

MINISTERE DE L'EDUCATION NATIONALE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT DE METALLURGIE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

**Etude du comportement d'un revêtement
réalisé par projection thermique
sur une pièce mécanique**

Propose par:

Algérie-Métallisation

Etudié par:

A. FEZZOUA

Dirigé par:

M. LARIBI

PROMOTION: JUILLET 1993

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'EDUCATION NATIONALE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT DE METALLURGIE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

**Etude du comportement d'un revêtement
réalisé par projection thermique
sur une pièce mécanique**

Proposé par:

Algérie-Métallisation

Etudié par:

A. FEZZOUA

Dirigé par:

M. LARIBI

PROMOTION: JUILLET 1993

E.N.P 10, Avenue hassen Badi El-Harrach. ALGER

REMERCIEMENTS

J'exprime ma profonde reconnaissance à Mr. M. LARIBI d'avoir dirigé ce travail et de m'avoir constamment guidé avec beaucoup de compétence.

J'adresse mes plus sincères remerciements à Mr. A. BOUKLI de s'être intéressé à ce travail, et à l'ensemble du personnel de l'entreprise "ALGERIE METALLISATION" qui n'ont ménagé aucun effort lors de la réalisation des travaux expérimentaux.

Je remercie vivement Mr. N. MESRATI, Chef du Département de Métallurgie à l'ENP, pour l'intérêt qu'il a manifesté à l'égard de cette étude.

Je remercie également Mr. M. BRADAI pour ses conseils qui m'ont été d'une grande utilité.

Enfin je ne peux manquer de remercier sincèrement et chaleureusement tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce modeste travail.

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail à :

- * Mon très Cher père
- * Ma très chère et douce mère
- * Mes frères et soeurs
- * Mon frère **Omar** et à sa femme Fady
- * Toute ma famille
- * Tous ceux qui me sont chers

المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

A LYDIA ET RIWAN

SOMMAIRE

	Page
Introduction	
Etude Bibliographique	
I- PROJECTION THERMIQUE	
I.1- Invention et développement du procédé	1
I.2- Utilisation des revêtements projetés	1
I.3- Principe de la projection thermique	2
I.4- Place de la projection thermique parmi les traitements de surface	3
I.5- Equipements de la projection thermique et leurs utilisations	5
I.5.1- Choix de l'appareil à utiliser	5
I.5.2- Différents pistolets	6
I.6- Mise en oeuvre de la projection thermique ...	
I.6.1- Préparation de surface	10
I.6.2- Conduite de la projection	13
I.6.3- Post-traitements des dépôts projetés..	14
I.7- Choix d'une solution de métallisation	
I.7.1- Généralités sur les matériaux déposés	16
I.7.2- Comportement en frottement	22
II- USURE DES SURFACES METALLIQUES	
II.1- Les différents types de l'usure	23
II.2- Analyse de l'usure	29
II.3- Fonctionnement et usure d'un vilebrequin	
II.3.1- Fonctionnement d'un vilebrequin	30
II.3.2- Usure d'un vilebrequin	31

INTRODUCTION

L'importance des matériaux métalliques dans la technologie moderne est maintenant bien connue de tous. Cependant, la quasi totalité des réalisations nouvelles se heurtent à des problèmes de dégradation de ces matériaux.

Le concepteur de toute nouveauté a besoin du matériau, qui allierait des propriétés plus ou moins contradictoires: le compromis entre les propriétés d'usage recherchées, la facilité de mise en oeuvre du matériau et les coûts ne peuvent résulter que de recherches poussées.

L'Algérie dispose d'un potentiel important et d'un parc de véhicule et d'engins assez vaste qui s'étend à tous les secteurs (agriculture, travaux publics, ...). Faute de pièces de rechange, une bonne partie de ces moyens est immobilisée, ce qui freine le développement économique.

Il y a lieu de signaler que des cimetières de véhicules et d'engins ne cessent de se répandre, très souvent faute de prise en charge de rénovation et recyclage des pièces usées.

Soucieuse de prendre en charge la rénovation des pièces mécaniques usées, l'entreprise "ALGERIE METALLISATION" s'est spécialisée dans le domaine des revêtements, en utilisant le procédé de projection thermique à l'arc électrique.

Dans le cadre de ce mémoire, nous nous proposons de contribuer à cette action de récupération de pièces mises au rebut prématuré, par l'étude de revêtement par projection thermique à l'arc électrique d'une pièce maîtresse dans l'industrie mécanique à savoir le vilebrequin.

Les travaux expérimentaux ont été réalisé en étroite collaboration avec l'entreprise "ALGERIE-METALLISATION".

Disposant de la chaîne complète d'équipements de revêtements par métallisation, cette entreprise ne maîtrise pas assez les différents paramètres inhérents à ce procédé.

Dans ce contexte, notre contribution consiste à étudier l'influence des principaux paramètres de projection sur le revêtement d'un vilebrequin. L'objectif principal est de maîtriser la technique de projection thermique à l'arc électrique en faisant varier judicieusement la distance de projection et la vitesse de rotation de la pièce pour voir leur influence sur la tenue du dépôt projeté.

Ceci permettrait une meilleure compréhension de tous les phénomènes connexes liés à la physico-chimie de matériaux utilisés afin d'arriver à un compromis assurant une bonne tenue du revêtement projeté sur le vilebrequin.

Compte tenu des objectifs assignés, nous avons jugé judicieux de diviser notre travail en deux parties principales :

La première consiste en une étude bibliographique permettant de présenter dans un premier chapitre la technique de projection et ses applications.

Dans un second chapitre, a été abordé le phénomène d'usure généralisé puis son effet sur le vilebrequin dont nous avons présenté le fonctionnement.

La deuxième partie concerne l'étude expérimentale pour laquelle deux chapitres ont été réservés : le premier a pour but de présenter le procédé utilisé à l'entreprise "ALGERIE METALLISATION", ainsi que pour les différents matériaux et échantillons avec lesquels on a travaillé.

L'analyse métallurgique et mécanique du multimatériau obtenu par simulation du vilebrequin fait l'objet du deuxième chapitre.

Cette étude est terminée par une conclusion comportant des recommandations.

I - PROJECTION THERMIQUE

I.1- Invention et développement du procédé :

C'est en 1909, que le Dr SCHOOP eut l'idée d'obtenir des revêtements par projection, en examinant les traces laissées sur un mur par des balles de plomb de la carabine de son fils.

Grâce à son bas point de fusion, le plomb pouvait fondre localement lors de l'impact par la transformation de la force vive en chaleur ; ce qui n'est pas le cas pour les métaux à point de fusion élevé. D'où l'idée de les projeter à l'état fondu.

Après la deuxième guerre mondiale, la pénurie des métaux a poussé les constructeurs à étudier les possibilités d'effectuer des revêtements d'aciers sur des pièces mécaniques usées.

C'est seulement vers les années 1960 qu'apparurent les pistolets plasma. La très haute température obtenue permet alors de fondre les matériaux les plus réfractaires (céramiques, carbures, métaux réfractaires : tantale, tungstène, etc...) tout en laissant le substrat pratiquement froid et peuvent donc être projetés sur les matériaux les plus sensibles (composites, verres, etc..) [1] [2] [3].

I.2- Utilisation des revêtements projetés :

La grande variété des matériaux projetables, permet à la projection thermique d'intervenir dans plusieurs cas d'applications :

- Protection contre la corrosion atmosphérique, thermique ou chimique : Le métal de revêtement à choisir dépend naturellement du milieu corrosif où se trouve plongé la pièce.

Toutefois, la porosité est toujours présente dans la plupart des revêtements obtenus par projection thermique, excepté dans le cas où le dépôt subit un post-traitement.

Réparation de pièces mécaniques usées : Dans de nombreux cas la projection thermique permet de sauver des pièces mécaniques, tout en réalisant des économies de matière et en leur conférant souvent des qualités de surface supérieures à celles de la pièce neuve.

- Amélioration des qualités de frottement et de résistance à l'usure : Les métaux projetés ont une certaine porosité qui, lorsque les pièces en frottement sont lubrifiées, améliore les qualités de frottement et de résistance à l'usure et au grippage (cas des vilebrequins), l'huile absorbée par le revêtement formant une réserve est restituée en cas d'arrêt du film de graissage.

- Autres utilisations : Le grand nombre de matériaux d'apport, permet à la projection thermique d'intervenir dans de nombreux cas d'applications autres que ceux décrits précédemment.

Grâce aux qualités des oxydes métalliques, il est, par exemple possible de répondre à des problèmes thermiques ou électriques [2] [3].

I.3- Principe de la projection thermique : La projection thermique est une technique qui consiste à projeter en fines particules, sur une surface préalablement préparée, un produit d'apport solide (sous forme de poudre ou de fil) fondu ou ramolli au moyen d'une source de chaleur appropriée (flamme ou arc) et projeté sur le substrat par l'intermédiaire d'un matériel utilisant l'énergie de combustion d'un mélange oxy-gaz, d'un arc électrique ou d'un jet plasma.

Les particules provenant de la pulvérisation sont véhiculées à grande vitesse (de l'ordre de 150 à 200m/s s'il s'agit des pistolets normaux - pistolet à fils, pistolets à poudre fonctionnant aux gaz - et presque supersoniques quand il

s'agit des pistolets à plasma) et vont s'écraser sur le support placé à une distance convenable.

Au moment de l'impact sur le substrat, les particules se présentent à l'état pâteux au moins en périphérie (voir fig. 3) [3].

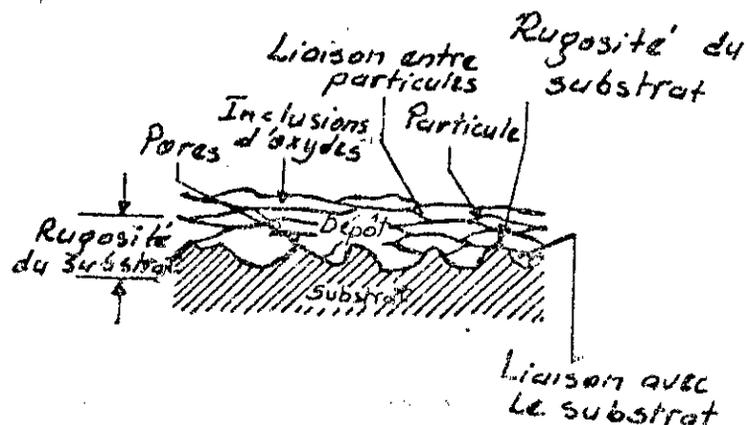


Fig. 1 - Représentation schématique d'un dépôt projeté à chaud

1.4- Place de la projection thermique parmi les traitements de surface :

L'utilisation de divers revêtements susceptibles de conférer des propriétés nouvelles aux surfaces qu'ils recouvrent, a pris incontestablement un développement d'autant plus spectaculaire, que l'utilisateur est confronté à divers problèmes tels que :

- le choix du type de revêtement qui se fait en fonction du type de sollicitations mécaniques et en fonction de l'environnement et des impératifs techniques (agressivité du milieu, maintenance...).

- le choix du procédé permettant le traitement qui se fait en tenant compte d'une jonction technico-économique.

Les techniques les plus utilisées sont :

I.4.1- Dépôts réalisés à partir de solutions :

Les dépôts électrolytiques présentent un bel aspect de surface et une bonne adhérence. Les épaisseurs déposées sont généralement faibles par rapport à celles réalisables en projection thermique. Les vitesses de dépositions sont relativement faibles, l'uniformité de l'épaisseur dépend de la forme de la pièce et le couple substrat-dépôt est limité aux matériaux conducteurs.

Cependant, industriellement seul le cuivre et le Nickel sont déposés.

I.4.2- Dépôts chimiques en phase vapeur (CVD) :

Cette technique permet la réalisation de dépôts uniformes et d'épaisseurs faibles (quelques centaines de μm). Les dépôts réalisés peuvent atteindre des duretés très élevées et présentent généralement une bonne adhérence. Cependant, la température à laquelle le substrat est porté, est très élevée (900 à 1100°C) ce qui conduit à des déformations et transformations de structures des métaux.

I.4.3- Dépôts physiques en phase vapeur (PVD) :

Les dépôts réalisés présentent un bel aspect de surface du type poli-glace et sont de très grande pureté.

Ces procédés conduisent à une très grande variété des dépôts réalisables sur des substrats restant à des températures faibles ou modérées. Cependant les installations de traitement sont très chères, les vitesses de dépositaire sont moins élevées qu'en projection thermique et le traitement de très grandes surfaces pose encore des problèmes.

I.4.4- Rechargement par soudage :

Les rechargements par soudage permettent la réalisation de dépôts présentant une très bonne liaison.

Cependant, l'élévation importante de la température du matériaux à recouvrir peut conduire à des déformations de pièces au moment du retrait.

1.4.5- Autres techniques :

Les traitements superficiels avec transformation structurale (mécaniques tels que : grenailage, martelage et thermique tel que la trempe superficielle) se font sans apport de matière.

Dans les techniques au trempé, les matériaux sont plongés dans un bain de métal en fusion. Les applications sont réservées aux traitements anti-corrosion.

Donc, parmi tous ces procédés, la projection thermique est la technique qui présente le plus de souplesse quant :

- au choix du couple substrat-dépôt ;
- au choix du procédé ;
- à la taille des pièces à traiter [3] [17].

Pour des températures de fusion supérieures à 200°C, il y a intérêt à utiliser la poudre et le pistolet à plasma [2].

1.5- Equipements de la projection thermique et leurs utilisations :

1.5.1 - Choix de l'appareil à utiliser :

Suivant la forme du matériau à projeter (poudre ou fil), le choix se portera obligatoirement sur le type d'appareil capable de le projeter sous sa forme physique.

Si on a à choisir entre la poudre et le fil, il est préférable d'utiliser le fil. En effet, la projection est plus régulière et généralement la pureté du fil est plus grande que celle de la poudre ; enfin, le revêtement est moins sujet à l'oxydation dans le cas du revêtement par projection du fil et la perte à la projection moins grande.

I.5.2- Différents pistolets :

Suivant la source d'énergie utilisée (flamme ou arc électrique) et la forme du matériau d'apport (fil ou poudre), on distingue :

I.5.2.1- Pistolets à fil fonctionnant aux fluides gazeux :

Ces appareils fonctionnent avec un chalumeau à gaz comprimé (oxygène - acétylène ou oxygène - propane) et air comprimé à des pressions comprises entre 3,0 et 5,5 bars.

Ces pistolets se composent de deux parties : une partie chalumeau, une partie entraînement du fil.

La partie chalumeau se compose d'un mélangeur, d'une buse à gaz annulaire et d'une buse à air.

La partie entraînement du fil peut être animée soit par un système à turbine, soit par un moteur à air comprimé, soit par un moteur électrique, qui communique un mouvement de rotation à deux molettes enserrant le fil et le poussant au travers de la buse à gaz du chalumeau.

Pratiquement tous les matériaux tréfilables, métaux alliages ainsi que des matériaux céramiques sous forme de cordons ou de baguettes peuvent être projetés par ces pistolets.

Les pistolets à baguettes sont de même type que les pistolets à fil, mais ils sont dotés à leur extrémité arrière d'un couloir porte baguette et l'entraînement se fait généralement par un moteur électrique extérieur et un flexible (voir fig. 2.a) [3].

I.5.2.2- Pistolets à fil à fusion électrique :

Le 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 40V et les intensités entre 100 et 400 A par des fils de 1,5 à 2mm de diamètre.

Comme dans le cas précédent, ces pistolets sont composés de deux parties : une partie entraînement des fils et une partie fusion et propulsion du métal d'apport.

Le dispositif d'amenée des deux fils électrodes peut être à air comprimé ou électrique. Les vitesses d'amenées des fils peuvent être différentes. Chaque molette d'entraînement est isolée électriquement.

Les fils sont amenés par des tuyères isolées, sous angle d'environ 60°, en court-circuit devant le jet d'air comprimé (voir fig.2.b) [2].

1.5.2.3- Pistolets à détonation :

Cet appareil est un peu analogue à un moteur à explosion. Une petite quantité de poudre avec laquelle on veut effectuer un revêtement est introduite dans la chambre de combustion, on fait exploser le mélange, la poudre se trouve fondue et projetée très violemment sur la cible. On peut ainsi obtenir des revêtements minces et durs. Mais l'ensemble du dispositif est encombrant et onéreux (voir fig 2.c) [3].

1.5.2.4- Matériels flamme-poudre :

1.5.2.4.1- Torches à gaz :

Il s'agit d'un chalumeau oxy-gaz équipé d'un petit récipient contenant la poudre. Celle-ci tombe par gravité (ou est entraînée par dépression dans la canalisation de l'un ou de l'autre des gaz) et est amenée jusque dans la flamme. La poudre traverse la flamme et est projetée à faible vitesse sur le support à recharger.

La distance de la buse au support est très faible (quelques mm), ce qui permet à la flamme d'assurer la fusion de la poudre et le chauffage du support. La poudre arrive ainsi sur le substrat chaud mais non fondu et une liaison de type brasure est assurée entre le métal d'apport et le métal de base.

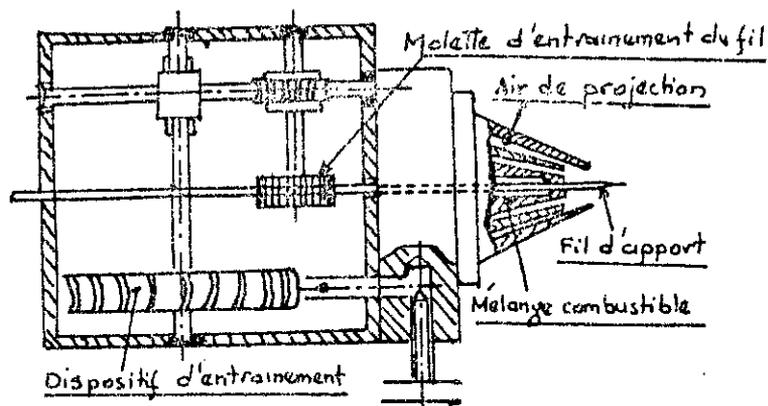


Fig 2-a : Schéma simplifié d'un pistolet à fil à entraînement par turbine à air.

