

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



DEPARTEMENT DE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

METALLURGIE

Mémoire d'ingénieur d'état

Thème :

***REALISATION ET CARACTERISATION DU
MULTIMATERIAU 25CD4/65E/55E***

Réalisé par :

M^r: A.BELHADI

Proposé et Consulté par :

Pr. N. MESRATI

Année universitaire 2006-2007

E.N.P, B.P 182, 10 Avenue Hassen Badi, El-harrach, Alger.

DEDICACE

Aux êtres qui me sont les plus chers :

*Mes parents
Pour tous leurs sacrifices*

*Mes chers frères
Adel, Momoh, Zino*

*Ma douce sœur
Mimi*

*A mes amis (es)
Faiza d'Algérie telecom, Mounira El Bessghir, Sofiane de Ben Aknoun, Hafid, Safia,
Hamid de Sidi Fredj.*

Et à toute ma classe...

Je dédie ce travail :

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier vivement mon encadreur Le Pr. N. MESRATI, Responsable du laboratoire Matériau, pour son dévouement, sa patience et pour ses conseils efficaces et les encouragements qu'il m'a prodigués durant le déroulement de ce travail.

Toute ma reconnaissance à Mr DJAGHLEL, Chef du département du génie métallurgie, pour son aide considérable et ses brillants conseils durant tous mon cursus.

Je remercie également l'ensemble des enseignants du Département du Génie Métallurgie pour l'enseignement qu'ils m'ont prodigué et leur contribution à notre formation durant ces trois années de spécialité.

J'exprime ma gratitude à l'ensemble du collectif de l'entreprise « Algérie Métallisation » et à leur tête Salah pour leur bienveillante attention afin de bien mener à bien ce travail.

Je tiens à remercier tous ceux qui, de près ou de loin, m'ont assistée dans ma tâche, particulièrement : El besseghir Mounira, Ladjali Omar, Safia, Hamid,

SOMMAIRE

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

<p style="text-align: center;">CHAPITRE 1 PROJECTION THERMIQUE</p>
--

I) INTRODUCTION	2
II) PROJECTION THERMIQUE	2
II-1) principe de la projection thermique	2
II-2) différents procédés de la projection thermique.....	3
II-2-1) Projection thermique a la flamme	3
II-2-2) Projection thermique a l'arc électrique	5
III) MATÉRIAUX UTILISES CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX PROJETES	6
III-1) Matériaux utilisés	6
III-2) Caractéristique des Matériaux Projetés	7
IV) PRÉPARATION DES SURFACES	9
IV-1) Généralités	9
IV-2) Propreté de la surface	9
IV-3) Rugosité	9
V) PARAMÈTRES DE PROJECTION.....	10

CHAPITRE II
ÉLABORATION DES MULTIMATERIAUX

I) INTRODUCTION	11
II) ÉLABORATION DES MULTIMATERIAUX.....	11
II-1) Pistolet de projection.....	1
II-2) Matériaux utilisés.....	11
II-2-1) Substrat	11
II-2-2) Sous couche d'accrochage	12
II-2-3) Dépôt.....	12
II-3) Procédé de métallisation	12
II-3-1) Préparation de la surface a revêtir	12
II-3-2) Paramètre de projection.....	13
II-3-3) Préparation des échantillon.....	14

CHAPITRE III
CARACTERISTIQUE PHISICO-CHIMIQUES DES
MULTIMATERIAUX

I) INTRODUCTION	15
II) OBSERVATION AU MICROSCOPE OPTIQUE.....	15
II-1) Préparation des échantillons	15
II-2) Interprétation des résultats	17
III) OBSERVATION A LA MICROSONDE.....	17
III-1) Principe de la microsonde	18
III-2) Résultats des analyses.....	18
III-3) Interprétation des résultats.....	25

IV) DIFFRACTION X SOUS INCIDENCE RASANTE	25
IV-1) Principe.....	25
IV-2) Dispositif expérimental	25
IV-3) Résultats des analyses	26
IV-4) Interprétation des résultats.....	31
V) ÉTUDE DE LA DURETE ET DE LA MICRODURETE	31
V-1) Essai de dureté	31
V-2) Interprétation des résultats.....	33
V-3) Essai de microdureté.....	33
V-4) Interprétation des résultats.....	35
CONCLUSION GENERALE	36

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

INTRODUCTION GENERALE

Du fait de l'augmentation de la puissance et du rendement des machines dus à des pressions, températures et débits plus élevés, les matériaux utilisés aujourd'hui atteignent souvent leur degré limite de sollicitations. C'est ainsi que la surface des matériaux doit satisfaire à des exigences sévères tant sur le plan de la polyvalence que sur celui des propriétés.

Des matériaux appropriés sont donc requis afin de pouvoir poursuivre de nouvelles technologies. Cependant, il arrive souvent que même des matériaux très élaborés, produits selon des méthodes sophistiquées, ne satisfassent pas entièrement aux exigences élevées et parfois contradictoires qui leur sont imposées.

De nombreux phénomènes comme la fatigue, la corrosion, le frottement, l'usure et la fissuration constituant les effets physiques de diverses sollicitations peuvent apparaître à la surface des pièces ou se propager à l'intérieur de celles-ci. De ce fait, de nombreux traitements de surface ont été mis au point et utilisés industriellement pour faire face à ces exigences. Parmi ces traitements, la projection thermique revêt, dans le cadre des matériaux, une importance primordiale. Cette technique a un intérêt particulier dans l'élaboration des multimatériaux et la rénovation des pièces usées en procurant ainsi à l'ensemble des propriétés et des qualités insoupçonnées et extraordinaires.

Malgré les caractéristiques particulières en surface, obtenues par projection d'un dépôt à propriété réclamées, lorsque les pièces réalisées sont soumises en service, elles peuvent présenter certaines défaillances dues aux sollicitations généralement complexes auxquelles elles sont soumises. L'un des problèmes les plus rencontrés est la fissuration à l'interface due à la fatigue.

L'objet de notre travail s'inscrit dans ce contexte. Il consiste d'une part, à étudier le rechargement par projection à l'arc électrique d'un acier de nuance 25CD4 très utilisé dans l'industrie mécanique ainsi que l'adhérence des dépôts projetés thermiquement et d'autre part, à maîtriser les mécanismes de dégradation en fatigue de ces nouveaux matériaux. Ceci permet une meilleure compréhension des phénomènes connexes liés à la nature physico-chimique des matériaux utilisés afin d'arriver à un compromis assurant une tenue à la fatigue du revêtement.

Afin de rendre notre travail plus compréhensif, nous avons jugé judicieux de le décomposer en deux grandes parties.

La première consiste en une étude bibliographique permettant de présenter dans le premier chapitre le principe de la projection thermique en développant succinctement les équipements qu'elle demande et les différentes étapes à suivre afin de bien mener l'opération de projection (préparation de la surface, paramètres de projection à respecter...).

Le second chapitre est consacré à la mécanique de la rupture des matériaux et son application sur les multimatériaux. Après avoir rappelé les différents critères de rupture des matériaux fragiles ainsi que les mécanismes de fissuration par fatigue, nous présentons les approches récentes et les originales de la mécanique de la rupture interfaciale basées sur l'énergie de rupture et l'angle de charge permettant de mesurer la mixité entre les modes d'ouverture et de cisaillement.

La deuxième partie traite de l'étude expérimentale où l'on expose dans le premier chapitre la technique de la projection à l'arc électrique ainsi que les processus relatifs à l'élaboration des multimatériaux.

Le second chapitre concerne la caractérisation physico-chimique des multimatériaux tout en prenant en considération les phénomènes interfaciaux qui se produisent dans la zone substrat-interface-dépôt ainsi que la réactivité des éléments pendant la diffusion par l'utilisation de méthodes de caractérisation telles que la microscopie électronique à balayage, la microsonde et la diffraction X sous incidence rasante.

Cette thèse est clôturée par une conclusion émanant des résultats expérimentaux et des conditions opératoires.

CHAPITRE I

PROJECTION THERMIQUE

I) INTRODUCTION

En 1909, le docteur SHOOP observa l'incrustation du plomb suite au tir d'une balle contre un mur en ciment. Ce dernier essaya de reproduire le même phénomène en projetant du plomb fondu avec un vaporisateur, puis en projetant du plomb en poudre à travers une flamme.

En 1914, il se tourne vers la projection du métal en fil. A titre d'exemple, nous citons les deux applications de cette technique.

- Pendant la guerre de 1914, la projection d'étain sur la face arrière des obus de 75 a permis le désencuvrage systématique, coup par coup, des canons de 75.
- A la fin de la première guerre (1914/1918), le succès de la vente des bustes d'Alsaciennes a conduit au shoopage en bronze des bustes montés en plâtre.

II) PROJECTION THERMIQUE

II-1) PRINCIPE DE LA PROJECTION THERMIQUE

Les projections thermiques sont des procédés particuliers de dépôt où les particules solides sont injectées dans un gaz à haute température, elles y sont chauffées, fondues, accélérées et projetées à grande vitesse sur le substrat où elles forment un dépôt de gouttelettes étalées.

Les principales caractéristiques de ces techniques sont les suivantes:

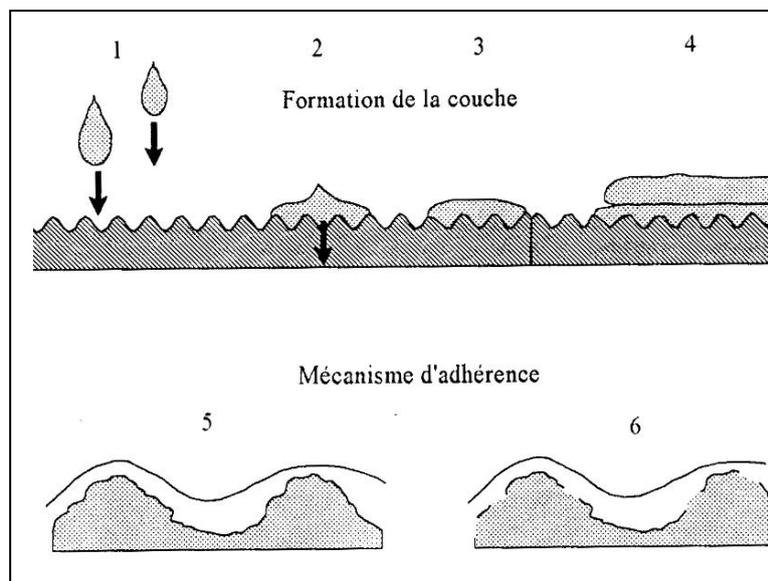
- Le processus est dit " froid", c'est-à-dire que le substrat est chauffé à des températures très inférieures à celles atteintes par les particules projetées. Les particules subissent des transformations physiques, elles sont fondues puis refroidies avec des vitesses de refroidissement élevées. Le revêtement est construit particule par particule et possède une structure lamellaire (fig I-1).

- Les propriétés du revêtement dépendent des matériaux de départ, des microstructures obtenues, des contraintes résiduelles produites lors de la projection et de la porosité du dépôt.

Cependant, le système revêtement/substrat est un matériau composite dont les propriétés dépendent aussi de la structure et des propriétés des interfaces présentes.

Notons enfin que les particules provenant de la pulvérisation sont véhiculées à grande vitesse définie comme suit:

- 100 à 200 m/s : pour les pistolets à gaz.
- 300 m/s : pour les pistolets à plasma.



- 1 Projection des gouttelettes de matière en fusion
- 2 Ecrasement sur la surface du substrat
- 3 Transmission de chaleur au matériel de base
- 4 Solidification et rétraction de la matière projetée
- 5 Adhérence mécanique
- 6 Microsoudures locales

FigureI-1 : Séquence du procédé de projection thermique [1]

II-2) DIFFERENTS PROCEDES DE LA PROJECTION THERMIQUE

Les procédés de projection thermique peuvent être classés en deux catégories suivant la source d'énergie utilisée flamme ou arc électrique.

II-2-1) PROJECTION THERMIQUE A LA FLAMME

On distingue trois types de pistolets à flamme

a) Pistolets à poudre : le matériau à projection est introduit, soit sous forme de baguettes, soit sous forme de poudres dans la flamme d'un chalumeau. Cette technique a été utilisée pour la première fois par le Dr SHOOP en 1910. Les gaz les plus couramment utilisés sont des mélanges hydrogène – oxygène, cyanogène – oxygène et surtout acétylène – oxygène, qui donnent des flammes à des températures de 2660°C, 4700°C, 3000°C respectivement. Ce paramètre température limite la projection de certains matériaux. Dans le

cas de projection à partir de poudres, ces dernières peuvent être introduites dans la flamme : soit par gravité, soit par mise en suspension préalable dans l'un des gaz ou encore par mise en suspension dans un courant d'air additionnel (figure I-2).

L'avantage de cette technique par rapport aux autres procédés de projection est son faible prix de revient et sa facilité de mise en œuvre. La présence de porosités importantes dans le dépôt, dues à la faible énergie cinétique des particules et à la faible vitesse d'éjection des gaz, limite l'utilisation de cette technique dans certains domaines [1].

b) Pistolets à fils : dans le cas des pistolets à poudre, la vitesse initiale des particules est fournie par les gaz utilisés pour fondre les particules. Dans le cas des pistolets à fils, le mélange des fluides comburant / combustible sert uniquement à fondre les matériaux à projeter. Une fois fondu, le matériau est pris en charge et projeté par un violent courant d'air comprimé.

Ces pistolets se composent de deux parties : une partie chalumeau et une partie entraînement de fil. Ils utilisent les mêmes gaz que les pistolets à poudre : oxygène mélangé à de l'acétylène, du propane plus de l'air comprimé à des pressions comprises entre 3 et 5.5 bars.

L'entraînement de fil peut être effectué de trois manières :

- Entraînement par un système à turbine
- Entraînement par un moteur à air comprimé
- Entraînement par un moteur électrique

Dans tous les cas, un mouvement de rotation est communiqué à deux molettes enserrant le fil et le poussent au travers de la base à gaz du chalumeau. Ces pistolets projettent, pratiquement tous les matériaux tréfilables, métaux, alliages ainsi que les matériaux céramique sous forme de baguettes ou de cordons [2].

Les matériaux les plus utilisés sont des matériaux anticorrosion : Zinc, Aluminium ou alliage zinc aluminium (figure I-3)

c) Pistolets à détonation : ce pistolet est monté sur une installation automatique et permet de projeter les matériaux à des vitesses nettement supérieures à celles des pistolets précédents. La projection s'effectue de façon discontinue en utilisant l'énergie d'onde résultant d'un mélange gazeux ox-acétylénique.

Cette technique de projection consiste à introduire la poudre à projeter et les gaz oxygène-acétylène dans un tube appelé " canon " de 25 mm de diamètre et de 1m de long et d'allumer le mélange au moyen d'une étincelle. Cette opération est répétée environ 8 fois par seconde. Entre chaque allumage, un balayage est pratiqué avec un gaz neutre (Azote). Ce pistolet est un de ceux qui donnent les meilleurs revêtements du point de vue porosité et adhérence des dépôts [1].

Les matériaux les plus souvent utilisés, sont des carbures de chrome plus nickel chrome, du carbure de chrome, du carbure de tungstène plus cobalt, de l'alumine etc..... (Voir figure I-4).

II-2-2) projection thermique à l'arc électrique

L'arc électrique est une source d'énergie qui permet à la projection thermique d'augmenter de façon notable sa panoplie de procédés. On trouve deux types de matériels qui utilisent cette énergie :

- Le pistolet à arc électrique entre deux fils.
- Le pistolet plasma.

a) Pistolet à arc électrique entre deux fils : Son principe consiste à faire jaillir un arc électrique entre deux fils consommables, le métal fondu dans l'arc étant ensuite projeté sur le support à revêtir par un jet d'air comprimé.

Ces pistolets sont alimentés par des générateurs de courant continu. Les tensions à l'arc sont comprises entre 25 et 40 V et les intensités entre 100 et 400 A pour des fils de 1.5 à 2 mm de diamètre. L'air comprimé nécessaire à la projection doit être propre et sec, et avoir un débit d'environ 25 m³ / h pour une pression d'utilisation de 5 bars. Ces pistolets sont constitués de deux parties, d'ailleurs comme les pistolets fils-flamme, une partie entraînant des fils et une partie fusion et propulsion du métal d'apport.

