

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 DE LA PROJECTION  
THERMIQUE SUR DEUX PIECES  
MECANIQUES D'UN MOTEUR DIESEL

Proposé par :

La S.N.T.F.

Etudié par :

Mr: B. MALKI.

Dirigé par :

M<sup>r</sup>: N. MESRATI.

PROMOTION

Juillet 1992.

Remerciements

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
المكتبة — BIBLIOTHEQUE  
Ecole Nationale Polytechnique

Je tiens à remercier Mr Mesrati pour ses conseils qui m'ont été d'un grand intérêt et également toute l'équipe de l'atelier de fabrication de la SNTF qui m'a facilité la réalisation du projet, ainsi que tout ceux qui m'ont aidé de près ou de loin.

Enfin Je dédie cet humble travail à mes parents à mes amis et à toute ma famille.

SOMMAIRE

|  |    |
|--|----|
| <u>Introduction</u> . . . . .  | 1  |
| <u>PREMIERE PARTIE: Recherche bibliographique</u> . . . . .          | 1  |
| 1-Procédé de projection thermique . . . . .                          | 3  |
| a) Rappel historique   |    |
| b) Principe  |    |
| c) place de la projection thermique parmi les traitements de surface |    |
| d) Les équipements de projection                                     |    |
| e) Caractéristiques des matériaux projetés                           |    |
| 2-Critères de choix d'une solution de métallisation . . . . .        | 12 |
| a) Nature des matériaux  |    |
| b) Comportement en sollicitations                                    |    |
| 3-Usures des surfaces métalliques . . . . .                          | 15 |
| a) Introduction.   |    |
| b) Différentes formes d'usures.                                      |    |
| <u>DEUXIEME PARTIE: Partie expérimentale.</u> . . . . .              | 22 |
| 1-Position du problème. . . . .                                      | 23 |
| a) Fonctionnement des deux pièces.                                   |    |
| b) Analyse de la composition chimique.                               |    |
| c) Analyse de l'usure.   |    |
| d) Choix des poudres.  |    |
| 2-Matériaux utilisés. . . . .  | 30 |
| a) Pistolet ROTOTEC 80.  |    |
| b) Poudres de projection.  |    |
| c)Eprouvettes utilisées.   |    |
| 3-Mise en oeuvre de la projection. . . . .                           | 33 |
| a) Préparation de surface.   |    |
| b) Paramètres de projection.   |    |
| c) Application sur les deux pièces.                                  |    |
| 4-Essais de caractérisation. . . . .                                 | 36 |
| a) Observations micrographiques .                                    |    |
| b) Essais de dureté superficielle.                                   |    |
| c) Essais de microdureté.  |    |
| d) Tests de choc thermique.  |    |
| e) Essai de corrosion.   |    |
| <u>Conclusion</u> . . . . .  | 64 |

La technique de revêtement par projection thermique possède une panoplie de matériaux d'apport ,ce qui lui permet d'intervenir dans plusieurs cas d'applications (l'amélioration des propriétés mécaniques des surfaces frottement-usure ,la résolution de problème de corrosion, d'isolation thermique ou électrique etc...). Le cas proposé par la SNTF qui à notre point de vue après l'enquête préliminaire menée au sein de cet organisme est la récupération de pièces usées. Parmi les pièces recensées , nous avons choisi un arbre de pompe à eau et un demi arbre de rotor du turbochargeur pour les raisons suivantes :

- La commodité de l'expérimentation exige une sélection de pièces à étudier à cause du temps limité.
- Ces deux pièces usées ont une grande rentabilité de récupération, de plus les lots de ces pièces sont parmi les plus importants.
- Les deux pièces travaillent dans des conditions différentes ce qui nous permet de toucher à plusieurs applications et maîtriser la technique de projection.
- La simplicité du diagnostic d'usure .

Pour pouvoir mener à bien le procédé de projection, il nous a paru nécessaire d'étudier en premier lieu l'influence de quelques paramètres de projection sur la qualité du revêtement et son adhérence et sur la microdureté du couple formé substrat/dépôt.

Ensuite nous nous sommes basés sur l'applications de la projection thermique sur les deux pièces en question, tout en relevant l'effet de la projection sur le comportement en corrosion de l'arbre de pompe à eau et sur les propriétés mécaniques du demi arbre de rotor.

En conclusion nous avons mis en relief les différentes recommandations pratiques pour la bonne conduite du procédé de projection thermique et sur les possibilités d'application de certains revêtements sur les deux pièces mécaniques.

## 1) Procédé de projection thermique

### Rappel historique

C'est en 1909 qu'un ingénieur Suisse eut l'idée d'obtenir des revêtements métalliques par projection thermique. Il observa une incrustation de Plomb au tir d'une balle contre un mur en ciment. Plusieurs applications en découlèrent surtout après la seconde guerre mondiale où la pénurie des métaux a poussé les constructeurs à étudier les possibilités d'effectuer des revêtements sur des pièces mécaniques usées. Les propriétés particulières de ces revêtements s'avèrent très intéressantes, notamment dans le cas des frottements. Il en résultât un développement très rapide de cette technique. Actuellement les problèmes d'économie de matière et d'énergie donnent aux revêtements par projection une place importante. Les progrès enregistrés dans les appareils et matériaux de projection sont énormes[1],[2].

### Principe

Le matériau d'apport solide sous forme de poudre ou de fil est porté à l'état liquide ou pâteux au moyen d'une source de chaleur appropriée. Il est en suite pulvérisé sous forme de gouttelettes au moyen d'un courant gazeux. Les particules qui proviennent de la pulvérisation sont véhiculées à grande vitesse, environ 100-200 m/s pour les pistolets à gaz, de l'ordre de la vitesse du son pour les pistolets plasma. Ces particules vont ensuite s'écraser sur un substrat placé à une distance convenable[1].

## Place de la projection thermique parmi les traitements de surface

Parmi les techniques de traitement de surface ,la projection thermique présente des particularités intéressantes , on citera les plus importantes:

\* Les dépôts réalisés par voie électrolytique peuvent aller de la fraction du micron à des épaisseurs généralement faibles par rapport à celles réalisées par projection thermique. Les vitesses de déposition sont relativement faibles et le couple substrat-dépôt est limité pour les revêtements électrolytiques.

\* Les dépôts réalisés par voie chimique permettent de s'affranchir du problème de la forme des pièces . l'uniformité du dépôt est la caractéristique de cette technique , cependant la gamme des matériaux d'apport est limitée . Les plus utilisés sont le Cuivre et le Nickel.

\* Le procédé pvd conduit comme la projection thermique à une grande variété de dépôts sur des substrats qui restent à des températures faibles. Les dépôts sont très purs avec un bel aspect de surface, cependant les installations de cette technique sont très chères. Les vitesses de déposition sont moins élevées qu'en projection thermique . Le traitement des grandes surfaces pose encore des problèmes.

\* Dans le procédé cvd le matériau à recouvrir est porté à température de réaction élevée ,ce qui conduit à des déformations et transformations de structure . L'adhérence

diminue quand la vitesse de déposition augmente. Ce procédé présente les mêmes applications que le procédé pvd.

\* Les autres techniques tel que la trempe superficielle , le rechargement par soudage permettent d'avoir des dépôts épais, mais présentent des limitations quant à la souplesse et l'efficacité des traitements.

Parmi donc les nombreux traitements de surface , la projection thermique est certainement la technique qui présente le plus de souplesse quant :

- au choix du couple substrat/dépôt.
- à la taille des pièces à traiter .
- à la vitesse de déposition élevée .

Cette technique présente néanmoins des limitations du point de vue adhérence faible et présence de contraintes et porosités résiduelles dans le dépôt et à l'interface[3].

#### Les équipements de projection et leurs utilisations

Les équipements de projection thermique commercialisés se divisent en deux catégories , suivant la source de chaleur utilisée: la flamme ou bien l'arc électrique[2].

#### \*)Projection thermique à la flamme

a) Pistolet à poudre: Ce matériel est généralement alimenté avec des fluides tel que l'oxygène comme comburant et l'acétylène, le propane ou l'hydrogène comme combustible. La poudre est distribuée par gravité ou par un distributeur assez élaboré désolidarisé du pistolet utilisant un courant gazeux neutre ou l'un des gaz d'alimentation suscités. Des poudres métalliques appropriées peuvent être projetées, des



oxydes ou des matières plastiques peuvent l'être également . Le support n'est généralement pas affecté thermiquement pendant la projection . Les poudres sont fusionnées dans la flamme , la distance entre la buse du pistolet et le substrat varie entre 100 et 250 mm. L'opération de projection par ce procédé peut s'effectuer soit par projection sans refusion ou bien projection suivie d'une refusion. Ce matériel est très répandu , on le trouve dans toutes les industries. Il permet de résoudre des problèmes d'usure , de corrosion et d'isolation thermique ou électrique. Il est aussi bien utilisé pour traiter les pièces neuves que les pièces usées pour des fins de protection et de récupération[4] .

b) Torche à gaz: Il s'agit d'un chalumeau oxy-gaz, équipé d'un petit récipient contenant la poudre à projeter . Celle-ci tombe par gravité ou elle est entraînée par dépression dans la canalisation de l'un des gaz jusqu'à la flamme ; en la traversant elle est projetée à faible vitesse sur le support. La distance entre la buse et le support est très faible , ce qui fait que la chaleur de la flamme assure la fusion de la poudre et le préchauffage du support. Il en résulte une liaison du matériau d'apport avec le métal de base. Les alliages utilisés avec ce type de matériel sont dits autofusibles à base de Nickel ou de Cobalt additionnés de Cr, W, Si, b etc [4], [2].

c) Pistolet à fil: Ces pistolets se composent d'une partie dite chalumeau et d'une autre dite entraînement. La partie gaz comprend un mélangeur de gaz, une buse à gaz annulaire et une buse à air. Le matériau à projeter passe à travers l'ensemble de ces trois pièces, après avoir été fondu par la flamme et en sortant des trous de la buse à gaz, il est pris en charge par l'air comprimé qui le propulse sur le substrat. Ces pistolets projettent pratiquement tous les matériaux tréfilables, ainsi que des matériaux céramiques sous formes de baguettes ou de cordons. Les dépôts réalisés avec ce matériel exigent une bonne préparation de surface[2].

#### d) Projection thermique à l'arc électrique

L'arc électrique est une source d'énergie qui permet à la projection thermique d'augmenter de façon notable sa gamme de procédés. Deux genres de matériel sont utilisés le pistolet à arc entre fils et le pistolet plasma.

a) Pistolet à arc entre fil: Le principe consiste à faire jaillir entre deux fils un arc électrique, le métal fondu dans l'arc étant en suite projeté par un jet d'air comprimé. Tout un dispositif assure l'alimentation en courant et en fil. Ce procédé exige une atmosphère contrôlée car la haute température de l'arc peut causer des changements de composition. Dans le cas de la projection des aciers, il y a risque de perte de carbone dû à l'oxydation à haute température.

b) Pistolet à plasma: Le pistolet à plasma utilise la décharge électrique d'un arc capable de conduire des courants très intenses entre deux électrodes sous faible tension. Le plasma étant un gaz ionisé à haute température proche de l'équilibre thermodynamique (les électrons et les ions ont la même température). Le matériau est en général introduit dans ce plasma sous formes de fines particules puis il est projeté à très grande vitesse sur le substrat. Ces pistolets permettent de projeter pratiquement tous les matériaux, même ceux qui sont les plus réfractaires. Actuellement, ce pistolet offre la gamme la plus étendue de revêtements et il est présent dans de nombreuses industries [2], [5].

Depuis quelques années de nouveaux matériels et installations sont apparus sur le marché. Les plasma sous vide, les plasma sous atmosphère et température contrôlée etc... constituent les forces de l'avenir de la projection thermique.

## Caractéristiques des matériaux projetés

les principales caractéristiques des revêtements projetés sont :

a) Formation et morphologie d'un revêtement: Les particules qui sont projetées sur un substrat s'écrasent sur ce dernier pour réaliser une juxtaposition de couches . Ces revêtements sont généralement poreux. Plusieurs modélisations ont été faites pour décrire la croissance des couches suivant les conditions de projection et la nature du matériau .Les résultats obtenus sont les suivants:

Le diamètre de la surface aplatie d'une goutte dépend du diamètre initiale de la goutte de sa densité, de sa viscosité ainsi que de sa vitesse au moment de l'impact .

Il s'ensuit que la morphologie d'un revêtement obtenue par projection est caractérisée par l'aspect ondulaire de particules fondues et soudées entre elles ou séparées par des inclusions d'oxydes.[2]

## b) Structure métallurgique du revêtement

les dépôts sont généralement stratifiés s'ils n'ont pas subi un post-traitement. Suivant la technique utilisée ils changent de structure et de composition à cause de l'oxydation ( exemple les projections réalisées dans l'air).

Il est admis que l'oxydation est importante quelque soit le métal , ce qui donne une résistance pratiquement nulle à la traction ( $A\% = 0$ )[2].

c) Adhérence: Les dépôts projetés adhèrent au substrat par un phénomène mécanique et métallurgique qui demande une préparation soignée de la surface. Pour les matériaux dont l'adhérence est faible et dans le cas où les coefficients de dilatation sont très différents, des sous couches d'accrochage sont utilisées pour une bonne adhérence. Un traitement de diffusion peut rendre compte de la nature de la liaison du revêtement.

d) densité: la dimension des particules et leur vitesse influent sur la densité du dépôt. Elle est également fonction du taux d'oxyde formé.

