

3/95

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTRE DES UNIVERSITES
ET DE LA RECHERCHE

THESE



L'ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Pour obtenir

le titre d' **INGENIEUR D'ETAT**

Spécialité: **METALLURGIE**

par

HALLAL Amine

**ETUDE DU COMPORTEMENT D'UN
MULTIMATERIAU REALISE PAR PROJECTION
THERMIQUE D'UN ACIER SUR UN ALLIAGE
D'ALUMINIUM**

Soutenu le 03 juillet 1995 devant la commission d'Examen

JURY

Mr: N. MESRATI	Président de jury
Mr: M. LARIBI	Rapporteur
Mme: N. KECHOUD	Examinatrice
Mr: E. SALHI	Examineur
Mr: A. BOUKLI	Invité

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTRE DES UNIVERSITES
ET DE LA RECHERCHE

THESE



L'ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Pour obtenir

le titre d' INGENIEUR D'ETAT

Spécialité: METALLURGIE

par

HALLAL Amine

**ETUDE DU COMPORTEMENT D'UN
MULTIMATERIAU REALISE PAR PROJECTION
THERMIQUE D'UN ACIER SUR UN ALLIAGE
D'ALUMINIUM**

Soutenu le 03 juillet 1995 devant la commission d'Examen

JURY

Mr:N . MESRATI	Président de jury
Mr:M. LARIBI	Rapporteur
Mme:N.KECHOUD	Examinatrice
Mr:E. SALHI	Examineur
Mr: A· BOUKLI	Invité

LE RECEUIL DE LA VIE EST LE LIVRE SUPRÊME

QU'ON NE PEUT NI FERMER NI OUVRIER À SON CHOIX

LE PASSAGE QU'ON AIME NE S'Y LIT PAS DEUX

FOIS

ET LE FEUILLET FATAL SE TOURNE DE LUI-MÊME

ON VOUDRAIT REVENIR À LA PAGE OÙ L'ON AIME

ET LA PAGE OÙ L'ON MEURT EST DÉJÀ SOUS NOS

DOIGTS

LE NOMBRE DE PAGES IMPORTE PEU

ET L'ON NE PEUT Y'ÉCRIRE CE QUE L'ON VEUT

"

DE GOLA GOL

"

ME NOUAR

(le livre suprême).

A ma Mère

A mon Père

A mes Sœurs et mon Frère

A la mémoire du docteur schoop

A tous ceux et celle qui me sont très chers.

Remerciements

Cette étude a été réalisée au Département de Métallurgie de l'Ecole Nationale polytechnique.

J'exprime à Monsieur **M. LARIBI** toute ma reconnaissance pour le sujet qu'il m'a proposé et dont il a eu la responsabilité scientifique. Ses précieux conseils et l'intérêt qu'il a témoigné à ce travail, ont permis son élaboration. Qu'il soit vivement remercié pour sa gentillesse et sa disponibilité et soit assuré de toute ma sympathie.

J'adresse mes respectueux remerciements à Mr. **HAFIANE**, Mr **MELLAH**, Mr **ZEROUK**, Mr **MAGNOUCHE** et Mr **SEDKI** qui ont bien voulu me faciliter l'accès aux différents centres de recherches.

J'exprime ma plus profonde reconnaissance à Mr **O. AZOUANI** manipulateur du MEB au CDM pour sa patience et ses conseils.

Madame N. **KECHOUD** et Mr E. **SALHI**, Enseignants à l'école Nationale polytechnique, m'ont fait l'honneur de juger ce mémoire. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma très profonde gratitude.

Je suis extrêmement sensible à l'honneur que me fait Mr N. **MESRATI**, Chef de département de métallurgie, en acceptant la présidence de jury de ce mémoire.

Enfin, je ne peux manquer de remercier sincèrement et chaleureusement le technicien dynamique **Abd-anour** qui, par sa collaboration, m'a permis de mener à bien ce travail, ainsi que toutes les personnes qui ont contribué de loin ou de près à la réalisation de ce travail.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....	1
----------------------------	---

PARTIE THEORIQUE

CHAPITRE I: L'ALUMINIUM ET SES ALLIAGES	4
I.1- <u>Historique:</u>	4
I.2- <u>Propriétés de l'Aluminium</u>	4
I.3- <u>Alliages d'Aluminium</u>	6
I.4- <u>Traitements thermiques des alliages d'Aluminium</u>	9
CHAPITRE II : PROJECTION THERMIQUE.....	11
II.1- <u>Invention et développement du procédé</u>	11
II.2- <u>Principe de la projection thermique</u>	12
II.3- <u>Place de la projection parmi les traitements de surface</u>	13
II.4- <u>Choix d'une solution de métallisation et caractéristiques des matériaux projetés</u>	14
II.5- <u>Equipements de la projection thermique:</u>	18
II.5.1- Projection thermique à la flamme	21
II.5.2- Projection thermique à l'arc électrique	21
II.5.3- Nouveauté:.....	22
II.6- <u>Mise en œuvre de la projection thermique:</u>	22

II.6.5- Finition.....	29
II.7- <u>Contrôle des dépôts obtenus par projection thermique:</u>	29
II.7.1- Mesure de l'épaisseur:.....	30
II.7.2- Mesure de l'adhérence.....	30
II.7.3- Mesure de la porosité.....	30
II.7.4- Mesure de la dureté:.....	31
II.7.5- Mesure de la densité:.....	31
II.8- <u>Emploi des matériaux projetés thermiquement</u>	32
II.8.1- Réalisation de revêtements sur des supports divers:.....	32
II.8.2- Façonnage d'objets céramiques-métalliques ou de matériaux composites:.....	32

PARTIE EXPERIMENTALE

CHAPITRE III: ELABORATION DES MULTIMATERIAUX ET METHODES DE CARACTERISATION MISES EN ŒUVRE.....	34
--	----

Elaboration des multimatériaux

III.1- <u>Critères de choix des matériaux</u>	36
III.1.1- Substrat	36
III.1.2- Sous couche d'accrochage:.....	37
III.1.3- Dépôt.....	38
III.2- <u>Equipements utilisés:</u>	39
III.2.1- Equipement de slurry coating:.....	39
III.2.2- Equipements et paramètres de projection:.....	40
III.3- <u>préparation des échantillons</u>	41
III.3.1- Dimension des échantillons.....	41
III.3.2- Décapage chimique:.....	42
III.3.3- Décapage au Zincate:.....	42

III.4- <u>Elaboration et dépôt de la sous couche Cu-Ni-Sn</u>	43
III.4.1- Cycle thermique:.....	43
III.5- <u>Rugosification</u> :	43
III.6- <u>Post-traitement</u> :	44
<div style="border: 1px solid black; padding: 10px; width: fit-content; margin: 20px auto;"> <p>Méthodes et techniques de caractérisation mises en œuvre</p> </div>	
III.7- <u>Analyse métallographique</u> :.....	45
III.8- <u>Microanalyse par sonde EDAX</u> :.....	46
III.9- <u>Essai de dureté</u>	47
III.10- <u>Essai de microdureté</u> :.....	48
III.11- <u>Test d'arrachement</u> :.....	49
CHAPITRE IV: RESULTATS ET DISCUSSION.....	50
IV.1- <u>Etude Métallographique</u>	52
IV.2- <u>Analyse ponctuelle EDAX</u>	60
IV.3- <u>Essai de dureté</u>	75
IV.4- <u>Essai de microdureté</u>	79
IV.4- <u>Test d'arrachement</u> :.....	83
<u>Interprétation générale</u>	85
<u>Conclusion générale</u>	87
<u>Bibliographie</u>	88

INTRODUCTION GENERALE

Deuxième métal de l'écorce terrestre après le Silicium, l'Aluminium est le principal métal non ferreux industriel. De part sa facilité de mise en œuvre (moulage en sable, en coquille, sous pression, laminage, forgeage, filage, étirage, etc.), sa résistance à la corrosion et sa bonne conductivité électrique, l'Aluminium et ses alliages ont acquis une place importante dans bon nombre de domaines tels que l'électricité, les industries du bâtiment, de la chimie, des industries mécaniques et aéronautiques ainsi que le matériel électroménager. Cependant, les alliages d'Aluminium connaissent des limites particulièrement dans la réalisation de pièces frottantes et celles travaillant à chaud.

Par ailleurs, la mise au point de traitements de surfaces, que l'on applique à une pièce métallique, soit pour en modifier les propriétés superficielles, soit pour la recouvrir d'une couche protectrice a permis d'élargir le domaine d'utilisation des pièces mécaniques. Ces techniques de traitement de surface peuvent être divisés en deux groupes: sans apport de matière et avec apport de matière [1]

Parmi les techniques de traitement de surface sans apport de matière, on cite:

- les procédés mécaniques tels que: grenailage, sablage, martelage
- les procédés thermiques tels que: la trempe superficielle

Les techniques avec apport de matière permettent de réaliser divers revêtements. Les procédés les plus utilisés sont:

- les dépôts chimiques en phase vapeur (CVD)
- les dépôts réalisés à partir de solutions,
- les dépôts physiques en phase vapeur (PVD),
- le rechargement par soudage,
- la projection thermique.

La projection thermique consiste à déposer des couches allant de quelques microns à plusieurs millimètres. La diversité des matériaux de revêtement (métaux, céramiques) permet d'utiliser cette technique pour lutter contre toute forme de dégradation (corrosion, usure, fatigue, chaleur, etc.) [2] .

Les matériaux interagissent avec leur environnement au niveau de leur surface externe et sont chimiquement corrodés ou mécaniquement abrasés. La mise en place de couches protectrices, chimiquement inertes ou mécaniquement résistantes peut donc, en consommant de faibles quantités d'une matière éventuellement chère, modifier profondément ces interactions avec l'extérieur et allonger considérablement la durée de vie de matériaux plus ordinaires et, donc , moins coûteux.

Etant donné les limites d'utilisation des alliages d'Aluminium et les avantages accrus de la projection thermique, il serait intéressant de voir les possibilités que cette dernière peut offrir afin de pouvoir réunir les propriétés spécifiques de l'Aluminium au cœur et celles du dépôt projeté en surface en vue d'étendre les domaines d'utilisation. Cependant un fait fondamental demeure; l'adhérence et le comportement de l'assemblage réalisé.

Dans le cadre du présent travail, nous nous proposons d'étudier l'adhérence et le comportement d'un multimatériau réalisé par projection thermique d'un acier à haute résistance sur un alliage d'Aluminium. Nous déposerons préalablement des sous-couches d'accrochage de différentes natures afin de renforcer l'adhérence et nous verrons également l'influence d'un post-traitement thermique sous vide.

Pour ce faire, notre étude est constituée de 2 parties principales:

La première consiste en une étude bibliographique, pour laquelle seront réservées 2 chapitres différents:

Dans un premier chapitre, on passera en revue les alliages d'Aluminium, leurs avantages et leurs limites .

Un second chapitre sera réservé aux techniques de traitement de surface et en particulier la projection thermique avec ses possibilités, ses applications ainsi que les équipements qu'elle utilise.

La deuxième partie sera consacrée à l'étude expérimentale où l'on développe dans un premier temps les différentes étapes de préparation des échantillons et de réalisation d'un multimatériau avec l'application d'un post-traitement pour certains.

La caractérisation physico-chimique et l'étude du comportement mécanique des échantillons réalisés sont faites principalement par:

- Une analyse chimique des différents matériaux utilisés;
- Une étude métallographique traitant principalement l'interface.
- Une étude en microscopie électronique à balayage, à la microsonde EDAX mettant en évidence le phénomène de diffusion et des phases produites
- Des essais de dureté et de microdureté.
- Des tests d'arrachement montrant la tenue du dépôt.

Cette étude sera enfin clôturée par une conclusion générale, des recommandations et éventuellement des perspectives.

PARTIE THEORIQUE

CHAPITRE I

L'ALUMINIUM ET SES ALLIAGES

CHAPITRE I

L'ALUMINIUM ET SES ALLIAGES

I.1- Historique:

L'Aluminium est un des éléments les plus abondants, il se place au troisième rang après l'Oxygène et le Silicium [3] Pourtant, alors que des métaux beaucoup plus rares sont connus depuis la plus haute antiquité, ce n'est qu'en 1827 que l'Aluminium a été isolé pour la première fois à l'état pur par Wöhler (chimiste allemand). La première préparation industrielle fut réalisée en 1854 par le Français Sainte-claire Deville. Le procédé utilisé était très coûteux et il a fallu attendre 1890 pour que la fabrication industrielle de l'aluminium se fit à une grande échelle. En effet, bien que son minerai soit abondant et riche, le caractère très réducteur de l'Aluminium rend sa préparation très difficile. L'Aluminium apparaît sous forme de silicates, le seul minerai utilisé est la bauxite qui est une alumine hydratée impure. En 1886 Hérould en France et Hall aux Etats-Unis ont mis au point le procédé d'électrolyse, seul utilisé de nos jours et qui permet de surmonter cette difficulté [4] .

I.2- Propriétés de l'Aluminium:

I.2.1- Propriétés physico-chimiques:

L'Aluminium, est un élément du troisième groupe de la classification de Mendéléiev. Son nombre atomique est $Z = 13$, sa masse atomique est $M = 26,97\text{gr}$. Il cristallise dans une structure cubique à faces centrées (CFC) de paramètre $a = 0,4041 \text{ \AA}$ et fond à une température de l'ordre de $660 \text{ }^\circ\text{C}$. Sa densité étant de $2,7 \text{ g/cm}^3$, le classe parmi les métaux légers. Sa résistivité ρ à l'état pur et à une température de 20°C est égale à $2,63 \mu\Omega\text{m}$ et sa conductivité électrique est égale à 65 % de celle du cuivre. [4], [5]

La position de l'Aluminium dans la série des potentiels électrochimiques le rend très réactif ($E^{\circ}_{Al/Al^{3+}} = - 1.66V/_{ENH}$), ce qui pourrait faire craindre une grande corrodabilité. Cette grande réactivité implique une très forte affinité pour l' Oxygène, ce qui fait que l'Aluminium se recouvre d'une pellicule très dure et adhérente d'oxyde Al_2O_3 qui stoppe la réaction d'oxydation en profondeur et permet à l'Aluminium de s'autoprotéger en se passivant (inerte). Cette couche d'oxyde plus ou moins hydratée a une résistance chimique limitée car elle résiste bien dans les solutions d'acide chlorhydrique, sulfurique, et nitrique, par contre, les bases attaquent violemment le métal. Cette protection peut être améliorée par l'anodisation qui est un traitement permettant d'obtenir une couche épaisse d' Al_2O_3 mais poreuse, et qui est ensuite colmatée par un traitement à l'eau chaude [5] .

I.2.2- Propriétés mécaniques:

A cause de sa structure cubique à faces centrées, l'Aluminium pur est très bien déformable à froid et à chaud. Sa faible dureté et sa faible limite élastique sont défavorables pour son emploi en mécanique [6] .

Les propriétés mécaniques intrinsèques de l'Aluminium sont les suivantes [4]:

Module d'élasticité	6700 Kg/mm ²
Module de torsion	2700 Kg/mm ²
Coefficient de poisson	0.34
Compressibilité à 20 °C.....	1,4.10 ³ par mégabarye

Les propriétés mécaniques de l'Aluminium dépendent :

- des traitements mécaniques (forgeage, laminage.....)
- des traitements thermiques (trempe, recuit)
- des impuretés (Fe, Si, Cu, Mn, Zn...).

L'Aluminium industriel contient jusqu'à 0.5 % d'impuretés qui peuvent avoir différents effets :

Sur la conductibilité électrique : la présence d'additions ou d'impuretés diminue la conductivité de l'Aluminium.

Sur d'autres paramètres:

- La présence de Fe et Ni augmente la tenue mécanique à chaud
- Ti(de 0.05 à 0.1 %) et le Be(de 0.005 à 0.01 %) affinent le grain lors de la solidification

- Zr (< 0.2 %) inhibe le grossissement du grain
- Si (0.5 à 0.8 %) abaisse la tenue à la fissuration à chaud, mais augmente la tenue au fluage
- Cr, Mn sont favorables à la résistance à la corrosion.

De façon générale, l'Aluminium présente :

- Une bonne aptitude à la déformation plastique,
- Une résistance mécanique relativement faible,
- Une bonne aptitude au soudage, au brassage et à l'anodisation,
- De très bonnes propriétés cryogéniques,
- Un excellent comportement vis à vis des agents chimiques et des différentes atmosphères.

La nuance la plus courante est la nuance à 99.5 % d'Aluminium. Cette nuance reçoit les applications les plus variées. Elle est utilisée dans les industries du bâtiment et des travaux publics (plafonds, gaines de ventilation, revêtements de façades), les industries chimiques et alimentaires, dans la cryogénie, les industries mécaniques et des biens de consommation (matériel électroménager, emballage) [6].

I.3- Alliages d'Aluminium

L'Aluminium non allié a des propriétés mécaniques très réduites [7]. L'industrie de l'Aluminium a bénéficié d'une somme de recherches, aussi bien en nombre qu'en qualité. Les méthodes de production et de transformation accomplies ont permis la réalisation d'alliages permettant d'améliorer les caractéristiques physiques, chimiques et métallurgiques de l'Aluminium en lui substituant des éléments entrant en solution solide ou formant des précipités qui entraînent des compositions d'alliages industriels. Les propriétés des alliages obtenus sont déterminées essentiellement par la microstructure des produits correspondants. Cette microstructure est conditionnée par la nature, la qualité et surtout la répartition des éléments d'addition.

Cependant on peut considérer que ces alliages comportent [5]:

- une addition principale déterminante pour les propriétés de résistances
- des additions secondaires en quantités plus faibles qui ont une action spécifique.

Bien que la plupart des métaux et certains métalloïdes soient capables de former avec l'Aluminium des solutions solides, les alliages d'Aluminium sont en fait basés sur quelques systèmes seulement [5]:

- * Aluminium - Cuivre,
- * Aluminium - Manganèse,
- * Aluminium - Magnésium,
- * Aluminium - Silicium,
- * Aluminium - Zinc.

Les principales additions secondaires sont le Fe, Cr, Ni, Zr, Ti, Co, V, Pb, Bi, Cd et Sn .

Suivant le mode de transformation des alliages, on distingue :

1.3.1- les alliages de moulage: qui forment plusieurs familles. Chaque formule est un compromis entre les propriétés de fonderie (coulabilité, absence de criquabilité à chaud, forme et répartition du retrait volumique) et les propriétés d'usage exigées de la pièce (caractéristiques mécaniques, aspect de surface, aptitude au polissage et à l'anodisation, résistance à la corrosion, etc.). Les pièces de fonderie sont obtenues par la coulée du métal liquide dans des moules en sable ou dans des moules métalliques appelés coquilles.

Les alliages de moulage appartiennent aux systèmes [5]:

- * Al-Manganèse : A-M4
- * Al- Cuivre : A-U10S4, A-U4G....
- * AL-Magnésium : A-3T,A-G10
- * Al- Zinc : A- Z5G
- * Al- silicium : A-S2GT, A-S7G, A-S13, A-S9U3, AS10G....

Ces alliages sont désignés sous forme alphanumérique, dans laquelle les lettres qui suivent la lettre A correspondent aux éléments d'additions :

- * - U pour le cuivre,
- * - M pour le manganèse,
- * - S pour le silicium,
- * - G pour le magnésium,
- * - Z pour le zinc,
- * - T pour le titane.

Les alliages au Silicium sont les plus nombreux parmi les alliages de moulage. A teneur élevée en Silicium, ces alliages présentent une aptitude au moulage

particulièrement bonne, bonne résistance mécanique et à la corrosion, grand allongement, etc [19].

Grâce à de petites adjonctions de Magnésium, les alliages Al-Si deviennent aptes au durcissement structural (précipitation de Mg_2Si) et atteignent une résistance mécanique élevée tout en conservant une tenacité suffisante [12].

Les alliages du type A-U5GT et A-S7G sont des alliages de fonderie à durcissement structural.

1.3.2- Les alliages de corroyage: qui sont coulés en fonderie sous forme de plaques ou de billettes et ensuite transformés en demi-produits: tôles, profilés,....., par laminage ou par filage. Les demi-produits ainsi obtenus sont ensuite utilisés dans la construction mécanique où ils sont assemblés par soudage, rivetage, vissage....., dans le bâtiment, dans l'électricité, etc.

Suivant le processus par lequel les différents niveaux de caractéristiques mécaniques sont obtenus, on distingue pour les alliages de corroyage:

- les alliages à durcissement structural ou " trempants " dans lesquels le durcissement est obtenu par une gamme de traitement thermique comportant une mise en solution, une trempe suivie d'un revenu ou maturation à l'ambiante.

Les alliages à durcissement structural sont ceux du type Al-Cu, Al-G-Si, Al-Zn-G avec ou sans Cu.

- les alliages non susceptibles de durcissement structural (ou non trempants) dans lesquels le niveau de caractéristique mécanique est obtenu par l'effet d'écrouissage dû aux déformations (laminage, filage) ou par des recuits. Ces alliages sont les alliages Al-Mn, Al-Mg.

Comme pour l'Aluminium pur, les alliages d'Aluminium au Manganèse, au Silicium-Magnésium, au Zinc-Magnésium, présentent une bonne résistance à la corrosion, par contre ses alliages au Cuivre (utilisés en coulée sous pression) présentent après quelques temps d'exposition, des corrosions intercrystallines et sous tension. [5]

Les alliages d'Aluminium sont faciles à mettre en forme par laminage (coefficient d'écrouissage $n = 0.2$ à 0.3), emboutissage, chaudronnage, etc.

L'emploi de l'Aluminium et de ses alliages constitue souvent une solution heureuse dans la lutte contre la corrosion [5]. Du fait de leur structure cristalline cubique à faces centrées, l'aluminium et ses alliages ne présentent pas de phénomènes de fragilisation aux basses températures. La résistance au cisaillement, à la compression et à la fatigue est plus élevée aux basses températures qu'à la température ambiante [6].

Tous ces avantages font que l'utilisation de l'Aluminium et de ses alliages ne cesse de prendre de l'ampleur, mais le seul paramètre qui s'oppose à leur utilisation dans tous les domaines est leur résistance à chaud.

L'augmentation de la température influe sur les propriétés des alliages d'Aluminium, cette influence dépend essentiellement [6]:

- de l'alliage lui même, à savoir sa composition et de son état structural,
- de la température
- de la durée de séjour à cette température.

En général la résistance à chaud des alliages d'Aluminium est faible au delà de 100 °C, sauf pour la série Al-Cu où l'on peut atteindre 300°C [6]:

En plus de leur faible résistance à chaud, les alliages d'Aluminium présentent une faible résistance à la fatigue et aux frottements .

I.4- Traitements thermiques des alliages d'Aluminium:

Les traitements thermiques des alliages d'Aluminium peuvent être divisés en trois types [5], [13]:

- les traitements d'homogénéisation
- les traitements d'adoucissement
- les traitements de trempe structurale

I.4.1- Traitements d'homogénéisation:

Ce sont des traitements comportant un chauffage à température relativement élevée allant de 450 à 610 °C suivis d'un maintien à cette température pendant 6 à 48 heures. Ces traitements qui ont pour but de dissoudre les phases métalliques en excès et de réaliser une homogénéisation de la composition de la solution solide, sont

appliqués à certains produits bruts de fonderie ou corroyés et destinés le plus souvent à faciliter la transformation à chaud ou à froid (filage, étirage, laminage, forgeage)

I.4.2- Traitements d'adoucissement :

Ils ont pour but d'adoucir un métal ou un alliage durci par écrouissage ou par trempe structurale.

Dans le cas de l'écrouissage, ce sont les traitements de restauration et les recuits de recristallisation.

- le traitement de restauration est effectué de 200 à 300 °C pendant 1 à 8 heures.
- le traitement de recristallisation est effectué de 300 à 400 °C pendant 0.5 à 3 heures.

Dans le cas de la trempe structurale, c'est un recuit de précipitation qui consiste en un chauffage assez prolongé à température comprise entre la température de revenu et la température de mise en solution d'un produit trempé ou revenu dans le but d'obtenir un adoucissement relativement important par évolution des précipités provenant des constituants de l'alliage

I.4.3- Traitements de trempe structurale:

Les traitements de trempe structurale des alliages d'Aluminium comprend une mise en solution solide suivie:

- d'un refroidissement suffisamment rapide pour maintenir à la température ambiante la solution existante à des températures plus élevées.
- d'un traitement de revenu ultérieur à l'ambiante (maturation) ou à température supérieure qui conduit à un durcissement de l'alliage.

CHAPITRE II
PROJECTION THERMIQUE

CHAPITRE II

PROJECTION THERMIQUE

II.1- Invention et développement du procédé: [2], [9].

La technique de réalisation de revêtements par projection fut l'idée en 1909 d'un ingénieur suisse de Zurich, le docteur SHOOP. En examinant les traces laissées sur un mur par des balles de plomb, il remarqua une fusion locale du plomb lors de l'impact. D'où l'idée de projeter des métaux à l'état liquide Figure 1.

