

Or d'après l'équation (4), nous avons :

$$\left(\frac{\partial T}{\partial x} n_x + \frac{\partial T}{\partial y} n_y \right) = -q_n = q_s - q_c - q_r \quad (9)$$

En substituant (9) dans l'équation (8), nous trouvons :

$$\begin{aligned} & \int_{A^e} \left[\frac{\partial \{N\}}{\partial x} k \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial \{N\}}{\partial y} k \frac{\partial T}{\partial y} \right] dx dy \\ &= \int_{A^e} Q dx dy + \int_{\Gamma^e} \{N\} q_s d\Gamma - \int_{\Gamma^e} \{N\} q_c d\Gamma - \int_{\Gamma^e} \{N\} q_r d\Gamma \end{aligned} \quad (10)$$

En remplaçant pour q_r , q_c , leurs expressions relatives et en substituant T par $\langle N \rangle \{a\}^e$. L'équation (10) devient :

$$\begin{aligned} & \int_{A^e} \left[\left(\frac{\partial \{N\}}{\partial x} k \frac{\partial \langle N \rangle}{\partial x} + \frac{\partial \{N\}}{\partial y} k \frac{\partial \langle N \rangle}{\partial y} \right) dx dy \right] \{a\}^e \\ &= \int_{A^e} Q dx dy + \int_{L^e} \{N\} q_s dL - \left[\int_{L^e} \{N\} h_c \langle N \rangle dL \right] \{a\}^e \\ &+ \int_{L^e} \{N\} h_c T_a dL - \int_{L^e} \left[\{N\} \varepsilon \sigma \left(\langle N \rangle \{a\}^e \right)^3 \langle N \rangle dL \right] \{a\}^e \quad (11) \\ &+ \int_{L^e} \{N\} \varepsilon \sigma T_r^4 dL \end{aligned}$$

Que nous pouvons ré-écrire sous la forme :

$$[K]^e \{a\}^e = \{F\}$$

$$\{F\}^e = \{F\}_Q^e + \{F\}_{q_s}^e + \{F\}_C^e + \{F\}_r^e$$

où

$$[K]_{xx}^e = \left[\int_A^e \left(\frac{\partial \{N\}}{\partial x} k \frac{\partial \langle N \rangle}{\partial y} \right) dx dy \right]$$

$$[K]_{yy}^e = \left[\int_A^e \left(\frac{\partial \{N\}}{\partial x} k \frac{\partial \langle N \rangle}{\partial y} \right) dx dy \right]$$

$$[K]_C^e = \left[\int_{L^e} \{h\} h_C \langle N \rangle dL \right]$$

$$[K]_r^e = \left[\int \{N\} \varepsilon \sigma \left(\langle N \rangle \{a\}^e \right)^3 \langle N \rangle dL \right]$$

ET

$$\{F\}_r^e = \int_{L^e} \{N\} \varepsilon \sigma T_R^4 dL$$

$$\{F\}_{q_s}^e = \int_{L^e} \{N\} q_s dL$$

$$\{F\}_Q^e = \int_{A^e} \{N\} Q dx dy$$

$$\{F\}_C^e = \int_{L^e} \{N\} q_c dL$$

IV.2.1 Forme matricielle généralisée

$$W = \sum w^e = \sum ([K]^e + \{F^e\}) = 0$$

D'où

$$W = ([K] \{a\} - \{F\}) = 0$$

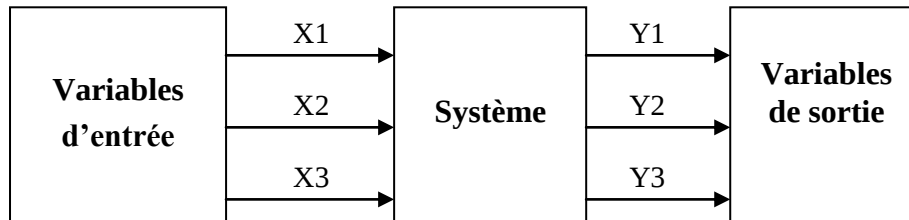
Avec :

[K] : matrice globale obtenue par assemblage des matrices élémentaires

{F} : matrice colonne globale des sollicitations obtenue par assemblage des matrices colonne élémentaires

IV.3 RESOLUTION DU PROBLEME

Un système physique, chimique, biologique, économique peut se concevoir comme étant une relation entre des causes (ou variables d'entrées) et des conséquences (ou variables de sortie), ce que l'on peut schématiser comme suit :



Scientifiquement, étudier un tel système, revient généralement à prévoir son comportement, c'est à dire quel sera l'état ou l'évolution des grandeurs de sortie en réponse à une valeur ou une variation des grandeurs d'entrée.