La porosité réduit l'allongement du revêtement. Des pores interconnectés sont indésirables pour la protection anti-corrosive. L'existence de porosité à l'interface peut diminuer l'adhérence du revêtement. Cependant un dépôt poreux peut trouver des applications intéressantes en frottement.

e) Contraintes résiduelles: Les contraintes résiduelles sont généralement dues au retrait pendant le refroidissement. Elles peuvent être la cause d'un écaillage du revêtement et une mauvaise adhérence. Pour minimiser ces contraintes il faut réduire les gradients de température par un préchauffage avant la projection et maintenir le plus possible le revêtement à une température basse[2].

f) Dureté: La valeur de la dureté d'un dépôt est déterminée par macrodureté . Elle est généralement influencée par les duretés intrinsèques des particules, le degré de cohésion entre particules ,le taux de porosité et les inclusions d'oxydes[2],[3].

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

## 2) Critères de choix d'une solution de métallisation

La démarche de choix d'une solution de métallisation doit tenir compte de plusieurs facteurs dont les principaux sont:

- \* la nature des matériaux utilisés
- \* le comportement en sollicitation [3].

\*) Nature des matériaux utilisés : Pratiquement tous les alliages ferreux peuvent se revêtir, pourvu qu'on choisisse la matière de revêtement convenable. Avec les aciers cémentés ou nitrurés, il faut enlever la couche superficielle par rectification. Le métal d'apport peut se trouver sous différentes formes et la plus répandue est la poudre. La connaissance de la composition et les caractéristiques des poudres est primordiale pour mener à bien le procédé de métallisation. [2], [3], [4].

a) Composition chimique de la poudre: La composition de la poudre a une grande influence sur les propriétés du dépôt. Le critère de sélection d'alliage pour une application donnée, dépend essentiellement du type de sollicitation rencontrée, du métal de base et du prix du matériau. En général, les alliages ferreux nécessitent une résistance à la corrosion combinée à une résistance à l'usure. L'utilisation de poudre inoxydable ou à base de Nickel ou Cobalt est fort recommandée. Pour les applications à haute température les alliages à base de Cobalt sont très intéressants. La résistance à l'oxydation à haute température des alliages ferreux requiert comme métal d'apport les alliages à bases de Nickel. La résistance aux autres types de sollicitation peut trouver des solutions en tenant compte de la nature et du pourcentage des additifs et constitutifs des poudres. [6]

L'adjonction d'additifs composites ou poudres composites trouve sa justification dans:

- l'élimination de ségrégation par dispersion lors de la fusion .
- la réduction de l'oxydation ou de la décarburation pendant la projection .
- l'augmentation de la limite élastique du revêtement.
- l'activation des réactions exothermiques pendant le chauffage[6].

b) Caractéristiques de la poudre: L'atomisation par l'eau et par les gaz sont les méthodes les plus utilisées pour la production des poudres de projection . Ces méthodes offrent une large gamme de taille et de forme de poudre . De ce fait pour chaque type d'équipement, sont associées des granulométries et des formes particulières . La projection plasma utilise des poudres fines car le temps de séjour dans la torche est très faible. Les poudres très fines présentent des surfaces spécifiques grandes, par conséquent la tendance à l'oxydation est grande aussi. La forme de la poudre et son état de surface ont une importance non négligeable ; une poudre sphérique est bénéfique pour l'intégrité du revêtement ; elle s'écoule mieux qu'une poudre irrégulière qui abaisse la densité apparente et ralentit l'écoulement par gravité[6],[2],[5].

#### \*) Comportement en sollicitations

##### a) Comportement en corrosion

Corrosion de contact: La corrosion de contact apparaît lorsque deux surfaces subissent des microglissements alternés et non fonctionnels et sous l'effet de charge ou de



vibration il y a élévation de température et oxydation .Les oxydes formés viennent par la suite éroder la surface[9],[3].

Corrosion à température ambiante: elle est causée par des hétérogénéités liées au matériau, au milieu ambiant, aux conditions d'emploi et au temps. Pour lutter contre ce type d'usure, on peut protéger le métal par un autre résistant bien au milieu agressif[10].

Corrosion à haute température: A haute température on peut protéger le métal oxydable par un métal ou alliage qui peut diffuser dans le substrat pour produire un alliage résistant bien à l'oxydation. On peut également protéger par un revêtement réfractaire ou non conducteur de chaleur[10].

#### b)Comportement en frottement

Les revêtements obtenus sans refusion à l'état brut de projection peuvent être poreux, ce qui permet de retenir les lubrifiants aux niveaux des surfaces concernées , ceux-ci leur attribue de bonnes qualités de frottement. Les revêtements avec refusion présentent peu de porosité, mais sont de structure hétérogène. Cette technique est employée dans le cas de la corrosion abrasion sévère et plus particulièrement lorsqu'il est nécessaire d'isoler le substrat de l'environnement. En général il est impératif de connaître les mécanismes d'usure des surfaces métalliques et leurs aspects tribologiques et métallurgiques, afin de pouvoir proposer un remède adéquat, Il nous a paru donc nécessaire de faire un rappel de l'usure des surfaces métalliques[5],[2].

### 3) L'usure des surfaces métalliques

#### Introduction:

L'usure des surfaces métalliques est la perte progressive de matière de la surface active d'un corps ,par suite du mouvement relatif d'un autre corps sur cette surface. L'usure est affectée par plusieurs facteurs qui déterminent son taux et sa nature . Le mode de contact qu'il soit ponctuel, linéaire ou surfacique, conditionne la fatigue des couches superficielles et l'écoulement de chaleur entre les deux surfaces en contact. La microgéométrie de surface influe considérablement sur le taux d'usure car la surface réelle de contact est différente de celle apparente . Les fluctuations de charge influent sur la valeur du coefficient de frottement. Les vitesses des déplacements relatifs des corps influent sur la température superficielle ; la résistance au frottement diminue quand la température augmente. La composition chimique , la structure métallurgique et les propriétés mécaniques des matériaux en contact, conditionnent eux aussi la nature et le taux d'usure par la complexité des couches superficielles qui peuvent se former lors du frottement.[11]

Les effets observés après usure sont très variés ,on citera les principaux:

- \* L'usure augmente la résistance au déplacement et une partie d'énergie est dissipée en chaleur.
- \* Les variations du coefficient de frottement le long de la surface peut donner lieu à des vibrations perpendiculaires à la surface de contact .

\* la chaleur dissipée lors du frottement peut augmenter la température aux points de contact et conduire à des microsoudures.

\* Les aspérités superficielles d'usure peuvent s'écrouir et éroder la surface pour donner lieu à des modifications géométriques de l'état de surface.

\* Les contraintes et les cycles thermiques ont pour effets de transformer les couches superficielles. Les changements rapides de température peuvent être à l'origine d'apparition de nouvelles phases d'oxydation et de changement de composition chimique.[11]

#### Différentes formes d'usure des surfaces métalliques

Les mécanismes d'usure sont dûs à des phénomènes isolés ou simultanés dont les principaux sont[12]:

##### A) L'usure adhésive

Aspect tribologique: L'usure adhésive est due au cisaillement par frottement des microsoudures entre deux aspérités en contact. On rencontre en général deux régimes d'usure : l'usure sévère qui apparaît quand la résistance au cisaillement de la microsoudure est supérieure à la résistance du corps le plus tendre. Il en résulte un transfert de matière par rupture et détachement de la microsoudure. Ce transfert de matière favorise l'usure abrasive des surfaces. L'usure modérée apparaît lorsque la microsoudure est plus fragile que les deux corps en contact. Elle est alors le siège d'un cisaillement, mais sans aucun transfert de matière. L'usure adhésive est toujours accompagnée d'un échauffement, elle se traduit

visuellement par l'aspect caractéristique d'errailage dû à l'arrachement et par des zones colorées sombres orientées dans le sens du glissement .

Aspect métallurgique: La compatibilité métallurgique des couples de matériaux a été reliée à leur comportement en usure adhésive et aux frottements. C'est ainsi que des relations entre propriétés tribologiques et capacité de donner des alliages ont été mises en évidence et que les bons couples anti-usures sont ceux qui possèdent une faible énergie d'interaction .

Méthode de lutte contre l'usure adhésive: Au niveau du choix du couple de matériaux des surfaces en frottement , il y a lieu d'utiliser des couples possédant de faible interaction, donc une énergie d'adhésion faible . Il y a intérêt aussi à utiliser des matériaux durs afin de diminuer le taux et la grosseur des particules d'usure . Il est particulièrement intéressant d'interposer entre les deux matériaux un film à faible résistance au cisaillement .

#### B) L'usure abrasive

Aspect tribologique: L'usure abrasive dite à trois corps est due à des particules dures, qui provoquent des rayures caractérisées à la fois par un déplacement de matière par déformation plastique et son enlèvement par cisaillement et formation de micro-copeaux .

L'abrasion tend à produire des modifications dans la structure et l'orientation des couches superficielles . Pour les métaux abrasés la structure est semblable à celle produite par le laminage .

L'écrouissage de la surface augmente graduellement la résistance à l'abrasion. Les surfaces soumises à l'abrasion présentent des sillons dans le sens du glissement, qui peuvent aller de la rayure légère au sillon profond.

La dimension et la forme des grains abrasifs influent sur la résistance à l'usure. Les gros grains et les particules rugueuses diminuent la résistance à l'abrasion. Le taux d'usure est en générale proportionnel à la charge et inversement proportionnel à la dureté des surfaces.

Aspect métallurgique: La résistance à l'abrasion des aciers au carbone et des aciers faiblement alliés augmente avec la teneur en carbone. Celle des aciers hypoeutectoides augmente avec la teneur en perlite, d'autre part lorsque la distance interlamellaire de la perlite diminue la résistance augmente. Les traitements thermiques de trempe augmentent la résistance, tandis que le revenu la diminue.

Le durcissement par écrouissage dû à l'abrasion augmente la résistance à l'usure. Les éléments donnant lieu à des carbures dispersés améliorent la résistance à l'usure des aciers faiblement alliés. Pour les aciers fortement alliés il convient d'éviter la mauvaise dispersion des carbures et leur accumulation aux joints de grains.

#### Méthode de lutte contre l'usure abrasive

\* Une bonne étanchéité et une filtration régulière des lubrifiants permet d'éviter l'apport des particules abrasives aux surfaces de frottement.

\* Un usinage approprié des surfaces frottantes permet d'araser les aspérités aiguës dans le cas d'abrasion à deux corps.

\* La porosité des surfaces permet de retenir les grains abrasifs .

\* L'augmentation de la dureté des surfaces et une régulière dispersion des phases apportent une amélioration à la résistance.

### C) L'usure corrosive

L'usure est due à l'enlèvement de matière par frottement mécanique des produits de réaction formés par attaque chimique des surfaces . Cette attaque est provoquée par des agents corrosifs contenus dans l'ambiance (gaz de combustion) ou par oxydation des lubrifiants . Le mécanisme de l'usure corrosive suit deux étapes . La première est caractérisée par l'attaque chimique des surfaces donnant lieu à des produits faiblement adhérents, mais très durs résistants temporairement à l'usure . La seconde étape est caractérisée par l'enlèvement de ces produits , ce qui permet un renouvellement de cette attaque. En conclusion le choix des additifs des lubrifiants et des surfaces de frottement doit s'opérer dans les conditions optimales minimisant l'usure.

### Méthode de lutte contre l'usure corrosive

\* La lubrification judicieusement choisie résout en générale le problème d'usure en éliminant les agents corrosifs acides par une neutralisation avec des additifs basiques et en ajoutant des anti-oxydants protégeant le lubrifiant.

\* Un revêtement anti-corrosif permet aussi la réduction ou l'élimination de la dégradation des surfaces.

## 0) Usure par fatigue

On distingue l'usure par fatigue mécanique des surfaces soumises à des charges cycliques élevées en frottement lubrifié, et l'usure par fatigue thermique des surfaces soumises à des gradients thermiques en frottement sec ou lubrifié.

a) Fatigue mécanique superficielle: Elle est caractérisée par l'apparition de petits criques ou cavités à la surface du métal. Ce phénomène est lié à l'état des contraintes et leur distribution à la surface et surtout à l'homogénéité du métal près de la surface. En effet la présence d'inclusions, la concentration de dislocations sur certains sites constituent autant de causes de fragilisation du métal à la surface et d'amorces de fissures. Les contraintes résiduelles dues aux traitements thermiques, localisées à la surface du métal peuvent donner lieu aussi à des microfissures. Les rugosités de surface constituent des amorces de fissures par effet d'entaille. Le milieu ambiant peut aggraver par corrosion le processus de propagation de fissure.

### Méthode de lutte contre l'usure par fatigue mécanique

\* Les matériaux résistants à la fatigue et les traitements superficiels appropriés améliorent la tenue des contacts.

\* Une augmentation de l'épaisseur du film de lubrification améliore la résistance à la fatigue.

b) La fatigue thermomécanique: Ce type d'usure affecte généralement les surfaces dures de matériaux fragiles. Les détériorations se présentent sous forme de fissures superficielles réparties le plus souvent perpendiculairement

à la direction de glissement . Les effets thermiques favorisent les dépassements de la résistance à la traction du matériau , quand ils sont combinées aux effets mécaniques de l'usure adhésive, peuvent conduire à l'usure de la surface.

L'analyse de chacune des principales formes d'usure, permet de rendre un diagnostic sur l'origine des détériorations et de proposer un remède adéquat pour lutter contre une usure ultérieure, par la démarche suivante :

- \* Sélection des types d'usures possibles en fonction des conditions d'utilisation.

- \* Relèvement des empreintes par un diagnostic visuel ou au microscope ( présence de débris d'oxydes etc ... ).

- \* Recherche des causes d'usure possibles (mauvaise utilisation ,vibration ,mauvaise lubrification etc ...).

- \* comparaison de la forme d'usure avec les cas connus pour faciliter le diagnostic

- \* Enfin proposition d'un remède.