Il a tout d'abord déposé des métaux à bas point de fusion, en pulvérisant, à l'aide d'un fluide chauffé, du métal fondu. Au fil des années, le docteur SHOOP améliora sa technique en rendant l'appareil de projection transportable et en projetant le métal sous forme de poudre, à travers une flamme d'un chalumeau oxy-gaz, puis sous forme de fils en utilisant un arc électrique.

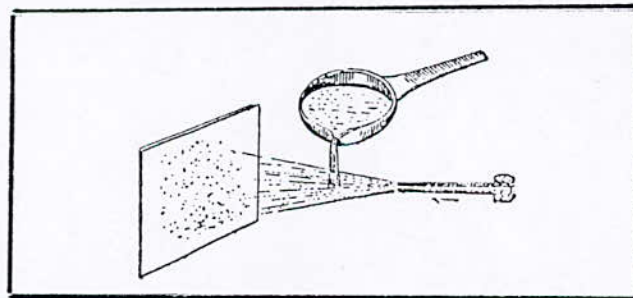


Figure 1: Méthode primitive de pulvérisation du métal liquide [8].

La technique de projection thermique n'a pas cessé d'évoluer, et c'est seulement vers les années 1960 qu'apparurent les pistolets plasma. La haute température que ces pistolets peuvent atteindre permet de faire fondre les matériaux les plus réfractaires

(céramiques, carbures, tungstène, etc.) tout en laissant le substrat pratiquement froid. Des propriétés de surface autrefois impensables peuvent être obtenues ainsi sans risque de détrempe ou de déformation des substrats métalliques. Ainsi par cette technique les produits les plus réfractaires peuvent être projetés sur les matériaux les plus sensibles (composites, verres, etc.).

En 1983, de nombreux laboratoires dans le monde, en particulier au Japon, ont étudié la possibilité d'intégrer, dans la technique de projection thermique, les lasers de puissance (CO₂)

II.2- Principe de la projection thermique [2] :

Le matériau d'apport solide sous forme de poudre ou de fil est porté à l'état liquide ou pâteux au moyen d'une source de chaleur appropriée (flamme ou arc). Il est ensuite pulvérisé sous forme de gouttelettes au moyen d'un courant gazeux. Ce dernier peut être constitué soit par un gaz auxiliaire qui est généralement de l'air, parfois de l'argon ou de l'azote mélangé au gaz provenant de la combustion (flamme oxy-gaz) ou de l'ionisation des gaz de ceux-ci (plasma d'arc).

Les particules qui proviennent de la pulvérisation sont véhiculées à grande vitesse, environ 100 à 200 m/s pour les pistolets à gaz et de l'ordre de la vitesse du son pour les pistolets plasma.

Après pulvérisation, les particules vont s'écraser sur le support placé à une distance convenable Figure 2

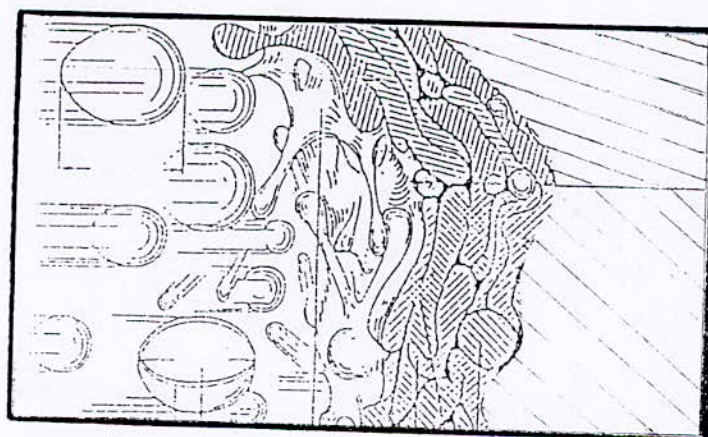
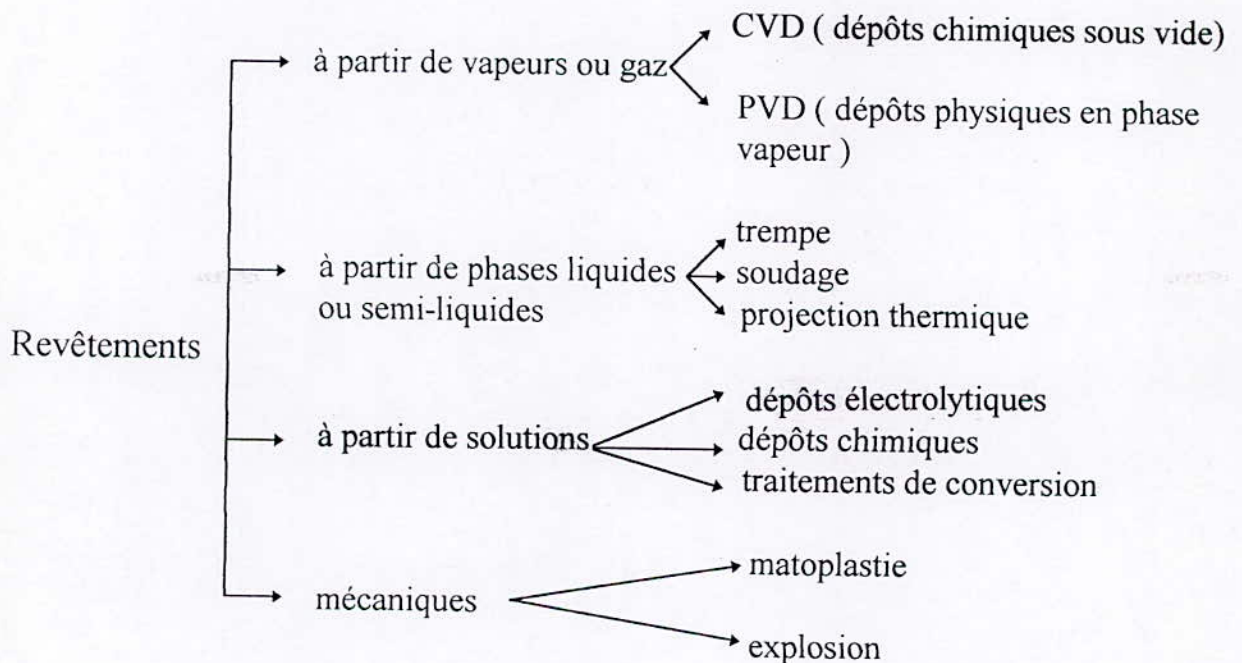


Figure 2: Représentation d'un dépôt réalisé à chaud [9]

II.3- Place de la projection thermique parmi les traitements de surface [1], [2]:

Les techniques de traitement de surface sont diverses, elles permettent de résoudre des problèmes de façon économiquement viable. Pour choisir la solution optimale (nature du revêtement + technologie d'application), il est nécessaire de considérer les techniques potentiellement utilisables [15]:



Parmi ces techniques, les plus utilisées sont:

- les dépôts électrolytiques,
- les dépôts chimiques,
- les dépôts physiques en phase vapeur (PVD),
- les dépôts chimiques sous vide (CVD).

Parmi ces moyens disponibles pour réaliser des traitements de surface, la projection thermique est certainement la technique qui présente le plus de souplesse:

- Quant au choix du couple substrat /dépôt,
- Quant à la taille des pièces traitables des plus grandes aux plus petites,
- Quant au choix du procédé.

Comme toute technique de traitement de surface, la projection thermique présente aussi des limitations dont il faut tenir compte Figure 3

- adhérence purement mécanique des dépôts dans certains modes de projection
- porosité résiduelle des revêtements.

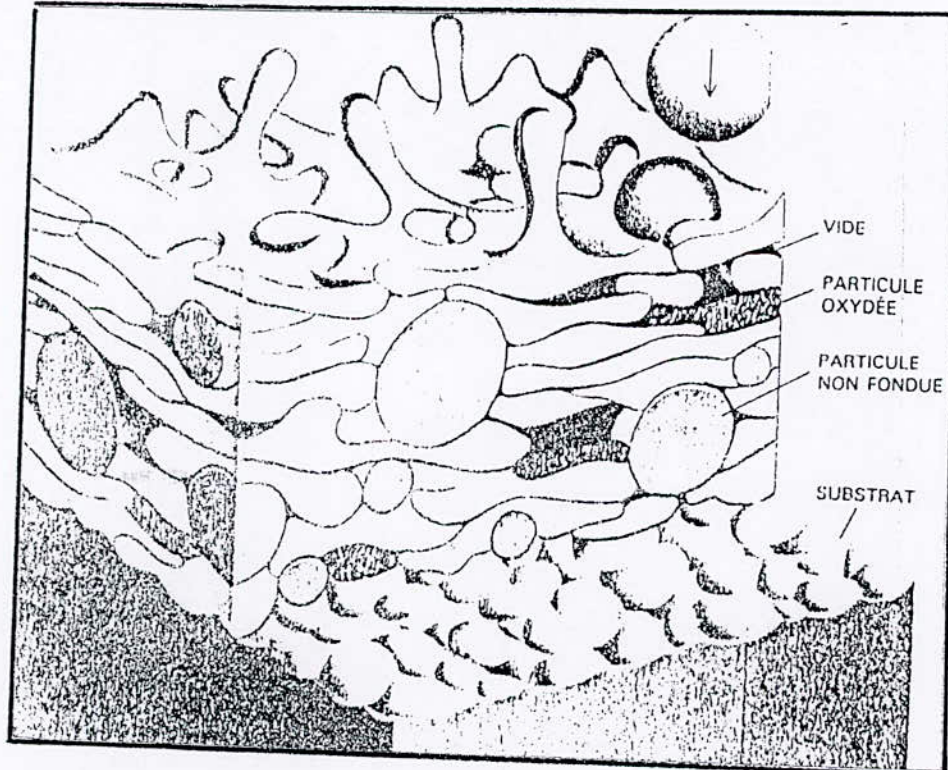


Figure 3: Edification d'un revêtement [15]

II.4- Choix d'une solution de métallisation et caractéristiques des matériaux projetés

II.4.1- Choix d'une solution de métallisation

Le choix des matériaux à appliquer sur les pièces à revêtir est primordial. Il est fonction des sollicitations auxquelles sont soumises ces pièces.

Les matériaux utilisés sont nombreux, et leur nombre ne cesse d'augmenter avec le développement des appareils de projection et des applications.

Ces matériaux peuvent être classés comme suit: [9]

- les aciers alliés et non alliés,
- les alliages à base de cobalt,

- les alliages à base de nickel,
- les alliages à base de zinc,
- les métaux purs,
- les oxydes,
- les carbures,
- les auto-adhérents (alliages à base de Ni-Al),
- les nitrures,
- les siliciures,
- les matériaux abrasables (type Ni-graphite),
- les matériaux antifricition -céramiques,
- les alliages MCrAlY (M = Ni-Co-Fe ou une combinaison de deux ou trois d'entre-eux, Cr = chrome, Al = aluminium, Y = yttrium),
- les matières plastiques (polyamide, polyéthylène....).

Pour que ces matériaux puissent être utilisés, ils doivent se présenter sous un certain nombre de formes leur permettant de s'adapter aux équipements de projection, tout en respectant leurs propriétés intrinsèques

Les principales formes commercialisées sont [15] :

- les fils nus massifs ou les fils fourrés
- les poudres
- les cordons
- les baguettes

II.4.2- Caractéristiques des matériaux projetés [9], [18]:

Les revêtements sont caractérisés par plusieurs facteurs dont les plus significatifs sont:

- la structure;
- l'adhérence;
- la densité;
- la dureté;
- contraintes résiduelles

Parfois pour d'autres applications, il est nécessaire de connaître des facteurs tels que :

- la résistance à l'usure;
- le coefficient de frottement;
- les caractéristiques électriques
- les caractéristiques thermiques

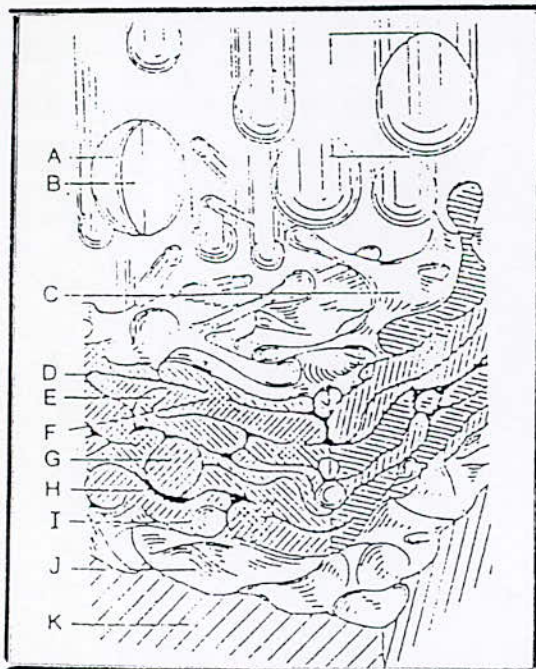
Ces différentes caractéristiques sont dépendantes dans une large mesure de la méthode de projection utilisée et des différents paramètres qui régissent cette méthode.

II.4.2.1- Structure:

En s'écrasant sur le substrat, les particules projetées forment une juxtaposition de couches qui donnent l'allure générale d'un dépôt obtenu par projection thermique. Lors d'une vue au microscope parallèlement au support, la structure du métal après projection apparaît sous forme de gouttelettes rondes, soudées les unes aux autres, pouvant laisser entre elles quelques vides. Lors d'une vue perpendiculaire au support, on trouve au contraire des stratifications. **Figure 4.**

Suivant la technique de projection employée, les revêtements peuvent changer de structure et de composition. Il est assez fréquent de voir le taux de carbone diminuer, et pour certains métaux purs comme le tungstène, de constater une augmentation du taux d'oxygène.

Pour la projection réalisée dans l'air, il est généralement admis que les revêtements s'oxydent. Néanmoins la proportion d'oxygène comprise dans les dépôts, tout en dépendant de la façon de projection, reste en général faible.



- A: coupe de la couche d'oxyde d'une gouttelette métallique
- B: intérieur d'une gouttelette métallique
- C: impact de la gouttelette métallique, éclatement partiel.
- D: éclatement de la couche d'oxyde lors de l'impact entre deux particules superposées.
- E: accrochage des particules entre elles.
- F: soudage partiel des particules, juste avant l'impact.
- G: particules métalliques non fondues avant l'impact.
- H: microcavité due à un remplissage partiel (porosité).
- I: micropore dû à des gaz enfermés (porosité).
- J: surface du matériau de base rugosifiée.
- K: matériau de base.

Figure 4: Coupe d'une couche projetée thermiquement [9].

II.4.2.2- Adhérence:

Les dépôts projetés adhèrent au substrat par un phénomène mécanique et métallurgique qui demande une préparation soignée de la surface à revêtir.

Pour les matériaux dont l'adhérence est faible et dans le cas où les coefficients de dilatation sont très différents, des sous couches d'accrochage sont utilisées pour rendre compte de la nature de la liaison du revêtement.

II.4.2.3- Densité:

Les revêtements réalisés à chaud dans l'air sont généralement poreux. Lors de la projection à chaud dans l'air, les particules du dépôt peuvent laisser entre elles quelques vides. Les revêtement ainsi obtenus sont poreux. Cette porosité est plus ou moins importante, mais peut être éliminée par un traitement à posteriori.

La densité du dépôt est fonction de la porosité, elle peut être influencée par la dimension des particules et leur vitesse.

L'existence de porosités à l'interface, peut diminuer l'adhérence du revêtement. Cependant, un tel dépôt peut être indésirable dans le cas d'une protection anticorrosion et bénéfique pour une auto lubrification et résistance au grippage.

II.4.2.4- Dureté

Les valeurs de dureté des dépôts projetés à chaud dépendent des paramètres de projection et de la technique élaborée pour les obtenir et des multimatériaux projetés.

Etant donné que le dépôt est constitué de particules juxtaposées, liées entre elles, le test de dureté effectué est sans rapport avec la dureté de chacune des particules, mais représentatif de la compacité du dépôt..

II.4.2.5- Contraintes résiduelles

Les contraintes résiduelles, qui sont généralement dues au retrait du dépôt pendant le refroidissement, peuvent être la cause d'un écaillage du revêtement et d'une mauvaise adhérence. Pour remédier à ce phénomène, il faut réduire les gradients de températures par préchauffage avant la projection et maintenir le plus possible le revêtement à une température basse.

II.5- Equipements de projection thermique:

Pour pouvoir projeter un matériau sous une forme donnée (fils, poudre, ou baguette) sur un substrat, il faut que l'appareil utilisé soit capable de le projeter sous sa forme physique [8] .

Les appareils de projection thermique peuvent être divisés en 2 catégories suivant la source d'énergie utilisée: Flamme ou arc électrique.

II.5.1- Projection thermique à la flamme:

C'est une projection qui utilise comme combustible, l'énergie thermique provenant de la combustion de gaz. Les matériaux utilisés sont des métaux, des alliages métalliques et des céramiques, qui se présentent sous forme de fils, de cordons, de poudres, ou de baguettes selon l'appareil utilisé.

En principe, le mot flamme désigne un mélange gazeux en cours de combustion. La réaction chimique rapide entre un carburant et un comburant se manifeste souvent par une flamme dont la température dépend des gaz de combustion utilisés.

Pour le fonctionnement des appareils de projection à la flamme, 3 types de fluides sont utilisés, à savoir [9]:

- un gaz combustible (acétylène, propane, hydrogène ou gaz naturel)
- un comburant (oxygène)
- de l'air comprimé, qui peut être remplacé dans certain cas par un gaz neutre (argon ou azote)

Le troisième fluide (air comprimé), n'est utilisé que dans certains équipements de projection.

Lors de l'utilisation des poudres comme matériaux de projection, différents appareils peuvent être utilisés :

a) Torche à gaz

Cet appareil, est un chalumeau oxy-gaz utilisant comme combustible de l'acétylène. L'appareil est équipé d'un petit récipient contenant la poudre à projeter. Cette dernière tombe par gravité et est amenée jusqu'à dans la flamme.

L'air comprimée n'est pas utilisé dans cet appareil, de ce fait la poudre traverse la flamme et est projetée à faible vitesse sur le support à recharger [15].

b) Pistolets à poudre: figure 5

Ce type d'appareil, utilise comme combustible l'acétylène ou le propane. Certains modèles utilisent en plus de l'air comprimé.

La poudre est introduite dans la flamme par pulvérisation après mise en solution dans un distributeur et dispersée dans un courant gazeux d'entraînement [9].



Figure 5: Pistolet à poudre [8].

c) Pistolets à détonation: figure 6

La projection s'effectue de façon discontinue en utilisant l'énergie d'ondes de chocs, résultant d'un mélange gazeux [15].

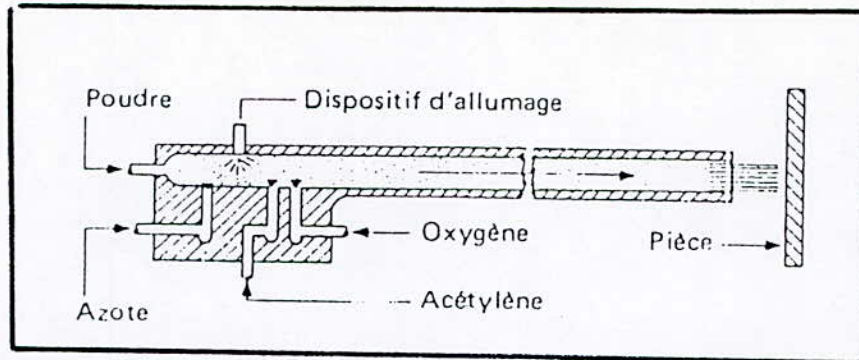


Figure 6 : Pistolet à détonation [9].

d) Pistolets à fils: utilisant les fils comme matériels de projection: (figure 7.)

Contrairement au pistolet à poudre, dans le pistolet à fils le mélange des fluides comburant / combustible sert uniquement à fondre les matériaux à projeter.

Ce pistolet se compose de deux parties: une partie chalumeau et une partie entraînement de fil [15].

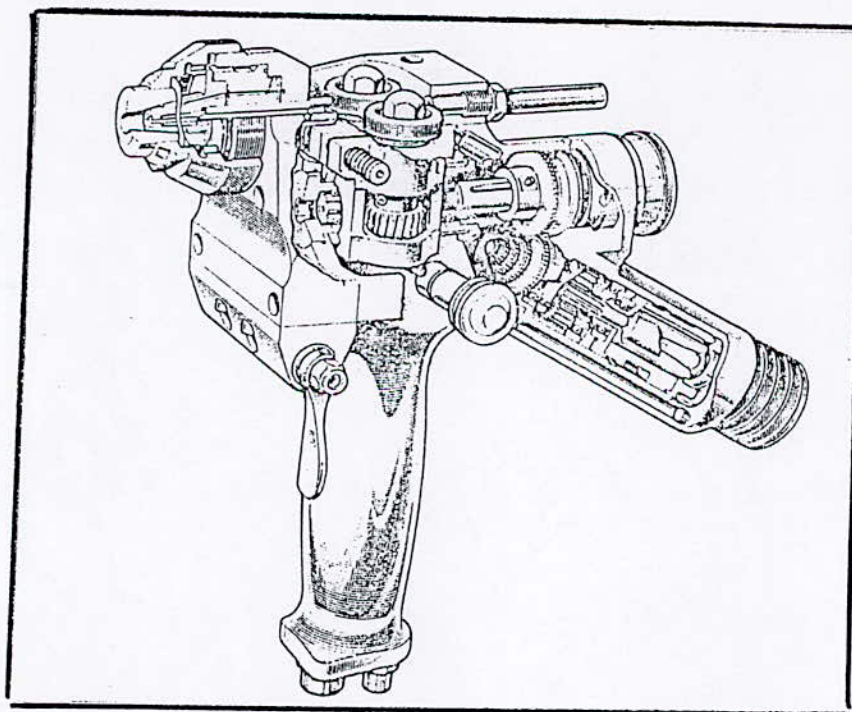


Figure 7: Pistolet à fils [8].

II.5.2- Projection thermique à l'arc électrique :

Dans le cas des appareils utilisant l'arc comme source d'énergie on peut citer les torches à plasma comme matériels poudre, et les pistolets à arc entre fils comme matériels fils

a)- Torches à plasma: figure 8

Le plasma est constitué par des particules gazeuses ionisées à haute température, c'est un milieu électriquement neutre. Il est obtenu par injection d'un gaz inerte (argon) ou d'un mélange semi-inerte dans un espace annulaire (B) situé entre une cathode (C) en métal réfractaire et une anode (D) généralement en cuivre.

Entre ces deux électrodes refroidies énergiquement, on fait jaillir un arc provoquant l'ionisation du gaz. [17]

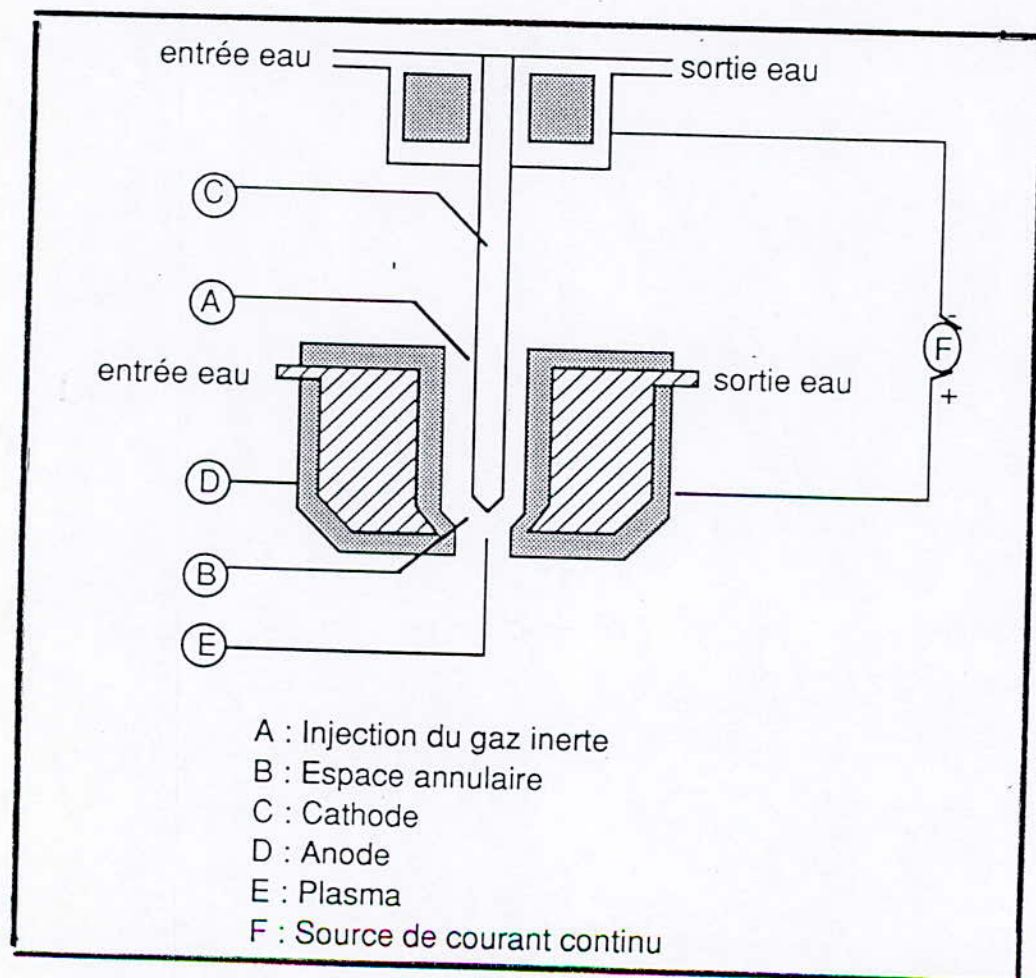


Figure 8 : Schéma de principe de l'arc plasma

b)- Pistolets à arc entre fils: [15]

Le principe consiste à faire jaillir entre deux fils un arc électrique, le métal fondu dans l'arc étant en suite projeté sur le substrat par un jet d'air comprimé Figure 9

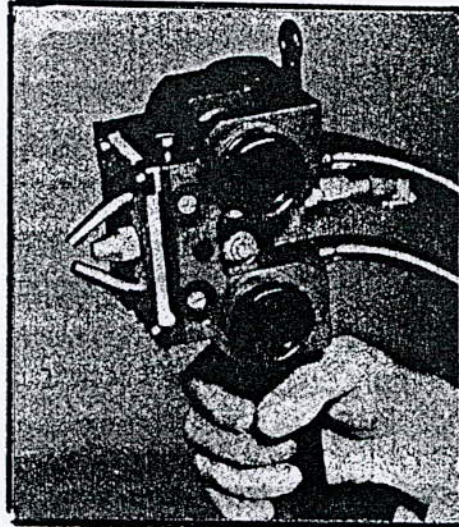


Figure 9: pistolet à arc entre deux fils [8].