Pour ce faire, il est intéressant de synthétiser un modèle dont le comportement soit analogue à celui du système étudié, c'est à dire reproduisant les mêmes relations entre ses grandeurs d'entrée et ses grandeurs de sortie. Le modèle simule le comportement du système. On utilise couramment trois types de modèles :

IV.3.1 1- Modèle mathématique

Le système est représenté par un ensemble de relations mathématiques :

$$(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) \xrightarrow{F} (Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_n)$$

IV.3.2 2 - Modèle analogique

Le système est représenté par l'assemblage d'éléments physiques (par exemple un circuit électrique se compose d'amplificateurs opérationnels, résistances, condensateurs, etc). Les grandeurs physiques (les tensions dans notre exemple) représentent les variables du système.

IV.3.3 3 - Modèle numérique

Le modèle est représenté par un ensemble de relations entre des grandeurs arithmétiques représentant les variables du système.

IV.3.3.1 Méthode de NEWTON-RAPHSON

a - Principe

Le procédé le plus utilisé est celui de NEWTON-RAPHSON.

Si $F(x)$ est continue dans le voisinage de X^* , alors le développement en série de TAYLOR autour d'un estimé X^n s'écrit :

$$F(x) = F(x^n) + F'(x^n)(x^* - x^n) + \frac{(x^* - x^n)^2}{2} F''(x^n) + \dots$$

Si $x^{(n)}$ est un estimé proche de la solution X^* de $F(x) = 0$, alors le carré de l'erreur $\zeta^{(n)}$ où $\zeta^{(n)} = x^* - x^{(n)}$ et les termes de degré supérieur sont négligeables.

Sachant que $F(x^*) = 0$, on obtient la relation approximative :

$$F(x^{(n)}) + F'(x^*) (x^* - x^{(n)}) = 0$$

L'approximation de l'erreur est donc :

$$\zeta^{(n)} = - \frac{F(x^{(n)})}{F'(x^{(n)})}$$

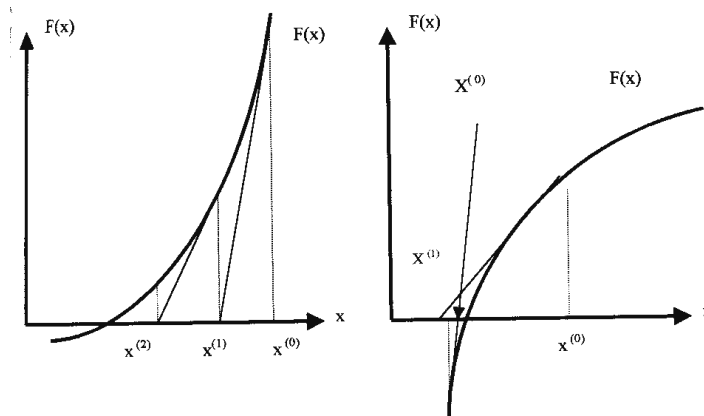
Avec un meilleur estimé de x^* :

$$x^{(n+1)} = x^{(n)} + \zeta^{(n)}$$

De l'équation (1) et (2), on obtient l'algorithme de **NEWTON-RAPHSON** :

$$x^{(n+1)} = x^{(n)} - \frac{F(x^{(n)})}{F'(x^{(n)})} \quad n = (0, 1, 2, 3, \dots, n)$$

IV.3.3.2 Représentation graphique de la méthode



Elle consiste à tracer la tangente à la courbe en chaque points $(x^{(n)}, F(x^{(n)}))$, l'intersection de cette tangente avec l'axe des x fournit le point $x^{(n+1)}$.

(ζ étant une approximation de l'erreur sur X^* à l'itération n).

Les conditions de convergence des méthodes numériques dépendent fortement de l'allure (continuité, monotonie,...) de $F(x)$ dans le voisinage de la solution et de la qualité de l'estimation initiale $x^{(0)}$ de la racine X^* .

La méthode de NEWTON-RAPHSON de convergence quadratique est certainement la plus employée de toutes, comme celle de la Sécante. Les conditions suffisantes de convergence sont celles de FOURIER :

$$F''(x^*) \neq 0$$

$$F(x^{(0)}) \cdot F''(x^{(0)}) > 0$$

IV.4 ETAPES DE LA MODELISATION ABSENCE DE LA TORCHE

La méthode des éléments finis nous permet de déterminer une distribution de la température dans l'épaisseur de la chemise.

