

وزارة التربية الوطنية  
MINISTERE DE L'EDUCATION NATIONALE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT **METALLURGIE**

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
المكتبة - BIBLIOTHEQUE  
Ecole Nationale Polytechnique

# PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

ETUDE DE L'INFLUENCE DES POST-TRAITEMENTS  
SUR L'ADHERENCE ET LE COMPORTEMENT  
MECANIQUE D'UN MULTI MATERIAU  
REALISE PAR PROJECTION THERMIQUE.

Proposé par :  
M<sup>r</sup> M. LARIBI

Etudié par :  
M<sup>r</sup> C. DEHMAS

Dirigé par  
M<sup>r</sup> M. LARIBI

PROMOTION

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'EDUCATION NATIONALE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : **GENIE METALLURGIE**

## **PROJET DE FIN D'ETUDES**

### **SUJET**

**ETUDE DE L'INFLUENCE DES POST-TRAITEMENTS  
SUR L'ADHERENCE ET LE COMPORTEMENT  
MECANIQUE D'UN MULTI MATERIAU  
REALISE PAR PROJECTION THERMIQUE.**

Proposé par:  
M<sup>r</sup> M. LARIBI

Etudié par:  
M<sup>r</sup> C. DEHMAS

Dirigé par:  
M<sup>r</sup> M. LARIBI

**PROMOTION**  
*Juillet 1994*

## REMERCIEMENTS



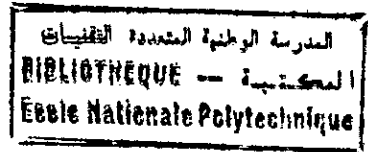
J'exprime ma profonde reconnaissance à Mr M. LARIBI d'avoir dirigé ce travail et de m'avoir constamment guidé avec beaucoup de compétence et de détermination. Merci et encore Bravo.

J'adresse mes plus sincères remerciements à Mr A. BOUKLI de s'être intéressé à ce travail et au collectif des travailleurs de l'entreprise "Algérie métallisation" ainsi qu'aux techniciens du laboratoire de Métallurgie particulièrement Khaled et Abdenour qui n'ont ménagé aucun effort lors de la réalisation des travaux.

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

Mon amabilité va également à l'encontre de Mr M. BRADAI pour ces conseils qui m'ont été d'une grande utilité, ainsi qu'à Mme HAMOUCHE pour ses précieux services.

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



## DEDICACES

A ma famille et aux intimes  
A la mémoire des martyrs de la république

# SOMMAIRE



	Page
INTRODUCTION:.....	1
I-Projection thermique:.....	3
I-1 Rappel historique.....	3
I-2 Principe de la projection thermique .....	3
I-3 Place de la projection thermique parmi les traitements de surface .....	4
I-4 Matériaux utilisés et caractéristiques des matériaux projetés.....	6
I-4-1 Matériaux utilisés.....	6
I-4-2 Caractéristiques des matériaux projetés.....	7
I-5 Préparation des surfaces .....	8
I-5-1 Généralité.....	8
I-5-2 Propreté de la surface.....	9
I-5-3 Rugosité.....	9
I-5-4 Traitement par impact.....	9
I-5-5 Préparation mécanique des surfaces.....	9
I-6 Les équipements de la projection thermique .....	9
I-6-1 Projection thermique à la flamme.....	9
I-6-2 Projection thermique à l'arc électrique.....	10
I-6-3 Nouveauté.....	11
I-7 Conduite de la projection.....	14
I-7-1 Sous-couche d'accrochage.....	14
I-7-2 Dépôt.....	14
I-7-3 Post-traitement des dépôts projetés.....	14
I-7-4 Image et caractéristiques du Dépôt.....	15
I-8 Applications de la projection thermique.....	15
I-8-1 Réalisation de revêtements sur des supports de nature diverses.....	15
I-8-2 Façonnage d'objets céramiques-métalliques ou de matériaux composites.....	17

