

وزارة الجامعات والبحث العلمي  
Ministère aux Universités et de la Recherche Scientifique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

DEPARTEMENT : **METALLURGIE**

**PROJET DE FIN D'ETUDES**

SUJET

**ETUDE et REALISATION d'un REVETEMENT  
par PROJECTION THERMIQUE d'une BIELLE  
d'un MOTEUR DIESEL**

Proposé par :

**N. MESRATI**

Etudié par :

**M. MERZKANE**

Dirigé par :

**N. MESRATI**

PROMOTION  
**juillet 92**

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail .....

A mon regretté père .

A ma mère .

A ma soeur .

A mes frères .

A ma famille et à tous mes amis .

REMERCIEMENTS

Nous exprimons nos vives gratitudees

A monsieur Mesrati de sa precieuse aide dans  
l'accomplissement de ce travail .

Nous tenons aussi à remercier :

Monsieur Harimi Med

Monsieur Souami

Monsieur Fodil

qui nous ont aidé de leurs mieux , ainsi que tous ceux qui  
ont contribué à notre formation et à la réalisation de ce  
modeste travail .

SOMMAIRE

	Page
I- INTRODUCTION .....	1
II- ETUDE DE L'USURE .....	3
II.1- Description .....	3
II.2- Mécanisme d'usure .....	4
II.3- Analyse de l'usure .....	9
II.4- Place de la projection thermique parmi les traitements de surfaces .....	10
III- LA PROJECTION THERMIQUE .....	12
III.1- Introduction .....	12
III.2- Principe de la projection thermique .....	12
III.3- Choix d'une solution de métallisation .....	13
III.4- Equipements de projections thermique et principe d'utilisation .....	14
III.5- Méthode de réalisation .....	19
III.6- Contrôle de qualité .....	20
III.7- Caractéristiques des matériaux projetés .....	22
IV- PROCÉDE DE METALLISATION .....	24
IV.1- Choix du procédé .....	24
IV.2- Principe de revêtement par le procédé Eutalloy..	25
IV.3- Etapes de la projection thermique .....	27
V- POSITION DU PROBLEME .....	33
V.1- Etude du fonctionnement de la bielle .....	33
V.2- Caractérisation des matériaux utilisés .....	35
V.3- Préparation des échantillons .....	37
V.4- Procédure et technique du revêtement .....	41
V.5- Paramètres de projection .....	43
V.6- Structure du revêtement .....	46
VI- CONTROLE DE QUALITE DU REVETEMENT .....	48
VI.1- Essais de dureté .....	48

VI.2- Essais de microdureté .....	60
VII- INFLUENCE DES TRAITEMENTS THERMIQUES SUR LE REVETEMENT .....	70
VIII- ESSAI COMPARATIF D'USURE .....	74
* CONCLUSION .....	75

## I- INTRODUCTION :

La mise au rebut prématurée de pièces de machines et d'outils usés est dispendieuse et non seulement sur le plan financier ; pour fabriquer des nouvelles pièces qui remplaceront celles qui ont été jetées, des quantités énormes d'énergie et de ressources naturelles sont nécessaires ainsi que du travail et d'investissements de somme d'argent importantes qui auraient pu être utilisées de manière beaucoup plus productive.

La majeure partie de ces pièces aurait pu être maintenue en service si elles avaient été réparées ou soumises à un entretien préventif , car en générale la durée de fonctionnement et la fiabilité des mécanismes sont limitées par phénomènes d'usure , dûs au frottement solide ou fluide des surfaces métalliques , ce qui a conduit à trouver des solutions économiquement viables qui permettent de prolonger la durée de vie des pièces de machines ( de 50 % à 500 % parfois ) .

Depuis que le docteur ingénieur suisse Schoop à découvert le procédé de projection thermique , d'immenses recherches ont été entreprises pour améliorer le champ d'action de la métallisation , et produire des alliages sous forme de poudre ou de baguette possédant des propriétés permettant d'apporter sur une pièce neuve ou usée un revêtement de protection dont les caractéristiques de résistance au phénomène d'usure sont nettement supérieures à celles du métal de base .

Cependant , le choix du procédés et du produit les plus adéquats à l'application nécessite une étude du comportement du revêtement sur le substrat , vis à vis des sollicitations mécaniques et tribologiques dans les mêmes conditions de travail de la pièce .

Le but de ce travail consiste à étudier l'adhérence du dépôt , sa dureté , son influence sur le métal de base , et

son comportement sous l'effet des différents traitements thermiques , ainsi que l'influence des paramètres de projection sur les propriétés de ce dépôt .

Le revêtement de la bielle fourchue usée pris comme sujet , représente une étude qualitative qui permet de choisir le pistolet à poudre convenable et la poudre correspondante. Suivant le mécanisme d'usure que la bielle subit pendant son fonctionnement , elle permet aussi de voir la faisabilité du dépôt et sa fiabilité en contrôlant la qualité du dépôt obtenue par projection thermique .

## II- ETUDE DE L'USURE :

### II.1- DESCRIPTION :

Le phénomène d'usure est défini comme étant la perte de matière solide subie par une surface frottante et relevant de plusieurs facteurs tels que :

- Mode de contact : Ponctuels , lineaires , surfaciques .
- L'ambiance : Nature du milieu , pression , températures.
- Nature des matériaux : Composition chimique , structures métallurgiques , propriétés mécaniques du métal .
- L'état de surface géométrique : Défauts géométriques pendant l'usure , on observe les phénomènes suivants :
  - Résistances au déplacement : Coefficient de frottement en fonction du temps .
  - Vibration : Dûe au contact entre deux matériaux .
  - Phénomènes thermiques : Température de la zone de contact .
  - Transformations géométriques : Amélioration de la surface micro-géométrique sous l'effet de la charge et du frottement .
  - Transformations mécaniques : Ecrouissage , changements de composition chimiques , destruction des grains .
  - Variation de masse : Perte de masses en fonction du temps .l'usure se subdivise en trois parties :
    - Usure rapide .
    - Usure normale .
    - Usure destructive .

Cette troisième partie cause l'endommagement de la pièce , qui la rend hors d'usage , cette destruction est due à des phénomènes isolés ou simultanés et on y remédier soit :

- Par prévention , contrôler la structure de la pièce par traitement thermique , et le milieu de travail de la pièce .
- Par récupération de la pièce endommagée : application des traitements de surfaces .

Il existe pour cela plusieurs procédés qui permettent de récupérer ces pièces , mais la technique la plus utilisée et

la plus facile à travailler est la projection thermique qui est arrivée à atteindre un niveau d'efficacité et de rentabilité très élevée .

Cependant l'étude des mécanismes d'usure est nécessaire pour donner une solution convenable au type d'usure existant qui se manifeste lors du fonctionnement de la pièce à revêtir.

## II.2- MECANISMES D'USURE :

### II.2.1- Usure adhésive :

C'est le type d'usure le plus fondamental , il est dû au cisaillement par frottement des micro-soudures ou jonctions qui se forment entre deux aspérités en contact direct métal/métal . L'énergie thermique dissipée par frottement et les fortes pressions ponctuelles suffisent pour provoquer un écoulement plastique localisé du métal et soudé les aspérités en contacte sous deux formes :

- Soudures chaudes accompagnée d'une interdiffusion et d'une recristallisation des matériaux près de l'interface .

- Soudure froides : Jonction due à l'adhésion des métaux à basses températures .

#### a- Aspect visuels de l'usure adhésive :

L'observation visuelle d'une usure adhésive se traduit par l'aspect caractéristique dû à l'arrachement de micro-soudures les dommages causés par l'usure sont :

- Grippage , né du contact brutale de deux surfaces métalliques .

- Le rayage adhésif causé par la présence d'une soudure en phase solide entre les surfaces frottantes , sans fusion locale de surface .

- Le rayage léger (ou griffage) crée par formation d'une rayure dans la direction du glissement , c'est une détérioration mineure d'origine soit , adhésive ou abrasive ou les deux à la fois .

b- Aspects métallurgiques de l'usure adhésive :

Des études ont démontré que la résistance adhésive des métaux frottants sur l'acier augmente lorsque leurs températures de fusion diminuent .

\* Comportement des aciers :

-Les aciers au carbone , à l'état recuit sont moins sujets à l'usure adhésive que les aciers austénitiques ou le fer pur . En effet la structure perlitique des aciers limiterait l'adhésion , la soudure aura lieu seulement dans la phase ferrite ou dans la phase austénite ce qui explique que l'augmentation de la teneur en carbone a pour effet de réduire la ferrite et d'augmenter la dureté .

-La présence des carbures métalliques dans un acier de dureté élevée augmente la résistance à l'usure , ainsi que les éléments d'addition C, Cr, V, Nb, W et surtout le Molybdène par leurs effets sur l'affinage du grain et sur le durcissement structural de la matrice . Par contre , la formation de composés intermétalliques , telque  $Fe_2Mo$  N'est pas recommandé .

-L'austénite résiduelle , produite par des fortes températures de trempe est néfaste , tandis que la trempe isotherme est benifique .

c- Lutte contre l'usure adhésive :

- On peut combattre ce type d'usure en utilisant des couples de matériaux possédant de faibles interactions , donc une énergie d'adhérence  $W_{ad}$  faible , c.a.d des matériaux ne donnant pas lieu à des soudures en phases solides telque : bronze-acier , chrome-fonte , .....etc .

- On peut aussi utiliser des matériaux durs à fin de diminuer à la fois le taux d'usure et la grosseur des particules d'usure , c'est ainsi que l'on peut utiliser les aciers trempés , cémentés , nitrurés ou des revêtements de chrome dur , carbure .....

- Il est aussi intéressant d'interposer entre les deux matériaux antagonistes un film autolubrifiant à faible résistance au cisaillement qui peut être constitué d'un métal mou (pb , Sn , Cu ....) déposé en très faible épaisseur sur un substrat très dur .

#### II.2.2- Usure abrasive :

Ce type d'usure est défini comme étant l'usure par déplacement de matière produite par des particules dures , ces particules peuvent se trouver entre les deux surfaces en mouvement relatif ou être encastrées dans l'une des surfaces, une telle usure se manifeste par des polissages , des griffures , des arrachements de copeaux , les conditions d'obtention de l'abrasion sont :

- Les particules abrasives doivent être plus dures que la surface abrasée .

- Les particules doivent avoir des coins ou des angles aigus et être conventionnellement orientées .

On distingue deux processus d'abrasion des surfaces :

- Abrasion à deux corps ; par des particules dures d'une des deux surfaces en contact sur l'autre plus tendre .

- Abrasion à 3 corps ; par des particules dures véhiculées entre les deux surfaces en contact , encastrées dans la plus tendre .

a- Aspects visuels de l'usure abrasive :

L'abrasion tend à produire des modifications marquées dans la structure et l'orientation des couches superficielles pour les métaux , la surface abrasée est semblable à celle produite par laminage . Les surfaces soumises à l'abrasion présentent des sillons dans le sens du glissement qui peuvent aller de la rayure légère au sillon profond de chariotage .

b- Aspects métallurgiques de l'usure abrasive :

La résistance à l'abrasion des aciers au carbone et des aciers faiblement alliés augmente avec la teneur en carbone indépendamment de celle de l'élément d'alliage , ainsi pour un

acier constitué uniquement de ferrite et de cémentite , la résistance à l'usure croit proportionnellement avec la teneur en cémentite .

Les aciers hypo-eutectoides résistent bien à l'abrasion qui augmente avec la teneur en perlite .

\* Influence des traitements thermiques :

-La trempe classique augmente la résistance à l'usure , alors que le revenu la diminue .

- Le durcissement par écrouissage préalable des aciers reconduit à aucune amélioration de leur résistance à l'usure.

- Pour les aciers faiblement alliés , la résistance à l'abrasion n'est améliorée que pour les éléments donnant lieu à des carbures dispersables dans la ferrite .L'addition d'une faible teneur en manganèse , améliore la résistance à l'usure d'une structure perlitique , mais abaisse celle d'une structure martensitique .

- La résistance à l'abrasion des aciers fortement alliés augmente avec la teneur en carbure , la meilleure structure étant constituée par une structure martensitique contenant un peu d'austenite résiduelle , par contre les aciers austénitiques et les aciers inoxydables ne possèdent pas une résistance à l'abrasion très élevée .

- L'acier le plus résistant à l'abrasion sous très fortes charges est l'acier austénitique à 12% de Mn .

c- Lutttes contre l'usure abrasive :

On peut combattre l'usure abrasive on opérant comme suite:

- Empêcher les particules abrasives d'arriver jusqu'aux surfaces des frottements par :

\* Une bonne étanchéité des organes et mécanismes .

\* Usinage approprié des états de surface qui élimine les aspérités aigüés .

- Utiliser des artifices pour neutraliser les particules abrasives au niveau des surfaces de frottement .

- Ménager des sculptures creuses sur les surfaces pour retenir les grains abrasifs .

### II.2.3- Usure corrosive :

Elle est définie comme un processus d'usure dominé par une réaction chimique ou électrochimique avec les milieux environnant . Cette forme d'usure qui a été peu étudiée , est en générale modérée , elle peut cependant devenir très prononcée surtout avec des températures élevées ou dans des atmosphères humides .

C'est l'enlèvement par frottement mécanique des produits de réaction formés par attaques chimiques des surfaces métalliques par des agents corrosifs contenus dans l'ambiance ou formés dans le lubrifiant , l'usure corrosive passe par deux stades .

1<sup>er</sup> stade : Les surfaces sont soumises à une attaque corrosive dont la vitesse peut présenter deux allures :

\* La vitesse est initialement rapide puis diminue avec le temps avec formation d'un film cohérent plus ou moins protecteur .

\* L'attaque chimique garde une vitesse de réaction constante .

2<sup>eme</sup> stade : Consiste à enlever par frottement les produits de réaction des surfaces .

### II.2.4- Usure par fatigue :

Ce type d'usure est dû à des charges trop fortes pouvant détériorer les surfaces , on peut observer des déformations plastiques sur les matériaux ductiles et des cassures sur les métaux fragiles .

Pour lutter contre ce type d'usure , on opère plus dans la métallurgie des surfaces que dans le choix de lubrifiant . Les matériaux résistant à la fatigue et les traitements thermiques appropriés (telque la trempe superficielle , cémentation , ..... ) améliorent la résistance à la fatigue . Les aciers contenant l'austenite résiduelle et les carbures précipités sont néfastes dans le cas de la résistance à l'usure par fatigue .

### II.2.5- Autres types d'usure :

Il existe d'autres types d'usure moins importantes que les mécanismes d'usure précédant on a :

- Usure d'origine électrique .
- Usure érosive .
- L'érosion par cavitation .

### II.3- ANALYSE DE L'USURE :

L'analyse des principales formes d'usure des surfaces devrait rendre un diagnostic sur l'origine des détériorations examinées sur une surface usée et de proposer des remèdes destinés à lutter contre une usure ultérieure .

Très souvent les surfaces détériorées portent les traces juxtaposées de plusieurs formes d'usure . Ainsi pour savoir quel est le ou les phénomènes impliqués dans la détérioration . On procède comme suite :

1- sélection des types d'usure possibles rencontrés sur la pièce considérée en fonction de son utilisation dans un organe mécanique donné .

2- Relever des empreintes à l'oeil nu , ou mieux à l'aide d'une loupe ou d'un petit microscope , en évitant d'observer les surfaces à fort grossissement dépassant 200 .

3- Recherche des indices pouvant orienter l'enquête .

4- Recherche des mobiles ou les causes d'usure possibles (mauvaise utilisation de matériel , mauvaise préconisation du lubrifiant , surcharge possible , survitesse , vibration,...)

5- Comparaison de la forme d'usure relevée des cas connus , cette façon de procéder par analogie se fera en premier lieu grâce à l'expérience et l'observation , et en second lieu à l'aide de manuels spécialisés donnant des définitions précises et présentant de nombreux exemples photographiques .

6- Diagnostic et proposition des remèdes :

Suivant ce diagnostic , on peut trancher dans le choix de solution au problème d'usure existant et le type de traitement de surface approprié . En générale la

projection thermique propose des revêtements résistant à l'abrasion, d'autres résistant à la corrosion, ce qui oblige à choisir le type de revêtement suivant l'état d'usure du mécanisme.

#### II.4- PLACE DE LA PROJECTION THERMIQUE PARMIS LES TRAITEMENTS DE SURFACES : ( Choix de solution Anti-usure )

Lorsqu'un organe de machine doit faire face à des sollicitations particulières, il est souvent fait appel aux traitements de surface qui permettent de résoudre les problèmes d'usure de façon économiquement viables. Pour choisir la solution optimale, il est nécessaire de mettre en considération les techniques les plus utilisées.

##### a) *Dépôts réalisés par des solutions :*

Les dépôts réalisés par voie électrolytique présentent :

- Un bel aspect de surface.
- Des épaisseurs déposées allant de la fraction de  $\mu\text{m}$  à des épaisseurs faibles par rapport à la projection thermique.
- La vitesse de déposition relativement faible de l'ordre de  $15 \mu\text{m/hr}$  pour le chrome, et  $60 \mu\text{m/hr}$  pour le cuivre.
- Bonne adhérence, l'uniformité du dépôt est fonction de la forme de la pièce.

##### b) *Dépôts physiques en phase vapeur : P.V.D*

Constitués de trois procédés de base : évacuation, dépôt ionique, pulvérisation cathodique, ces dépôts donnent :

- Une grande variété de dépôt possible à des températures faibles ou modérées.
- Un bel aspect de surface de type poli-glace.

Inconvénients du procédé P.V.D sont :

- Les installations du traitement sont très chères.
- Vitesse de déposition moins élevée qu'en projection thermique.
- Difficulté de traiter des grandes surfaces.

##### c) *Dépôts chimiques en phases vapeur C.V.D :*

Ce procédé consiste à élever la température de réaction

entre 900°C et 1100°C pour conduire à des déformations et transformations de structure des métaux , les dépôts réalisés présentent :

- Des épaisseurs faibles et une uniformité excellente .
- Une bonne adhérence , grace à la diffusion métal/dépôt .
- Une dureté élevée ( 2000 à 3000 Hv ) .

L'inconvénient de ce procédé est la diminution de l'adhérence du dépôt avec une vitesse de déposition élevée , et une température de réaction faible .

d) Autres techniques de dépôt :

Rechargement par soudage : Celui-ci permet la réalisation des dépôts épais qui présentent une très bonne liaison , mais on observe une élévation importante de la température du substrat qui peut conduire à des déformations des pièces au moment du retrait .

Parmi toutes ces techniques de traitement de surface la projection thermique est la technique qui présente le plus de souplesse :

- \* Choix du couple substrat-revêtement .
- \* Choix du procédé .
- \* Une gamme d'application étendue .

### III- LA PROJECTION THERMIQUE :

#### III.1- INTRODUCTION :

L'idée d'obtenir des revêtements par projection a été adoptée par le docteur Schoop en 1909, en commençant par des dépôts des métaux à bas point de fusion tel que le Plomb en le pulvérisant à l'aide d'un fluide chauffé du métal fondu, puis il a amélioré le procédé en projetant le métal sous forme de poudre à travers une flamme oxy-acétylène, puis il remplaça la poudre par un fil métallique en utilisant d'autres sources de chaleur telle que l'emploi de l'arc électrique entre deux fils, et les chalumeaux à plasma.

#### III.2- PRINCIPE DE LA PROJECTION THERMIQUE :

La technique consiste à projeter en fines particules, sur une surface préalablement préparée. Un produit d'apport solide fondu ou ramolli au moyen d'une source de chaleur. La projection se fait par l'intermédiaire d'un matériel utilisant l'énergie de combustion d'un mélange oxy-gaz, ou arc électrique ou jet à plasma, ces particules sont véhiculées à grande vitesse.

- 100 à 200 m/s pour le pistolet à gaz.

- De l'ordre de la vitesse du son pour le pistolet à arc.

Les températures atteintes par les grains de poudre dans ces flammes sont affectées par leur dimension, leur pouvoir émissif et le temps de parcours dans les divers zones, et les particules fondues dans la flamme, sont projetées avec forces sur la surface et s'y écrasent en prenant la forme de l'état de surface du substrat.

La grande variété de matériaux projetables confère à la projection thermique un large domaine d'utilisation :

- Amélioration des propriétés mécaniques des surfaces (frottement usure .....)
- Résolution du problème de corrosion.