La partie entraînement est décrite dans le précédent paragraphe. Les fils sont connectés aux polarités des générateurs par des tubes contact. L'écartement des fils au niveau de l'arc électrique est tenu constant pour éviter les fluctuations de l'arc, qui font varier la dimension des particules projetées. Une console de contrôle permet d'assurer le suivi des paramètres de projection.

Ce pistolet permet de projeter des quantités de métal plus importantes comparativement aux pistolets fils-flamme. Les principaux métaux d'apport projetés sont le zinc, l'aluminium, le cuivre et certains aciers (à 0.2 % C).

b) Pistolet plasma : Le procédé de projection au plasma utilise comme source thermique un arc électrique éclatant dans une buse, cet arc porte un flux de gaz inerte (très souvent argon, azote ou hélium) à une température très élevée. Il se présente des températures de l'ordre de 20 000 °C conduisant ainsi à la fission des gaz moléculaires et à l'ionisation partielle des atomes. Ces hautes températures provoquent une forte augmentation du volume du gaz qui s'échappe de la buse élevée. La vitesse d'écoulement du jet de plasma des installations modernes de projection atteint plusieurs fois la vitesse du son. C'est à l'intérieur de ce jet de plasma à haute énergie qu'on injecte, au moyen d'un gaz porteur, la matière de revêtement pulvérulente. Les particules fondent et sont projetées sur le matériau de base prétraité. Ce procédé au plasma permet de réaliser des revêtements d'excellente qualité en utilisant comme matériau de projection presque toutes les matières fusibles qui ne se désintègrent pas et dont la granulométrie (configuration, taille, répartition granulométrique) est adéquate. Le projection au plasma a acquis une grande importance, tant sur le plan technique qu'économique, comme système permettant la réalisation des surfaces fonctionnelles (figure I-5).

III) MATÉRIAUX UTILISES ET CARACTÉRISTIQUES DES MATÉRIAUX PROJÉTÉS

III-1) MATÉRIAUX UTILISES

Les matériaux utilisés lors de la projection thermique sont très nombreux et leur nombre augmente en fonction d'application nouvelle [4]

Nous pouvons les classer de la façon suivante :

- Les aciers alliés et non alliés.
- Les alliages base cobalt.
- Les aciers base nickel.
- Les aciers base cuivre.
- Les alliages de zinc.
- Les métaux purs.
- Les carbures.
- Les oxydes.
- Les auto – adhérents (alliages base Ni – Al).
- Les nitrures.
- Les siliciures.
- Les matériaux abrasables (type Ni – Graphite).
- Les matériaux antifriction.
- Les alliages MCRAALY (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 ...)

Ces différents matériaux ne se présentent pas tous sous la même forme car il faut tenir compte de certaines propriétés intrinsèques et également des procédés employés pour les projeter.

Les principales formes commercialisées sont :

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

Les fils nus massifs sont les matériaux réservés aux matériels flamme et arc; ils sont largement diffusés dans les catégories métaux purs et les aciers. Ces types de produits sont définis par le diamètre et leurs compositions.

Les poudres quant à elles, sont tenues à répondre à des critères plus nombreux que les fils.

- Composition
- Dimensions des particules et leur répartition granulométrique.
- Formes des particules : sphérique, lamellaires, cubiques.....
- Type d'élaboration : électrofondues, frittées, agglomérées, mélangées, enrobée, composites
- Coulabilité
- Densité : tassée ou non tassée

Les poudres sont employées aussi bien pour les techniques flamme que pour les plasmas.

Les cordons permettent de conditionner les matériaux non tréfilables et d'obtenir un produit continu pouvant alimenter des pistolets à fils. Ces types de produits sont définis par leur composition et leur diamètre.

Par contre, les baguettes, obtenues par frittage, permettent de conditionner des matériaux non tréfilables pour alimenter de façon discontinue des pistolets à fils.

Tous ces produits sont utilisés suivant leur besoin et leur type de projection thermique [3].

III-2) CARACTÉRISTIQUES DES MATÉRIAUX PROJÉTÉS

Les caractéristiques essentielles des matériaux projetés sont [5-10]:

- La structure.
- L'adhérence.
- La densité.
- La dureté.

a) Structure : lors du contact avec le substrat, les particules sphériques, grâce à leur énergie cinétique élevée, se déforment en forme de cylindre. Le temps de déformation sphère- cylindre a été estimé par **Kudinov** [1] à 10^{-10} - 10^{-5} . Cette déformation a été modélisée par **Madesjski** par la formule suivante, obtenue en négligeant les tensions de surface et en supposant que la goutte liquide s'aplatit avant de se solidifier.

$$\frac{D}{d} = \frac{pvd^{0.2}}{u} \quad (I-1)$$

Où d : diamètre initial de la particule
p : densité du liquide

u : viscosité du liquide
v : vitesse d'impact de la particule

Pour réaliser la fusion des particules dans le jet de gaz chaud, il faut prendre en compte de nombreuses variables du matériau tels que le coefficient de transfert thermique, la conductivité thermique et la température de fusion.

Les valeurs ont été combinées dans une équation de conduction thermique et de dynamique de gaz pour donner l'équation suivante.

$$\frac{S(K \Delta T)^2}{v \cdot \mu} \geq \frac{(LD)^2}{16p} \quad (I-2)$$

Où S : distance de projection
K : conductivité thermique de la couche

- V : vitesse du jet de gaz.
AT : gradient de température de la couche.
L : capacité thermique de la particule par unité de volume à la température de fusion.
D : diamètre moyen de la particule.
P : densité de la particule.

D'après l'équation (1-2), le temps de séjour de la particule est déterminé par la vitesse des gaz l'énergie (conductivité thermique) et la distance de projection.

Nous constatons par ces essais de modélisation que suivant les paramètres de projection et la nature du matériau, les caractéristiques des dépôts peuvent changer. Nous pouvons facilement vérifier la bonne fusion de la particule en plaçant une lame de verre devant le jet afin d'examiner la façon dans la particule s'est écrasée.

b) Adhérence : les dépôts projetés adhèrent aux substrats par un phénomène mécanique qui demande une préparation soignée de surface à revêtir. La particule en fusion épouse plus en moins bien les rugosités du substrat. Néanmoins, en générale, l'accrochage du dépôt est seulement mécanique et suivant les matériaux projetés et les paramètres de projection, l'adhérence varie de 20 à 115 MPa.

Pour les matériaux comme les métalliques dont l'adhérence est faible, et dans le cas où les coefficients de dilatation sont très différents entre le matériau projeté et le substrat, on utilise des sous-couches d'accrochages connues pour leurs bonnes valeurs d'adhérence, telles que l'aluminure de nickel, le molybdène ou l'alliage 80 Ni – 20 Cr.

c) Densité : les dépôts projetés sont poreux. Cette porosité est plus ou moins importante suivant le mode de projection. La dimension des particules et leur vitesse ont une influence importante en ce qui concerne la densité des dépôts. Pour les dépôts métalliques, la densité est également fonction du taux d'oxydes formés pendant la projection.

Les dépôts d'aluminium peuvent avoir, suivant la vitesse du dépôt et la température, une porosité de l'ordre de 25% dans le cas de la projection flamme et de 5% dans le cas de la projection plasma. La densité des dépôts projetés est fonction de la porosité, et sa valeur varie entre 5 et 25% au dessous de la densité théorique du produit.

d) Dureté : Les matériaux projetés thermiquement sont constitués de particules juxtaposées et liées entre elles. Ceci se traduit en général par une dureté sans rapport avec la dureté de chacune des particules, mais représentatives de la compacité du dépôt. La dureté des dépôts obtenus dépend toujours des paramètres de projection.

Notons que les autres caractéristiques que doivent avoir les poudres projetées sont

:

- La résistance à l'usure.
- Le coefficient de frottement.
- Les caractéristiques électriques.
- Les caractéristiques thermiques.

IV) PREPARATION DES SURFACES

IV-1) GENERALITES :

La préparation de surface est un facteur primordial et indispensable à une bonne adhérence des dépôts. Elle est destinée principalement à mettre en condition de réception la couche superficielle des solides. Le but le plus important de cette mise en condition est d'éliminer de la surface tous les corps étrangers qui peuvent le recouvrir (solide ou liquide) et aussi de dissoudre ou de détacher les composés chimiques présents (couche d'oxyde ou autres composés du métal).

L'idéal d'une bonne préparation est de permettre un contact aussi intime que possible entre la surface à recouvrir et le revêtement à exécuter, ou de conduire à une surface suffisamment active chimiquement pour faciliter les réactions.

La préparation de surface proprement dite a pour but :

- De nettoyer la pièce.
- De créer un relief favorisant l'adhérence mécanique du dépôt.

IV-2) PROPETE DE LA SURFACE :

Les pièces destinées à être revêtues doivent être propres et débarrassées de graisses, huiles et peintures. Si les pièces sont poreuses, il est nécessaire de diluer les matières contaminantes présentes dans les porosités avec les diluants appropriés, pour éviter que l'échauffement du substrat, dû à la projection ne fasse remonter les matières contaminantes à la surface et nuise à l'adhérence du dépôt.

Les dégraissages sont effectués, le plus souvent, en utilisant des vapeurs de solvant dans lesquelles les pièces doivent séjourner de 15 à 30 minutes.

Si les pièces à traiter ne sont pas poreuses, un décapage humide peut être employé. Ce procédé utilise des abrasifs du type oxyde d'aluminium (de granulométrie de 200 à 500 μm) mélangé à de l'eau. Les additifs du type inhibiteur de rouille peuvent être ajoutés. Ce décapage est destiné principalement à éliminer des surfaces, les produits corrosifs des matériaux déposés antérieurement, ou rugosifier les surfaces destinées à être revêtues. Les pièces ainsi traitées doivent être rincées et séchées [1-3].

IV-3) RUGOSITE :

Après nettoyage des pièces, il est nécessaire de créer une rugosité en surface de la pièce à revêtir, afin de permettre aux particules en fusion d'épouser les irrégularités de la surface et réaliser ainsi un bon accrochage mécanique. Cette ultime préparation doit être faite pour la bonne tenue des dépôts. Cette géométrie de surface peut être obtenue par :

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

Le choix de la technique de préparation dépend de la nature du revêtement et de son épaisseur.

a) Traitement par impact : Il permet de préparer la surface par projection d'abrasif. Celui-ci doit être à angle vif. Ce traitement nettoie la pièce et crée une certaine rugosité de la surface. Dans cette phase du traitement, les paramètres de projection de l'abrasif

doivent être contrôlés. En particulier, l'orientation du jet qui doit être compris entre 30 et 60° par rapport à la normale. L'abrasif doit être maintenu propre et sa granulométrie contrôlée. En outre, pour des emplois spécifiques, la quantité d'abrasif doit être vérifiée.

b) Préparation mécanique des surfaces : Cette technique consiste à effectuer un usinage permettant :

- de diminuer la dimension des pièces afin de laisser une épaisseur suffisante pour le dépôt sans cependant nuire à la résistance de celle-ci.
- d'augmenter les surfaces d'accrochage.
- dans le cas de réparation, cette technique permet de corriger le profil.

V) PARAMETRES DE PROJECTION

Les principaux paramètres à prendre en compte lors de la projection thermique sont [11,12] :

- les débits des fluides
- la vitesse de distribution des matériaux à projeter
- la distance de tir
- l'angle d'incidence

a) Débit des fluides : ceux-ci ont une influence importante sur les caractéristiques des dépôts. Les compositions préconisées des mélanges oxy-gaz doivent également être rigoureusement respectées conformément aux abaques. Dans la plupart des cas, les mélanges sont très près de la stoechiométrie en favorisant légèrement, soit l'oxygène, soit le gaz en fonction du produit et des caractéristiques des dépôts à obtenir.

b) Vitesse de distribution des matériaux à projeter : Les matériaux à projeter se présentent sous différentes formes (fils, poudres, cordons ou baguettes). Dans tous les cas, l'injection de ces produits dans la flamme se fait en fonction de la puissance du chalumeau, de la nature des produits et des caractéristiques souhaitées du dépôt.

c) Distance de tir : Ce paramètre varie de 60 à 250 mm. Suivant le mode de projection employé, la fusion des particules et leur vitesse changent. En règle générale, la distance de projection joue un rôle dans les caractéristiques des dépôts telles que porosité, adhérence, cohésion etc....

d) Angle d'incidence : La projection sur un substrat est généralement réalisée avec un angle d'incidence de 90°. Dans ce cas, le dépôt s'accroche normalement et est homogène. Si cet angle de projection est inférieur à 45°, la porosité du dépôt augmente ainsi que la cohésion entre les particules.

CHAPITRE II

ELABORATION DES MULTIMATERIAUX

I) INTRODUCTION

Ce chapitre présente la procédure d'élaboration des multimatériaux par la technique de la projection thermique à l'arc électrique ainsi que les processus relatifs à la préparation des éprouvettes. Notons que ces multimatériaux ont été réalisés à l'entreprise " **Algérie Métallisation** " spécialisée dans la récupération et la rénovation des pièces mécaniques usées.

II) ELABORATION DES MULTIMATERIAUX

II-1) PISTOLET DE PROJECTION

Le pistolet de projection utilisé est l'arc **SPRAY 234**, de marque anglaise utilisant l'arc électrique comme source d'énergie. Il a été conçu et développé pour réduire la fatigue de l'opérateur et des revêtements de hautes qualités. Appareil souple et portable, il se manipule aussi bien manuellement que mécaniquement [4-6].

II-2) MATERIAUX UTILISES

II-2-1) Substrat

Les matériaux de base utilisés sont des aciers faiblement alliés de nuance **25CD4**. Ce choix a été motivé d'une part par sa disponibilité dans l'industrie algérienne et d'autre part par son utilisation pour la réalisation des pièces soumises aux vibrations, aux chocs mécaniques et à l'usure tels que: les vilebrequins, les axes, les essieux....

L'analyse spectrochimique d'un échantillon de cet alliage réalisé sur un spectromètre type DV4, a révélé la composition chimique suivante:

Elements	Fe	C	Mn	Cr	Co	Mo
Composition	97,54	0,246	0,592	1,063	0,020	0,258

Tableau III-1: Analyse spectrochimique du matériau.

Après un traitement de trempe à l'huile effectué à 850°C et un revenu à 600°C, l'acier doit présenter les caractéristiques mécaniques suivantes:

Re (daN/mm ²)	R (daN/ mm ²)	A%	K _{UF}	HB
≥75	115	20	≥11	300

Tableau III-2: Caractéristiques du matériaux avant projection

II-2-2) Sous couche d'accrochage :

Pour les matériaux dont l'adhérence est faible, l'utilisation de la sous couche d'accrochage est d'une importance primordiale pour l'amélioration de l'adhérence du dépôt au substrat. Dans notre cas et vu l'importance de celle-ci, nous avons utilisé une sous-couche d'accrochage réalisé par déposition d'un alliage Ni-Al désigné par la nuance 75 E sur une épaisseur d'environ 0,1 mm à 0,2 mm [7-12].

II-2-3) Dépôt

Nous avons réalisé des revêtements composites par projection simultanée de deux fils en acier de nuances respectives 55E et 65E sur une épaisseur d'environ 1mm.

65E : acier au chrome Manganèse.

55E : acier inoxydable 18/5.

Eléments	Fe	C	Mn	Cr	Ni
Composition	66,6	0,132	8,1	18,5	5,5

II-3) PROCEDE DE METALLISATION

Afin de bien mener l'opération de projection, il est impératif de suivre certaines étapes tels qu'une bonne préparation de la surface et le choix des paramètres de projection.

II-3-1) Préparation de la surface à revêtir

a) Dégraissage:

Les échantillons utilisés au cours de la projection sont parallélépipédiques de dimension (50x5x3 mm³). Ces derniers sont dégraissés et nettoyés avec une solution de trichloroéthylène afin d'éliminer les salissures composées principalement de graisse d'huile, de sueur des mains...[13-14].

b) Décapage mécanique:

Cette opération consiste à préparer la surface d'accrochage par un meulage permettant de rugosifier la surface de l'échantillon.

c) Sablage :

Parmi les différentes méthodes de rugosification, nous avons utilisé le grenillage. Ce traitement qui consiste à cribler la surface par un jet de particules métalliques permet d'obtenir une surface prête pour recevoir le dépôt. La pression du jet de la grenaille utilisée est de 7 bars. Ce prétraitement garantit une bonne adhérence, les particules pénètrent les interstices de la surface rugueuse et pour ainsi dire s'agrippent à ses aspérités [18].