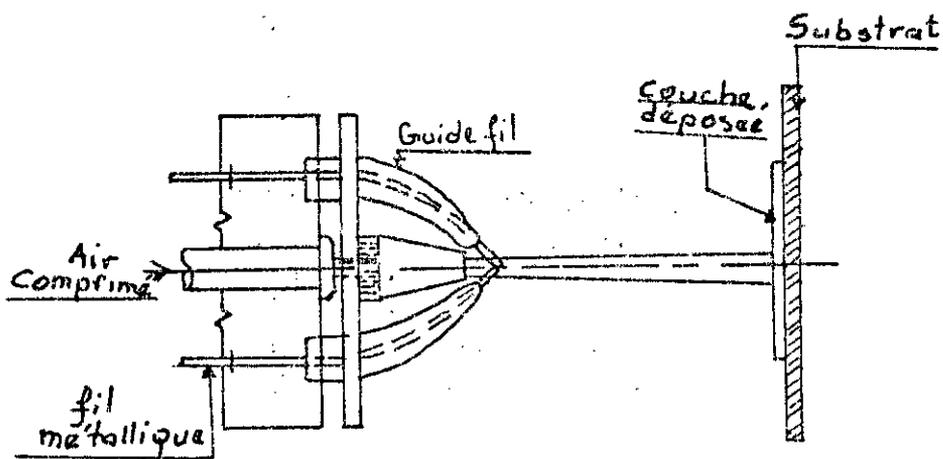


Fig 2-b : Principe du pistolet à arc électrique.

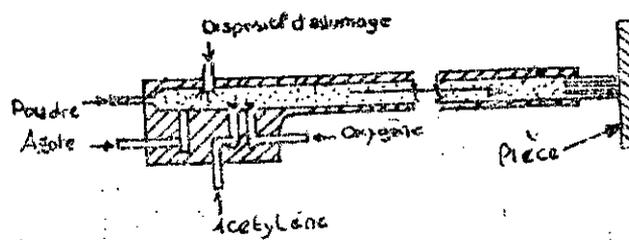


Fig 2-c : Canon à détonation.

Ce matériel est très largement appliqué aux cas de revêtements de petites et moyennes pièces. C'est un outil très apprécié des ateliers d'entretiens (voir fig. 2.d) [3].

1.5.2.4.2- Pistolets à poudres :

Ils peuvent être de deux types :

Le premier fonctionne avec un chalumeau à gaz comprimé (de même construction que les pistolets à fil fonctionnant aux gaz), l'air comprimé servant à l'entraînement de la poudre, celle-ci est située dans un réservoir extérieur à l'appareil est entraînée soit par pression, soit par aspiration. Du fait de l'obligation de chauffer l'air d'entraînement, il y a déperdition de calories et on ne peut guère dépasser une température de fusion de 1500°C.

Le deuxième type de pistolet ou l'entraînement de la poudre ne se fait plus par l'air comprimé mais par l'oxygène servant à la combustion du gaz combustible. Ce dispositif a permis d'atteindre des températures de fusion de 2500°C [2].

1.5.2.5- Pistolets à plasma :

Le pistolet à plasma est constitué généralement par une cathode en tungstène toriques et une buse anode en cuivre refroidies par un courant d'eau sous pression et percée d'un ajutage étroit. Si l'on fait jaillir l'arc entre l'anode et la cathode et que l'on force un gaz (généralement de l'Argon ou de l'azote) à passer dans cet arc, il est ionisé et, la température étant très élevée (supérieure à 8000°C), il est éjecté par cet ajutage à une vitesse avoisinant la vitesse sonique. Si l'on induit dans cette chambre un matériau en poudre fine, il est instantanément fondu et pulvérisé violemment sur la surface à recouvrir, c'est le fonctionnement en arc soufflé. Si la cathode et la pièce sont réunies au même pôle, c'est le fonctionnement en arc semi-transféré.

On peut ainsi fondre et pulvériser des matériaux dont le point de fusion est supérieur à 4000°C. Cependant des précautions doivent être prises pour ceux qui sont susceptibles

de subir des transformations à hautes températures dues à des phénomènes tels que : température de fusion très proche de la température d'évaporation (type magnésie) ou de produits qui se décomposent (cas du carbure de silicium pur).

Néanmoins, c'est le pistolet qui offre la plus étendue gamme de revêtements et il est présent dans de nombreuses industries (voir fig. 2.e) [4] [2].

1.5.2.6- Sableuses :

Quand il s'agit d'une projection sur une surface métallique, il est indispensable de décaper auparavant la surface. Pour effectuer cette opération, on emploie soit des sableuses à air comprimé, soit des installations de décapage à la grenaille à turbine, soit s'il s'agit de pièces mécaniques à réparer localement dans un atelier où il faut éviter toute poussière, un pistolet de sablage à récupération [2].

1.5.2.7- Nouveautés :

Depuis quelques années, de nouveaux matériels et installations sont apparus sur le marché :

- plasma basse pression ;
- plasma sous atmosphère et température contrôlées ;
- plasma laser ;
- chalumeau à flamme supersonique [3] [2].

1.6 - Mise en oeuvre de la projection thermique :

Les caractéristiques d'un dépôt et sa bonne tenue en service dépendent de sa qualité d'exécution, du processus de fabrication et de réparation, comprenant les étapes suivantes :

1.6.1- Préparation de surface :

La préparation de surface est un facteur primordial et indispensable à une bonne adhérence des dépôts. Certains échecs rencontrés en métallisation sont imputables à une mauvaise préparation de surface [1].

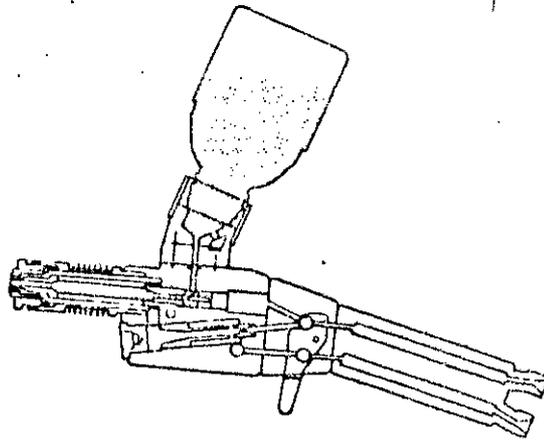


Fig 2.d : Schéma de principe
Alimentation du pistolet à poudre par gravité .

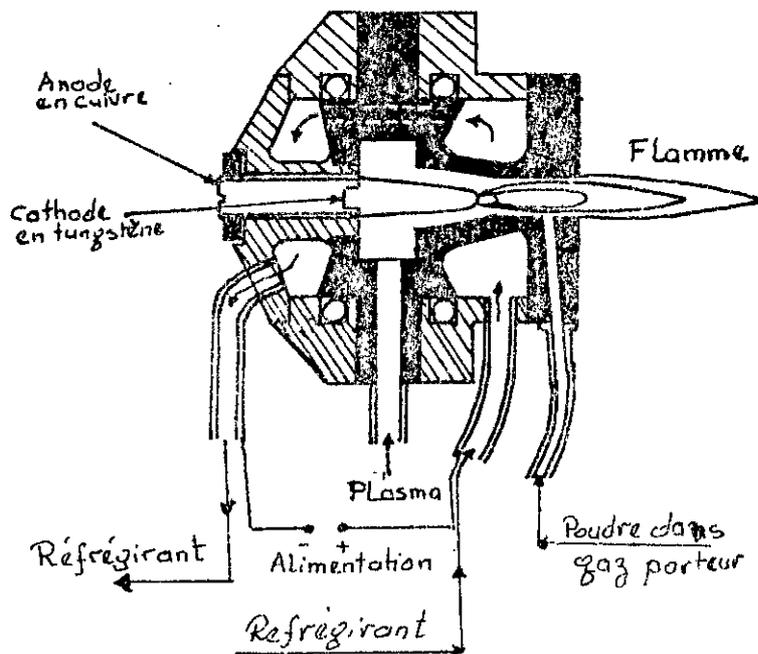


Fig 2.e : Pistolet à plasma

Non seulement il est nécessaire d'avoir une surface propre mais encore de la rendre rugueuse pour faciliter l'accrochage du métal pulvérisé.

1.6.1.1- Propreté 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 dans des porosités avec des diluants appropriés, pour éviter que l'échauffement du substrat, dû à la projection ne fasse remonter les matières contaminantes à la surface et nuire à l'adhérence du dépôt.

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

Si les pièces à traiter ne sont pas poreuses, une seule immersion dans des solvants liquide est suffisante.

Un décapage humide peut également être employé. Ce procédé utilise des abrasifs du type oxyde d'Aluminium (de granulométrie de 200 à 500mm) mélangés à de l'eau. Des additifs du type inhibiteur de rouille peuvent être ajoutés. Ce décapage est destiné à enlever les produits corrosifs des matériaux déposés ultérieurement.

Les pièces ainsi traitées doivent être rincées et séchées [2] [3].

1.6.1.2- Rugosification :

Après nettoyage, il est nécessaire de créer une rugosité en 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 opération se fait par décapage mécanique, par projection d'abrasif : galets de mer concassés, corindon (Alumine pure) fine ou grenaille angulaire de fonte (non grenaille d'acier, car cette dernière, au bout de peu de temps, s'arrondit et ne pique plus la surface suffisamment).

Le matériel utilisé est choisi en fonction des revêtements à réaliser. Les matériels utilisant le décapage au jet d'abrasif propulsé à air sont les plus couramment utilisés, car ils peuvent projeter tous les types d'abrasifs. Les matériels à turbine, quant à eux, sont alimentés par des abrasifs du type grenaille.

Quant il s'agit de réaliser des dépôts épais, il est conseillé d'effectuer une préparation mécanique par usinage à l'outil, avant le décapage au jet d'abrasif [1].

1.6.2- Conduite de la projection :

Le réglage du pistolet de projection doit être fait suivant les normes indiquées par le constructeur, de façon à avoir un grain fin.

1.6.2.1- Sous-couches d'accrochage :

Pour les matériaux dont l'adhérence est faible et dans le cas où les coefficients de dilatations sont très différents entre le matériau projeté et le substrat, ou pour réaliser des revêtements épais, on utilise des sous-couches d'accrochage connues pour leurs bonnes valeurs d'adhérence.

Ces matériaux sont projetés en fines épaisseurs de l'ordre de 0,01 à 0,2mm suivant l'utilisation.

Les sous-couches les plus utilisées sont : Molybdène, Nickel-Aluminium (80-20), Nickel-Aluminium (95-5), Nickel-chrome (80-20), Nickel-chrome 80-20 (94% et Aluminium 6%), etc... [1] [3].

I.6.2.2- Dépôt :

Le revêtement est effectué par passes successives pour éviter tout échauffement nuisible.

Pour éviter l'interposition d'un voile d'oxyde entre la surface du support et le revêtement qui diminuerait l'adhérence, il faut procéder à la métallisation dans les heures qui suivent : une heure si le temps est humide, la demi-journée au maximum si le temps est sec.

En principe, la métallisation doit être faite perpendiculairement à la surface ou au maximum avec un angle de 30° de chaque côté de la perpendiculaire ; sinon il y a rebondissement des particules, mauvaise adhérence et augmentation de la perte du métal projeté [2].

I.6.3- Post-traitements des dépôts projetés :

Des traitements divers sont effectués sur les dépôts pour leur conférer des qualités supérieures à leur état brut.

Ces traitements sont de quatre ordres :

I.6.3.1- 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 désirées à un revêtement.

On distingue :

- le colmatage naturel : les porosités se bouchent au vieillissement ;

- le colmatage artificiel : les porosités sont bouchées par application d'un vernis ou d'une peinture réactive, de peintures non réactives fluides et d'un produit d'imprégnation [3].-

I.6.3.2- Imprégnation : Elle consiste à introduire différents produits colmatant pour éviter les inconvénients de la porosité des dépôts. 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 [1].

I.6.3.3- Traitements thermiques : Non seulement ils tendent à fermer les porosités, ils permettent d'améliorer l'adhérence et même de transformer la structure des couches déposées.

Ces moyens 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 : permet d'améliorer l'adhérence entre, le dépôt et le substrat et généralement de compacter le dépôt jusqu'à le rendre étanche.

Ces traitements permettent aussi de rendre les couches déposées plus ductiles, moins contraintes et d'augmenter la résistance au choc [1].

I.6.3.4- Traitements mécaniques :

Sur des matériaux ductiles, des actions mécaniques peuvent fermer les porosités des dépôts en surface.

Les techniques utilisées sont :

- l'usinage à l'outil (tournage, fraisage) ;
- compactage des dépôts par projection sous pression de billes de verre, de zircone ou de différents métaux (Aluminium, Acier, Nickel, etc...) [1].

1.7.1.2.1- Formation et morphologie d'un revêtement :

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 : ces revêtements sont généralement poreux ;

Des essais de modélisation ont montrés que, suivant les paramètres de projection et la nature du matériau, les caractéristiques des dépôts peuvent changer.

L'un de ces essais est celui utilisant le traitement théorique de Madesjski simplifié (en négligeant l'influence des tensions de surface et en supposant que la goutte liquide s'aplatie avant de se solidifier).

$$\frac{D}{d} = 1,29 \left(\frac{\alpha \cdot v \cdot d}{\mu} \right)^{0,2} \text{ avec}$$

D : diamètre de la surface
aplatie

d : diamètre initial de la
particule

μ : viscosité du liquide

V : vitesse d'impact de la
particule

α : Constante.

Il s'ensuit que la morphologie d'un revêtement obtenu par projection thermique est caractérisée par l'aspect ondulatoire des particules fondues et soudées entre elles ou séparées par des inclusions d'oxydes (voir fig.3) [1] [4].

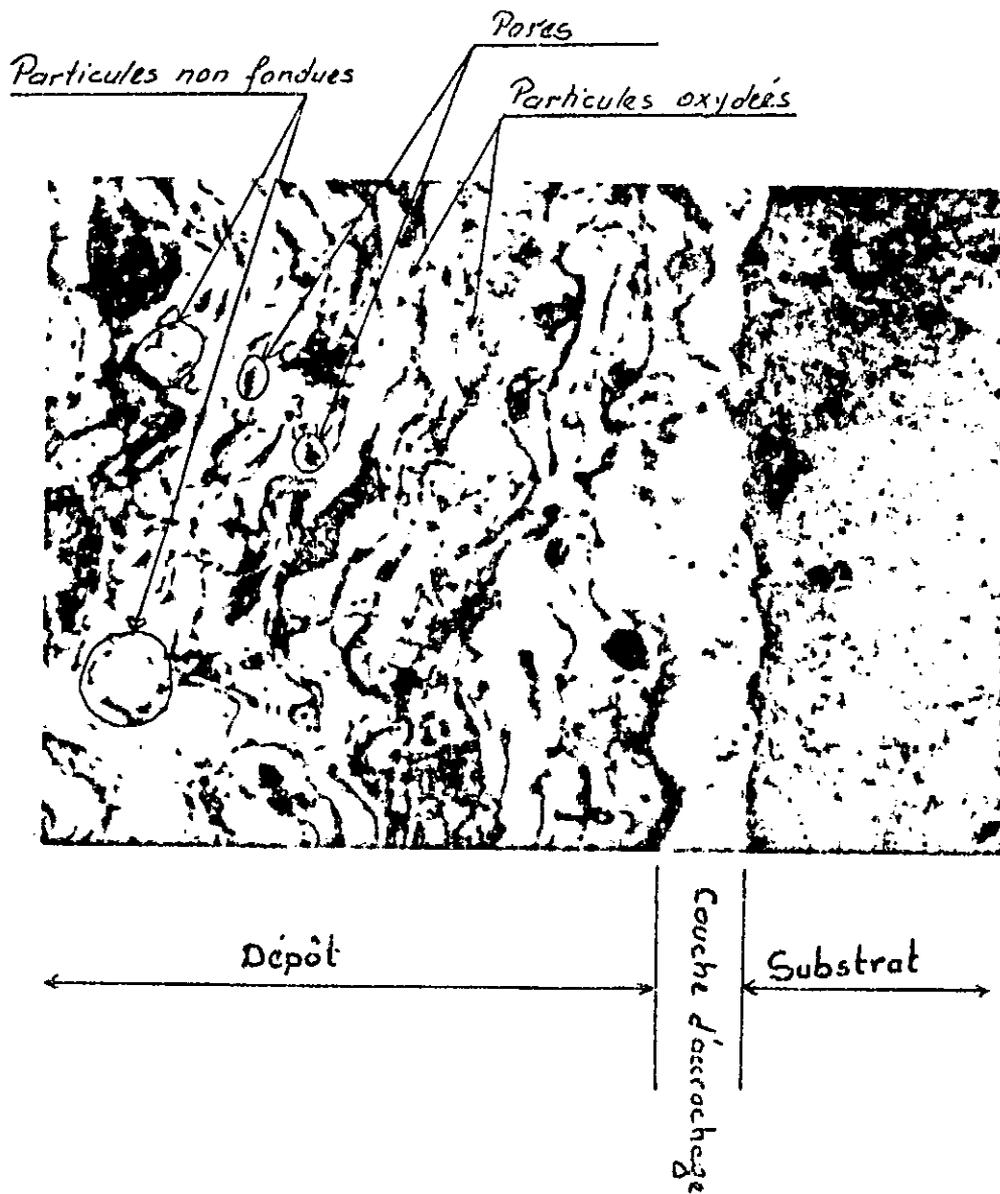


Fig 3: Coupe micrographique d'un dépôt réalisé par projection à l'arc électrique.

1.7.1.2.2- Structure métallurgique des dépôts :

La structure du métal projeté est caractéristique parallèlement au support, elle présente au microscope l'aspect de gouttelettes rondes, soudées les unes aux autres, pouvant laisser entre elles quelques vides ; perpendiculairement au support, on trouve au contraire des stratifications.

Le revêtement s'oxyde superficiellement surtout par contact avec l'air ambiant. Néanmoins la proportion d'oxygène comprise dans les dépôts, tout en dépendant de la façon de projeter, reste en général très faible.

En conclusion les caractéristiques du métal sont un peu analogues à celles du métal trempé et écroui. La radiographie prouve que les dépôts sont cristallins, composés de cristaux fins et de grosseur régulière [3].

1.7.1.2.3- Adhérence :

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

Pour améliorer l'adhérence de certains matériaux, des sous-couches d'accrochage connues pour leurs bonnes valeurs d'adhérence sont utilisées [1].

1.7.1.2.4- Porosité :

En s'écrasant les unes sur les autres, les particules projetées peuvent laisser entre elles quelques vides. La porosité est toujours présente, excepté dans le cas où le dépôt subi un post-traitement.

La densité des dépôts projetés est fonction de la porosité. La dimension des particules et leur vitesse influent sur la densité du dépôt qui est également fonction du taux d'oxyde formé.

L'existence de porosité à l'interface peut diminuer l'adhérence du revêtement. Cependant un dépôt poreux a des propriétés d'autolubrification et de résistance au grippage.