II.5.3- Nouveauté:

Vue les possibilités qu'offre la projection thermique, les recherches n'ont pas cessé d'évoluer dans ce domaine. De nouveaux appareils sont apparus ces dernières années permettant de projeter pratiquement tous les matériaux, même ceux qui sont très réfractaires ou très oxydables et peuvent même éviter à certains matériaux très instable en température une modification de structure.

Parmi ces nouveautés on peut citer [9]:

- le plasma basse pression,
- le plasma VPS (plasma sous vide),
- le plasma sous atmosphère et température contrôlée,
- le plasma IPS (sous gaz inerte) qui garantit une grande pureté chimique,
- le plasma technique (équipement robotisé).

II.6- Mise en œuvre de la projection thermique:

Pour le réglage de l'appareil de projection employé, l'utilisateur, doit se référer aux réglages préconisés par les constructeur du matériel, à savoir: les débits des

fluides, la distance de tir, l'angle d'incidence, la vitesse de défilement des fils, l'intensité, la tension, etc [2].

II.6.1- Préparation des surfaces à traiter :

Avant la préparation des surfaces, il est difficile de caractériser ces dernières, c'est à dire de connaître ce qui les recouvre, de quoi se compose la sous-couche immédiate (le derme) et quel est le relief ? [11].

Une surface avant préparation est plus ou moins contaminée par:

- Des matières liquides et solides (corps gras-huile, ou graisse enrobant des particules solides, poussières d'origine organique, minérale ou métallique;
- Une couche chimique plus ou moins épaisse et plus ou moins régulière formée par réaction avec le métal de base, lors de traitements subis préalablement par les produits, ou lors de leur exposition à l'atmosphère;
- Une sous-couche dont la structure et la composition sont différentes de celles du métal à cœur.

L'opération de préparation de surface est une opération obligatoire et indispensable pour avoir une adhérence du dépôt aussi cohérente que possible. De ce fait les pièces destinées à être revêtues doivent être propres en surface, sans contamination de graisses, huile, peinture, et aussi dépourvues de tout composé chimique (couches d'oxyde ou autres composés du métal).

Le but le plus important de cette préparation de surface est non seulement d'éliminer toutes traces de corps étranger (solide ou liquide), mais encore de rendre la couche superficielle suffisamment active chimiquement pour faciliter les réactions.

La préparation de surface comprend deux étapes: un nettoyage et une rugosification [11].

II.6.1.1- Le nettoyage:

Le nettoyage de la surface peut se faire en faisant un décapage, ou un dégraissage.

Le décapage a pour but principal d'éliminer de la surface les couches chimiques adhérentes, et aussi à retirer des produits solides incrustés dans les porosités. Le décapage peut être chimique ou mécanique.

Le dégraissage a pour rôle de débarrasser la surface des corps gras et de toutes les matières étrangères qui la souillent. Le dégraissage peut être chimique ou électrochimique.

II.6.1.2- La rugosification:

La propreté de la surface à revêtir est nécessaire mais non suffisante pour obtenir une bonne adhérence [15]. Pour palier ce problème, il est nécessaire de créer une rugosité à la surface de la pièce à revêtir afin de permettre aux particules en fusion ou à l'état pâteux de venir épouser les irrégularités de la surface et réaliser ainsi un bon accrochage mécanique.

Cette géométrie de surface conduisant à des dépôts adhérents peut être obtenue par:

- traitement par impact
- préparation mécanique des surfaces suivie d'un traitement par impact.

a)- Traitement par impact:

Ce traitement consiste à projeter avec force, sur le substrat un abrasif en vue de nettoyer la pièce et créer une certaine rugosité à sa surface.

Les grenailles ou abrasifs se présentent sous différentes matières et formes. Le tableau 1 présente les différentes matières utilisées pour la grenaille [10]:

- Les grenailles métalliques, peuvent être:
 - rondes, coulées, obtenues par atomisation avec fusion au four électrique et trempe rapide d'un métal
 - angulaires, présentant des arrêtes et formes irrégulières, obtenues par concassage, broyage d'une matière première cassante;
 - cylindriques, obtenues par coupe régulière d'un fil métallique;
 - fragmentées, obtenues par coupe régulière de tôles.
- Les abrasifs minéraux naturels sont utilisés dans leur état
- Les abrasifs minéraux synthétiques et organiques, se présentent sous des formes spécifiques (par exemple, billes de verre ou fil coupé de nylon).

Métalliques	Ferreux	Acier coulé Fil d'acier coupé Bille à roulements Fonte Fonte hématite Fonte hématite malléabilisée Fonte traitée Fil d'acier inoxydable coupé
	Non Ferreux	Aluminium Cuivre Laiton
Non métallique	Minéraux	Naturels: Sable Silex Synthétique: Corindon Scories Verre Céramique
	Organique	Naturels: Bois Agicides Synthétiques: Plastiques Nylon

Tableau 1: Grenailles et abrasifs [10]

Les grenailles métalliques sont les abrasifs les plus employés et peuvent être projetées au moyen d'une turbine d'air comprimé.

b)- Préparation mécanique des surfaces:

Cette technique consiste en un usinage qui permet:

- de diminuer la dimension des pièces afin de laisser une épaisseur suffisante pour le dépôt sans cependant nuire à la résistance mécanique de celles-ci;
- augmenter les surfaces d'accrochage;
- corriger le profil dans le cas de réparation de pièce usée.

II.6.2- Sous couche d'accrochage:

La sous couche d'accrochage est un dépôt intermédiaire, généralement de faible épaisseur entre le substrat et le revêtement fonctionnel proprement dit.

Le rôle de la sous couche d'accrochage est d'améliorer l'adhérence et la tenue de certaines couches d'oxydes, de carbures, et de réaliser des rechargement épais. Elle permet de rapprocher les propriétés physico-chimiques entre le substrat et le matériau projeté lorsque les coefficients de dilatation sont très différents [2].

Les sous couches d'accrochage sont projetées en fines épaisseurs de l'ordre de 0.05 à 0.2 mm suivant l'utilisation. Les plus utilisées sont [9]:

-molybdène.....	315 °C
-nickel-aluminium 80-20.....	620 °C
-nickel-aluminium 95-5.....	1010 °C
-nickel-chrome....80-20.....	1260 °C
-nickel-chrome....80-20 (94%) et aluminium (6 %).....	980 °C

Notons qu'en réalité, il existe deux manières différentes de projection [2]:

- Projection sans refusion,
- Projection avec refusion

Projection sans refusion: Ce type de projection utilise une sous couche d'accrochage qui augmente l'adhérence entre dépôt et substrat.

Projection avec refusion: Ce type de projection ne nécessite pas de sous couche d'accrochage, car un apport d'énergie calorifique adopté remet en solution l'agglomérat de particules et porte le support à une température élevée supérieur à 900 °C ,ce qui à pour conséquence la formation d'une zone de diffusion entre le substrat et le dépôt, et de ce fait il représente un bon moyen au revêtement pour s'adhérer au substrat en formant un revêtement étanche.

II.6.3- Dépôt:

Les caractéristiques d' un dépôt et sa bonne tenue en service dépendent de sa qualité d'exécution et du processus de fabrication.

Lorsque la pièce est chauffée de manière excessive pendant l'opération de projection, les contraintes du revêtement sont accrues et il y a risque de craquelures ou de séparation. De même, le revêtement peut prendre une couleur sombre ce qui est l'indice d'une oxydation excessive

Pour réaliser un bon dépôt, il faut que ce dernier soit exécuté comme suit [2]:

- Le revêtement doit être effectué par intermittence "par passes successives" afin d'éviter tout échauffement nuisible du substrat.
- Il faut procéder à la métallisation dans les heures qui suivent la préparation de la surface pour éviter l'interposition d'un voile d'oxyde entre la surface du support et le revêtement (sous couche et couche).
- La métallisation soit faite perpendiculairement à la surface ou au maximum avec un angle de 30° de chaque côté de la perpendiculaire pour avoir un bon étalement des particules sur le substrat sans rebondissement, ni perte, avec adhérence optimale

Avant de commencer la projection, les zones voisines des sections métallisées peuvent être masquées avec du produit de masquage.

II.6.4- Post traitement des dépôts projetés [9], [15]:

Pour que les revêtements de projection puissent répondre aux exigences d'assurance de qualité, des traitements divers sont effectués sur ces derniers pour leur conférer des qualités supérieures à leur état brut.

Ces traitements sont définis comme suit:

- Colmatage,
- Imprégnation
- Peinture
- Traitement mécanique
- Traitement thermique

II.6.4.1- Colmatage:

C'est une opération qui, par absorption, réaction chimique ou tout autre mécanisme, permet de boucher les porosités ouvertes et d'apporter d'autres propriétés, comme augmenter la tenue à la corrosion de certains métaux: le zinc, l'aluminium, ou les alliages zinc-aluminium.

On distingue deux types de colmatage:

- le colmatage naturel: les porosités se compactent au vieillissement,
- le colmatage artificiel: ce sont:

L'hydrocarbonatation: où les pièces après métallisation sont trempées dans l'eau naturelle puis séchées à l'air. Il y a formation d'hydrocarbonate de zinc et d'oxyde d'aluminium pour les alliages zinc-aluminium, qui s'oppose à toute pénétration ultérieure d'air.

L'oxychloruration: où les pièces sont trempées (ou arrosées) dans du sodium puis séchées à l'air libre. Il se forme des traînées blanchâtres d'oxychlorure de zinc par fixation de l'oxygène de l'air. Ce sel, insoluble se comporte comme un véritable ciment et s'oppose à l'attaque par l'eau de mer

La Carbonatation: est utilisée pour les alliages Al-Mg ; elle est réalisée par trempage (ou arrosage) et séchage à l'air

II.6.4.2- Imprégnation:

Pour éviter les inconvénients de la porosité des dépôts, différents produits colmatants y sont introduits. En général, ce sont des résines ayant un bon pouvoir pénétrant. Elles polymérisent à l'intérieur du dépôt pour étancher celui-ci et lui permettre de résister à certains agents corrosifs.

Ces imprégnations sont effectuées à la brosse, au pistolet de peinture ou sous-vide.

II.6.4.3- Peinture:

Elles réagissent avec les métaux déposés en fabriquant des sels qui sont de véritable bouche pores tout en passivant le dépôt.

II.6.4.4- Traitements mécaniques

Ces traitements mécaniques ont pour rôle de fermer les porosités des dépôts en surface. Lorsqu'il s'agit de matériaux ductiles tels que le zinc, l'aluminium, l'argent,, la technique la plus appropriée est le compactage des dépôts par projection sous pression de billes de verre, de zircone, ou de différents métaux (Al-acier-Ni, etc.)

II.6.4.5- Traitements thermiques

Ces traitements tendent non seulement à fermer les porosités, mais encore permettent d'améliorer l'adhérence et même de transformer la structure des couches déposées. Ces traitements permettent aussi de rendre les couches déposées plus ductiles, moins contraintes et d'augmenter la résistance aux chocs [2].

Les moyens de traitements thermiques sont:

- Chauffage au four, à l'air ou sous vide, pour réaliser des zones de diffusion du dépôt dans les substrats
- Pressage isostatique à chaud, qui permet d'améliorer l'adhérence entre le dépôt et le substrat, et également de compacter le dépôt jusqu'à le rendre étanche

II.6.5- Finition:

La finition consiste à rendre la surface des pièces projetées uniforme. Dans le cas de pièces usées tels les vilebrequins ou autres pièces de précision, après projection, un usinage bien pointu doit être fait pour faire revenir la pièce à sa côte d'origine,

II.7- Contrôle des dépôts obtenus par projection thermique [2], [9] :

La projection thermique s'applique de plus en plus à des pièces mécaniques de précision où il faut assurer une qualité et une fiabilité équivalentes à celles des pièces homogènes.

Les différents contrôles des dépôts sont fonction de : l'épaisseur, l'adhérence, la porosité, la dureté, la densité, l'homogénéité

II.7.1- Mesure de l'épaisseur:

Les épaisseurs obtenus par projection thermique peuvent être mesurées par plusieurs méthodes. On peut citer:

- les moyens conventionnels de métrologie, c'est à dire, pieds à coulisse, palmers, jauges diverses (plus ou moins perfectionnées);
- les jauges à induction magnétique, qui permettent de mesurer des revêtements non magnétiques sur des bases magnétiques (fer et acier), comme du zinc sur de l'acier
- les appareils de mesure utilisant le principe des courants de foucault (HF), lorsqu'il s'agit de projetats non métalliques sur des substrats non magnétiques
- les mesures par résistance (Ohm), les ultrasons, la rétrodiffusion de rayon β , etc.

II.7.2- Mesure de l'adhérence

L'adhérence est une propriété qui détermine la qualité et l'application du revêtement. La mesure de l'adhérence nécessite des tests destructifs. Pour cela les essais sont généralement réalisés sur un échantillon témoin représentatif du revêtement à éprouver.

Le test d'adhérence peut se faire de deux manières différentes:

- Un essai d'arrachement d'un ruban adhésif. Cet essai consiste en un rainurage du dépôt (quadrillage) avec un outil tranchant. Un ruban adhésif est appliqué sur la partie rainurée et le ruban est arraché brusquement. L'adhérence du dépôt est jugée selon le rapport des parties du revêtement restées sur le substrat et celles adhérant au ruban.

- Un autre essai consiste à coller deux éprouvettes. L'une des éprouvettes est revêtue sur la face propre et plate, l'autre reste sans revêtement. Ces deux éprouvettes sont collées ensemble à l'aide d'une colle à forte adhérence. L'ensemble de ces deux éprouvettes collées, subit alors un essai de traction qui permet de connaître la force d'arrachement du dépôt ou sa bonne tenue.

II.7.3- Mesure de la porosité

Dans la plupart des revêtements obtenus par projection thermique, la porosité est toujours présente. La mesure de cette dernière peut se faire par une évaluation micrographique qui consiste à mesurer le nombre de porosités en rapport avec une unité de surface, sur une coupe transversale examinée au microscope.

Une autre méthode permet la mesure de la porosité en utilisant un porosimètre à mercure. En faisant pénétrer du mercure sous pression dans les pores d'un revêtement, on peut mesurer la porosité et le diamètre des pores suivant la quantité de mercure qui pénètre dans l'échantillon en fonction de la pression exercée.

II.7.4- Mesure de la dureté:

Le revêtement obtenu par projection thermique est généralement hétérogène, les valeurs de dureté sont par conséquent relatives

Les tests de macrodureté permettent d'obtenir une indication précise de la cohésion de particules entre elles, ce qui donne une idée précise sur la qualité du dépôt qui craque si la cohésion n'est pas bonne

II.7.5- Mesure de la densité:

Pour réaliser la mesure de la densité, il faut calculer le volume de l'échantillon de revêtement usiné avec précision, peser et appliquer la formule ci-dessous

$$d = m / v$$

avec

- d: densité apparente
- m: masse de l'échantillon
- v: volume de l'échantillon

Une idée sur la porosité peut être obtenue en faisant la différence entre la densité apparente du dépôt et la densité théorique.

Dans le contrôle des revêtements d'autres mesures peuvent être effectuées pour répondre à certaines exigences en relation avec leur utilisation, à savoir:

- mesure du coefficient de frottement
- mesure de l'usure
- mesure de la corrosion et de l'oxydation
- tests de fatigue
- résistance électrique
- conductivité thermique, etc.

II.8- Emploi des matériaux projeté thermiquement [2]:

La projection thermique permet soit de réaliser des revêtements sur des supports de nature diverse ou le façonnage d'objets céramiques-métalliques ou de matériaux composites:

II.8.1- Réalisation de revêtements sur des supports divers:

Les matériaux projetés thermiquement sont employés dans différents domaines en fonction du type et de l'importance des sollicitations.

Lors de la réalisation de revêtement sur un support, ce dernier est soit neuf soit usé.

*** *Projection thermique appliquée à des pièces neuves:***

- Projection anticorrosion
- Amélioration de la tenue à la l'usure et du coefficient de frottement
- Application électronique

*** *Projection thermique appliquée à des pièces usées:***

- Rechargement de vilebrequins de moteurs ou de compresseurs,
- Réparation de machine outils,
- Pièces de convoyage de matières abrasives.....

ou encore dans l'aéronautique, la projection prend place pour le réparation des parties de moteur à turbine comme

- les stators de compresseur
- les chambres de combustion
- les aubes de turbines

II.8.2- Façonnage d'objets céramiques-métalliques ou de matériaux composites: [15]

Le façonnage par projection de carbures et métaux réfractaires est également commode lorsqu'on veut fabriquer des corps composites, constitués de couches successives de métaux et de carbures, permettant d'obtenir des gradients fonctionnels de propriétés.

Les corps composites peuvent être faits de couches superposées de matériaux différents, ou bien le mélange des deux constituants. Ces mélanges s'obtiennent soit par projection simultanée avec deux chalumeaux, soit avec une torche si celle-ci est alimentée par deux distributeurs de poudre contenant chacun l'une d'entre elles, ou encore s'il est alimenté par un seul distributeur contenant le mélange des poudres préparées à l'avance.

PARTIE EXPERIMENTALE

CHAPITRE III

**ELABORATION DES MULTIMATERIAUX ET
METHODES DE CARACTERISATION MISES EN
ŒUVRE**

CHAPITRE III

ELABORATION DES MULTIMATERIAUX ET METHODES DE CARACTERISATION MISES EN ŒUVRE

Avant de présenter les différents équipements, procédés, moyens et méthodes mis en œuvre pour l'élaboration des multimatériaux, nous avons jugé judicieux de repositionner le problème de façon plus explicite que dans l'introduction de ce mémoire.

En effet, l'utilisation de la projection thermique comme moyen de rénovation, de rechargement ou d'élaboration de pièces mécaniques composites a montré ses performances. Cependant, lorsque des substances métalliques à gradients fonctionnels assez différents sont à assembler par ce procédé, l'existence d'un matériau intermédiaire appelé sous-couche d'accrochage devient impérative. Son rôle est de rapprocher principalement les propriétés thermiques et physiques des deux substances formant le multimatériau.

A ce titre, la réalisation d'un multimatériau par la projection d'un acier à haute résistance sur un alliage d'Aluminium nécessite incontestablement une sous couche d'accrochage.

Aussi les post-traitements thermiques que l'on applique aux multimatériaux ainsi réalisés ont montré leur efficacité [15], [16]

En effet, généralement ils homogénéisent les structures et permettent une interdiffusion qui pourrait renforcer l'adhérence et « souder » davantage les différentes substances entre elles.

Dans cet optique, le travail envisagé dans le cadre de ce mémoire consiste à élaborer des multimatériaux en utilisant deux types de sous-couches d'accrochage:

- La première sous-couche est un alliage Ni-Al que l'on dépose par projection à l'arc électrique sur une épaisseur de 1 à 2 / 10 mm.
- La deuxième sous couche d'accrochage est déposée par le procédé dit « slurry coating ». Elle est constituée préalablement d'une poudre métallique à 50 % Cu, 30 % Ni et 20 % Sn à très faible granulométrie

Notre choix s'est porté sur ces deux types de poudre car la première est utilisée à l'entreprise « **Algerie Métallisation** » et a montré son efficacité.

La deuxième a déjà fait l'objet d'une récente étude par slurry coating et a donné des résultats satisfaisants en ce qui concerne la diffusion et la formation de phases avec l'alliage d'Aluminium[16].

Les huit échantillons relatifs à ces deux types de multimatériaux ont été ensuite divisés en deux groupes afin d'étudier l'influence d'un post-traitement thermique.

On a fait subir à 4 échantillons (deux relatifs à la sous-couche Ni-Al et deux relatifs à la sous-couche Cu-Ni-Sn) un post-traitement thermique à 420 °C pendant deux heures sous vide.

Les quatre échantillons restants (2 du type Ni-Al et 2 du type Cu-Ni-Sn) ont été étudiés sans être post-traités.

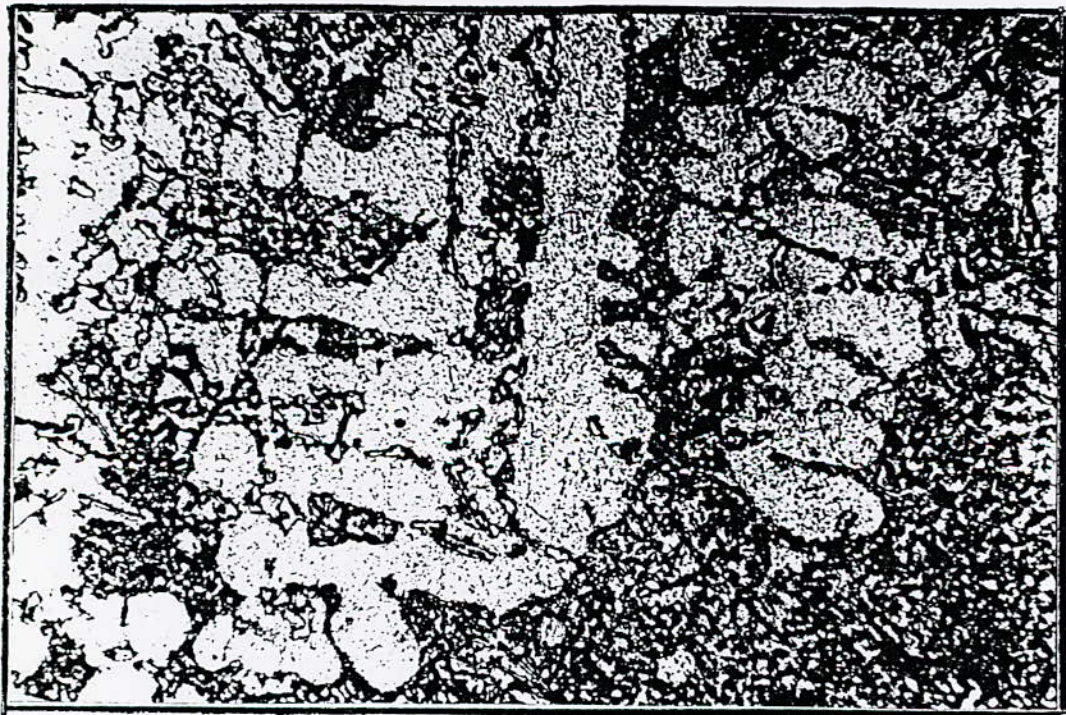
Ainsi notre étude consiste à faire une comparaison entre des échantillons type Ni-Al et des échantillons type Cu-Ni-Sn post-traités et non post-traités et de voir l'efficacité respective des deux sous-couches (Ni-Al et Cu-Ni-Sn) et le rôle du post-traitement concernant les deux sous-couches également.



III.1- Critères de choix des matériaux:

III.1.1- Substrat:

Du fait de son large emploi dans l'industrie, de sa disponibilité sur le marché et de ses bonnes propriétés mécaniques et physiques (densité, coulabilité,etc.), nous avons choisi l'alliage de fonderie AS-13 type (ALPAX) comme matériau à traiter par projection thermique. La figure 10 présente une micrographie de cet alliage à grossissement 100.



X 100

Figure 10: Structure micrographique de l'alliage utilisé (ALPAX).

III.1.1.1- Composition chimique du substrat:

L'analyse qualitative et quantitative du substrat à été effectuée par un spectromètre de fluorescence X de type PW 400.

L'alliage d'aluminium utilisé provient de l'unité de fonderie d'Aluminium de la SNVI de Rouiba..