- Résolution du problème d'isolation ou de conduction .
- Les revêtements assurent plusieurs fonctions à la fois.

### III.3- CHOIX D'UNE SOLUTION DE METALLISATION :

#### III.3.1- Caractéristique générale des poudres :

La méthode la plus utilisée pour produire des poudres métalliques est l'atomisation par l'eau et par gaz , car l'opération de projection thermique nécessite de fines poudres , vue que la forme des particules et leurs propriétés influent sur la vitesse du dépôt et sur leurs températures lors de la sortie du chalumeau ou pistolet .

Les propriétés des dépôts dépendent de la composition chimique des poudres ce qui a conduit à produire plusieurs types de poudres .

Les principaux groupes de poudres utilisées dans la projection thermique sont :

- Alliages pour revêtements fondus .
- Alliages et métaux résistants à l'oxydation .
- Les céramiques .
- Alliages auto-adhérents .
- Alliages auto-fondants .

#### III.3.2- Comportement des dépôts projetés :

Il existent en générale deux types de revêtements projetés avec refusion , et sans refusion .

a) Revêtements projetés avec refusion :

Les matériaux projetés sont essentiellement à base de Nickel ou Cobalte , qui une fois refondent présentent très peu de porosités mais il reste de structure hétérogène . Cette technique est généralement employée dans la protection contre la corrosion et l'abrasion sévère .

Ces revêtements projetés présentent une dureté pouvant atteindre 60 HRC , et avec l'introduction des carbures au

sein de la matrice Nickel ou Cobalte une dureté ponctuelle plus importante peut être atteinte . Les dépôts présentent une meilleure conductibilité thermique et électrique par rapport au revêtement non fondu , l'épaisseur de la couche varie de 0,5 mm à 8 mm , des états de surface très poussés peuvent être obtenus après usinage à la meule .

b) Revêtements projetés sans refusion :

Ils peuvent être poreux et si nécessaire retiennent les lubrifiants ce qui leur attribue de bonnes qualités de frottement . Les matériaux projetés ont le même coefficient de dilatation que s'ils étaient à l'état massif , sauf dans le cas de forte épaisseur .

Les dépôts sont constitués de particules juxtaposées et liées entre elles ce qui donne une bonne résistance à l'usure mais peu de résistance aux chocs et aux pressions ponctuelles .

### III.4- EQUIPEMENTS DE PROJECTIONS THERMIQUE ET PRINCIPE D'UTILISATION :

#### III.4.1- Projection thermique à la flamme :

a)- Torches à gaz :

IL s'agit d'un chalumeau oxy-gaz équipé d'un petit récipient contenant la poudre qui tombe par gravité et entraînée dans la canalisation de l'un des gaz et amener jusqu'à la flamme puis projetée à faible vitesse sur le support à recharger .

La distance de la buse au support est très faible ( qqe cm au max ) , ce qui fait que la chaleur de la flamme assure à la fois la fusion de la poudre et le chauffage du support , ce qui permet d'assurer la liaison du métal d'abord avec le métal de base sans fondre ce dernier .

Les alliages utilisés avec ce type de matériel sont des alliages dits "auto-fondants" à base de Nickel ou cobalte avec du chrome , W , Bore , Si etc ..... , les duretés des dépôts varient de 15 à 65 HRC . Ils sont destinés à résoudre

les problèmes d'usure de corrosion , d'abrasion et d'oxydation à chaud , ce matériel est largement appliqué pour les revêtements de petite et moyenne dimension .( Fig n° )

b)- Pistolet à poudre :

Il a le même fonctionnement que le précédent ,mais le support n'est pas chauffé pendant la projection et les poudres sont fondues dans la flamme , la distance entre le pistolet et le substrat varie entre 80 et 200 mm ,la liaison entre le dépôt et le substrat peut être purement mécanique , ce qui rend indispensable la préparation de la surface avant projection soit par usinage mécanique , soit par décapage au jet abrasif .

Ce procédé permet de résoudre des problèmes d'abrasion de corrosion , d'usure , d'isolation thermique ou électrique pour les pièces neuves ou usées .( Voir Fig n° 1 . a )

c)- Pistolet à fils :

Le matériau est pris en charge par le mélange fluide comburant-combustible , et projeté par un violent courant d'air comprimé .

Les pistolets projettent pratiquement tous les matériaux tréfilables , métaux et alliages , ainsi que les matériaux les plus utilisés à savoir les métaux d'anti-corrosion tel que Zinc , Aluminium , les dépôts peuvent être accrochés de façon mécanique au support , ce qui oblige à préparer les surfaces à revêtir avant de projeter par décapage au jet abrasif . (Voir Fig n° 1 . b )

d)- Pistolet à détonation :

C'est un chalumeau à poudre et à flamme , monté sur une installation automatique et qui permet de projeter des matériaux à des vitesses nettement supérieures à celles du pistolet à fils (840 m/s) , la projection s'effectue de façon discontinue en utilisant l'énergie d'onde de chocs résultant du mélange gazeux .Elle consiste à introduire la poudre à projeter et le mélange gazeux dans un tube de 25 mm de diamètre et 1m de long , et d'allumer tout le mélange au

moyen d'une étincelle 8 fois par seconde , et vue la grande vitesse de projection , les dépôts sont très adhérents et très dense , les matériaux les plus projetés , sont des carbures de chrome + Ni-Cr , et les carbures de W etc ..... L'épaisseur du revêtement est comprise entre 0,2 et 0,25 mm . ( Voir Fig n° 2 . a )

#### III.4.2- Projection thermique à l'arc électrique :

##### a) Pistolets à arc entre deux fils :

Le principe consiste à faire jaillir un arc entre deux fils , le métal fondu dans l'arc étant ensuite projeté par un jet d'air comprimé , ces pistolets sont intéressants surtout par la quantité horaires du métal projeté et par l'adhérence du dépôt qu'ils permettent à réaliser .

##### b) Pistolets à plasma :

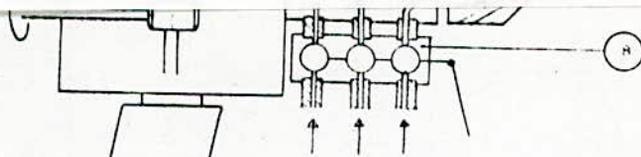
Ce pistolet utilise la décharge d'un arc électrique capable de conduire des courants très intenses entre deux électrodes sous une faible tension , il comporte en générale une cathode en W et une anode en Cu qui est refroidie par une circulation d'eau , l'anode est percée d'un trou servant de tuyère de la colonne plasma où il atteint une vitesse de 900 m/s et une température de 12600°K , pour un mélange Nz/H<sub>2</sub> et une tuyère de 6 mm ( Voir Fig n° 2 . b ) .

#### III.4.3- Autres pistolets :

Il existe d'autres pistolets de projection thermique qui sont moins utilisés industriellement tel que :

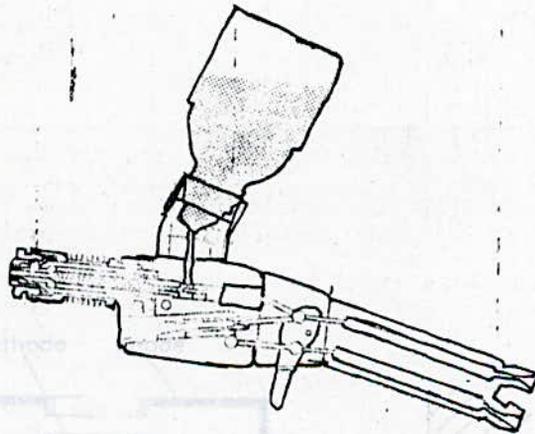
- Plasma à basse pression en atmosphère et température contrôlées , qui permettent de réaliser des revêtements non oxydés , exempte de porosité , et très adhérents .

- Chalumeau supersonique : c'est un jet à combustion interne qui donne des vitesses de gaz hypersonique .



**Fig n°1b : Pistolet à fils**

**Fig n°2a : Pistolet à délamination**



**Fig n°1a : Pistolet à poudre**

**Fig n°2b : Pistolet à plasma**

### III.5- METHODE DE REALISATION :

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

- Préparation de la surface .
- Paramètres de projection .
- Opération de finition .

#### III.5.1- Projection thermique avec refusion :

Le revêtement ne nécessite pas de sous-couches d'accrochage , dans ce type de projection un apport d'énergie calorifique adopté remet en solution l'agglomérat de particules , et porte le support à une température élevée supérieure à 950°C , ce qui a pour conséquence de lier le dépôt au substrat créant ainsi une liaison de type métallurgique .

##### \* Préparation des surfaces :

Les pièces traitées étant portées à températures supérieures à 950°C , leurs caractéristiques mécaniques peuvent se trouver modifiées .

Il est donc nécessaire de prévoir d'éventuelles déformations ou modifications structurales du support , on doit donc :

- Eviter la présence d'angles saillants , zone de rapide montée des températures .
- S'assurer que la masse de la pièce est en rapport avec les moyens de chauffage .
- Eviter au maximum les angles rentrants .
- Eviter les différences de masses importantes dans la zone de revêtement .

#### III.5.2- Projection thermique sans refusion :

##### a) Préparation de surface :

La préparation des surfaces proprement dite a pour but :

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

b) Propreté de surface :

Les pièces doivent être débarrassées des huiles ou graisses provenant des stockages ou des procédés d'usinage à l'aide d'usinage à sec ou d'un produit dégraissant .

c) Rugosité :

Pour obtenir une bonne adhérence , surtout si l'adhérence est purement mécanique , cette géométrie de surface conduit à des dépôts adhérents , elle est obtenus par :

- Traitement par impact ( jet d'abrasif à angle vif ) .
- Préparation mécanique par usinage .

Ces revêtements nécessitent des sous-couches d'accrochage composées en générale de Nickel-Aluminium .

### III.6- CONTROLE DE QUALITE :

Le controle de qualité est une étape nécessaire pour voir la qualité des dépôts projetés , on envisage pour cela trois types de controle :

#### III.6.1- Controle des produits de projection :

Un controle granulométrique de la poudre peut être fait suivant des échelles granulométriques adoptées .

La vitesse d'écoulement est mesurée par le temps mis pour 50g de poudre pour passer à travers un orifice calibré .

La densité apparente de la poudre est donnée par le rapport  $d = m/v$  .

La composition chimique peut être contrôlée par :

- Spectométrie .
- Voie chimique .
- Spectographie .

### III.6.2- Contrôle des paramètres de projection :

L'industrie ne possède pas encore des moyens efficaces non destructifs ce qui rend utile l'étude des paramètres de projection et de contrôler les dépôts obtenus par la projection thermique .

Les principaux paramètres de projection sont :

- Les débits des fluides .
- La vitesse de distribution des poudres .
- La distance de tir .
- L'angle d'incidence .

a) Débits des fluides : Celui-ci a une influence majeure sur les caractéristiques des dépôts , la nature des gaz employés dépend des matériaux projetés , donc les mélanges oxy-gaz doivent être respectés de telle manière à être proches des stoechiométries en favorisant la quantité d'oxygène ou du gaz suivant les produits et les caractéristiques du dépôt à obtenir .

b) Vitesse de distribution des matériaux à projeter : 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 du dépôt .

c) Distance de tir : C'est un paramètre variant de quelque millimètre jusqu'à 250 mm suivant le mode de projection employé , il joue un rôle dans les caractéristiques des dépôts telles que porosité , adhérence , .....

d) Angle d'incidence : La projection sur le support est généralement réalisée avec un angle d'incidence de  $90^\circ$  , afin que le dépôt s'accroche normalement et qu'il soit homogène si cet angle de projection est inférieur à  $45^\circ$  , la porosité du dépôt et la cohésion entre les particules augmentent .

### III.6.3- Contrôle des dépôts obtenus par P.T :

Les revêtements de projection sont soumis à des exigences d'assurance de qualité , et pour étudier les caractéristiques du dépôt , il est inévitable de réaliser des contrôles qui sont destructifs .

a) Mesure de l'adhérence : L'adhérence est une des propriétés les plus importantes de la projection thermique , il n'existe pas de contrôle non destructif , les essais sont réalisés sur des échantillons témoins , plusieurs méthodes peuvent être appliquées

- Un essai d'arrachement consiste à arracher brusquement un ruban adhésif appliqué sur une partie rainurée du dépôt à fin de juger l'adhérence selon le rapport des parties du revêtement restées sur le substrat et celles adhérentes au ruban .

- Un autre test d'arrachement consiste à mesurer la contrainte de rupture de deux éprouvettes cylindriques collées entre elles après avoir revêtu l'une de ces éprouvettes à la section perpendiculaire à la force de traction , et ceci pour déterminer la force d'arrachement du dépôt .

b) Autres mesures : D'autres mesures peuvent être faites pour caractériser la qualité du dépôt obtenue , on a :

- Mesure de dureté et microdureté .
- Mesure du coefficient de frottement .
- Mesure de l'épaisseur .
- Mesure de l'usure .
- Test de corrosion et oxydation .
- Test de fatigue .
- Résistivité électrique .
- Conductivité thermique etc ....

### III.7- CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX PROJETES :

#### III.7.1- Formation et structure d'un revêtement :

Les particules qui sont projetées sur un substrat s'écrasent sur celui-ci , après l'étape de projection les revêtements sont poreux , et après fusion ils se contractent d'environ 20% .

### III.7.2- Structure métallurgique des dépôts :

Ces dépôts sont généralement stratifiés s'ils ne sont pas traités à posteriori suivant les techniques employées . Ils changent de structure et de composition dû à sa grande vitesse de refroidissement pouvant atteindre 1 million de degrés à la seconde , pour dépôt refondu on observe un revêtement homogène qui présente une zone de diffusion à l'interface . Il est assez fréquent de voir le taux de carbone diminué ou le taux d'oxygène augmenté .

### III.7.3- Adhérence :

Après la projection les dépôts adhérents au substrat par un phénomène mécanique qui demande une préparation soignée de la surface à revêtir , les particules en fusion épousent plus ou moins bien la rugosité du substrat .

Pour les revêtements projetés sans refusion , on utilise des sous-couches d'accrochages connues par leurs bonnes valeurs d'adhérence , pour les revêtements projetés avec refusion , on a formation d'une zone de diffusion entre le substrat et le revêtement qui représente un bon moyen au revêtement pour s'adhérer au substrat .

#### IV- PROCÉDE DE METALLISATION :

##### IV.1.- CHOIX DU PROCÉDE :

Suivant la forme de la pièce à revêtir et la facilité d'emploi du pistolet , on choisi l'un des deux procédés existant au sein de la SNTF qui sont le procédé ROTOTEC 80 et le procédé EUTALLOY , ces deux pistolets offrent :

- Une utilisation simple .
- Une grande maniabilité en toute position .
- Une gamme étendue d'application .
- Une sécurité maximale de fonctionnement et de réglage .
- Un entretien minimum et rapide .

##### A- Procédé ROTOTEC 80 (Fig n°1. 2 ) :

Son principe de fonctionnement repose sur une réaction exothermique d'origine physico-chimique sur une surface préparée ( exempte d'oxydes de graisses ou d'humidité ) . Les particules des alliages micropulvérisés de la serie 19000 et 12000 ( suivant la maison Castolin Eutectic ) , sont portée à une température proche de la fusion . La température atteinte par ces particules , lorsqu'elles touchent la surface de la pièce , produit des réactions exothermiques , degageant une quantité de chaleur élevée , suffisante pour porter à fusion les grains de métal de la surface et provoquer un microsoudage . L'opération du revêtement se déroule en deux étapes :

\* Projection d'une couche d'accrochage par la poudre Xuper UltraBond 51000 conçue pour les alliages de la serie 19000 .

\* Projection de l'alliage de revêtement .

Mais l'inconvenion de ce procédé est la forme de la buse du pistolet qui est conçue spécialement pour des pièces rotatives placées dans un tour , ce qui rend son utilisation impossible vue que l'alesage de la bielle ne peut être fixé dans un tour à cause de la dimension de la bielle .

#### B- Procédé EUTALLOY (Fig n° 3.2) :

Le procédé Eutalloy est conçu pour effectuer des revêtements anti-usure permettant la prolongation de la durée de vie des pièces essentielles de machines , le procédé Eutalloy peut être utilisé aussi bien pour la reconstitution d'arêtes fines que des surfaces de moyennes dimensions , ainsi que pour les revêtements de pièces de grande section , il offre une gamme d'application étendue , une utilisation simple dans toutes les positions de soudage et permet d'effectuer des revêtements anti-usure de grande précision grâce aux nombreuses possibilités d'adaptation et de réglage de la torche .

C'est un procédé manuel , qui permet de suivre la forme de la surface pendant le revêtement . Suivant ces caractéristiques , le chalumeau oxy-acétylénique Eutalloy répond au type du pistolet nécessaire pour faire un revêtement sur la bielle fourchue car sa simplicité d'utilisation permet la réalisation d'un dépôt uniforme sur toute la surface de la pièce .

#### IV.2- PRINCIPE DE REVETEMENT PAR PROCEDE EUTALLOY :

##### A- Description du procédé Eutalloy :

Le procédé Eutalloy utilise la flamme oxyacétylénique , l'alliage micropulvérisé passe à travers la flamme , il est porté à une température proche de sa température de fusion déposé à l'état pâteux sur une pièce préchauffée , il est ensuite amené à fusion . La liaison entre le métal de base et le métal d'apport s'effectue par diffusion sans qu'il y ait dilution , donc alteration des caractéristiques du dépôt ou pollution de celui-ci par le métal de base .

##### B- Métaux compatible avec le procédé Eutalloy :

Ce procédé permet le revêtement des principaux métaux pour autant que leur température de fusion soit supérieure à la température de liaison de l'alliage , les éléments des-oxydants présentent dans les alliages Eutalloy (serie 10000)

permettent la réalisation du revêtement sur les aciers , les aciers coulés , les aciers inoxydables au chrome-nickel , les alliages de nickel , les fontes grises à graphite lamellaire et sphéroïdale et certains alliages cuivreux comme dans les autres procédés de soudage . Il est indispensable lors d'une application de tenir compte des modifications métallurgique qui peuvent intervenir . Le métal de base peut être soumis à des modifications structurales , telles que grossissement du grain , phénomène de trempe ,etc.....

Ainsi , il est donc nécessaire d'utiliser les méthodes appropriées de préchauffage et de traitement thermiques , si le métal de base l'exige . Cependant , les dépôts Eutalloy sont sensibles aux refroidissements brusques et doivent être refroidis lentement dans l'amiante ou vermiculite à défaut de ces minerais . Les cendres ou le sable sec conviennent aussi, les dépôts Eutalloy sont insensibles aux traitements thermiques tels que , revenu , cémentation , etc .....

Certains aciers ou aciers inoxydables contiennent des éléments d'alliages qui peuvent rendre délicates l'application du procédé , les éléments d'alliages tel que le Titane (utilisé dans les aciers inoxydables comme stabilisant) et l'aluminium , provoquent rapidement des oxydes qui empêchent la diffusion dans le métal de base . Dans une moindre mesure , le manganèse et le vanadium se comportent de manière identique . Dans ce cas , il est recommandé de veiller très soigneusement à la préparation , au préchauffage et à l'application elle même .

#### C- Principe et fonctionnement du chalumeau Eutalloy :

On règle l'oxygène et l'acétylène séparément au moyen de vannes à pointeau assurant une précision élevée du réglage de la flamme , l'acétylène sécoule dans un circuit séparé et passe à travers une pastille-filtre destinée à empêcher tout retour de flamme lors d'une éventuelle erreur de manipulation l'oxygène pénètre dans un injecteur et provoque une aspiration sur le canal d'entrée de l'alliage micropulvérisé

qui est acheminé ainsi vers le système mélangeur/diffuseur , ce n'est qu'après un mélange homogène entre l'alliage micropulvérisé et le gaz transporteur que le mélange s'effectue avec l'acétylène , l'écoulement de l'alliage micropulvérisé est réglé par une valve d'alimentation actionnée par un levier . Après mélange , le gaz combustible brûle à la sortie de la lance , et l'alliage porté à haute température est projeté sur la pièce .

La puissance de chauffe de la flamme peut être réglée en agissant sur les boutons de réglage des gaz selon le choix de la poudre . Les meilleurs résultats , concernant l'apport thermique , sont obtenus après réglage des pressions , en ajustant la flamme désirée avec les vannes de réglage ouvertes au maximum .