L'étude menée permet de comprendre le processus de modélisation du comportement thermique de la structure sous l'effet de la chaleur très élevée dégagée par la torche au cours de la projection.

Les étapes de la modélisation peuvent être classées chronologiquement de la façon suivante :

- définir la forme du modèle au moyen des nœuds qui nous permettent de réaliser une discrétisation par éléments. Il faut préciser la nature de ces éléments, et intégrer au même temps, les compléments géométriques nécessaires et les caractéristiques du matériau (isotrope ou non) ;
- fixer les conditions aux limites ;
- définir le chargement extérieur.

Toutes ces opérations sont aujourd'hui facilement exécutées sur les logiciels industriels par des pré processeurs graphiques.

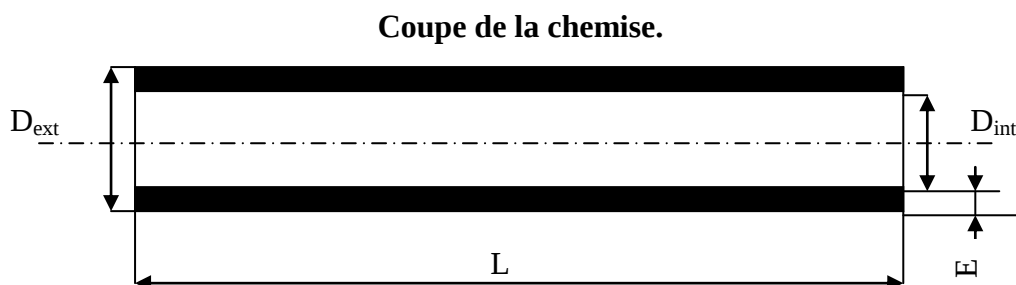
La modélisation est basée sur les équations générales tridimensionnelles de la conduction, en tenant compte des hypothèses suivantes :

- on néglige l'échange thermique avec l'atmosphère ;
- on suppose que la température extérieure est celle du milieu ambiant ($T = 25^{\circ}\text{C}$).

IV.4.1 Description du modèle géométrique

Dans n'importe quel programme d'éléments finis, les données peuvent être divisées en trois catégories :

- 1 - les données nécessaires pour définir la géométrie de la structure dans l'espace.



$$L = 140 \text{ mm} ; D_{\text{ext}} = 45 \text{ mm} ; D_{\text{int}} = 37 \text{ mm} ; E = 4 \text{ mm}$$

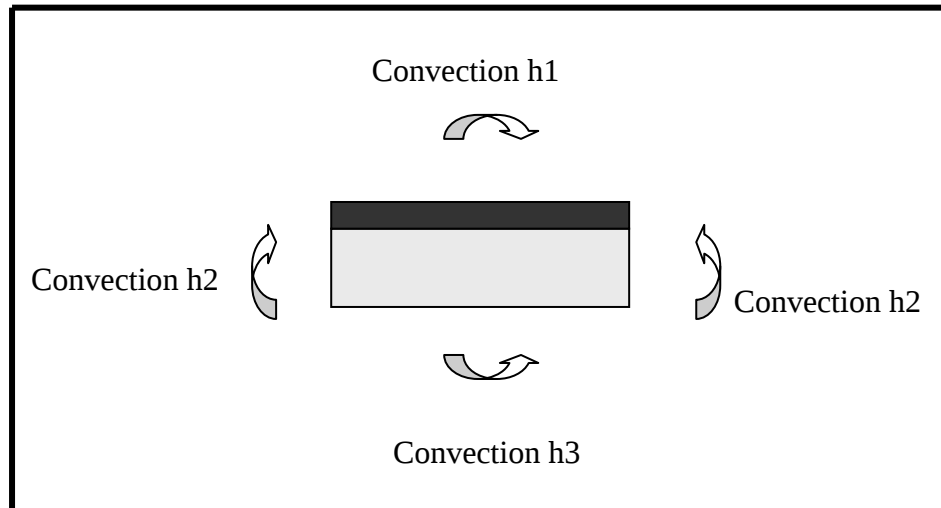
- 2- Les données concernant les propriétés du matériau (conductivité thermique, densité, chaleur spécifique, etc), et le système d'unités doivent être choisis à l'avance.

- **Conductivité thermique (K) :** $K_{xx}, K_{yy} \dots\dots\dots 27 \text{ W/m. K.}$
- **La masse volumique (ρ) :** $\rho \dots\dots\dots 7900 \text{ kg/m}^3.$
- **La chaleur spécifique (C_p) :** $C_p \dots\dots\dots 0.085 \text{ W/kg.K.s.}$
- **La densité du matériau (d) :** $d \dots\dots\dots 7.9$

3 - La dernière catégorie, celle qui concerne les sollicitations aux quelles la structure est soumise et les conditions aux limites.