PARTIE

EXPERIMENTALE

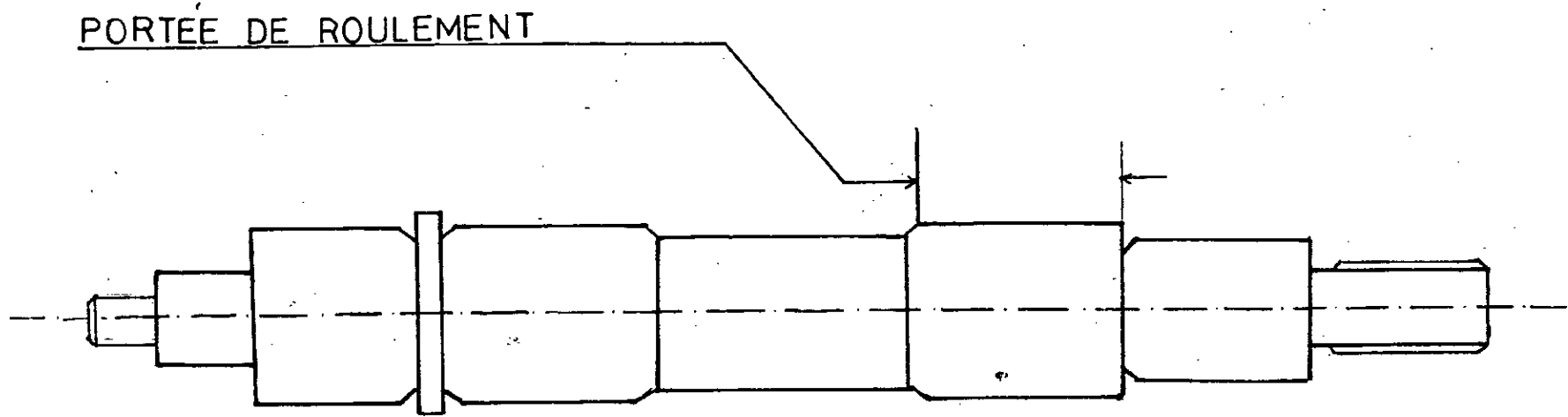
## 1) Position du problème

### a) fonctionnement des deux pièces dans leurs système:

\* La pompe à eau permet la circulation de l'eau dans un circuit pour assurer le refroidissement du moteur lors du fonctionnement . L'arbre d'entraînement fig(1) est supporté dans le carter de pompe par deux roulements à billes , séparés par une entretoise en acier . Le roulement extérieur est suivi d'un déflecteur reposant sur un épaulement de l'arbre . Le roulement intérieur est maintenu en position par un arrêtoir et un joint d'arrêt pour absorber toute poussée de l'arbre[13] . L'analyse des états de surface de l'arbre a conduit aux constatations suivantes : l'usure des portées de roulements , usure de la partie entre portées de roulement au contact avec l'entretoise et Dégradation corrosive de l'extrémité de l'arbre.

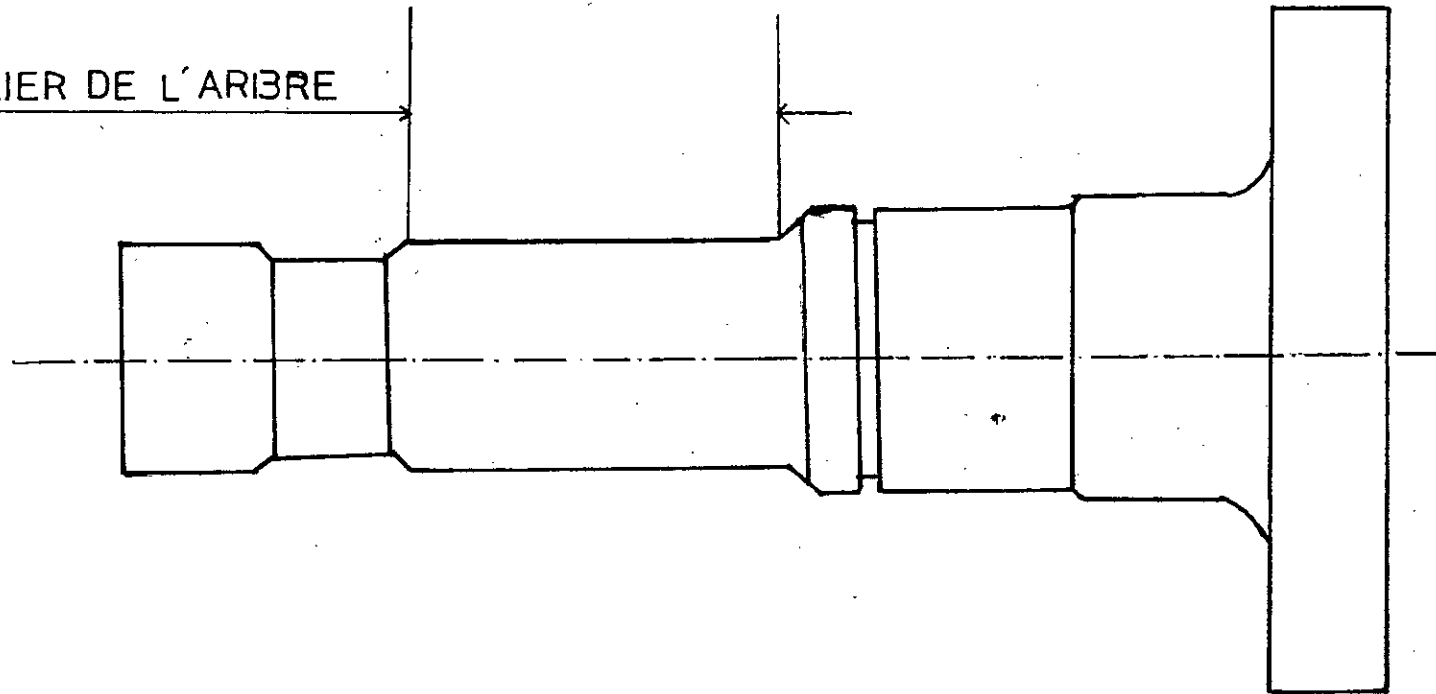
-Le turbochargeur permet d'augmenter la puissance du moteur en assurant une meilleur économie du combustible grâce à l'emploi des gaz d'échappements. En effet celui-ci est équipé d'une turbine et d'un train d'engrenage et quand l'énergie thermique des gaz est insuffisante , le moteur entraîne le turbochargeur par l'intermédiaire du train d'engrenage .Lorsque le moteur se trouve en pleine charge l'énergie thermique des gaz est suffisante pour entraîner le turbochargeur. Le demi arbre de rotor fig(2) est un élément situé à la limite du train d'engrenage permettant de transmettre le mouvement à la turbine. La vitesse de rotation de l'arbre peut atteindre 22000 tr/mn[14].

-24-



FIG(1) : ARBRE DE POMPE A EAU

PALIER DE L'ARBRE



FIG(2): DEMI ARBRE DE ROTOR

L'analyse de l'état de surface montre une usure du palier de l'arbre caractérisée par des zones sombres d'aspect éraillé et une usure prononcée localement dans une partie frottante avec une bague. Les modifications dimensionnelle sont estimées à quelques centièmes.

**b) Analyse de la composition chimique des deux pièces:**

-L'analyse de la composition chimique de l'arbre de pompe a donné les résultats suivants :

| Fe    | C    | Cr    | Ni    | Si   | Mn   | S    |
|-------|------|-------|-------|------|------|------|
| 65.75 | 0.06 | 18.10 | 10.96 | 0.54 | 2.31 | 0.41 |

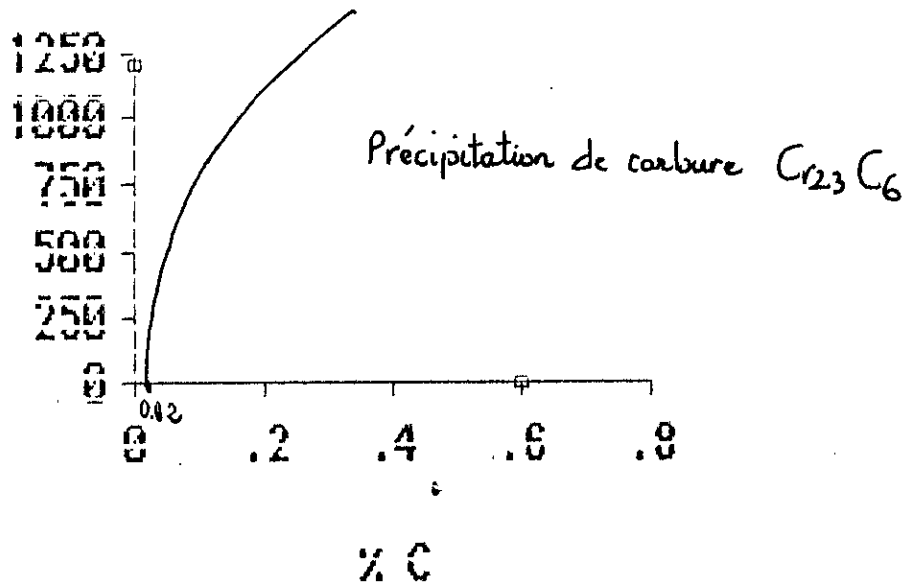
**Tab 1**

La désignation correspondante : Z6CN18.9

Il apparaît donc d'après l'analyse que l'arbre de pompe est un acier inoxydable austénitique. L'austénite métastable de ce type d'acier peut évoluer à la suite d'un écrouissage ou au cours d'un traitement thermique. La composition de l'acier et le taux de sollicitation commandent la transformation de l'austénite qui diminue la résistance à la corrosion intergranulaire, la figure (3) indique le domaine d'existence de la solution de carbone dans les alliages fer-chrome [3]. En effet si cet acier est porté à une température inférieure à la limite de solubilité des carbures de chrome, il y a précipitation dans les joints de grains. Il en résulte une susceptibilité préférentielle à la corrosion au voisinage des joints de grains.

\* Celle de l'échantillon du demi arbre de rotor a donné les résultats suivants:

FIG(3)



Limite de solubilité du carbone dans les alliages Fer Chrome.

| Fe    | C     | Mn   | Si   | P      | S     | Al   |
|-------|-------|------|------|--------|-------|------|
| 97.09 | 0.156 | 0.82 | 0.20 | 0.0066 | 0.008 | 0.04 |

Tab 2

La désignation correspondante est XC12. Le demi arbre de rotor est un acier ordinaire doux .La difficulté d'usinage pour le prélèvement d' échantillons prouve que la pièce était trempée. Ce qui a conduit à utiliser le chalumeau pour la coupe . Lors de l'usinage qui s'en est suivi une détrempe a été constatée due au chauffage.

c)Analyse de l'usure des deux pièces :

\* Au niveau des portées de roulement, le mouvement rotationnel provoque une répartition de charge qui modifie la position d'équilibre de l'assemblage . Il en résulte des microglissements alternés et élévation de température aux surfaces de contact , ce qui provoque une oxydation superficielle et par la suite les particules d'oxydes viennent éroder la surface .L'usure des portées peut provoquer des vibrations de l'arbre ce qui contribue à une dégradation rapide des portées et une rupture de l'étanchéité de la pompe d'où l'infiltration de l'eau qui est probablement à l'origine de la dégradation corrosive constatée à l'extrémité de l'arbre .

On conclue que l'usure des portées de roulements est à l'origine de la dégradation des états de surface de l'arbre, par conséquent le remède qui sera proposé doit s'appuyer surtout sur un revêtement limitant l'usure des portées de roulements en résistant aux pressions et à l'oxydation.

Le XC12 est un des aciers de cémentation et d'ailleurs lors de l'usinage on a remarqué une grande dureté de la surface. Lorsque la pièce est en fonctionnement il y a risque de détrempe superficielle. La résistance aux frottements de la pièce diminue surtout au niveau des zones de contact avec la bague en acier. Les vitesses de rotation élevées atteignant les 22000 tr/mn favorisent l'usure adhésive. Si cette dernière est combinée à l'usure abrasive la dégradation de la surface du palier peut s'accroître d'une manière significative.

d) Choix des poudres de revêtement:

\* Pour les portées de roulement de l'arbre de pompe où l'en recherche une grande résistance aux pressions et à l'oxydation, la poudre lubrotec série 19985 est conçue pour cet usage par le fournisseur. La composition de cette poudre étant à base de Ni et Cr c'est donc une poudre qui permet une bonne résistance à l'oxydation.

\* La poudre de revêtement du demi arbre de rotor qui permet de diminuer l'usure de la pièce et d'augmenter la résistance aux frottements est la XUPER Bronzotec qui est probablement la plus indiquée (recommandation du fournisseur). Il faut noter aussi que le couple bronze-acier est souvent utilisé pour combattre l'usure adhésive.

Il serait très utile d'étudier l'influence de la projection thermique sur le comportement en corrosion humide du couple substrat/dépôt de l'arbre de pompe et sur les propriétés mécaniques du demi arbre de rotor.