Les pores interconnectés sont indésirables pour la protection anti-corrosive [1] [4].

1.7.1.2.5- 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 [1] [5].

1.7.1.2.6- Dureté :

La mesure de la dureté d'un revêtement est généralement une valeur relative, car il est difficile d'avoir une valeur exacte de la dureté dans un matériau hétérogène. Elle est influencée par les duretés intrinsèques des particules, le degré de cohésion entre particules, le taux de porosité et les inclusions d'oxydes.

Si on effectue une microdureté sous charge importante ou une macrodureté, on obtient une indication précise de la cohésion des particules entre elles, ce qui donne une idée précise de la qualité du dépôt qui craque si la cohésion n'est pas bonne [1] [4].

1.7.1.2.6- Autres caractéristiques :

Les revêtements obtenus par projection à chaud résistent bien à la compression, pourvu qu'il s'agisse de dépôts relativement fins.

La résistivité électrique et la conductivité thermique sont en général supérieures à celles des matériaux massifs [1] [2].

I.7.2- Comportement au frottement :

Par suite de sa porosité et sa faculté d'absorber l'huile, le revêtement obtenu sans refusion à l'état brut, a des propriétés d'auto-lubrification et de résistance au grippage. Ceux-ci lui attribue de bonnes qualités de frottements.

Dans le cas de la projection thermique suivie d'une refusion au chalumeau, les dépôts obtenus présentent très peu de porosité mais ils restent de structure hétérogène.

Cette technique est employée dans le cas de corrosion-abrasion sévère ou frottement et plus particulièrement lorsqu'il est nécessaire d'isoler le substrat de l'environnement extérieur [3] [5].

En résumé la démarche de choix proposée conduit à prendre en compte successivement :

- le choix des solutions ;
- le choix des matériaux et procédés ;
- le choix de l'usinage ;
- les critères de qualité.

II - L'USURE DES SURFACES METALLIQUES :

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

L'usure d'un mécanisme ne ressort pas uniquement du rôle joué par la lubrification, la pression et la vitesse, mais relève aussi de nombreux autres facteurs tels que la technologie de l'ensemble et de chaque pièce prise séparément, de leur métallurgie et en particulier des traitements de surface, de leurs tolérances de fabrication et des conditions d'environnement climatiques telles que la température, la corrosivité, l'humidité et l'abrasivité [8] [18].

II.1- Les différents types de l'usure :

Les mécanismes d'usure sont dus à des phénomènes isolés ou simultanés dont les principaux sont :

II.1.1- L'usure par adhésion : Mécanisme de l'usure par adhésion

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

Le frottement permet de rompre ces microsoudures. Deux cas peuvent se présenter :

a- la résistance au cisaillement des soudures est supérieure à celle du corps le plus tendre qui se déchire par action du frottement. Le fragment d'usure cisailé peut :

* soit rester fixé sur la surface la plus tendre. On dit qu'il y a transfert et rapidement il y a un frottement du métal le plus tendre sur lui-même ;

* soit être détaché et expulsé sous forme de particule d'usure. Celle-ci fortement écrouie et oxydée contribue ensuite à l'usure des surfaces frottantes suivant un processus abrasif.

Dans ce cas l'usure qui en résulte est appelée «l'usure sévère» (fig. 4.a).

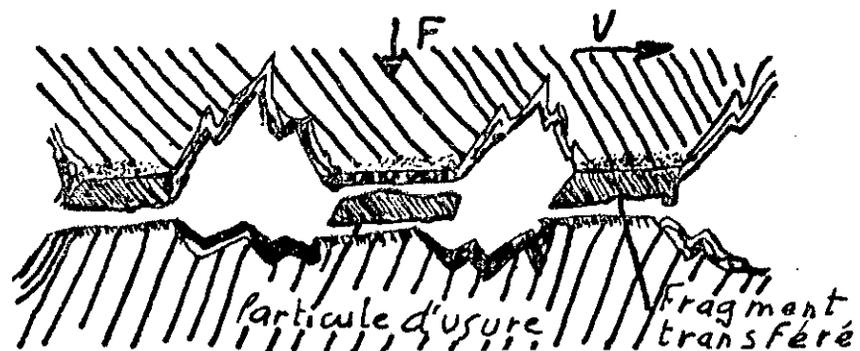


fig. 4.a- Usure sévère

b- lorsque les soudures de l'interface sont plus fragiles que les deux corps, elles sont alors le siège du cisaillement, mais sans aucun transfert ni déchirement, le coefficient de frottement sera plus faible que dans le cas précédent, c'est le frottement «par cisaillement». Le type d'usure accompagnant ce frottement est dit «usure douce ou modérée».

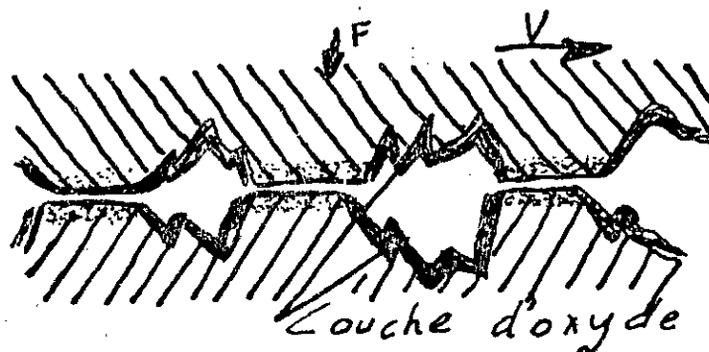


Fig. 1.b- Usure modérée

L'usure adhésive est toujours accompagnée d'un échauffement au moins local des surfaces métalliques, qui se traduit par l'aspect caractéristique dû à l'arrachement de microsoudures et par des zones colorées sombres orientées dans la direction du glissement.

Le grippage est le cas extrême de l'usure abrasive. Le nombre de liaison est tellement élevé qu'il interdit le mouvement [8] [9].

Aspects métallurgiques de l'usure adhésive :

La comptabilité métallurgique des couples de matériaux a été reliée à leur comportement à l'usure adhésive. Il a été vérifié que les meilleures conditions de frottement sont données par les couples ne formant pas d'alliage avec très faible solubilité lorsque le métal le plus fusible est liquide.

En ce qui concerne les aciers, en règle générale les structures fines et composites telles que la martensite, la perlite et la bainite se comporte mieux que les structures ferritiques et austénitiques monophasées [9] [10].

Remèdes :

Au niveau des choix des matériaux des surfaces en frottement, il y a intérêt à utiliser des couples de matériaux possédant de faibles interactions, donc une énergie d'adhésion faible, c'est-à-dire des matériaux ne donnant pas lieu à des soudures en phase solide.

L'utilisation des matériaux durs, permet de diminuer à la fois le taux d'usure et la grosseur des particules d'usure.

Il est particulièrement intéressant d'interposer entre les deux matériaux antagonistes un film autolubrifiant à faible résistance [8] [9].

Aspects métallurgiques de l'usure abrasive :

En général, une dureté élevée favorise la résistance à l'usure du matériau. Plusieurs expériences ont montré clairement que deux aciers de même dureté pouvaient se comporter différemment face à l'abrasion.

Les microstructures perlitiques, martensitiques et bainitiques des aciers ont par exemple une meilleure résistance au grippage que les microstructures ferritiques et austénitiques.

D'une manière générale, les métaux ayant une microstructure monophasée à gros grains résistent moins bien au grippage que ceux ayant des microstructures fines et polyphasées [8] [9] [10].

Remèdes :

- une filtration efficace des lubrifiants, et une bonne étanchéité des organes et mécanismes permet d'éviter l'amenée des contaminants abrasifs aux surfaces de frottement ;

- l'utilisation des sculptures en creux sur les surfaces permet de retenir les grains abrasifs et le dépôt sur celle-ci de films très minces de métaux mou par voie électrolytique, permet l'incrustation des particules abrasives ;

- le choix des matériaux permet aussi de limiter les dommages causés par l'abrasion [8].

II.1.3- L'usure par fatigue : Mécanisme de l'usure par fatigue:

Ce type d'usure survient après un vieillissement provoqué par un mouvement cyclique de roulement pur ou de roulement et glissement combinés.

La fatigue mécanique superficielle se manifeste par l'apparition de petites fissures suivies de débris. Ce phénomène est lié à l'état des contraintes et leur distribution

à la surface et surtout à l'homogénéité du métal près de la surface. Les fissures qui se développent perpendiculairement à la direction de glissement peuvent également apparaître avec des matériaux fragiles soumis à des gradients importants de température entraînant ainsi un choc thermique (fatigue thermique) [8] [9].

Remèdes : Les remèdes à ces types de détériorations résident dans :

- la métallurgie des surfaces : l'amélioration de la tenue en fatigue passe par un durcissement des surfaces, la carbonisation et la trempe superficielle sont pratiquées couramment. Ces traitements provoquent des contraintes résiduelles de compression qui sont favorables à la tenue en fatigue [8] ;

- la lubrification : par une élévation de l'épaisseur du film d'huile [8].

11.1.4- L'usure corrosive : Mécanisme de l'usure corrosive :

L'usure corrosive est due à une réaction des surfaces de frottement avec une ambiance corrosive qui crée un produit de réaction évacué ultérieurement par le frottement.

Le mécanisme de l'usure corrosive suit deux étapes. Dans un premier stade, les surfaces sont attaquées chimiquement par des agents corrosifs contenus dans l'ambiance ou formés dans le lubrifiant par altération. Dans le second stade, il y a enlèvement des produits de réaction par frottement et l'attaque se poursuit [8] [9].

Remèdes : Ils sont de deux types :

- l'utilisation d'un lubrifiant avec des additifs appropriés (détergents à réserve de basicité, anti-oxydants et anti-corrosifs) permet en général de résoudre le problème d'usure ;

- l'utilisation des matériaux résistant à la corrosion (acier inoxydable, alliage à base de chrome-nickel) [8] [9].

- déterminer les types d'usure possibles en fonction des conditions d'utilisation ;
- reconnaître les faciès : surface et coupe à l'oeil nu, ou mieux en s'aidant d'un loupe ou d'un petit microscope binoculaire tout en évitant d'observer les surfaces à très fort grossissement ;
- recherche des causes d'usure possibles (mauvaise lubrification, vibrations, etc...) ;
- comparer avec des cas d'usure connus ;
- diagnostic et proposition de remèdes [8].

II.3.- Fonctionnement et usure d'un vilebrequin :

II.3.1- Etude du fonctionnement d'un vilebrequin :

Le vilebrequin est le premier organe du véhicule à transmettre sous forme d'un couple l'énergie développée par la combustion des gaz.

Il permet en outre :

- de mettre en marche le moteur à l'aide d'une manivelle appliquée à l'une de ses extrémités ou d'un démarreur ;
- de commander l'ensemble des mécanismes auxiliaires (distribution, pompe à huile, ventilateurs, dynamo ou alternateur) ;
- l'amenée d'huile sous pression aux différentes têtes de bielles.

Le vilebrequin travaille à la flexion entre les paliers sur lesquels il prend appui par les tourillons, et la torsion autour de son axe de rotation par suite des efforts que transmettent les bielles.

Il est en outre le siège de vibrations (de torsion principalement) qui induisent son usure aux surfaces de frottement, en l'occurrence les manetons et les tourillons [12], [13].

Les éléments constituant un vilebrequin sont (voir fig.6) :

- les manetons ou soies sur lesquels s'articulent les bielles ;
- les tourillons qui permettent à l'arbre de reposer sur les paliers du carter ;
- les bras de manivelles ou flasques qui portent les contre-poids et qui permettent de relier les manetons et les tourillons ;
- les canalisations intérieures pour le graissage sous pression de manetons et des tourillons ;
- l'emplacement, du volant moteur à une extrémité, et à l'autre, la dent du loup qui sert à l'engrènement de la manivelle de mise en marche, et la portée du pignon de distribution ;
- éventuellement, les portées recevant les amortisseurs de vibration de torsion (damper).

La disposition de ces éléments est conditionnée par le nombre de pa lier et de cylindres du moteur, par l'obligation de répartir régulièrement les impulsions des cylindres sur deux tours de rotation, tout en assurant le meilleur équilibrage possible.

Le vilebrequin doit être équilibré statiquement et dynamiquement.

L'équilibre statique est l'équilibre au repos.

L'équilibre dynamique est un équilibre en mouvement. Un vilebrequin est en équilibre dynamique lorsqu'on peut le faire tourner à une vitesse quelconque avec le minimum possible de vibrations [12] [13] [14].

II.3.2- Usure du vilebrequin :

Le vilebrequin doit pouvoir assurer son service sans usure notable aussi longtemps que le piston (au moins 300 000kms pour une voiture particulière).

Il doit donc conserver son jeu de ligne d'arbre et pour cela :

- ne pas détériorer les coussinets de ligne d'arbre ;
- ne pas user ses portées.

Les principales causes de l'usure des portées sont :

- les vibrations induisant une usure par corrosion de contact ;

- le vilebrequin est soumis à la flexion entre les paliers et à la rotation autour de son axe de rotation. Un vieillissement causé par son mouvement de roulement et glissement combinés, se manifeste par l'apparition de petites fissures suivies de débris [8] :

- par suite d'une défaillance du système de filtration, des impuretés abrasives contenues dans l'huile constituent le troisième corps et rayent la surface des portées ;

- lors d'une mauvaise lubrification, par suite du mouvement de l'assemblage, un frottement direct métal/métal peut avoir lieu, il en résulte des microglissements alternés et élévation de température aux surfaces de contact, ce qui provoque une oxydation superficielle et les particules d'oxydes viennent éroder la surface ;

- un vilebrequin est une pièce en rotation de forme compliquée, il faut s'attendre donc à des effets centrifuges. La force tournant avec le vilebrequin augmente les vibrations de flexion et par conséquent l'usure des paliers [14].

En conclusion, on peut dire que la mise au rebut prématurée des vilebrequins est la conséquence de l'usure des portées. Ainsi le remède qui sera proposé doit s'appuyer sur un revêtement devant limiter cette usure.

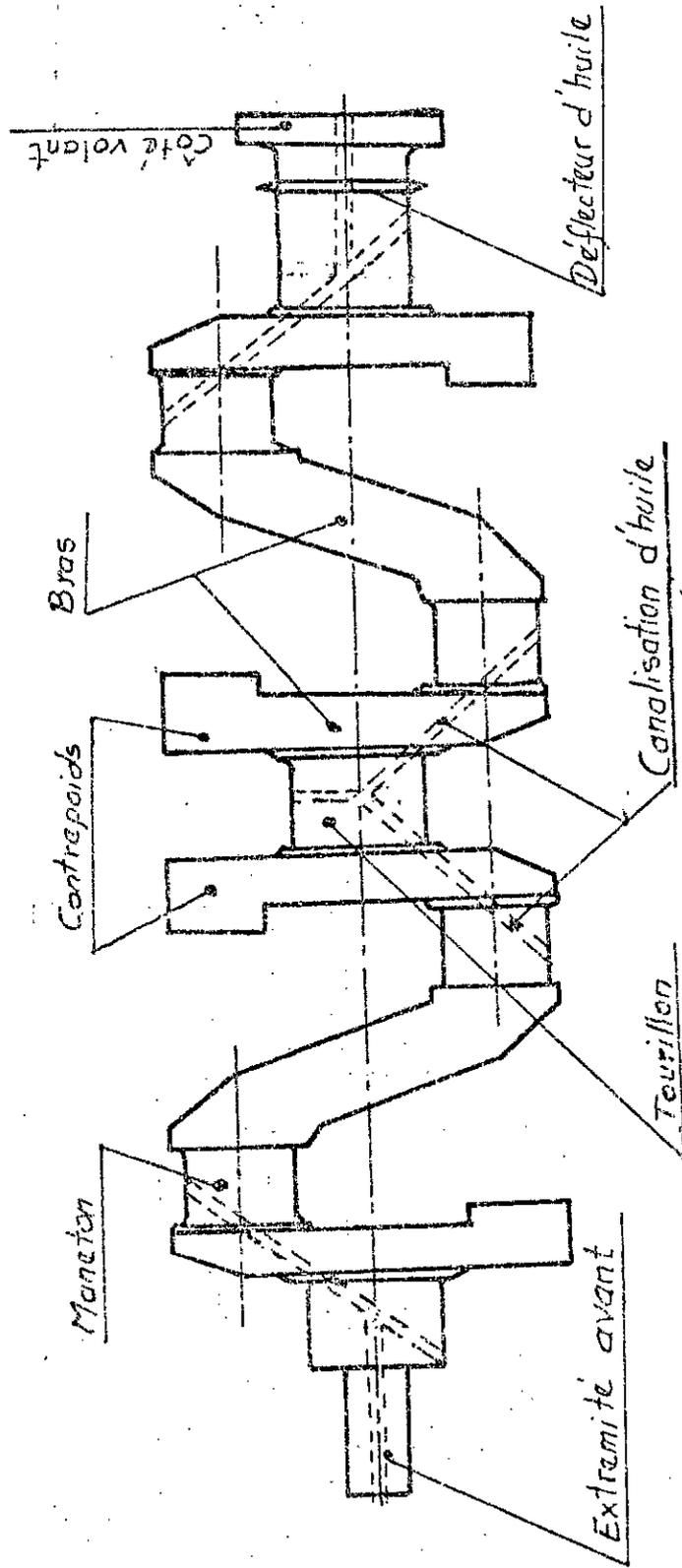


Fig.6. : La nomenclature du vilebrequin

III - TECHNIQUES EXPERIMENTALES

Etant donné les considérations citées dans le chapitre précédent en ce qui concerne l'importance technico-économique du vilebrequin et la place qu'il occupe dans le moteur ; et vu la gravité des répercussions que peut engendrer son usure, l'objectif de notre travail est l'étude de la technique de revêtement par métallisation d'un vilebrequin.

Cette étude permettra la maîtrise des principaux paramètres de la technique de projection à l'arc électrique par analyse des effets métallurgiques et mécaniques que ceux-ci peuvent produire sur le multimatériau réalisé.

Les travaux expérimentaux inhérents à la technique de projection ont été réalisés à l'entreprise "ALGERIE METALLISATION", entreprise privée spécialisée dans la rénovation et la récupération par métallisation des pièces mécaniques usées (vilebrequins, tambours, verins, axes, essieux, ...).

III.1- Equipement utilisé :

Le pistolet de projection utilisé est l'ARC SPRAY 234 utilisant l'arc électrique comme source d'énergie.