<b>II-Usure des surfaces:</b> .....	<b>19</b>
II-1 Définition.....	19
II-2 Intérêt de l'étude de l'usure.....	19
II-2-1 Intérêt économique .....	19
II-2-2 Intérêt scientifique.....	19
II-3 Classification de l'usure .....	19
II-3-1 L'usure bénéfique .....	19
II-3-2 L'usure normale.....	19
II-3-3 L'usure catastrophique.....	19
II-4 Principaux types d'usure .....	19
II-4-1 L'Usure adhésive.....	19
II-4-2 L'usure abrasive.....	20
II-4-3 L'usure érosive.....	22
II-4-4 L'usure par fatigue.....	22
II-4-5 L'usure corrosive.....	22
II-5 Fonctionnement et mécanismes d'usure d'un vilebrequin.....	22
II-5-1 Fonctionnement d'un vilebrequin.....	22
II-5-2 Usure d'un vilebrequin.....	22
<b>III-Traitements thermiques:</b> .....	<b>28</b>
III-1 Définition.....	28
III-2 But des traitements thermiques.....	28
III-3 Classification des Traitements thermiques .....	28
III-3-1 La trempe.....	28
III-3-2 Le revenu.....	29
III-3-3 Le recuit.....	30
<b>IV-Techniques expérimentales:</b> .....	<b>32</b>
IV-1 Position du problème.....	32
IV-2 Equipement utilisé.....	32
IV-2-1 Pistolet utilisé.....	32
IV-2-2 Paramètres de projection.....	33

IV-3 Matériaux utilisés.....	34
IV-3-1 Substrat.....	34
IV-3-2 Sous-couche d'accrochage.....	35
IV-3-3 Dépôt .....	35
IV-4 Préparation des échantillons.....	35
IV-4-1 Préparation mécanique.....	36
IV-4-2 Décapage chimique.....	36
IV-4-3 Rugosification.....	36
IV-5 Post-traitement.....	36
V-Analyses métallurgiques et mécaniques du multimatériau obtenu:.....	39
V-1 Analyse micrographique et interprétation.....	39
V-1-1 Introduction.....	39
V-1-2 Interprétation.....	48
V-2 Dureté et microdureté.....	48
V-2-1 Introduction.....	48
V-2-2 Interprétation.....	55
V-3 Test d'arrachement.....	55
V-3-1 Introduction.....	55
V-3-2 Interprétation.....	60
V-4 Examen tribologique.....	60
V-4-1 Introduction .....	60
V-4-2 Interprétation.....	65
Conclusion.....	65
CONCLUSION GÉNÉRALE ET RECOMMANDATIONS.....	66

## INTRODUCTION

Les multimatériaux, ou produits formés par l'association de matériaux différents, constituent une troisième voie d'évolution des aciers spéciaux au même titre d'ailleurs que tous les métaux. Ils permettent en effet deux types d'amélioration : La première est d'ordre technique, permettant d'associer deux ou plusieurs éléments conduisant à un produit nouveau qui peut réunir les propriétés et avantages de chacun, la deuxième amélioration est d'ordre économique permettant de limiter l'utilisation du produit performant et cher seulement à l'endroit où il est indispensable.

L'Algérie, dont l'expérience industrielle montre que les dégradations de pièces de machines en fonctionnement normal sont le plus souvent dues à la fatigue ; doit accorder un intérêt particulier aux techniques de réalisation des multimatériaux et de rénovation de pièces usées, car à défaut de disponibilité de pièces de rechange, on s'aperçoit bien vite que notre industrie, vecteur promettant de notre économie, se porte mal, et la mise hors service de machines productives alimente progressivement les espaces rebut de nos entreprises.

A ce titre, l'entreprise privée "ALGERIE METALISATION", soucieuse de prendre en charge la rénovation des pièces mécaniques usées, s'est spécialisée dans le domaine des revêtements en utilisant le procédé de projection thermique à l'arc électrique.

Dans le cadre du présent mémoire, nous nous proposons de contribuer à la promotion et à l'épanouissement de cette action par l'étude du rechargement par projection thermique à l'arc électrique d'un organe déterminant non admis à être remplacé périodiquement tant à cause de son prix que des travaux importants que son remplacement nécessite, en l'occurrence le vilebrequin.