L'Entalloy comprend 3 lances . ( Fig 3 )

- Lance 45 : Pression : Oxygène 2 bar    Acétylène 0,5 bar
- Lance 48 : pression : Oxygène 2 bar    Acétylène 0,5 bar
- Lance 53 : pression : Oxygène 2 bar    Acétylène 0,4 bar

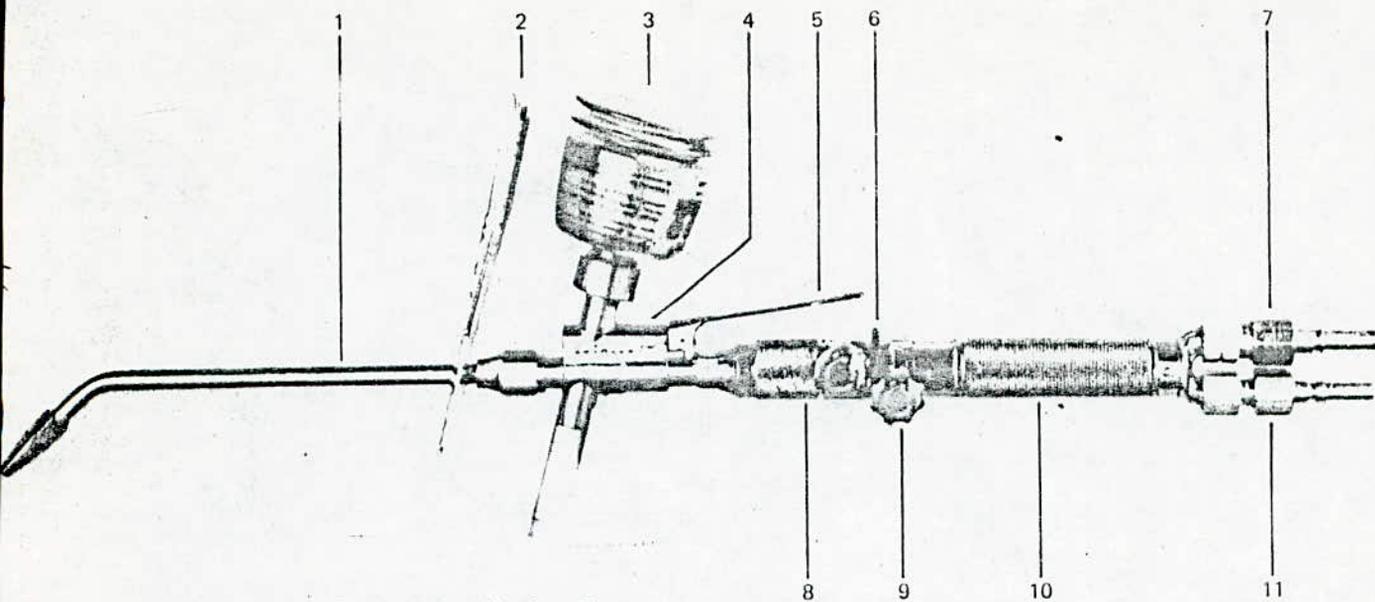
La flamme devra être neutre pour tous les types de poudre du pistolet Eutalloy ( de la serie 10000 ) ( Voir Fig n°3.b)

#### IV.3- ETAPES DE LA PROJECTION THERMIQUE :

##### IV.3.1- Préparation de la surface :

La préparation de la surface est la partie la plus critique de l'ensemble du travail , surtout dans le cas des revêtements qui doivent être fondus . Elle dépend de la nature et la forme de la base de la pièce , et de l'épaisseur du revêtement à appliquer .

Pendant l'opération de projection des tensions prennent naissance dans le revêtement et ces tensions croissent avec l'épaisseur du dépôt déposé et la préparation du revêtement doit être telle qu'elle résiste à ces tensions , et qu'elle maintienne celui-ci en contact intime avec la surface jusqu'à ce que la fusion soit réalisée .



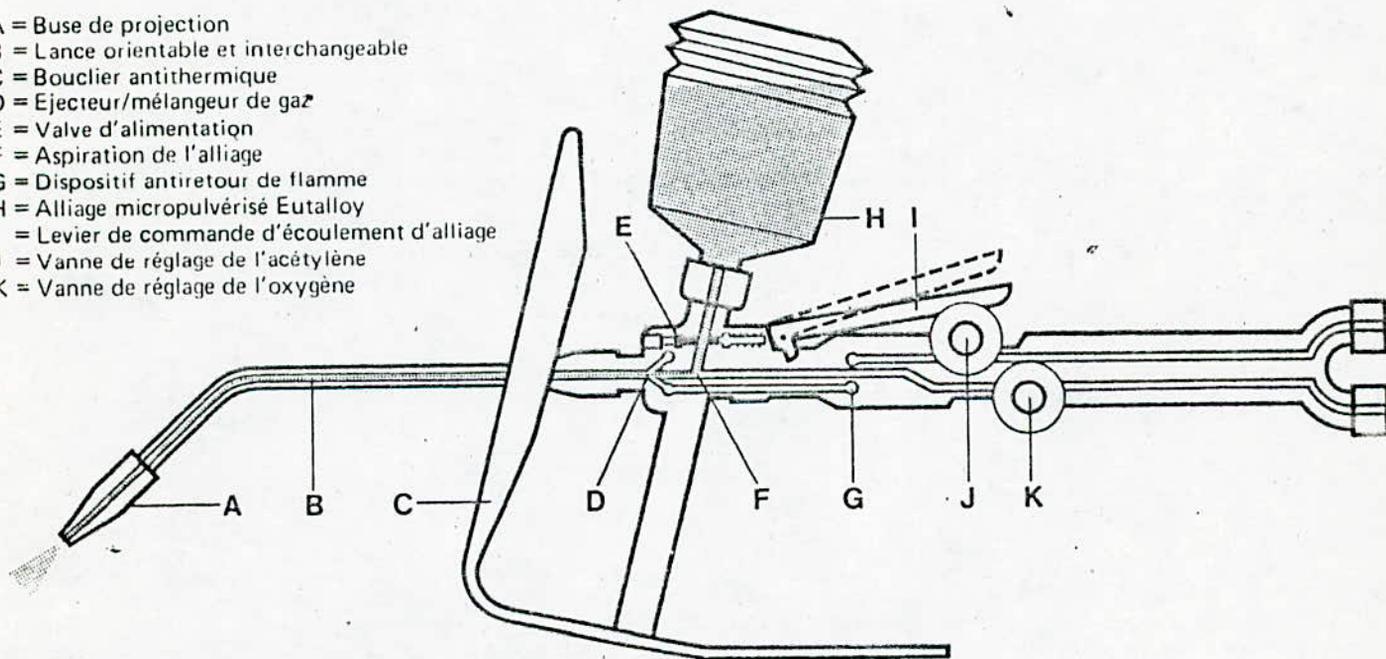
Vue extérieure des chalumeaux Eutalloy, modèles A et B.

a

Fig n°3 : Pistolet EUTALLOY

b

- A = Buse de projection
- B = Lance orientable et interchangeable
- C = Bouclier antithermique
- D = Ejecteur/mélangeur de gaz
- E = Valve d'alimentation
- F = Aspiration de l'alliage
- G = Dispositif antiretour de flamme
- H = Alliage micropulvérisé Eutalloy
- I = Levier de commande d'écoulement d'alliage
- J = Vanne de réglage de l'acétylène
- K = Vanne de réglage de l'oxygène



Principe de fonctionnement des chalumeaux Eutalloy, modèles A et B.

Avant cette préparation , il peut être nécessaire de nettoyer la pièce . L'huile , la graisse ou les autres matières étrangères doivent être enlevées par dégrèvement ou lavage avec des solvants aussi complètement que possible avant passage à la préparation mécanique par l'abrasif , par meulage sans lubrifiant , afin de créer des rugosités pour favoriser l'adhérence mécanique , et de casser les angles vifs pour éviter la surchauffe du métal pour les pièces circulaires on crée des rugosités à l'aide d'un outil qui permet d'obtenir les épaulements nécessaires .

On devra toujours examiner soigneusement les surfaces afin de déceler les fissures qui peuvent exister et pourraient , si elles étaient emprisonnées sous le revêtement crée le décollement rapide .

#### IV.3.2- Préchauffage :

Le préchauffage est toujours considéré comme une partie de la préparation de la surface , il sert à réduire les contraintes dans les revêtements non fondus en soumettant la pièce à une pré-dilatation .

Le préchauffage répond à plusieurs buts :

a) Il évite la condensation de la vapeur d'eau produite d'une flamme oxy-acétylenique car en frappant une surface froide , la vapeur d'eau se condense et la surface est momentanément humide , et on fondant le métal ou l'alliage, le film d'eau est instantanément vaporisé , ceci se traduit par une explosion minuscule mais violente sous la particule et il en résulte que cette particule ne peut pas adhérer convenablement .

b) Les métaux projetés s'accrochent plus fortement aux surfaces chaudes qu'aux surfaces froides , car en général plus la température est élevée plus l'accrochage est fort , cependant un préchauffage trop poussé peut oxyder la surface.

c) Il provoque une dilatation de la base qui favorise l'adhérence du revêtement et évite les criques qui peuvent exister .

d) Pour éviter le risque d'oxydation , le préchauffage exige une flamme neutre , à une distance d'au moins 200 mm .

#### IV.3.3- Technique de projection :

Pour l'application des alliages qui seront ultérieurement soumis à la fusion . La première considération qu'il faut prendre est l'exigence d'adhésion sur la base doit être suffisamment forte pour que le revêtement demeure en contact intime avec la matière de base jusqu'à ce que la fusion soit terminée .

Il faut tenir compte des faits suivants :

- Les alliages utilisés ont des coefficients de dilatation élevés , en conséquence il tendent à se contracter pendant l'application sur les surfaces plates quand le revêtement n'est pas étendu jusqu'aux arrêtes . La contrainte de traction dans le revêtement est appliquée directement au joint d'adhésion , sous la forme d'une contrainte de cisaillement .

L'adhésion sur la base doit être assez forte pour résister à ces contraintes , s'il n'en est pas ainsi , le revêtement se sépare de la surface en laissant un vide à la face de contact . Quand ceci se produit le métal de base tend à s'oxyder au moment où l'on applique la chaleur pour la fusion et le revêtement ne mouillera pas dans celui-ci .

- Afin de ne pas créer un échauffement excessif , il est nécessaire de faire une projection par intermittence .

- Si la pièce est chauffée de manière excessive pendant l'opération de projection , les contraintes du revêtement sont accrues et il y a risque de craquelures ou séparation .

- A l'état brute de projection les alliages sont poreux et à l'état fondu il se comporte d'environ 20% , une tolérance doit être prévue pour ce retrait .

- La vitesse de déplacement doit être assez rapide pour éviter une surchauffe locale .

#### IV.3.4- Technique de fusion :

L'opération de fusion commence pendant que la pièce est encore tiède ou chaude à la suite de l'opération de projection pour deux raisons :

\* Il faut moins de chaleur pour amener la pièce à la température de fusion .

\* Il y a moins de risque de soulèvement du dépôt non fondu pendant son refroidissement consécutif à l'opération de projection . Cependant on peut faire fondre plus efficacement le revêtement d'une pièce quelconque si l'on emploie l'équipement de chauffage convenable , en choisissant la buse convenable , ainsi qu'une flamme douce et neutre avec un débit de gaz correspondant . On maintient la buse fixe jusqu'à ce que le revêtement atteigne le point de fusion facilement reconnu car il prend un éclat brillant quand il fond . Il est important d'éviter l'échauffement excessif qui provoquera des coutures du métal , en pratique , le centre de la flamme est toujours maintenu juste en face de la section fondue , par contre il y a des règles fondamentales qu'il faut observer :

a) Eviter une concentration de chaleur excessive quand on chauffe avant fusion , car si le chalumeau est immédiatement placé près de la surface , le revêtement peut se dilater beaucoup plus vite que la base , et l'accrochage peut être détruit avant que la fusion soit faite .

b) S'assurer que la matière de base est entièrement chauffée à une température voisine du point de fusion du revêtement , afin d'éviter les criques .

c) Eviter d'utiliser une flamme à grande vitesse pour ne pas provoquer une fusion inégale du revêtement .

#### IV.3.5- Refroidissement :

En général un tel revêtement nécessite un refroidissement surtout que celui-ci possède une ductilité faible et un coefficient de dilatation plus élevé que la plupart des aciers sur lesquels on les projette . Il en résulte que des

criques peuvent apparaitre dans le revêtement pendant le refroidissement pour l'une des raisons suivantes :

a) Quand le coefficient de dilatation de la base est plus faible que celui du revêtement .

b) Si le revêtement est refroidi rapidement pendant que le coeur est encore chaud ( encore dilaté ) .

c) S'il existe des changements de structures métallurgiques de la base (transformation martensitique ) en mettant en oeuvre un cycle de refroidissement convenable , il est souvent possible de prévenir ou de supprimer au moins en partie la transformation martensitique , on y arrive en interrompant le refroidissement à partir de la température de fusion et on maintenant la pièce pendant un certain temps dans un milieu (vermiculite , sable sec ,....) qui protège la pièce des courants d'air agités .

#### IV.3.6- Finition :

La finition du dépôt ne pose pas de problème lorsqu'il s'agit des métaux facilement usinables ; dans ce cas un usinage à la lime ou à la machine-outil permet d'obtenir le degré de finition jugé indispensable .

Les dépôts Eutalloy utilisés en tant que revêtement anti-usure n'exigent pas d'usinage de finition vu que les dépôts obtenus sont parfaitement lisses , dans le cas du revêtement des pièces circulaires , l'usinage s'effectue sans difficulté , pour les pièces revêtues , la rectification est aussi possible à l'aide de meules à carbure de silicium .

## V- POSITION DU PROBLEME :

### V.1- ETUDE DU FONCTIONNEMENT DE LA BIELLE :

#### V.1.1- Role - description : ( Fig n° 4 )

La bielle est l'organe de liaison entre piston et vilebrequin , par l'intermédiaire du bras de manivelle du vilebrequin , elle sert à transformer le mouvement circulaire et continue de l'arbre vilebrequin à un mouvement de translation du piston , elle transmet au vilebrequin l'effort reçu par le piston .

La bielle se compose de 3 parties (Voir Figure) : Traversé par l'axe du piston .

- Pied de bielle .
- Corps de bielle .
- Chapeau de bielle qui tourillone sur le maneton .

En règle générale :

- Plus longue est la bielle , mieux elle transmet la force qui lui est appliquée , cette longueur est en générale voisine de 4 fois le rayon du manivelle .
- Plus rapide est la rotation , plus courte doit être la bielle afin de limiter les valeurs des forces d'inertie .

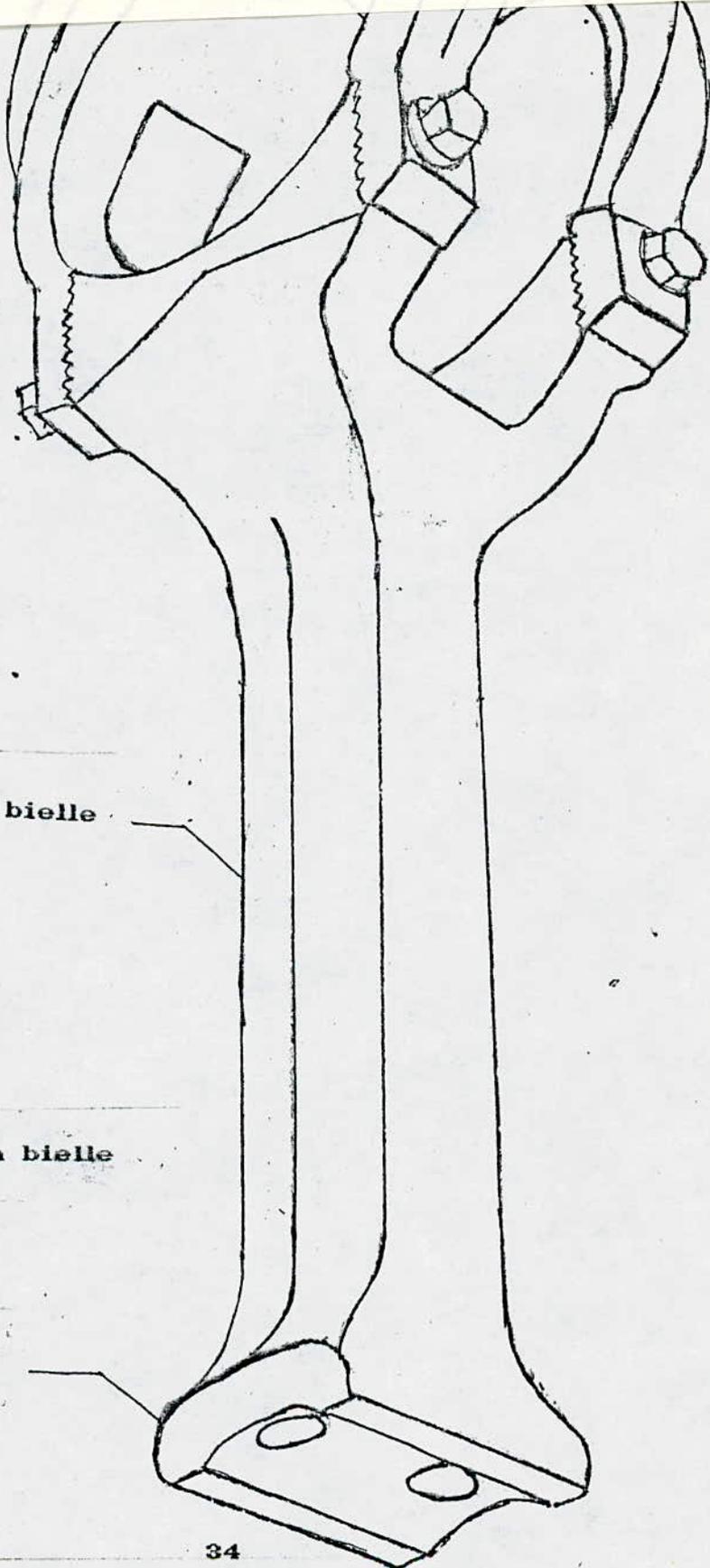
Les efforts exercés à l'articulation sont nés de :

- La combustion .
- Forces d'inertie alternative (piston + pied de bielle)
- Forces d'inertie rotative (tête de bielle) .

#### V.1.2- Tête de bielle fourchue :

La tête de bielle est faite de deux parties et comporte deux demi chapeaux assemblés à la partie inférieure par trois boulons .

La tête de bielle comprend coussinet de bielle , formé par deux demi coussinets supérieur et inférieur , de forme semi-circulaire et possède un dos en acier couvert d'une couche de bronze au plomb pour coussinet et d'une couche de régule sur le pourtour intérieur , le coussinet supérieur possède en plus une surface de portée au centre du pourtour extérieur se composant d'une couche de bronze pour coussinets avec une couche de plomb pur .



Corps de bielle

Fig n°4 : La bielle

Pied de bielle

V.1.3- Verification de l'alésage de la tête de bielle fourche : ( Fig n° 5 )

Après avoir posé le chapeau de bielle et serré les boulons supérieur et inférieur avec des couples de serrage respectif de 238 N.m et 102 N.m , on mesure l'alésage en des points de 60° les uns des autres . la moyenne de ces dimension ne devra pas être supérieure au maximum spécifié .(voir Fig )

Alésage de chapeau de bielle fourchu

Neuf ..... 193,65 - 193,68 mm .

Max ..... 193,70 mm .

La moyenne ne doit pas dépasser 193,70 mm c.a.d 5/100 mm de la bielle neuve .

V.1.4- Traitement de la bielle :

La bielle est forgée à chaud , puis trempée (à l'eau ou l'huile ) ensuite un revenu ramène le cas échéant la dureté superficielle à une valeur favorable à l'usinage .

pour éviter les tapures de forme ou de trempé , l'acier de la bielle doit donc être peu chargé en carbone , faiblement allié et de qualité " acier fin " .

V.2- CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES :

POSITION DU PROBLEME :

Avant tout travail du revêtement appliqué sur le métal du corps de bielle et du chapeau de bielle , il faut tout d'abord étudier le type d'usure rencontré ainsi que la dureté du métal et sa nuance .