II-3-2) Paramètres de projection

Afin que la couche projetée s'amalgame le mieux possible avec le substrat, il est recommandé de respecter certaines indications préconisées par le constructeur et qui sont données par le tableau III-3.

Pression d'air dans le moteur	3,8 bars
Pression d'air dans la buse de projection	3 bars
Vitesse d'avance du fil métallique	0,064 m/s
Tension du générateur	30 V
Intensité du courant	100 A

Tableau II-3: Paramètres de mise en service du pistolet SPRAY 234.

D'autres paramètres de projection (distance de projection, vitesse de rotation de la cible, débit de matière projetée, angle de projection...) qui ont une influence majeure sur la qualité du revêtement, ne sont pas maîtrisés par l'entreprise et sont choisis aléatoirement en fonction des pièces traitées. C'est dans ce contexte, qu'une étude récente a été réalisée en collaboration avec cette entreprise et ayant pour objectif l'optimisation des paramètres de projection pour lesquels on a opté dans notre étude.

Distance de projection	140 mm
Vitesse de rotation de la cible	16 trs/min
Angle de tir	90 degrés
Vitesse d'avance de la buse	4 mm/tr

II-3-3) Préparation des échantillons

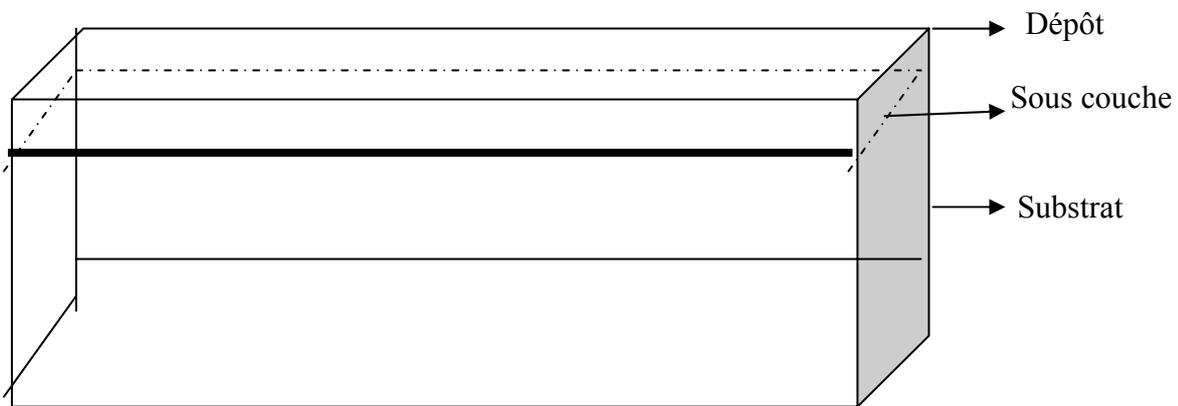
Dans le but de pouvoir faire une étude comparative, nous avons réalisé quatre (04) types différents de multimatériaux:

- ⇒ Des multimatériaux réalisés sans sous couche d'accrochage.
- ⇒ Des multimatériaux réalisés avec sous couche d'accrochage d'optimiser l'adhérence.
- ⇒ Des multimatériaux réalisés avec sous couche et traités thermiquement à 1050°C pendant 1 heure dans le but de voir l'influence du post-traitement sur l'adhérence des dépôts
- ⇒ Des matériaux constitués uniquement du matériau de base (25CD4) pour servir de référence.

Notons que le traitement thermique a été effectué sous atmosphère normale. Le refroidissement a lieu naturellement à l'air libre.

Les multimatériaux obtenus après la projection sont représentés par la figure III-

1.



CHAPITRE III
CARACTERISATIONS PHYSICO-CHIMIQUES
DES MULTIMATERIAUX

I) INTRODUCTION

Parmi les moyens utilisés pour la caractérisation de l'interface, figurent le microscope optique, la microsonde et la diffraction X sous incidence rasante. Des mesures de dureté et de microdureté ont été également effectuées. Ces techniques permettent d'avoir des informations sur la microstructure, sur la morphologie et la composition des différentes couches ainsi que sur la formation des composés intermétalliques et les carbures au niveau de l'interface.

II) OBSERVATION AU MICROSCOPE OPTIQUE

II-1) PREPARATION DES ÉCHANTILLONS

L'observation au microscope optique est effectuée sur des surfaces convenablement préparées ayant subies des polissages mécaniques avec des papiers abrasifs à granulométrie décroissantes (120, 320, 600, 800, 1000). Entre chaque passe du polissage, un nettoyage aux ultrasons a été effectué. La finition a été faite sur papier feutre d'une suspension d'alumine.

La mise en évidence des différentes structures est réalisée par une attaque chimique au Nital 5% (95% Alcool éthylique et 5% Acide nitrique) pendant près de 10 secondes.

Les différentes structures observées ont été effectuées au niveau de l'interface, comprenant le dépôt et le substrat, et au niveau du dépôt pour les quatre types d'échantillon étudiés, traités et non traités.

Dans ce qui suit, seront illustrées les structures obtenues représentées par les micrographies numérotées de 1 à 4.

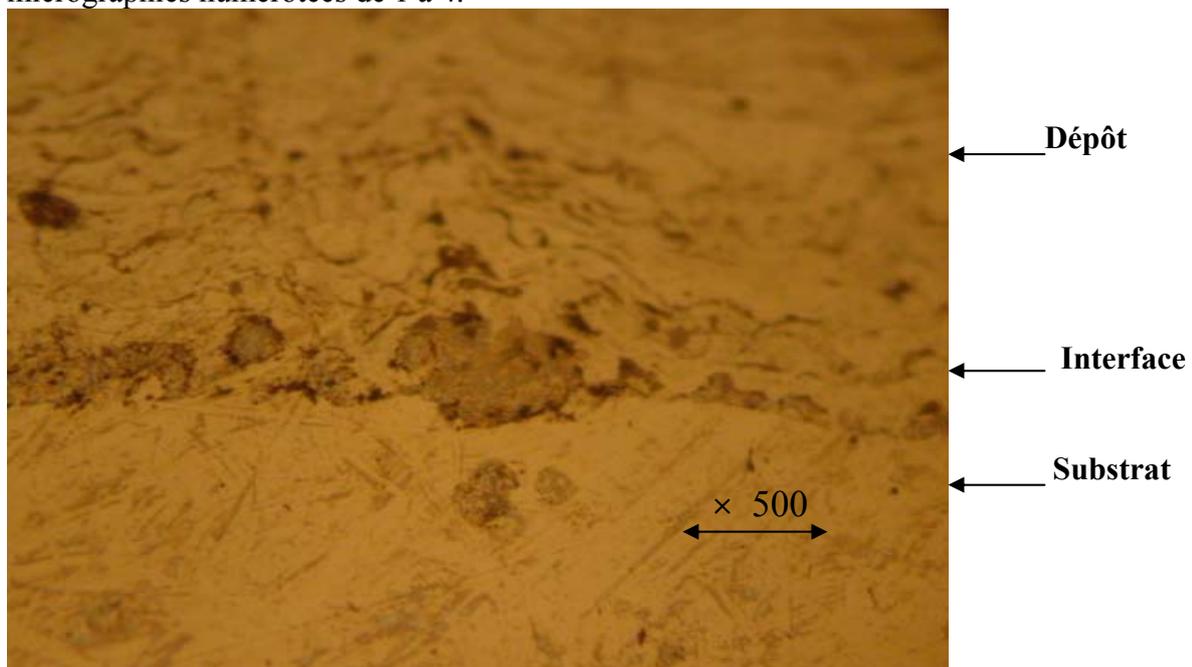


Figure 1 : Multimatérial 25CD4/65E/55E réalisé avec sous couche d'accrochage à base de l'alliage Ni-Al.

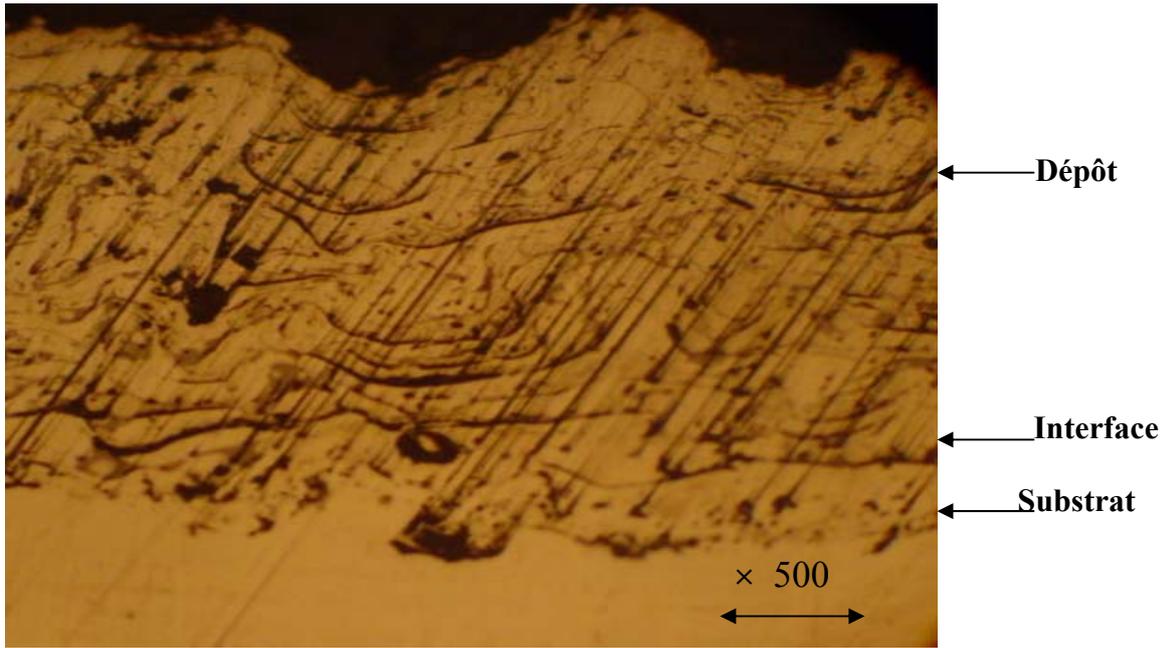


Figure 2 : Multimatériau 25CD4/65E /55E réalisé sans sous couche d'accrochage.

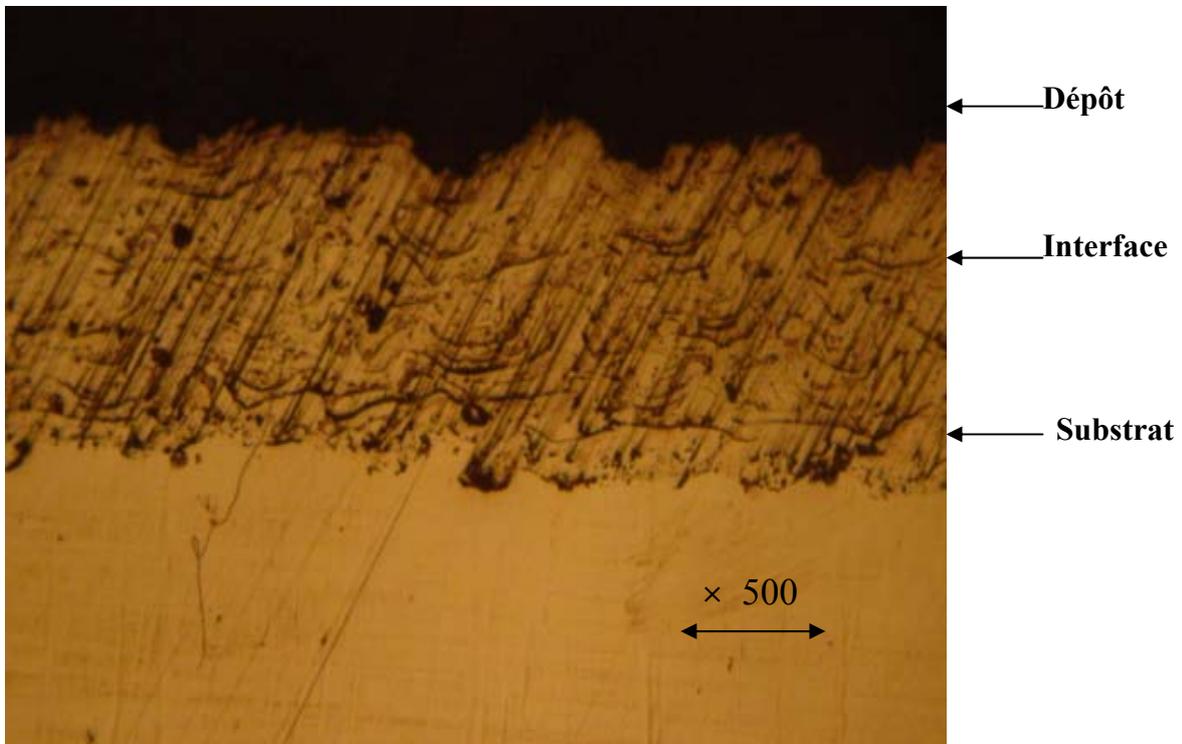


Figure 3 : Multimatériau 25CD4/65E /55E ayant subi un traitement thermique à 1050 °C pendant 1heure.

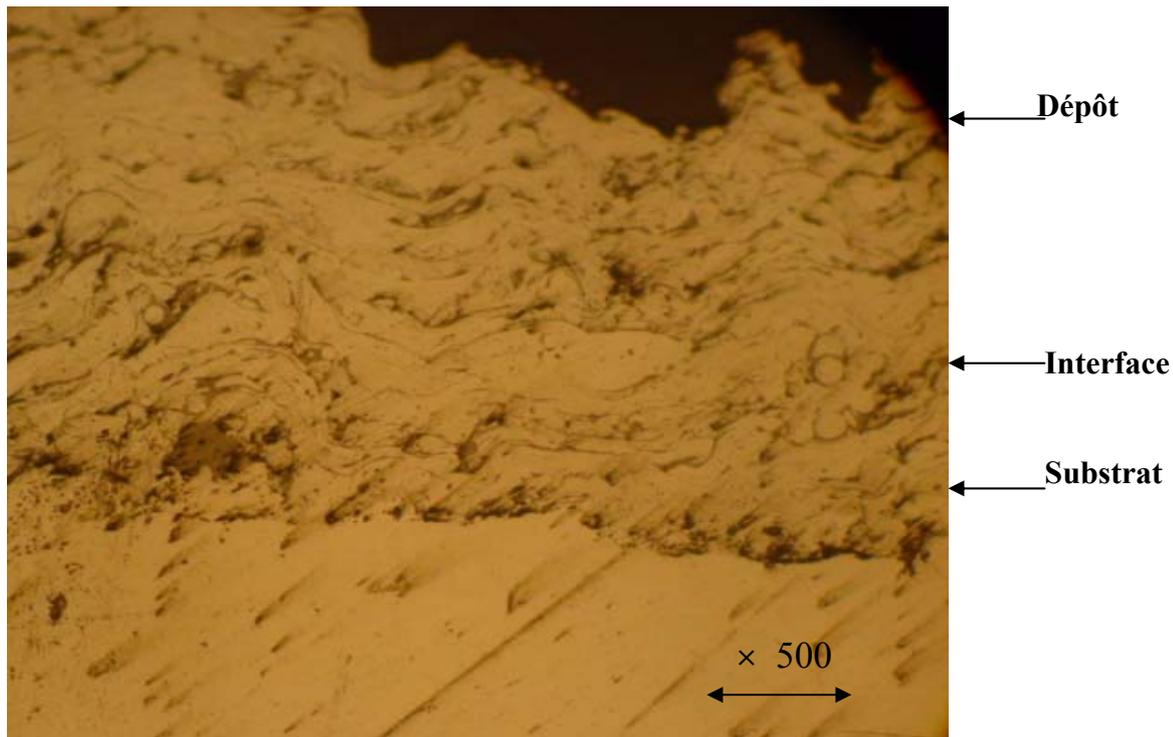


Figure 4 : Morphologie du dépôt, du substrat et de l'interface.