L'analyse spectrochimique révèle la présence des éléments suivants. Tableau 2

Eléments	Al	Si	Fe	Cu	Mn
(%)	83,1	13,2	0.47	0.093	0.15

Tableau 2: Analyse spectrochimique de l'alliage utilisé:

III.1.2- Sous couche d'accrochage:

Il est très fortement recommandé d'utiliser la sous couche d'accrochage lorsque les coefficients de dilatation entre le dépôt et le substrat sont très différents. Cette dernier permet de rapprocher les propriétés mécaniques et thermiques entre le dépôt et le substrat et de ce fait réaliser une meilleure adhérence [17].

Nous avons jugé judicieux de réaliser deux types de sous couches d'accrochage prise chacune en sandwich entre le dépôt et le substrat. La première sous couche d'accrochage est composée d'un alliage Ni-Al désigné par la nuance 75 E. La composition chimique de cette dernière est donnée sur le tableau 3. Cette sous couche à été réalisée par projection thermique sur une épaisseur de 2/10 mm. La deuxième est un mélange de poudres composé de 50% Cu, 30% Sn, 20% Ni, réalisée par traitement thermochimique (Slurry-coating) dans un four sous vide tableau 3.

Eléments	Ni	Al	Mn	Si	Mg
(%)	78	18	1,43	0.95	0,82

Tableau 3 : Composition chimique de la sous couche Ni-Al

III.1.3- Dépôt:

Afin de réaliser un multimatériau pouvant résister à l'usure, un matériau composite résultant de la combinaison de deux fils en acier de nuances respectives

55 E et 65 E a été déposé sur une épaisseur d'environ 8/10 mm.

* 65 E : acier au Chrome Manganèse

* 55 E : acier inoxydable 18/5.

L'analyse spectrochimique de ces deux fils par fluorescence de rayons X à montré la présence des éléments regroupés dans les tableaux 4 et 5

Eléments	Fe	Cr	Ni	Mn
(%)	61,6	20,2	7	0,2

Tableau 4 : Composition chimique du fil 55 E

Eléments	Fe	Mn	Cr	Si
(%)	93,2	3,03	1,98	0,35

Tableau 5 : Composition chimique du fil 65 E

Une analyse spectrochimique du dépôt seul réalisé par la jonction de ces fils par fusion à l'arc a donné les éléments regroupés dans le tableau 6

Eléments	Fe	Cr	Ni	Mn
%	80,7	10,2	4,4	1,95

Tableau 6: Composition chimique du dépôt

III.2- Equipements utilisés:

III.2.1- Equipement de slurry coating:

Le slurry coating, consiste à déposer un mélange de poudres sur un substrat. Un traitement thermique sous vide permet la diffusion de la poudre.

Le dispositif expérimental (figure 11) utilisé pour le traitement de la sous couche d'accrochage Cu-Ni-Sn déposée préalablement sur le substrat d'AS 13 est constitué des parties suivantes:

- 1- Pompe sous vide;
- 2- Tube en Pyrex;
- 3- Régulateur de température;
- 4- Four tubulaire.

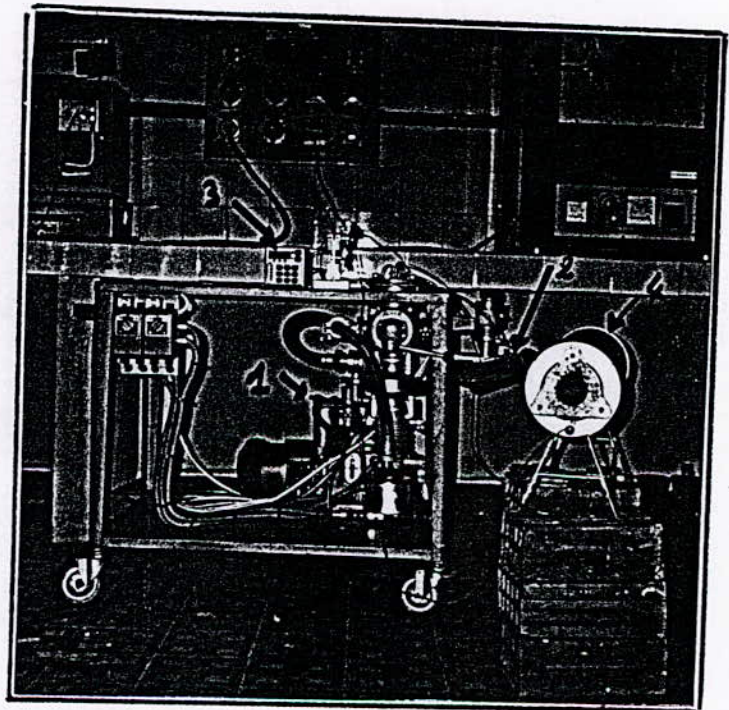


Figure 11: Dispositif expérimental utilisé

- Une pompe qui assure un vide primaire et secondaire de 10^{-3} à 10^{-5} torr.
- Un tube en Pyrex dans lequel sont introduits les échantillons et relié à la pompe par un tuyau.
- Un four tubulaire horizontal ouvert sur un coté pour introduire le tube dans son enceinte. Un thermocouple accroché au tube est relié à un régulateur de température.

Le dispositif a été conçu et réalisé au laboratoire de Métallurgie de l'Ecole.

Après avoir déposé la suspension contenant la poudre, on procède aux étapes suivantes:

- On place les échantillons dans le tube en Pyrex, on relie ce dernier à la pompe pour assurer un vide suffisant.
- Enfin on introduit le tube dans le four préalablement chauffé à la température du traitement

III.2.2- Equipements et paramètres de projection:

Le pistolet utilisé est un pistolet de projection thermique utilisant l'arc électrique comme source d'énergie. Ce pistolet de marque Spray 234, est alimenté par deux générateurs de courant continu.

Le poste de projection thermique est conçu de sorte que le matériel soit portatif .

Le pistolet se manipule avec souplesse et peut être soit manuel, soit automatisé de façon simple (monté sur un chariot de machine outil).

La qualité des dépôts produits dépend du débit de matière projetée. Ce dernier est fonction d'un certains nombre de paramètres, à savoir :

- Des paramètres liés à la mise en service du pistolet, et qui sont indispensables pour le bon fonctionnement de l'appareil. Ces derniers peuvent être résumés dans le tableau 7:

Pression d'air dans le compresseur	4 à 5,5 bars
Pression d'air dans la buse de projection	3 bars
Tension du générateur	30 v
Vitesse d'avance du fil métallique	0.064 m / s
Intensité de courant	100 A

Tableau 7 : Paramètres de mise en service du pistolet.

- Des paramètres de projection liés à la méthodologie de projection et au réglage du pistolet, à savoir : la distance de projection, vitesse d'avance de la buse, angle de

projection, etc...). Le choix de ces paramètres est d'une importance primordiale car ils ont une influence directe sur la mouillabilité des particules projetées, et donc sur la qualité du revêtement.

Les résultats d'une étude récente [15] concernant l'optimisation des paramètres de projection nous a permis de les exploiter pour réaliser notre dépôt. Ces derniers se présentent dans le tableau 8:

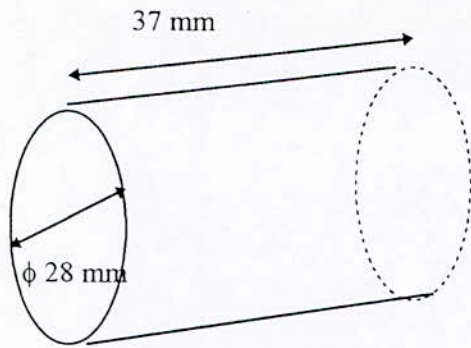
Distance de projection	140 mm
Vitesse d'avance de la buse	Balayage de gauche à droite de façon manuel avec une vitesse faible
Angle de tir	90 °

Tableau 8 : Paramètres de projection.

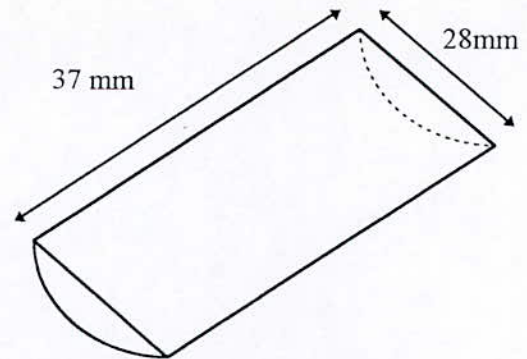
III.3- préparation des échantillons

III.3.1- Dimension des échantillons

A partir d'un lit de fusion d'AS-13 , on a fait la coulée de l'alliage sous forme de cylindres dans un moule en sable. Une fois refroidi, huit échantillons ont été confectionnés par usinage au tour en tenant compte de la commodité des essais nécessaires pour cette étude Figure 12.



a) Echantillons pour test d'arrachement



b) Echantillons pour slurry coating

Figure 12 : Schéma des échantillons utilisés

III.3.2- Décapage chimique:

Les surfaces des échantillons destinées à être revêtues ont été décapées avec du trichloro-éthylène ($\text{CHCl}=\text{CCl}_2$), puis avec du méthanol, afin d'enlever les graisses et contaminants dus à l'usinage au tour et au polissage qui l'a suivi. Ces deux produits permettent de débarrasser toutes les traces de graisses, d'huile et d'impuretés se trouvant à la surface.

III.3.3- Décapage au Zincate:

Vu la très grande oxydabilité de l'Aluminium, la surface en contact avec l'air se recouvre aussitôt d'une nouvelle couche d'oxyde d'une façon durable. Celle-ci constitue un obstacle à toute diffusion éventuelle des éléments en contact avec la surface. Afin d'éliminer la couche d'oxyde et rendre la surface apte à accepter le dépôt, nous avons effectué un décapage au Zincate.

Cette méthode permet par déplacement chimique d'éliminer la couche d'oxyde de type Al_2O_3 (barrière de diffusion) et de déposer à sa place une couche de zinc très adhérente sur la surface du substrat.

Le procédé de préparation des surfaces comprend plusieurs étapes, à commencer par un polissage au papier 600, un nettoyage au trichloroéthylène, ensuite un dégraissage électrolytique en bain alcalin inhibé, et enfin la mise en bain dans le « zincate de soude » pendant quelques minutes

Le décapage au zincate est effectué pour les échantillons devant accepter la sous couche d'accrochage du type Cu-Ni-Sn.

III.4- Elaboration et dépôt de la sous couche Cu-Ni-Sn:

L'élaboration de cette sous couche d'accrochage se fait par mélange sous forme de suspension des deux produits principaux suivants:

- 1- Un liant de type (diluant + vernis cellulosique ou venilique)
- 2- La poudre constituée de 50 % Cu, 30 % Ni, 20 % Sn à très faible granulométrie

Après préparation de la suspension, cette dernière est déposée avec un pinceau sur la surface du substrat.

III.4.1- Cycle thermique:

Le dépôt de la suspension sera suivi d'un traitement thermique dans une atmosphère sous vide afin de:

- mettre les échantillons à l'abri de toute oxydation possible
- assurer une bonne diffusion des éléments présents en surface

Le choix de la température et de la durée du traitement a été fait sur la base de l'étude bibliographique [16] et avec une comparaison des diagrammes d'équilibres des éléments Al, Cu, Ni, Sn, Si. Nous avons opté pour une température de 500 °C pendant 8h. Cette température correspond au domaine où presque toutes les phases visées existent, alors que la durée de maintien a été jugée suffisante pour la diffusion des éléments.

Après traitement, les échantillons sont refroidis à l'intérieur du tube dans l'enceinte du four. Ils sont ensuite brossés sous l'eau et nettoyés à l'acétone de façon à éliminer les résidus de la suspension.

III.5- Rugosification:

Pour rendre la surface des échantillons prête pour recevoir le dépôt, la méthode de rugosification utilisée est le grenailage par jet d'abrasif métallique à pression de 07 bars. Cette rugosification assure les qualités d'adhérence et d'accrochage du dépôt.

Etant donné que le substrat est un alliage d'Aluminium, l'opération de rugosification se fait avec beaucoup de soins et de prudence pendant un temps très court d'exposition au jet d'abrasif.

III.6- Post-traitements:

Le post-traitement thermique envisagé a été effectué sur 4 échantillons:

- Deux ayant subi le slurry coating Cu-Ni-Sn
- Deux sur lesquels a été projetée la sous-couche type Ni-Al.

Parmi les divers traitements thermiques effectués sur les dépôts réalisés par projection thermique, nous avons opté pour un recuit d'homogénéisation.

Ce recuit d'homogénéisation a été fait à une température de 420 °C dans le four sous vide, avec un temps de maintien de 2 heures.

Le refroidissement a lieu dans le four sous une atmosphère normale.

* Méthodes et techniques de caractérisation mises en œuvre *

Pour comprendre les phénomènes qui se sont produits au cours de la réalisation du multimatériau et afin de mieux le caractériser, il a été nécessaire d'utiliser un ensemble de techniques physico-chimiques et mécaniques permettant des investigations tant au niveau des différentes couches formant le multimatériau qu'au niveau des interfaces.

III.7- Analyse métallographique:

III.7.1- Micrographie optique:

Cette méthode est la première utilisée pour contrôler la qualité d'un dépôt. Son but principal est la mise en évidence de la structure de l'échantillon et des inclusions non métalliques se trouvant à sa surface. Elle permet aussi de mettre en évidence la grandeur et la forme des grains, les divers constituants du multimatériau, ainsi que la structure particulière de certains traitements et révèle les défauts infimes (inclusions, microfissures, porosités, écaillages, etc....)

La qualité des résultats obtenus dépend essentiellement du soin apporté à la préparation des échantillons.

Une fois la projection et le post-traitement réalisés, nous avons procédé à une préparation convenable des surfaces à observer. Ces dernières ont subi des polissages mécaniques sur du papier abrasif à grains de plus en plus fins (120, 320, 600, 1000, 1200) et enfin une finition sur papier feutre à l'aide d'une suspension d'alumine.

La mise en évidence de la structure micrographique est réalisée par une attaque chimique à la soude caustique (10 à 20 %) pendant environ 5 mn, suivi d'un rinçage à l'eau

Les observations micrographiques et les photos ont été prises avec différents grossissements au niveau de l'interface et sur le substrat pour les quatre échantillons

(post-traités et non post-traités) afin de mieux comprendre les processus physico-chimiques qui en découlent, à savoir l'interdiffusion entre le dépôt et le substrat et l'écaillage produit

III.7.2- Microscopie électronique à balayage (M.E.B)

Cette méthode permet d'observer la morphologie des dépôts et des interfaces. Elle présente deux avantages sur la microscopie optique: fort grossissement et importante profondeur de champ. Le principe du MEB repose sur l'analyse des électrons secondaires et des électrons rétrodiffusés de l'échantillon excité par un faisceau d'électrons incidents balayant la surface observée par l'intermédiaire d'un canon à électrons. Ces effets de charge sont néfastes pour l'obtention d'une bonne image, on cherche à les éliminer au maximum en métallisant les échantillons non conducteurs.

III.8- Microanalyse par sonde EDAX:

Cette méthode est extrêmement sensible. La surface analysée est de l'ordre du diamètre du spot électronique excitateur ($1\mu\text{m}^2$) et sa profondeur analysée est de quelques microns.

L'émission de rayonnement X par une substance peut se produire sous l'effet d'un bombardement électronique. Cette émission X est due au réarrangement spontané du cortège électronique des atomes de l'échantillon ionisé par bombardement. Cette réorganisation donne lieu à des raies d'émission (K, LI, LII, ...) caractéristiques en fréquence et en intensité des éléments réparties en plus ou moins grande proportion dans le dépôt analysé.

En balayant la surface de l'échantillon avec le spot et en calant le spectromètre sur une raie d'émission d'un élément choisi, on peut obtenir une image X de l'échantillon donnant la répartition de l'élément considéré.

Les analyses ponctuelles et globales sont effectuées par la sonde du microscope, qui utilise l'émission. Le traitement du spectre ainsi obtenu est fait par un micro-ordinateur.

Notons par ailleurs que la microsonde ne détecte pas les éléments chimiques dont le numéro atomique est inférieur à celui du sodium ($z < 11$).

III.9- Essai de dureté: Figure 13:

La dureté d'un métal est la résistance qu'il oppose à la pénétration d'un autre corps plus dur que lui.

L'essai consiste à exercer une charge F (constante) sur un pénétrateur. La valeur de la dureté est donnée par le rapport de la charge sur la surface de l'empreinte.

Dans notre présent travail on a effectué un test de dureté de type Brinell. Ce dernier consiste à imprimer une bille en acier extra-dur.

A cet effet nous avons exercé une charge de 15.625 Kgf, sur une bille de diamètre 1.25 mm.

La lecture de la dureté se fait directement sur des tables faisant correspondre le diamètre de l'empreinte à la dureté, suivant la charge appliquée.

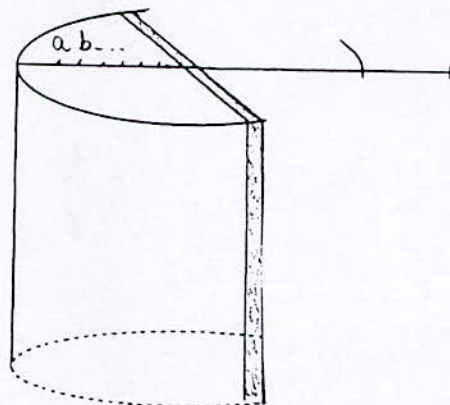


Figure 13: Répartition des prises de dureté HB.

III.10- Essai de microdureté Figure 14 :

La microdureté caractérise la résistance à la déformation d'une phase dans la matrice et les valeurs obtenues permettent de distinguer les différentes phases présentes.

L'essai consiste à imprimer dans la phase à tester un pénétrateur en forme de pyramide droite à base carrée, d'angle au sommet 136° , effectué sous une charge choisie de telle sorte que l'empreinte soit mesurée avec une plus courte marge d'erreur.

Nous avons à cet effet travaillé avec une charge de 200 g.

Après l'application de la charge le pénétrateur laisse une empreinte en losange, la diagonale de l'empreinte est mesurée à l'aide d'une règle graduée située sur l'oculaire.

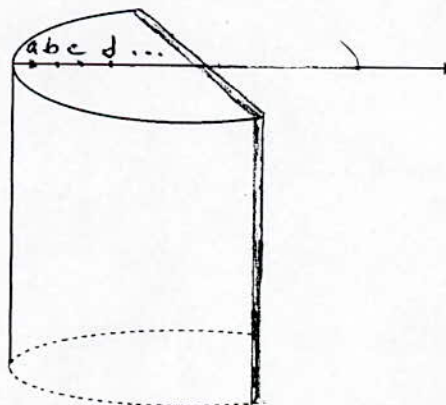
La valeur de la microdureté mesurée est calculée par la formule suivante :

$$Hv = 0.189 f / d^2$$

d: moyenne des deux diagonales de l'empreinte (μm)

f: charge d'essai en newton.

La lecture de la microdureté se fait directement sur des tables faisant correspondre la diagonale moyenne à la microdureté suivant la charge appliquée.



Microdureté HV

Figure 14: Répartition des prises de microdureté HV.

III.11- Test d'arrachement:

Le test d'arrachement est une méthode directe pour accéder à la résistance de l'interface. Ce dernier consiste à soumettre à un effort progressif d'extension, un assemblage formé d'un échantillon ayant été rechargé sur la surface circulaire transversale et un autre échantillon standard de même dimension et de même forme collés par une colle spéciale M BONDE 200 ADHESIVE dotée d'un pouvoir collant très fort sur les matériaux. Figure 15

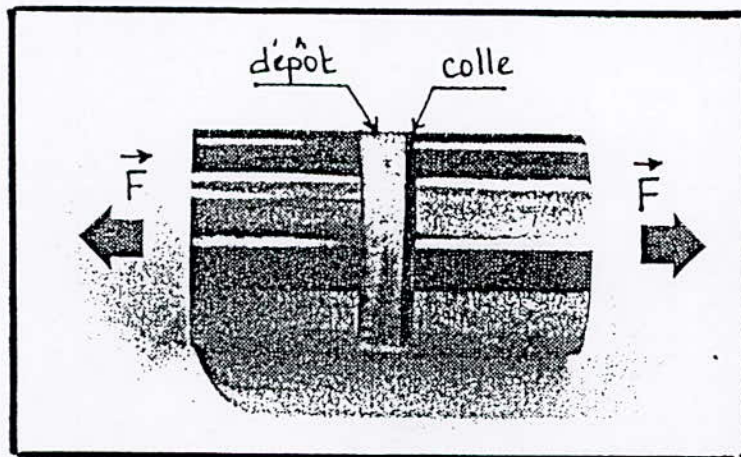


Figure 15 Echantillon relatif au test d'arrachement.

La manipulation est réalisée sur une machine de traction servo-hydraulique équipée d'un porte échantillon polyvalent qui peut s'adapter non seulement aux éprouvettes normalisées, dites proportionnelles, mais également à des éprouvettes de formes géométriques variables.

Notre test consiste à tirer de part et d'autre des extrémités de l'éprouvette réalisée jusqu'à rupture. Cette dernière peut se produire au niveau de la colle, ou au niveau du dépôt, c'est à dire l'arrachement de la calotte déposée sur la surface transversale. La charge à la rupture est directement envisagée. La contrainte de rupture est obtenue en divisant la charge par la section connue de l'éprouvette:

$$\sigma_r = \frac{F_r}{S}$$

Le diamètre de l'éprouvette est de 28 mm, la section correspondante est

$$S = \frac{\pi d^2}{4} = 615.75 \text{ mm}^2$$

CHAPITRE IV

RESULTATS ET DISCUSSION

CHAPITRE IV

RESULTATS ET DISCUSSION

Les méthodes de caractérisation physico-chimiques et mécaniques ainsi que les préparations préalables inhérentes mises en œuvre ont été succinctement décrites dans le chapitre précédent.

Les résultats obtenus et leurs commentaires respectifs seront présentés ci-dessous de la manière suivante:

1- L'étude métallographique réalisée par microscopie optique et par microscopie électronique à balayage (MEB) fera l'objet d'un choix des photographies les plus descriptives.

Dans la mesure du possible et pour des raisons de non encombrement du mémoire, seules les photographies jugées meilleures seront présentées.

2- L'analyse ponctuelle a été réalisée par microsonde électronique (EDAX). Le choix des phases et des constituants a été fait selon leur forme, leur taille et leur contraste.

Nous avons quand même parcouru les trois zones formant le multimatériau.

Pour cette étude, les résultats seront présentés comme suit:

- a)- Illustration de l'image de chaque multimatériau
- b)- Les spectres des analyses qualitatives des différents points (mentionnés sur la photographie sus-présentée) .
- c) - L'analyse quantitative (sous forme de tableaux) des points suscités.

3- les courbes relatives à l'essai de dureté HB réalisé à partir du cœur (substrat) jusqu'au dépôt (acier) en passant par l'interface (Ni-Al ou Cu-Ni-Sn)

4- Les courbes de la microdureté HV réalisées de la même façon que les duretés HB mais avec des intervalles plus rapprochés.

5- L'histogramme du test d'arrachement relatif aux 4 échantillons.

La présentation de ces résultats et de leur commentaires respectifs seront suivis d'une interprétation globale mettant en évidence le lien entre eux.