IV.4.2 Conditions aux limites

Le schéma suivant montre les différentes conditions aux limites à prendre en considérations sur le modèle géométrique.



IV.4.2.1 Définition des paramètres de convection

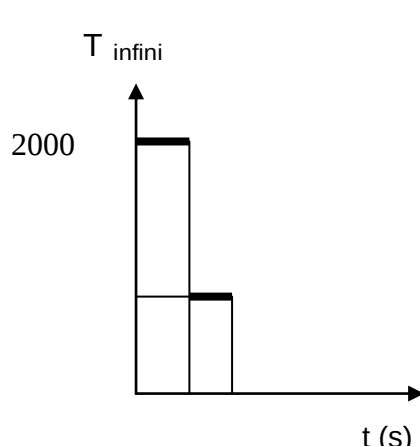
Température loin de la paroi :

Sur la face latérale et la face inférieure, la température infinie, correspond à la température ambiante, prise à 300 K.

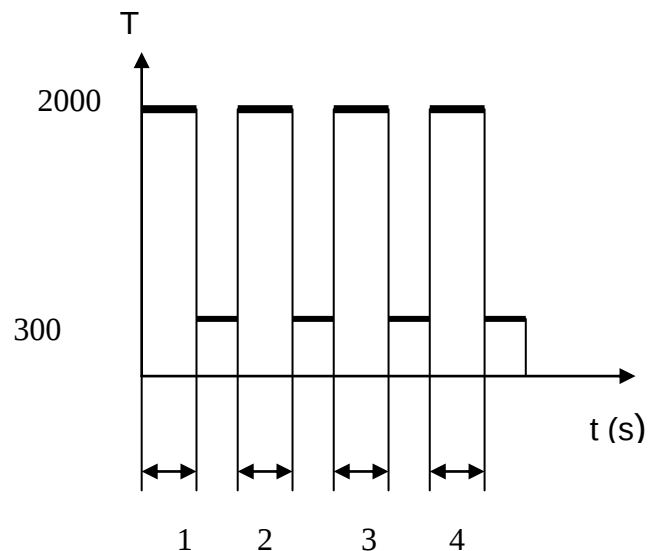
Par contre sur la face supérieure, deux cas se présentent :

1. Absence de la torche.
2. Présence de la torche.

Cette dernière balaye la surface avec une vitesse uniforme de l'ordre de 20 m/mn.



a) une couche



b) l'ensemble des couches

La procédure de modélisation comporte un transfert de chaleur seulement par conduction et convection naturelle.

IV.4.3 Calcul des paramètres de la convection

Coefficient d'échange h :

Le coefficient d'échange h dépend de plusieurs paramètres :

- . caractéristiques géométriques de la paroi ;
- . caractéristiques des fluides (p , μ , C_p : en fonction de la température) ;
- . écoulement du fluide (vitesse, régime laminaire ou turbulent) ;
- . température extérieure.

A titre indicatif, h varie entre :

- 2 et 200 W/m².K pour les gaz,
- 100 et 2000 W/ m².K pour les liquides.

Le coefficient d'échange est donné par l'expression suivante :

$$h = Nu \frac{\lambda}{x}$$

avec:

h : coefficient de d'échange.

λ : conductivité thermique.

X : dimension caractéristique.

Les valeurs de h sur chacune des faces sont exprimées et évaluées par les corrélations suivantes. Les résultats sont regroupés dans un tableau.

1^{er} cas : face verticale du modèle géométrique

$$Nu = 0,539 Gr^{0,25}$$

$$Gr = g\beta(T_p - T_{inf}) x^3 / \nu^2$$

avec: g : accélération de pesanteur ;
 β : dilatation volumique à pression constante ;
 ν : viscosité cinématique.

2^{eme} cas : face horizontale supérieure : deux cas se présentes

a) Présence de la torche

$$Nu = 0,54 Ra^{0,25} \quad 10^5 < Ra < 10^7$$

$$Nu = 0,15 Ra^{0,25} \quad 10^7 < ra < 10^{10}$$

b) Absence de la torche

$$Nu = 0,27 Ra^{0,25}$$

avec :

$$Ra = g \beta (T_p - T_{inf}) x^3 / \alpha \nu$$

3^{ème} cas : face inférieure

$$\begin{aligned} \text{Nu} &= 0,54 \text{ Ra}^{0,25} & 10^5 < \text{Ra} < 10^7 \\ \text{Nu} &= 0,27 \text{ Ra}^{0,25} & 10^7 < \text{Ra} < 10^{10} \end{aligned}$$