II-2) Interprétation des résultats

Pour un multimatériau réalisé avec sous couche, l'observation au microscope électronique à balayage a montré une bonne stratification des couches projetées ainsi que l'étalement des particules. Ce constat met en évidence l'importance de cette sous couche dans l'amélioration de l'adhérence entre le dépôt d'une part et le substrat d'autre part.

Pour un échantillon où la sous couche n'a pas été déposée, on constate que l'accrochage est purement mécanique vu que le substrat et le dépôt ont des coefficients de dilatations thermiques différents et vu aussi le nombre important des particules mal fondues (**Figure 2**).

Par contre, pour l'échantillon post-traité, à l'accrochage mécanique, s'ajoute un accrochage métallurgique à cause de la formation des composés intermétalliques et la présence de carbures. Ces derniers viennent ainsi renforcer la liaison substrat-revêtement (**Figure 3**).

III) OBSERVATION A LA MICROSONDE

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 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 répartis 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 choisis, on peut obtenir une image X de l'échantillon donnant la répartition de l'élément considéré [38].

III-2) RESULTATS DES ANALYSES

Afin de caractériser chimiquement la couche interfaciale, des images X des principaux éléments présents dans le substrats et le dépôt tels que: Fe, Cr, Ni, Al, Mo ont été réalisées.

Echantillon n°1: Multimatériau 25CD4/65E /55E réalisé sans sous couche d'accrochage

*** Répartition du Nickel**

Nous constatons que la concentration en Nickel dans le dépôt est plus riche que celle dans le substrat. De plus, les deux couches du multimatériau sont séparées par une ligne, ce qui montre que cet élément n'a pas diffusé vers le substrat (photo n°7).

*** Répartition du Fer**

Cet élément est présent dans tout l'échantillon, mais il n'est pas réparti de façon uniforme entre le substrat et le dépôt. Toutefois, on ne peut pas parler de diffusion du fer vers l'interface puisque celui-ci est localisé principalement dans le dépôt et le substrat (photo n°8).

*** Répartition du Chrome**

Nous faisons les mêmes constatations que pour l'image X du Nickel où l'élément n'a pas diffusé vers l'interface (photo n°9).

Echantillon n°2: Multimatériau 25CD4/65E /55E réalisé avec sous couche d'accrochage

*** Répartition du Nickel**

Nous avons décelé la présence du Nickel au niveau de l'interface près du dépôt où l'on constate une légère diffusion de cet élément. Contrairement à cela, on constate qu'on n'a pas de diffusion au niveau de l'interface près du substrat (photo n°10).

*** Répartition de l'Aluminium**

Cette image montre que l'Al se situe uniquement dans la sous couche. Bien que l'on puisse distinguer la limite entre le substrat et le dépôt, la continuité du passage de l'un à l'autre n'exclut pas la possibilité de l'intervention de l'Aluminium dans la liaison substrat-dépôt (photo n°11).

*** Répartition du Fer**

Cet élément est présent dans tout l'échantillon, même de part et d'autre de la sous couche d'accrochage en faible proportion. Ceci montre qu'on a une légère diffusion (photo n°12).

*** Répartition du Chrome**

Pas de diffusion de cet élément d'une partie vers l'autre (photo n°13).

Echantillon n°3: Multimatériau ayant subi un traitement thermique à 1050°C pendant 1 heure

*** Répartition du Nickel**

Nous avons décelé la présence du Nickel de part et d'autre de la sous couche. Ceci ne peut être due alors qu'à la diffusion de cet élément (photo n°14).

*** Répartition de l'Aluminium**

Nous faisons les mêmes constatations que l'image X de l'Al de l'échantillon précédent (photo n°15).

*** Répartition du Fer**

A la différence de l'échantillon précédent, cette image est intéressante car le Fer est réparti de façon uniforme entre le substrat et le dépôt. Or, la sous couche, en principe, ne contient pas le Fer donc la présence de cet élément de part et d'autre de celle-ci ne peut s'expliquer que par sa diffusion (photo n°16).

*** Répartition du Chrome**

On remarque une diffusion du Chrome de part et d'autre de l'interface (photo n°17).

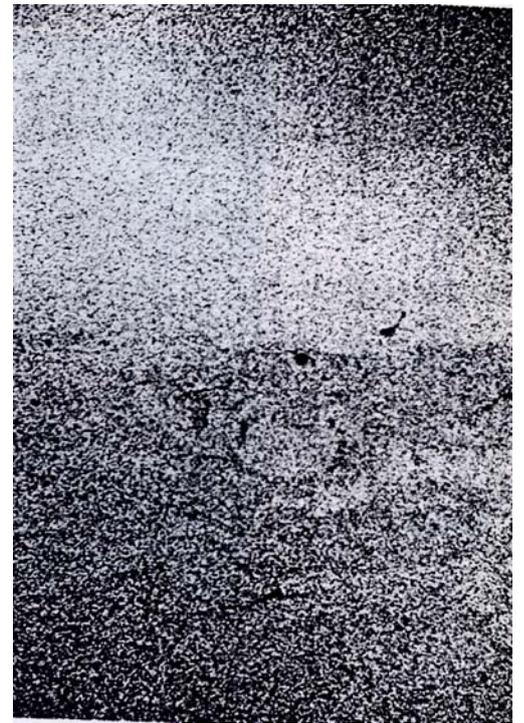
Echantillon n°1 : Multimatérial 25CD4/65E /55E réalisé sans sous couche.



← Dépôt →

← Substrat →

50 μm X 200



50 μm X 200

Photo n°7 : Image X du Ni



← Dépôt

← Substrat

Photo n°9 : Image X du Cr

50 μm X 200

Echantillon n°2 : Multimatérialu 25CD4/65E /55E réalisé avec sous couche.

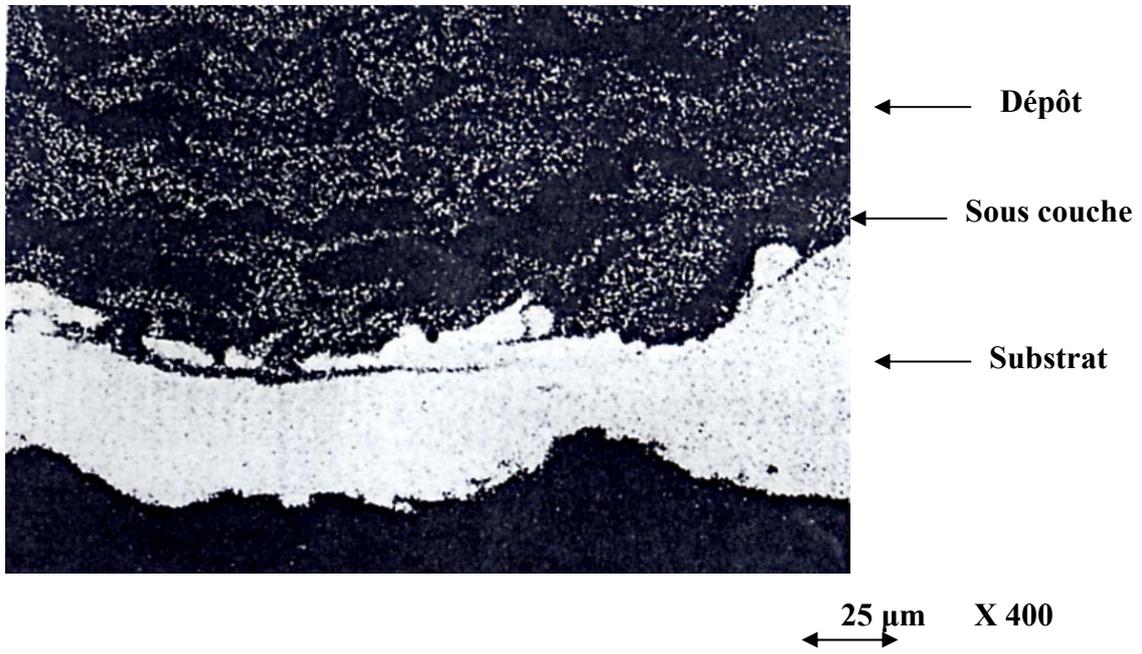


Photo n°10 : Image X du Ni

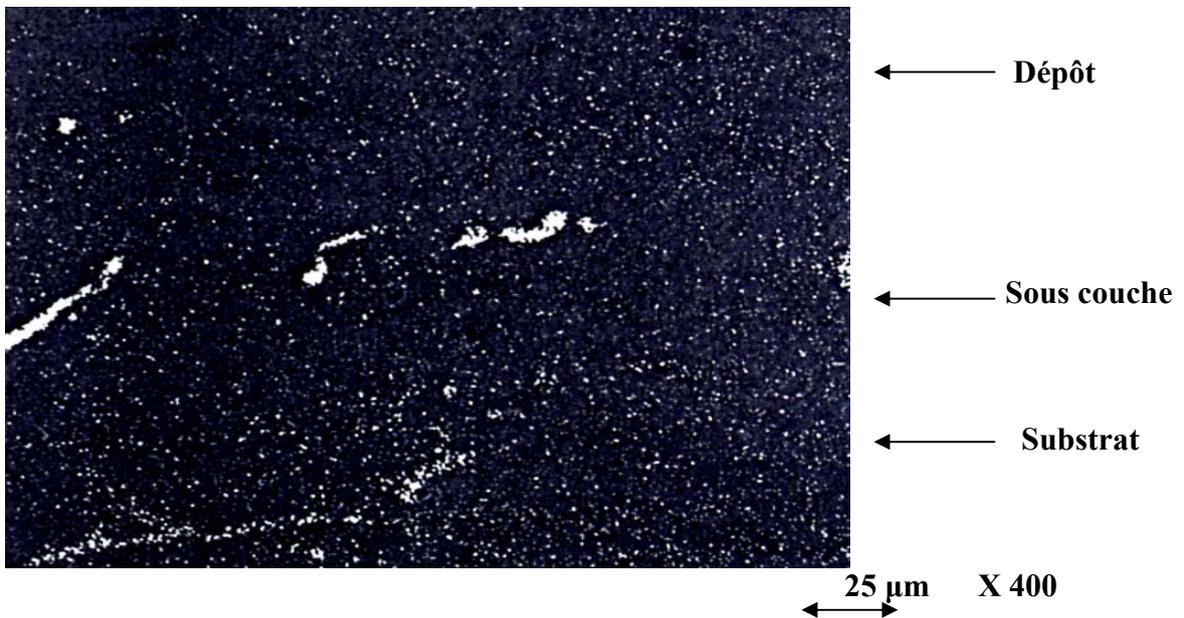


Photo n°11: Image X d'Al

Echantillon n°2 : Multimatériau 25CD4/65E /55E réalisé avec sous couche.

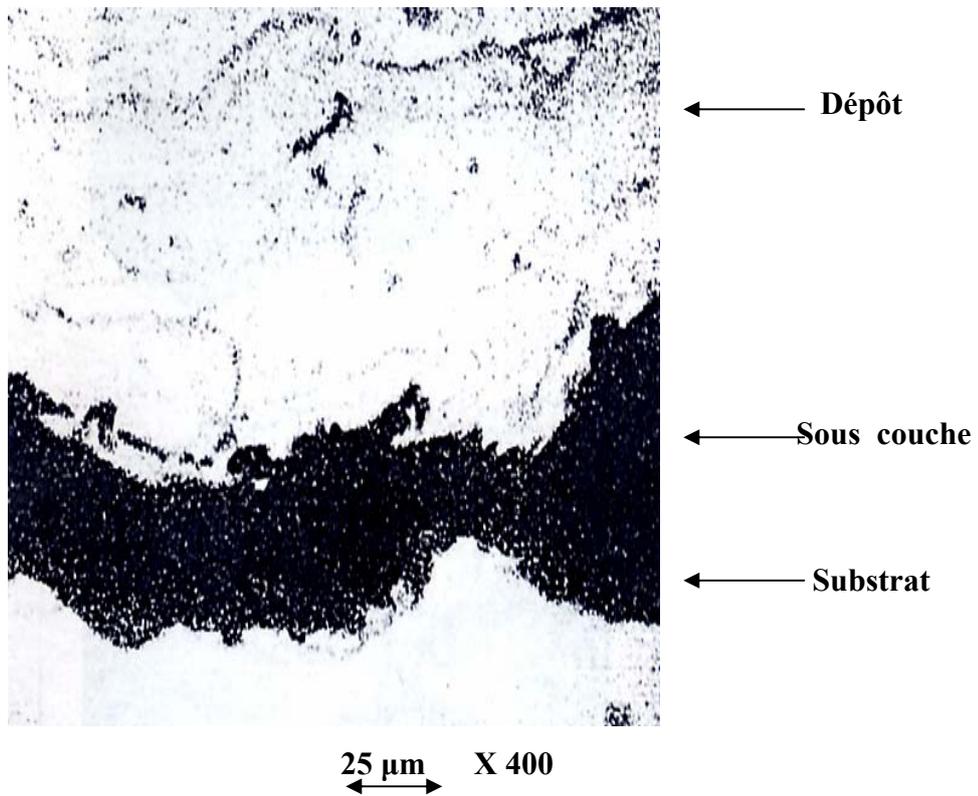


Photo n°12: Image X du Fe

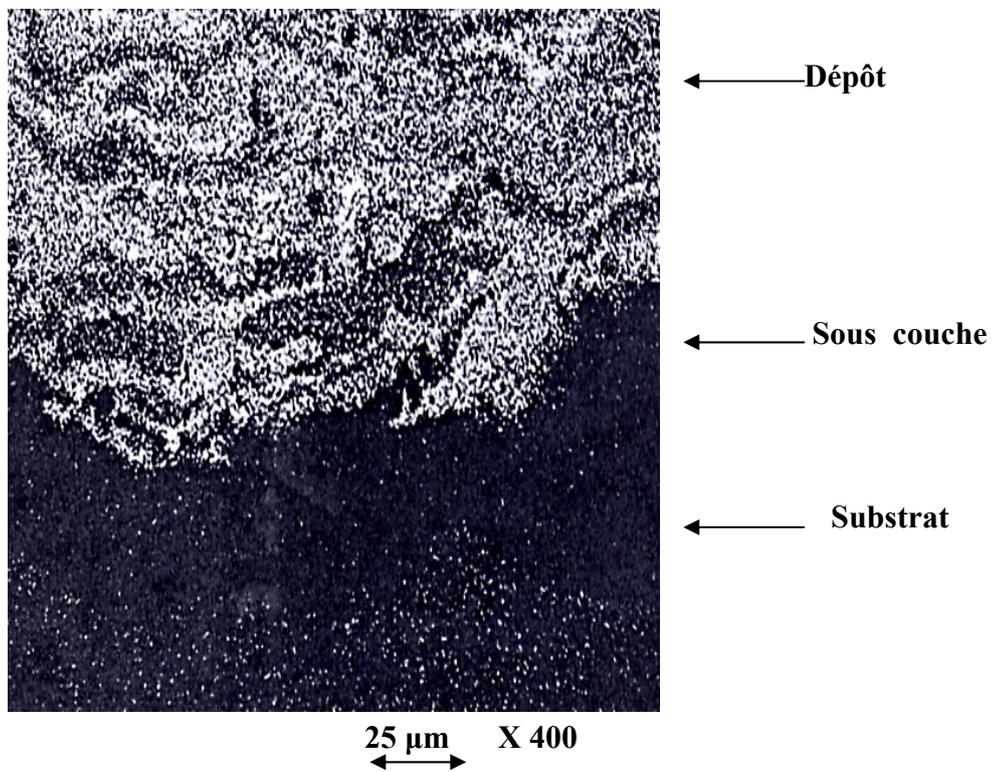


Photo n°13: Image X du Cr

Echantillon n°3 : Multimatérial 25CD4/65E /55E ayant subi un traitement thermique à 1050 °C pendant 1heure.