Nuance des échantillons

\* Chapeaux de bielle :

Suivant les analyses faites par le diffractomètre , la composition du métal du chapeaux de bielle est : 45M5

(%)	C :	0,403	Mn :	1,472
	S :	0,082	Si :	0,203
	P :	0,005	Cr :	0,032

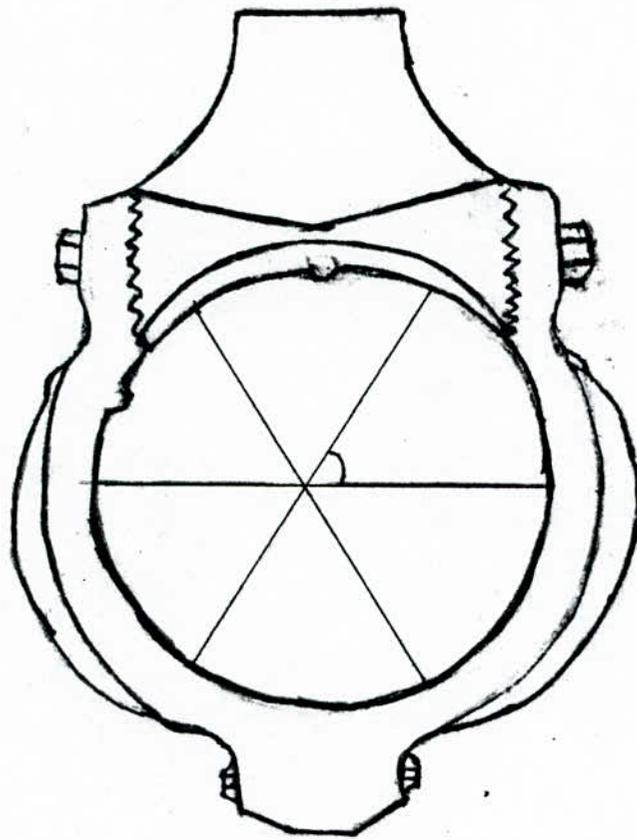


Fig n° 5  
Alésage de La Tête de bielle

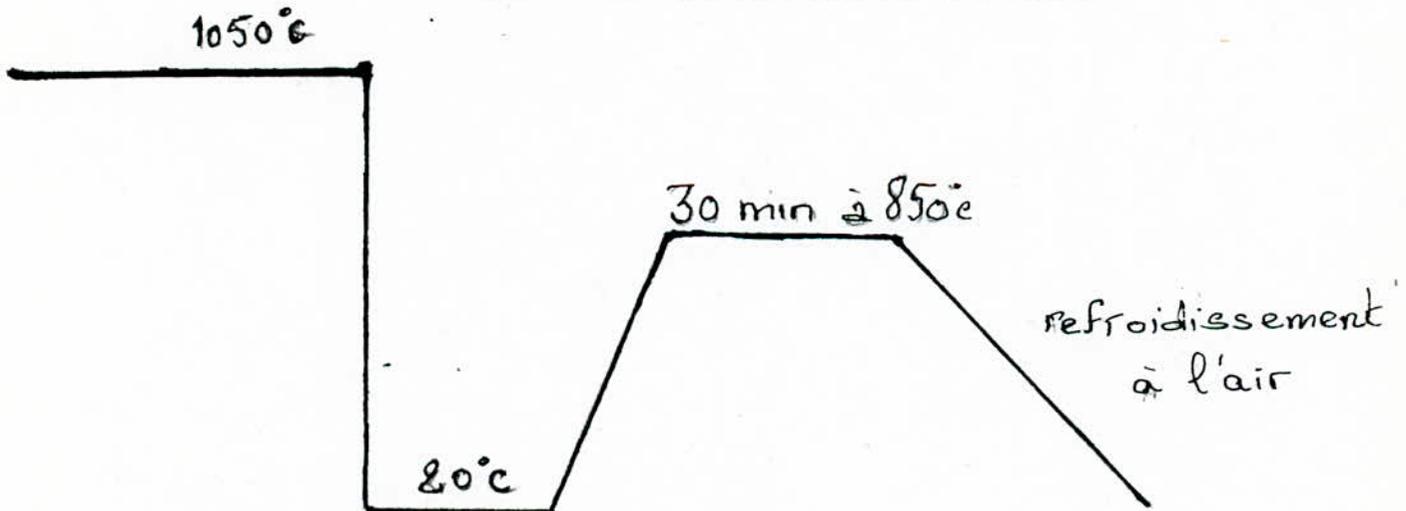


Fig n° 6  
cycle de Traitement de La bielle

\* Corps de bielle :

La composition du métal du corps de bielle est : 38C4

(%)	C :	0,375	Si :	0,185
	S :	0,038	Mn :	0,833
	P :	0,010	Cr :	0,980
	Ni :	0,248	Cu :	0,150

Dureté des échantillons

- Pour le corp de bielle : La dureté est faite pour une charge de 24 HRC équivaut à 260 HB équivaut à 250 HV .

- Pour le chapeau de bielle : La dureté est aussi faite pour une charge de 150 Kgf on a : 35 HRC équivaut à 320 HB équivaut à 360 HV .

- Type d'usure : Pour détecter le type d'usure rencontré dans la bielle , on procède comme suite :

Suivant les conditions d'utilisation particulières , seule l'usure abrasive et adhésive sont possibles , car la corrosion et la fatigue du métal n'ont pas eu lieux et ceci est verifié on observant la surface d'usure qui est l'exemple de debrit d'oxydes .

Dans notre cas la perte de masse est d'ue à l'usure soit abrasive ou adhésive , et pour voir le type d'usure on est amené à l'observation à grossissement de 10 à 50 fois en utilisant une loupe ou un microscope binoculaire à faible grossissement .

On observent sur des échantillons des sillons et des rayures légères dans le sens du mouvement de la bielle , ce qui nous indique que le type d'usure possible est certainement l'usure abrasive .

Pour remedier à ce type d'usure il faut choisir un revêtement possédant la particularité d'être anti-usure et résiste à l'usure abrasive .

V.3- PREPARATION DES ECHANTILLONS :

Le métal de base utilisé dans nos expériences provient d'un chapeau de bielle mis en rebut au niveau de la S.N.T.F .

De cette pièce on a coupé plusieurs échantillons de sections plates de mêmes dimensions .

On a pris deux autres échantillons circulaires de même nuances que le métal du corp de bielle .

La préparation des échantillons se fait en trois étapes :

Première étape :

- On enlève les graisses et les huiles se trouvant sur la pièce par ringage à l'eau , puis à l'aide du trichloroéthylène .

Second étape :

On procède au décapage à l'aide d'une meule pour :

- Eliminer toute trace d'oxyde ou de peinture .
- Créer une rugosité sur la surface à revêtir .
- Eliminer les angles vifs .
- Mettre les angles de raccordement à  $30^\circ$  .

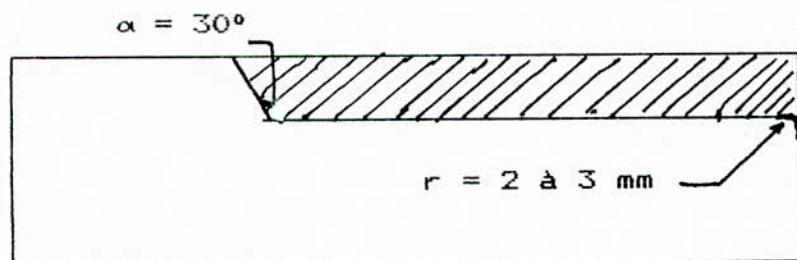


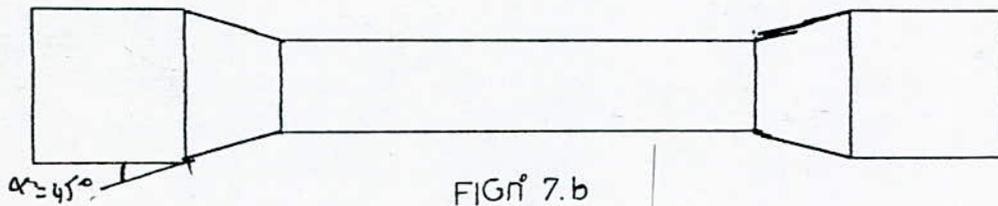
fig n° 7

Pour les pièces circulaire la préparation mécanique se fait par usinage à l'aide de l'outil Roto Tool 1 qui permet d'obtenir les épaulements nécessaires .

\* Poudre utilisée :

Parmis les 4 types de poudres existantes au sein de la S.N.T.F on a choisit la poudre de serie 10009 BOROTEC de composition de base Ni+Cr+B+Si et de dureté variant de 52 à 62 HRC . Cette poudre à de bonnes propriétés de moulage et une excellente résistance à l'usure et à la corrosion , et possède un faible coefficient de frottement ainsi qu'une résistance aux pressions élevées .

Cette poudre fond en donnant une surface brillante et lisse qui nécessite un minimum d'enlèvement de matière . Il est employé pour les aciers , aciersinox et fontes , pour des revêtements minces à moyens ( Tableau n° 1 )



Troisième étape :

- Détecter les microfissures susceptibles d'exister à l'aide de la méthode magnaflux , ou aux ultrasons .
- Protéger les zones voisines de l'emplacement à revêtir par la solution Casto.Mask .

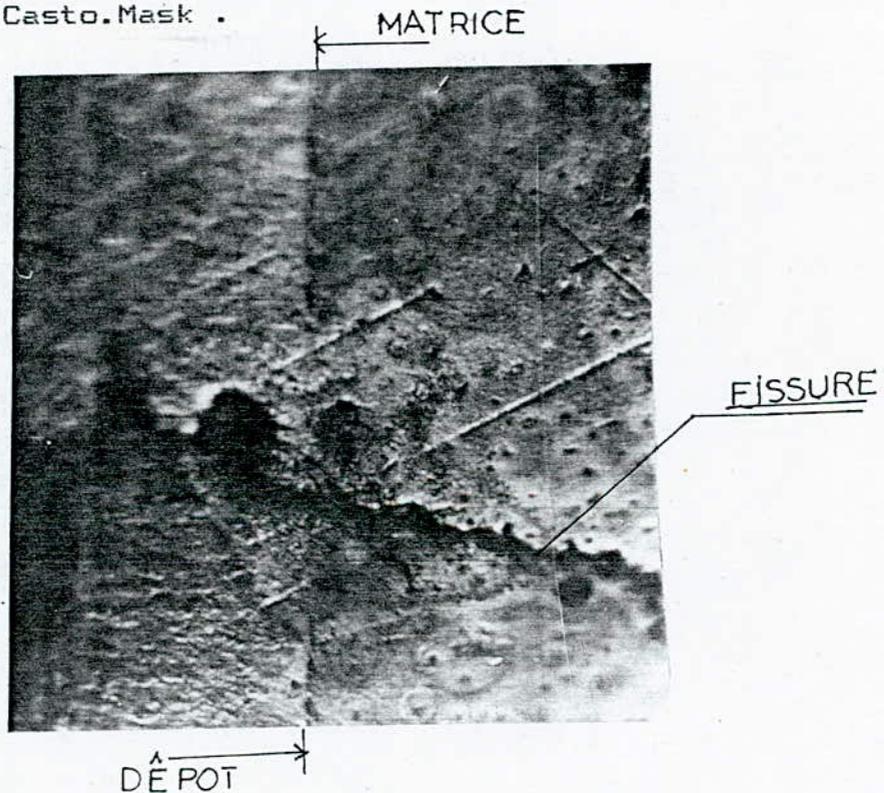


Fig n°8 : Destruction du revêtement sous l'effet des microfissures .

Alliage	Dureté	Composit- de base	caractéris- générale	utilisa- tion
BOROTEC 10009	52 à 62 HRC 620 à 720 HV	Ni + Cr +B + Si	Faible coeff. de Frott. et resist à l'abrasion	* Acier * Acier inox * fonte
Tungtec 10112	57 à 62 HRC 650 à 1000 HV	Ni+cr +B+Si	Haute resistance à l'abra- sion	* Acier * Acier inox * Fonte
Bronzochrome 10185	32 à 42 HRA 360 à 420 HV	Ni+B +Si	Resistance élevée au frottement métal-métal et teneur élevée à la corrosion et à la chaleur	* Acier * Acier inox * Fonte
Nitec 10224	25 à 30 HRC 220 à 270 HV	Ni+B +Si	Excelente accrochage sur fonte et bonne resistance à la corrosion	* pour fonte grise * malle- able ou spher- idale

Tableau n° 4

#### V.4- PROCEDURE ET TECHNIQUE DU REVETEMENT :

Avant de passer au technique d'application , il est nécessaire de préparer la pièce à revêtir soigneusement avant revêtement .

- Tout d'abord il faut éliminer toute les traces de graisses de peinture , d'oxydes , par préparation mécanique à la lime à l'outil de coupe sans lubrification , à la brosse , par meulage ou corindonnage .

- Casser les angles vif ou arrondis .

- Faire des angles de raccordement à 30° .

Cette préparation évite la surchauffe du métal de base et la fusion locale des angles . Le procédé Eutalloy peut être appliqué selon deux méthodes de bases

##### V.4.1- Technique en une étape :

Appelée technique de projection et fusion simultanées , elle s'applique à la reconstitution des arrêtes et des bords des pièces et au revêtement rapide des pièces de petites dimensions .

Après avoir préparé la pièce , sélectionné la lance de projection et réglé la flamme en fonction de l'application et de l'alliage utilisé , on procède comme suite :

- Préchauffer la pièce au gris-bleu pour les métaux ferreux .

- Concentrer la flamme sur le point de départ jusqu'au rouge sombre .

- Presser lentement ensuite convenablement pour assurer un écoulement stable .

- La vitesse de départ dépend de la température du métal de base .

- Balancer légèrement la buse .

- Maintenir le dard de la flamme à une distance qui varie entre 6 et 20 mm selon l'alliage et l'épaisseur à obtenir .

- Maintenir la buse perpendiculaire .

- Laisser refroidir la pièce dans du vermiculite ou le sable .

La vitesse du dépôt dépend de la température du métal de base , sur les pièces de petites dimensions , supportant une température de liaison de l'alliage , l'épaisseur du dépôt dépend de :

- La grandeur de la buse .
- La quantité d'alliage introduite dans la flamme .
- L'avance du chalumeau .
- La température du métal de base .

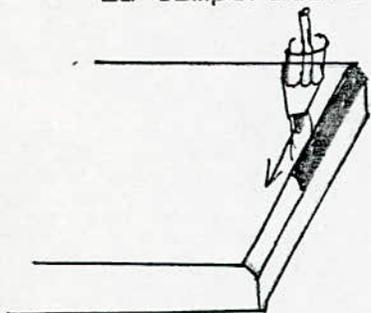


Fig n°9a : Technique en une étape

#### V.4.2- Technique en deux étapes :

Appelée aussi projection suivie de fusion , cette technique s'applique au revêtement Eutalloy sur des pièces de moyennes ou grandes dimensions avec des alliages usinables , résistant aux pressions et à l'abrasion , l'épaisseur des dépôts varie de 0,2 à 8 mm et les surfaces obtenues sont parfaitement lisses , permettant un usinage final réduit , voire inutile . Pour cette technique on procède comme suite :

##### a) projection :

- Prechauffer la pièce à revêtir à 300°C à couleur bleue pour les aciers .
- Projeter ensuite l'alliage sur la pièce en effectuant un mouvement de va et vient lent et régulier sur la pièce .
- Maintenir le dard de la flamme entre 25 et 30 mm .

##### b) Fusion :

- Choisir une buse convenable aux dimensions et nature de la pièce .

- Procéder à la fusion de l'alliage en partant de l'extrémité de la pièce , la fusion est obtenue dès que l'alliage devient brillant .
- Déplacer le chalumeau en veillant à une fusion correcte .
- Maintenir le dard à une distance qui varie entre 6 et 20 mm en balayant la surface du métal .
- Enfin faire refroidir la pièce dans du vermiculite ou du

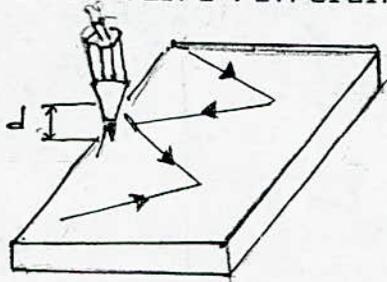


Fig n°9b : Technique en deux étapes  
 d : prechauffage et  
 projection 25 à 30 mm .  
 Fusion 6 à 20 mm .

On commence la fusion a proximité d'un angle de la pièce et le chalumeau doit assurer une fusion correcte de toute l'alliage projeté .

#### V.5- PARAMETRES DE PROJECTION :

Pour une matière donnée susceptible de former un revêtement sur une pièce donnée , les facteurs les plus importants , les qualités du revêtement sont :

- Distance de projection .
- Distance de fusion .
- Débit de la poudre .
- Vitesse de refroidissement .
- Débit des gaz .

Suivant les recommandations données par le producteur on prend des valeurs de part et d'autre pour voir l'influence de ces paramètres sur la structure et les propriétés du revêtement ;

- \* Distance de projection 6 à 20 mm
- \* Débit de la poudre (suivant les dimensions de la surface)
- \* Débit des gaz : neutre .
- \* Distance de fusion 2 à 6 mm .
- \* Vitesse de refroidissement : lent .

#### V.5.1- Distance de projection :

La distance de projection proposée varie de 25 à 30 mm on a choisis deux valeurs extrêmes 6-20 mm et 30-40 mm , après préparation de la surface on préchauffe la pièce à des températures variant de 250°C à 300°C puis on projette la poudre d'une distance X1, X2 et X3 en maintenant tous les autres paramètres fixés .

Echantillon 1 : On projette d'une distance de projection X1= 6 à 20 mm .

Echantillon 2 : On projette d'une distance X2= 25 à 30 mm .

Echantillon 3 : On projette d'une distance X3= 30 à 40 mm .

#### V.5.2- Distance de fusion :

Après avoir projeté la poudre BOROTEC d'une distance de 25 à 30 mm sur toute la surface on laisse refroidir l'échantillon à une température chaude puis on fusionne le revêtement déposé jusqu'à ce qu'il devient briant sur toute la surface la distance optimum entre la buse et l'échantillon est de 6-20 mm , les valeurs extrêmes sont 2-6 mm et 20 à 30 mm .

Echantillon 4 : Distance de fusion 2-6 mm .

Echantillon 5 : Distance de fusion 6-20 mm .

Echantillon 6 : Distance de fusion 20 à 30 mm .

#### V.5.3- Débit des gaz :

Le débit de la flamme doit être réglé suivant les pressions de fonctionnement données dans le tableau n° 2 suivant chaque buse .

Lance	Oxygène	Acétylène
N°45	2 bars	0,5 bar
N°48	2 bars	0,5 bar
N°53	2 bars	0,4 bar

Tableau N° 2

On ouvre au maximum , l'oxygène d'abord puis l'acétylène et on allume la torche ,et lors de l'écoulement de l'alliage ,on règle la flamme désirée neutre , le levier de commande de l'alliage pressé

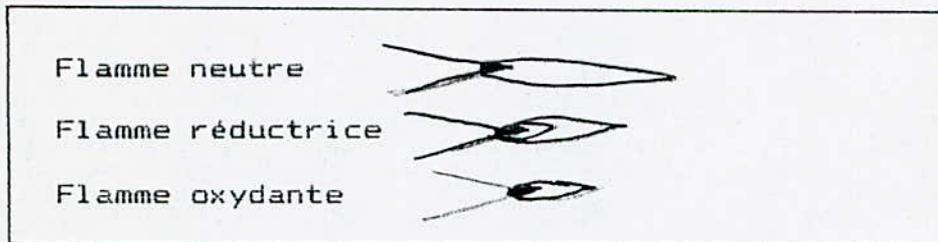


Fig n°10 :  
Réglage de  
flamme

Pour étudier l'influence de ce paramètre on est amené à projeter et fusionner la poudre par les trois types de flamme On a :

Echantillon 10 : Flamme réductrice .

Echantillon 11 : Flamme neutre .

Echantillon 12 : Flamme oxydante .

Toutes les autres paramètres sont fixés suivant les recommandations données .