IV.1- ETUDE METALLOGRAPHIQUE

Echantillon 1: Multimatérialu réalisé avec sous-couche type :
Ni-Al non post-traité

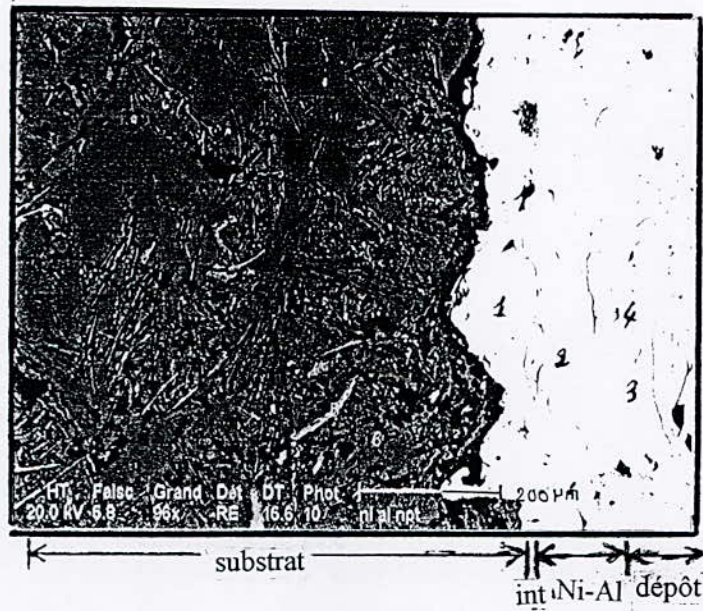


Photo MEB X 96

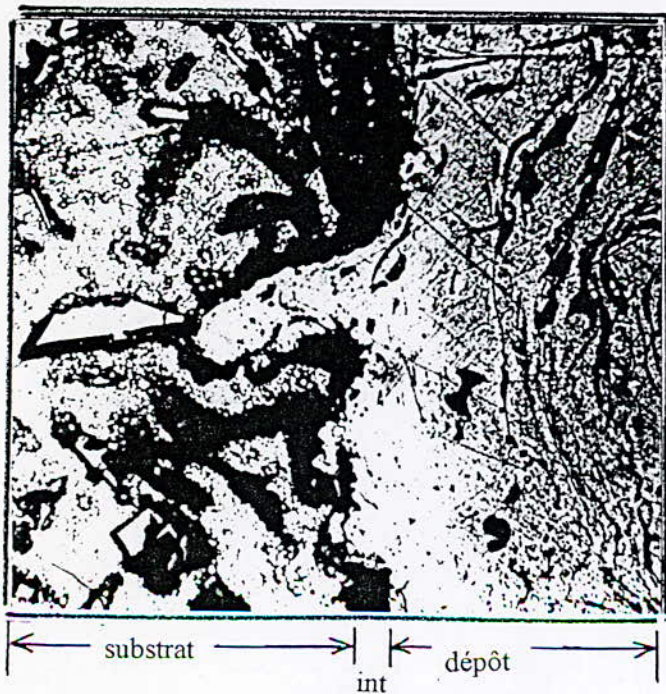


Photo optique X 200

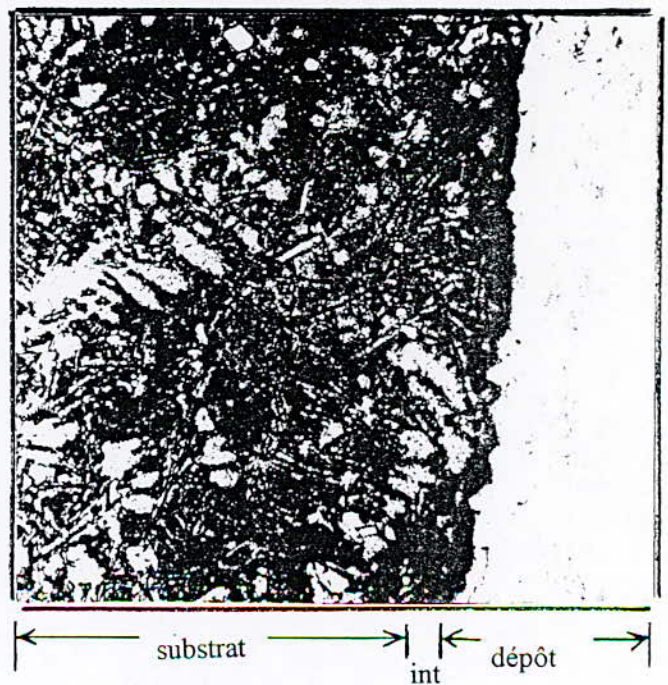


Photo optique X 50

Interprétation:

On remarque une certaine uniformité structurale du dépôt avec des couches allongées parsemées de petits pores et de quelques oxydes. Le substrat d'AS-13 a une structure non uniforme où l'on remarque une distribution aléatoire des lamelles et des dendrites.

Au niveau de l'interface une fine couche grise foncée est observée. Celle-ci pourrait être un début de mélange de phase entre les éléments du dépôt et ceux du substrat.

Echantillon 2: Multimatériau réalisé avec sous-couche type:
Ni-Al post-traité

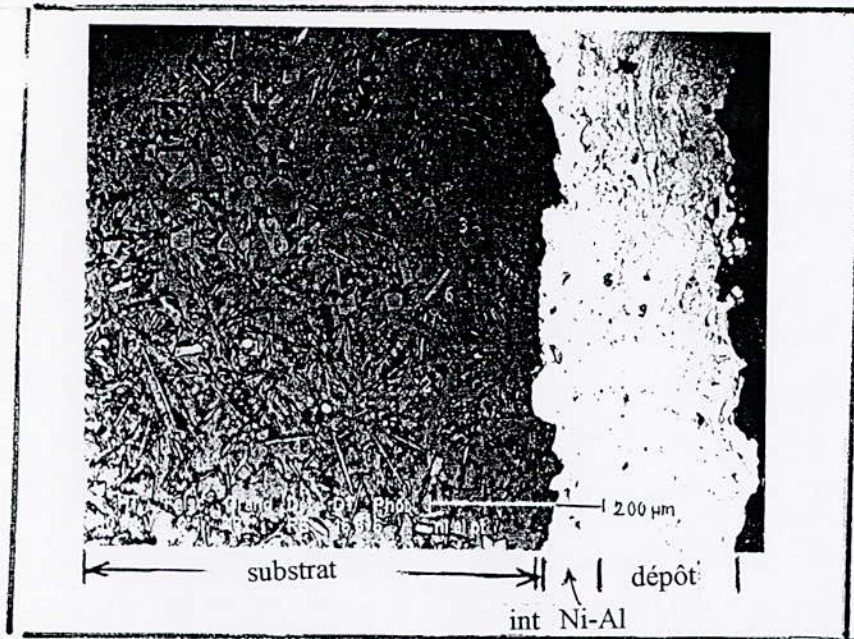


Photo MEB X 48



photo optique X 200

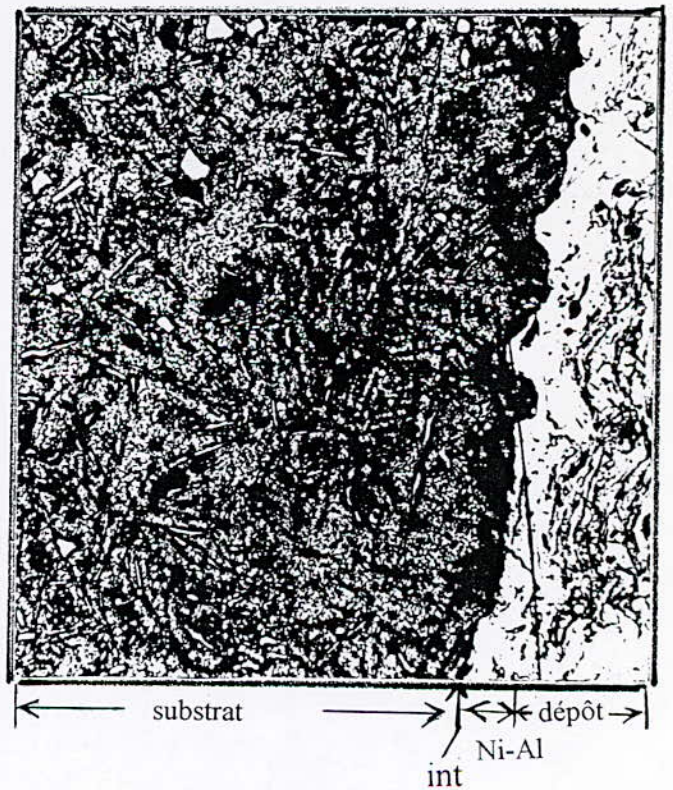


photo optique X 50

Interprétation:

Le dépôt est encore plus uniforme avec allongement des couches et existence inévitable de pores et d'oxydes.

Le substrat a une structure plus uniforme avec une répartition presque similaire des différents constituants (lamelles, dendrites,) dans tout le volume.

La sous-couche Ni-Al est plus nette que dans les échantillons non post-traités précédents. En effet sa couleur est blanche brillante et s'arrête de façon nette au niveau du substrat.

Elle est elle même parsemée de particules provenant sans doute de la diffusion d'éléments du substrat et du dépôt.

Echantillon 3: Multimatérialu réalisé avec sous-couche type:
Cu-Ni-Sn non post-traité

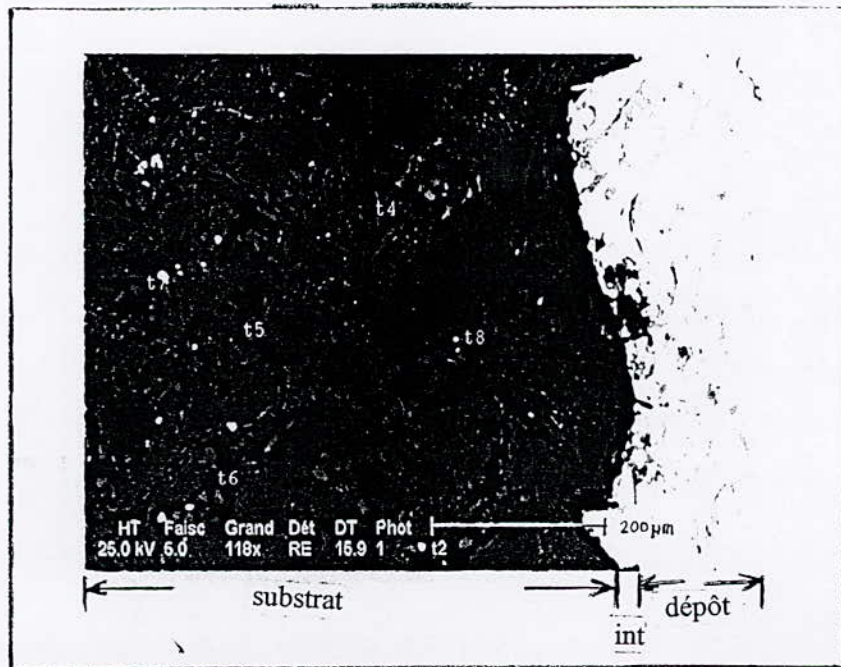


Photo MEB X 118

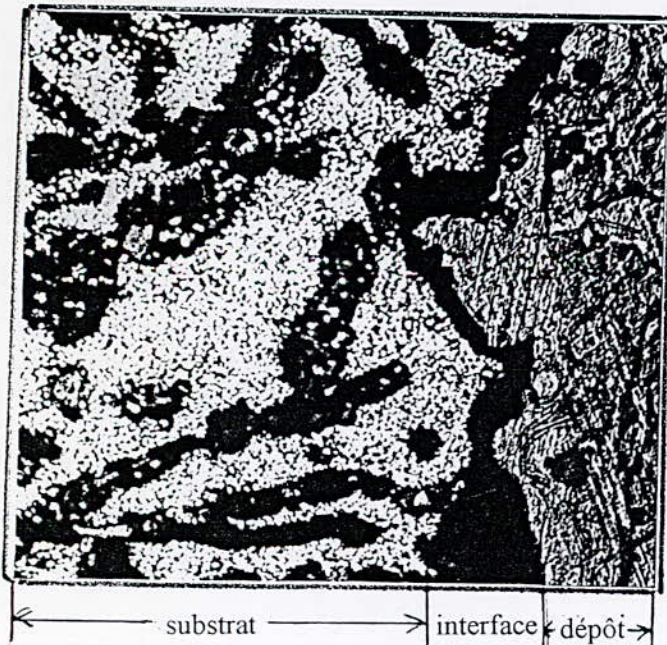


photo optique X 200

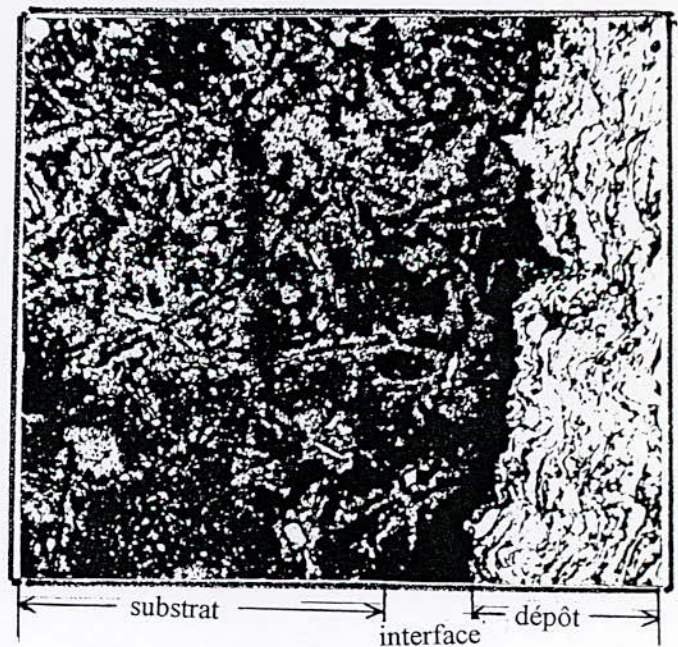


photo optique X 50

Interprétation:

Le dépôt formé de couches allongées et ondulées avec la présence d'oxydes, de pores et de particules non fondues ressemble à celui de l'échantillon 1.

Le substrat est par contre plus uniforme que celui de l'échantillon N ° 1 mais les phases, les lamelles et les plaquettes qui le constituent sont plus grossières.

Au niveau de l'interface, on remarque la même couche fine noirâtre que dans le premier échantillon. Celle-ci est sans doute la sous couche d'accrochage Cu-Ni-Sn avec un début de diffusion du côté du substrat et du dépôt.

Echantillon 4: Multimatérialu réalisé avec sous-couche type:
Cu-Ni-Sn post-traité

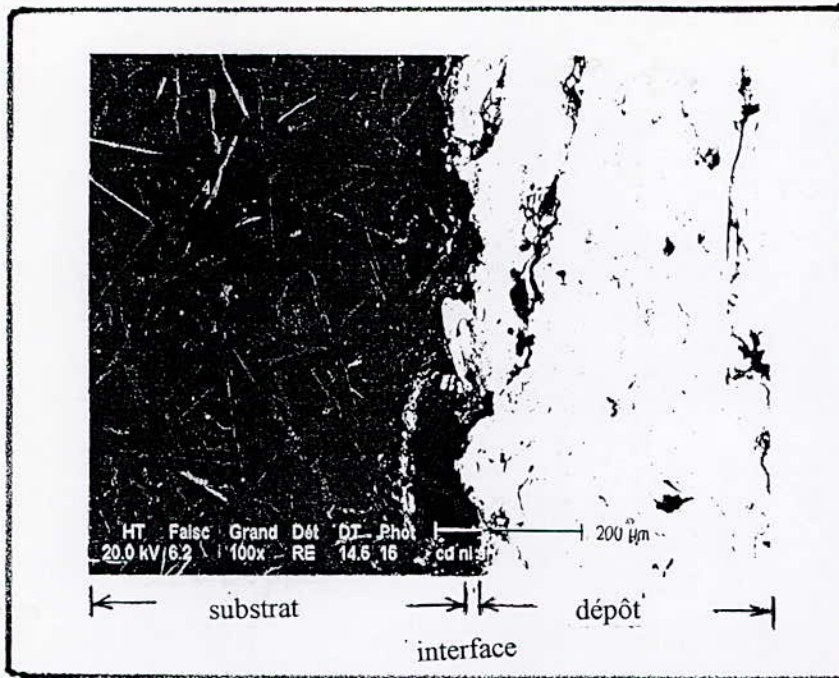


Photo MEB X 100

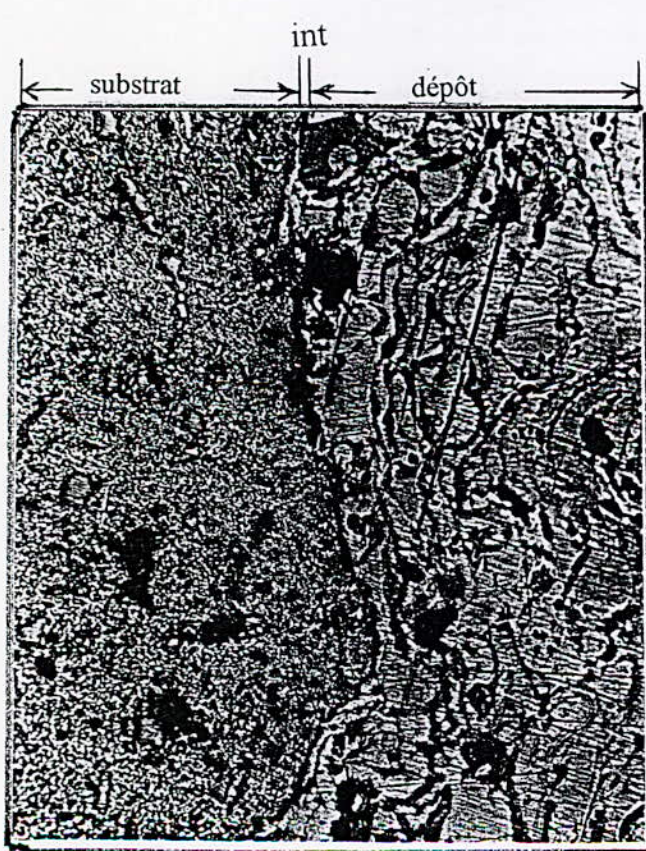


photo optique X 200

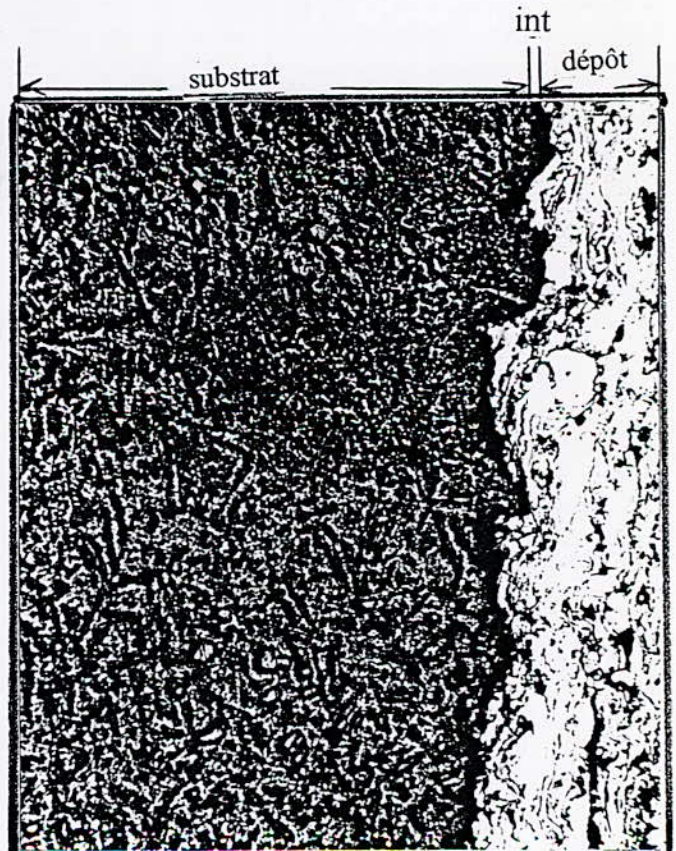


photo optique X 50

Interprétation:

La structure du dépôt est classique. Cependant on peut observer des phases fines et allongées en longueur particulièrement au voisinage de l'interface.

C'est donc la diffusion qui a eu lieu lors du post-traitement réalisé.

La structure du substrat a, elle même, changé par rapport à celle de l'échantillon non post-traité avec une répartition homogène des lamelles est des particules de couleur claire.

De la même manière, on remarque au niveau de l'interface des phases blanches allongées provenant d'une diffusion des éléments du dépôt à travers l'interface.

IV.2- ANALYSE PONCTUELLE EDAX

Echantillon 1: Multimatériau réalisé avec sous-couche type :
Ni-Al non post-traité

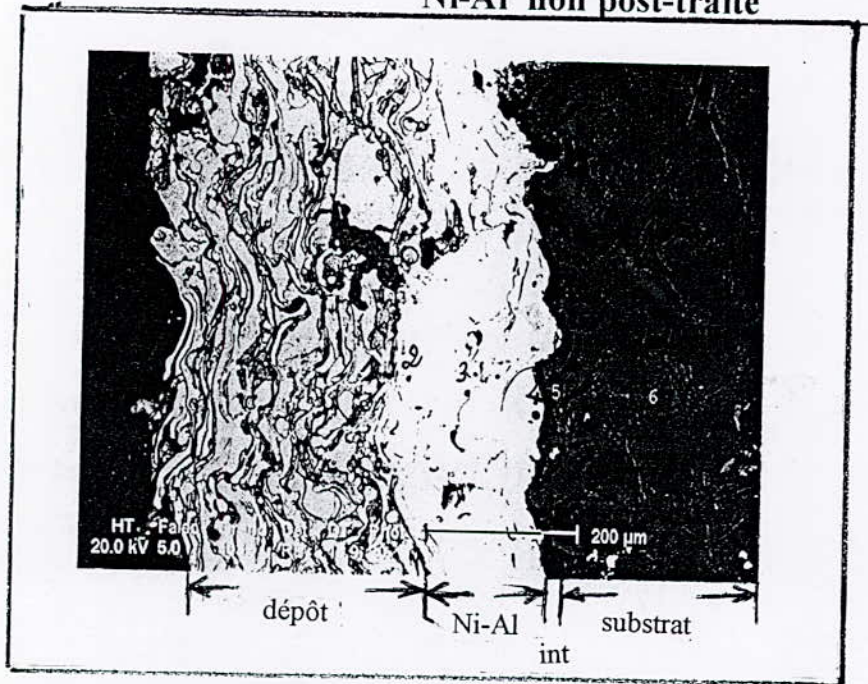
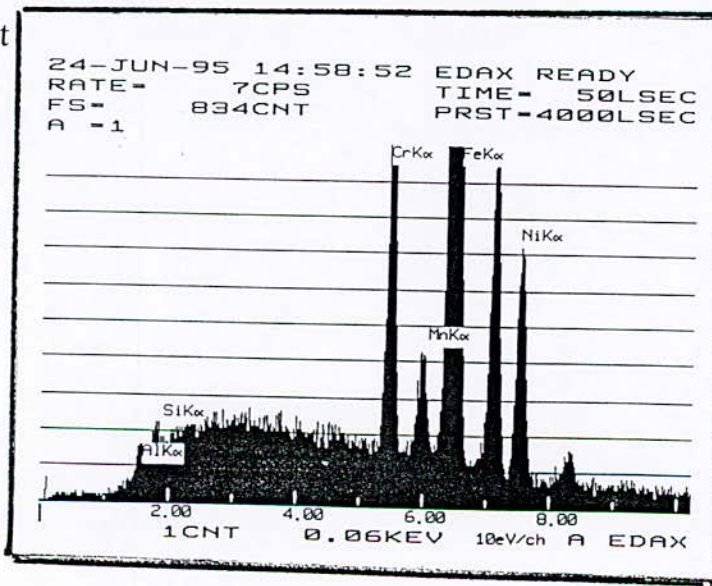


Photo MEB X 103

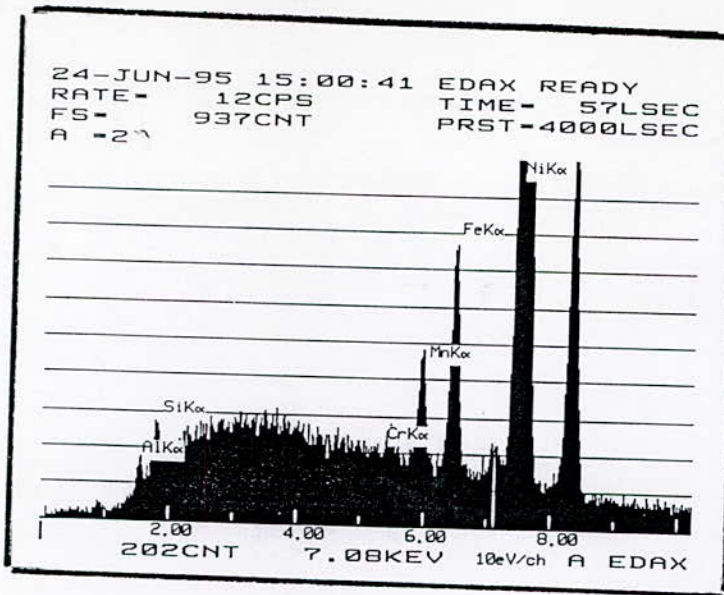
Dépôt



(%)

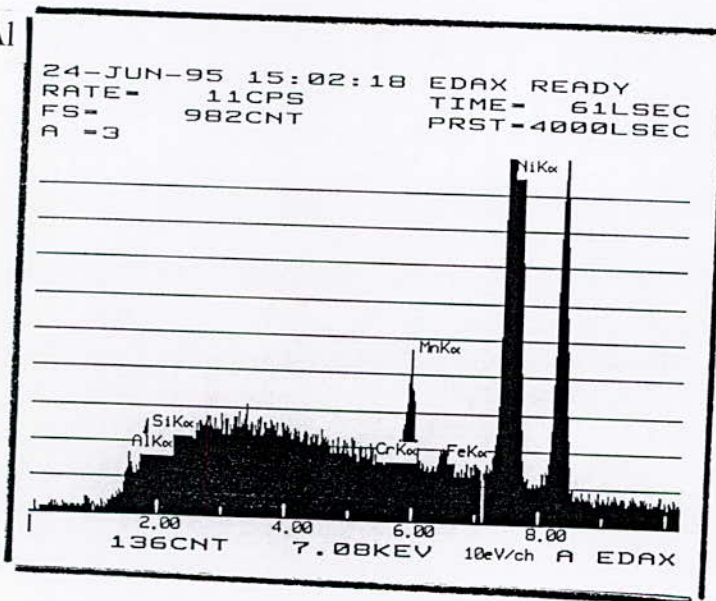
Cr	7.81
Mn	1.75
Fe	79.04
Ni	10.47
Al	0.54
Si	0.39
Cu	----
Zn	-----
Sn	-----