Le tableau suivant donne les valeurs de coefficients h durant et après le processus de déposition du dépôt des couches.

h	h₁	h₂	h₃	h₄
Couche 1	10,42	20,56	17,14	20,56
Couche 2	15,3	17,06	20,44	17,06
Couche 3	13,8	16,6	14,1	16,6
Couche 4	16,8	18,1	17,4	18,1
Couche 5	14,9	17,4	14,6	17,4

Tableau IV-1 : récapitulatif des coefficients h

IV.4.4 Choix de l'éléments de maillage

Le type d'élément à utiliser dépend de :

- . nombre de dimensions du problème ;
- . l'ordre de dérivation exigé par la forme intégrale des équations gouvernantes ;
- . sa forme (représentation des côtés courbés) ;
- . degré de précision désiré (degré des polynômes d'interpolation).

Le découpage du domaine se fait en fonction du degré de précision désiré dans les zones où les variations des paramètres physiques peuvent être plus grands.

L'élément type choisi dans notre cas, est un élément iso paramétrique à deux dimensions, à quatre nœuds, il est appliqué pour les deux analyses : stationnaire et non stationnaire.

```

** ELEMENT NAME .....PLANE55 .....ISOPRAMETRIQUE
** NUMBERS OF NODES .....4..... I, J, K, L
** DEGREE OF FREEDOM .....1..... TEMPERATURE
** REAL CONSTANTS .....O.
** MATERIELS PROPERTIES..... 4..... Kxx, Kyy, Dens, C

```

IV.5 CHOIX DE L'INCREMENT DE TEMPS

Quelque soit la méthode numérique, la précision de cette dernière dépend du choix du pas Δt . Pour la sélection de cet intervalle de temps, il faut tenir compte des trois facteurs suivants :

- 1- la variation de l'excitation $F(t)$ appliquée ;
- 2- la complexité de l'amortissement non linéaire ;
- 3- les propriétés de rigidité.

L'incrément de temps devra être suffisamment court pour permettre la représentation sûre de tous ces facteurs.

De toute façon, l'incrément de temps " Δt " doit obligatoirement être considéré petit pour donner une solution raisonnable pour laquelle l'instabilité n'est pas un problème pratique.

En générale, un incrément de temps $\Delta t / t \leq 1/10$ est un bon choix empirique pour obtenir des résultats optimales avec une performance souhaitable.

IV.6 LA DEMARCHE DE MODELISATION

La démarche de déposition de dépôt s'effectue à froid et en deux étapes :

1^{er} étape : en absence de poudre. et de flamme :



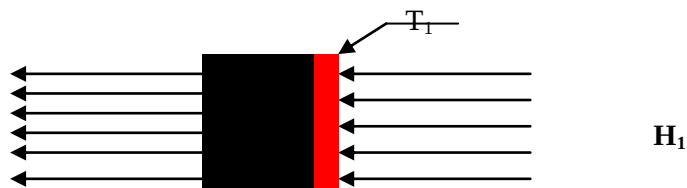
Avec : T_{amb} : température ambiante.

2^{ème} étape : en présence de poudre. et de flamme :

Elle comprend les étapes suivantes :

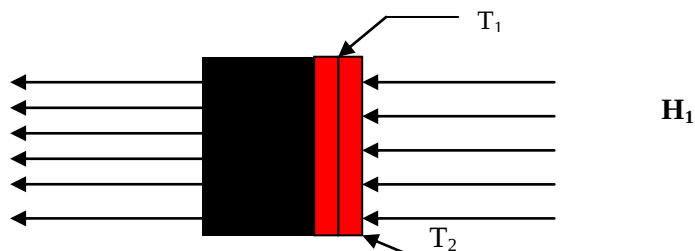
Étape (1) :

T



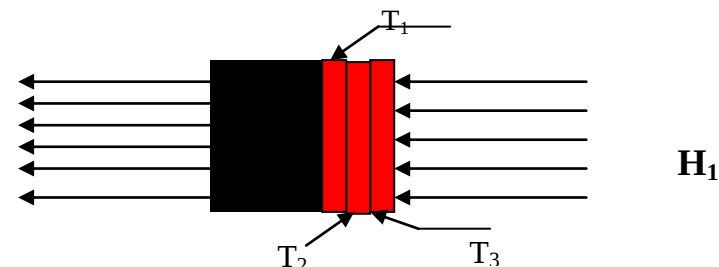
Étape (2) :

T'