#### V.5.4- Débit de la poudre :

Le chalumeau est accompagné de 3 lances qui donne des débits différents suivant les dimensions des pièces à revêtir et afin de voir l'influence du débit de la poudre sur une pièce de dimension constante .

On projette à l'aide de chaque lance sur trois échantillons différents mais de sections égales , toute en maintenant les autres paramètres constantes on a :

Echantillon 7 : Lance N° 48 .

Echantillon 8 : Lance N° 45 .

Echantillon 9 : Lance N° 53 .

#### V.5.5- Vitesse de refroidissement :

En général ces types de dépôts sont sensible aux refroidissements brusques et doivent être refroidis lentement dans du sable sec , et pour voir cette influence on a laissé refroidir deux échantillons l'un dans du sable sec

et l'autre dans l'air agité .

Echantillon 13 : Refroidissement à l'air .

Echantillon 13' : refroidissement lent .

Enfin on a préparé deux autres échantillons de même nuance que celle du corp de bielle , on a :

Echantillon 14 : Refroidissement lent .

Echantillon 15 : Refroidissement rapid .

#### V.6- STRUCTURE DU REVETEMENT :

Les revêtements projetés et fusionnés présentent une structure homogène et lisse , leurs températures de fusion sont comprises entre 980°C et 1200°C , ce qui assure un accrochage de type diffusion , et une structure homogène , sa dureté et son apparence brillante sont dues à la composition de se dernier

Au niveau de l'interface on observe entre le dépôt et le métal de base , une zone de liaison et de diffusion .

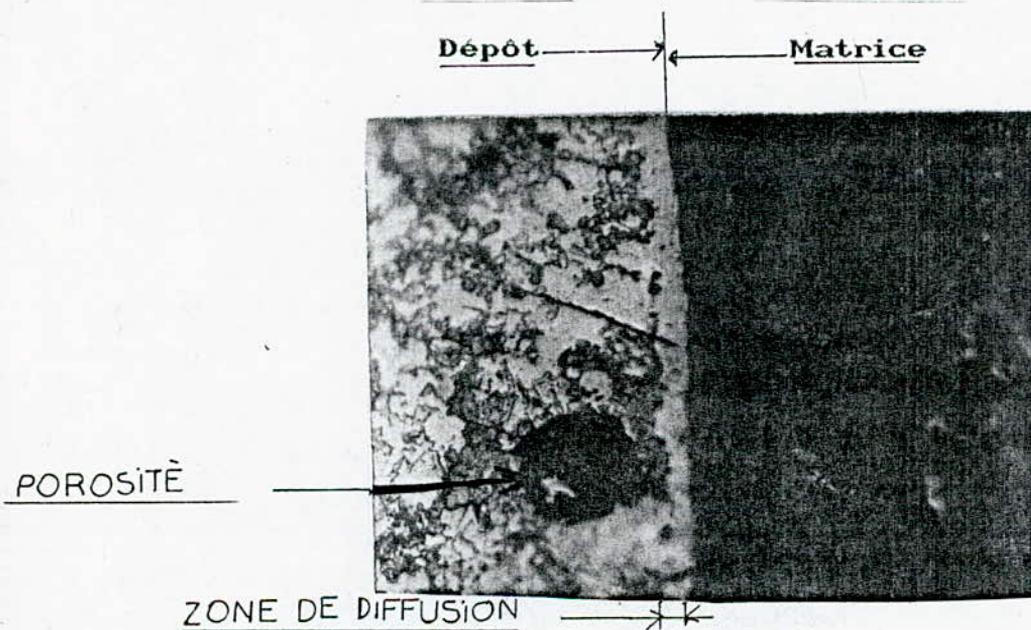


Fig n°11 : microstructure du revêtement à l'interface .

La qualité du dépôt ne dépend pas seulement de la composition de la poudre, mais aussi distribution des tailles de particule, c'est pour cela qu'il est recommandé d'agiter la poudre avant l'emploi.

Le schéma suivant montre le principe de revêtement sur un substrat.

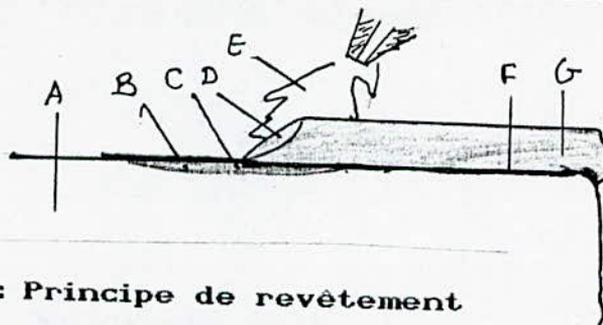


Fig n°12 : Principe de revêtement sur un substrat

- A : Métal de base .
- B : Couche préalable de protection anti-oxydation .
- C : Zone affectée par la chaleur .
- D : Bain de fusion .
- E : Particules de poudre à l'état pâteux .
- F : Zone de diffusion .
- G : Dépôt réalisé .

On observe au niveau de l'interface une zone de diffusion qui présente une apparence blanche vers la partie du revêtement, ce dernier peut être reconnu par son apparence claire présentant des phases de silicium et des porosités dûs à beaucoup de causes .

Pour des informations complémentaires, il est intéressant de considérer les phases susceptibles de se former lors de la fusion du revêtement sur le métal de base .

Le bore principal durcisseur pour le nickel forme la phase Ni-Ni<sub>3</sub>B à une température de 1092°C, ainsi que des borures de chrome ( CrB, Cr<sub>5</sub>B et Cr<sub>2</sub>B ), tandis que le silicium diminue la température de formation de borure de nickel et contribue à la formation du boro-silicate qui retarde l'oxydation du métal de base .

## VI- CONTROLE DE QUALITE DU REVETEMENT :

Pour différents paramètres de projection , on obtient des revêtements de qualités différents , afin de voir l'influence de ces paramètres sur les propriétés de ces revêtements , on est amené à faire des essais de dureté et de microdureté ainsi que des observations micrographiques .

### VI.1- ESSAIS DE DURETE :

Les essais de dureté appliqués sur le revêtement projeté sont généralement influencés par la dureté des particules la porosité du dépôt , et la vitesse du refroidissement de ce dernier . Lorsqu'on effectue les mesures de duretés superficielle , il faut tenir compte de l'épaisseur du revêtement . Pour notre cas on a utilisé l'échelle Rockwell A correspondant à 0,9 mm d'épaisseur pour une charge de 45 Kgf. Aussi le tableau N° 3 nous donne les valeurs de dureté représentant les moyennes de 10 mesures pour chaque valeur et chaque paramètre de projection .

#### VI.1.1- Distance de projection :

Pour une distance plus élevée ou plus faible que l'optimum c.a.d 25 à 30 mm on obtient des duretés respectives inférieurs et supérieurs à celle trouvée pour l'optimum (Fig N° 13 ) on peut interpréter ces résultats comme suite :

- Distance de projection faible : l'impacte des particules lors de la projection sur le substrat est assez fort pour bien adhérer sur celui-ci , et cela évite la formation de pores due à une mauvaise adhérence , et on obtient une dureté superficielle élevée .

- Pour une distance de projection élevée de 30 à 40 mm , les particules ne sont pas complètement amollies par le chauffage ils ne sont pas assez plastiques pour s'aplatir et épouser la forme de la surface , ainsi pendant la fusion , on peut oxyder les zones qui ne sont pas mouillées par le dépôt , ces derniers peuvent former des porosités qui diminuent la dureté superficielle du revêtement par rapport à celui obtenu pour une distance de 25 à 30 mm .

Ces résultats sont mis en évidence par les photos micrographiques , ou on voit clairement la quantité de porosité différente pour chaque distance de projection (Voir Fig ) .

#### VI.1.2- Distance de fusion :

Les valeurs de dureté superficielle trouvées montrent que :

- Pour une distance de fusion faible 26 mm , on obtient une dureté plus élevée 52,13 HRA , cette élévation est due à l'apport thermique apporté par le chalumeau à cette distance qui fait que le revêtement risque de se tremper lors du refroidissement .

- Pour une distance de fusion élevée de 25 à 30 mm , la dureté du dépôt est moins élevée 48,13 HRA , cela est due à la température atteinte de cette distance qui ne favorise pas la trempabilité du revêtement . ( Fig N° 14 )

#### VI.1.3- Débit des poudres :

Les mesures de dureté montrent que plus on augmente le débit de poudre plus la dureté du dépôt augmente , on a :

Buse 53 : 51,81 HRA      débit faible .

Buse 45 : 58,50 HRA      débit élevé .

Buse 48 : 55,56 HRA      Débit moyen .

On peut conclure qu'un débit trop élevé de poudre fait que des particules peuvent ne pas fondre ainsi que la chaleur apportée pour mettre en fusion , le dépôt augmente la vitesse de refroidissement ce qui fait augmenter la dureté du dépôt par rapport à un débit de poudre correspondant au dimension de la pièce à revêtir . Aussi pour un débit élevé de poudre , on obtient une bonne adhérence lors de la projection et ce qui évite la formation de porosité . ( Fig N° 15 )

#### VI.1.4- Débit des gaz :

On observe les résultats suivant :

Flamme oxydante : 34,08 HRA .

Flamme réductrice : 52,58 HRA .

Flamme neutre : 51,81 HRA .

Ces valeurs peuvent être expliquées par les faits suivants :

- Pour une flamme oxydante , l'oxygène en excès forme avec le carbone se trouvant dans le revêtement des oxydes de carbone , ainsi que la décarburation du métal de base favorise la formation exagérée de pores , et c'est cela qui explique la faible valeur de dureté obtenue .

- Pour une flamme réductrice , le carbone en excès enrichit le dépôt et augmente la dureté de ce dernier , bien qu'une très faible porosité peut exister grâce à la formation d'oxyde de carbone .

La figure n° 16 justifie les résultats obtenus .

#### VI.1.5- Vitesse de refroidissement :

Pour deux pièces l'une refroidie lentement et l'autre refroidie rapidement , on obtient :

Refroidissement rapide : 44,7 .

Refroidissement lent : 34,8 .

On peut expliquer ces résultats comme suite :

- Pour un refroidissement lent , le revêtement n'est pas trempé complètement , donc la dureté n'est pas trop élevée .

- Pour un refroidissement rapide , le revêtement a subi une trempe le long de l'épaisseur , ce qui donne une dureté plus élevée par rapport à la dureté d'une pièce au refroidissement lent . On tient à remarquer que ces pièces étant circulaires ont subi des filrages grossiers qui peuvent retenir une certaine quantité de poussière qui n'adhère pas au travail et elle est soufflée . ( voir Fig n° 17 )

#### VI.1.6- Conclusion :

On peut dire comme conclusion , que les principaux facteurs qui influent sur les valeurs de dureté superficielle sont la porosité et la vitesse de refroidissement .

Ces deux facteurs sont contrôlés par les paramètres de projection qui jouent un rôle important sur la qualité du dépôt , et suivant les résultats obtenus , on conclue que les paramètres donnés par l'opérateur sont favorables pour l'obtention d'un revêtement qui ne présente pas une porosité

supérieure à 5% limitée par le fabricant de l'alliage  
utilisé comme dépôt

Paramètre de projection		Valeur du dureté	
		HRA	HV
Distance de projection	6 à 20 mm	60,20	591,27
	25 à 30 mm	51,81	462,12
	35 à 40 mm	50,48	412,70
Distance de fusion	2 à 6 mm	52,53	463,86
	6 à 20 mm	51,81	462,12
	25 à 30 mm	48,13	443,02
Débit des poudres	Buse n° 48	55,56	522,08
	Buse n° 53	51,81	462,12
	Buse n° 45	58,50	560,62
Débit des gaz	Oxydante	34,08	321,08
	Neutre	51,81	462,12
	Réductrice	52,58	475,25
Vitesse de refroidissement	Lent	34,80	344,60
	Rapid	44,70	406,10

Tableau n° 3 : Valeur de dureté en fonction des  
paramètre de projection (p=45 Kgf)