## 2) Matériel utilisé

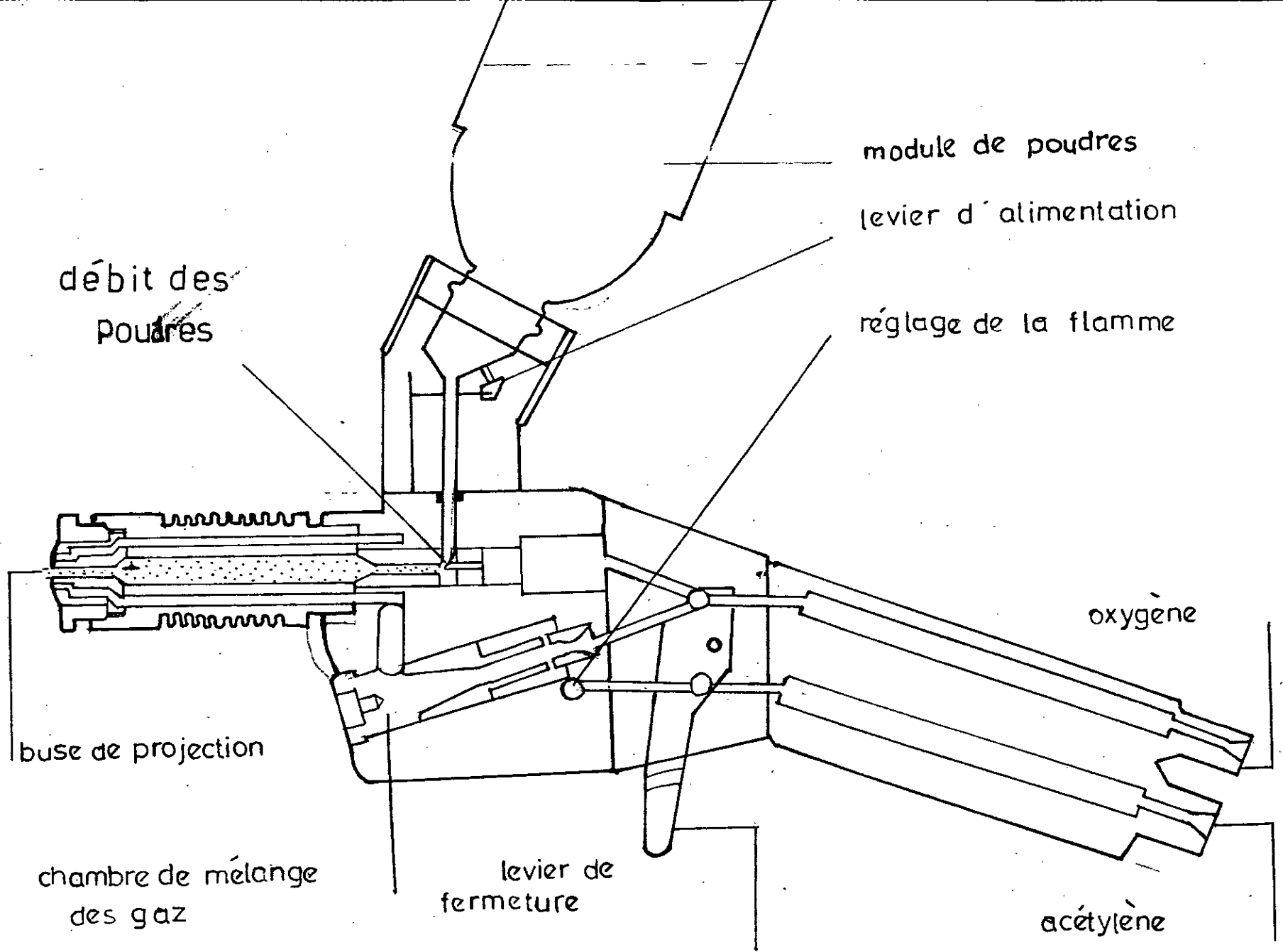
a) Pistolet ROTOTEC80: C'est un pistolet de projection thermique utilisant une flamme oxy-acétylénique fig(4). Il s'installe sur un tour mécanique permettant la recharge des pièces cylindriques. Il utilise des alliages micropulvérisés conçus spécialement pour ce procédé . Le débit des poudres se fait par gravité. La mise au point de ce pistolet s'appuie surtout sur le réglage de la flamme neutre .[15]

b) Poudres utilisées en projection: Les poudres utilisées dans notre étude sont:

\* ULTRA BOND 50000: c'est une poudre d'accrochage projetée avant la poudre de revêtement. Celle-ci est composée de :Ni,Al et Ti. Elle est projetée sur une épaisseur de 0.1 à 0.2 mm . La propriété d'auto-accrochage résulte d'une relation synergétique entre le Nickel et l'Aluminium qui se combinent chimiquement dans une réaction exothermique pour former du Nickel-Aluminure pendant la projection. La réaction exothermique assure un apport supplémentaire de chaleur aux particules fondues, ce qui permet des microsoudages avec le métal de base.

\* LUBROTEC 19985: c'est une poudre utilisée pour les portées de roulement . Elle présente une bonne résistance aux frottements , aux pressions et à certaines formes de corrosion . Elle est composée de Ni,Fe,Cr et Si.

\* XUPER BRONZOTEC 19868 :c'est une poudre utilisée pour les portées en bronze et pour une résistance maximale à l'usure par frottement .Elle est composée de Cu,Al et Ni.[15]

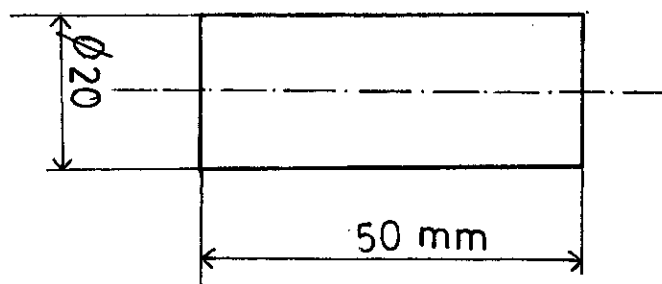


FIG(4) : PISTOLET ROTOTEC 80

c)Eprouvettes utilisées pour l'étude des paramètres de projection:

Onzes échantillons identiques d'une nuance XC10 ont été confectionnés en tenant compte de la commodité des essais nécessaires pour cette étude .

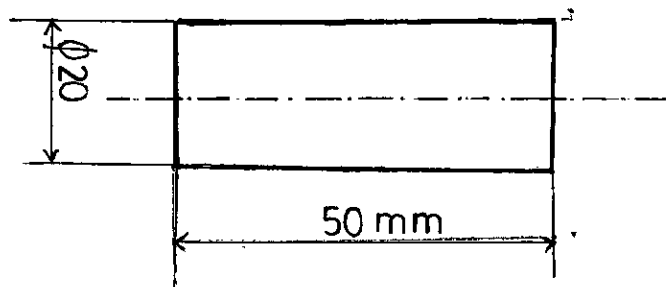
Schéma de l'éprouvette:



d)Eprouvettes pour la projection sur Z6NC18.9 et XC12

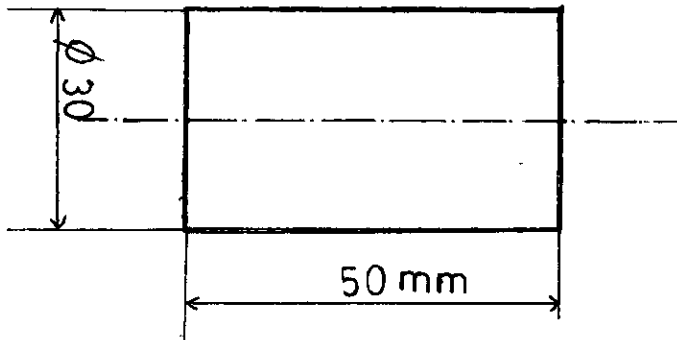
\* Deux éprouvettes cylindriques de l'acier Z6NC18.9

Schéma de l'éprouvette:



\* Deux éprouvettes cylindriques de l'acier XC12 trempées à l'eau après un maintien de 40 mn à 980 °C

Schéma de l'éprouvette:



### 3) Mise en oeuvre de la projection

#### a) Préparation de la surface

\* Nétoyage de la surface: on a utilisé le trichloro-éthylène ( $\text{CHCl}_3$ ) pour le dégraissage des échantillons qui ont été contaminés pendant l'usinage. La technique utilisée est l'immersion dans un bain du solvant maintenu à une température de 60 °C pendant 45 mn. par la suite les échantillons sont rincés et séchés.

\* Rugosification de surface: Parmi les différentes méthodes de rugosification, nous avons utilisé le filetage pour sa facilité de préparation et parce qu'il est recommandé pour les épaisseurs supérieures à 5/10. Les indications de filetage [15] sont :

- Pas de filetage = 0.7 mm
- Profondeur de passe = 0.35 mm

## b) Paramètres de projection

Les paramètres recommandés par le constructeur [15] sont :

- Une distance de projection  $d = 200$  mm .
  - Une vitesse linéaire  $V = 30$  m/mn ( la vitesse de rotation se calcule en connaissant le diamètre de l'échantillon ) .
  - Une vitesse d'avance  $V_a = 5$  mm/tr .
  - La pression d'oxygène = 4 bars , celle de l'acétylène = 0.7 bars
- A chaque fois qu'on fait varier un paramètre les autres sont maintenus constants.

Les principaux paramètres choisis pour leur intérêt pratique sont :

\* La distance de projection: on a choisi donc trois distances différentes 100, 200 et 300 mm .

Comme le diamètre des échantillons est de 20 mm alors la vitesse de rotation sera de  $30 \cdot 1000 / 20 \cdot 3.14 = 470$  tr/mn

On a fixé la vitesse du tour mécanique de l'expérimentation à 500 tr/mn qui est la seule vitesse proche de 470 tr/mn

\* La vitesse de rotation: On a opté pour trois vitesses différentes 125, 500 et 1250 tr/mn.

\* la vitesse d'avance: Dans ce cas trois vitesses différentes sont prises en considération 2,5 et 7 mm/tr.

\* Débit des gaz:

- Un échantillon pour une flamme réductrice .
- un échantillon pour une flamme oxydante .

Les poudres utilisées sont l'ULTRABOND 50000 comme couche d'accrochage et la Lubrotec 19985 comme poudre de revêtement.

c) Application sur le XC12 et Z6NC18.9

\* Projection de la poudre bronzotec 19868 sur un échantillon du XC12 trempé. Comme le diamètre de l'échantillon est de 30 mm alors la vitesse de rotation sera égale à  $30 \times 1000 / 30 \times 3.14 = 314$  tr/mn

\* Projection de la poudre Lubrotec sur un échantillon du Z6NC18.9

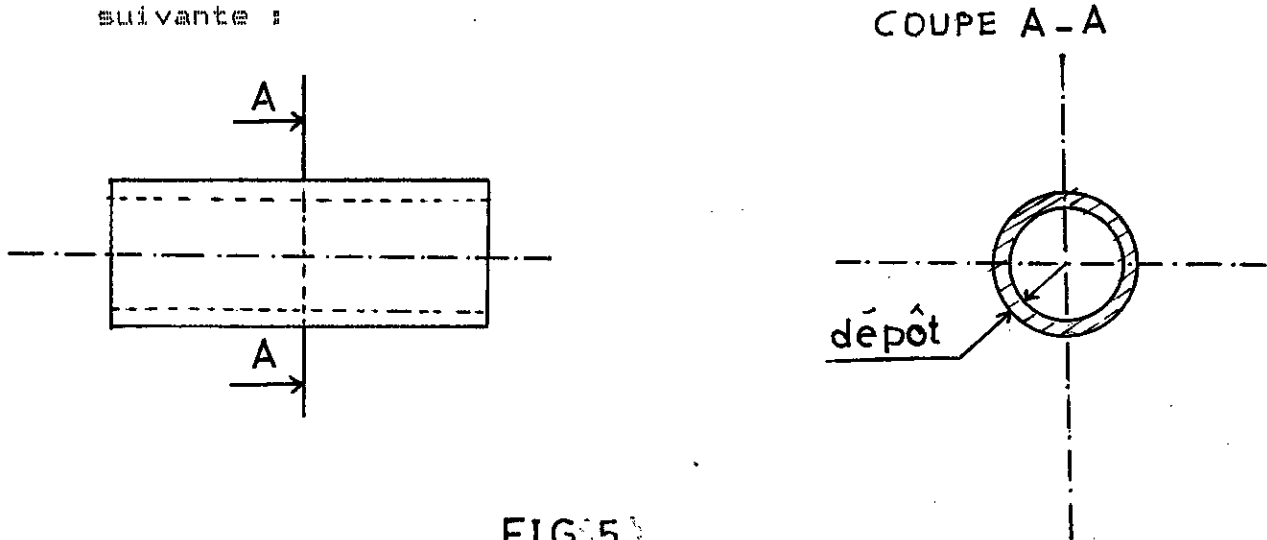
Les conditions sont:

- Distance de projection : 200 mm
- Vitesse d'avance : 5 mm/tr
- Flamme neutre (Pression d'oxygène= 4 bars ,pression d'acétylène= 0.7 bars).