NiAl



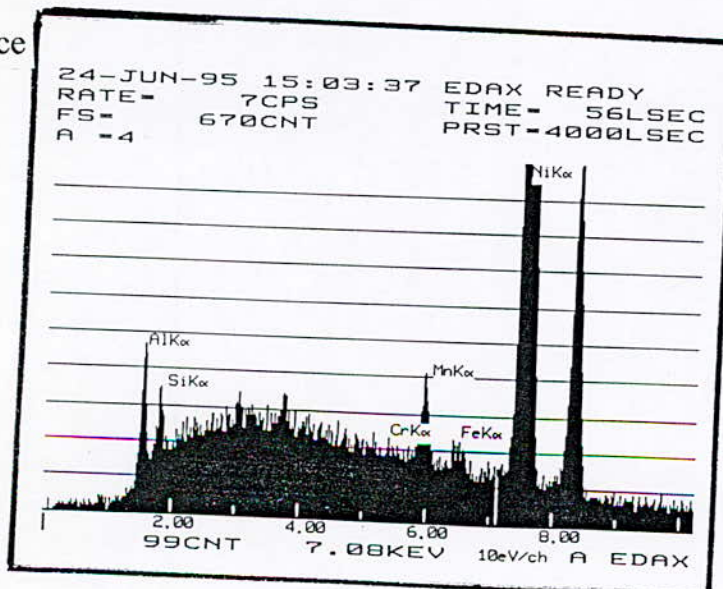
	(%)
Cr	0.64
Mn	2.08
Fe	4.43
Ni	91.67
Al	0.56
Si	0.61
Cu	----
Zn	-----
Sn	-----

NiAl



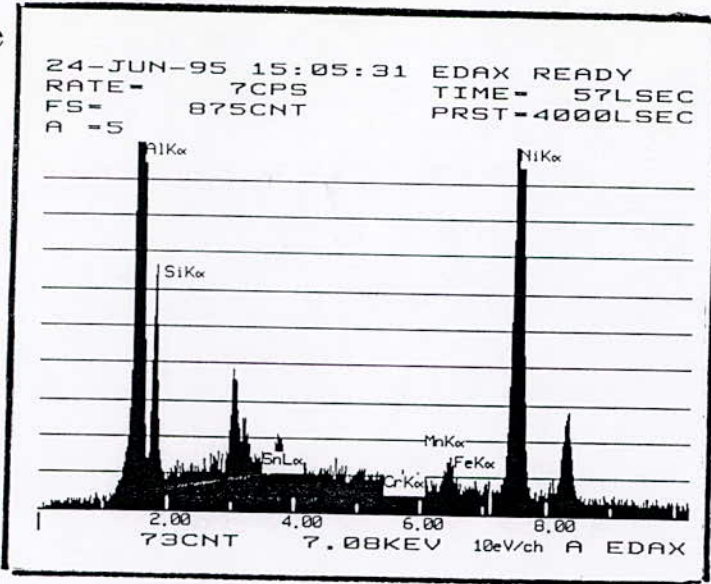
	(%)
Cr	0.22
Mn	1.91
Fe	0.38
Ni	96.37
Al	0.69
Si	0.62
Cu	---
Zn	---
Sn	---

Interface



	(%)
Cr	0.35
Mn	1.60
Fe	0.52
Ni	93.68
Al	2.95
Si	0.89
Cu	---
Zn	---
Sn	---

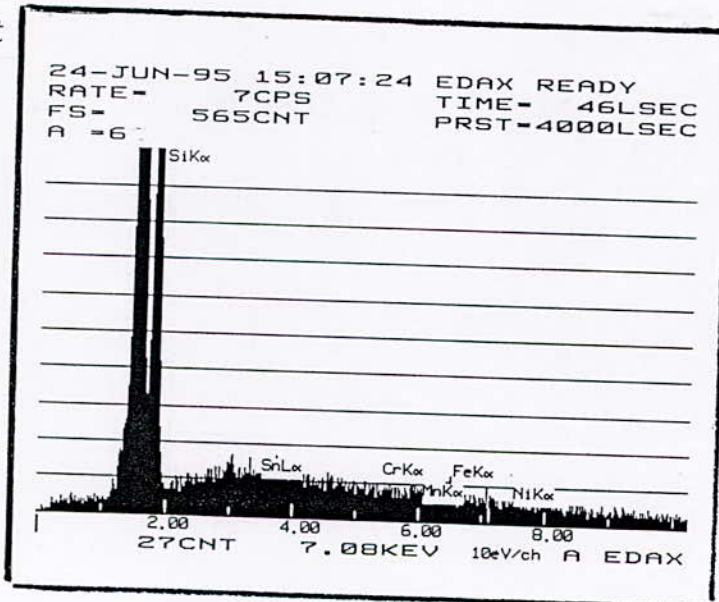
Interface



	(%)
Cr	0.05
Mn	0.39
Fe	1.05
Ni	35.79
Al	57.52
Si	5.19
Cu	---
Zn	---
Sn	---

(%)

Substrat



Cr	0.28
Mn	0.41
Fe	1.02
Ni	0.42
Al	71.06
Si	26.63
Cu	---
Zn	---
Sn	0.17

Interprétation:

Comme remarqué lors de l'analyse métallographique, le substrat et le dépôt sont de structure classique. Les analyses ponctuelles réalisées sur des particules préférentielles en parcourant les trois zones du multimatériau ont révélé la présence des éléments principaux (Al et Si) au niveau du substrat et la présence de Fe, Cr, Ni et Mn au niveau du dépôt alors qu'au niveau de l'interface, les deux analyses (Pts 4 et 5) montrent déjà la présence mais en faible quantité des éléments du dépôt et du substrat, en plus du Ni et de l'Al.

Echantillon 2: Multimatérialu réalisé avec sous-couche type:
Ni-Al post-traité

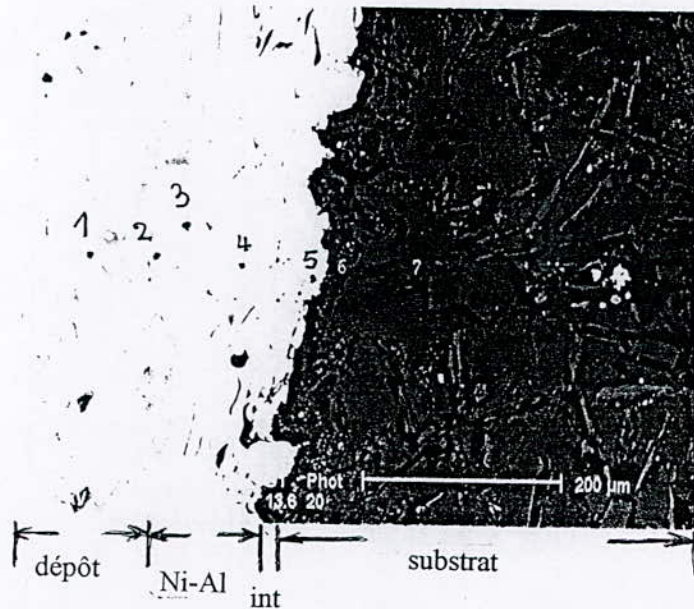
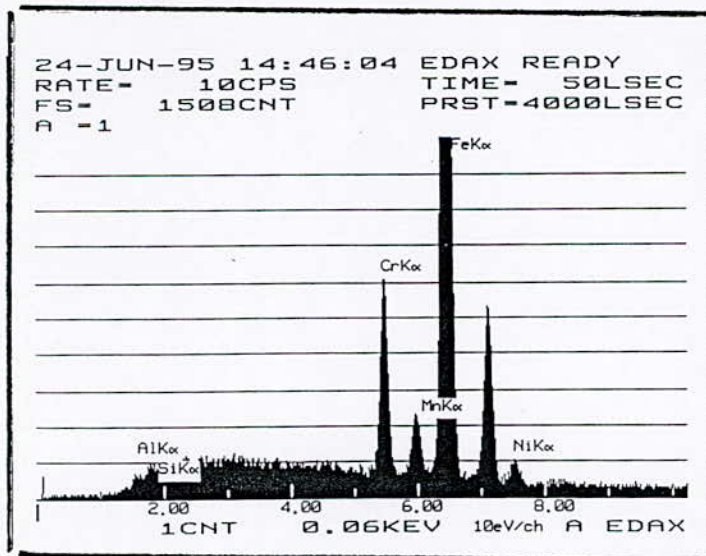


Photo MEB X 133

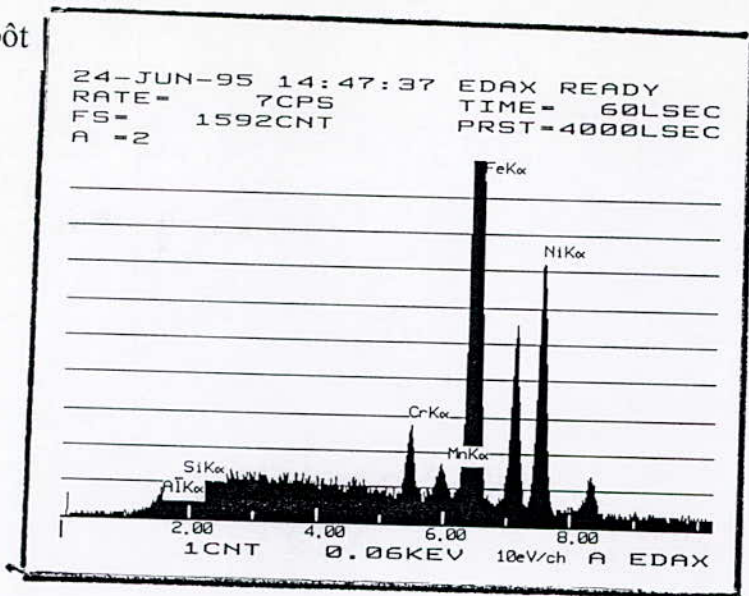
Dépôt



(%)

Cr	8.14
Mn	2.32
Fe	86.66
Ni	2.27
Al	0.27
Si	0.35
Cu	----
Zn	----
Sn	----

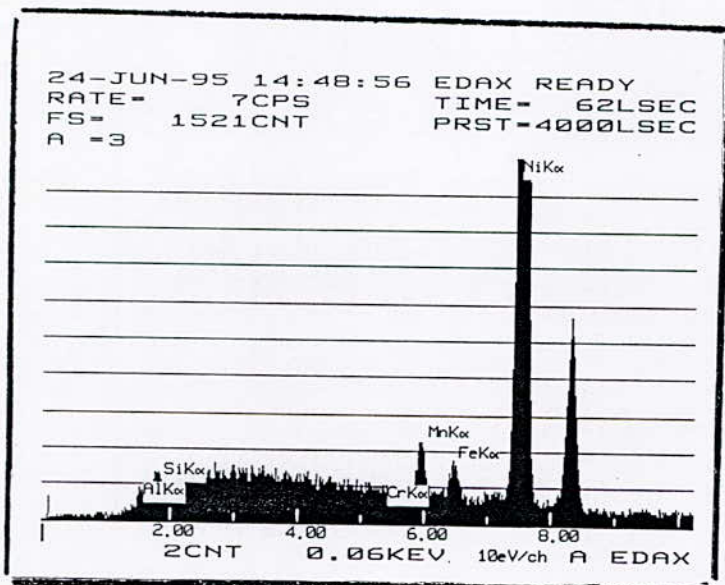
Dépôt



(%)

Cr	2.42
Mn	1.36
Fe	73.80
Ni	21.92
Al	0.19
Si	0.31
Cu	----
Zn	----
Sn	----

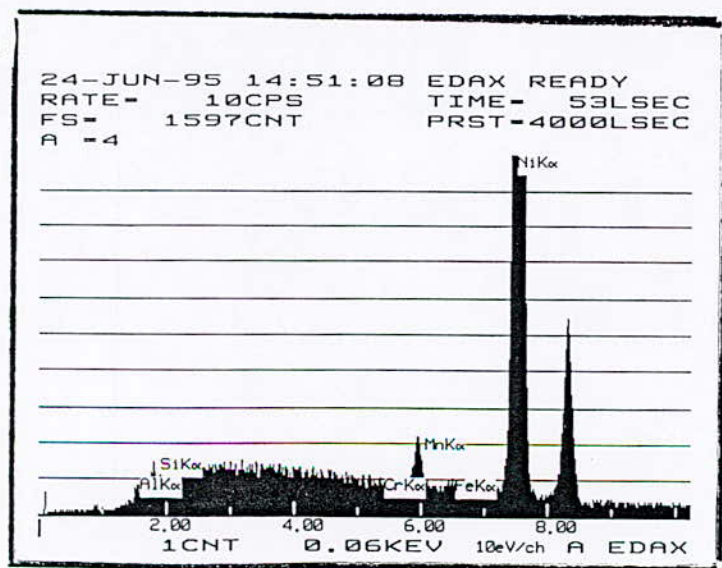
NiAl



(%)

Cr	0.12
Mn	2.03
Fe	1.22
Ni	95.43
Al	0.46
Si	0.74
Cu	----
Zn	----
Sn	----

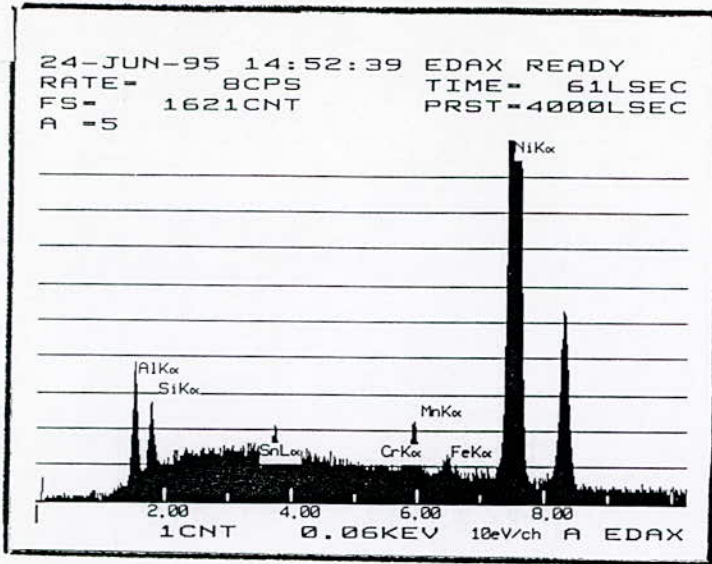
NiAl



(%)

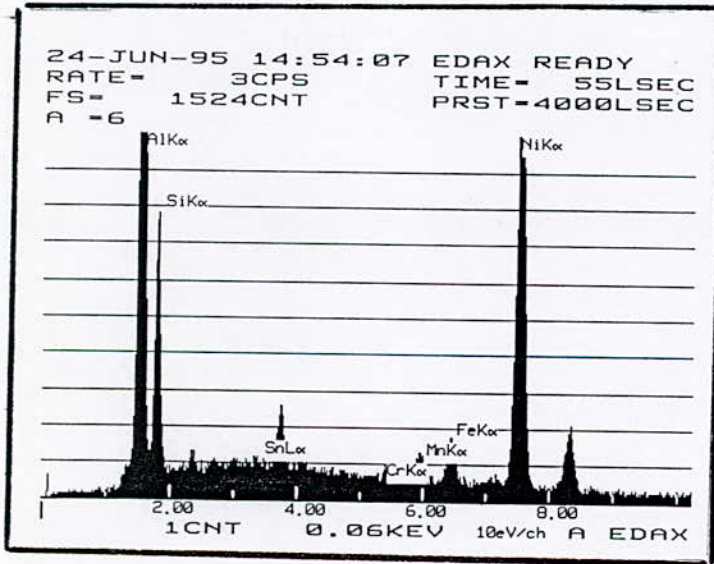
Cr	0.09
Mn	1.79
Fe	0.15
Ni	96.84
Al	0.52
Si	0.60
Cu	---
Zn	---
Sn	---

Interface



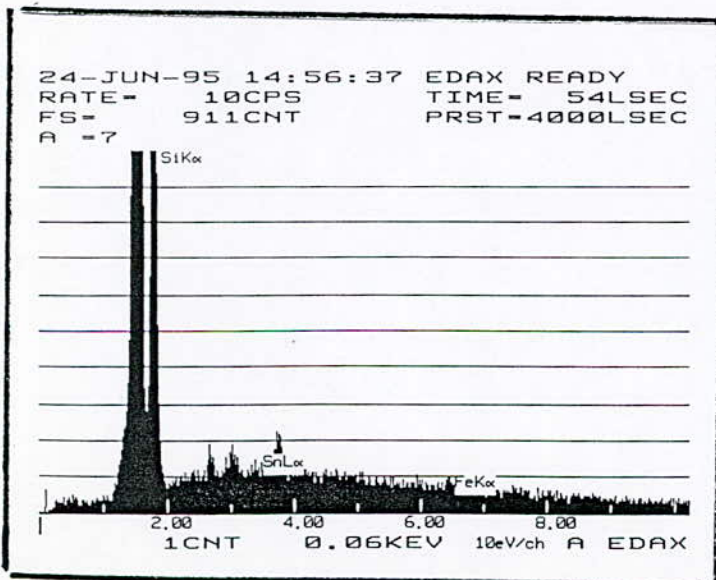
	(%)
Cr	0.12
Mn	1.64
Fe	0.39
Ni	91.70
Al	4.026
Si	1.86
Cu	---
Zn	---
Sn	0.26

Interface



	(%)
Cr	0.35
Mn	1.38
Fe	2.71
Ni	39.63
Al	46.26
Si	9.68
Cu	---
Zn	---
Sn	---

Substrat



	(%)
Cr	0.18
Mn	0.34
Fe	0.66
Ni	0.61
Al	79.60
Si	18.61
Cu	---
Zn	---
Sn	---

Interprétation:

La présence au niveau de l'interface de l'ensemble des éléments constituant le multimatériau est la première constatation que l'on fait. Elle vient d'ailleurs confirmer l'analyse métallographique au MEB montrant la netteté de la frontière entre le substrat et le dépôt indiquant l'interdiffusion des différents éléments.

Notons particulièrement que le Nickel, élément majeur de la sous couche Ni-Al est l'élément qui a le plus diffusé. Sa présence est révélée dans presque toutes les analyses effectuées à travers le multimatériau (Pts 1, 2, 3, 4, 5,). Ce constat met en évidence l'utilisation des sous-couches Ni-Al à base de Nickel dans beaucoup d'assemblages métalliques par projection thermique.

Echantillon 3: Multimatériau réalisé avec sous-couche type:
Cu-Ni-Sn non post-traité

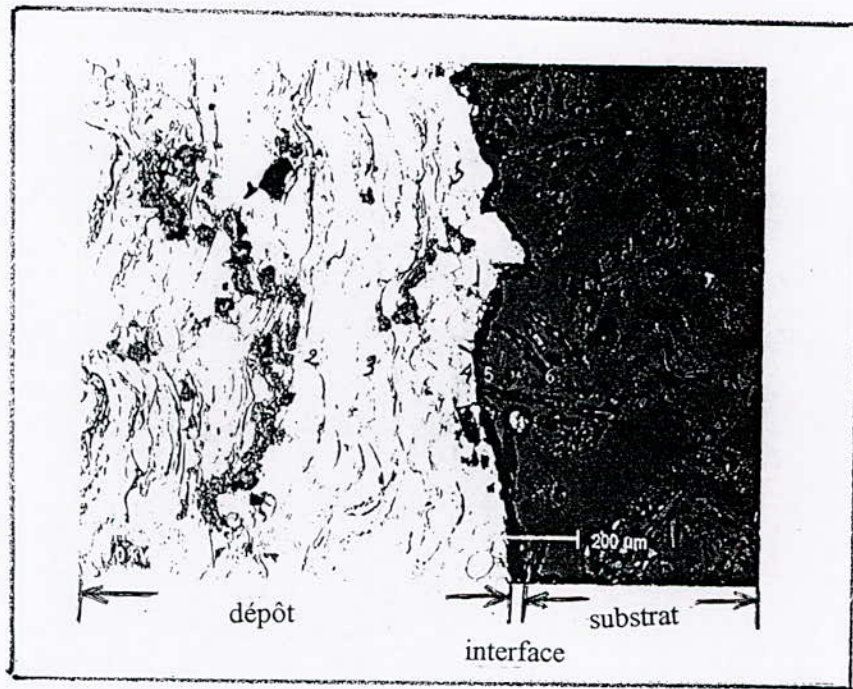
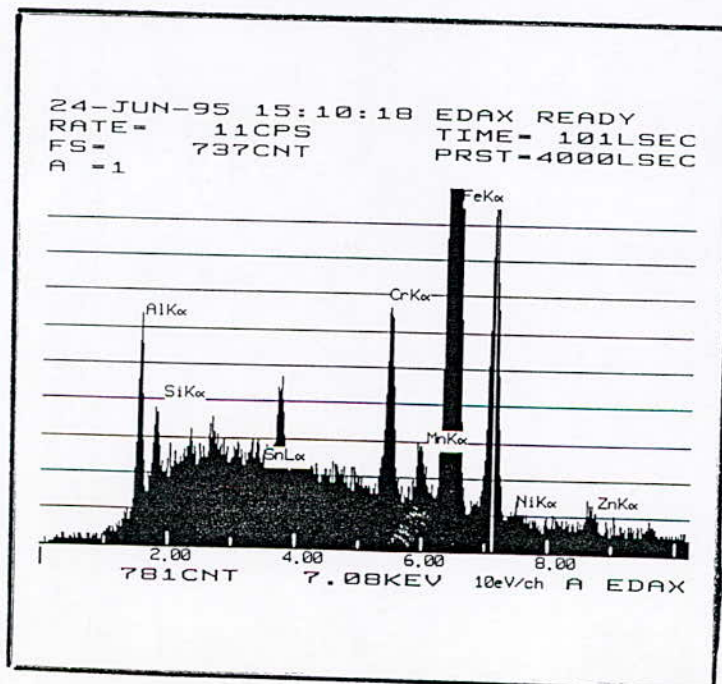


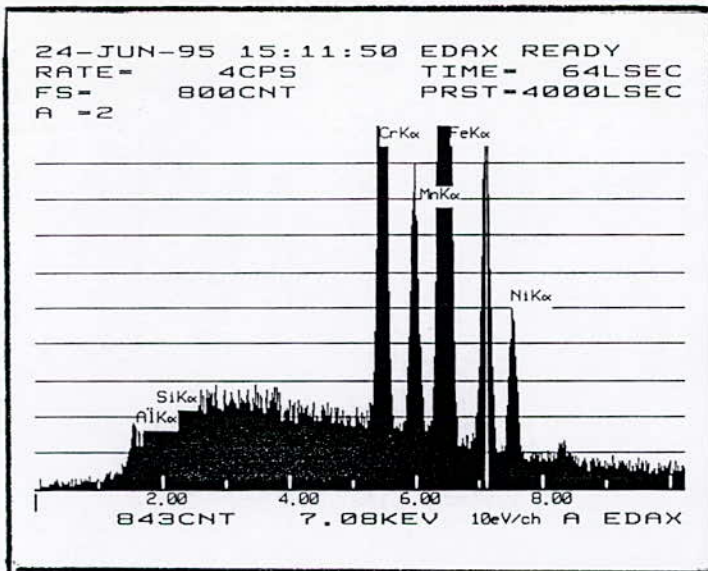
Photo MEB X 102

Dépôt



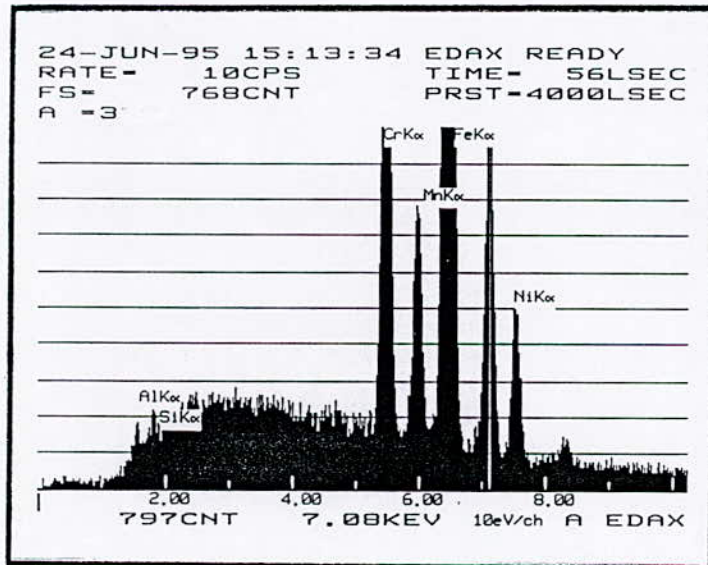
Cr	3.67
Mn	0.95
Fe	86.70
Ni	0.86
Al	4.29
Si	1.19
Cu	0.32
Zn	1.86
Sn	0.16