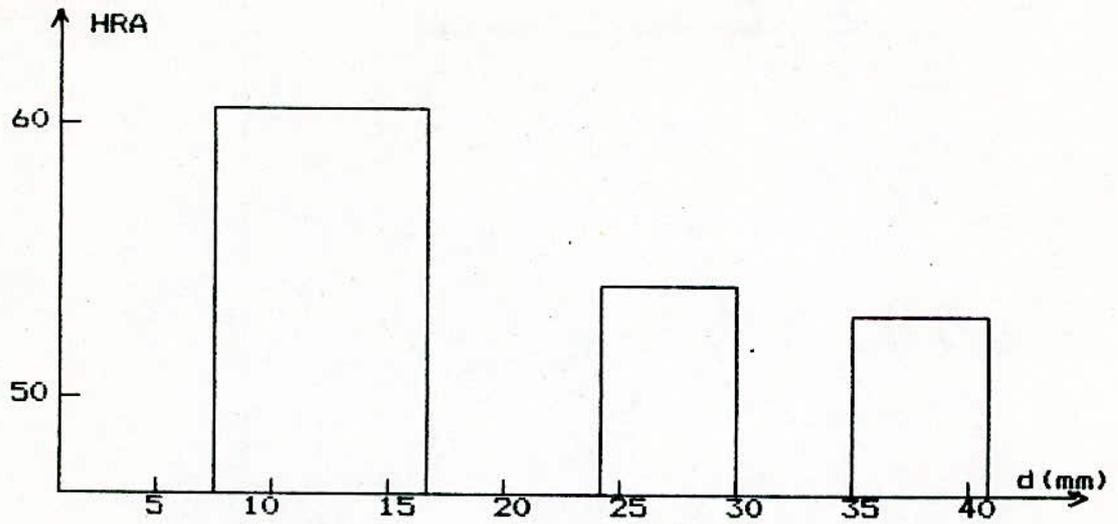


Fig N° 13 : Distance de projection

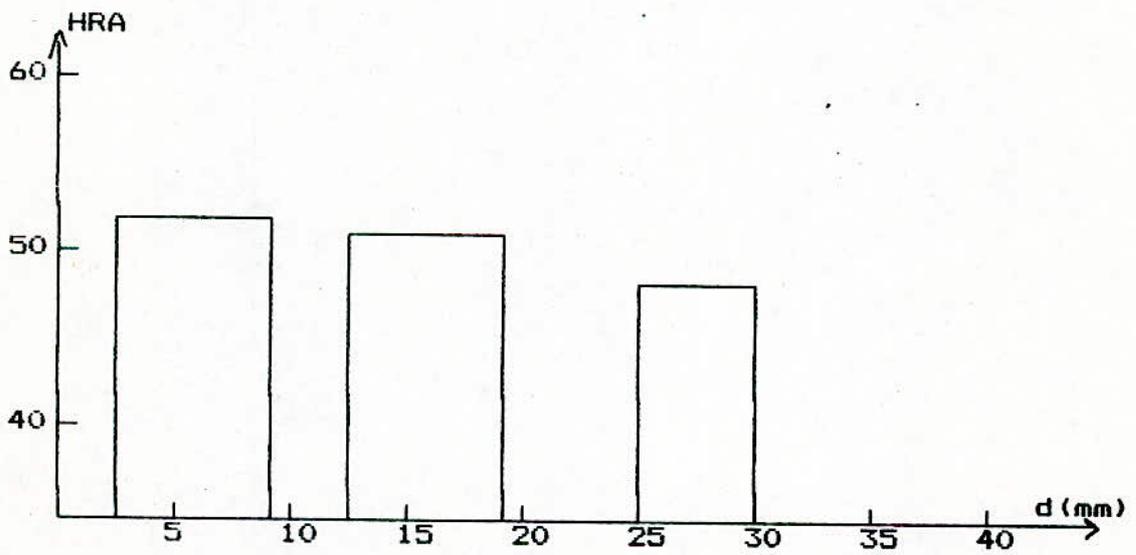


Fig N° 14 : Distance de fusion

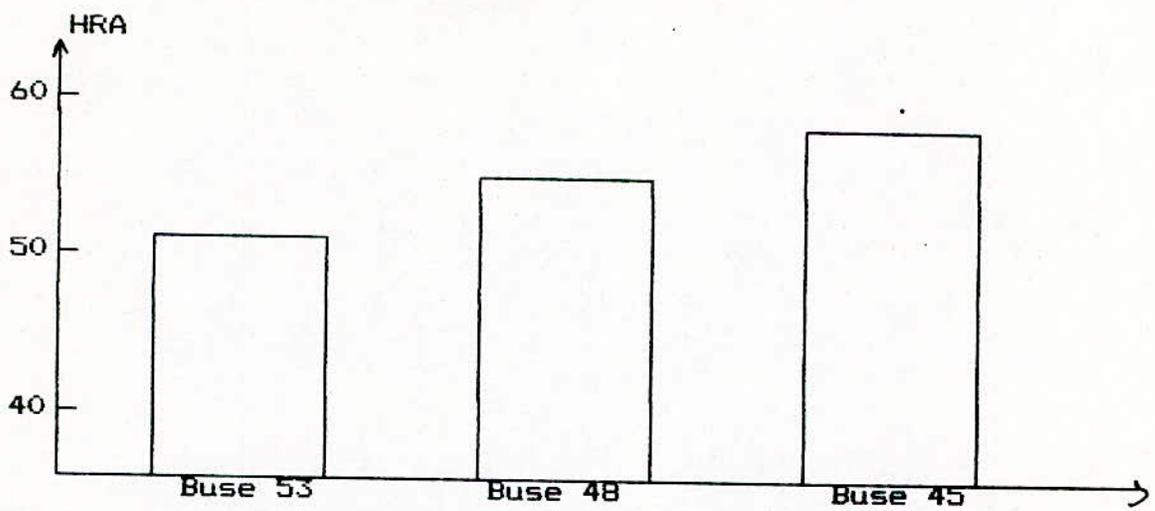


Fig N° 15 Débits de poudre

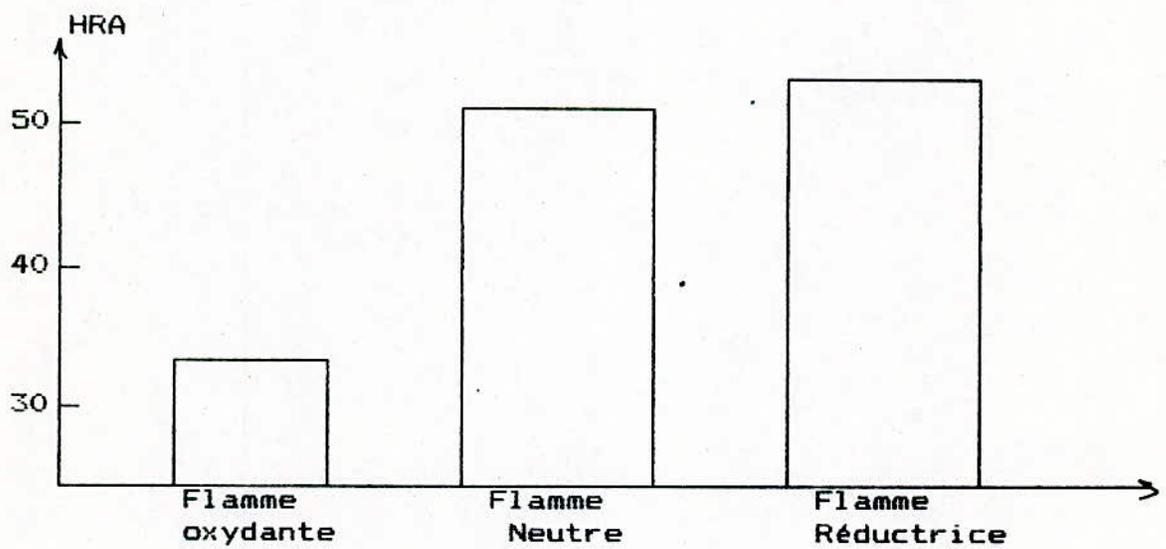


Fig N° 16 Débits des gaz

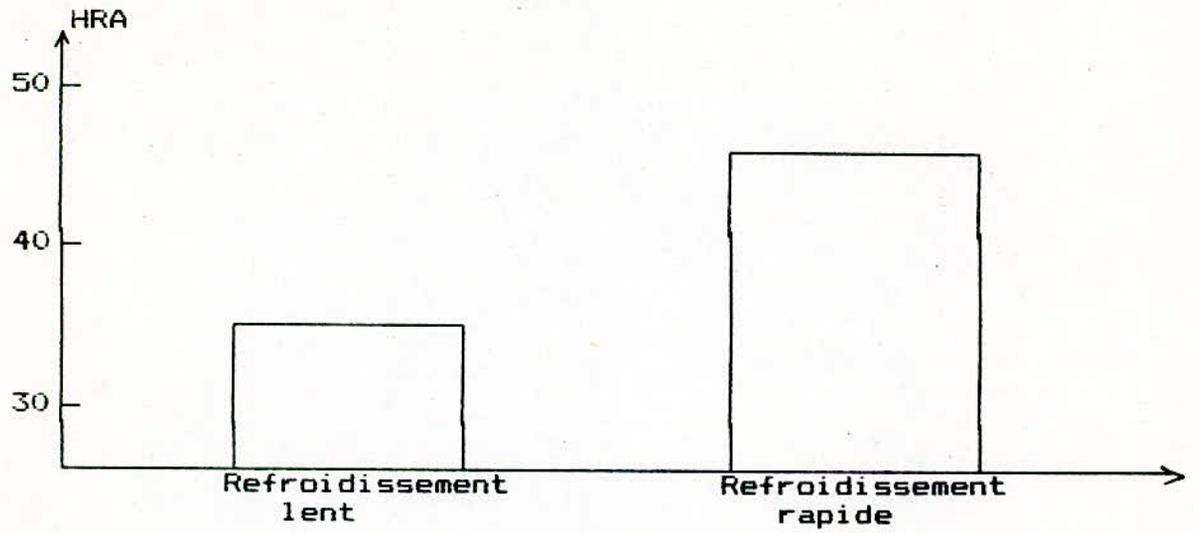


Fig N° 17 : Vitesse de refroidissement

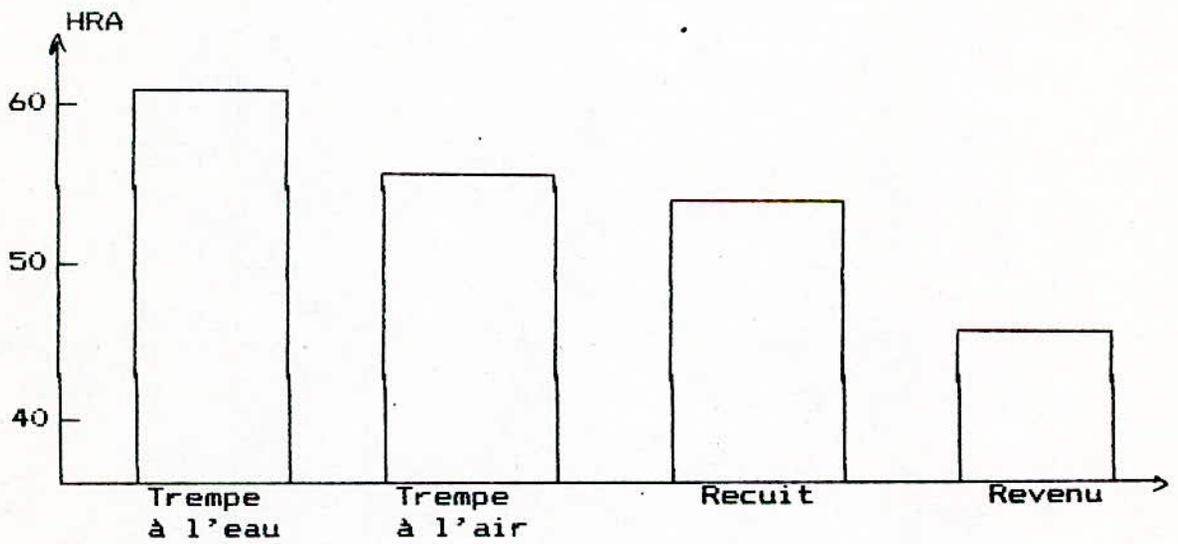
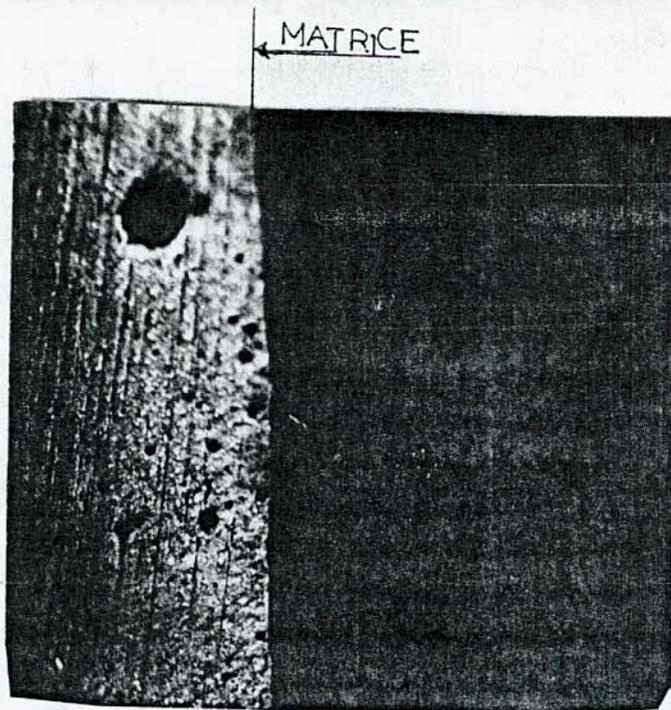


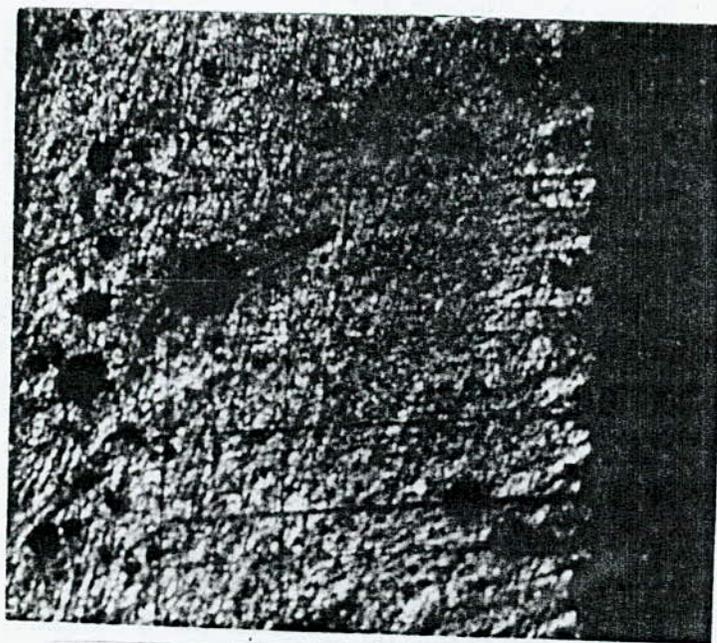
Fig N° 18 : Traitement thermique



DÉPÔT

(X 200)

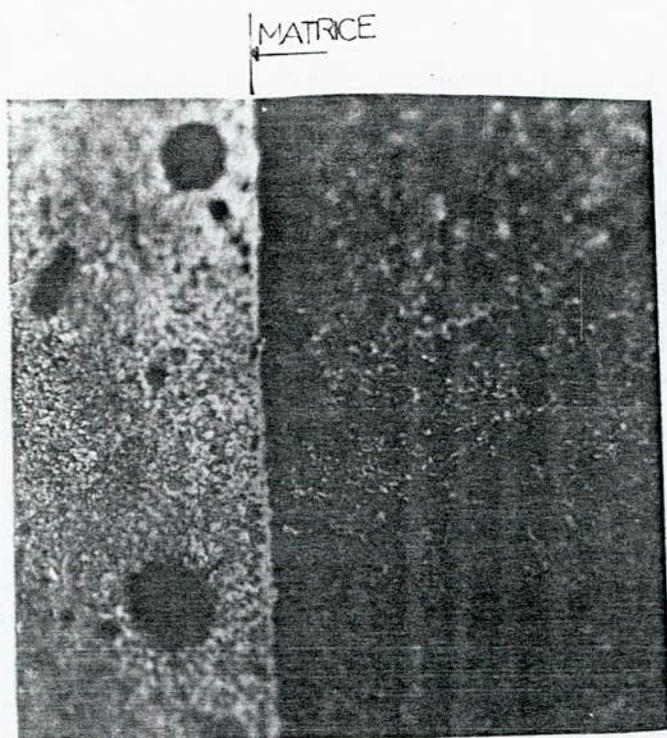
a)  $d = 6 \text{ à } 20 \text{ mm}$



(X 500)

b)  $d = 30 \text{ à } 40 \text{ mm}$

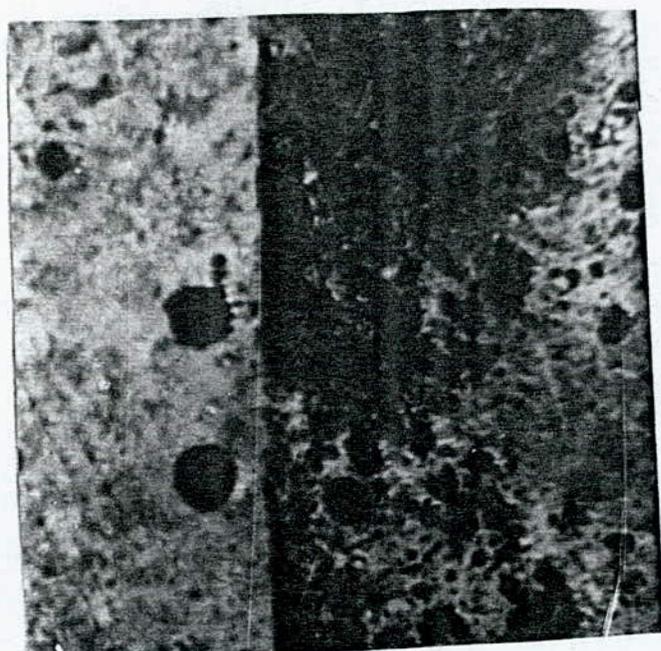
Fig n°19 : Variation de la structure en fonction de la distance de projection



DÉPÔT

(X 200)

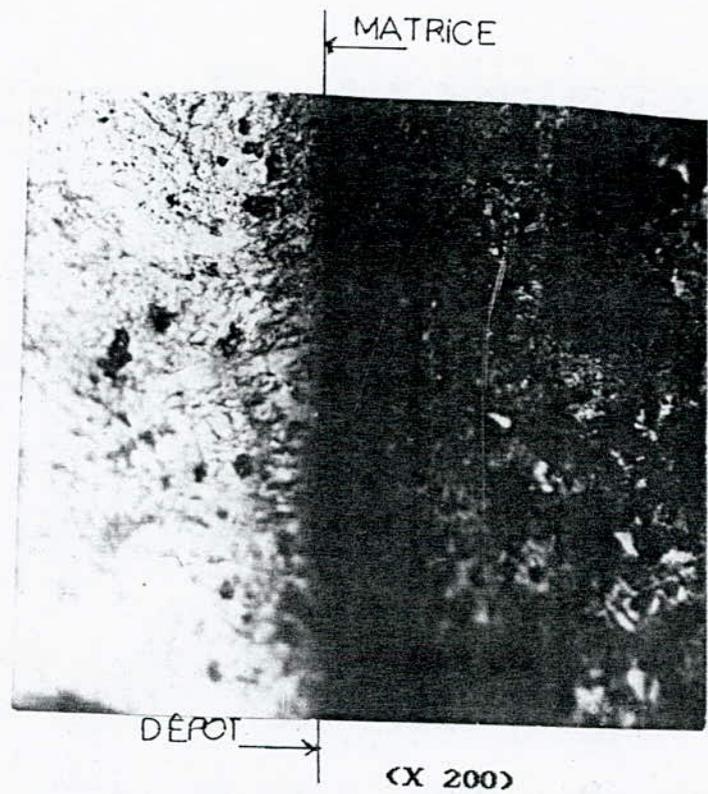
a) d = 2 à 6 mm



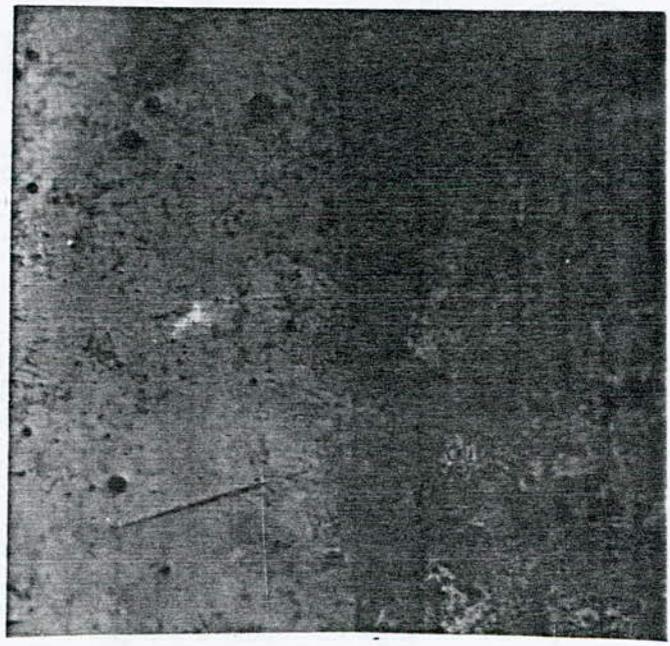
(X 200)

b) d = 25 à 30 mm

Fig n°20 : Variation de la structure du dépôt en fonction de la distance de fusion .

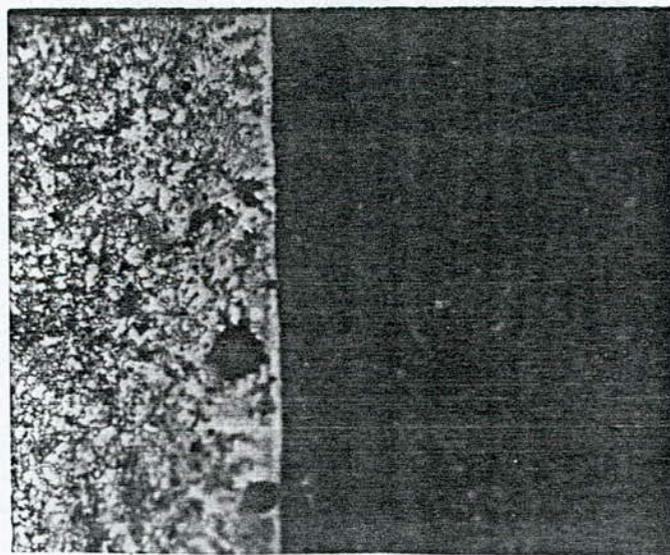
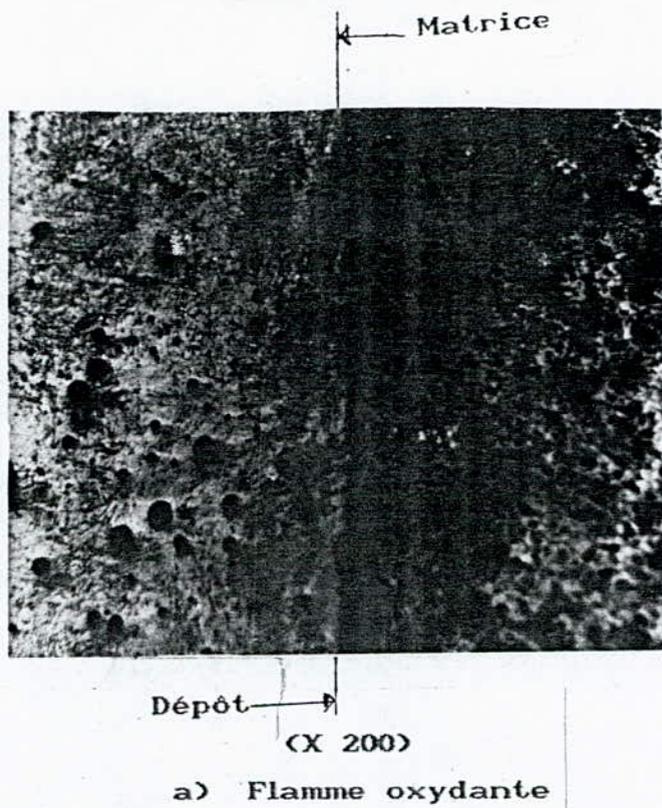


a) Débit moyen : Buse n°48



b) débit élevé : Buse N°45

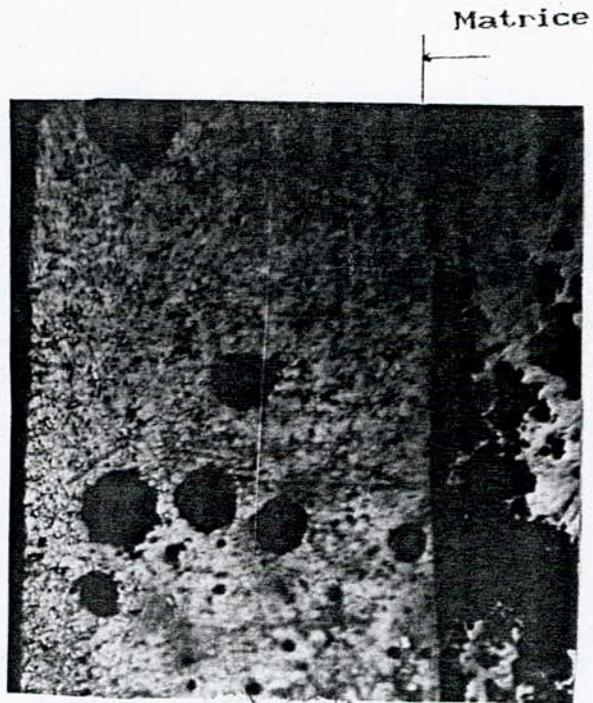
Fig 21 : Variation de la structure du dépôt en fonction des débits de la poudre .



(X 200)

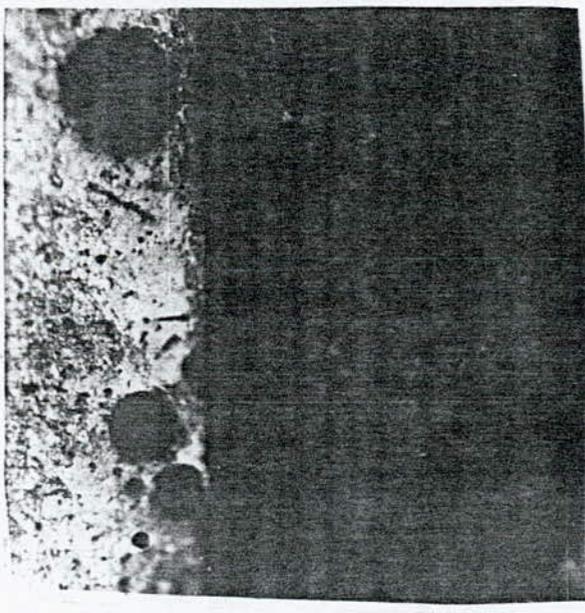
b) Flamme réductrice

Fig n°22 : Variation de la structure du dépôt en fonction des débits des gaz .



Dépôt  
(X 200)

a) Refroidissement rapide



(X 200)

b) Refroidissement lent

Fig n°23 : Variation de la structure en fonction de la vitesse de refroidissement .

## VI.2- ESSAIS DE MICRODURETE :

Pour chaque paramètre de projection , la microdureté varie en fonction des changements de structure dans le revêtement et dans le métal de base , sous l'effet de la chaleur apportée par le chalumeau et la cinétique de refroidissement.