#### 4) Essais de Caractérisation

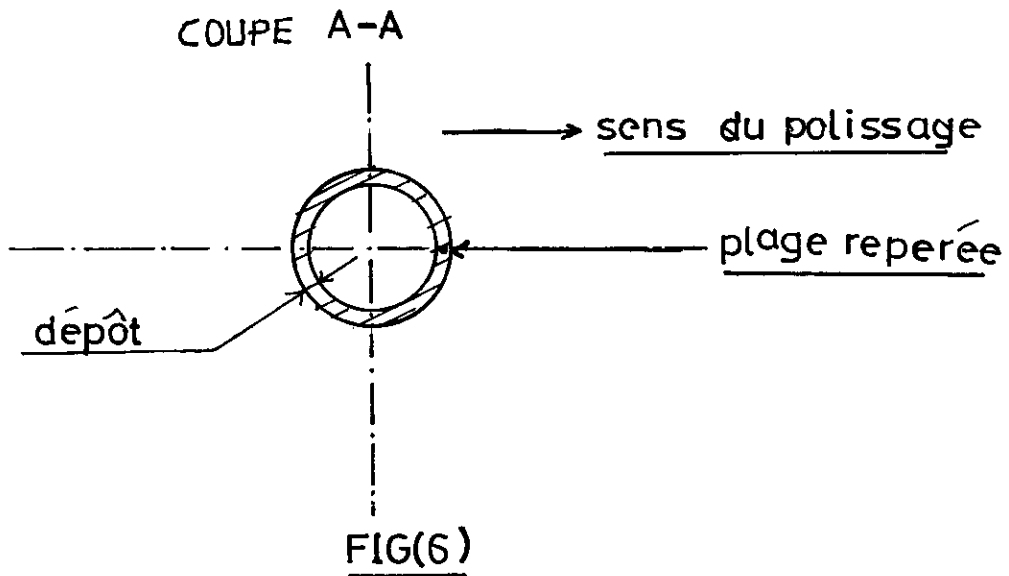
##### A) Observations micrographiques:

Après l'opération de projection, les échantillons ont été découpés à l'aide d'une microtronceuse selon la figure (5) suivante :



FIG(5)

On les a ensuite enrobés pour ne pas altérer l'interface lors du polissage. Sur chaque échantillon enrobé a été repérée une plage d'observation. On a ensuite effectué le polissage avec les papiers abrasifs 320, 600 et 1000 dans le sens indiquée par la fig(6) ci-dessous:



FIG(6)

Entre chaque passe du polissage ,un nettoyage aux ultrasons a été effectué . La finition a été faite avec la patte diamantée 3µ de granulométrie . A la fin les échantillons ont été de nouveau nettoyés aux ultrasons ,rincés puis séchés au séchoir.

Pour l'observation micrographique , les échantillons préparés pour l'étude des paramètres de projection n'ont pas subi d'attaque chimique, tandis que l'échantillon Z6NC18.9 a subi une attaque avec une solution à base d'acide chlorhydrique, acide nitrique et acide acétique, alors que l'échantillon XC12 a subi une attaque au Nital. Les résultats des observations sont indiqués sur les figures 7 à 22.

#### Résultats des observations et interprétations:

##### a) paramètres de projection:

##### \* Influence de la distance de projection:

Les figures 7,8 et 9 montrent que l'éloignement de la buse de projection par rapport à l'échantillon conduit à :

- Une augmentation de la porosité du dépôt .
- une diminution de la cohésion entre les particules .
- Une discontinuité de la liaison substrat/dépôt (risque de rupture au niveau de l'interface).
- Une présence de films d'oxydes sur les contours des gouttelettes non fondues.

Conclusion: La porosité est minimale pour une faible distance, mais augmente relativement avec cette dernière. Ce résultat n'est pas inattendu puisque pour les faibles distances les particules sont suffisamment plastiques pour permettre une densification du revêtement. Pour les



FIG(7) : x 250



d = 100 mm )

FIG(8) : x 250

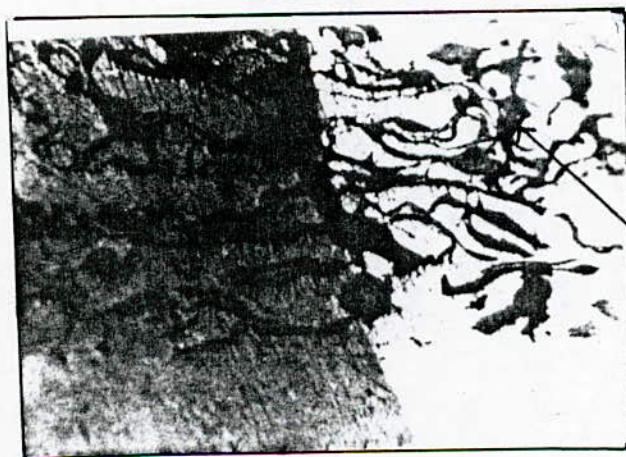


d = 200 mm )

dépôt

substrat

FIG(9) : x 250



d = 300 mm )

porosité

influence de la distance de projection

grandes distances les particules sont plus refroidies ,plus rigides et ont de faibles vitesses d'impact, par conséquent la porosité et l'oxydation augmentent et la cohésion entre particules diminue[08]. L' excès de chauffage pour les faibles distances cause une dilatation différentielle plus ou moins importante entre le substrat et le dépôt (les coefficients de dilatation sont :  $15.1 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  pour la poudre d'accrochage et  $11.6 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  pour le substrat(XC10)). Il en résulte une discontinuité de la liaison.

\*) Influence de la vitesse de rotation:

Les figures 10,11 et 12 montrent que si la vitesse augmente on aura :

- Une diminution de la porosité du dépôt .
- Une augmentation de la cohésion entre particules et entre les sous-couches du dépôt.
- Un meilleur étalement des particules .
- Une faible oxydation des particules.

conclusion: Les faibles vitesses de rotation favorisent un échauffement excessif dans la zone de projection. Il en résulte une augmentation de la température du couple substrat/dépôt ce qui augmente le temps d'exposition à l'oxydation d'ou la diminution de la cohésion entre particules et la densité du dépôt [17] .Par ailleurs le mauvais étalement des particules sur le substrat causé par les faibles vitesses nuit à l'adhérence du dépôt .

FIG(10): x 250

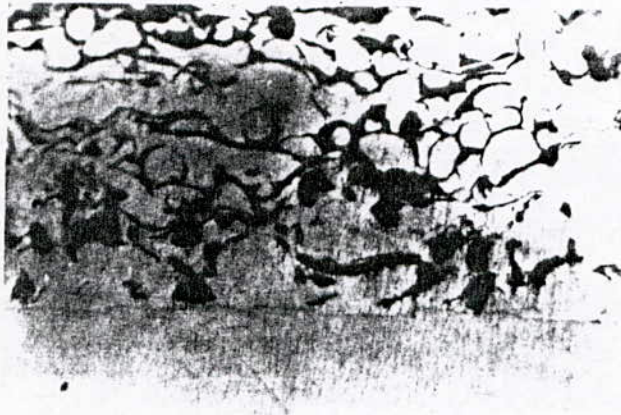
(Vr = 125 tr/mn)



porosité

FIG(11): x 250

(Vr = 500 tr/mn)

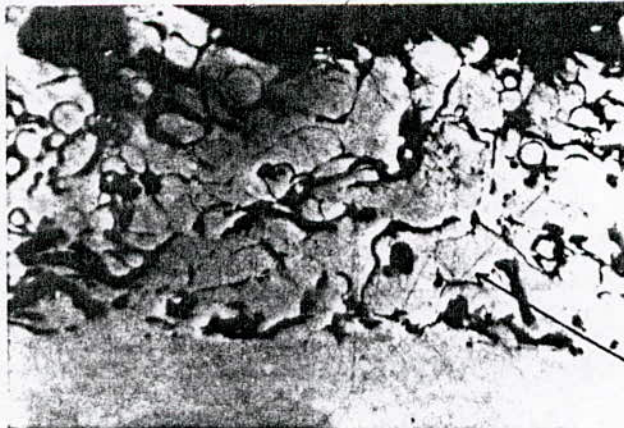


dépôt

substrat

FIG(12): x 250

(Vr = 1250 tr/mn)



étalement de  
particules

influence de la vitesse de rotation

\*) Influence de la vitesse d'avance:

Les figures 13, 14 et 15 montrent :

-Une diminution de la porosité jusqu'à une certaine vitesse d'avance de la buse de projection puis une augmentation quand celle-ci devient importante .

-Une discontinuité de la liaison pour les faibles vitesses d'avance .

-Une faible cohésion du dépôt quand la vitesse est trop faible ou quand elle est trop grande .

Conclusion: Un temps de maintien long dans la zone de projection favorise l'oxydation des particules , ce qui diminue la cohésion et la densification du dépôt . L'excès de chauffage est à l'origine de la discontinuité de la liaison. Un mouvement rapide du pistolet provoque une turbulence des gaz de combustion ce qui conduit à un mélange avec de l'air. Il s'en suit une augmentation de l'oxydation des particules [17].

\*) Influence de la nature de la flamme:

Les figures 16 et 17 montrent :

-Une diminution importante de la porosité pour une flamme réductrice.

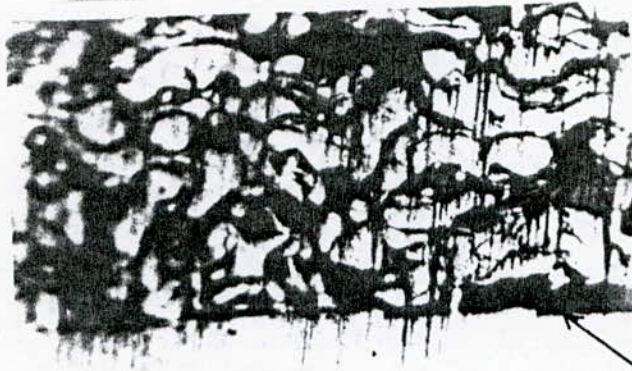
-Une augmentation de l'oxydation et de la porosité pour une flamme oxydante.

Conclusion: L'excès d'acétylène dans le premier cas a permis la réduction des oxydes formés et donc une grande densification du dépôt.

Par contre l'excès d'oxygène dans le deuxième cas a augmenté l'oxydation et a conduit à une diminution de la cohésion du dépôt et de l'adhérence au substrat.

FIG(13): x 250

(Va = 2,5mm/tr)



rupture de la  
liaison

FIG(14): x 250

(Va = 5mm/tr)

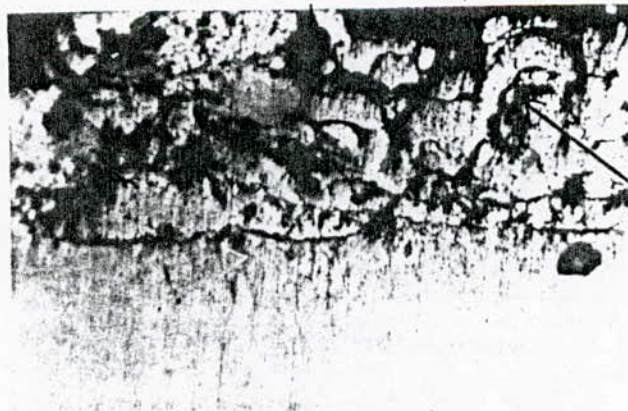


dépôt

substrat

FIG(15): x 250

(Va = 7mm/tr)



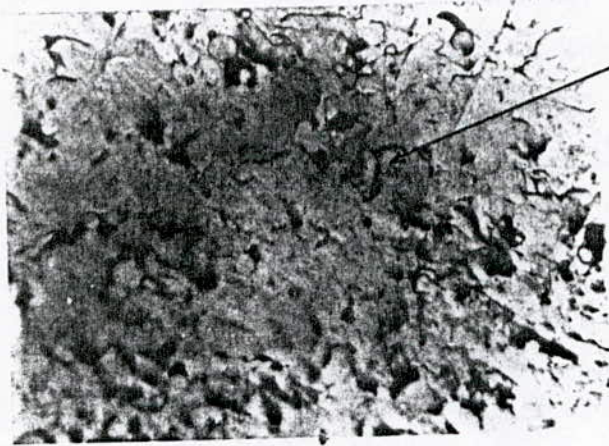
porosité

influence de la vitesse d'avance

FIG(16):x 250

entassement des  
particules

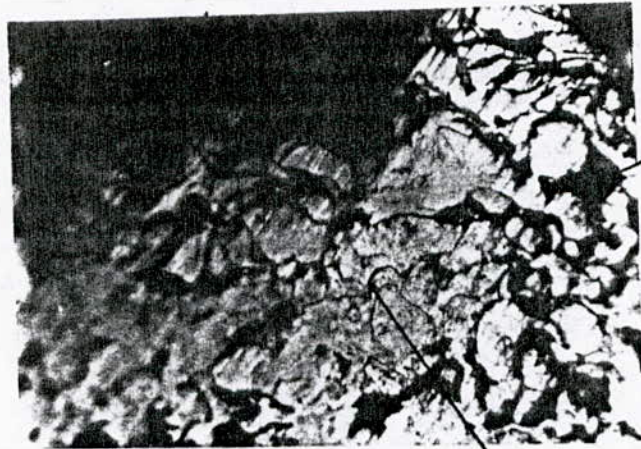
flamme réductrice



FIG(17) : x 250

porosité

flamme oxydante



oxydes de projection

influence du débit des gas

\*) Observation en coupe longitudinale: Les figures 18, 19 et 20 montrent un échantillon du XC10 en coupe longitudinale revêtu dans les conditions optimales. On observe sur la fig(18) une continuité de la liaison le long du filetage, ce qui reflète une bonne préparation de surface. sur la fig(19) une rupture qui s'est effectuée au niveau du dépôt et non à l'interface après un essai de coupe à la scie. La figure(20) montre le même échantillon attaqué au Nital où l'on peut remarquer la zone affectée thermiquement.

b) Applications sur Z6NC18.9 et XC12:

-La figure(21) montre l'échantillon de l'arbre de pompe en coupe transversale. On observe sur la figure:

\* Une bonne continuité de la liaison.

\* Une présence d'oxydes dans le dépôt et des pores plus ou moins isolés.

\* Une présence d'oxydes dans le dépôt et des pores plus ou moins isolés.

-On observe sur la figure(22) de l'échantillon du demi arbre de rotor en coupe transversale :

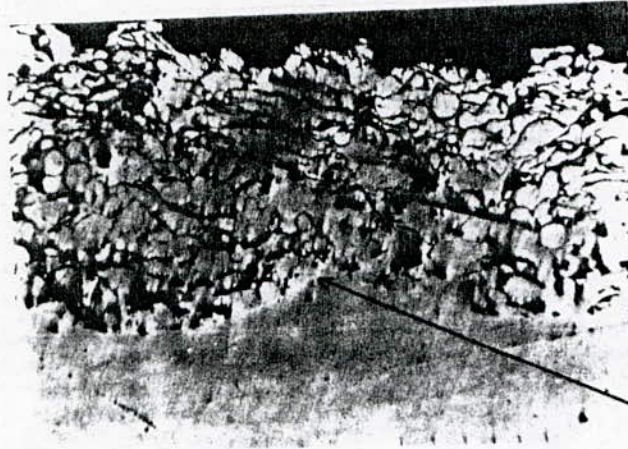
\* Une matrice martensitique jusqu'à l'interface .