Il a été conçu et développé pour réduire la fatigue de l'opérateur et produire des revêtements de hautes qualités. Ces deux buts ont été atteints grâce à la tête de projection CC, aux conducteurs refroidis, à la réduction du poids et au meilleur équilibre de toute l'unité de projection. Bien qu'ayant d'abord été conçu pour une utilisation manuelle, il peut également être monté sur une machine (voir fig. 7.a. ; fig.7.b) [7].

Pour que la couche projetée s'amalgame le mieux possible avec le métal de base, il faut respecter les paramètres de projection préconisés par le constructeur [2] (voir tableau -I-).

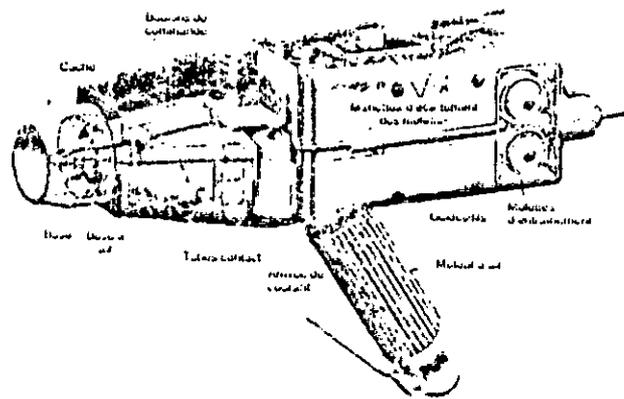


Fig 7-a.: Pistolet à arc électrique

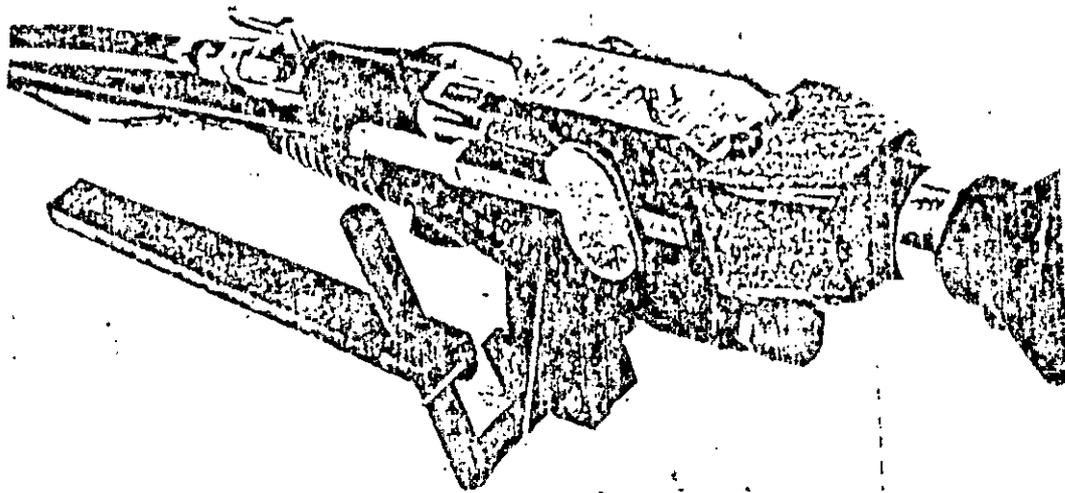


Fig 7-b.: Arc spray 234 monté sur une machine.

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	30V
Intensité de courant	100A

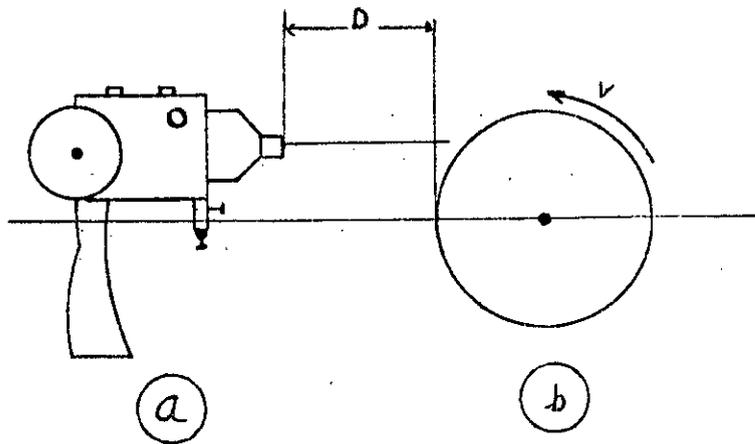
TAB I : Paramètres de projection

Malheureusement, certains paramètres de projection (distance de projection, vitesse de rotation de la cible, débit de matière projeté, etc...) qui ont une influence majeure sur la qualité de revêtement, ne sont pas maîtrisés et sont choisis aléatoirement en fonction des pièces traitées.

Dans le cas des vilebrequins, on travaille à une distance de projection variant entre 150 et 160mm et une vitesse de rotation d'environ 16tr/min.

L'objet principal de notre étude consiste à faire varier judicieusement la distance de projection autour de celle utilisée dans la dite entreprise en gardant constante la vitesse utilisée. Ensuite, on fait varier la vitesse de rotation tout en gardant fixe la distance utilisée.

La pièce à recharger est fixée sur un mandarin, le jet du métal doit être dirigé légèrement au dessus ou au dessous de l'axe, suivant le sens de la rotation du mandarin, de façon que le jet de métal ait tendance à plaquer les particules métalliques sur la pièce et non pas à les faire s'échapper par la tangente [2].



(a) : pistolet métalliseur
 (b) : pièce à recharger animée d'un mouvement de rotation.

Fig. 8 - Positions respectives du pistolet métalliseur et de la pièce à recharger

Les distances utilisées au cours de nos essais sont :

$d_1 = 180$ mm
 $d_2 = 160$ mm
 $d_3 = 140$ mm pour une vitesse fixée à 16trs/min
 $d_4 = 120$ mm
 $d_5 = 90$ mm

et les vitesses utilisées sont :

$V_1 = 23$ trs/min
 $V_2 = 19$ trs/min
 $V_3 = 16$ trs/min pour une distance fixée à 160 mm
 $V_4 = 12$ trs/min
 $V_5 = 9$ trs/min

III.2- Matériaux utilisés :

III.2.1- Substrat :

Des analyses chimiques effectuées sur certains échantillons de vilebrequin d'une part, et les recherches

bibliographiques concernant les matériaux utilisés pour leur fabrication d'autre part, nous ont incité à prendre comme matériau de base un alliage type 20 NCG.

Ce choix a également été motivé par la disponibilité et l'utilisation de cet acier faiblement allié dans l'industrie algérienne.

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

Eléments	Fe	C	Ni	Cr	Mn	Mo	Co
Composition	96.13	0.192	1.314	0.988	0.768	0.036	0.016

Après un traitement de trempe à 850°C sans revenu, l'acier présente les caractéristiques mécaniques suivantes :

Re (dN/mm ²)	R (daN/mm ²)	A%	K _{cu}	HB
≥ 100	125	≥ 7	≥ 5	200

Du fait des valeurs élevées de R_e , R et K_{cu} , cet acier est utilisé pour la réalisation des pièces soumises aux vibrations, chocs mécaniques tels que : les vilebrequins, axes, essieux, engrenages, ... [15] [16].

III.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 la qualité 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 réalisée par déposition d'un alliage Ni-AL désigné par la nuance 75E sur une épaisseur d'environ 0,1 mm.

Remarque : Nous avons par ailleurs jugé judicieux de réaliser un revêtement sans sous-couche d'accrochage par laquelle une étude comparative a été faite et dont les conséquences sont confirmées dans le chapitre (IV.B).

III.2.3- Dépôt :

Nous avons réalisé un revêtement composite par projection simultanée de deux fils en acier de nuances respectives 55 et 65 E sur une épaisseur de 1,5mm.

65 E : acier au chrome Manganèse

55 E : acier inoxydable 18/5.

Il faut signaler qu'une rectification est effectuée par usinage à la machine outil (tour) de façon à retomber sur la côte visée.

III.3- Préparation des échantillons :

Dix échantillons identiques de forme cylindriques ont été confectionnés en tenant compte de la commodité des essais nécessaires pour l'étude des paramètres de projection.

Les dimensions ont été choisies de manière à se rapprocher le plus possible des dimensions courantes de portées du vilebrequin à l'usure.

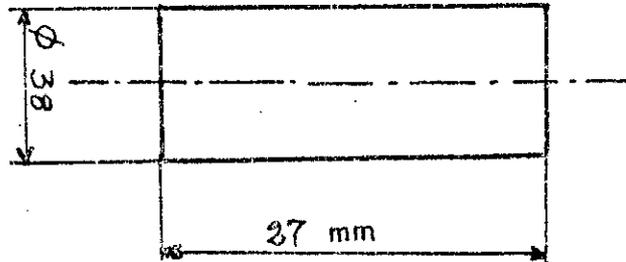


Fig. 9 - Schéma de l'échantillon utilisé

Un autre échantillon de même forme et dimension que les précédents a été confectionné dans le but de voir le comportement du revêtement à l'interface dépôt - substrat sans sous-couche d'accrochage.

Il faut souligner que ces échantillons, avant le traitement de projection ont subi une préparation mécanique bien soignée, et qui consiste en :

a- préparation mécanique de la pièce (décapage mécanique) :

Cette opération qui consiste en un usinage à la machine outil (tour ou rectifieuse) permet de :

- corriger le profil de la pièce ;
- débarrasser la pièce des bavures, peintures, huiles, etc... ;
- diminuer la dimension des pièces afin de laisser une épaisseur suffisante pour le dépôt, sans cependant nuire à la résistance de celle-ci.

b- Rugosification :

Parmi les différentes méthodes de rugosification, nous avons utilisé le grenailage qui est recommandé pour les dépôts épais.

En plus de la rugosification, ce traitement permet aussi l'élimination des huiles et graisses laissées par le tour lors de l'opération d'usinage [3].

La pression du jet de la grenaille utilisée est de 7 bars. Cette ultime opération a été faite avec beaucoup de soins, car elle constitue un facteur important pour la bonne tenue du revêtement du fait qu'elle augmente la surface d'accrochage [1] [2].

IV- Analyse métallurgiques et mécaniques du multimatériau obtenu :

L'adhérence du dépôt est l'une des propriétés les plus importantes de la projection thermique. En effet, elle permet de déterminer sa qualité et son application.

Il n'existe pas de contrôles non destructifs pour cette mesure, et les essais sont généralement réalisés sur un échantillon témoin du revêtement à éprouver [1].

Pour différents paramètres de projection, nous avons obtenu des revêtements de qualités différentes. Afin de voir l'influence de ces paramètres sur les propriétés, nous avons effectué les essais de caractérisation suivants :

IV.1- Analyse micrographique et interprétations :

La micrographie est la première méthode utilisée pour contrôler la qualité d'un dépôt [6].

Une fois la projection réalisée, nous avons procédé à l'observation micrographique avant l'opération de ^{finition} définition à la machine outil (tour), pour permettre une prise de photos sur un dépôt épais.

On a fait subir aux échantillons des polissages mécaniques sur du papier abrasif de granulométrie de plus en plus faible (120, 180, 380, 600 et 1000). Entre chaque passe du polissage un nettoyage aux ultrasons a été effectué. La finition a été faite sur papier feutre à l'aide d'une suspension d'Alumine.

La mise en évidence de la structure micrographique de la couche d'accrochage est réalisée par une attaque chimique au Nital à 5% (95% Alcool éthylique et 5% Acide Nitrique) pendant dix secondes.

Les structures micrographiques obtenues à l'aide d'un microscope optique sont représentées par les photographies numérotées de 10 à 19.

- Influence de la distance de projection :

Les figures 10, 11, 12, 13 et 14 montrent que la diminution de la distance de projection entraîne :

- une diminution de la porosité du dépôt ;
- une meilleure stratification de particules ;
- une cohésion élevée entre les particules du dépôts.

Par contre l'éloignement de la buse de projection par rapport au substrat conduit à :

- une oxydation importante du dépôt ;
- les particules sont moins bien fondues ;
- une présence de films d'oxydes sur les contours des particules non ou mal fondues.

Pour les faibles distances de projection, les particules ont une vitesse d'impact élevée et sont suffisamment plastiques, ce qui nous permet d'avoir une meilleure stratification des particules et une densification élevée du dépôt, d'où la diminution de la porosité [18].

Par contre pour les distances élevées, les particules qui ont une faible vitesse d'impact sont plus rigides et se refroidissent durant leur trajectoire [5] [12]. Ceci explique la porosité et l'oxydation élevée du dépôt. Ces deux facteurs conduisent à une faible cohésion entre les particules.

Influence de la vitesse de rotation de la cible :

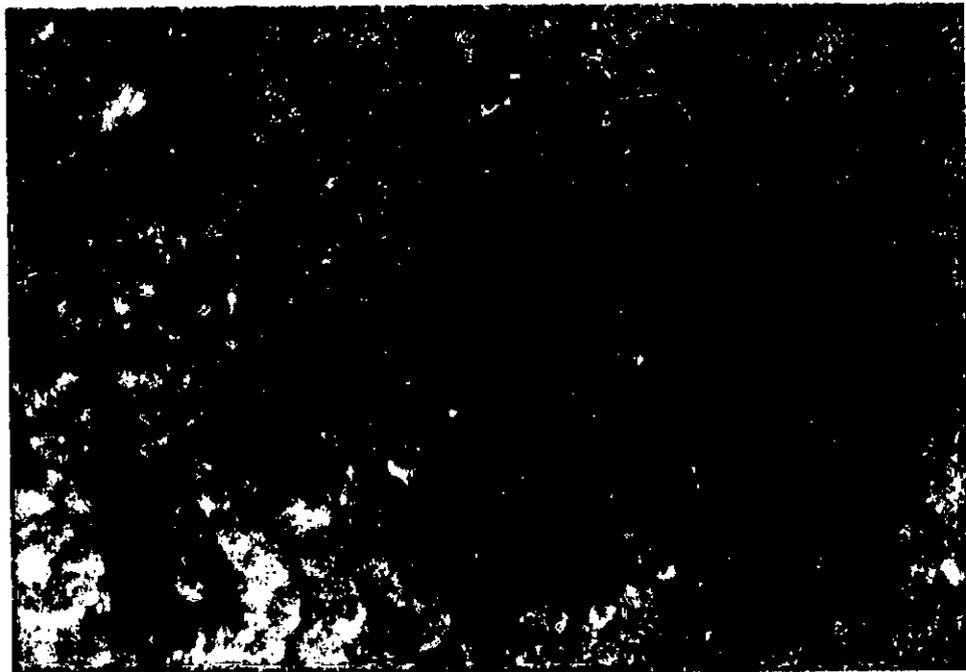
D'après les figures 15, 16, 17, 18 et 19, on constate pour des vitesses élevées :

- une faible oxydation du dépôt ;



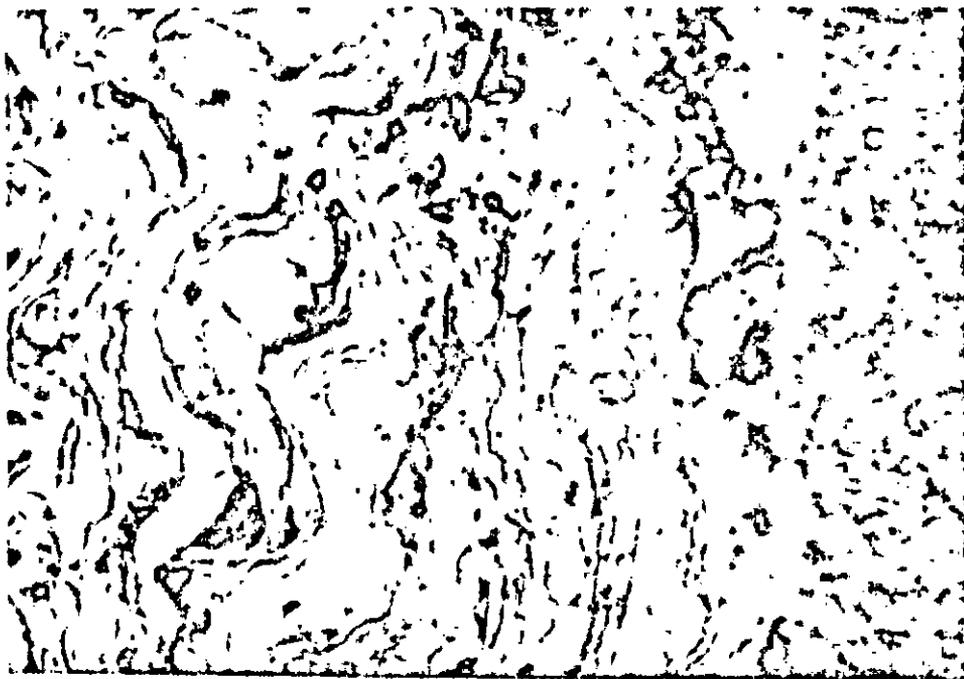
(x 200)

Photo N° 10 : $d = 180 \text{ mm}$; $v = 16 \text{ tr/s/min}$



(x 200)

Photo N° 11 : $d = 160 \text{ mm}$; $v = 16 \text{ tr/s/min}$



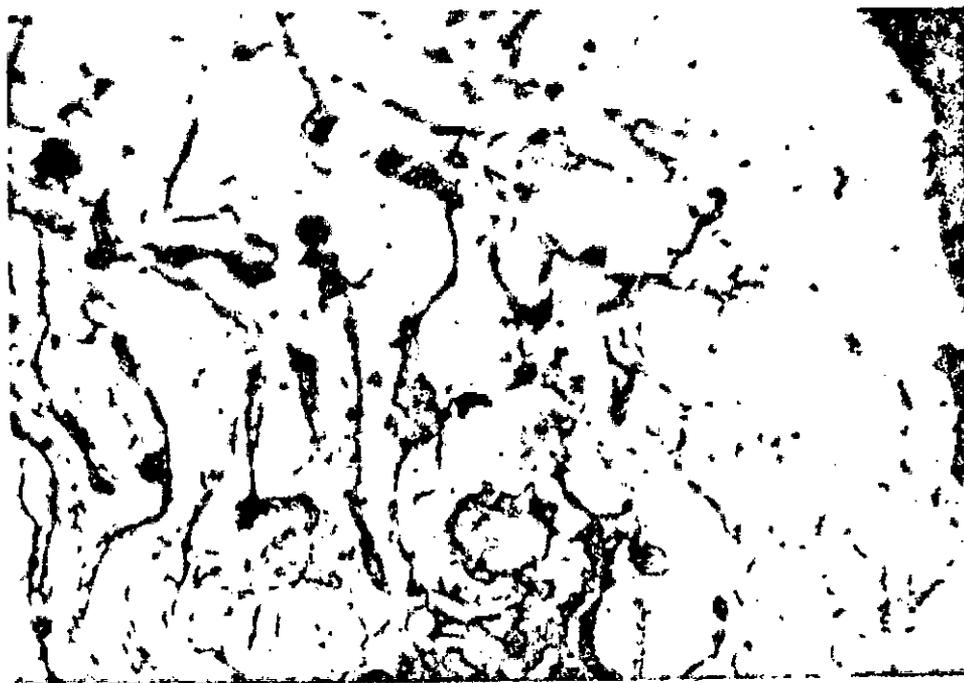
(x 200)

Photo N°12 : d = 140 mm ; v = 16 trs/min



(x 200)

Photo N°13 : d = 120 mm ; v = 16 trs/min



(x 200)

Photo N°14 $d = 90 \text{ mm}$; $v = 16 \text{ trs/min}$.