L'essai de microdureté est utilisé afin de comparer la dureté le long de l'interface . Pour cela , on a utilisé une charge de 100 g dans un microduremètre possédant un grossissement de 370 fois . On a mesuré six empreintes , deux le long du revêtement , deux de part et d'autre de la zone de diffusion , et les deux autres au niveau du métal de base . ( Voir Fig n° 24 )

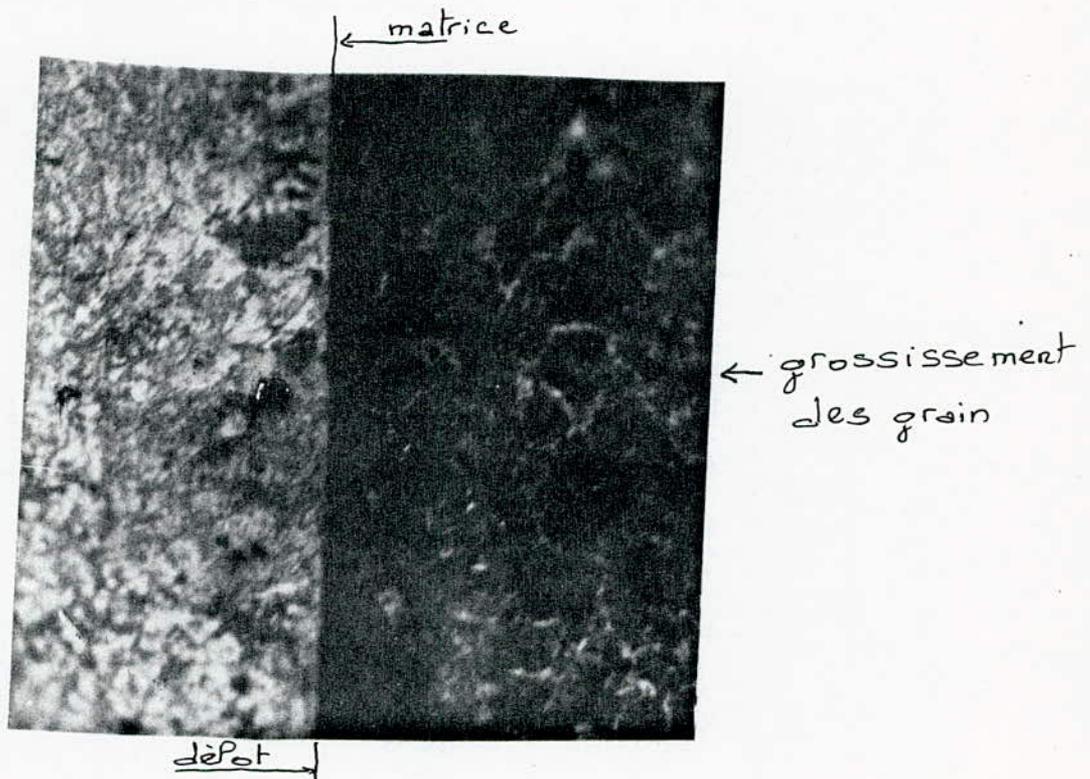


Fig:24 influence du dépôt sur la structure du métal de base .

### VI.2.1- Distance de projection : ( Fig n° 25 )

D'après les valeurs de la microdureté mesurées le lent de l'interface , pour des distances de projection respectives 6-20 mm , 25 à 30 mm , 30 à 40 mm , on a :

- Au niveau du revêtement , la microdureté diminue en s'approchant de l'interface , cela est dû à la vitesse de refroidissement du dépôt après l'opération de fusion , entre 250  $\mu\text{m}$  et 500  $\mu\text{m}$  , la microdureté est de :

\* 880 HV pour l'échantillon n°2 .

\* 690 HV pour l'échantillon n°1 .

\* 913 HV pour l'échantillon n° 3 .

Cette différence est due à la distance de projection , car :

- Plus la distance est proche du substrat , le revêtement a tendance à fondre et donc lors de la fusion , on fondre le métal plus rapidement , et la vitesse de déplacement est plus rapide , donc le temps d'exposition de la flamme devant le substrat est court et la vitesse de refroidissement est lente donc la microdureté est faible .

- Par contre plus la distance de projection est loin du substrat , on a les particules de la poudre qui sont moins pateux , car ils tendent à se refroidir avant d'arriver au substrat , donc lors de la fusion , la vitesse de déplacement du chalumeau est lente , ce qui augmente la vitesse du refroidissement et le revêtement a tendance à se tremper et devient très dur .

- Au niveau du métal de base , la distance de projection conditionne l'échauffement de ce dernier , plus la distance de projection est proche du substrat , plus dans cette dernière risque d'exister des changements de phase , en générale , la transformation martensitique est évitée , car le refroidissement se fait dans du sable sec , mais on observe l'effet du grossissement des grains au niveau de l'interface , ce qui explique les valeurs de microdureté trouvées .

### VI.2.2- Distance de fusion : ( Fig n° 26 )

On variant la distance de fusion , on obtient les valeurs de microdureté suivantes :

	au revêtement	à l'interface
Ech 2 : 6 à 20 mm	880 HV	450 HV .
Ech 4 : 2 à 6 mm	770 HV	430 HV .
Ech 6 : 20 à 30 mm	792 HV	446 HV .

On remarque que la différence de dureté du revêtement n'est pas aussi importante pour une distance de projection fixe , cependant au niveau du métal de base , il existe une différence de microdureté due au surchauffe qui favorise le grossissement du grain , donc pour une distance de 2 à 6 mm , ce phénomène est accentué , tandis que pour une distance de 20 à 30 mm , les microduretés sont constantes , ce qui explique que cette transformation est très limitée , mais l'inconvénient pour cette distance , et que le dépôt ne mouille pas bien le métal de base , et par conséquent , la zone de diffusion n'est pas importante , ce qui diminue l'adhérence du dépôt .

### VI.2.3- Débit des poudres :

Le débit de la poudre a une grande influence sur le métal de base , car on a tendance à diminuer la vitesse du déplacement du chalumeau et cela provoque la surchauffe du métal de base .

- Pour un faible débit de poudre , quand on fait la différence entre deux mesures de microdureté on a 70 HV pour une distance de 250  $\mu$ m de l'interface .

- Pour un débit moyennement élevé ( buse 48 ) , on a une différence de 110 HV pour une distance de 250  $\mu$ m .

- Pour un débit élevé de poudre , on a une différence de 220 HV pour une distance de 250  $\mu$ m .

Ces résultats nous indiquent l'importance du grossissement du grain en fonction du débit de la poudre projetée . ( Fig 27 )

#### VI.2.4- Débit des gaz :

Suivant le type de flamme utilisée , le comportement du dépôt et du métal de base sont différents . Les microduretés obtenues nous donnent les informations suivantes :

- La microdureté au niveau du dépôt pour une flamme réductrice est plus élevée que pour une flamme oxydante on a :

Flamme réductrice : 890 HV .

Flamme neutre : 860 HV .

Flamme oxydante : 780 HV .

On peut conclure donc , qu'une flamme réductrice augmente la dureté du dépôt , car il y a enrichissement progressif en carbone , tandis que pour une flamme oxydante l'excès d'oxygène forment avec le carbone se trouvant dans le dépôt des oxydes de carbone qui se dégage , bien que la teneur en carbone est faible dans le dépôt .

- La microdureté dans l'interface nous donne les indications suivantes :

Flamme réductrice : 470 HV à 20  $\mu\text{m}$  de l'interface .

Flamme neutre : 440 HV à 15  $\mu\text{m}$  de l'interface .

Flamme oxydante : 360 HV à 32  $\mu\text{m}$  de l'interface .

On peut conclure , que pour une flamme oxydante l'effet de l'oxygène sur le carbone du métal de base en formant du  $\text{CO}_2$  qui se dégage , diminue la dureté au niveau de l'interface , cette décarburation est fonction du pourcentage de carbone dans le métal de base , tandis que pour une flamme réductrice , on a un enrichissement de carbone du métal de base , ce qui explique que la microdureté pour une flamme réductrice est supérieure à celle d'une flamme neutre . (Fig 28)

#### VI.2.5- Vitesse de refroidissement :

Les deux échantillons n° 14 et 15 étant revêtus avec les mêmes conditions et mêmes paramètres de projection optimum recommandés par l'opérateur , on obtient les valeurs suivantes :

- Au niveau du dépôt pour l'échantillon 14 subissant un refroidissement lent , la microdureté diminue rapidement cela

est dûe à une trempe superficielle du revêtement , car la vitesse de refroidissement est lente .

- Pour l'échantillon 15 , qui a subit un refroidissement à l'air agité , la dureté du dépôt diminue très faiblement , car la vitesse de refroidissement est très élevée par rapport à l'échantillon 14 .

- Au niveau du métal de base , on a remarqué que lors du refroidissement rapide on a une dureté varie entre 500 et 400 HV dûe à une transformation martensitique , tandis que pour le refroidissement lent , on a pu éviter la transformation martensitique , la dureté varie de 360 à 340 HV . ( Fig 29)

#### VI.2.6- Conclusion :

On peut dire , que les paramètres de projection influent sur la qualité du dépôt et du métal de base , cependant , grace aux essais de microdureté nous pouvons conclure que :

- La vitesse de refroidissement joue un rôle important sur la qualité du dépôt du fait qu'il provoque des criques , en plus le métal de base subit une transformation martensitique.

- Les distances de projection et de fusion ainsi que le débit des gaz influent sur le grossissement des grains du métal de base , donc il est recommandé de suivre les distances données par l'opérateur , afin de ne pas accentué cette transformation qui peut changer les propriétés mécaniques du substrat .

- Le choix de la flamme peut créer des hétérogénéités physiques surtout au niveau de l'interface .

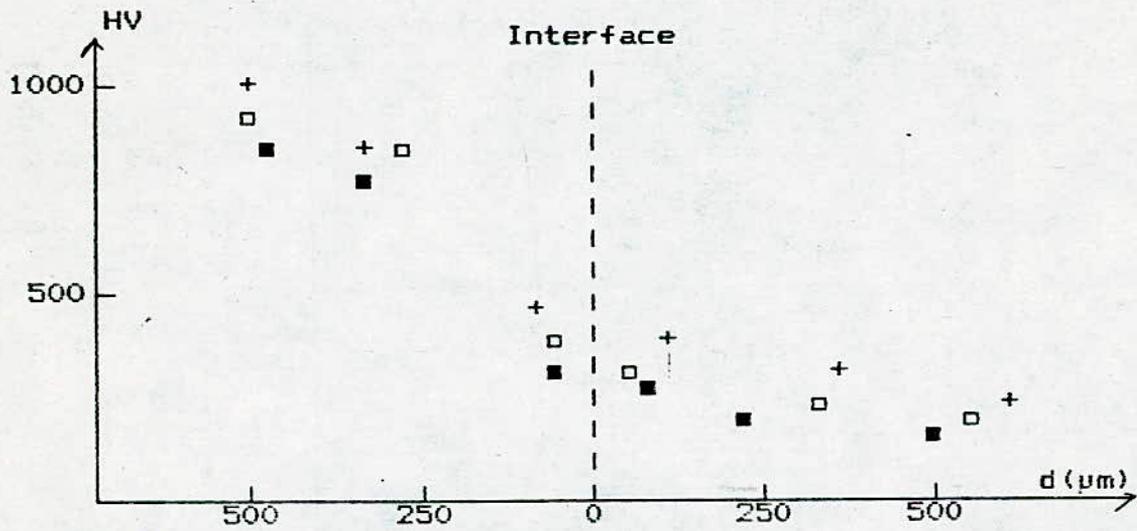


Fig N°25 : Variation de la microdureté en fonction de la distance de projection .

- $d = 6 \text{ à } 20 \text{ mm}$  .
- $d = 25 \text{ à } 30 \text{ mm}$  .
- +  $d = 35 \text{ à } 40 \text{ mm}$  .

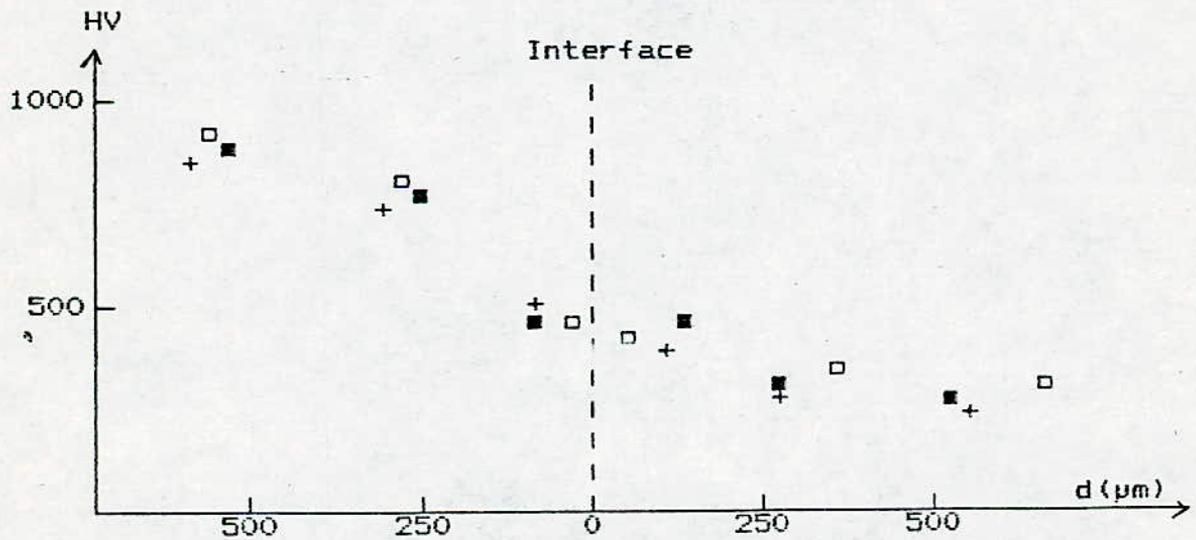


Fig N°26 : Variation de la microdureté en fonction de la distance de fusion

- $d = 2 \text{ à } 6 \text{ mm}$
- $d = 6 \text{ à } 20 \text{ mm}$
- +  $d = 20 \text{ à } 30 \text{ mm}$

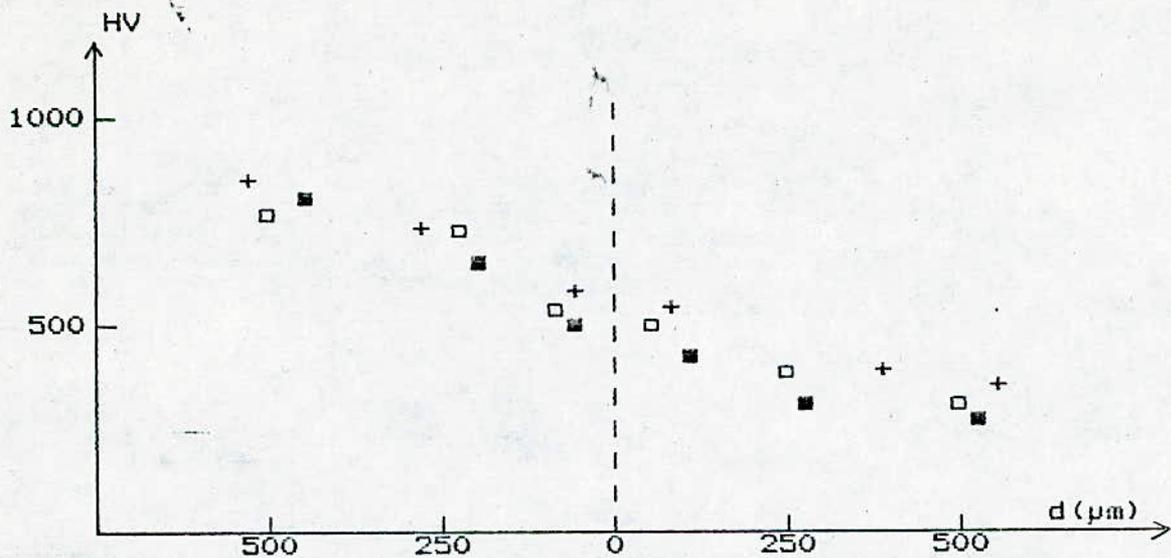


Fig N°27 : Variation de la microdureté en fonction des débits de poudre

- Débit faible : Buse 53
- Débit moyen : Buse 48
- + Débit élevé : Buse 45

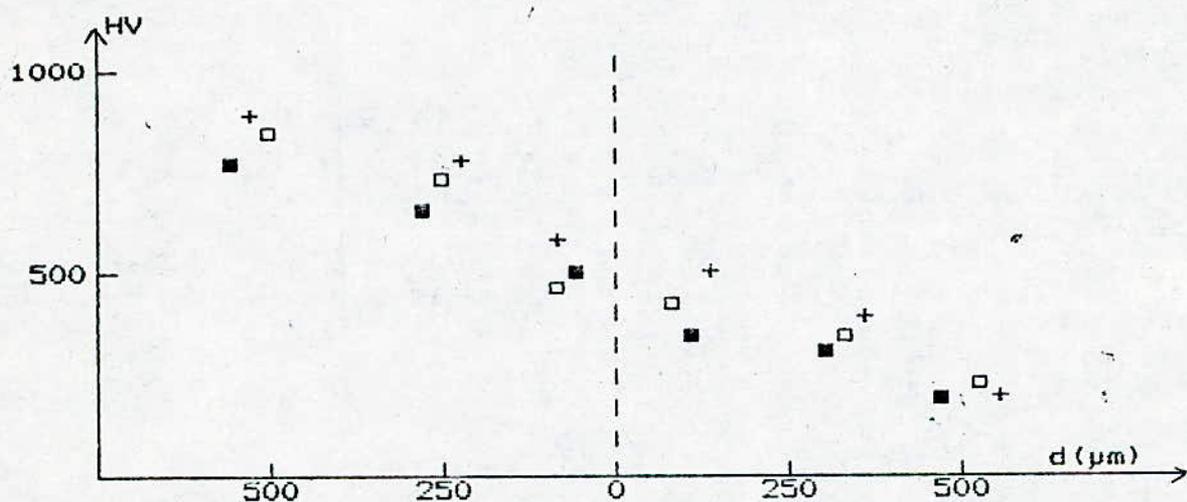


Fig N°28 : Variation de la microdureté en fonction des débits des gaz

- Flamme oxydante
- Flamme neutre
- + Flamme réductrice

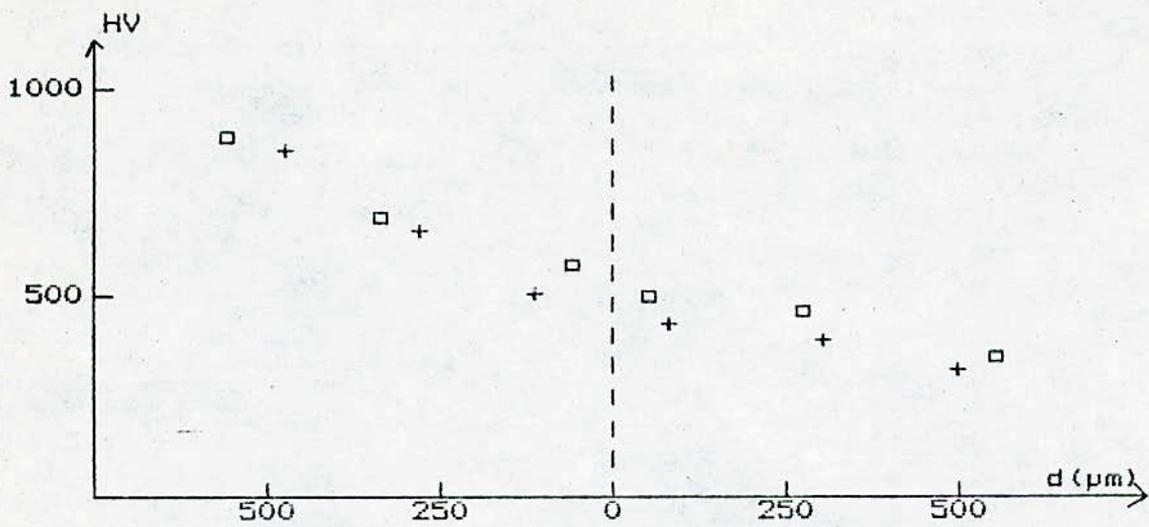


Fig N°29 : Variation de la microdureté en fonction de la vitesse de refroidissement  
 + Refroidissement lent  
 □ Refroidissement rapide