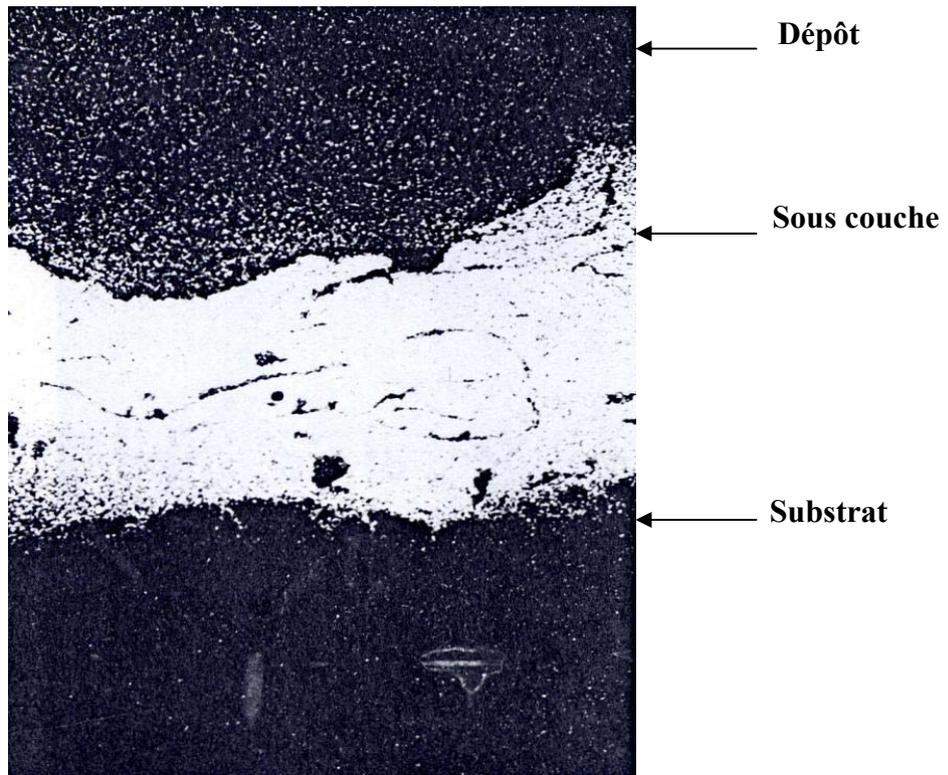


Photo n°14: Image X du Ni

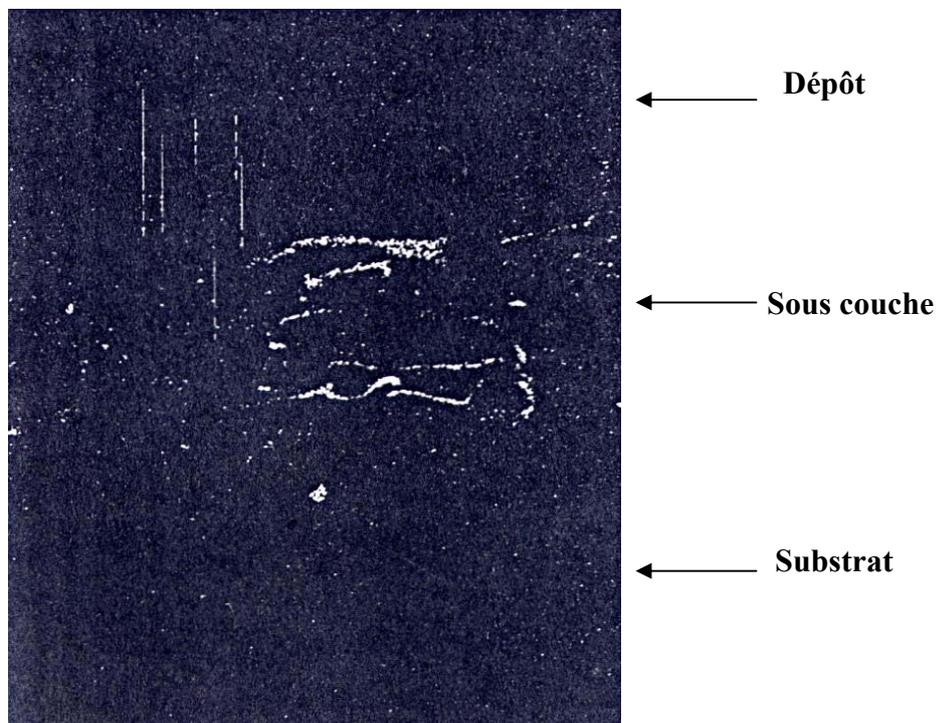


Photo n°15: Image X d'Al

Echantillon n°3 : Multimatérial 25CD4/65E /55E ayant subi un traitement thermique à 1050 °C pendant 1heure.

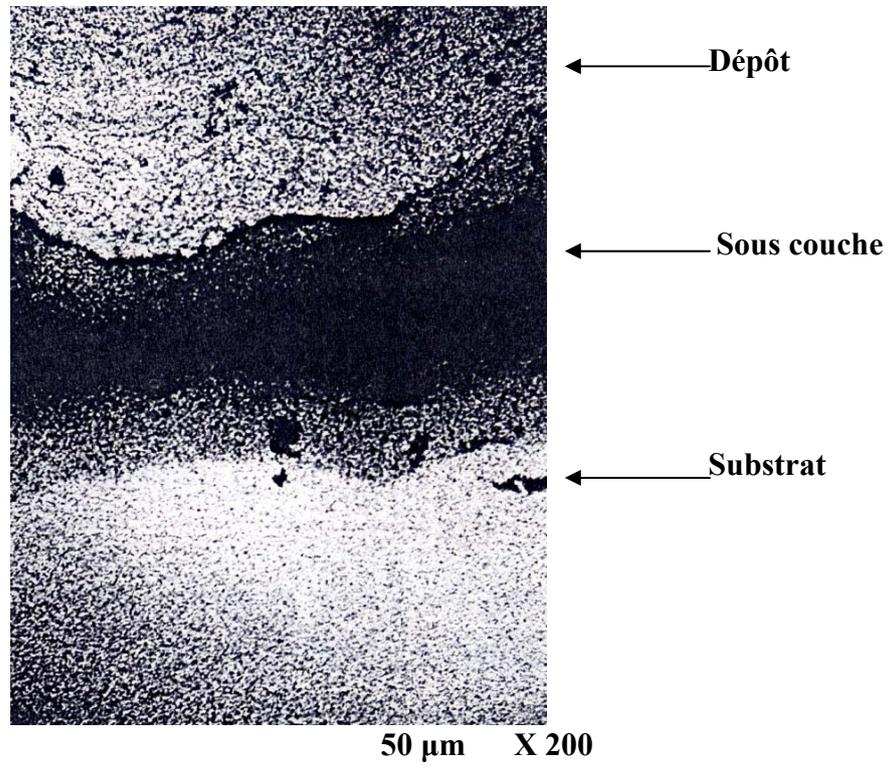


Photo n°16: Image X du Fe

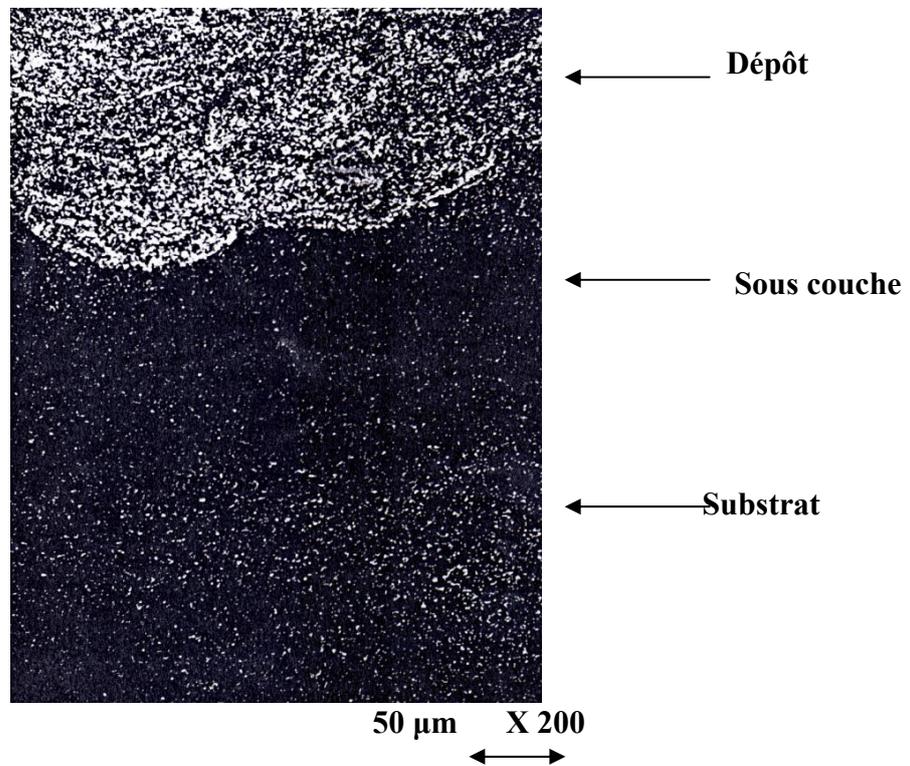


Photo n°17: Image X du Cr

III-1) Interprétation des résultats

Pour le multimatériau réalisé sans sous couche, les images du Fe, du Ni et du Cr permettent de constater que ceux-ci n'ont pas diffusé vers l'interface, ceci s'explique par le fait que le substrat et le dépôt sont liés uniquement par une liaison mécanique.

Par contre, pour un multimatériau réalisé avec sous couche, nous avons décelé la présence du Nickel dans le dépôt en faible proportion. La présence de cet élément ne peut s'expliquer que par sa diffusion à partir de la sous couche d'accrochage de même que l'Al. En revanche, l'image du Fe nous a montré que cet élément n'est pas réparti d'une manière uniforme entre le substrat et le dépôt. Toutefois, on peut parler d'une légère diffusion.

Enfin pour un multimatériau traité, l'image du Ni permet de constater de part et d'autre de la sous couche la présence du Ni en faible proportion. Par contre l'image du Fe est intéressante car elle montre la répartition de cet élément d'une manière uniforme. La présence de cet élément de part et d'autre de la sous couche d'accrochage ne peut être due qu'à une diffusion de cet élément.

IV) DIFFRACTION X SOUS INCIDENCE RASANTE

Après un polissage jusqu'à l'interface, une série d'analyse par diffraction X sous incidence rasante a été effectuée à ce niveau afin d'identifier les phases présentes ainsi que les composés intermétalliques formés.

IV-1) Principe

Dans les conditions habituelles de diffraction ou de fluorescence, l'angle d'incidence α du faisceau de rayon X tombant sur la surface de l'échantillon à analyser est de l'ordre de quelques dizaines de degrés et la profondeur de pénétration du faisceau dans le matériau est alors de l'ordre de quelques dizaines de microns. Si l'on veut étudier une surface ou une couche mince d'épaisseur inférieure à $1\mu\text{m}$, le signal parasite dû au substrat sera important et masquera le signal à étudier.

La diffraction des rayons X en incidence rasante ($0.1 < \alpha < 3^\circ$) permet d'étudier la surface d'un échantillon sur une profondeur comprise entre 20 et 1000 \AA .

Contrairement à la diffraction classique, où l'angle d'incidence du faisceau X est de quelques dizaines de degrés, ce qui implique des profondeurs de pénétration de ce faisceau sur plusieurs micromètres, dans le cas d'une incidence rasante (de quelques dixièmes à 1 ou 2 degrés), la diffraction s'opère dans les zones très superficielles du matériau [46].

IV-2) DISPOSITIF EXPERIMENTAL

La figure IV-1 représente le dispositif expérimental de diffraction X sous incidence rasante utilisé. La source de rayon X est une anode de cuivre ($\lambda_{\text{K}\alpha} \text{ Cu} = 0,154 \text{ nm}$). Les spectres sont réalisés à α constant, le détecteur se déplaçant. En générale, la détection du faisceau diffracté se fait dans le plan d'incidence mais elle peut également s'effectuer dans tout l'espace. L'utilisation des fentes de Sollers sur le trajet du faisceau diffracté permet d'améliorer la résolution, c'est-à-dire de réduire la largeur instrumentale des raies de Bragg à $0,1 \text{ \AA}$. Ce dispositif diffère assez peu d'un appareillage classique de diffraction X. La

différence majeure tient au réglage très précis des petits angles d'incidences. La surface de l'échantillon doit être suffisamment plane et bien polie. Le polissage sur pâte diamantée s'avère convenir [46].

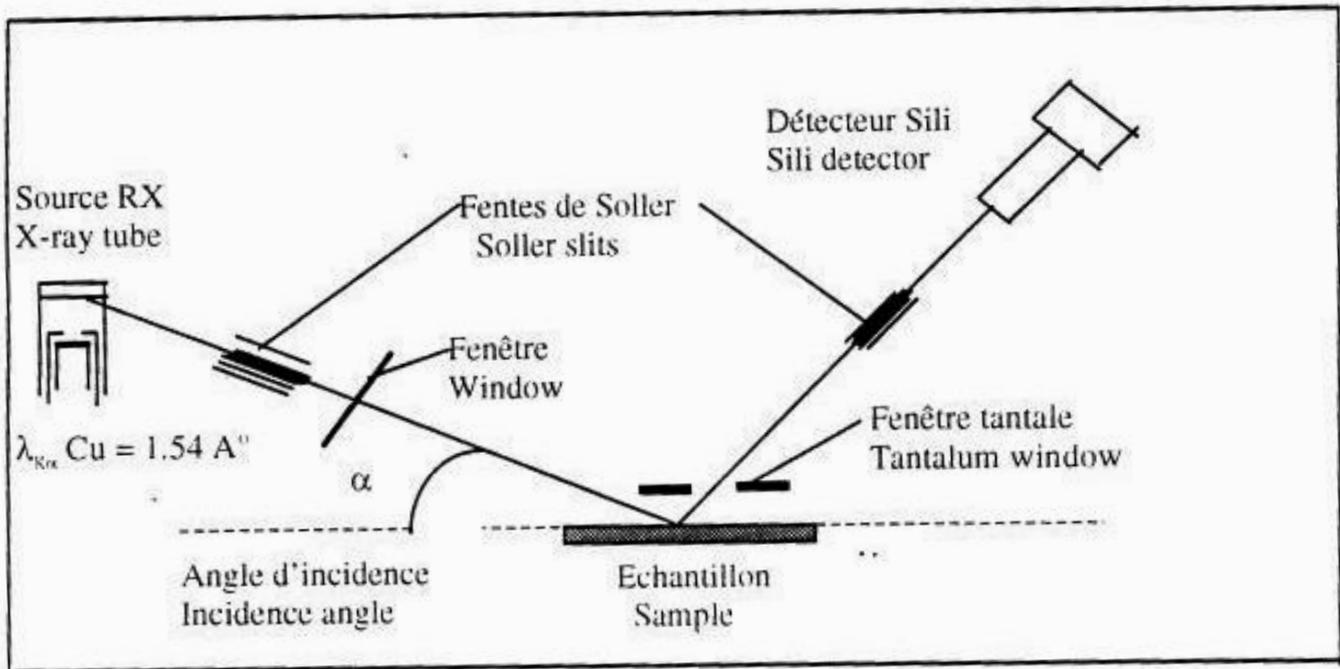


Fig IV-1: Schéma de l'appareillage de diffraction X sous incidence rasante

IV-3) RESULTATS DES ANALYSES

Echantillon n°1: Matériau 25CD4/65E /55E sans revêtement

La diffraction X de la surface du matériau sans revêtement a révélé la présence des éléments suivants Fe, Cr, Mn (fig IV-2).

Echantillon n°2: Matériau 25CD4/65E /55E réalisé sans sous couche

Cette analyse a montré que le dépôt projeté à l'arc électrique sans la sous couche n'adhère pas bien au substrat, ceci est dû à la non formation de composés intermétalliques. Cependant, on signale la présence de certains oxydes tel que NiO, MnO (fig IV-3).

Echantillon n°3: Matériau 25CD4/65E /55E réalisé avec sous couche

Contrairement à l'échantillon précédent, le spectre de diffraction X du multimatériau réalisé avec sous couche a montré, en plus de la présence des oxydes NiO et MnO, la présence du carbure Cr_3C_2 et la formation du composé intermétallique Fe_3Al . Ceux-ci viennent ainsi renforcer l'adhérence du dépôt. De ce constat, nous concluons que la sous couche Ni-Al intervient dans l'amélioration de la qualité de l'adhérence.