Dépôt



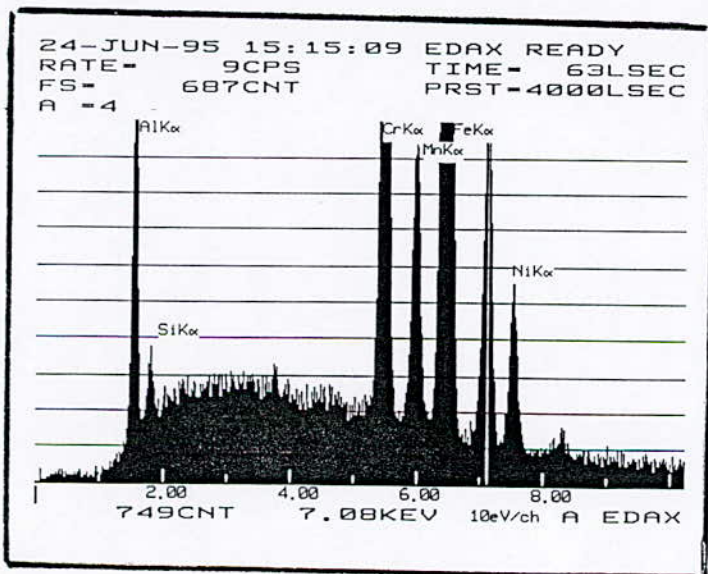
Cr	14.93
Mn	3.50
Fe	75.04
Ni	5.68
Al	0.49
Si	0.37
Cu	---
Zn	---
Sn	---

Dépôt



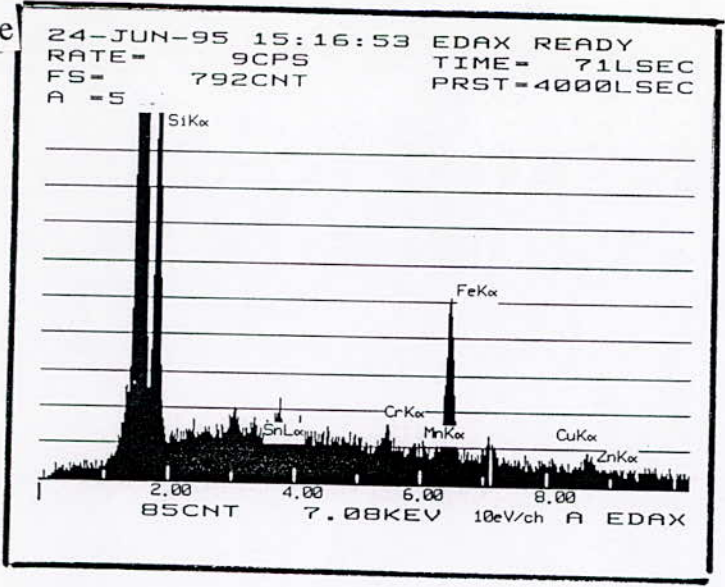
Cr	14.58
Mn	3.25
Fe	75.24
Ni	6.14
Al	0.53
Si	0.25
Cu	----
Zn	----
Sn	----

Interface



Cr	17.47
Mn	3.13
Fe	65.64
Ni	5.87
Al	7.20
Si	0.71
Cu	----
Zn	----
Sn	----

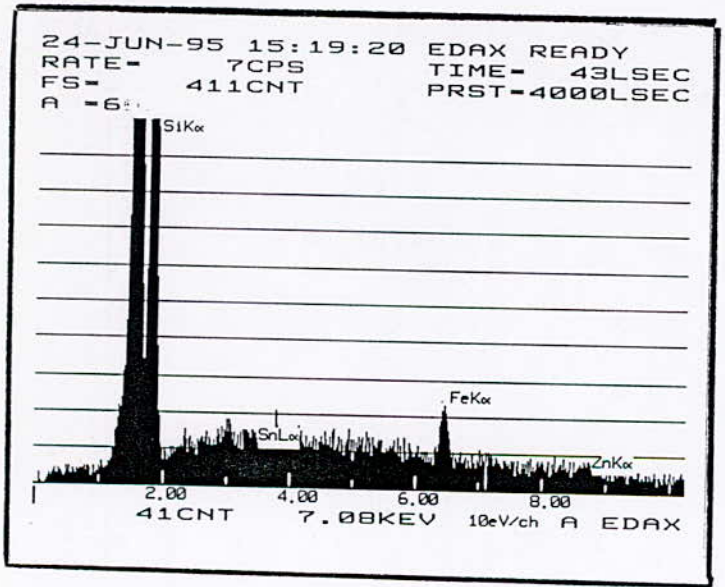
Interface



(%)

Cr	0.67
Mn	0.28
Fe	6.86
Ni	0.17
Al	74.37
Si	15.61
Cu	0.41
Zn	1.62
Sn	---

Substrat



(%)

Cr	----
Mn	----
Fe	2.48
Ni	----
Al	67.28
Si	29.25
Cu	----
Zn	1
Sn	----

Interprétation:

La fine couche noire foncée (sur la photo) révélée par le M.E.B est constituée de Cr, Mn, Fe; Ni, Al, Cu....

Ceci montre déjà le début de diffusion émanant du procédé de projection thermique.

On remarque une présence rare et spontanée de quelques phases, dont l'analyse au niveau du point 5 par exemple révèle la présence de: Cu, Zn

Echantillon 4: Multimatérialu réalisé avec sous-couche type:
Cu-Ni-Sn post-traité

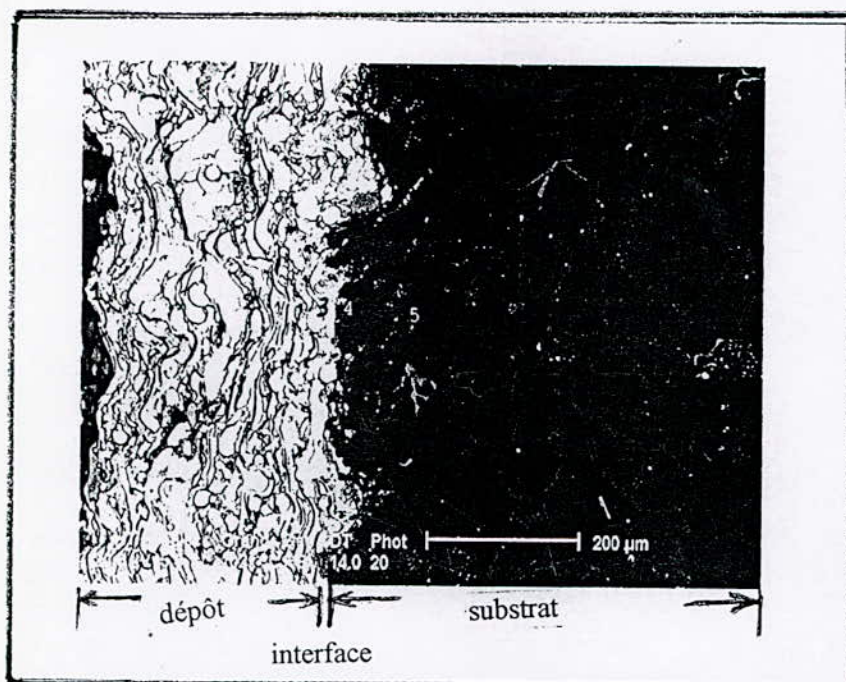
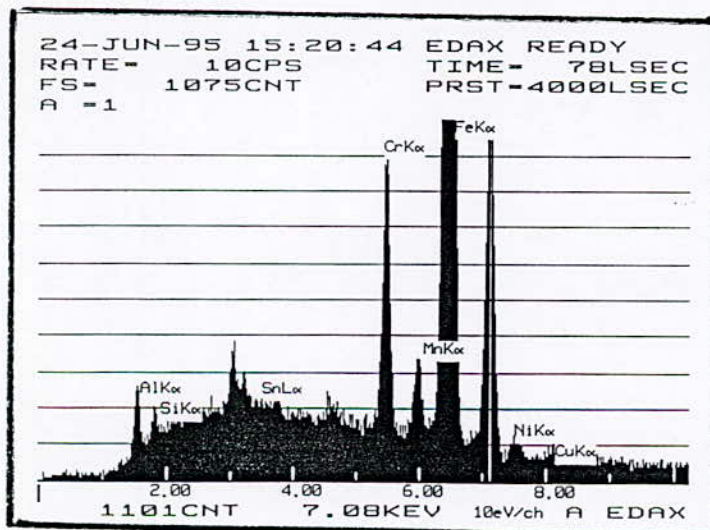


Photo MEB X 102

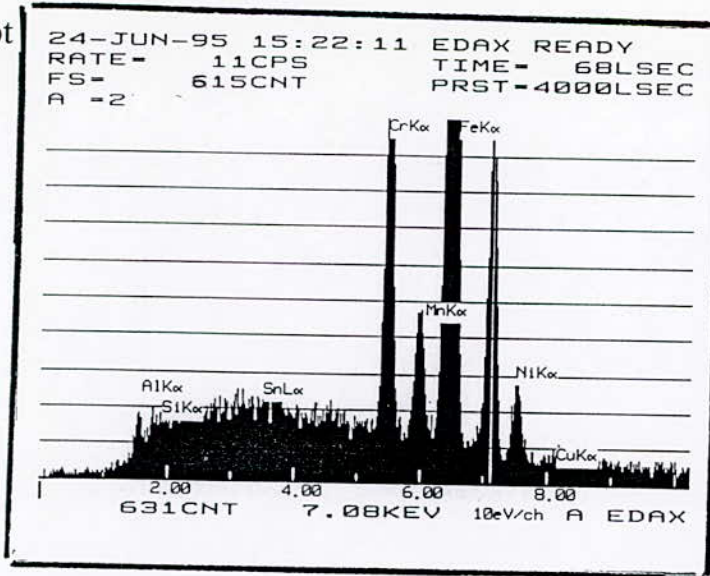
Dépôt



(%)

Cr	5.47
Mn	1.40
Fe	89.67
Ni	0.94
Al	1.65
Si	0.43
Cu	0.44
Zn	----

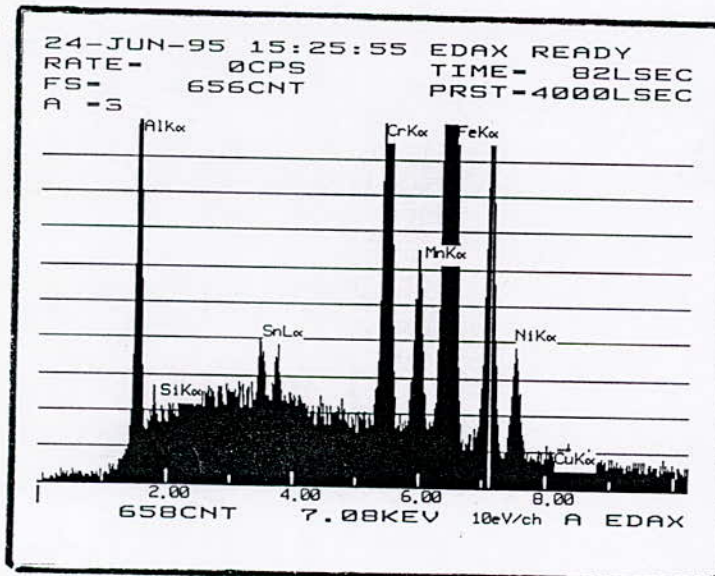
Dépôt



Sn ----
 (%)

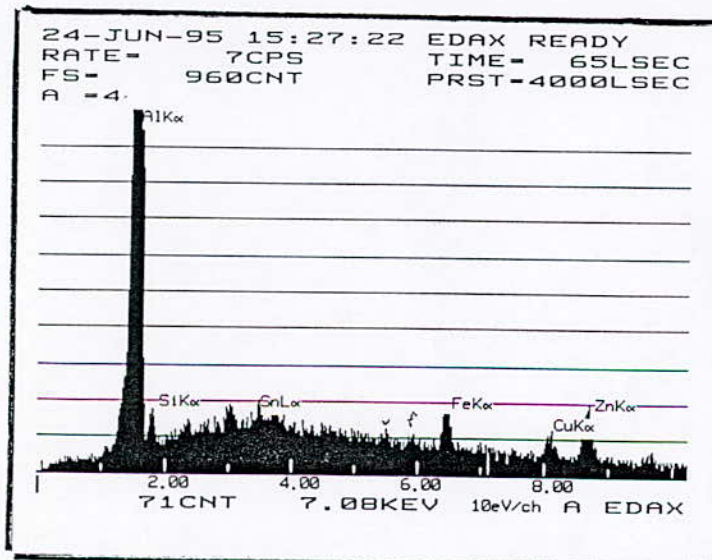
Cr	9.31
Mn	2.09
Fe	83.67
Ni	3.53
Al	0.92
Si	0.20
Cu	0.17
Zn	-----
Sn	0.10

Interface



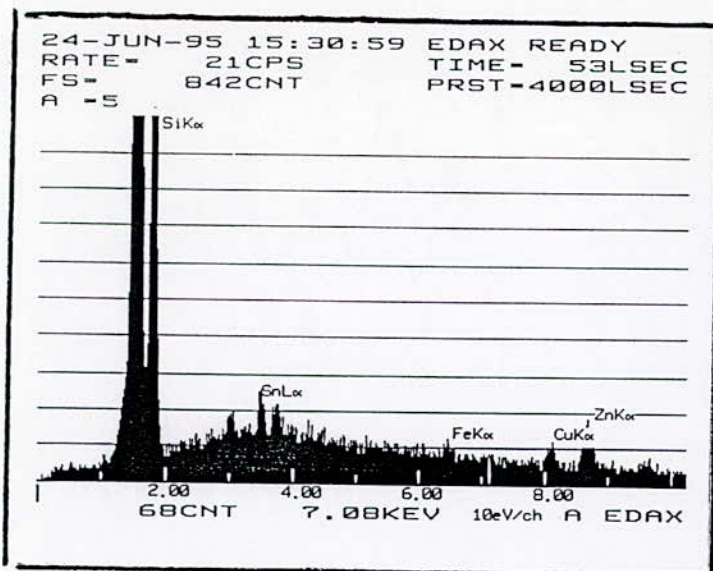
Cr	11.38
Mn	2.23
Fe	71.04
Ni	3.92
Al	9.22
Si	0.26
Cu	0.33
Zn	-----
Sn	1.62

Interface



Cr	0.31
Mn	0.3
Fe	1.910
Ni	-----
Al	87.95
Si	1.17
Cu	2.00
Zn	5.76
Sn	0.61

Substrat



	(%)
Cr	-----
Mn	-----
Fe	0.43
Ni	-----
Al	72.56
Si	18.66
Cu	1.52
Zn	4.62
Sn	2.21

Interprétation:

Pour ces échantillons, l'analyse métallographique se confirme. Les résultats relatifs aux points 2 3 et 5 au niveau du dépôt et du substrat indiquent une présence des éléments constituant l'interface. De part et d'autre de celle-ci, sont également présents des éléments provenant sans doute du substrat et du dépôt, en l'occurrence Cr, Fe, Mn Ni, Cu ...

IV.3- DURETE - HB

I- Echantillons des multimatériaux réalisés avec sous-couche type: Ni-Al post-traités et non post-traités

Comportement		Post-traités	Non post-traités
Position radiale (mm)			
a:	1	42.2	50.1
b:	4	45.1	53.6
c:	7	43.7	55
d:	10	44.7	58
e:	12	46.7	60.1
f:	13.1	138	76.3
g:	13.6	191	138

D'après les courbes de la figure 16, on remarque que la dureté de l'échantillon post-traité est légèrement inférieure à celle de l'échantillon non post-traité au niveau du substrat. Ceci est sans doute dû au fait que le post-traitement à 420°C pendant 2 heures qu'on a appliqué a permis d'adoucir l'alliage d'Aluminium.

Ce constat se confirme par la bibliographie [13], [4], d'autant plus que les échantillons ont été utilisés à l'état brute de coulée

A partir de l'interface jusqu'au dépôt, la dureté prend des valeurs plus élevées (beaucoup) et devient plus importante pour l'échantillon post-traité que pour l'échantillon non post-traité.

On peut dire que la sous-couche Ni-Al post-traitée est plus dure que celle qui n'a pas subi de traitement. Ceci est également valable pour le dépôt.

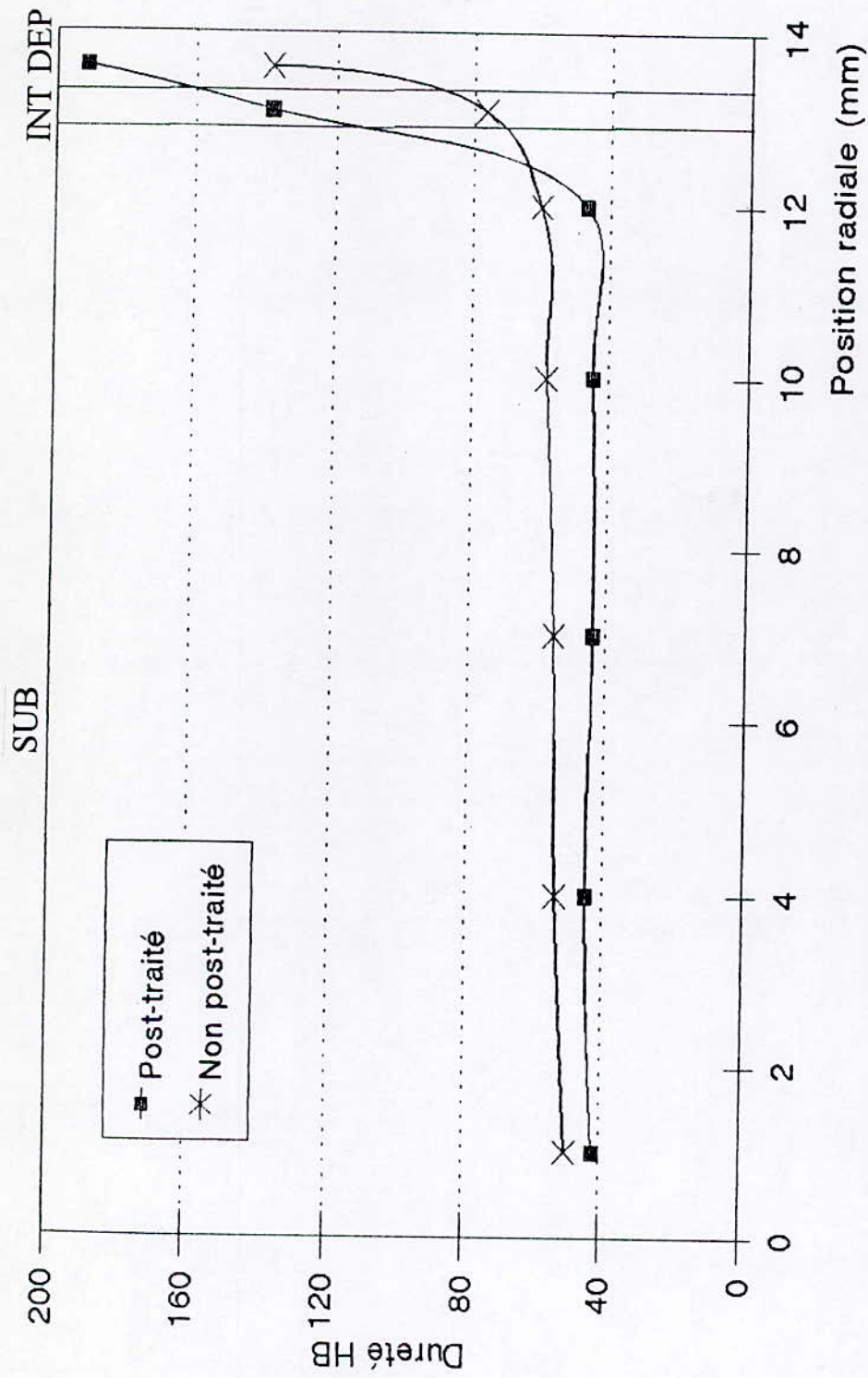


Figure 16: Evolution de la dureté HB du multimatériau réalisé avec sous-couche Ni-Al

2- Echantillons des multimatériaux réalisés avec sous-couche type:
Cu-Ni-Sn post-traités et non post-traités

Comportement		Post-traités	Non post-traités
Position radiale (mm)			
a:	1	43.7	50.1
b:	4	42.2	51.9
c:	7	43.7	57.9
d:	10	44.7	58
e:	12	46.7	60.1
f:	13.1	86	115
g:	13.6	233	191

Au niveau du substrat et du dépôt, le même constat que celui des échantillons réalisés avec sous-couche Ni-Al peut être fait Figure 17.

En effet le substrat AS 13, s'adoucit et le dépôt (Acier spécial) durcit.

Au niveau de l'interface, la dureté de l'échantillon non post-traité reste légèrement plus élevée. La sous-couche Cu-Ni-Sn non post-traité est plus dure que celle traitée.

Ce résultat conforte l'analyse métallographique car montrant la diffusion plus importante des éléments du substrat particulièrement l'Aluminium et probablement la migration du Nickel à partir de l'interface.

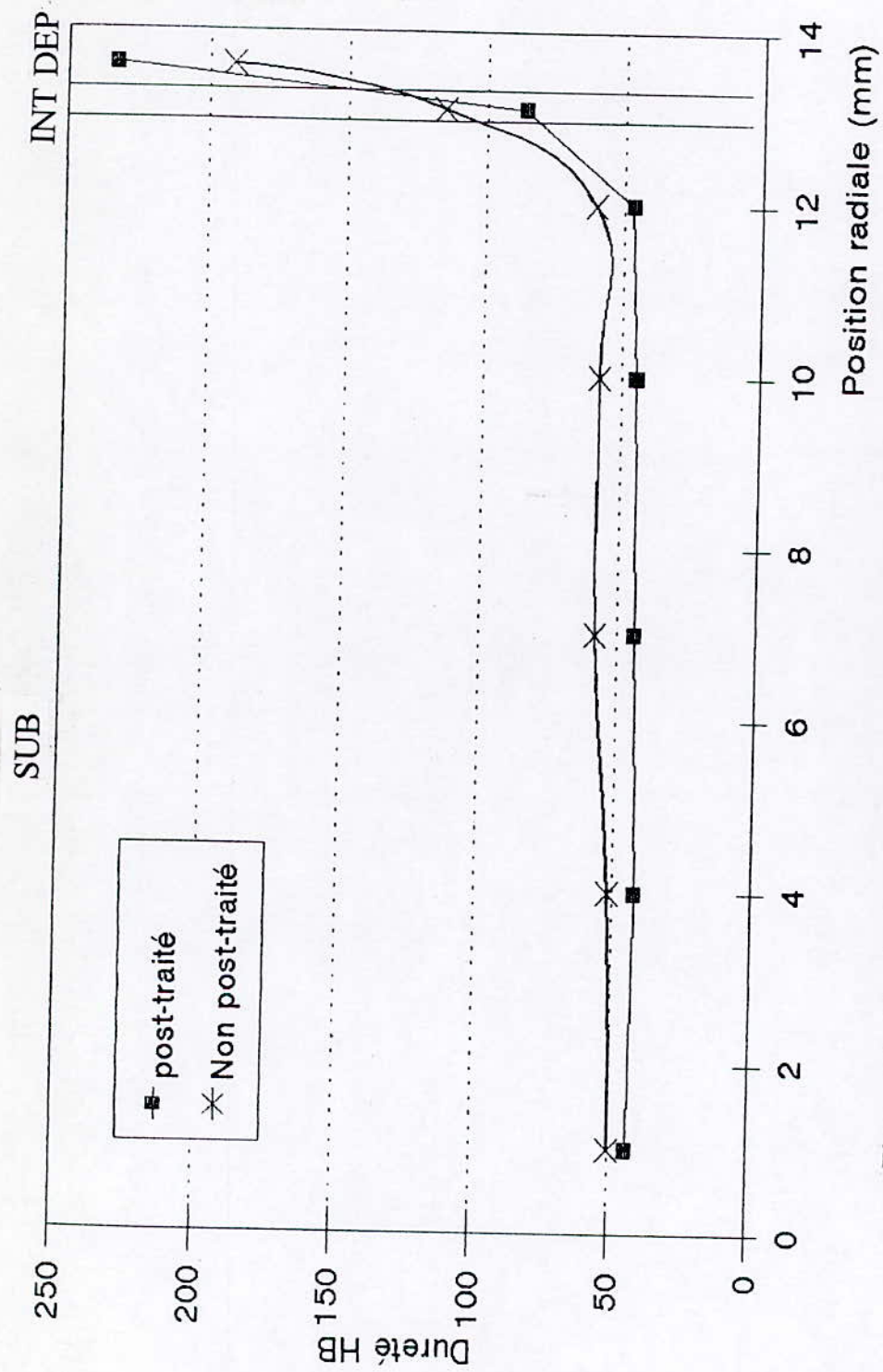


Figure 17 : Evolution de la dureté HB du multimatériau réalisé avec sous-couche Cu-Ni-Sn

4- MICRODURETE - HV

I- Echantillons des multimatériaux réalisés avec sous-couche type:
Ni-Al post-traités et non post-traités

Comportement		Post-traités	Non post-traités
Position radiale (mm)			
a:	0.1	67.7	75.7
b:	2	73.6	55.1
c:	3	53.8	41.1
d:	4	52.6	73.6
e:	5	51.3	82
f:	6	82.6	87.8
g:	7	75.5	65.9
h:	8	72.5	69.6
i:	9	47.9	57.9
j:	10	75.7	67.7
k:	11	71.5	85.1
l:	12	82	87
m:	13	123	155
n:	13.3	386	300
o:	13.6	412	320
p:	13.9	400	362

Tout le long du substrat on assiste à un chevauchement des valeurs de la microdureté. Tantôt, c'est l'échantillon post-traité qui est plus dur, tantôt c'est l'inverse Figure 18

Au niveau de l'interface les deux valeurs de la microdureté sont proches avec celle de l'échantillon non post-traité qui est plus élevée.