\* Une bonne continuité de la liaison et une faible oxydation du dépôt en bronze.

Conclusion:

On peut conclure d'après ces observations que les paramètres de projection choisis sont déterminants pour la qualité du revêtement, c'est ainsi que :

FIG(18) : x 250



continuite de la  
liaison

FIG(19) : x 250



rupture au niveau  
du dépôt

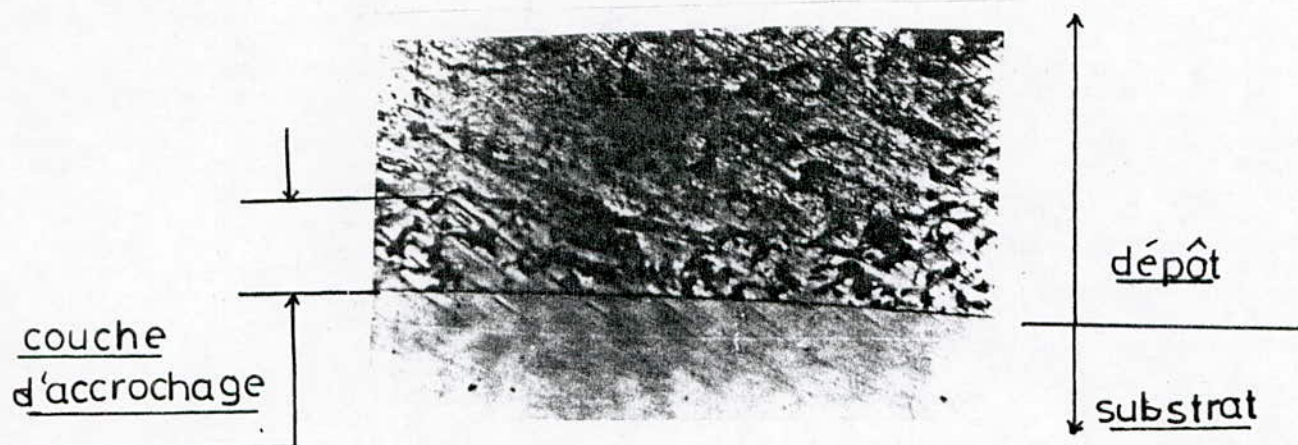
FIG(20) : x 250



coupe longitudinale

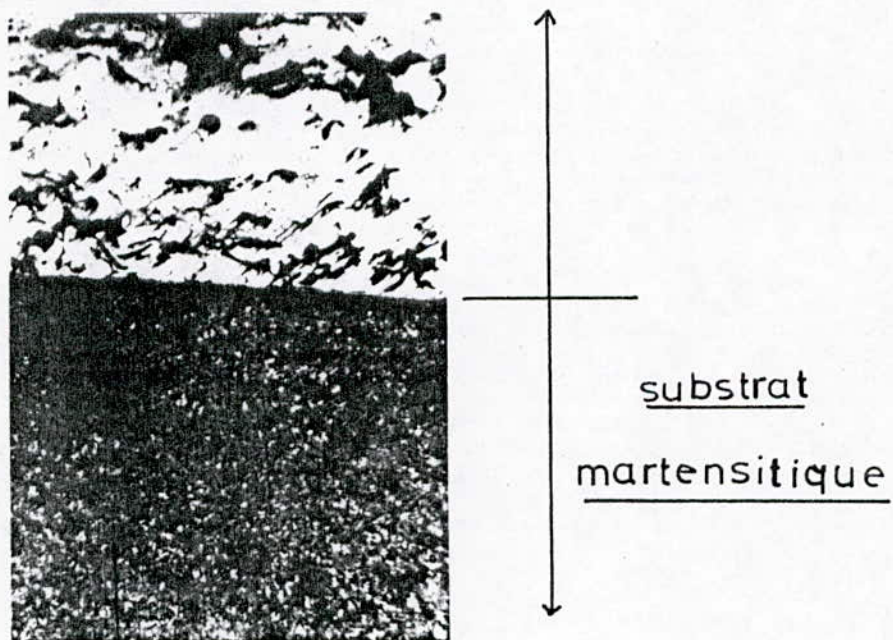


FIG(21): x 250



DÉPÔT SUR Z6NC18.9

FIG(22):x 250



DÉPÔT SUR XC12 TREMPÉ

\* La distance de projection et la vitesse d'avance ont une grande influence sur l'échauffement du support et dans une large mesure sur la cohésion du dépôt.

\* Une grande vitesse de rotation permet une homogénéisation du dépôt et une bonne adhérence au substrat.

\* les débits des gaz contrôlent la porosité

L'interdépendance des paramètres de projection pris en considération nous suscite à recommander pour une description complète de la qualité du revêtement un élargissement de l'étude à d'autres paramètres tel que : le débit des poudres, leur nature, leurs caractéristiques et l'influence de l'état de préparation de surface.

#### B) Tests de traitements thermiques :

Un premier échantillon XC10 en coupe transversale revêtu dans les conditions optimales est porté directement à une température de 800°C dans le four, maintenu pendant 5 minutes puis refroidi à l'air [16].

Un deuxième échantillon identique au précédent coupé en trois a subi les traitements suivants :

- Le premier est réservé pour la visualisation du revêtement sans traitement.

- Le deuxième est porté à 800°C au four, maintenu pendant 20 minutes puis refroidi dans le même four.

- Le dernier a subi le même traitement que le deuxième, mais avec un temps de maintien de 40 minutes.

Après le traitement thermique et le polissage, les échantillons ont été observés sans attaque chimique au microscope optique.

Les résultats sont indiqués sur les figures 23, 24, 25 et 26

### Résultats des tests et interprétations:

\* La figure(23) montre la continuité de la liaison entre le substrat et la couche d'accrochage .

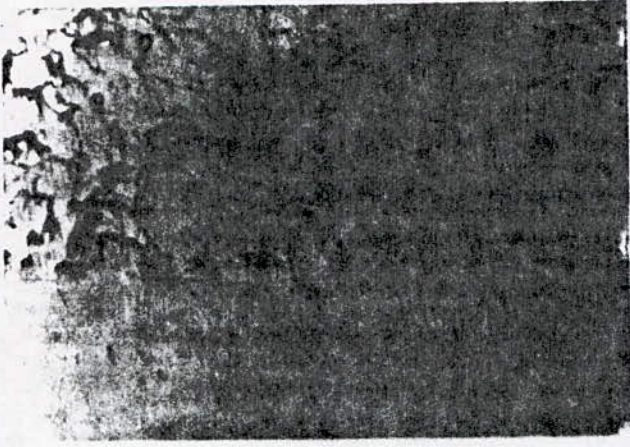
\* La figure(24) indique une rupture de la liaison à l'interface substrat/dépôt et entre quelques particules fondues.

\*Les figures 25 et 26 font aussi apparaître une rupture et des déformations au niveau de l'interface et une très faible variation de la porosité.

Conclusion: Les jonctions métallurgiques de la poudre d'accrochage avec le métal de base ont de très faibles épaisseurs pratiquement imperceptibles au microscope optique . Lors d'une dilatation différentielle entre le substrat et le dépôt, la résistance au cisaillement de ces jonctions est très faible, expliquant la rupture observée . Le traitement de densification de cette poudre projetée est inutile et même préjudiciable pour l'adhérence du revêtement.

La sensibilité aux fluctuations de température de ces types de revêtements suscite des interrogations quant à leur tenue en frottement pendant le service. Pour cela nous recommandons vivement des tests d'usures simulant, à l'échelle du laboratoire, le fonctionnement de la pièce revêtue. Il est aussi très important, pour une évaluation quantitative de l'adhérence ,de procéder à des essais d'arrachement du revêtement.

fig(23) sans traitement



x 250

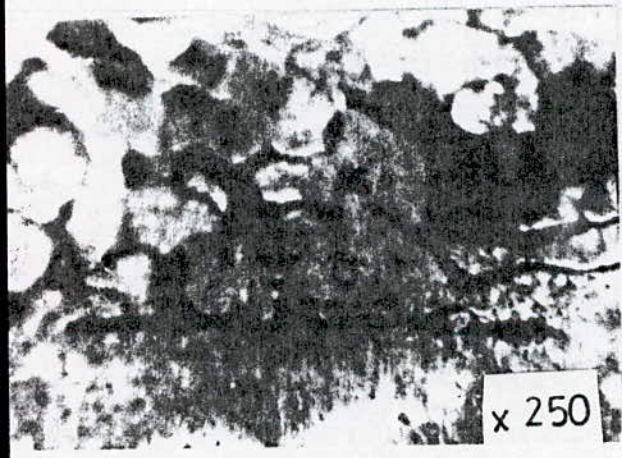
fig(25): maintien de 20mn



x 100

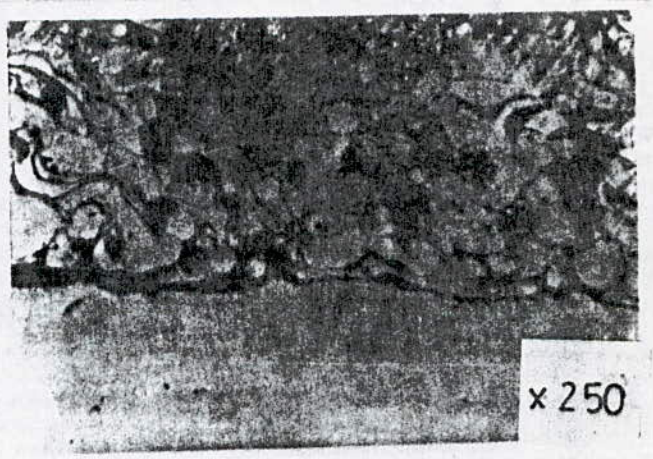


fig(24): maintien de 5mn



x 250

fig(26): maintien de 40mn



x 250

TESTS DE CHOCS THERMIQUES

### C) Essais de dureté superficielle:

Des essais de dureté superficielle Rockwell (la charge est 15Kgf et le pénétrateur est en diamant) ont été effectués sur les dépôts des échantillons. Pour chaque échantillon la valeur de sa dureté superficielle est obtenue en calculant la moyenne arithmétique de cinq essais.

Les résultats sont portés sur les figures 27 à 30 .

### Résultats et interprétations:

#### a) Influence de la distance de projection:

La figure(27) montre que la dureté du dépôt augmente puis diminue quand l'éloignement de la buse de projection par rapport au substrat augmente.

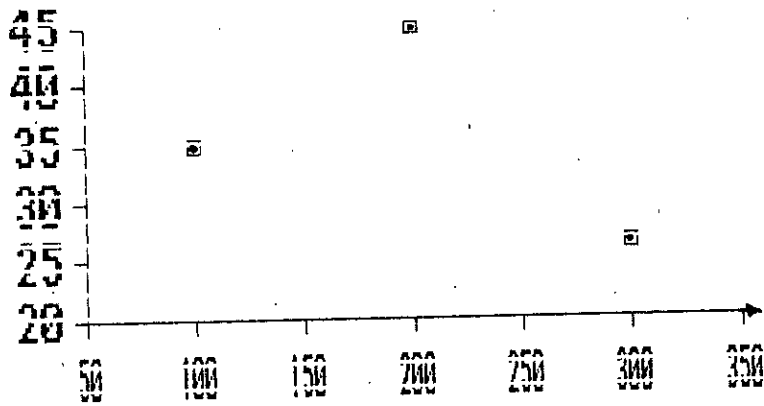
Si la distance est faible l'oxydation et la porosité sont faibles, mais la diminution de la dureté du dépôt est attribuée au faible taux d'oxydation. Quand la distance augmente le taux d'oxydation augmente d'où la dureté est plus grande , cependant si la distance est trop importante l'oxydation est très élevée ,il en résulte une faible cohésion entre particules et la dureté du dépôt chute.

#### b) Influence de la vitesse de rotation:

La figure(28) montre que la dureté augmente avec la vitesse de rotation de l'échantillon , cela est dûe à une augmentation de la cohésion entre particules et à une diminution de la porosité quand la vitesse augmente. Ce résultat est en parfaite correspondance avec les observations micrographiques.

fig(27)

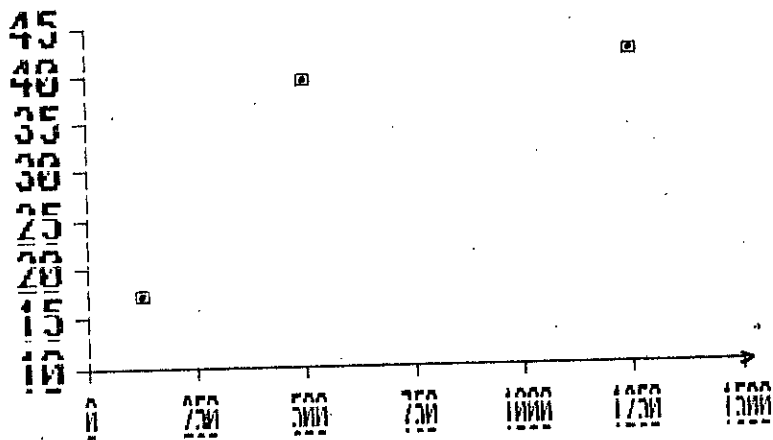
dureté superficielle



distance de projection en mm

fig(28)

dureté superficielle



vitesse de rotation tr/min

ESSAIS DE DURETE SUPERFICIELLE

c) Influence de la vitesse d'avance:

Sur la figure (29) on remarque une augmentation de la dureté puis une diminution quand la vitesse d'avance de la buse de projection augmente. De même que le premier cas la cohésion entre particules et la porosité du revêtement en sont les responsables de cette variation.