Dans ce contexte, une étude récente, première du genre s'est réalisée et ayant eue pour objectif l'optimisation des paramètres de projection. Dans le même cadre, nous enchaînons par l'étude de l'influence des post-traitements (thermiques) sur l'adhérence des dépôts projetés thermiquement, ce qui permet une meilleure compréhension des phénomènes connexes liés à la nature physico-chimique des matériaux utilisés afin d'arriver à un compromis assurant une bonne tenue du revêtement projeté sur le vilebrequin et des propriétés mécaniques fort intéressantes qui en découlent.

Compte-tenu des objectifs assignés, nous avons jugé utile de décomposer notre travail en deux grandes parties :

La première consiste en une étude bibliographique permettant de présenter dans un premier chapitre la technique de la projection thermique en développant succinctement son rôle parmi les traitements de surface, son domaine d'application, ainsi que les équipements qu'elle demande.

Dans un second chapitre, a été abordé le phénomène d'usure généralisé des surfaces fonctionnelles, puis les conséquences qu'elle engendre sur les paramètres influençant le système tribologique d'un vilebrequin dont nous abordons brièvement le fonctionnement et la chaîne cinématique. Un troisième chapitre est consacré aux traitements thermiques où l'on donne le principe et le rôle de chacun, dans le souci de pouvoir sélectionner ceux qui s'adaptent aux post-traitements appliqués aux dépôts projetés thermiquement.



La deuxième partie traite de l'étude expérimentale, où l'on développe dans un premier chapitre la procédure et les processus relatifs à la préparation des échantillons.

Un second chapitre est consacré à l'analyse métallurgique et mécanique du multimatériau ainsi obtenu, sur lequel un certain nombre de tests ont été réalisés à savoir :

- une observation métallographique qui nous renseigne sur l'interface dépôt-substrat et qui nous donne le maximum d'informations concernant la structure, l'édification et la porosité du dépôt,
- une étude de dureté pour une meilleure connaissance de la résistance ainsi que de l'homogénéité de la structure du dépôt. Cette étude caractérise par ailleurs la cohésion et l'oxydation des particules,
- un test d'arrachement dans le but principal est la mise en évidence de la tenue du dépôt et de visualiser la nature de l'accrochage du dépôt sur le substrat,
- un examen tribologique qui caractérise la tenue à l'usure du multimatériau et qui nous permet de connaître le coefficient de frottement du matériau déposé.

Enfin, cette étude est clôturée par une conclusion émanant des résultats expérimentaux et des conditions opératoires.

# CHAPITRE I - PROJECTION THERMIQUE :

## I.1. Rappel historique :

Revêtement est le terme général utilisé pour désigner tout dépôt d'un produit fondu ou partiellement fondu sur un matériau de base en vue d'en améliorer les caractéristiques fonctionnelles.

Dans la plupart des cas, cet exploit technique permet de résoudre les problèmes découlant des impératifs contradictoires de légèreté, de dureté, de tenue au frottement ou à la corrosion.

C'est en 1909, que l'idée d'obtenir des revêtements métalliques par projection thermique fût l'oeuvre d'un ingénieur suisse, en effet, le Docteur SHOOP observa une incrustation de plomb au tir d'une balle contre un mur en ciment et plusieurs applications en découlèrent suite à la reproduction du phénomène en projetant du plomb fondu avec un vaporisateur, puis en projetant du plomb en poudre à travers une flamme.

Après la seconde guerre mondiale, la pénurie des métaux a poussé les constructeurs à étudier les possibilités d'effectuer des revêtements sur des pièces mécaniques usées, il en résultat un développement très rapide de cette technique, essentiellement de la part des céramistes dans le domaine du façonnage de la céramique classique et les assemblages céramique-métal.

## I.2. Principe de la projection thermique :

La projection thermique est une technique qui consiste à projeter en fines particules, sur une surface préalablement préparée, un produit d'apport solide, fondu ou ramolli au moyen d'une source de chaleur appropriée (flamme ou arc). Il est pulvérisé sous forme de gouttelettes au moyen d'un courant gazeux. Ce dernier peut-être constitué soit par un gaz auxiliaire qui est généralement de l'air, parfois de l'argon ou de l'azote mélangé au gaz provenant de la combustion (flamme oxy-gaz) ou de l'ionisation des gaz de ceux-ci (plasma d'arc).