Echantillon n°4: Multimatériau 25CD4/65E /55E ayant subi un traitement thermique à 1050°C pendant 1 heure

Cette analyse de diffraction X est très intéressante car elle nous a permis de mettre en évidence le phénomène de diffusion par la présence de traces des carbures tel que Cr_3C_2 et Al_4C_3 au niveau de l'interface. Celle-ci nous a aussi révélé la formation de composés intermétalliques tels que Fe_3Al et $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$. Ces derniers viennent ainsi renforcer l'adhérence.

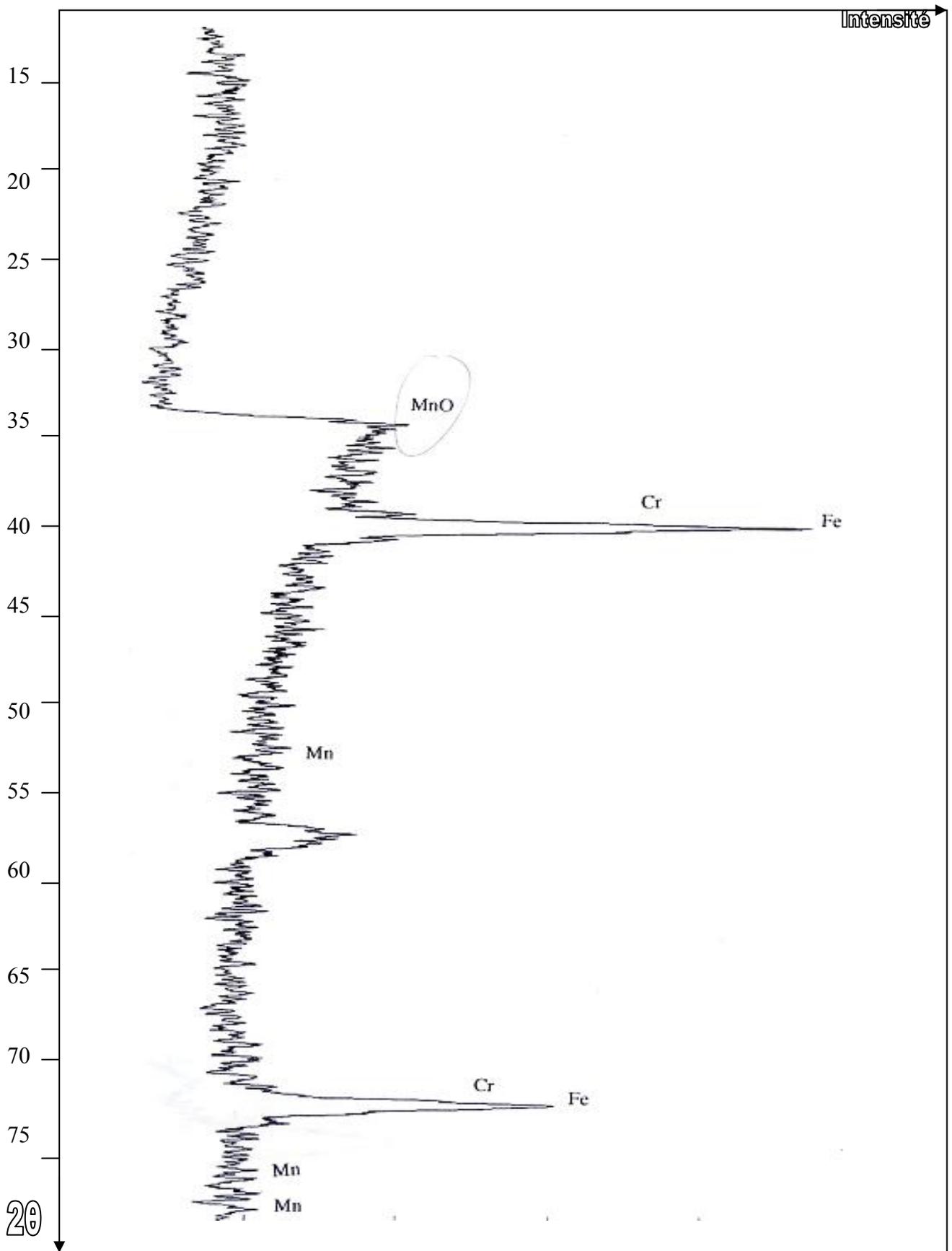


Fig IV-2 : Spectre de diffraction X sous incidence rasante de la surface du substrat 25CD4.

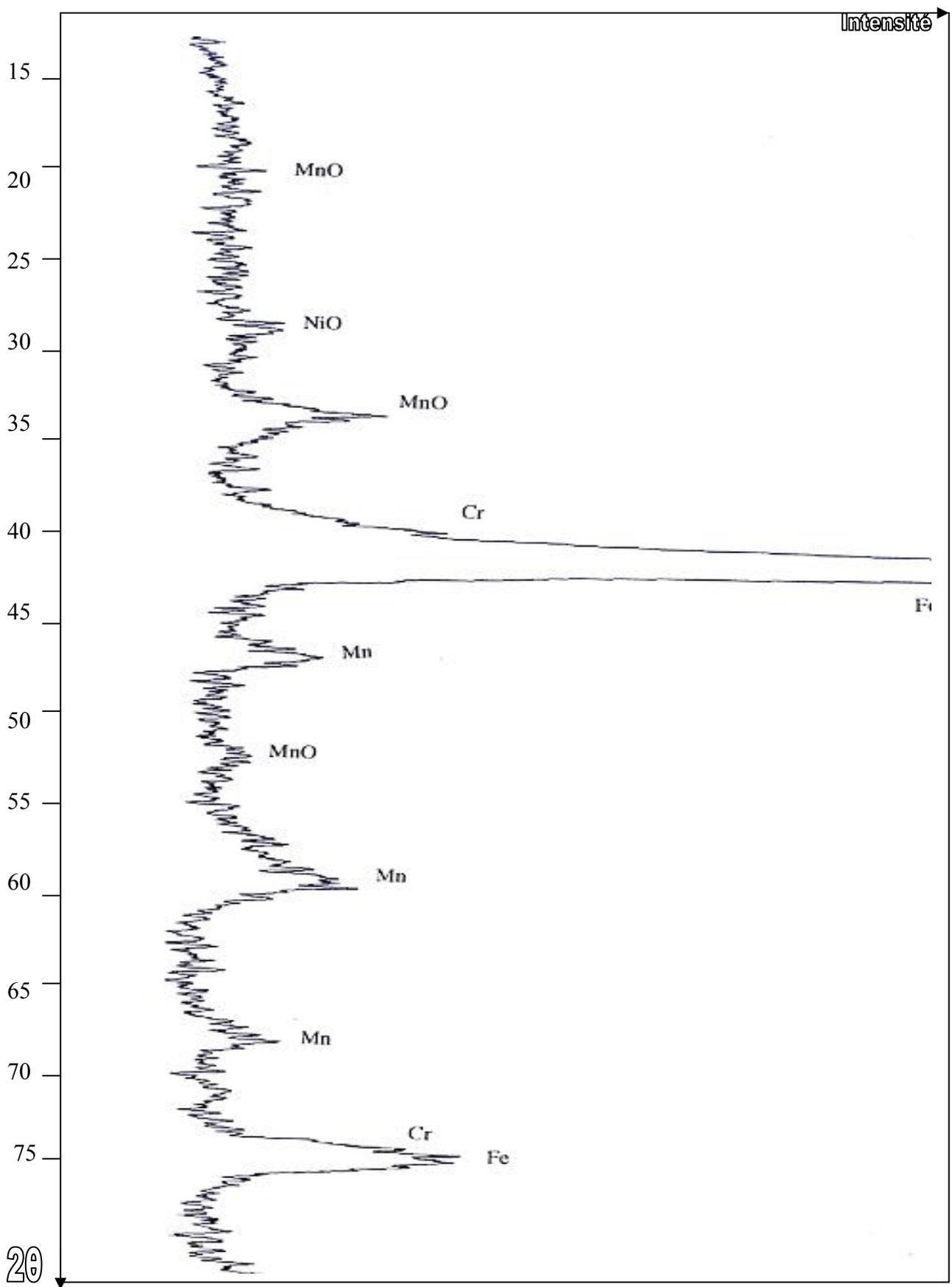


Fig IV-3 : Spectre de diffraction X sous incidence rasante de la surface du multimatériau réalisé sans sous couche.

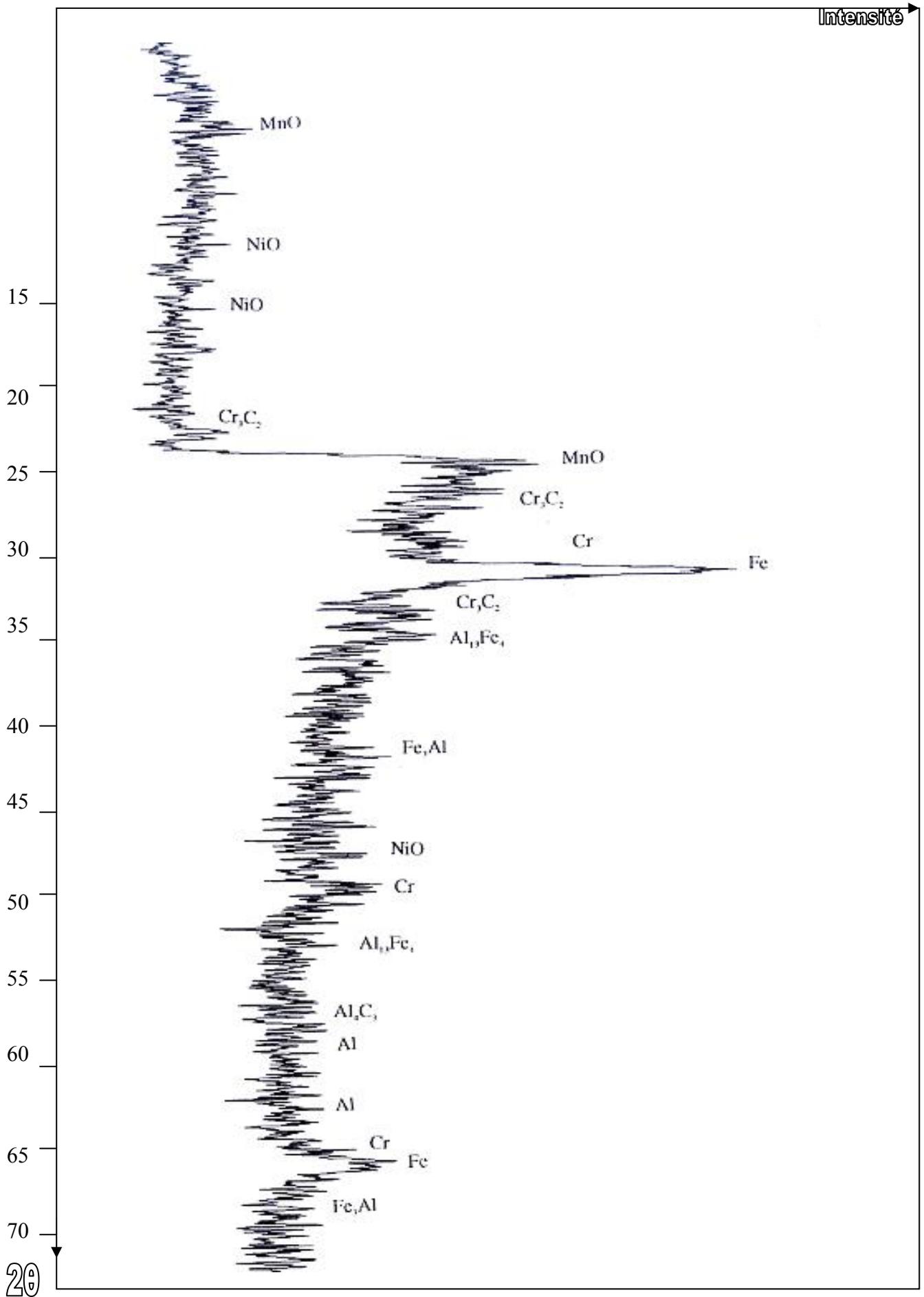


Fig IV-4 : Spectre de diffraction X sous incidence rasante de la surface du multimatériau réalisé avec sous couche.

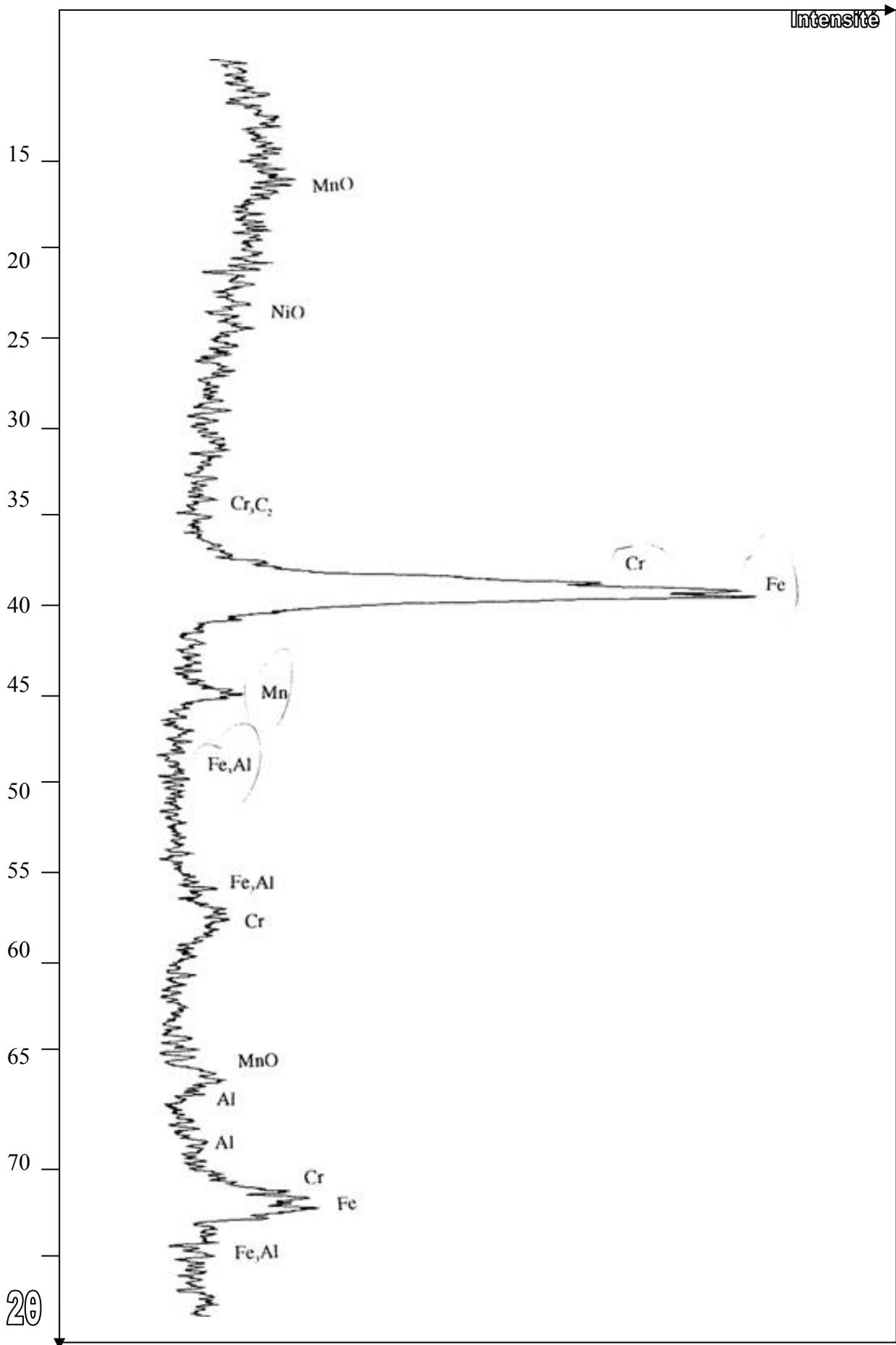


Fig IV-5 : Spectre de diffraction X sous incidence rasante de la surface du multimatériau traité à 1050°C pendant 1heure.