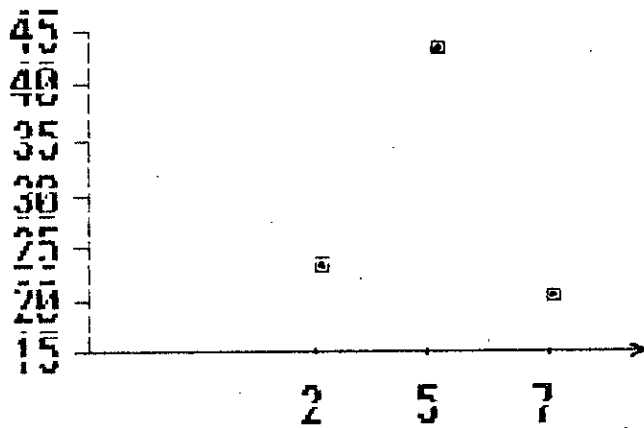
d) Influence de la nature de la flamme:

La figure (30) est un histogramme des duretés de trois échantillons suivant la nature de la flamme. L'échantillon de la flamme réductrice possède une faible dureté par rapport à celui de la flamme neutre à cause du faible taux d'oxydation. Par contre <sup>pour</sup> l'échantillon de la flamme oxydante c'est à cause de la faible cohésion entre particules.

e) Les valeurs des duretés superficielles obtenues sur les dépôts des échantillons Z6NC18.9 et XC12 sont respectivement égales à : 40 HR15Kgf et 22 HR15Kgf . Ces résultats confirment les observations micrographiques à savoir que la poudre Lubrotec 19868 projetée permet d'avoir une bonne résistance aux pressions et que la bonne qualité de frottement de la poudre Xuper Bronzotec est attribuée à la porosité du dépôt obtenu et non à sa dureté .

fig(29)

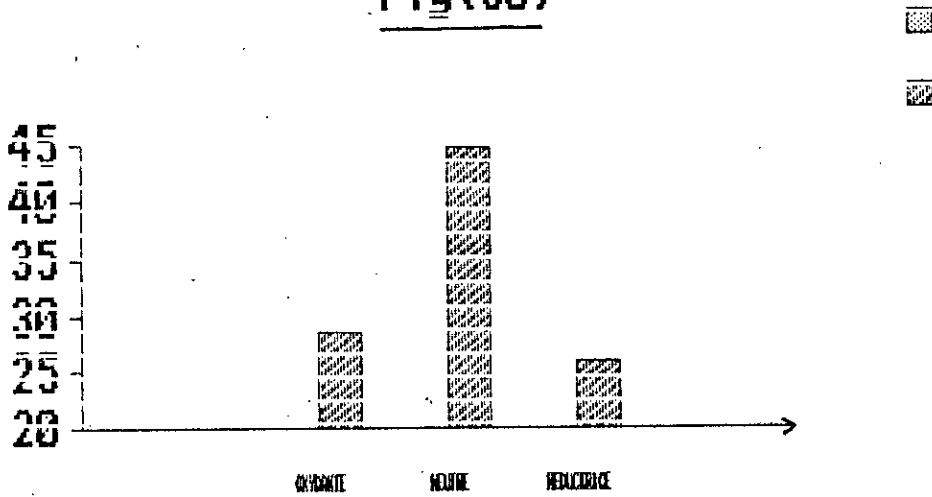
dureté superficielle



vitesse d'avance en mm/tr

fig(30)

dureté superficielle



nature de la flamme

ESSAIS DE DURETE SUPERFICIELLE



Conclusion: L'essai de dureté superficielle vient confirmer les observations micrographiques où l'on peut conclure que pour les revêtements réalisés par ce procédé et pour une poudre donnée :

- \* Une grande dureté avec une faible porosité est obtenue avec des grandes vitesses de rotation.
- \* La distance de projection et la vitesse d'avance doivent être dans les normes d'utilisation.
- \* la dureté d'un revêtement n'est pas seulement fonction de la dureté intrinsèque de chaque particule , mais aussi du taux d'oxydes dans le dépôt.

#### D) Essais de microdureté aux voisinages de l'interface:

Des essais de microdureté ont été réalisés sur les échantillons en utilisant une charge de 100 g et un pénétrateur pyramidale. Sur chaque échantillon ont été effectués deux essais et la moyenne arithmétique constitue les valeurs des microduretés au voisinage de l'interface. Les résultats sont portés sur les figures 31 à 40 .

#### Résultats et interprétations

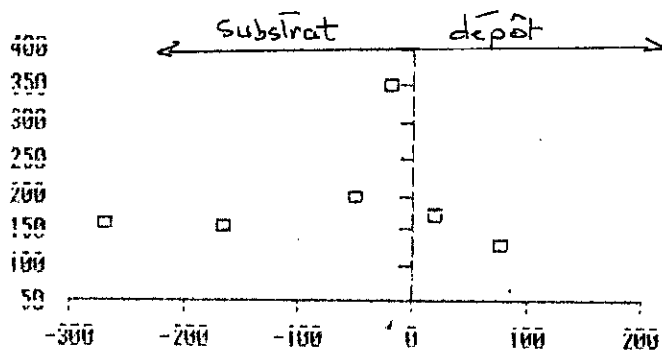
##### a) distance de projection:

Les figures 31, 32 et 33 montrent que la zone limite à l'interface de la matrice est affectée par le traitement de projection. La microdureté est d'autant plus grande que la distance est proche du substrat. Ceci s'explique probablement par l'érouissage dû aux grandes vitesses d'impact des particules sur un support ductile. Les gradients de température peuvent induire des contraintes résiduelles dans le couple substrat/dépôt ce qui favorise l'augmentation de la microdureté. Du côté du dépôt on peut noter une légère variation de la microdureté de la couche d'accrochage, cela est dû aux variations des vitesses de refroidissement des particules quand la distance varie.

##### b) Vitesse de rotation:

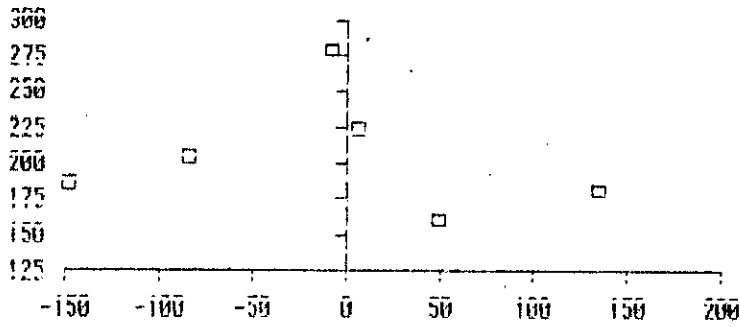
Sur les figures 34, 35 et 36 on peut noter que si la vitesse de rotation est grande, la microdureté du substrat augmente. L'érouissage provoqué par les grandes vitesses d'impact des particules sur le substrat et les contraintes

Fig N°31 : Pour d=100 nm



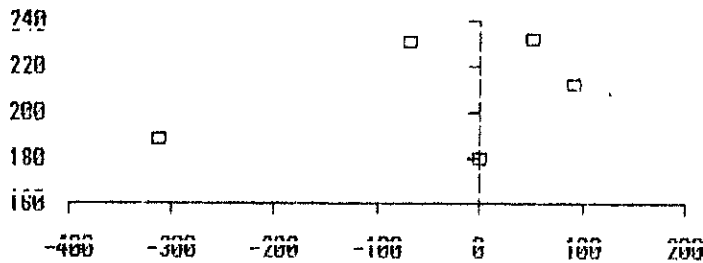
influence de la distance de projection

Fig N°32 : Pour d=200 nm



influence de la distance de projection

Fig N°33 : Pour d=300 nm



influence de la distance de projection

ESSAIS DE MICRODURETE:

fig N°34: Pour une vitesse de rotation de 125 tr/mn)

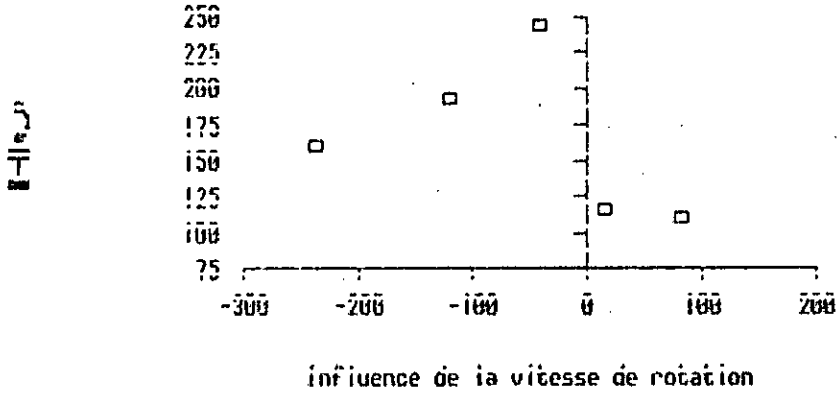


fig N°35: Pour une vitesse de rotation de 500 tr/mn)

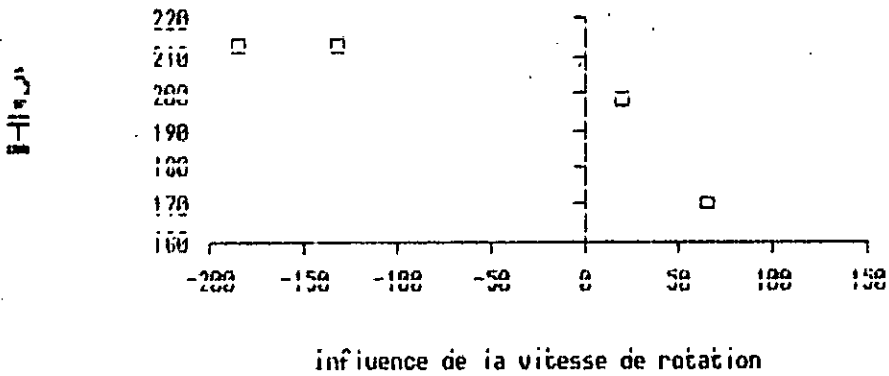
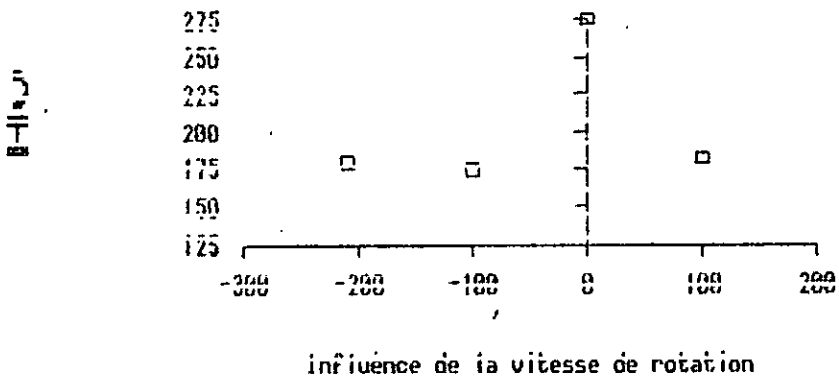


fig N°36 : Pour une vitesse de rotation de 1250 tr/mn)



ESSAIS DE MICRODURETE

résiduelles en sont toujours la cause. Une faible vitesse de rotation augmente les contraintes résiduelles, ce qui conduit à une augmentation de la microdureté.

c) Vitesse d'avance: Il en est de même pour ce cas là (figure 37 et 38), une faible vitesse d'avance augmente les contraintes résiduelles par contre une grande vitesse affecte peu la microdureté à cause du faible échauffement.

d) Les résultats des essais de microdureté réalisés sur les échantillons Z6NC18.9 et XC12 figure 39 et 40 montrent :

- Une augmentation de la microdureté de l'échantillon de l'arbre de pompe au voisinage de l'interface qui est due à l'écroutissage de la microstructure austénitique.
- Une diminution dans le cas de l'échantillon du demi arbre de rotor qui est due à un revenu partiel et une relaxation de la martensite du substrat.

#### Conclusion:

Les résultats obtenus des essais de microdureté au voisinage de l'interface sont d'une grande importance. Le changement des propriétés mécaniques de la couche superficielle d'un support de revêtement peut conduire à des conséquences fâcheuses (exemple: abaissement de la tenue en fatigue, diminution de la résistance à la corrosion sous tension).