Les particules provenant de la pulvérisation à grande vitesse .

- environ 100 à 200 m/s pour les pistolets à gaz.
- de l'ordre de la vitesse du son pour les pistolets à plasma.

Les particules vont s'écraser sur le support placé à une distance convenable. Au moment de l'impact sur le substrat, les particules se présentent à l'état pâteux au moins en périphérie.

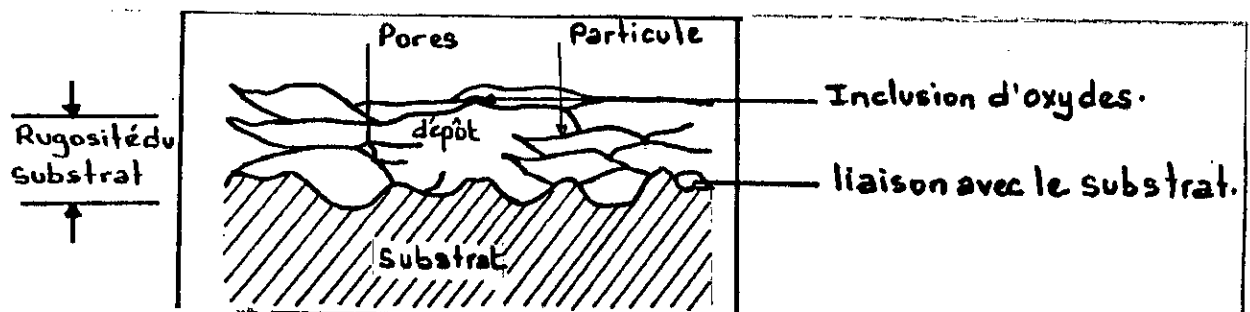


Fig.1 : Représentation schématique d'un dépôt projeté à chaud.

### **I.3. Place de la projection thermique parmi les traitements de surface : (Fig 2)**

Parmi les techniques de traitement de surface, la projection thermique présente des polyvalences fort intéressantes en terme d'utilisation, on citera les plus importantes :

\* Les dépôts réalisés par voie électrolytique concrétisent des épaisseurs relativement faibles (de l'ordre du dixième de micron) par rapport à celles réalisées par projection thermique. Les vitesses de déposition sont relativement faibles également, et le couple substrat - dépôt est limité pour les revêtements électrolytiques aux matériaux conducteurs.

\* Les dépôts réalisés par voie chimique permettent de surpasser la contrainte liée à la forme des pièces. L'uniformité du dépôt constitue un avantage de cette technique, cependant la gamme des matériaux d'apport est restreinte, les plus utilisés sont le cuivre et le nickel.

\* Le procédé PVD (dépôt physique en phase vapeur) 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 demeurent onéreuses, les vitesses de déposition sont moins élevées qu'en projection thermique. Le traitement des grandes surfaces pose encore des problèmes.

\* Dans le procédé CVD (dépôts chimiques sous vide). 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.