IV-4) INTERPRÉTATION DES RESULTATS

A travers cette série d'analyses, il ressort que:

- le post-traitement est favorable à l'amélioration de l'adhérence, et ceci par la formation des composés intermétalliques et les carbures qui renforcent la liaison substrat dépôt par le phénomène de diffusion.
- L'utilisation des couches intermédiaires entre le substrat et le dépôt est indispensable car elles permettent d'améliorer d'adhérence par l'établissement de liaison chimique entre substrat d'une part et le dépôt d'autre part.

V) ÉTUDE DE LA DURETE ET DE LA MICRODURETE

V-1) ESSAI DE DURETE

Dans notre étude, la dureté est influencée par l'étalement et la cohésion des particules; la porosité, l'épaisseur du dépôt ainsi que la précipitation des phases intermétalliques et des carbures; toutefois elle demeure une méthode précieuse pour déterminer la qualité d'un revêtement.

Dans ce travail, nous avons utilisé l'essai Rockwell dont les caractéristiques sont :

- pénétrateur : Bille d'acier
- charge : 100 Kg

Les essais de dureté Rockwell ont été effectués sur la surface des échantillons soigneusement polie mécaniquement avec des papiers abrasifs très fins, puis à l'aide de pâtes diamantées.

Signalons, toutefois que les valeurs enregistrées sur les courbes découlent de la moyenne arithmétique de trois essais différents.

Dans ce qui suit, on présentera les courbes schématisant les variations de dureté des différents échantillons étudiés en fonction de la position (fig IV-6, 7 et 8). Elles concernent :

- le multimatériau réalisé avec sous couche d'accrochage
- le multimatériau réalisé sans sous couche d'accrochage
- le multimatériau ayant subi un traitement thermique à 1050°C pendant 1 heure.

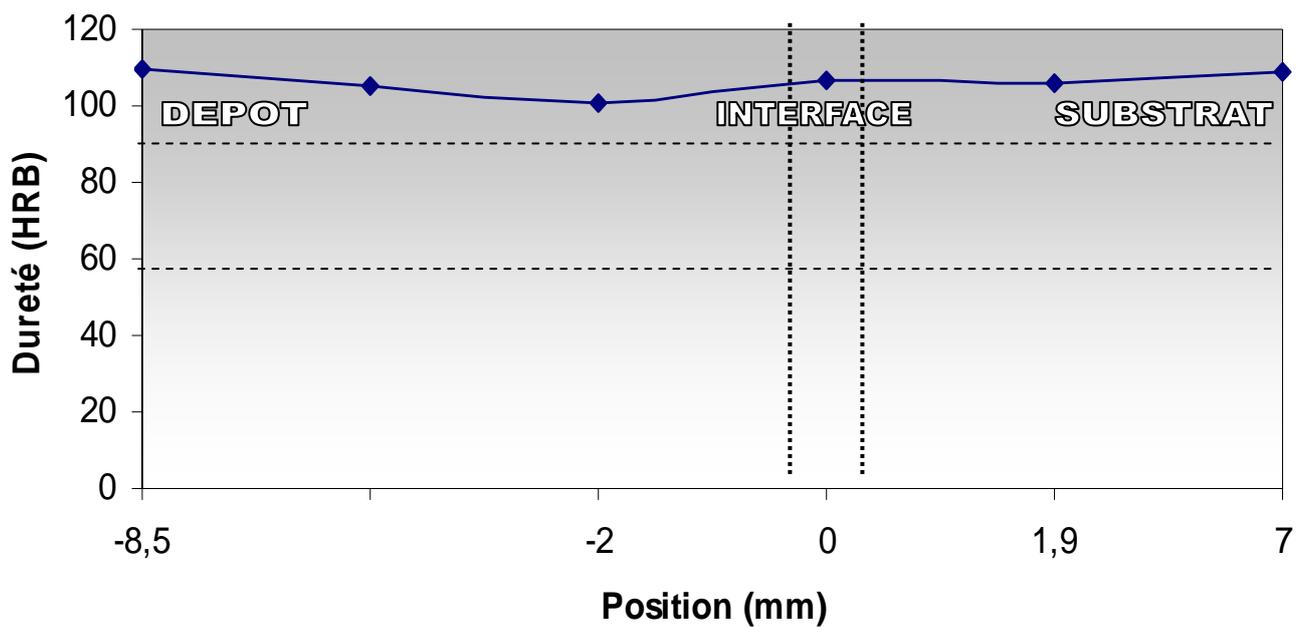


Fig IV-6 : Evolution de la dureté dans le multimatériau réalisé

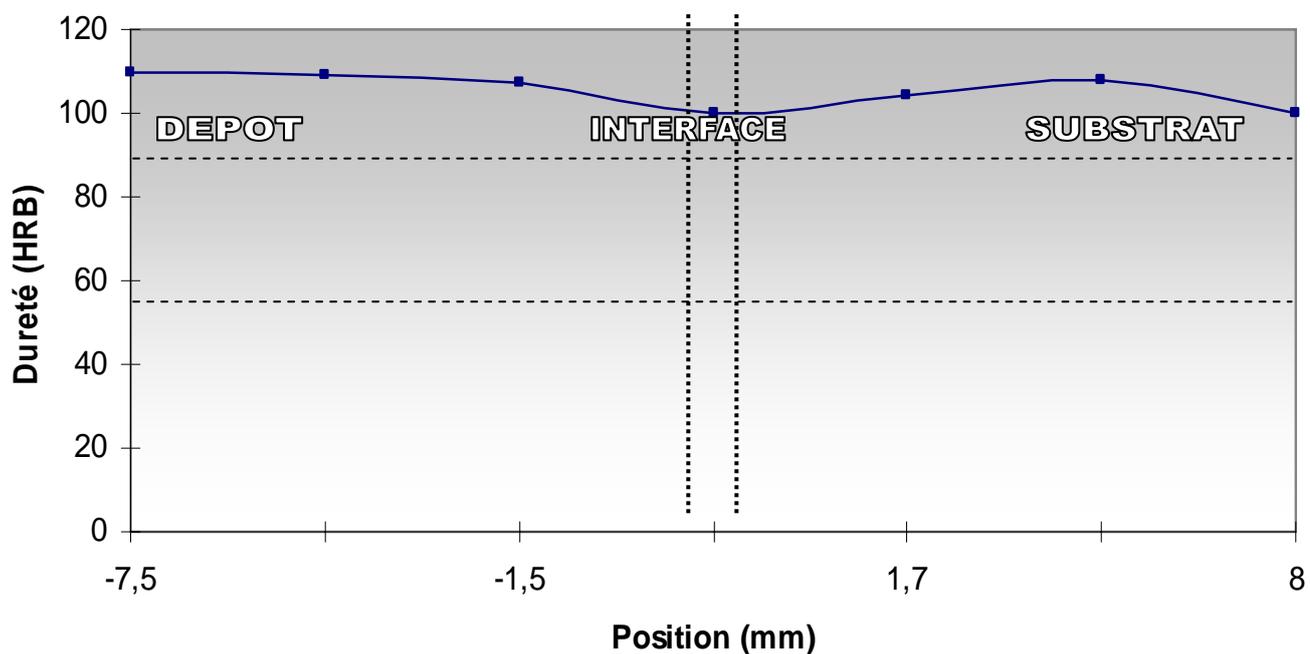


Fig IV-7 : Evolution de la dureté dans le multimatériau réalisé sans sous couche

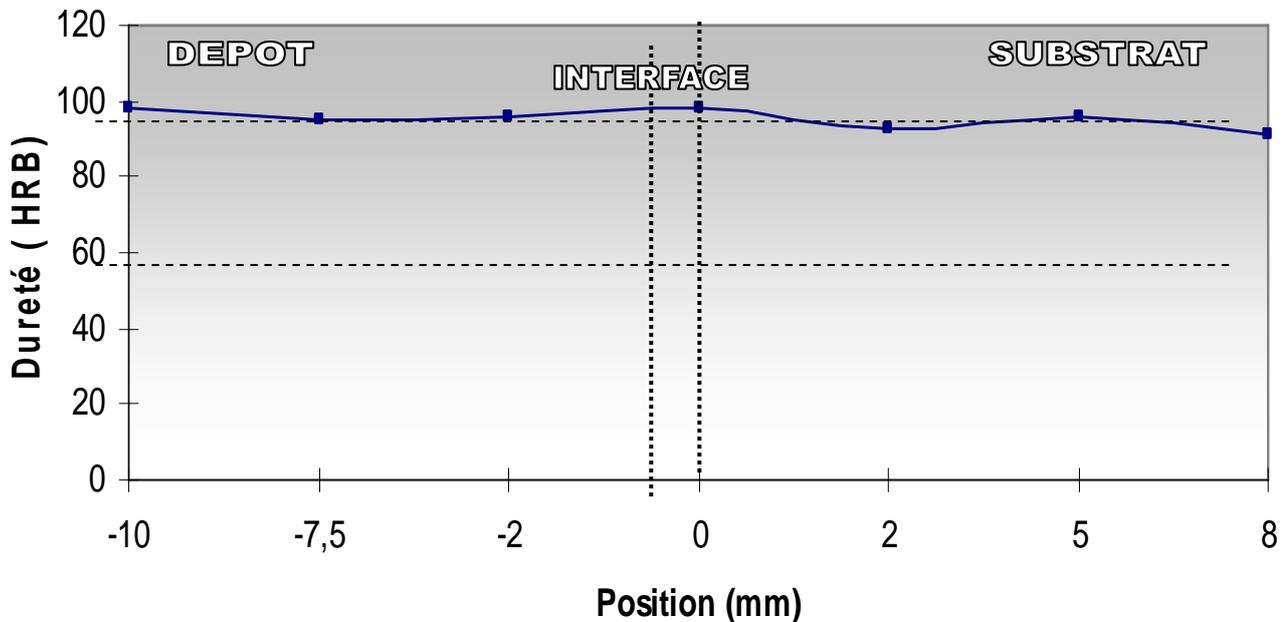


Fig IV-8 : Evolution de la dureté dans le multimatériau traité thermiquement à 1050°C pendant 1 heure

V-1-2) Interprétation des résultats

Concernant les duretés **HRB**, on remarque que celle-ci s'échelonne sur un ordre de grandeur appréciable.

Pour un multimatériau réalisé avec sous couche d'accrochage, la dureté à l'interface est légèrement supérieure à celle du substrat et du dépôt et ceci s'explique par la présence des carbures et la diminution de la porosité. Ce résultat est très intéressant car illustre bien l'uniformité de la dureté en allant du substrat vers l'interface, puis vers le dépôt (fig IV-6).

Par contre pour un multimatériau réalisé sans sous couche d'accrochage, la dureté à l'interface est faible à celle du substrat et du dépôt. Ceci s'explique par le fait que la porosité est élevée. Ce constat met en évidence l'importance de la sous couche d'accrochage dans la concrétisation de ce genre de compromis (fig IV-7).

Dans le cas d'un multimatériau ayant subi un traitement thermique à 1050°C pendant 1 heure, la dureté à l'interface est élevée, ceci est du à la formation des composés intermétalliques et la présence des carbures. Même si les duretés ne sont pas grandes à celles du matériau réalisé avec sous couche d'accrochage, elles illustrent par ailleurs l'uniformité des propriétés entre le dépôt et le substrat (fig IV-8).

V-2) ESSAI DE MICRODURETE

Les mesures de microdureté «Vickers» ont été effectuées sur la surface des échantillons en faisant une succession de pointés de microduretés, alignés selon une même direction, qui peut être choisie d'une manière arbitraire. Il faut noter que les échantillons testés ont subi un polissage préalable. La valeur de la microdureté obtenue représente la moyenne arithmétique de trois essais différents. Pour tous nos essais, la charge était de 500 g.

Dans ce qui suit, on présentera les courbes schématisant les variations de microdureté des différents échantillons étudiés en fonction de la distance (fig IV-9, 10 et 11).

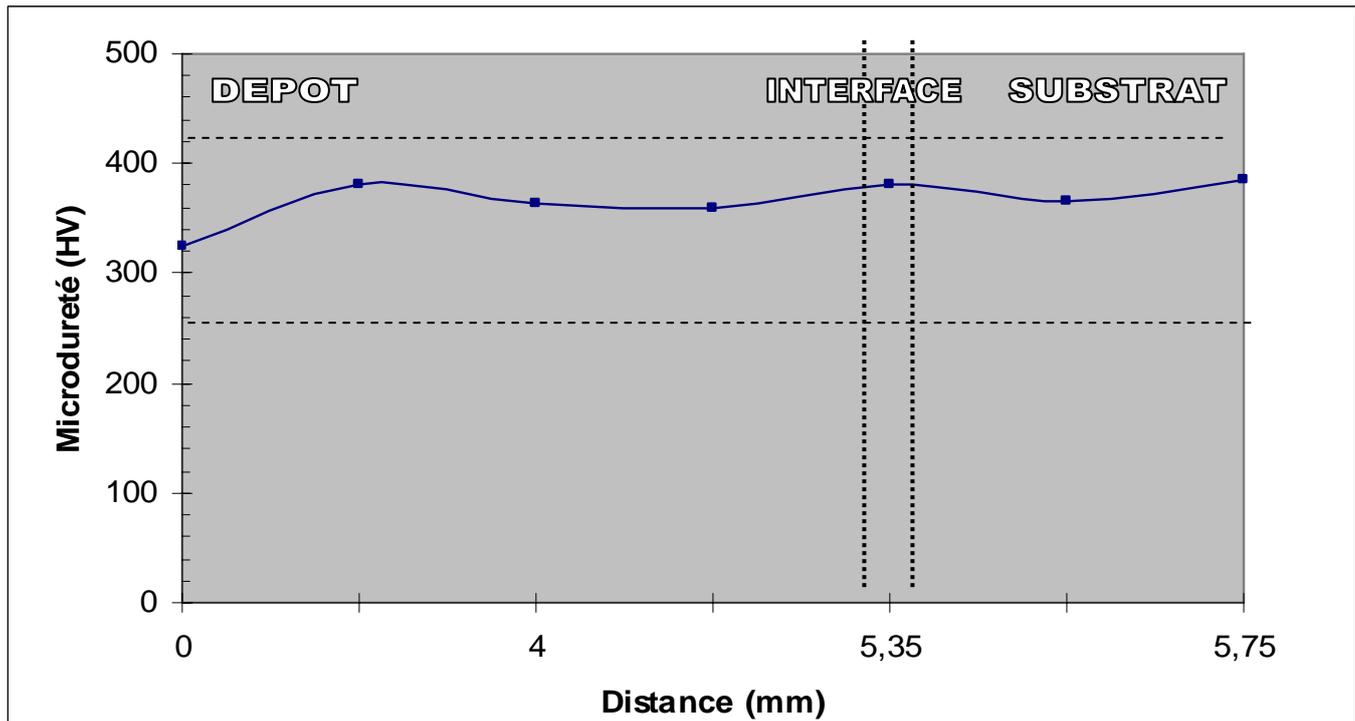


Fig IV-9 : Evolution de la microdureté dans le multimatériau réalisé avec sous couche