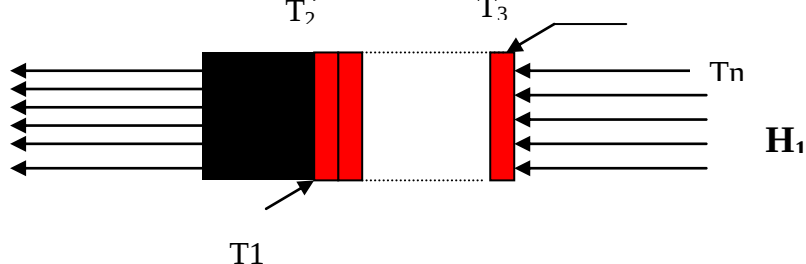
Étape (3) :

T''



Étape (n) :

T''''''



IV.7 RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Les résultats obtenus nous donnent l'évolution de la température d'un nœud en considérant la projection sans refroidissement, ainsi que les profils des températures en fonction du temps.

Des données expérimentales ont été utilisées d'après les travaux de J. PINA, A. M. DIAS [12]. Ceci nous a permis de comparer les résultats du modèle thermique avec les mesures expérimentales. La validation n'a pu être effectuée que sur le dépôt d'alumine.

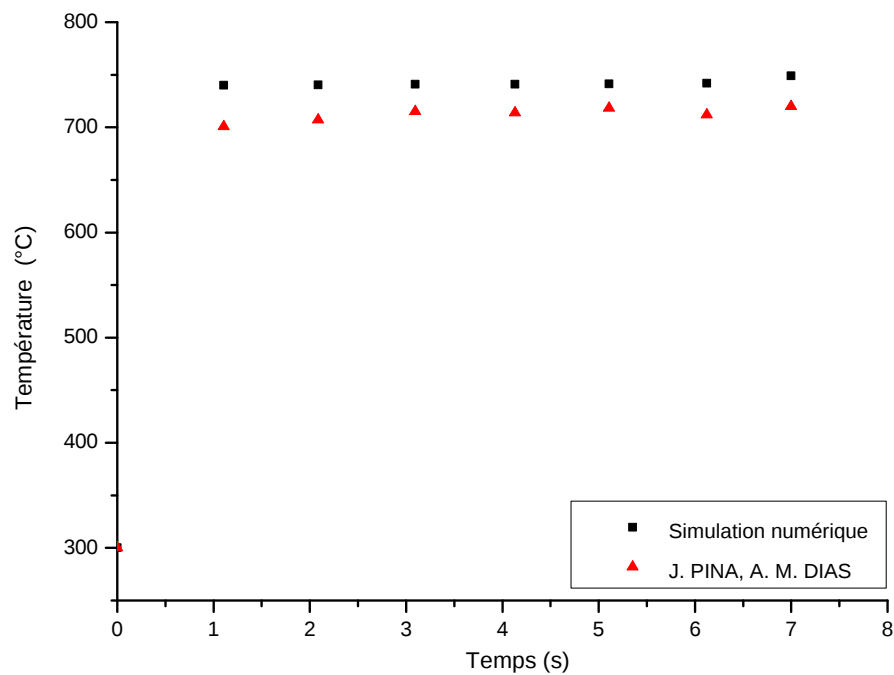


Figure IV -1 : Evolution de la température d'un nœud dans le substrat
Métal d'apport alumine

CONCLUSION GENERALE

Ce travail a contribué à la compréhension du comportement des dépôts projetés par plasma sur un substrat métallique, en vue de leur utilisation comme pièces devant favoriser l'augmentation de la durée de vie, et cela dans le cadre d'une étude sur l'usure de la chemise d'une pompe immergée de la centrale de Cap Djenet.

L'étude menée est avant tout bibliographique, et bien que quelques expériences et une modélisation thermique aient donné des résultats. Une étude expérimentale approfondie reste à faire.

Ils est néanmoins possible d'énoncer déjà quelques résultats et tirer quelques conclusions au sujet des revêtements d'alumine et de carbure de tungstène sur un substrat métallique.

Dans l'étude expérimentale, les tests de dureté et d'adhérence ont été réalisés sur plusieurs échantillons avec des dépôts d'alumine et de carbure de tungstène. Les profils obtenus nous ont permis d'en tirer les remarques suivantes :

- la dureté augmente à l'approche de l'interface ;
- dans l'épaisseur du dépôt, la dureté passe par un maximum pour chuter aux bords de la surface libre et de l'interface ;
- la présence d'une sous-couche d'accrochage donne une meilleure dureté dans les dépôts ;
- la qualité de la colle et le soin apporté à l'opération de collage sont des facteurs importants dans la mise en œuvre des essais de traction ;
- les contraintes de rupture lors de l'essai de traction sont très importantes si la surface soumise à la traction correspond à toute la section de l'éprouvette dues vraisemblablement aux effets de bords.