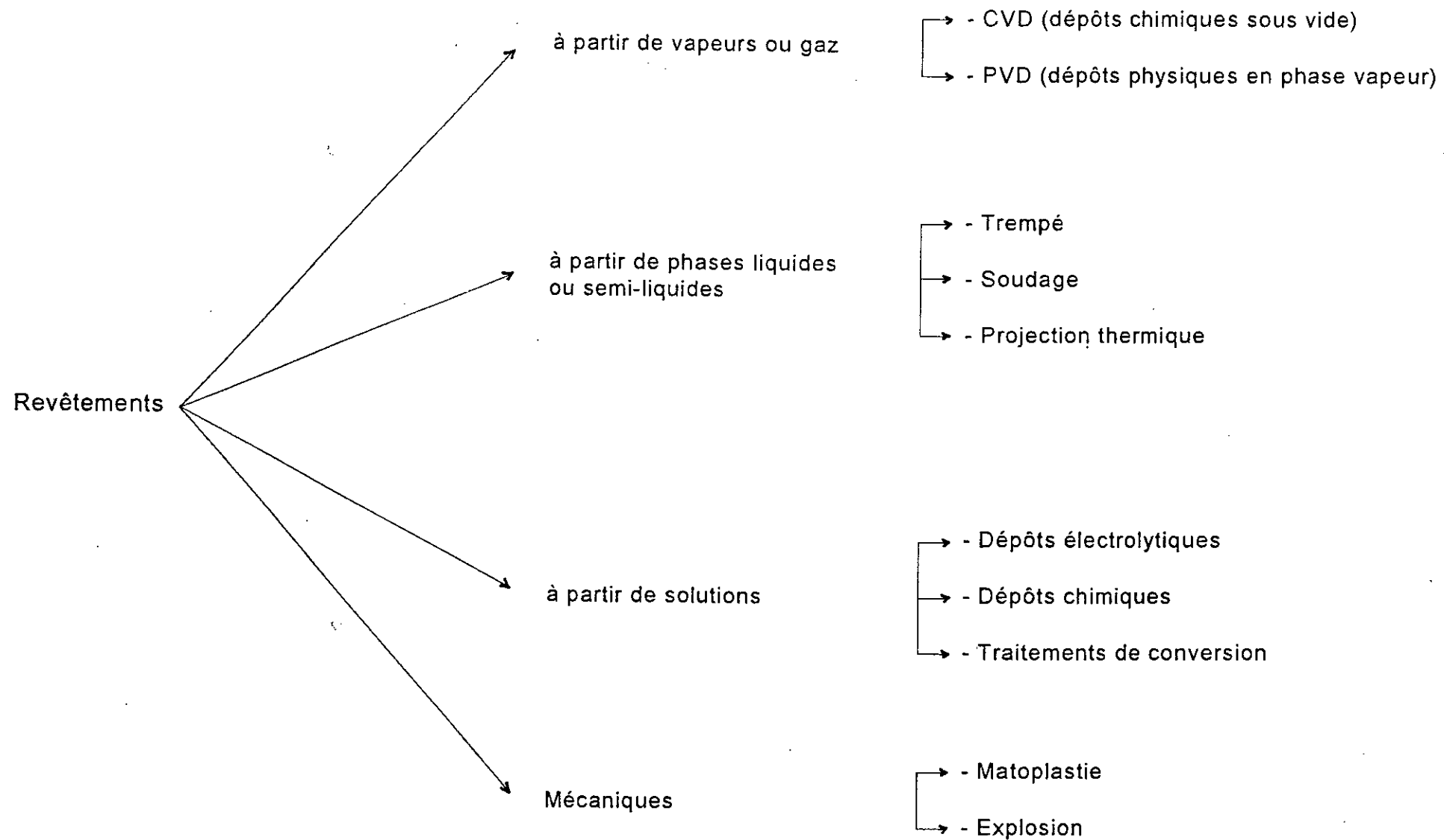
\* Les autres techniques tel que la trempe superficielle, le rechargement par soudage permettent d'avoir des dépôts épais, mais présentent des limitations quant à la souplesse et l'efficacité des traitements.

Parmi les nombreux traitements de surface, la projection thermique est certainement la technique qui présente le plus d'applications s'agissant :

- du couple substrat - dépôt,
- des dimensions des pièces à revêtir,
- de la vitesse de déposition élevée.

Cette technique présente néanmoins des barrières quant à sa pratique du point de vue adhérence (accrochage purement mécanique).

Signalons toutefois que les dépôts projetés thermiquement présentent des contraintes et des porosités résiduelles ainsi qu'à l'interface.