- le nombre de particules mal fondues devient important ;
- une diminution de la porosité du dépôt ;
- une meilleure cohésion entre les particules du dépôt ;
- un meilleur étalement des particules.

L'échauffement excessif dans la zone de projection causé par les faibles vitesses de rotation de la cible, entraîne une élévation de la température du couple substrat/dépôt. Ce qui augmente le temps d'exposition à l'oxydation d'où la diminution de la cohésion entre les particules de la densité du dépôt [18]. Le taux d'oxydation élevé et la porosité importante pour les faibles vitesses conduisent à un mauvais étalement des particules qui peut être néfaste à l'adhérence du dépôt.

Pour des valeurs élevées de la vitesse, les particules malfondues sont attribuées à l'écrasement important de celles-ci sur le substrat [11].

IV.2- Etude de la dureté superficielle :

La dureté qui est influencée par l'étalement et la cohésion des particules, la porosité, le taux d'oxydation et l'épaisseur du dépôt, demeure une méthode précieuse pour déterminer la qualité d'un revêtement [6].

Des essais de dureté Rockwell (la charge est de 15kgf et le pénétrateur en diamant) ont été effectués tout le long du dépôt (Voir fig 22.a) .

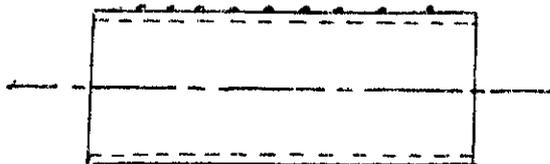
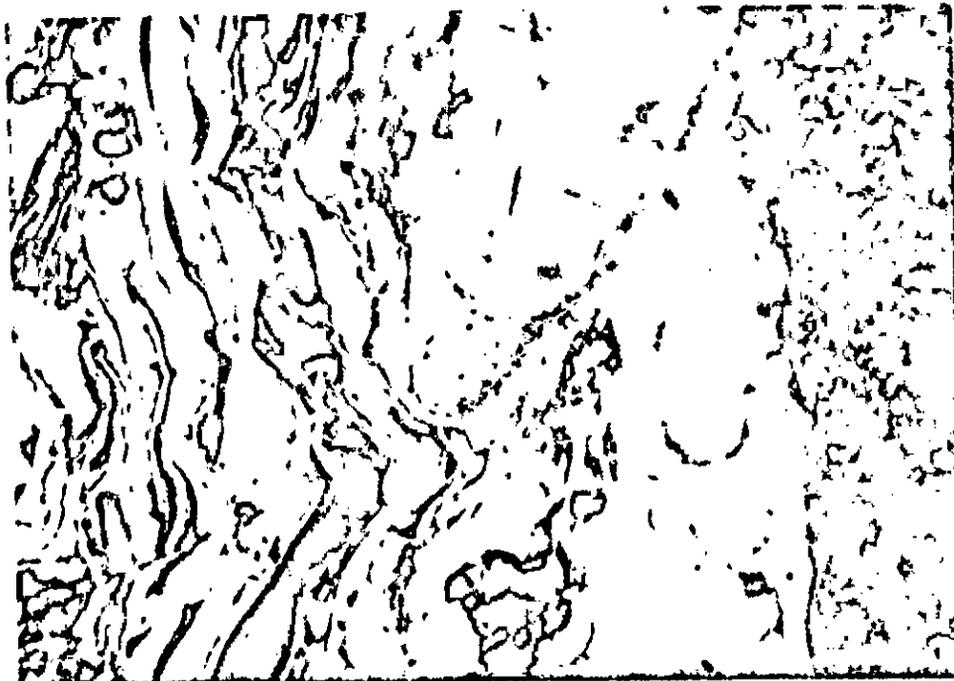


Fig22.a : Schéma représentant les différents points correspondants aux essais de dureté superficielle (HRC).



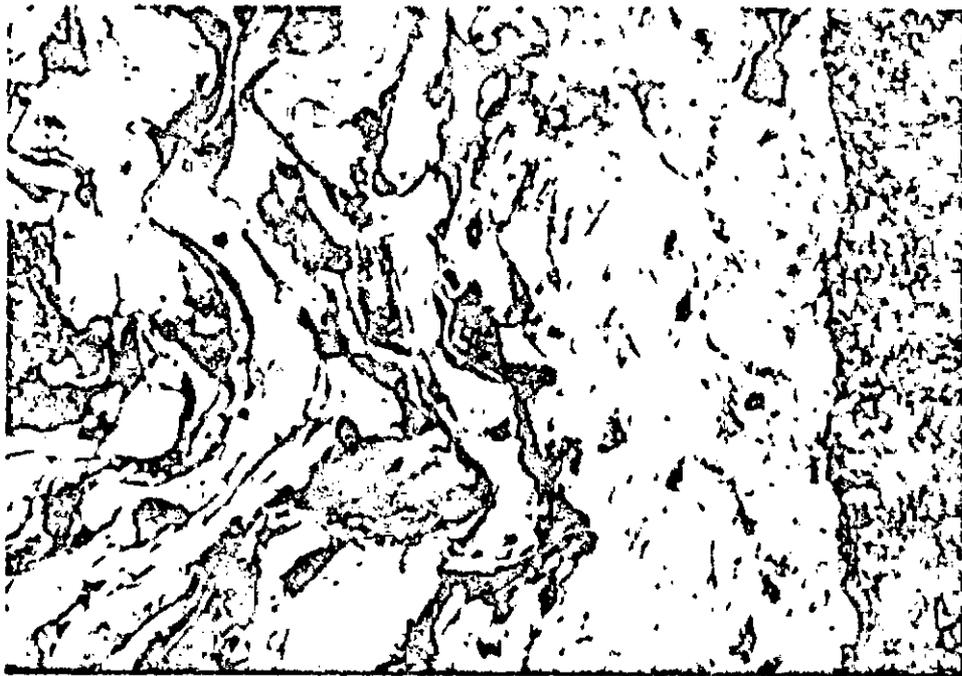
(x 200)

Photo N° 15 : $v = 23$ trs/min; $d = 160$ mm



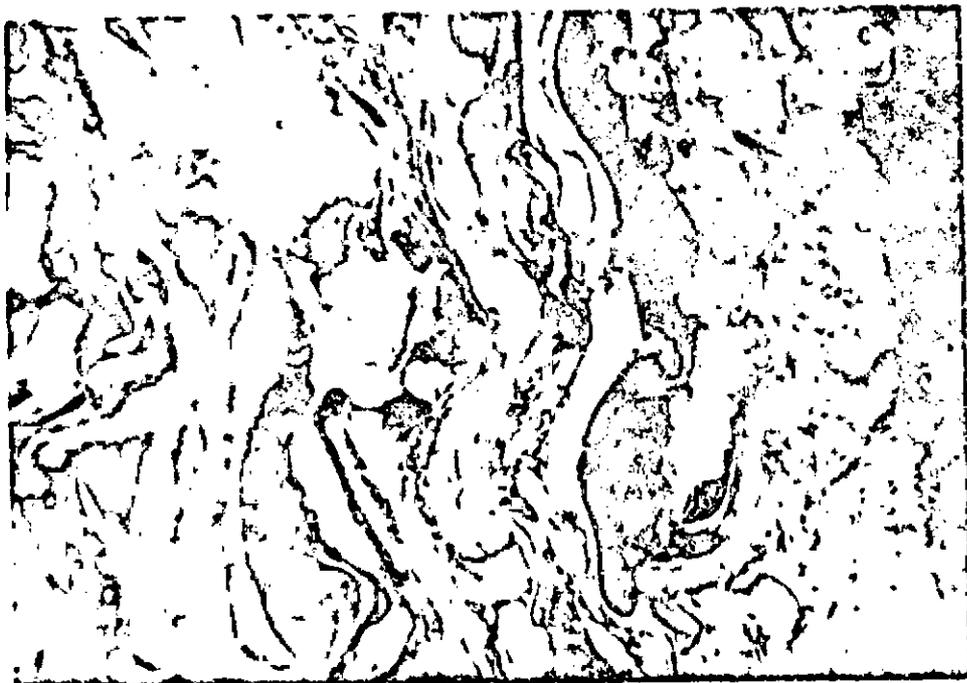
(x 200)

Photo N° 16 : $v = 19$ trs/min : $d = 160$ mm



(x 200)

Photo N° 17 : $v = 16$ trs/min ; $d = 160$ mm



(x 200)

Photo N°18 : $v = 13$ trs/min ; $d = 160$ mm



(x 200)

Photo N° 19 : $v = 9$ trs/min ; $d = 160$ mm.

Pour chaque échantillon, la valeur de la dureté superficielle est obtenue en calculant la moyenne arithmétique des essais répartis en trois catégories par ordre de grandeur de la dureté.

Les résultats sont portés sur les figures 20 et 21.

Influence de la distance de projection :

La figure 20, représentant l'évolution de la dureté superficielle en fonction de la distance de projection, montre que la dureté augmente jusqu'à une certaine valeur puis diminue quand l'éloignement de la buse de projection par rapport au support devient important.

Lorsque la distance augmente, l'élévation de la dureté correspondante est attribuée au taux d'oxydation qui devient de plus en plus important. Cependant, pour des distances trop élevées, les particules sont moins bien fondues et le taux d'oxydation est très important. Il en résulte un mauvais étalement des particules, une faible cohésion du dépôt d'où la diminution de la dureté.

Ce résultat est en parfaite correspondance avec les observations micrographiques où on voit que la dureté maximale correspond au meilleur étalement des particules.

Influence de la vitesse de rotation de la cible :

La figure 21, représentant la variation de la dureté superficielle (HRC) en fonction de la vitesse de rotation de l'échantillon, montre que la dureté du revêtement augmente jusqu'à une certaine valeur de la vitesse puis diminue quand celle-ci est très importante.

Si la vitesse de rotation de la cible augmente, l'augmentation de la dureté est attribuée à une meilleure cohésion entre les particules et à une diminution de la porosité.

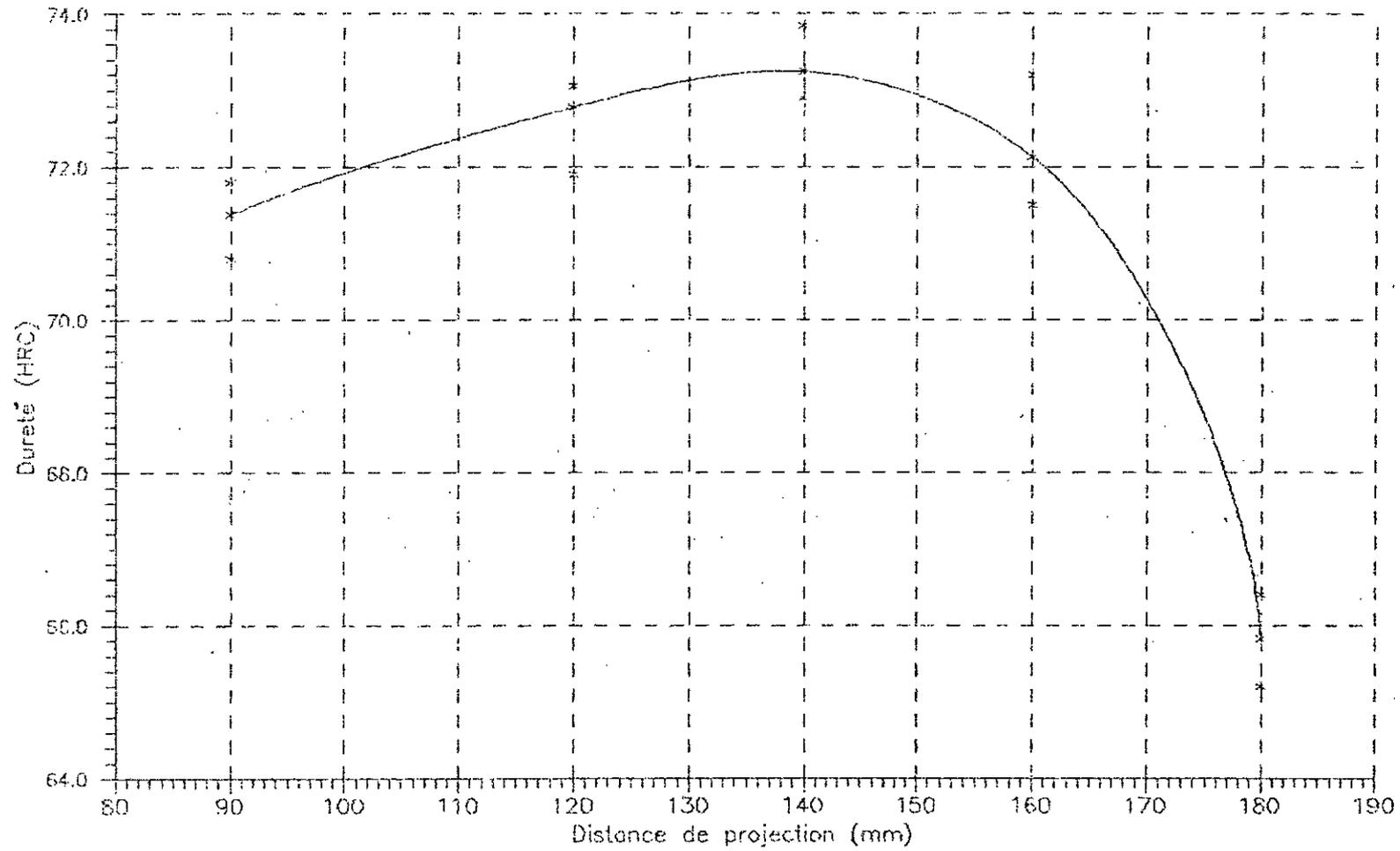


Fig 20 : Evolution de la dureté(HRC) en fonction de la distance de projection (mm).

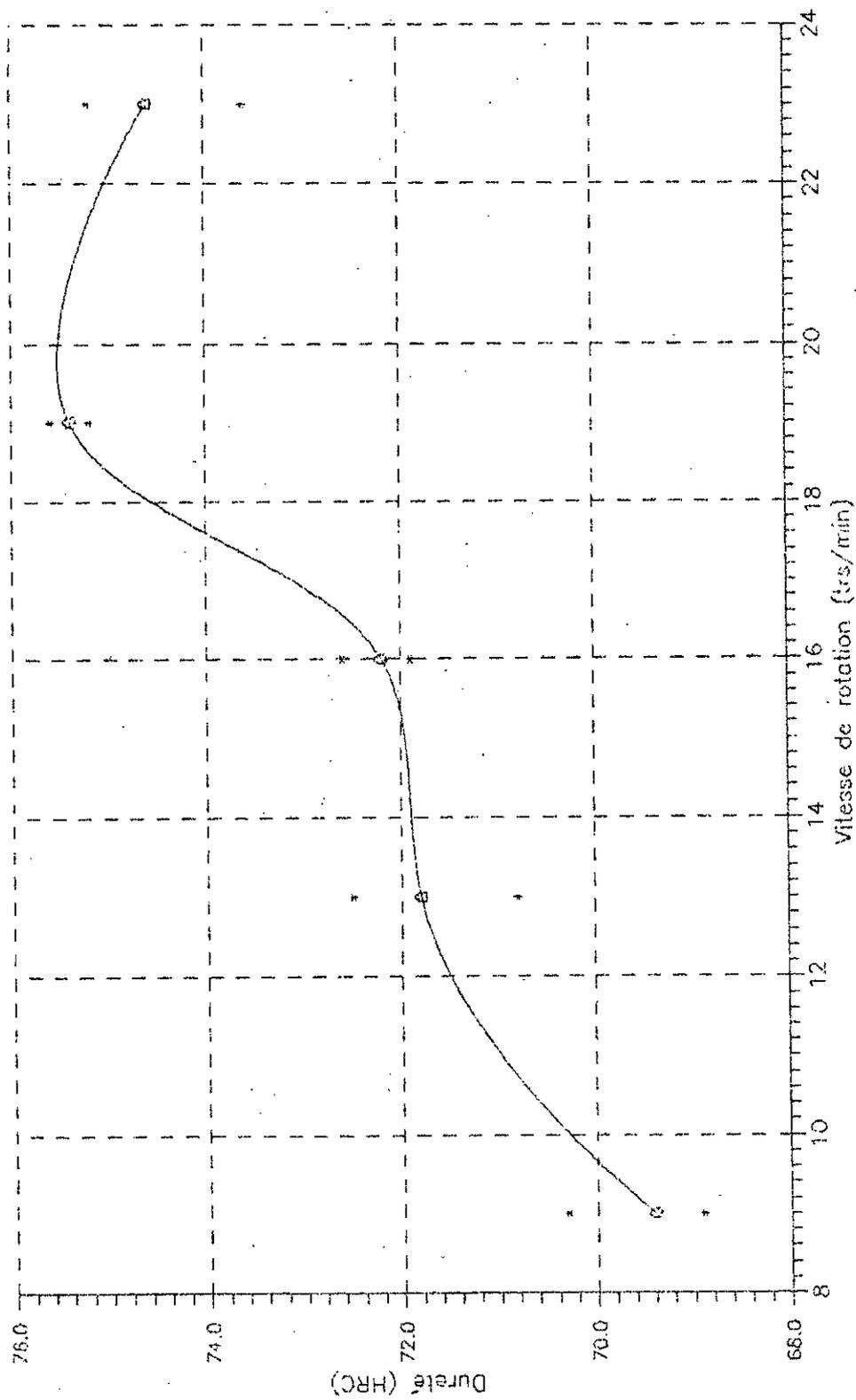


Fig 21: Evolution de la dureté(HRC) en fonction de la vitesse de rotation de la cible (trs/min)

L'augmentation de la vitesse entraîne une élévation de la dureté du dépôt. Ceci s'explique par le fait que la densité du dépôt devient de plus en plus élevée.