Pour confirmer ou infirmer les hypothèses avancés interprétant ces résultats, nous recommandons des essais <sup>d'analyses</sup> par diffraction pour la détermination de la nature exacte des phases et des structures de la couche superficielle.

fig N 37 : Pour une vitesse d'avance de 2.5 mm/tr

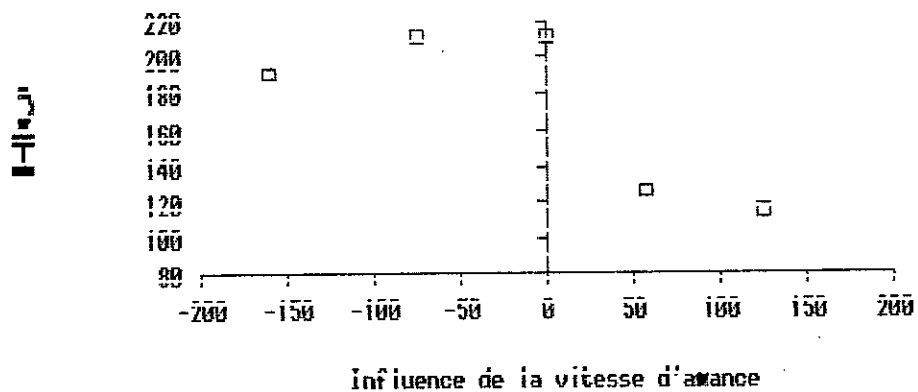
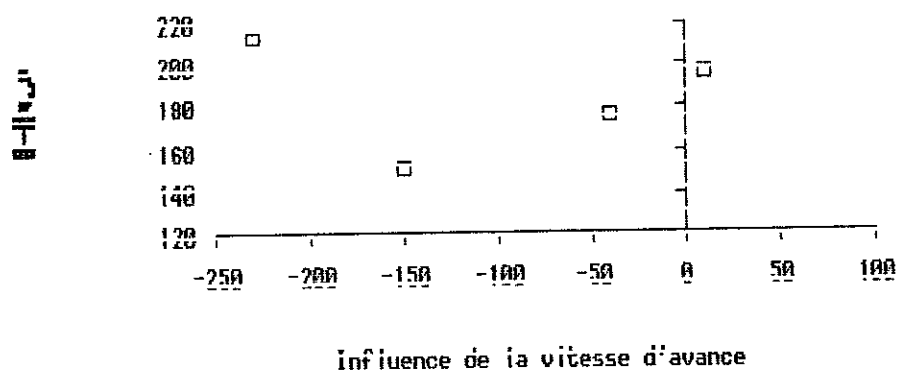
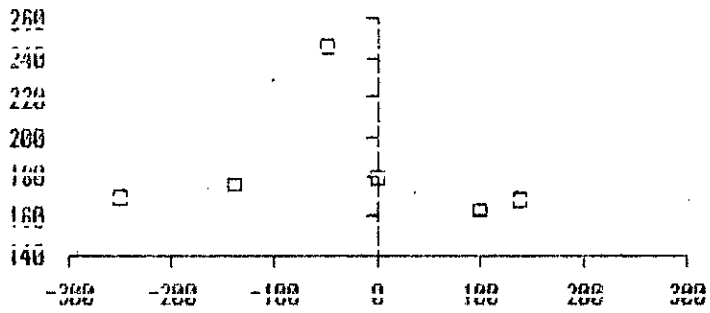


fig N 38: Pour une vitesse d'avance de 7 mm/tr)



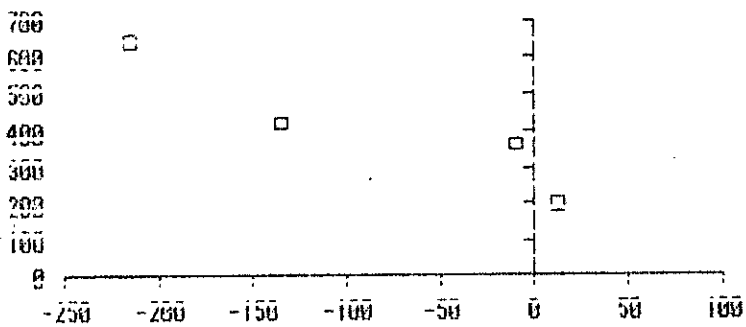
CH103

fig N°39: échantillon de l'arbre de pompe



CH104

fig N°40: Echantillon du demi arbre de rotor



ESSAIS DE MICRODURETE

E) Influence de la projection thermique sur le comportement en corrosion de l'arbre de pompe à eau:

Un essai qualitatif de corrosion a été effectué sur l'échantillon de l'arbre de pompe. Il consistait à immerger l'échantillon coupé et poli transversalement par rapport au dépôt dans un bac d'eau de mer à une température ambiante de 20°C pendant 48 heures. Les résultats des observations micrographiques sans attaque chimique ont mis en évidence la dégradation de la couche d'accrochage dans une ambiance humide. Par contre le dépôt et la matrice n'ont pas été altéré.

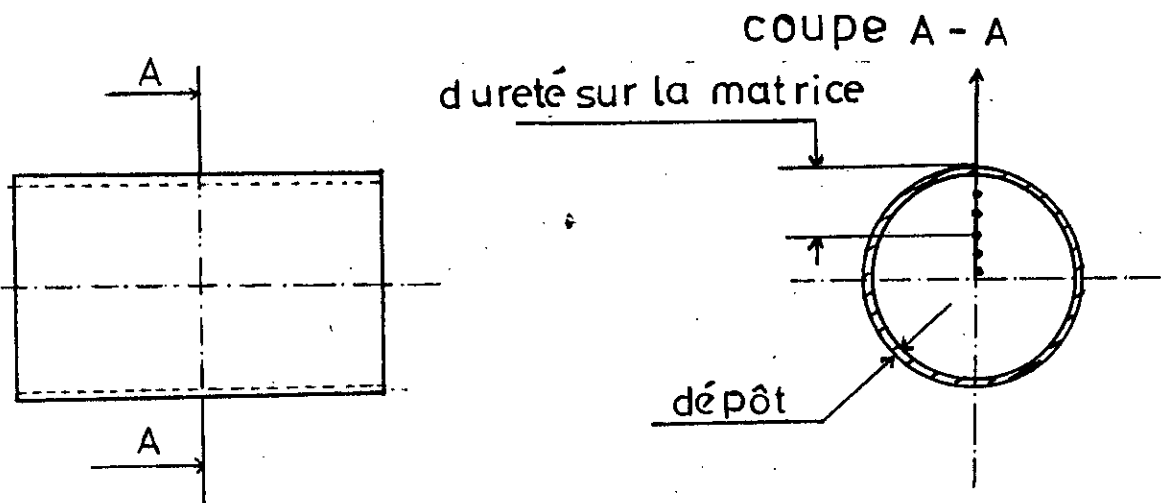
Conclusion:

La dégradation de la couche d'accrochage implique une diminution de l'adhérence du dépôt d'où risque d'enlèvement total du revêtement. Ce qui incite à s'interroger s'il y a risque d'infiltration de l'eau à travers le dépôt superficiel vers la couche d'accrochage, lorsqu'on applique un revêtement sur l'arbre de pompe à eau. Vu le temps insuffisant, nous jugeons utile la poursuite de cette étude afin de relever les causes de cette dégradation et quels sont les précautions à prendre pour éviter une telle conséquence.



F) Influence de la projection thermique sur les propriétés mécaniques du demi arbre de rotor:

Pour mettre en évidence l'influence du traitement de projection, des essais de dureté Rockwell HRC avec une charge de 100 Kgf et un pénétrateur en diamant ont été réalisés sur deux échantillons du demi arbre de rotor ; avant le revêtement et après le revêtement. L'essai a été réalisé suivant une coupe transversale indiquée par la figure(42) ci-dessous



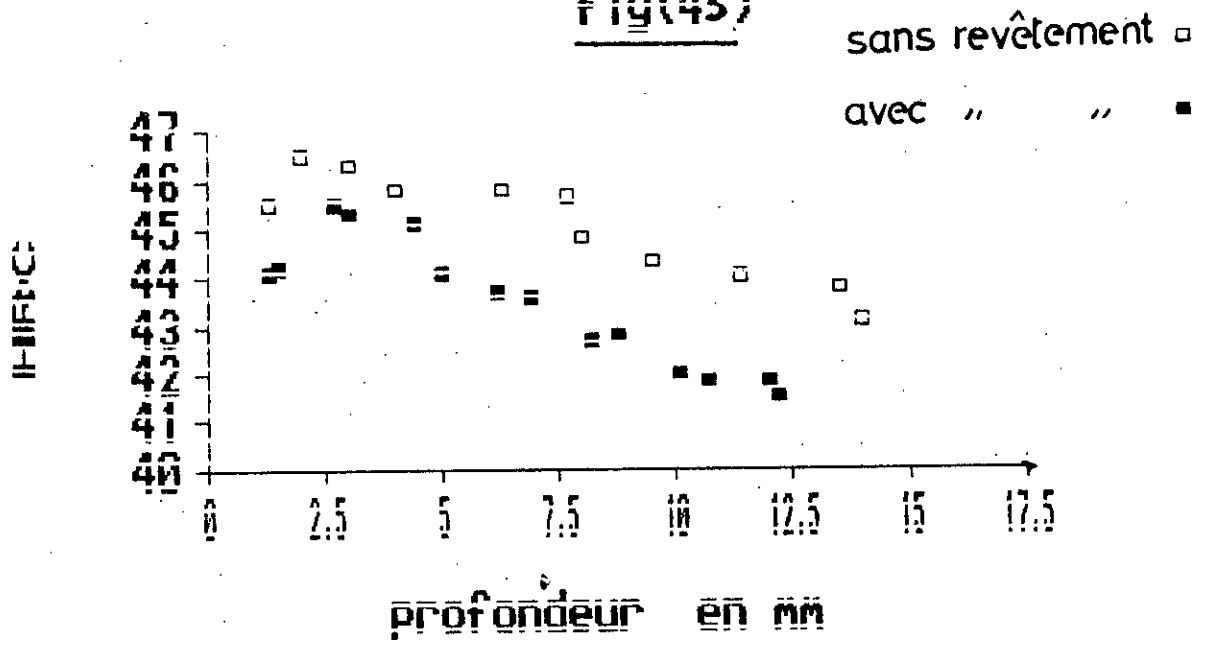
FIG(42)

Les résultats sont portés sur la figure(43).

Conclusion:

L'effet thermique de la projection cause une légère variation de la dureté de la matrice de l'échantillon (estimée environ à 2 unités), l'essai de microdureté et l'observation micrographique confirme ce résultat. On conclue que la projection réalisée avec ce procédé sur des aciers ordinaires trempés peut se conduire sans altération des propriétés mécaniques du substrat.

fig(43)



INFLUENCE DE LA PROJECTION SUR LA DURTE DU XC12 TREMPE

### Conclusion générale:

Le travail que nous avons fait, nous a permis tout d'abord de voir l'ampleur du domaine de la projection thermique et de mettre en relief l'intérêt qu'à son application sur le plan de la recherche appliquée du point de vue récupération et protection des pièces.

Il ressort de l'étude réalisée sur l'influence des paramètres de projection sur les revêtements obtenus par le procédé ROTOTEC, les recommandations pratiques suivantes:

- \* Une faible distance de projection cause une mauvaise adhérence et peut nuire aux propriétés mécaniques du métal de base.
- \* Une grande distance de projection confère aux dépôts une faible cohésion, ce qui rend difficile l'obtention d'un bon état de surface pendant l'usinage de finition.
- \* Une grande vitesse de rotation conduit à une bonne cohésion du dépôt.
- \* La vitesse d'avance a les mêmes effets que la distance de projection et doit être donc dans les normes d'utilisations.
- \* Pour les applications nécessitant un dépôt pratiquement imperméable, l'utilisation d'une flamme réductrice est vivement recommandée.
- \* Une flamme oxydante nuit énormément à la qualité du dépôt, il s'en sort que le contrôle régulier des débits des gaz est impératif.
- \* Les tests de chocs thermiques ont révélé une sensibilité de certains dépôts obtenus avec ce procédé aux effets thermiques. Il en résulte que la réalisation d'un revêtement

appelé à travailler dans des conditions thermiques sévères, doit se faire avec précaution. Par ailleurs les opérations de projection intermittentes sont déconseillées.

Concernant l'application de la projection sur les deux pièces mécaniques choisies, on peut conclure d'après l'étude faite que :

\* Il y a possibilité de revêtement de l'arbre de pompe à eau sans affecter les propriétés anti-corrosives du métal de base ; seulement la sensibilité de la couche d'accrochage à la corrosion après projection nous incite à recommander pour ce cas là l'utilisation d'une vitesse de rotation un peu plus grande car ça permet d'avoir avec la poudre lubrotec un dépôt moins poreux mais dur.

\* Le rechargement du demi arbre de rotor peut s'effectuer sans altérer ses propriétés mécaniques, cependant un test d'usure sur un banc d'essai est très nécessaire pour justifier le choix de la solution de métallisation.

## Bibliographie

- 1-Guide pratique de la projection thermique ; CETIM 1989 , page 1
- 2-Technique de l'ingénieur Métallurgie(1990),M5-traitement de surface;M1645: MAURIS DUCÔS-Revêtement par projection thermique.
- 3-Guide pratique de la projection thermique; CETIM 1989,page 2,5,9
- 4- Guide pratique de la projection thermique CETIM 1989 page 35,37,38.
- 5- Guide pratique de la projection thermique CETIM 1989 page 42
- 6- -Metal Handbook:Powder metallurgy vol(7) 1984 ; M.Kishor: Metal powder used for hardfacing , page 823.
- 7-Métallurgie générale J.Benard 2° édition Masson 1984.
- 8-Métal spraying and flamme deposition of ceramics and plastiques/ W.E.Ballard 4°edition LONDON: Griffin 1963 page 353.
- 9- Les lubrifiants moteurs perte par usure et frottement/IFP,Paris Technip 1979, page 138.
- 10-Métallurgie générale J.Benard 2° édition Masson 1984.
- 11-Technique de l'ingénieur Mécanique et chaleur B585/J.Bloeut.
- 12- Les lubrifiants moteurs perte par usure et frottement./IFP,Paris Technip 1979 page 92.

-13-Manuel d'entretien du moteur section 10 (au niveau de SNTF).

-14-Manuel d'entretien du moteur section 8 (au niveau de SNTF).

-15 Revêtement Méthode CASTOLIN-procédé Rototec, UM14 (F1-F4)

-16 La lutte contre la corrosion et usure / INSA- Masson Paris (1970) chapitre 4: Analyse des revêtement de surface.

-17- Métal spraying and flamme deposition of ceramics and plastiques/ W.E. Ballard 4<sup>e</sup> édition LONDON: Griffin 1963 page 374.