Le dépôt par contre présente une microdureté plus élevée pour l'échantillon post-traité que pour l'échantillon non post-traité. Ce résultat cadre avec celui de la dureté

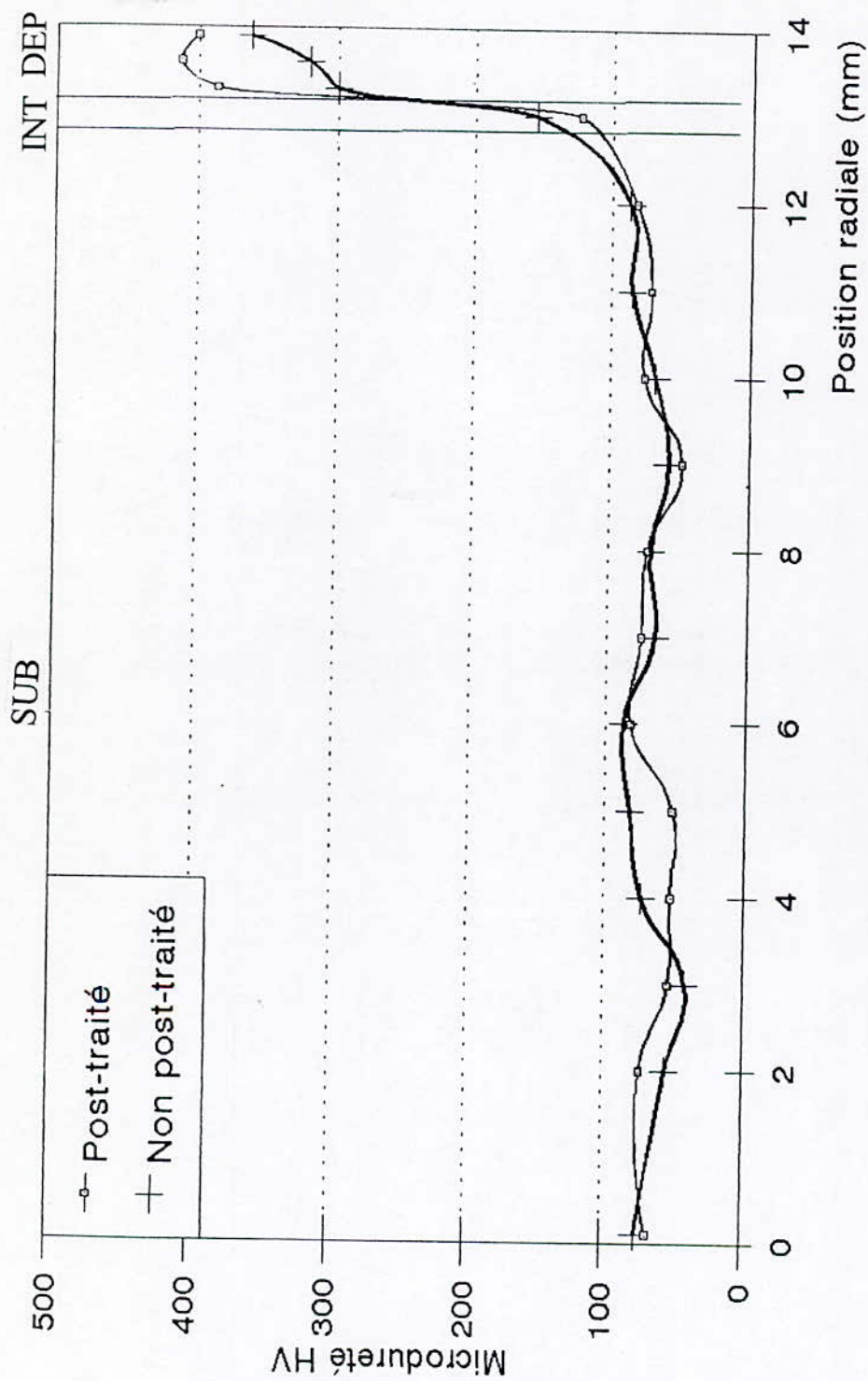


Figure 18 : Evolution de la Microdureté HV du multimatériau réalisé avec sous-couche Ni-Al.

2- Echantillons des multimatériaux réalisés avec sous-couche type:
Cu-Ni-Sn post-traités et non post-traités

Comportement		Post-traités	Non post-traités
Position radiale (mm)			
a:	0.1	46.8	56.5
b:	2	35.6	41.1
c:	3	31.8	58.7
d:	4	25.2	51.3
e:	5	41.3	56.2
f:	6	52.6	46.2
g:	7	41.1	60.1
h:	8	43.8	64.2
i:	9	55.1	50.1
j:	10	59.4	56.5
k:	11	53.8	82.6
l:	12	64.2	100
m:	13	150	303
n:	13.3	303	341
o:	13.6	412	386
p:	13.9	386	441

Au niveau du substrat et de l'interface, le même constat que pour les échantillons type Ni-Al peut être fait. figure 19

Part contre, au niveau du dépôt les valeurs de la microdureté des deux échantillons se chevauchent.

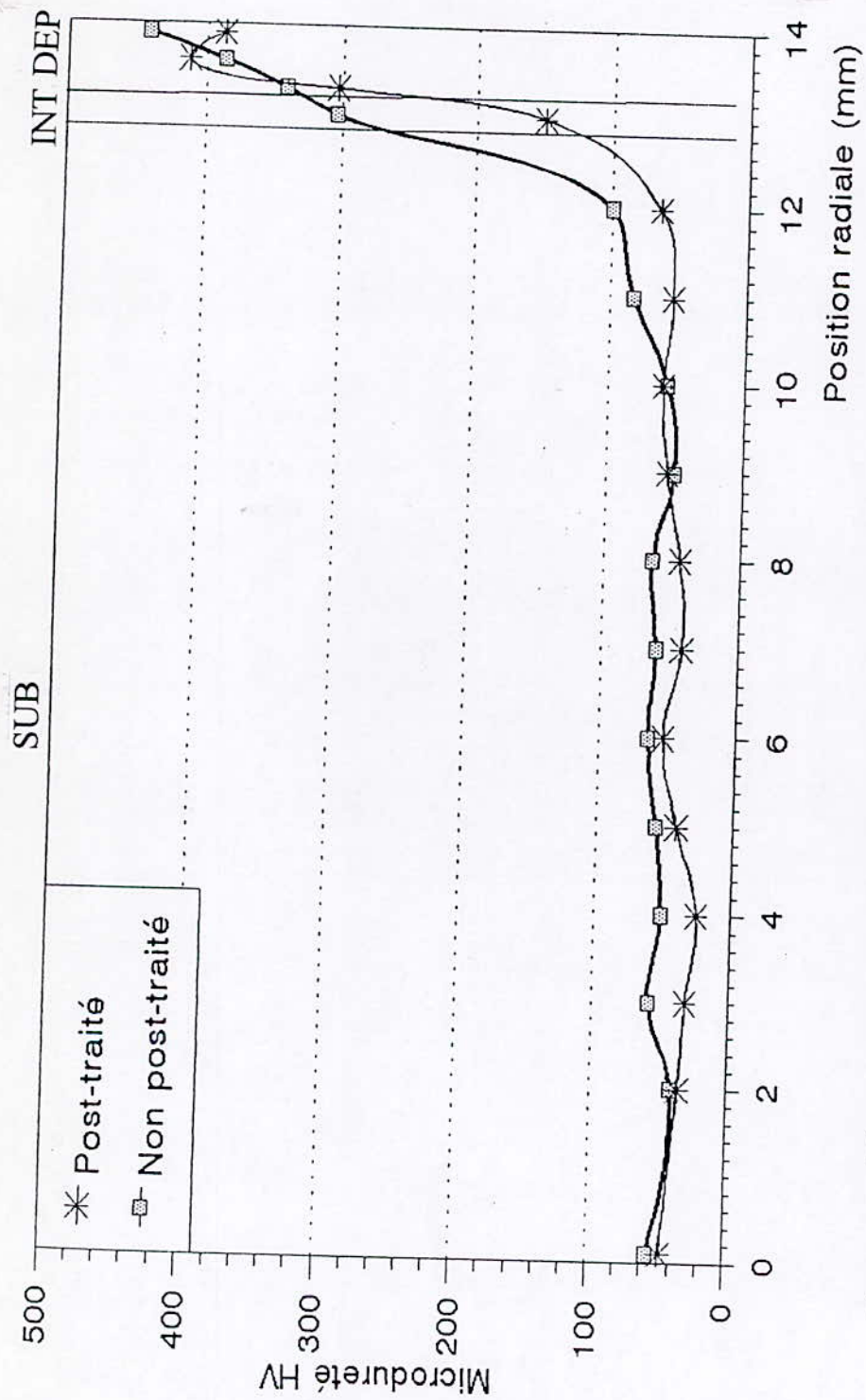


Figure 19 : Evolution de la microdureté HV du multi-matériau réalisé avec sous-couche Cu-Ni-Sn

IV.5- TEST D'ARRACHEMENT

Echantillons	Ni-Al non post-traité	Ni-Al post-traité	Cu-Ni-Sn non post-traité	Cu-Ni-Sn post-traité
Contrainte σ (daN/mm ²)	14.3	16.6	13.2	12.4

1- Echantillons réalisés avec sous-couche Ni-Al :

Les échantillons réalisés avec la sous-couche Ni-Al est post-traités présentent une contrainte à la rupture légèrement supérieure à celle des échantillons non post-traités.

L'adhérence est rendue meilleure par l'application d'un post-traitement de 420°C pendant 2H . Ceci a permis, comme on l'a remarqué par l'étude métallographique et à la microsonde, la diffusion du Nickel sur les deux côtés. Cette interdiffusion a renforcé la liaison entre les éléments du substrat et ceux du dépôt.

2 - Echantillons réalisés avec sous-couche Cu-Ni-Sn:

La contrainte de rupture des l'échantillons post-traités est légèrement inférieure à celle n'ayant pas subi de post-traitement. Ce dernier parait ne pas avoir eu d'influence (sinon négative) sur ce phénomène d'adhérence.

Signalons toutefois que dans bien des cas , la rupture à eu lieu au niveau de la colle. Celle-ci n'a donc pas résisté plus mais même avec cela , les résultats obtenus sont acceptables Figure 20 .

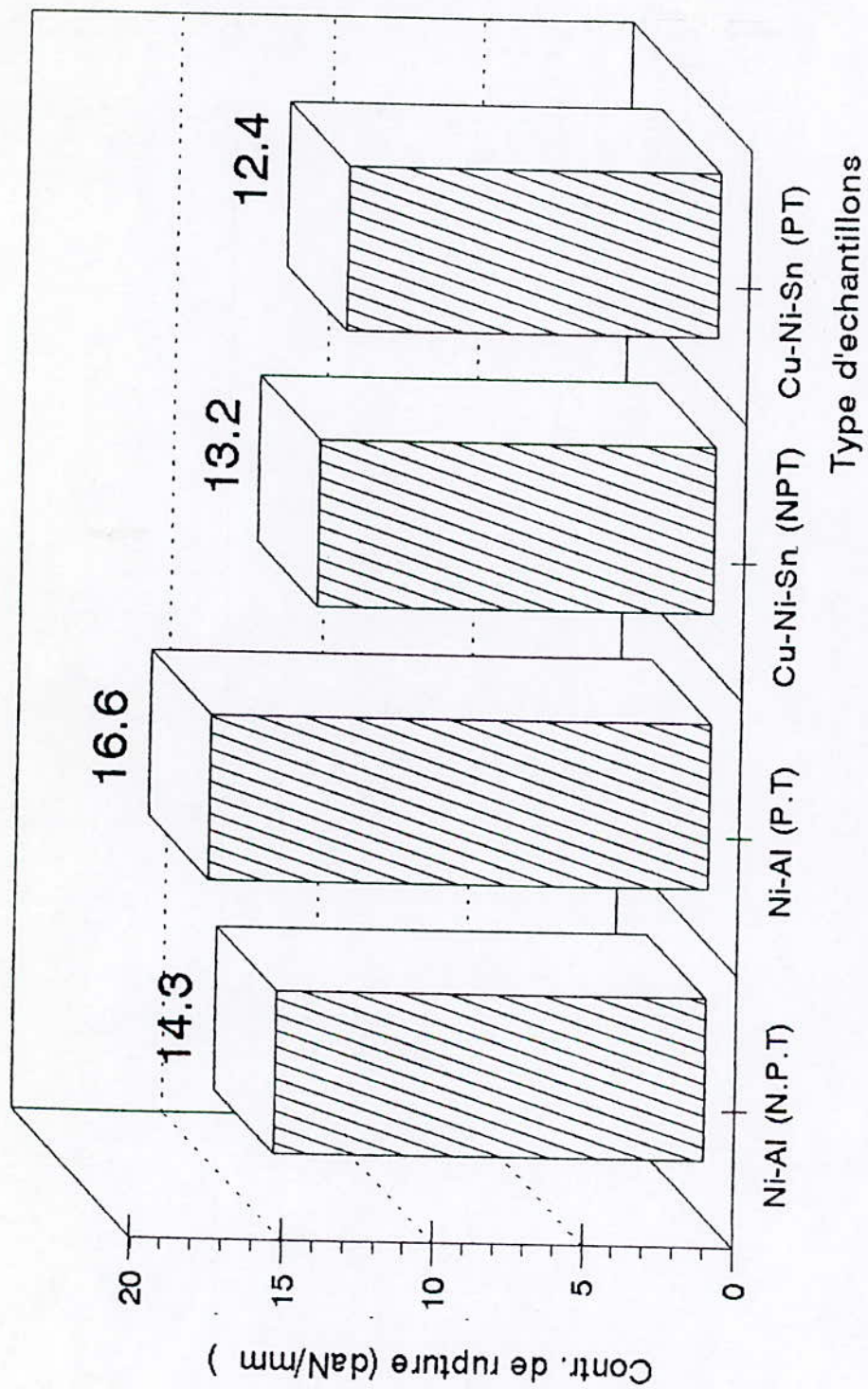


Figure 20: Evolution de la contrainte de rupture en fonction des types de multimatériaux réalisés.

Interprétation générale:

Il ressort des études métallographiques et de la microsonde que de façon générale les échantillons n'ayant pas subi de post-traitement ont une structure non homogène particulièrement au niveau du substrat.

On a remarqué au niveau de l'interface une fine couche correspondant à la présence des éléments appartenant au substrat et au dépôt ainsi que de la sous couche.

Après application du post-traitement, la diffusion a lieu de façon plus importante surtout pour l'échantillon réalisé avec la sous-couche Ni-Al.

L'analyse par microsonde a révélé la présence en forte proportion du nickel même à des distances loin de l'interface.

Ces observations ont trouvé leur confirmation par l'étude de la dureté et du test d'arrachement qui montrent une adhérence meilleure.

Par contre l'essai de microdureté a fait ressortir des valeurs ne reflétant parfois pas celles de la dureté.

On peut par conséquent dire que la microdureté n'a pas donné les résultats attendus ce qui s'explique par le fait que le pénétrateur très fin peut tomber sur des phases ou des points fragiles ou ductiles selon le cas sans que le multimatériau le soit dans sa globalité.

L'analyse simultanée de toutes les études et tests effectués pour l'ensemble des échantillons fait apparaître les conclusions suivantes:

- Les caractéristiques (dureté, adhérence, interdiffusion.....) des échantillons réalisés avec une sous-couche type Ni-Al sont meilleures. Le post-traitement appliqué permet d'avantage de les améliorer.
- Le post-traitement n'a pas d'effet, sinon négatif pour les échantillons réalisés avec la sous couche Cu-Ni-Sn. Il y a eu certainement une diffusion avec formation de phases le long de l'interface.

Notons aussi que le cuivre n'a pas été révélé, ce qui laisse penser qu'il n'a pas formé de phases avec les autres éléments et qu'il peut être présent ponctuellement et tout seul.

Ce qui ressort de cette étude est qu'un post-traitement peut ne pas être bénéfique. Il faut donc ne pas l'envisager ou modifier sa température et son temps de maintien en tenant compte des substances principales en présence.

CONCLUSION GENERALE

L'utilisation de la projection thermique comme procédé de l'élaboration de multimatériaux connaît de nos jours un essor incontestable. En effet, il permet de réaliser la liaison de matières à gradients fonctionnels et caractéristiques physico-chimiques extrêmes.

Dans le domaine des traitements de surfaces, cette méthode économique a permis de solutionner beaucoup de problèmes. Elle offre la possibilité de déposer en fine couche le matériau nécessaire pour une application donnée (usure, corrosion, frottement, conductivité, etc...) sur la surface d'un substrat dont les propriétés sont également recherchées (légèreté, plasticité, coût, etc ...)

L'utilisation de la projection thermique est simple mais délicate en ce sens que l'assemblage des substances principales est généralement tributaire d'une sous-couche de liaison permettant de rapprocher les propriétés particulières de ces deux dernières.

L'étude que nous avons entreprise a permis de montrer que cette sous-couche est indispensable mais doit être judicieusement choisie. Il en est de même pour le post-traitement dont on a montré l'inefficacité dans le cas des multimatériaux réalisés avec une couche de Cu-Ni-Sn.

De façon générale, on peut dire que la projection d'un acier à haute résistance permettant de lutter contre l'usure, le frottement et éventuellement la fatigue sur un alliage d'aluminium aux propriétés connues est possible.

Le multimatériau qui en découle peut être utilisé sans crainte surtout dans des conditions métallurgiques pas très sévères.

Signalons toutefois que cette étude aurait été plus complète avec, particulièrement une étude quantitative globale par images X renseignant sur la présence et la répartition des différents éléments dans tout le volume de la pièce. Aussi, une étude de la tenue de ces multimatériaux en fatigue ou aux chocs est souhaitable.

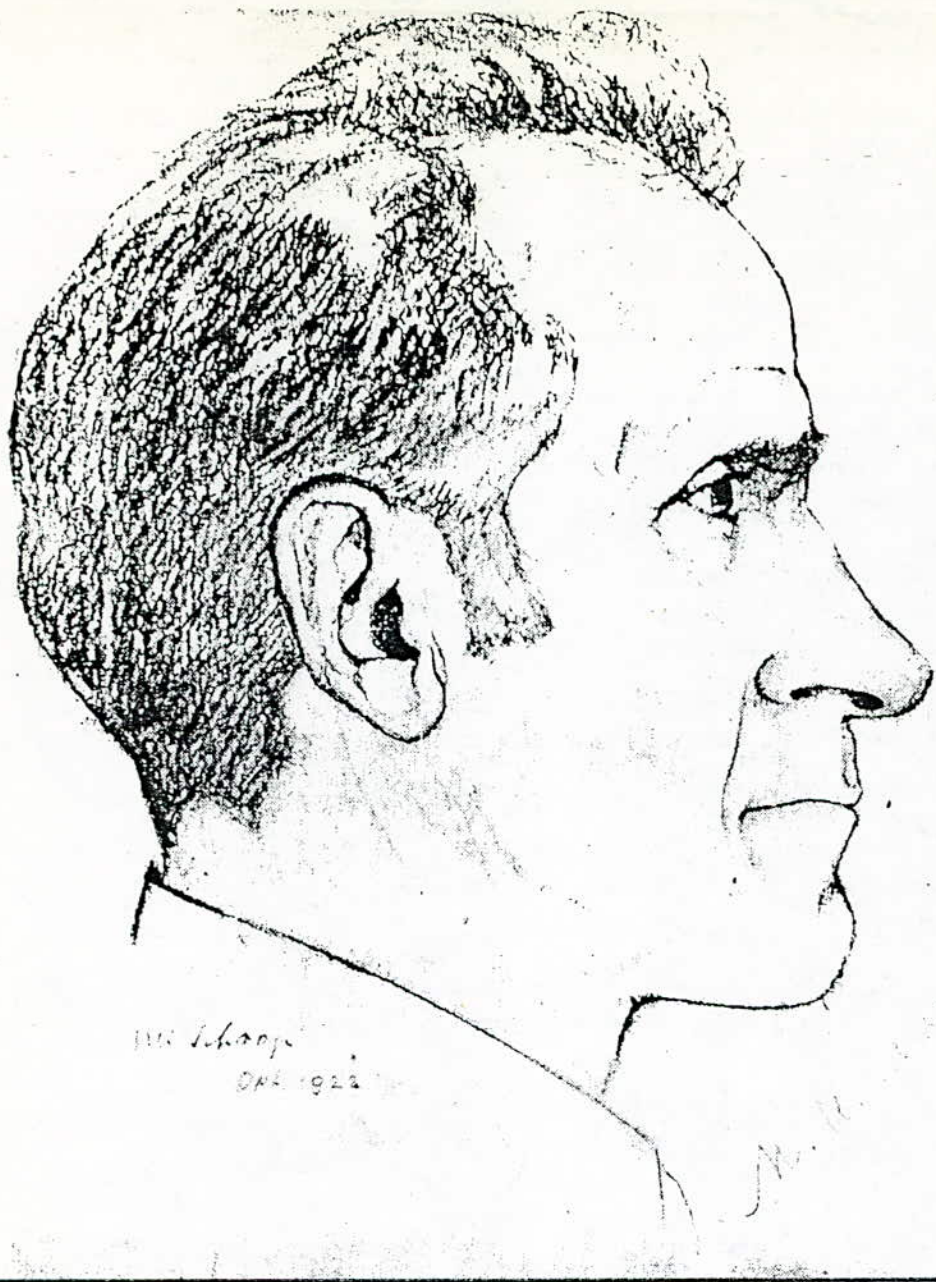
Ces deux aspects feront certainement l'objet d'une étude future.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] / **MAURIS DUCOS** 1990
Traitement superficiel des métaux M 1425
Techniques de l'ingénieur
- [2] / **CETIM** 1989
Guide pratique de la projection thermique
- [3] / **MALKI** 1992
Etude de la projection thermique sur deux pièces
mécaniques d'un moteur diesel.
Mémoire de fin d'étude d'ingénieur, ENP
- [4] / **PECHINEY** 1964
L'aluminium Ingénieur du groupe de Pechiney
Editions EYROLLES. Paris
- [5] / **VARGEL**
Le comportement de l'aluminium et de ses alliages
Edition Dunod. Paris
- [6] / **MAURIS DUCOS** 1990
Alliages d'aluminium M 1080
Techniques de l'ingénieur
- [7] / **BOUAOUDJA** 1992
Matériaux métallique matériaux
Tome 1

- [8] / **M.E. BALLARD** 1963
METAL spraying and the flamme déposition of
ceramics and plastics 4^{ème} édition , london.
- [9] / **MAURAI DUCOS** 1990
Revêtements par projection thermique M1645
Techniques de l'ingénieur
- [10] / **MAURAI DUCOS** 1989
Décapage mécanique par grenailage M 1494
Techniques de l'ingénieur
- [11] / **MAURAI DUCOS** 1990
Préparation des surfaces M 1435
Techniques de l'ingénieur
- [12] / **D. BOUKROUNE** 1993
Optimisation et caractérisation du traitement de
surface par slurry coating des alliages d'Aluminium.
Mini projet de thèse de Magister, ENP
- [13] / **MAURAI DUCOS** 1990
Traitement thermique des alliages d'aluminium M 1290
Techniques de l'ingénieur
- [14] / **MAURAI DUCOS** 1990
Diagramme d'équilibre d'alliages binaires M 70
Techniques de l'ingénieur
- [15] / **C. DEHMAS** 1994
Etude de l'influence d'un post-traitement sur l'adhérence
et le comportement mécanique d'un multimatériau réalisé
par projection thermique
Mémoire de fin d'étude d'ingénieur, ENP

- [16] / **B.DJERDJAR** 1993
Etude et réalisation d'un traitement de surface des alliages légers à base d'aluminium-Silicium par slurry coating
Mémoire de fin d'étude d'ingénieur, ENP
- [17] / **H.AJRHOURE** 1992
Adhérence et réactivité des multimatériaux à base de graphite
Thèse de doctorat E.C.Lyon
- [18] / **A. FEZZOUA.** 1993
Etude du comportement d'un revêtement réalisé par projection thermique sur une pièce mécanique.
Mémoire de fin d'étude d'ingénieur, ENP
- [19] / **D. ALTENPHGOL** 1976
Un regard à l'intérieur de l'aluminium
1^{ère} édition 1976



THE LATE DR M. U. SCHOOP

INVENTOR OF THE METAL-SPRAYING PROCESS

From a sketch completed in 1922