Cependant, si la vitesse est très élevée, l'écrasement des particules est trop important. Pour avoir un bon écrasement, il faut une fusion suffisante de la particule mais aussi une vitesse non négligeable. Cependant, la température de la particule, dès qu'elle dépasse la température de fusion, a une influence plus grande que la vitesse sur l'écrasement de la particule. Il est donc préférable d'avoir une particule bien fondue avec une vitesse de rotation de la cible moyenne qu'une particule moins fondue avec une grande vitesse [11].

Donc la diminution de la dureté pour les vitesses élevées est attribuée aux particules qui sont moins bien fondues.

Comme précédemment, on constate que ce résultat coïncide avec les observations micrographiques où le meilleur étalement des particules correspond à la dureté la plus élevée.

IV.3- Etude de la dureté au voisinage de l'interface :

Afin de comparer la dureté du revêtement à celle du substrat, et de voir l'influence des paramètres de projection sur celle-ci au voisinage de l'interface, nous avons effectué des essais de dureté Rockwell en utilisant les mêmes conditions que précédemment (la charge est de 15 kgf et le pénétrateur est en diamant) suivant une coupe transversale indiquée par la figure 22.

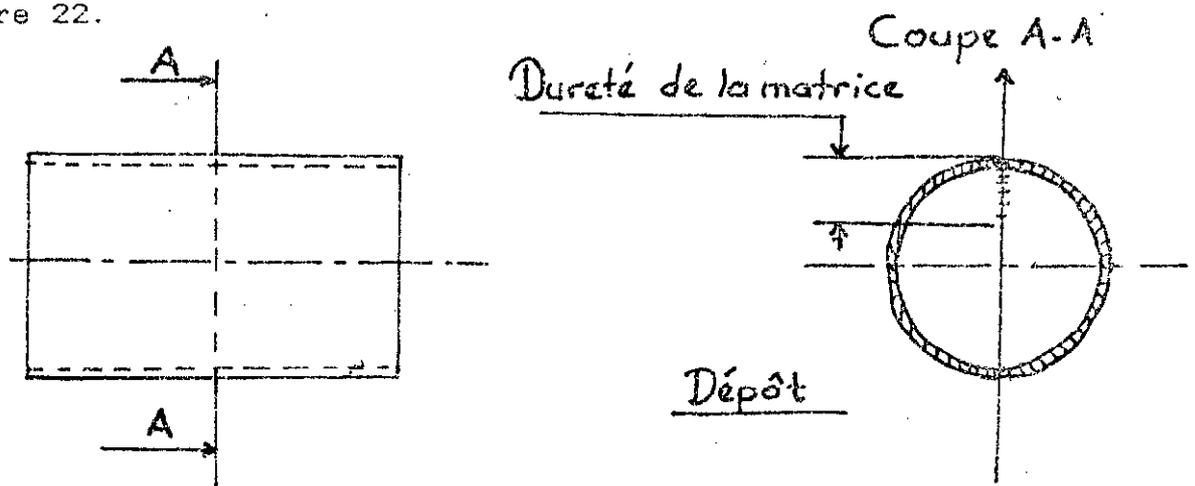


Fig 22.b : schéma représentant les différents points correspondants aux tests de dureté (HRc)

Trois essais ont été effectués sur chaque point et la moyenne arithmétique constitue les valeurs de dureté au voisinage de l'interface.

Les résultats sont portés sur les figure 23 et 24.

Influence de la distance de projection :

La figure 23 montre que :

- pour chaque valeur de la distance de projection, la dureté du revêtement diminue en s'éloignant de l'interface. Ceci s'explique par le fait que plus on s'approche de l'interface, les couches de métal projetées sont de plus en plus écrouies par l'arrivée des couches suivantes et à un meilleur étalement des particules qui induit une bonne cohésion du dépôt projeté ;

- la dispersion des résultats de dureté est due à l'hétérogénéité du dépôt projeté ;

- pour les distances trop élevées ou trop faibles par rapport à l'optimum, on remarque que la dureté du dépôt est inférieure à celle de la matrice. Ce qui n'est pas très intéressant du point de vue application du revêtement projeté pour l'amélioration de la tenue à l'usure ;

- on constate aussi une chute de la dureté au niveau de la sous couche d'accrochage. Ceci est dû au fait que la dureté de l'alliage Ni-AL est inférieure à celle du métal de base et du dépôt avant la projection.

- enfin, au niveau du métal de base, la courbe montre que la zone limite à l'interface est affectée par le traitement de projection.

Influence de la vitesse de rotation de la cible :

D'après la figure 24, on constate :

- pour chaque valeur de la vitesse de rotation de l'échantillon, la dureté du revêtement diminue en s'éloignant de l'interface. Ceci est attribué au refroidissement des particules qui, en s'éloignant de l'interface, devient de plus

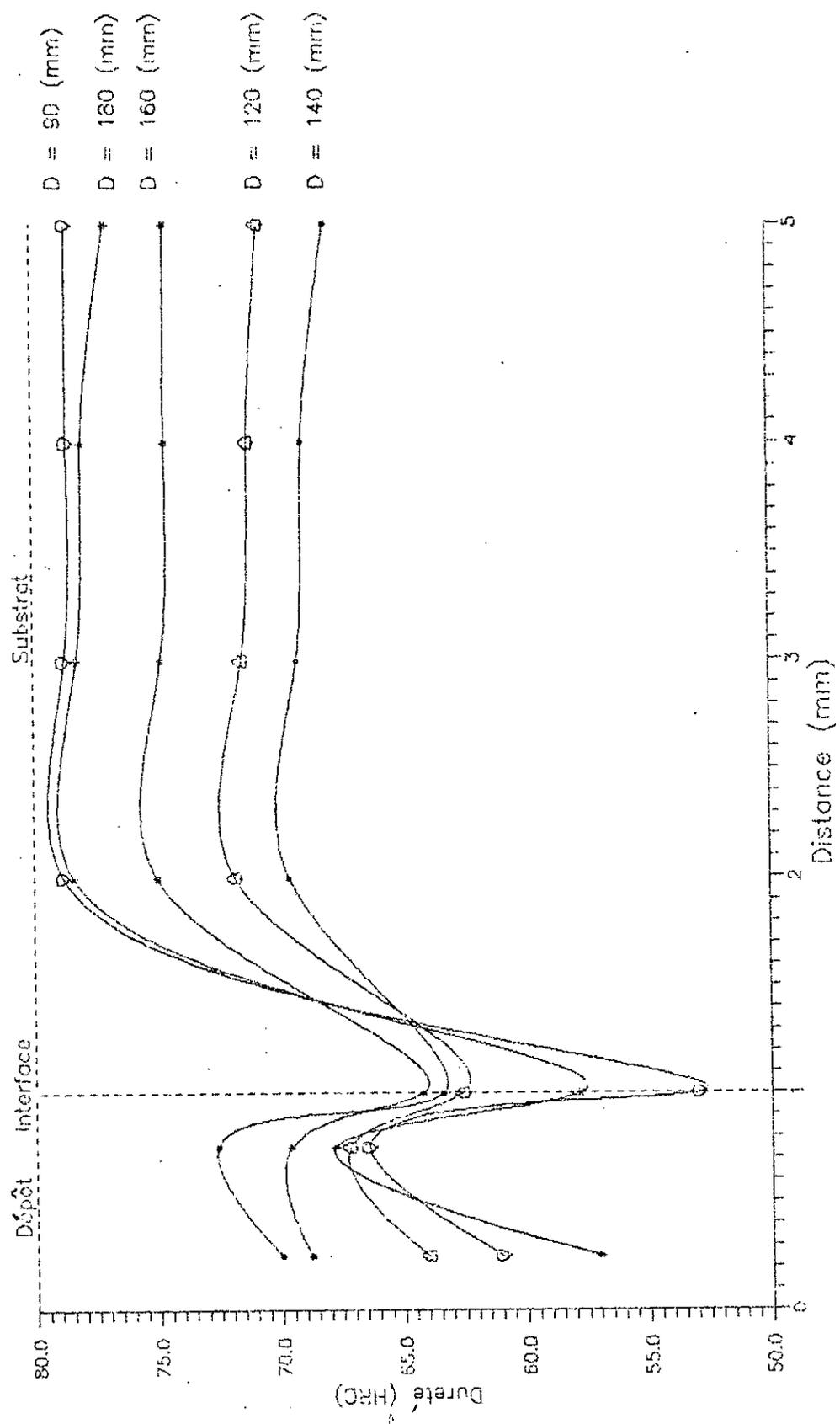


Fig 23 : Evolution de la dureté(HRC) au voisinage de l'interface

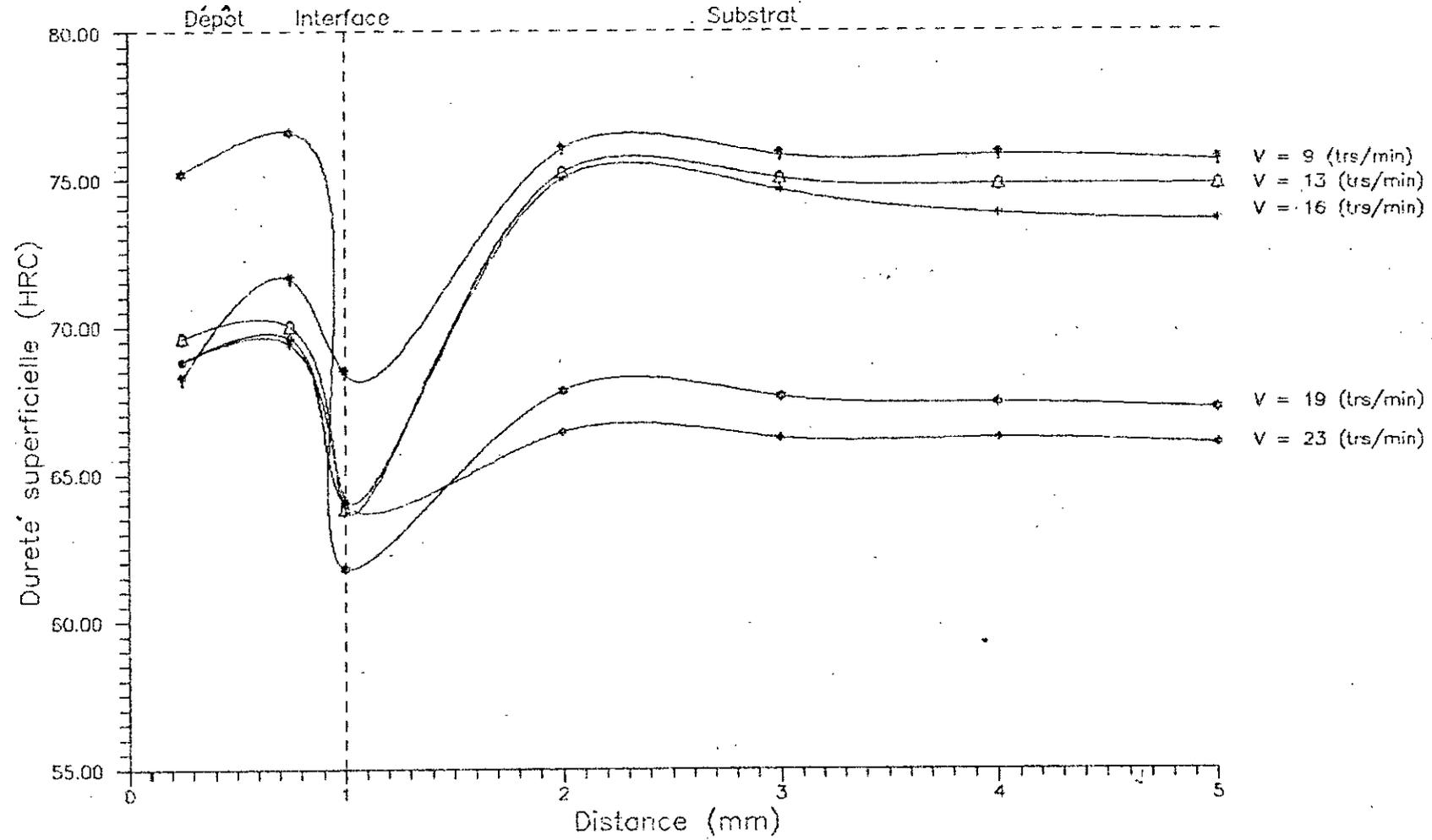


Fig 24 : Evolution de la dureté (HRC) au voisinage de l'interface

en plus important et qui est néfaste pour la cohésion entre les particules ;

- de même, que pour les distances de projection, la dureté de la sous-couche d'accrochage est inférieure à celle du dépôt et du métal de base pour les différentes vitesses ;

- pour les faibles vitesses, la dureté du dépôt est inférieure à celle du substrat. Ce qui n'est pas très intéressant pour son application en tant que le revêtement devant en principe améliorer la résistance à l'usure du matériau ;

- au niveau du métal de base, l'échauffement excessif du substrat et l'écroutissage provoqué par les particules pour les faibles vitesses de rotation, conduisent à une légère élévation de la dureté de celui-ci.

IV.4- Etude de la microdureté :

Des essais de microdureté "Vickers" ont été réalisés sur des échantillons en utilisant une charge de 700g.

Il faut noter que les échantillons testés ont subi un polissage préalable.

Cinq essais ont été effectués dont un sur la sous-couche d'accrochage et deux de part et d'autre de celle-ci.

La valeur de la microdureté obtenue représente la moyenne arithmétique de trois essais différents.

Les résultats sont portés sur les figures 25 et 26.

Influence de la distance de projection :

D'après la figure 25, on constate que :

- au niveau du dépôt, la microdureté augmente avec la diminution de la distance de projection. Ceci est dû à l'écroutissage, provoqué par les grandes vitesses des particules pour les faibles distances de projection.

- pour chaque valeur de la distance, la microdureté pour le dépôt augmente en s'approchant de l'interface. Ceci est

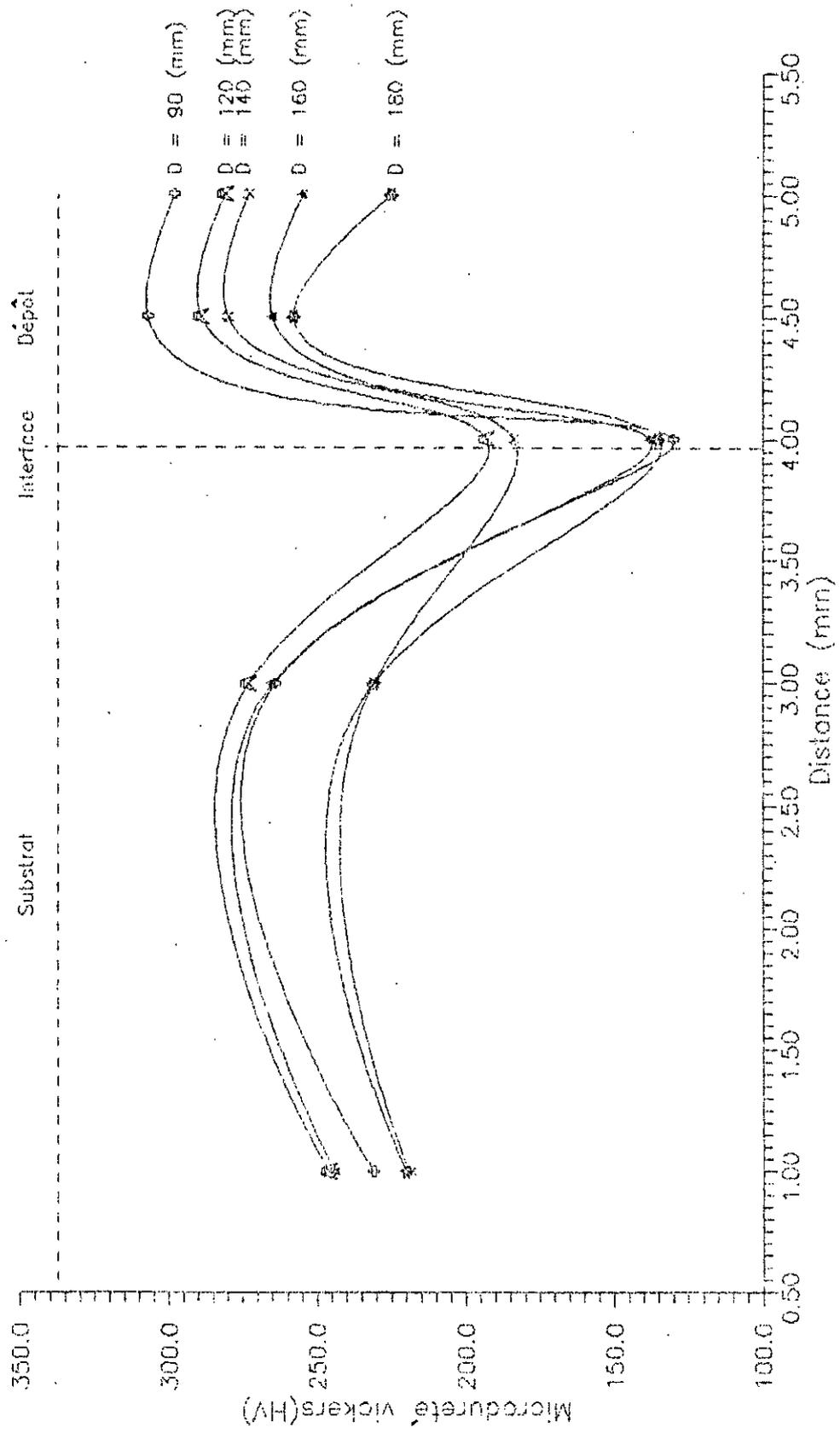


Fig 25: Evolution de la microdureté(HV) au voisinage de l'interface.

du à l'écrouissage provoqué sur chaque couche projetée par l'arrivée de la couche suivante avec un effet moindre en allant des premières aux dernières couches projetées, ainsi qu'à l'étalement des particules ;

- au niveau de la sous-couche d'accrochage, on constate une chute de la microdureté. Ceci est dû à la présence de l'alliage Ni-AL la constituant.

- les variations des vitesses de refroidissement des particules quand la distance pour la sous-couche d'accrochage varie sont à l'origine des variations des valeurs la microdureté ;

- le traitement de projection affecte le substrat ou de légères variations de la microdureté sont observées.