Tous les résultats montrent l'importance de la sous-couche dans l'amélioration de l'adhérence.

Nous remarquons que le carbure de tungstène donne de meilleurs résultats que l'alumine.

Du point de vue modélisation, nous avons développé un modèle permettant de prévoir la distribution de température pendant la projection plasma. Les premiers éléments de la modélisation par éléments finis ont été mis en place.

La température obtenue dans le substrat est de l'ordre de 700°C pour des dépôts sans refroidissement. Les valeurs et les profils de température sont confrontés à des résultats expérimentaux réalisés par J. PINA et A. M. DIAS. Les résultats obtenus sont encourageants. Le profil de température est répétitif d'une passe de torche à une autre.

Des études peuvent être envisageables afin d'améliorer les qualités des revêtements par projection plasma :

- étude de l'influence de la porosité sur la dureté du revêtement ;
- étude des contraintes résiduelles dans les dépôts ;
- étude de l'amélioration du modèle thermique en introduisant notamment la chaleur latente de solidification ;
- étude des profils de température dans le cas d'une projection avec refroidissement.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] APPS. R. L.
"The influence of surface preparation on the bond strength of flame sprayed aluminum coating on mild steel" J. Vac. Technol, 11, pp 725 -734, 1974
- [2] BELTZUNG. F., LOPEZ. E., ZAMBELLI. G.
"Measurement of cohesion and adhesion strengths in alumina coatings produced by plasma spraying", J. Mater. Sci. Lett, 8, pp 346-348, 1989
- [3] BENSIMON. R. , REBY. J.
"Protection par dépôt au pistolet", Manuel des traitements de surface, CETIM, 1989
- [4] BOULOS. M.
"R, F plasma spraying", J. Thermal Spray Technol, 1981
- [5] BRUN. J.
"Contribution à l'analyse de deux méthodes de caractérisation de l'adhérence appliquées aux revêtements de chrome allié à du carbone", Thèse d'Ingénieur du Conservatoire National des Arts Et Métiers, CNAM, Février 1992
- [6] CAPLIN. R, DAVID. D.
"Méthode usuelle de caractérisation des surfaces", SFM Eyrolles, 1988
- [7] CARREROT. H.
"Etude du comportement mécanique de dépôt céramique projeté par plasma pour application orthopédiques", Thèse de l'Ecole des mines de Saint Etienne, 1991
- [8] CLYNE T.W.
"The quenching stress in thermally sprayed coatings", Thin Solid Films , Août 1990
- [9] CLYNE T.W , GILL
"Stress distribution and materiel response in thermal spraying of metallic and ceramic disposit", Metallurgical Transactions, vol 21 B, pp 377, Avril 1990
- [10] CODDET.C , MONTAVON G.
"Développement et industrialisation du procédé et laser PROLAL, permettant la réalisation de la préparation de surface simultanément à une opération de projection thermique", Université de technologie de Belfort-Montbéliard , 1999
- [11] COURLAOUEN. N., VERNA. E., STTONNET. J.
"Thermal spray", Proceedings of 15th Internatinal. Thermal Spray Conference, pp 861-866, Mai 1989
- [12] J. PINA, DIAS A. M.
"Genèse des contraintes résiduelles dans le procédé plasma, Expérimentation et modélisation", Colloque Contraintes Résiduelles", Portugal-France, 1982
- [13] DUCOS. M.
"Revêtements par projection thermique", Technique de l'Ingénieur, M 1645 -1989
- [14] DUCOS. M.
"La projection à chaud", Revue Galvano-Organo "traitement de surface"., n° 545, Avril 1984
- [15] FAUCHAIS. P.
"La projection thermique des céramiques", Les revêtements céramiques, CETIM , Senlis, 1989
- [16] FAUCHAIS. P., GRIMAUD. A., VARDELLE. A., VARDELLE. M.
"La projection plasma", Revue Ann. Phy Fr., 14, pp 261-230, 1989
- [17] FAUCHAIS. P., VARDELLE. A., VARDELLE. M.
"Les paramètres contrôlant la qualité des dépôts plasma de céramiques et des cermets obtenus par projection plasma à la pression atmosphérique", Les couches minces, n° 232, 1986
- [18] FAUCHAIS. P., DESMAISON. J., MACHET. J.
"Les dépôts céramiques", L'industrie céramique, pp 48, Janvier 1987