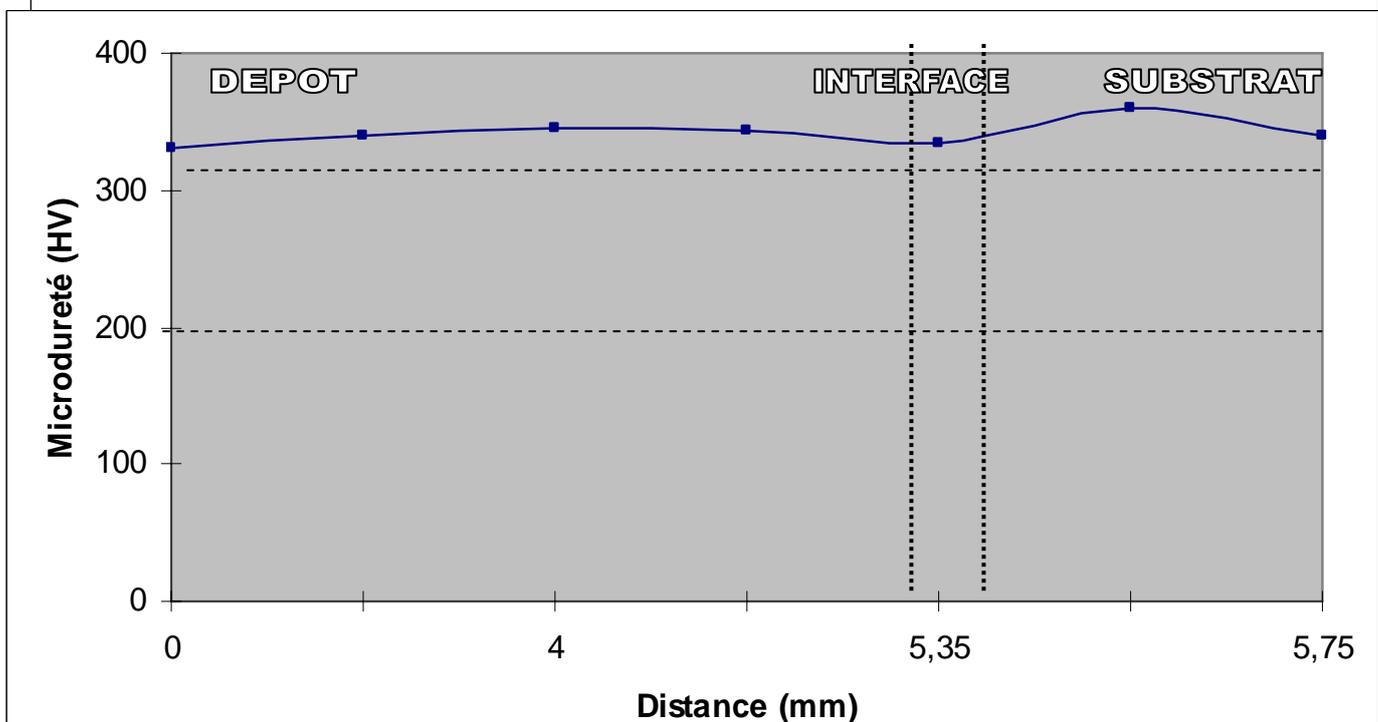
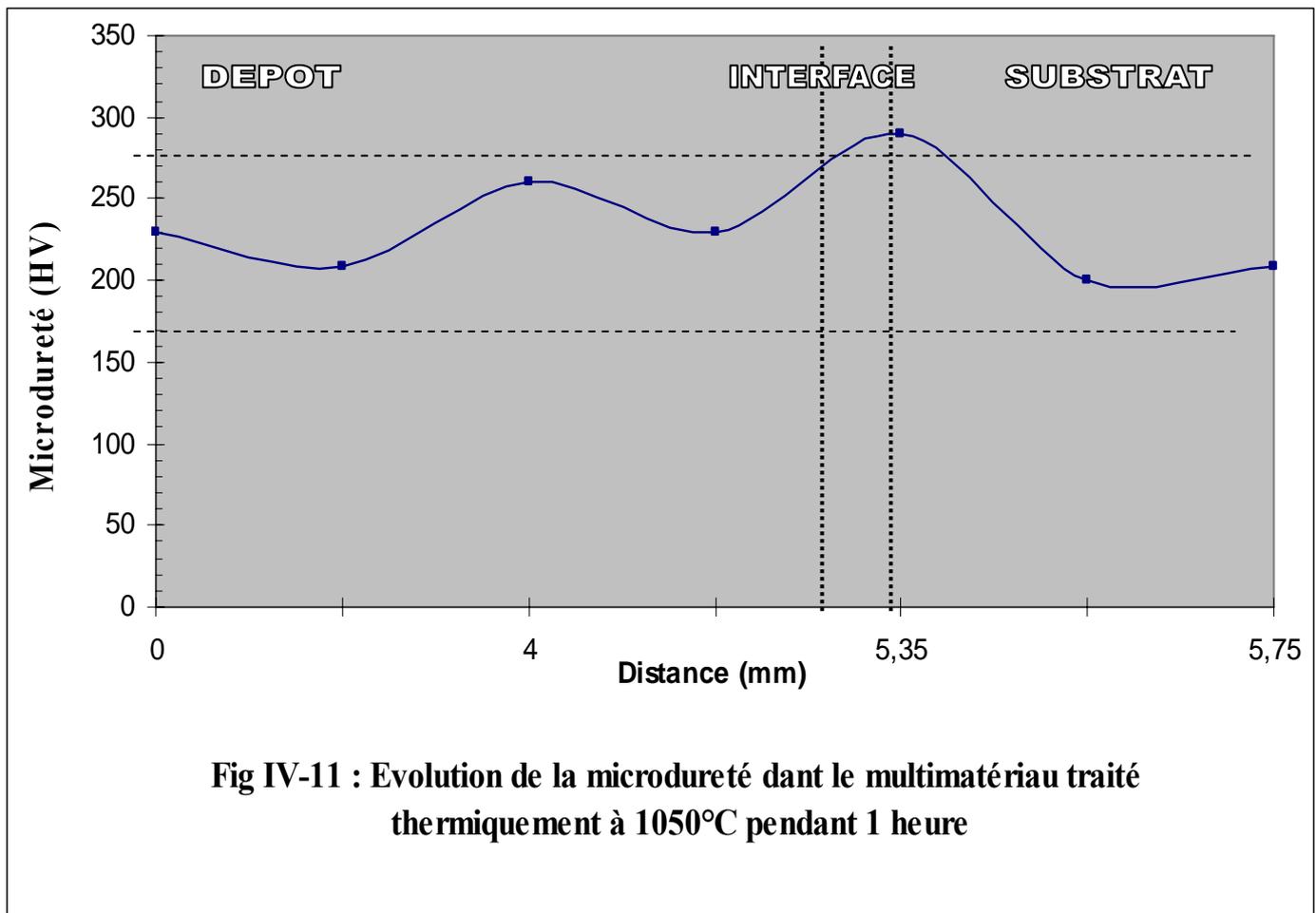


Fig IV-10 : Evolution de la microdureté dans le multimatériau réalisé sans sous couche



V-2-1) Interprétation des résultats

La première remarque qu'on puisse faire sur la microdureté c'est que celle-ci nous renseigne sur la nature des phases présentes à l'interface. C'est la même interprétation que celle de la dureté (fig IV-9 et 10) sauf que pour le multimatériau traité (fig IV-11), cet essai n'illustre pas l'uniformité des microduretés, ceci est certainement à la présence des carbures et la formation de composés intermétalliques dispersés d'une manière aléatoire dans la matrice. Ceci est d'ailleurs confirmé par la diffraction X sous incidence rasante.

CONCLUSION GENERALE

A travers cette étude, il ressort que l'utilisation de la projection thermique à l'arc électrique est d'une importance primordiale dans la réalisation des multimatériaux et la récupération des pièces mécaniques usées. En effet, celle-ci permet de résoudre de nombreux problèmes complexes inhérents aux matériaux.

Cette étude a montré que la présence d'un revêtement en surface d'une pièce, permet d'obtenir des caractéristiques intéressantes et en particulier une bonne tenue en fatigue.

L'analyse physico-chimique et mécanique basée sur l'observation au microscope optique, à la microsonde, à la diffraction X et l'étude de dureté, de microdureté ont montré que:

- le matériau réalisé avec sous couche d'accrochage a une dureté et une microdureté élevée au niveau de l'interface. Elles mettent ainsi en évidence la bonne dispersion des carbures, la formation de composés intermétalliques et la diminution de la porosité, ce qui est confirmé par l'analyse à la microsonde et la diffraction X sous incidence rasante.

- contrairement à cela, nous avons montré qu'un échantillon ayant subi un traitement thermique à 1050°C pendant 1 heure, même si les duretés et les microduretés ne sont pas élevées, réalisé un bon compromis car il engendre le processus d'interdiffusion entre le dépôt et le substrat grâce à la formation des composés intermétalliques au niveau de l'interface ainsi que des carbures. Ces derniers viennent alors renforcer la liaison substrat-revêtement en réalisant un accrochage métallurgique en plus de l'accrochage mécanique. Ce résultat est bien appuyé par l'analyse à la microsonde et la diffraction X.

- Dans le cas d'un multimatériaux réalisé sans sous couche d'accrochage, on remarque une forte porosité et un taux d'oxyde élevé avec une répartition aléatoire des éléments. Ce constat met ainsi en évidence l'importance de la sous couche d'accrochage dans l'amélioration de l'adhérence et l'obtention de propriétés mécaniques adéquates.

Il ressort des différents tests et analyses effectués que le multimatériau avec sous couche d'accrochage réalise une convergence positive des diverses propriétés par rapport aux autres échantillons étudiés. Ce constat est très concluant car c'est ce qu'il y a de plus recherché de la projection thermique dans l'industrie.

Ainsi par ce travail, on a pu montrer l'intérêt et l'apport de la projection thermique dans la résolution de nombreux problèmes rencontrés dans le monde industriel. Elle permet bien souvent de réaliser un bon compromis en offrant des propriétés superficielles intéressantes compatibles avec les propriétés volumiques réclamées de la pièce.

En dépit des résultats obtenus, cette étude pourrait être complétée et améliorée par l'étude et la détermination des lois de propagation des fissures dans le multimatériau en insistant en particulier sur la déviation des fissures à l'interface qui est un problème important de point de vue applications industrielles.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] M.DOCUS ;

Revêtements par projection thermiques. Techniques de l'Ingénieur M5.
M1645 1992

[2] Guide pratique de la projection thermique. CETIM 1989

[3] N. MESRATI , H. AJHROURH, D. NGUYEN, D. TREHEUX.

Thermal Spraying and Adhesion of Oxides onto Graphite.
Journal Of Thermal Spray Technology, Vol 9, N°1, pp. 95-99. 2000

[4] Manuel d'entretien du pistolet Arcspray. Version nouvelle 2002

[5] H.S INGHAM, A.P. SHEPARD;

Manuel de projection à la flamme.
METCO Inc. Westbury, Long Island, New York 1999

[6] P. CHIGNON, P. FAUCHAIS;

Thermal spraying of ceramics, revue "The scientist". 8ème Edition. 1986

[7] W.E BALLARD ;

Metal spraying and flamme deposition of ceramics and plastics
4ème Edition, London. 1963

[8] H.CLAIRE, E. CRAWELL

Thermal spray coating, page 361
Metal Hand book, vol.5, Ninth edition 1982

[9] D. TREHEUX :

Adhérence des dépôts projetés thermiquement : solution et problème.
Ecole Centrale de Lyon. France 2001

[10] A. RODITTI :

Adhérence de la céramique sur les alliages à base de chrome cobalt et nickel-chrome par
le procédé de projection métallique à la flamme.
Thèse de docteur de 3ème cycle. France. 1975

[11] P. CHAGNON, A. TRONCHE, P. FAUCHAR :

Frottement des dépôts d'alumine projetés par plasma.
Industrie céramique N°805 pp 319-324. 1986

- [12] **B. PICARD, R. OGOLNIK, A.M. LEJUS, J. THERY, R. COLLONGUES:**
 Le rôle du zinc dans la liaison céramo-métallique.
 Volume 1 pp 329- 324. 1985
- [13] **C. COLIN :**
 Les mécanismes de l'usure et du frottement.
 Traitement thermique n°208 pages 79-96 1987
- [14] Les lubrifiant moteur : perte par usure et frottement.
 IFP, Paris Technique, Page 138 197
- [15] **H. P. LIEURADE**
 La pratique des essais de fatigue. Edition – Paris 1982
- [16] **G. PLUVINAGE**
 Mécanique élastoplastique de la rupture. Edition – Cepadues 1989
- [17] **R. LABBENS**
 Introduction à la mécanique solide. Edition – Paris 1980
- [18] **J. LEMAITRE, J.L.CHABOCHE :**
 Mécanique des matériaux solides. Edition – Bordas Paris 1985
- [19] **H. D. BUI:**
 Mécanique de la rupture fragile. Edition - Masson 1978
- [20] **J. BAILLON, C. BATHIAS:**
 Fatigue des matériaux et des structures.
 Ecole d'été Québec – Canada. 1978
- [21] **B. BARTHELEMY :**
 Notions pratiques de mécanique de la rupture. Edition - Eyrolles 1980
- [22] **H.L. EWALDS, R.J.H. WANHILL:**
 Fracture mechanics. 1989
- [23] **D. FRANCOIS, A. PINEAU, A. ZAOUI :**

- Comportement mécaniques et comportement élastique des matériaux. 1992
- [24] G. FANTOZZI :**
- Propriété mécanique et comportement élastique des matériaux.
I. N. S. A de Lyon. 1989
- [25] G. FANTOZZI :**
- Mécanique non linéaire de la rupture.
I.N.S.A de Lyon. 1989
- [26] Matériaux et structures sous chargement cyclique**
Laboratoire de mécanique des solides. Ecole polytechnique E.N.S.M.P 1978
- [27] Dj. SAADOUN :**
- Etude des champs de déformation élastique-plastique et élastique-viscoplastique en fond d'entaille. Thèse de Magister – Algérie. 1993
- [28] Y. BENHALIMA**
- Simulation numérique de la propagation de fissures par fatigue
(application aux véhicules industriels de la S. N. V. I / C. V. I).
Thèse de Magister – Algérie 1993
- [29] S. BRAHIMI, P. LEHR :**
- Etude de la propagation des fissures de fatigue dans les matériaux métalliques et des conséquences des processus de déformation plastique à fond de fissure.
Rapport de recherche E N. S. T. A. 1991
- [30] P. DESTUYNDER, PALAISEAU, M. DJAOUA :**
- Sur une interprétation mathématique de l'intégrale de RICE
en théorie de la rupture fragile. pp 71 – 77. 1981
- [31] N. MESRATI, Q. SAIF, D. TREHEUX, A. MOUGHIL, G. FANTOZZI, A. VINCENT**
- Characterization of thermal fatigue damage of thermal barrier produced by atmospheric plasma spraying. Journal of Surface and Coating Technology, Vol. 187, pp. 185-193. 2004*
- [32] M. COMNINOU:**
- The interface crack. Journal of applied Mechanics pp 631 – 637. 1977
- [33] NGUYEN QUOC SON :**

- Méthodes énergétiques en mécanique de la rupture.
Journal de Mécanique Vol 19 N° 2 pp 365 – 385. 1980
- [34] P. BALLADON, J. HÉRITIER, C. JARBON :**
- Strain-Hardening effects on fracture toughness and ductile crack growth in austenitic stainless steels.
American Society for testing and materials pp 293 – 307. 1985
- [35] M. S. HU, A.G. EVANS:**
- The cracking and decohesion of thin films on ductile substrates.
Acta metallurgica. Vol 37 N° 3 pp 917 – 925. 1989
- [36] M. RUHLE, A.G. EVANS, B.J. DALGLEISH, P.G. CHARALAMBIDES:**
- The fracture energy of biomaterial interfaces.
Mat. Sci, and Eng A 126 pp 53 – 64. 1990
- [37] H.C. CAO, A.G. EVANS:**
- An Experimental Study of the fracture Resistance of Bimaterial Interfaces Mech. Of Mat. 1998
- [38] R. MOUSSA, J.L. CHARMANT, F. OSTERSTOCK :**
- Evaluation des paramètres de rupture par la méthode du défaut contrôlé :
Application à SIC. Industrie Céramique N° 757 pp 59 – 71.
- [39] B.D. SARTWELL, A. MATTHEWS:**
- Surface and coatings technology.
Materials Science and Engineering. Volume 50 N° 2. 1997
- [40] H. HERMAN :**
- Structural materials / Properties, Microstructure and Processing.
Materials Science and Engineering. Volume A149 N° 2. 1992
- [41] B. COQUILLET :**
- Tenue en fatigue de fils d'aciers inoxydables austénitiques.
Thèse Ecole Centrale de Lyon – France. 1989
- [42] J.F. CARTON :**
- Traitements superficiels et tenue en service des assemblages démontables :
Base d'une méthodologie de choix en tribologie.
Thèse E. C. L – France 1993

[43] G.SAIF :

Mise au point et caractérisation de couches intermédiaires permettant l'accrochage entre un alliage métallique et une céramique projetée plasma
Thèse E. C. L – France 1991

[44] J. MSTOWSKI :

Etude théorique et expérimentale de la déformation plastique d'un solide bimétallique.
Application à la réalisation par filage arrière d'un palier revêtu.
Thèse Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris – France. 1983

[45] Revenu de Métallurgie :

Science et Génie des matériaux. Volume n° 12 1993

[46] H. AJRHOURE :

Adhérence et réactivité des multimatériaux à base de graphite.
Thèse E. C. L – France 1995