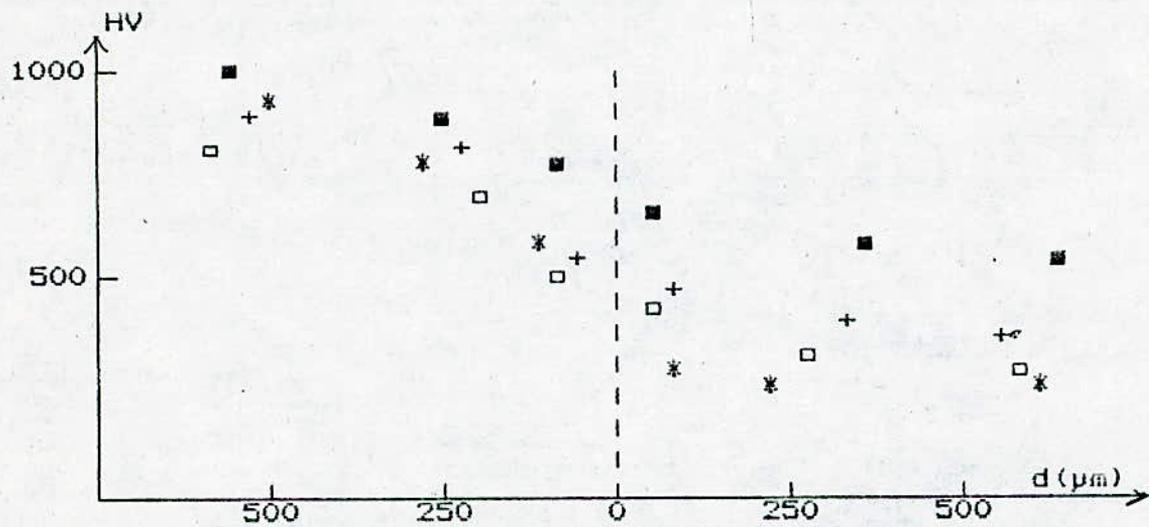


Fig N°30 : Variation de la microdureté en fonction des traitements thermiques  
 ■ Trempe à l'eau à T = 850 °C  
 + Trempe à l'air à T = 850 °C  
 □ Revenu à T = 600 °C , t = 30 minutes  
 \* Recuit de normalisation à T = 830 °C , tr = 30 min

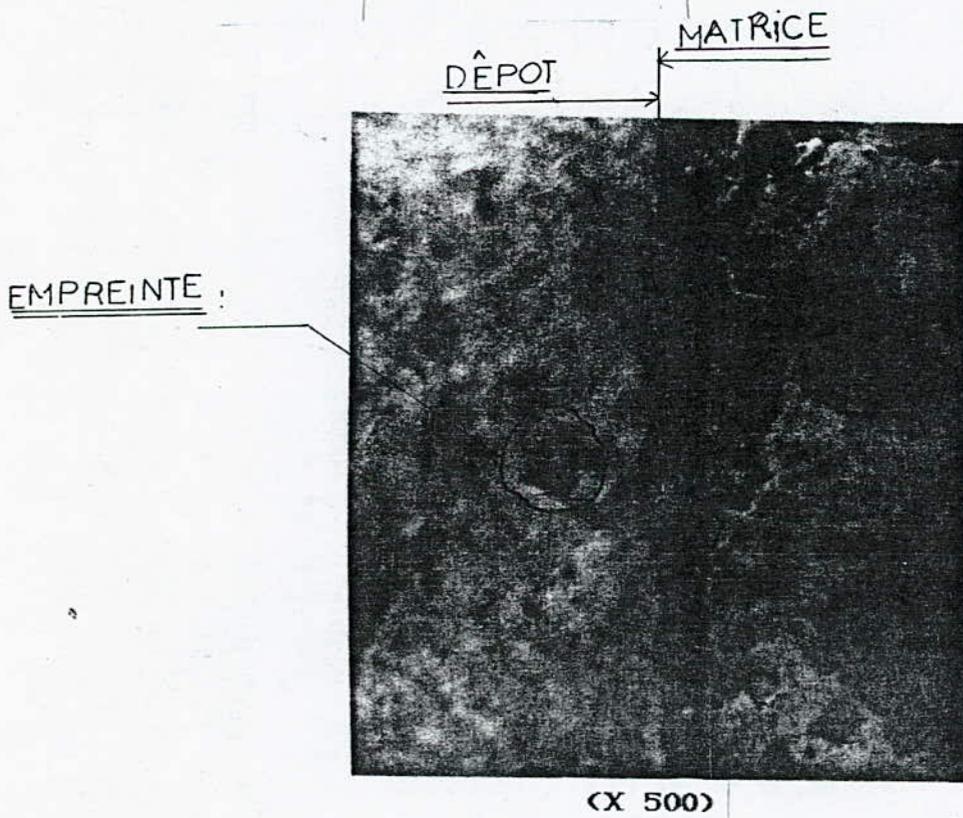
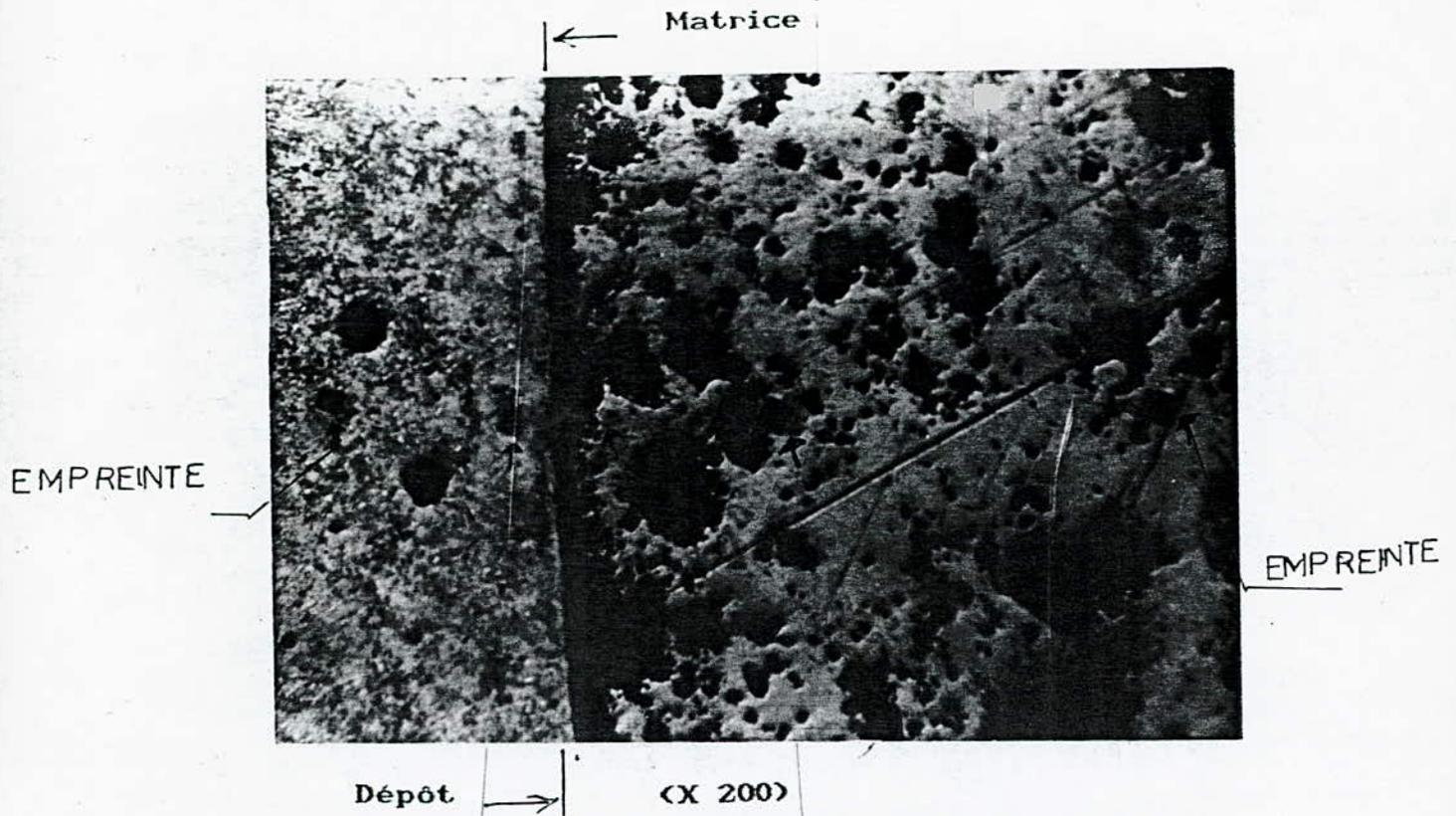
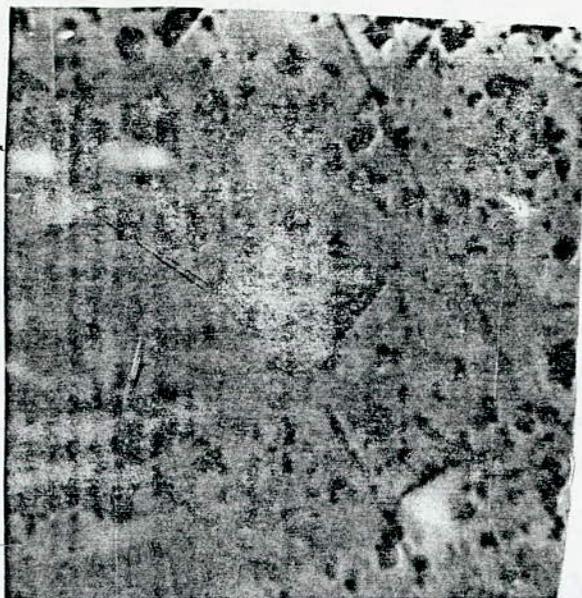


Fig n°30 : Essais de microdureté  
le long de l'interface

EMPREINTE



(x 375)

a) Refroidissement lent

EMPREINTE



(x375)

b) Refroidissement rapide

Fig n°31 : Essai de microdureté sur métal de base

## VII- INFLUENCE DES TRAITEMENTS THERMIQUES SUR LE REVETEMENT :

Lors de la projection thermique , des modifications métallurgiques peuvent intervenir sur le métal de base qui sera soumis à des modifications structurales telles que grossissement du grain , phénomène de trempe , etc .....

Les propriétés mécaniques que le métal de base avait avant son revêtement , se trouve modifier , ainsi des traitements thermiques sont nécessaires afin de revenir aux propriétés initiales .

Afin de voir l'influence de ces traitements sur le revêtement , on est amené à faire des mesures de dureté , de microdureté , ainsi que des observations microscopiques .

Les traitements thermiques envisagés pour ces échantillons sont , une trempe à l'air , une trempe à l'eau , un revenu et un recuit de normalisation . Pour l'échantillon du chapeau de bielle de nuance 45 M 5 , le point  $A_{c3}$  est à  $780^{\circ}\text{C}$  .(suivant le diagramme TTT )

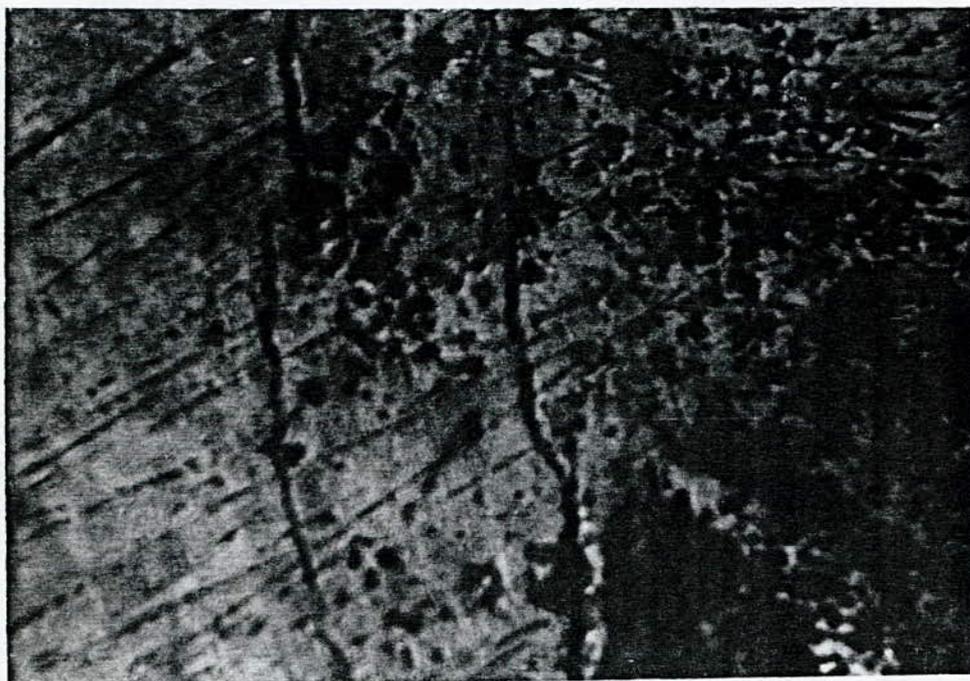
### VII.1- TREMPE :

D'une température de  $850^{\circ}\text{C}$  , on maintient la pièce revêtue pendant 30 min dans un four , les résultats obtenus pour différentes mesures effectuées , nous permettent de dire que :

- Le dépôt atteint une dureté de 980 HV à 895 HV , et le métal de base une dureté de 820 HV à 740 HV (Fig 30 ) , ceci qui indique que le métal de base possède une structure martensitique , mais l'inconvénient et que des criques se forment au niveau du revêtement sous l'influence de la différence des coefficients de dilatation entre le revêtement et le métal de base , ce qui présente un inconvénient majeur lors du fonctionnement . La fig n° 32 met en évidence ces défauts , tandis qu'une trempe à l'air , l'effet de crique est moins accentué que pour une trempe à l'eau , bien que la transformation martensitique est ralentie .

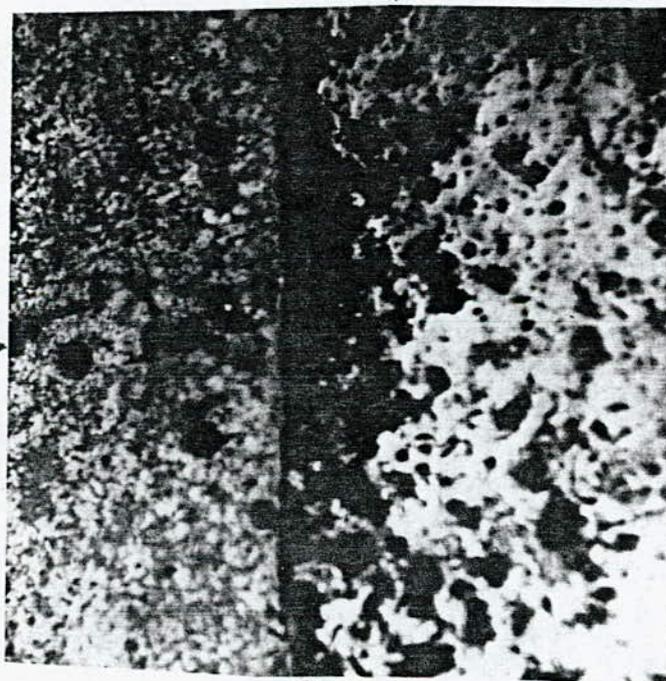
Crique

Crique



(X 200)

a) Surface de dépôt



(X 200)

b) Interface

Fig n°32 : Structure du dépôt trempé à l'eau T= 850 °C

#### VII.2- REVENU :

L'échantillon trempé à l'eau est ensuite revenu à 600°C pendant 30 minutes , on obtient les résultats suivants :

- La microdureté le long de l'interface montre que la dureté du dépôt varie de 890 à 520 HV plus faible que celle obtenue lors de la trempe , ce qui montre qu'on peut adoucir le revêtement en diminuant les contraintes résiduelle formées lors de la trempe . ( Voir Fig n° 30 )
- Des observations micrographiques montrent que le revenu ne peut pas être source de défaut physique comme la trempe ( Fig n° 32 ) .

#### VII.3- RECUIT DE NORMALISATION :

L'échantillon trempé est chauffé dans un four à une température de 850°C pendant 30 minutes , puis refroidi à l'air , on obtient les résultats suivants :

- Les valeurs de microdureté montrent que ce traitement améliore les propriétés mécaniques du métal de base , les duretés obtenues sont faibles comparées à celles obtenues après trempe .
- Mais les valeurs de dureté dans le dépôt sont relevées , cela est dûe au refroidissement à l'air qui favorise la trempabilité du dépôt .

#### VII.4- CONCLUSION :

L'étude du comportement du revêtement vis à vis des traitements thermiques , nous a permet de faire les remarques suivantes :

- Le dépôt est très sensible au phénomène de trempe , des criques peuvent exister , cependant diminué la vitesse du refroidissement en faisant une trempe à l'air ou à l'huile reste la seule solution pour prévenir en partie de ces criques .
- le revêtement et le métal de base , sont tous les deux influencés par le revenu , ce dernier ne pose pas de problème sur la qualité du dépôt .

- Un recuit de normalisation refroidi d'une température de 800 à 850 °C limite le grossissement des grains austénitique .

### VIII- ESSAI COMPARATIF D'USURE :

Le but principal du revêtement d'une pièce est d'augmenter la durée de vie de cette dernière , cette augmentation peut atteindre jusqu'à 300 % .

Cet essai consiste à prendre deux échantillons de même masse et de même dimension , et de les soumettre à une usure abrasive sévère . Au bout d'un certain temps on mesure les pertes de masse pour chaque échantillon , le rapport entre les deux valeurs trouvées nous donnent la durée de vie de la pièce revêtue .

Echantillon 1 : Sans revêtement .

Echantillon 2 : Avec revêtement .

Masse initiale :

$M_{ech1} = 10 \text{ g}$  .

$M_{ech2} = 10 \text{ g}$  .

Après un maintient de chaque échantillon dans le milieu abrasif ( constitué par un cylindre tournant à une vitesse de 500 tours/min , et des particules abrasives ) , pendant une heure sous une pression de 7 Kgf , on obtient les résultats suivantes :

Masse finale :

$M_{fech1} = 9,586 \text{ g}$  .

$M_{fech2} = 9,821 \text{ g}$  .

On a :  $M_{ech1} - M_{fech1} = 0,414 \text{ g}$  .

$M_{ech2} - M_{fech2} = 0,179 \text{ g}$  .

Le rapport nous donne  $0,414/0,179 = 2,313$  .

On conclut que le revêtement effectué sur cette pièce peut augmenter la durée de vie de la pièce d'environ 232 % , mais ceci reste une simple comparaison d'usure , qui ne reflète pas l'état réel du fonctionnement de la bielle . La meilleure chose à faire est de placer la bielle revêtue dans un banc d'essai soumis aux mêmes conditions de travail .

## CONCLUSION

Au thème de cette étude , nous tenons à remarquer que le revêtement projeté sur un substrat en fonction des paramètres de projection donnés par les recommandations , possède les meilleurs qualités physico-chimiques, comparé à ceux obtenus par d'autres paramètres . Des essais de dureté , de microdureté , ainsi que des observations microscopiques approuvent ces résultats .

Aussi l'adhérence au substrat du dépôt obtenu par le chalumeau Eutalloy est favorisée par une liaison métallurgique de type diffusion , qui représente le moyen le plus efficace pour augmenter cette adhérence .

Les dépôts projetés sont insensibles aux traitements thermiques envisagés pour le métal de base , qui se trouve avec une structure <sup>modifiée</sup> sous l'influence de la chaleur apportée par le chalumeau .

Il serait souhaitable d'approfondir cette étude en mettant en évidence les différentes phases formées dans le revêtement et leurs influences sur les propriétés de ce dépôt , ainsi que la caractérisation de la zone de diffusion , et les phases susceptibles de se former à l'interface .

## BIBLIOGRAPHIE

- 1- Technique de l'ingénieur. M5 (1990) : traitement de surface M1645 .
- 2- Guide pratique de la projection thermique ; CETIM 1989 .
- 3- Metal hand book : powder metallurgy Vol (2) 1984 .
- 4- Les lubrifiants moteur , perte par usure et frottement  
I.F.P , Paris 1979 .
- 5- Manuel d'entretien du moteur , section 3 .
- 6- Manuel d'utilisation -CASTOLIN -EUTALLOY .
- 7- Powder metallurgy process .
- 8- Manuel de projection thermique (METCO) .
- 9- Revêtement céramique par projection thermique .
- 10-Metallurgie générale J.Benard Edition masson 1984 .
- 11-Revêtement methodes Castolin -procédé Eutalloy UM14  
F1 à F4 .