- [19] GIBLIN. R.
"Transmission de la chaleur par convection naturelle" Editions Eyrolles, Paris V^e, 1974
- [20] GILL, CLYNE T.W
"Molding of generation of residual stress during thermal spraying of ceramic coating", 17th cintec world ceramic congres 1990
- [21] HEINTZE , McPHERSON
"Fracture toughness of plasma sprayed zirconia coating, Surface and coating technology, n°36, 1988
- [22] JEANDIN. M., LUCCHESI. P.
"La projection thermique", Janvier 2001
- [23] LEBRUN. J. L., ZAOUALI. M., HOUHOU. M.
"Mesure de l'adhérence de revêtements projetés par plasma et canon de détonation", Rapport STCAN, ENSAM, Paris 1990
- [24] MATHEWS. A.
"Method for assesing coating adhesion", Le vide, Les couches minces, Octobre 1988
- [25] McPHERSON
"Review of microstructure and proprieties of plasma sprayed ceramic coating", Surface and coating technology, n°39, 1989
- [26] McPHERSON, SHAFER
"Interlamellar contact with in Pscotings", Thin Solid Films, 1982
- [27] MORTIER. M., BENSIMON. R.
"Guide de la projection à chaud en mécanique", CETIM, 1976
- [28] NESMANN. Ph.
"Caractérisation des revêtements d'alumine obtenus par plasma" Thèse d'Ingénieur, ENSAM Paris, 1990
- [29] PERENNOU. M.
"Adhérence, fissuration et propriétés mécaniques de revêtement zircone", Thèse ENSAM Paris, 1991
- [30] RAYMOND, HANOTE. I.
"Caractérisation des dépôts céramiques", Thèse d'Ingénieur ENSAM Paris, 1988
- [31] ROUX. A.
"Contribution à l'étude des transferts d'énergie plasma /particule dans le cas du plasma induction et du plasma soufflé", Thèse Université de Compiègne/SENVENANS, 1991
- [32] RUHL. R. C.
"Cooling rates in splat cooling", Mat. Sc. Eng.1, pp 313-320, 1967
- [33] SINGHAM. H., SHEPARD. A. P.
"Manuel de la projection à la flamme", Metco Inc. Westbury, LongIsland, New York
- [34] SULZER-PLASMA-TECKNIK
"Revêtement par projection plasma supersonic", Document SNECMA, Revue Technologie et Formation, n°74, Janvier 1998
- [35] TUCKER. R. C.
"Structure propriety relation ships in deposits produced by plasma spray and detonation gun techniques", J. Vac. Technol, n°11, pp 741-746, 1974
- [36] VARDELLE. A., FAUCHAIS. P., VARDELLE. M.
"Projection de revêtements protecteurs par plasma", L'actualité chimique, Décembre 1981
- [37] VARDELLE. A., VARDELLE. M., BESSON. J. L., FAUCHAIS. P.
"Corrélations entre les propriétés des dépôts et les conditions de fonctionnement d'une installation de projection plasma : Exemple, l'alumine γ ", Revue Phys. Apll, n°16, 1981

[38] VARDELLE. A., VARDELLE. M., FAUCHAIS. P.

"Influence of velocity and surface temperature of alumina particles on the proprieties of plasma sprayed coating", Plasma Chemistry an Plasma Processing , pp 255-291, 1982

[39] VARDELLE. M.

"Etude de la structure des dépôts d'alumine obtenue par projection plasma en fonction des températures et des vitesses des particules au moment de leur impact sur la cible", Thèse de doctorat de troisième cycle, Université de Limoges, Mai 1980

[40] ZAOUALI. M.

"Caractérisation par diffraction X de l'état mécanique et micro structural des couches minces métallique et céramique obtenues par PVD et plasma", Thèse de Doctorat, ENSAM, Mai 1990

[41] ZAMBELLI. G. et CARREROT. H.

"Etude du comportement mécanique de dépôts céramiques projetés par plasma pour les applications orthopédiques", Thèse de Doctorat, Ecole des mines de Saint Etienne, Septembre 1991

[42] ZAMBELLI . G., LOPEZ. E., BELTZUNG. F.

"Measuement of cohesion and adhesion strengths in alumina coatings produced by plasma spraying" Journal. Mater. Sci. Lett, n°8, pp 346-348, 1981

[43] ZIENKIEWICH. O. C. "The Finite Element Method in Engineering Science"

Mc Graw-Hill, New York, 1 st edition, 1967, 3rd edition, 1977.

[44] **Z. EMONET**

"développement des techniques de revêtements plasma" , revue Surface n°138 p 41- 45,1990