Influence de la vitesse de rotation de la cible :

La figure 26 montre que :

- les valeurs de la microdureté du revêtement augmentent quand la vitesse de rotation de l'échantillon diminue. L'échauffement excessif des particules pour les faibles vitesses de rotation induit des contraintes résiduelles thermiques qui sont la cause principale de l'élévation de la microdureté ;

- pour chaque valeur de la vitesse, la microdureté pour le dépôt augmente en s'approchant de l'interface. Ceci est du à l'écrouissage provoqué sur les particules de chaque couche projeté par l'arrivée des couches suivantes, et à l'écrasement des particules qui devient meilleur en s'approchant de l'interface ;

- au niveau du métal de base, on constate le même phénomène que pour les distances de projection, c'est-à-dire que le traitement de projection thermique cause une légère variation de la dureté du substrat.

IV.5- Etude de la densité :

La connaissance de la densité du dépôt est d'une importance primordiale pour la qualité d'un revêtement et son application.

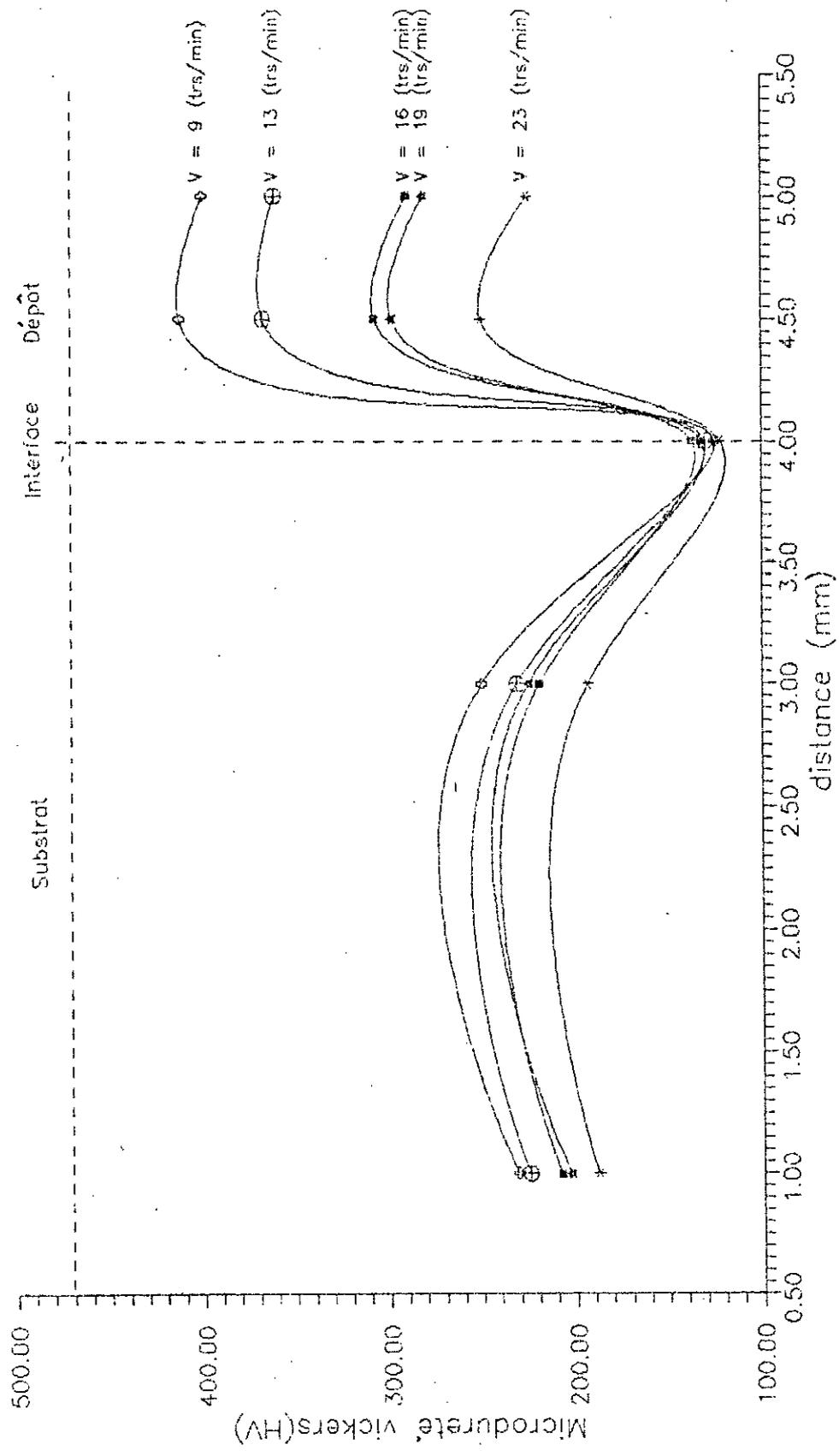


Fig 26 : Evolution de la microdureté (HV) au voisinage de l'interface.

La densité des dépôts projetés est fonction de la porosité. Cette dernière permet à la projection d'augmenter de façon notable sa panoplie d'applications. D'une part, elle augmente le pouvoir isolant de certains matériaux tels que les céramiques, d'autre part, lorsque des forces agissent sur le matériau, les pores le renforcent en interrompant la propagation des fissures qui se forment inévitablement [19].

Les pores sont également favorables dans la mesure où ils stockent les lubrifiants, surtout dans les revêtements anti-usure. De tels pores peuvent cependant être rédhibitoires pour des revêtements censés protéger une pièce contre la corrosion [19] [3].

Dans le but de voir l'influence des paramètres de projection sur la densité du dépôt, nous avons réalisé cette mesure en déterminant le volume et la masse (par pesée) pour chaque échantillon, du dépôt avant et après la projection.

La densité du dépôt projeté est donnée par la formule ci-dessous :

$$d = \frac{m}{V} = \frac{m_2 - m_1}{V_2 - V_1} = \frac{m_2 - m_1}{\pi \frac{Q_2^2}{4} \cdot L_2 - \pi \frac{Q_1^2}{4} \cdot L_1}$$

avec :

- d : densité du dépôt projeté.
- m_1, m_2 : masses respectives de l'échantillon avant et après la projection.
- V_1, V_2 : volumes respectifs de l'échantillon avant et après la projection.
- Q_1, Q_2 : représentent respectivement le diamètre initial et final de l'échantillon.
- L_1, L_2 : longueurs respectives de l'échantillon avant et après le procédé de projection.

Ces résultats sont portés sur les figures 27 et 28.

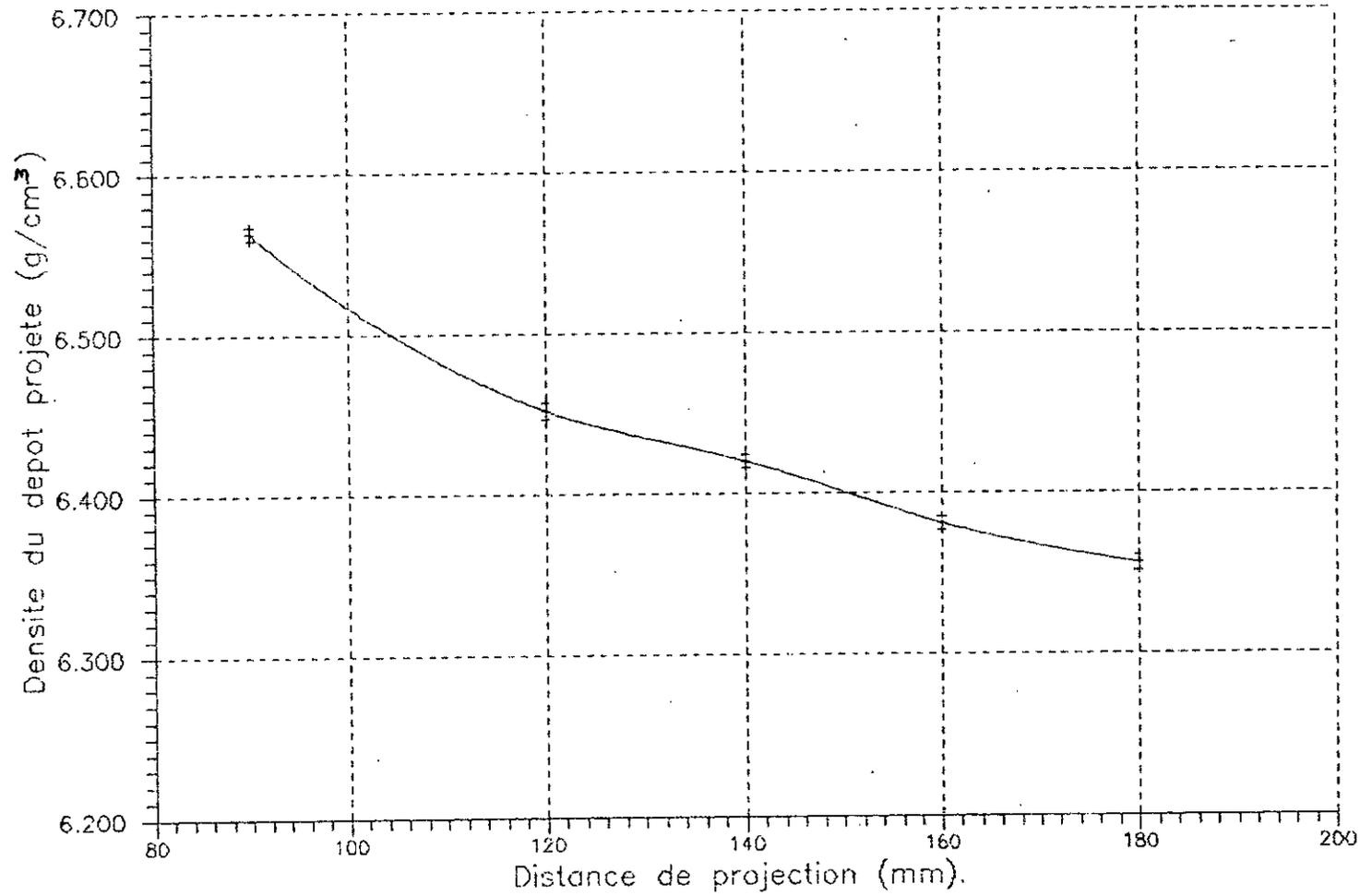


Fig 27: Evolution de la densité (g/cm³) du dépôt en fonction de la distance de projection (mm)

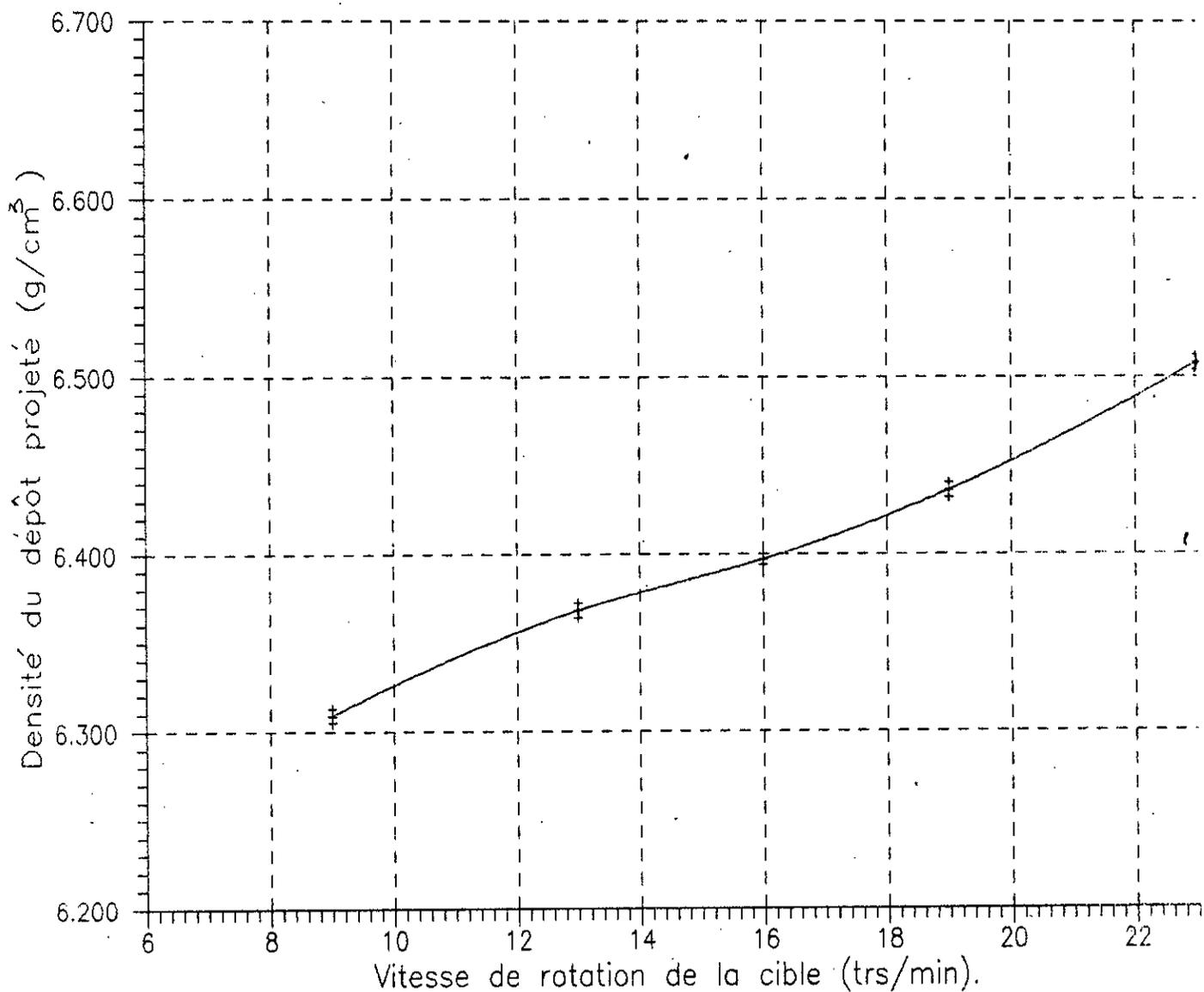


Fig 2.8 : Evolution de la densité du dépôt projeté (g/cm^3) en fonction de la vitesse de la cible (trs/min).

échantillons réalisés avec les paramètres optimaux, des essais de perte de masse par abrasion en fonction du temps.

Ces essais ont été effectués sur une machine d'usure, dont le principe de fonctionnement consiste à fixer l'échantillon sur l'une des extrémités d'une tige, et sur l'autre un poids de 1kg qui permet de mettre l'échantillon en contact avec un cylindre tournant à une vitesse de 500trs/min. Un réservoir placé juste au dessus de l'échantillon permet de débiter des particules abrasives servant de troisième corps. Les éprouvettes ont été pesées avant et après chaque essais.

La durée de cet essai d'usure est d'une heure pour chaque échantillon.

Les résultats des essais sont présentés sur le tableau IV.

Il ressort de cette étude comparative d'usure, que le dépôt projeté à une distance $d = 140\text{mm}$ (distance à recommander) et à une vitesse de 16trs/min (vitesse utilisée à l'entreprise ALGERIE METALLISATION), présente la meilleure tenue à l'usure du fait que la perte de masse enregistrée est la moins importante. Ceci peut être expliqué par le fait qu'avec ces paramètres de projection, le revêtement réalisé présente un meilleur compromis entre la porosité et le taux d'oxyde, dû à un parfait étalement et une très bonne cohésion des particules du dépôt (voir fig. 12).

Les résultats obtenus par ce simple essai de perte de masse sont assez satisfaisants du fait qu'ils confirment les études métallographiques, cependant une simulation sur un banc d'essai d'usure est à recommander.

IV.7- Influence de la sous-couche d'accrochage sur les caractéristiques du dépôt :

Afin de voir l'influence de la sous-couche d'accrochage, nous avons jugé utile de faire une étude comparative entre deux échantillons A et B de même forme et dimensions que les précédents, mais l'échantillon B a été réalisé sans sous-couche d'accrochage.

Echantillon	Conditions de métallisation	Masse initiale (g)	Masse finale (g)	Perte de masse (g)
1	d = 160mm V = 16tr/min	35.3500	34.7685	0.5815
2	d = 140mm V = 16tr/min	48.6119	48.3740	0.2379
3	d = 160mm V = 19tr/min	42.3559	41.8930	0.4629
4	Métal de base	27.5900	27.2014	0.3886

TAB IV : Perte de masse en fonction du temps.

Les paramètres de projection sont ceux utilisés à l'entreprise ALGERIE METALLISATION à savoir :

- distance de projection = 160 mm
- vitesse de la cible = 16 trs/min
- pression d'air dans la buse de projection = 3 bars
- pression d'air dans le moteur = 3,8 bars
- tension du générateur = 30 V
- intensité de courant = 100 A

IV.7.1- Analyse micrographique :

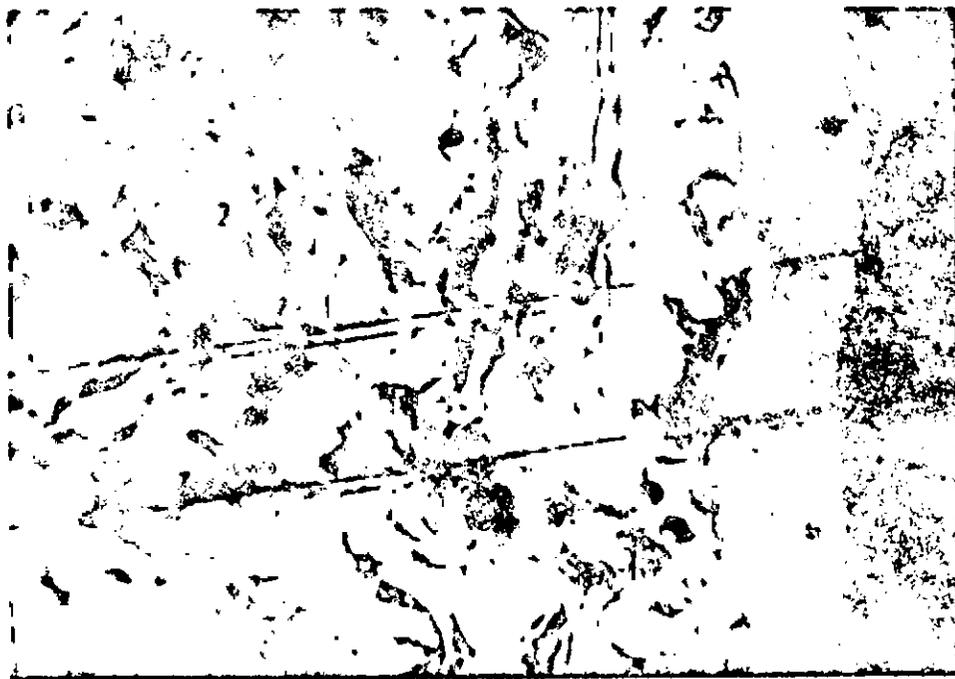
Les photographies 29 et 30 représentent les résultats des observations micrographiques : la photo n°29 montre clairement la présence de pores et de particules non fondues à l'interface dépôt-substrat pour l'échantillon réalisé sans sous-couche d'accrochage. Ceci est évidemment néfaste à l'adhérence du revêtement par effet d'augmentation de la fragilité de l'interface.

La présence des porosités à l'interface est due à un mauvais mouillage du substrat par le métal liquide projeté [20] ; par contre pour l'échantillon (A), d'après la figure 30, on constate que les porosités et les particules non fondues sont pratiquement inexistantes à l'interface dépôt/substrat. Ceci s'explique par le fait que les particules liquides de l'alliage constituant la sous-couche d'accrochage provoquent un excellent mouillage du métal de base.

En conclusion, on peut dire que l'accrochage n'est pas mécanique. Seulement, du fait que le mouillage (lié à la nature relative des matériaux), crée des liaisons fortes entre le matériau déposé et le substrat. Ce phénomène est appelé adhésion thermodynamique [20].

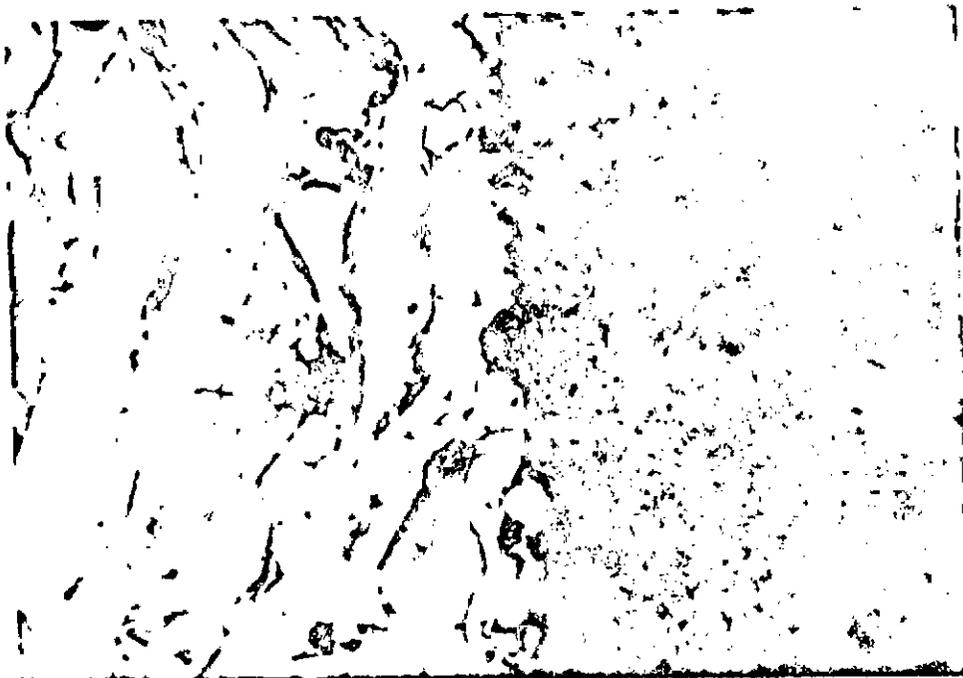
IV.7.2- Essais de dureté :

Les essais de dureté Rockwell (la charge est de 15 kgf) effectué aux voisinages de l'interface nous ont donné les résultats représentés sur la figure 31.



x 200)

Photo N° 29 : échantillon A "Avec sous-couche d'acrylonitrile".



(x 200)

Photo N° 30 : échantillon B "Sans sous-couche d'acrylonitrile".

On remarque que :

- au niveau de l'interface, la dureté de l'échantillon réalisé avec couche-d'accrochage chute. Ceci est dû à la dureté de l'alliage la constituant (Ni - Al) qui est inférieure à celles du métal de base et de dépôt projeté.

- pour chaque échantillon, la dureté augmente en s'approchant de l'interface. Ceci est dû à l'écrouissage provoqué sur chaque couche projeté par l'arrivée des couches suivantes, et à une meilleure cohésion du dépôt.

- la dureté du revêtement avec sous-couche d'accrochage est supérieure à celle du revêtement sans celle-ci. Ceci s'explique par le fait que son absence rend l'échantillon B moins dense du fait de la présence d'un nombre élevé de pores à l'interface.

- au niveau du métal de base, on constate que la présence de la sous-couche d'accrochage pour l'échantillon A cause une légère élévation de la dureté de celui-ci.

IV.7.3- Essais de microdureté :

Afin de voir l'influence de la sous-couche d'accrochage sur la microdureté du dépôt, nous avons effectué des essais de microdureté aux voisinages de l'interface.

Les résultats sont portés sur la figure 32.

On constate que la valeur de la microdureté pour le dépôt réalisé avec couche d'accrochage est légèrement supérieur à celle du dépôt réalisé sans celle-ci. Ceci peut être attribué à un meilleur étalement des particules pour l'échantillon A.

On remarque aussi que la microdureté de l'échantillon A est inférieure à celle de l'échantillon B à l'interface métal/substrat. Ceci s'explique par la valeur de la microdureté de l'alliage constituant la sous-couche d'accrochage.

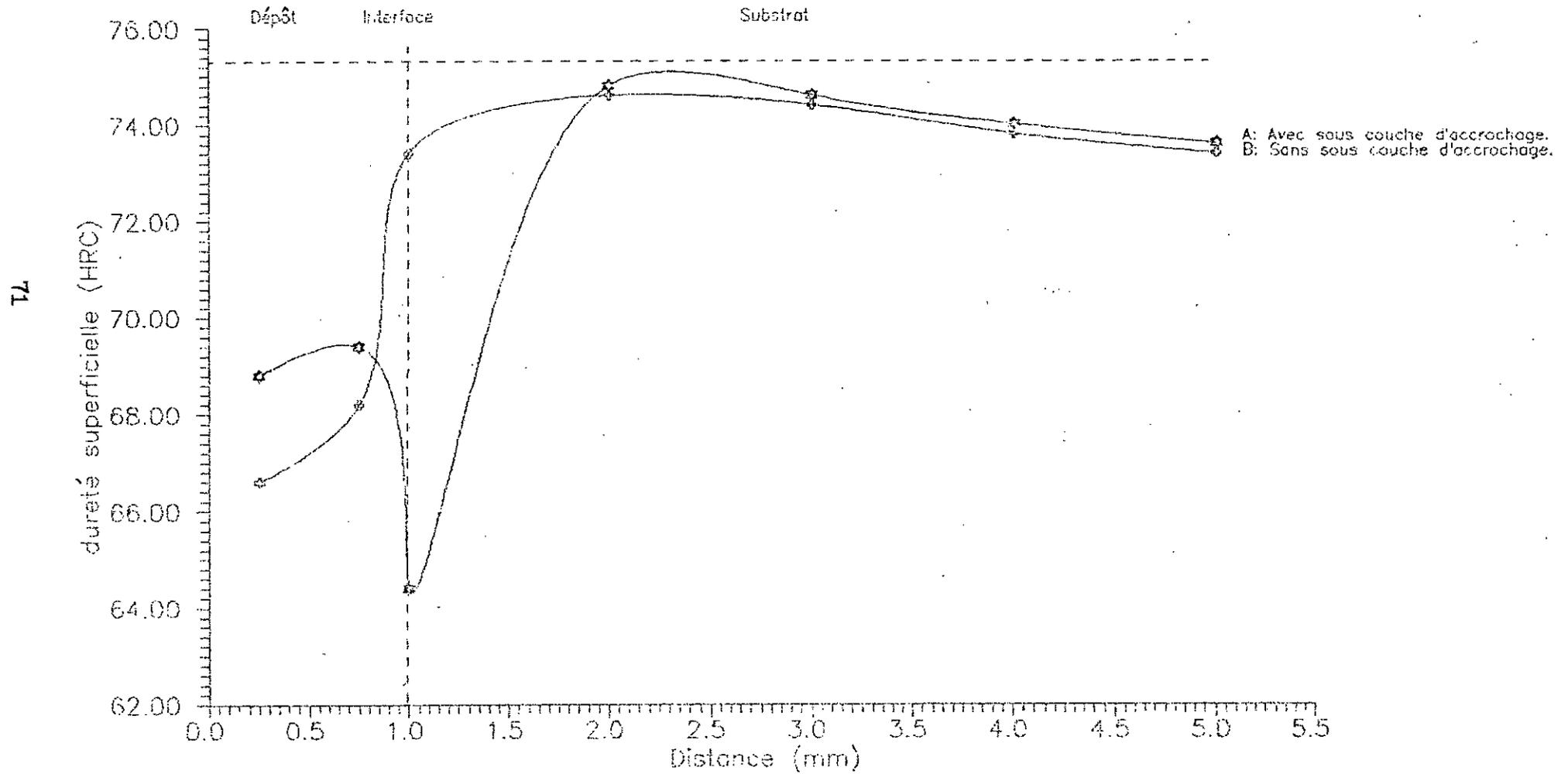


Fig 31: Evolution radiale de la dureté(HRC)
avec et sans sous couche d'accrochage

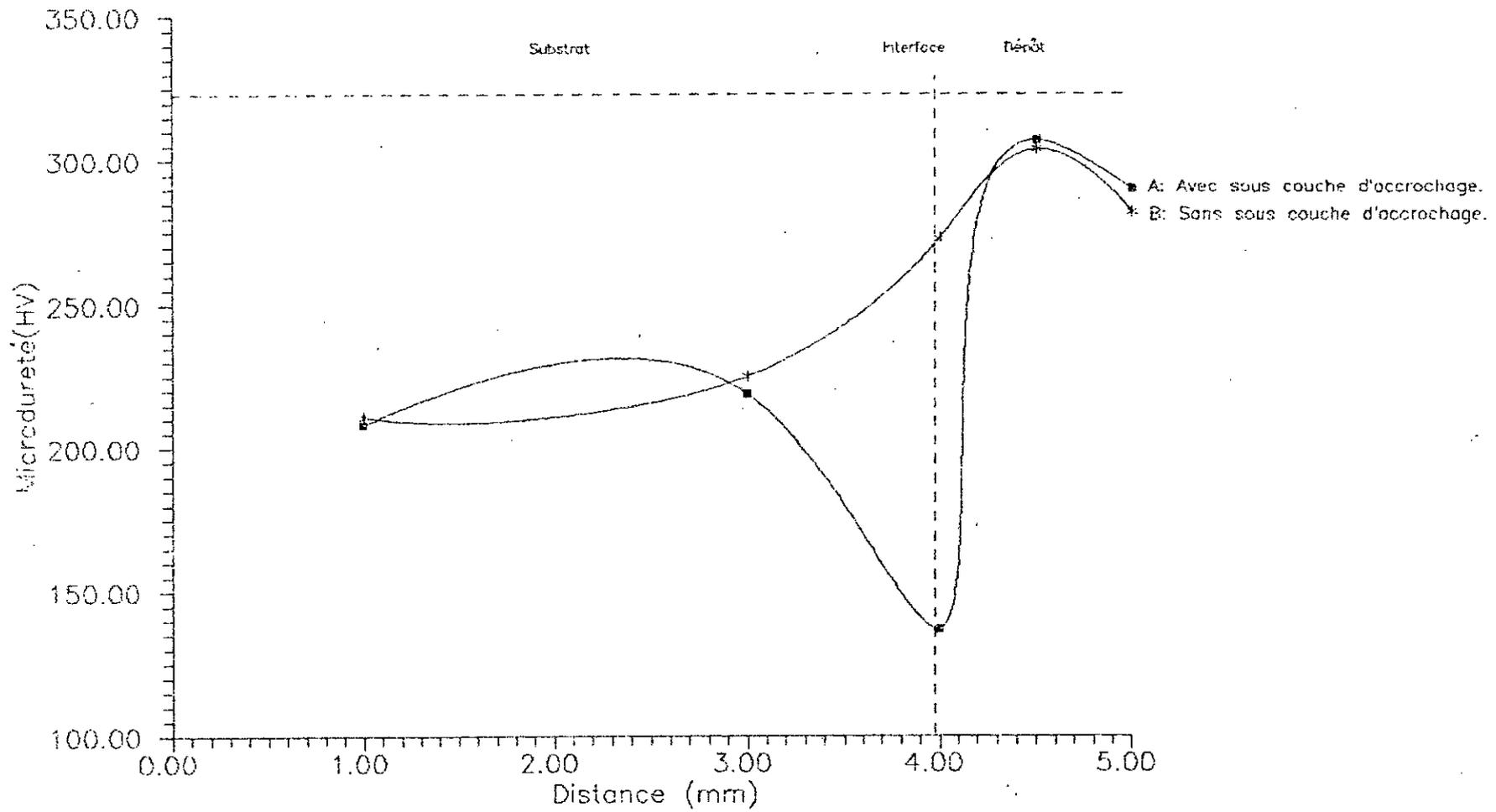


Fig 32 : Evolution de la microdureté (HV) au voisinage de l'interface avec et sans sous couche d'accrochage

IV.7.4- Mesure de la densité :

La mesure de la densité effectuée de la même manière que pour les paramètres de projection, a montré que la densité du revêtement réalisée sans sous-couche [(6.374 ± 0,004)g/cm³] est inférieure à celle du dépôt réalisé avec sous-couche d'accrochage [6.5080 ± 0,005g/cm³]. Ceci s'explique par la porosité élevée surtout à l'interface dépôt/substrat pour le revêtement réalisé sans sous-couche d'accrochage.

En conclusion, les essais de microdureté et de dureté aux voisinages de l'interface, la mesure de densité et surtout les observations micrographiques ont montré que la présence de la sous-couche d'accrochage est indispensable à la tenue du revêtement. A noter qu'il est aussi très important, pour une évaluation quantitative de l'adhérence, de procéder à des essais d'arrachement.

CONCLUSION

Devant l'ampleur que peut causer les problèmes de dégradation des matériaux et des progrès asymptotiques résultant des nombreuses recherches appliquées dans le domaine de la projection, cette étude nous a permis de constater l'importance du revêtement par métallisation dans la récupération des pièces mécaniques.

Cette étude particulière du vilebrequin a montré que la maîtrise des paramètres de projection est d'une importance primordiale dans la conduite du procédé de revêtement et de son influence sur la qualité du dépôt réalisé.

L'analyse physico-chimique et mécanique basée sur l'étude micrographique, de dureté et de microdureté, de densité et d'usure ont montré que :

- l'éloignement excessif de la buse de projection par rapport au substrat confère au dépôt une porosité et un taux d'oxydes élevés conduisant à une mauvaise cohésion des particules. Ceci rend également difficile l'obtention d'un bon état de surface pendant l'usinage de finition ;

- une faible distance de projection, au même titre qu'une faible vitesse de rotation de la pièce causent une mauvaise adhérence et peuvent nuire aux propriétés mécaniques du multimatériau réalisé ;

- conformément à la distance et à la vitesse pratiques à l'entreprise, on a montré que :

pour une vitesse de 16 trs/min, une distance de 140mm et pour la distance de 160mm, une vitesse d 19trs/min réalisent un bon compromis.

- en plus de l'analyse physico-chimique, le test d'usure a permis non seulement de confirmer les deux résultats précédents, mais de recommander celui où l'on utilise une vitesse de 16trs/min avec une distance de 140mm ;

- l'analyse du revêtement réalisé avec ~~et~~ sans sous-couche d'accrochage a montré que la liaison entre le métal de base et le dépôt est tributaire d'un accrochage mécanique et métallurgique simultané.

Par ce modeste travail, on a pu montrer l'intérêt de la projection thermique à l'arc électrique et son application pour la rénovation et la récupération des pièces mécaniques.

En dépit des résultats obtenus, cette étude pourrait être complétée par l'analyse d'autres paramètres sur la tenue à l'usure du vilebrequin, sciemment l'influence de post-traitements.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] : MAURIS DUCOS
"Revêtements par projection thermique" M1645 1990
Techniques de l'ingénieur M5
- [2] : J. CAUCHETTIER
"Revêtements par projection de métaux"
- [3] : "Guide pratique de la projection thermique"
CETIM 1989
- [4] : P. CHIGNON and P. FAUCHAIS
"Thermal spraying of ceramics" 1986
- [5] : W.E. BALLARD
"Metal spraying and flame deposition of
ceramics and plastics" 1963
4eme édition, London
- [6] : H. CLAIRE and E. CRAWELL
"Thermal spray coating" page 361 1982
Métal hand book
Vol. 5, Ninth edition
- [7] : Manuel d'entretien du pistolet Arcspray 234
- [8] : "Les lubrifiants moteur : perte par usure et
frottement" 1979
IFP, Paris Technip, page 138
- [9] : C. COLIN
"Les mécanismes de l'usure et du frottement"
Traitement thermique n°208 pages 79-96 1987

- [10]: S. FAYEULE
Thèse de doctorat "modification des mécanismes d'usure par implantation d'ions dans les aciers"
Université Claude BERNARD Lyon 1 1987
- [11]: P. CHAGNON, A. TRONCHE et P. FAURI
"Frottement des dépôts d'Alumine projeté par plasma" 1986
- [12]: Frederic C. NASH
"Technologie automobile"
Trad. Guy Vanbon -Toronto 1983
- [13]: M. DEBOIS
"L'automobile : technologie professionnelle"
Tome I
Nouvele édition Paris : Foucher 1983
- [14]: L. BUTY
"L'attelage des moteurs rapides"
Tome I, pages 221 - 267
Technip 1964
- [15]: L. BUTY
"L'attelage des moteurs rapides"
Tome II, pages 354 - 361
Technip 1964
- [16]: G. LEMASSON, L. BLAIN
"Matériaux de construction mécanique et électrique : désignation, classification, caractéristiques, emplois"
6^e édition Dunod 1976
- [17]: D. TREHEUX, A.B. VANNES
"Traitements de surface et revêtements"
- [18]: B. MALKI
Mémoire de fin d'études d'ingénieur, ENP Juil. 1992
"Etude de la projection thermique sur deux pièces mécaniques d'un moteur Diesel"

[19]: H. HERMAN

"Les revêtements par projection plasma"
Pour la science n°133

Nov. 1988

[20]: D. TREHEUX

"Adherence des dépôts projetés
thermiquement :solution et problème"
Ecole Centrale de Lyon.