**Fig 2 :** Traitement de surfaces : les techniques potentiellement utilisables.

## **I. 4. Matériaux utilisés et caractéristiques des matériaux projetés :**

### **I.4.1. Matériaux utilisés :**

Les matériaux utilisés lors de la projection sont très nombreux et leur nombre augmente en fonction des applications. Nous pouvons les classer de la façon suivante :

- les aciers alliés et non alliés,
- les alliages à base de cobalt, de nickel, de cuivre et de zinc,
- les métaux purs,
- les oxydes,
- les carbures,
- les autos - adhérents (alliages à base Ni - Al),
- les nitrures,
- les siliciures,
- les matériaux abrasables (type Ni - graphite),
- les matériaux antifriction - céramiques,
- les alliages MC<sub>r</sub> Al Y (M = Ni - Co - Fe ou une combinaison de deux ou trois d'entre-eux),
- les matières plastiques (polyamide, polyéthylène ...)

Ces différents matériaux ne se présentent pas tous sous la même forme, car il faut tenir compte de certaines propriétés intrinsèques et également du procédé employé pour les projeter.

Les principes formés sont :

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

Les fils nus massifs sont les matériaux réservés aux équipements de projection utilisant la flamme et l'arc électrique; ils sont largement diffusés dans les catégories des métaux purs et les aciers.

Ces types de produits sont définis par leurs diamètres et leurs compositions.

Les poudres, quand à elles, sont tenues de répondre à des critères plus nombreux que les fils, à savoir la composition, la dimension des particules et leur répartition granulométrique. La forme des particules peut-être sphérique, lamellaire ou cubique. Elles sont obtenues par électrofusion, frittage, agglomération, enrobage.

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

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

Les baguettes, par contre permettent de conditionner des matériaux non tréfilables pour alimenter de façon discontinue des pistolets à fils. Elles sont obtenues par frittage. Tous ces produits sont utilisés suivant leur besoin et le type de projection thermique.

## I.4.2. Caractéristiques des matériaux projetés :

### I.4.2.1. Structure :

Les particules qui sont projetées sur un substrat s'écrasent sur celui-ci pour réaliser une superposition de couches qui donne un dépôt obtenu par projection thermique. Ce dépôt est généralement poreux.

En s'écrasant, ces particules occupent une surface dont le diamètre «D» peut-être évalué par rapport au diamètre initial «d» de la particule en utilisant le traitement théorique de MADESJKI simplifié (en supposant que la goutte liquide s'aplatit avant de se solidifier.

$$D/d = 1.29 \frac{(\rho \cdot v \cdot d)^{0.2}}{\mu}$$

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

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

$$\frac{S \cdot (K \cdot \Delta T)^2}{v \cdot \mu} \geq \frac{L^2 \cdot D^2}{16 \rho}$$

avec :

S : distance de projection.

K : Conductivité thermique de la couche.

$\Delta T$  : gradient de température de la couche.

$\mu$  : viscosité du jet de gaz.

L : Capacité thermique de la particule par unité de volume à la température de fusion.

D : diamètre moyen de la particule.

$\rho$  : densité de la particule.

D'après l'inéquation ci-dessus le temps de séjour de la particule dans le jet de gaz et la taille de la particule sont importants pour que la fusion complète soit correcte, le temps de séjour de la particule est déterminé par la vitesse du gaz, l'énergie et la distance de projection.

### I.4.2.2. Adhérence :

Les dépôts projetés adhèrent aux substrats par un phénomène mécanique qui demande une préparation soignée de la surface à revêtir, la particule en fusion épouse plus ou moins bien les rugosités du substrat.

Toutefois, en général, l'accrochage du dépôt est seulement mécanique et, suivant les matériaux projetés et les paramètres de projection, l'adhérence varie de 20 à 115 MPa.

Pour les matériaux comme les oxydes métalliques, dont l'adhérence est faible, et dans le cas où les coefficients de dilatation sont très différents entre le matériau projeté et le substrat, on utilise des sous-couches d'accrochage connues pour leurs bonnes valeurs d'adhérence, telles que l'alliure de nickel,

Pour les matériaux comme les oxydes métalliques, dont l'adhérence est faible, et dans le cas où les coefficients de dilatation sont très différents entre le matériau projeté et le substrat, on utilise des sous-couches d'accrochage connues pour leurs bonnes valeurs d'adhérence, telles que l'alliure de nickel,

#### **I.4.2.3. Densité :**

Les dépôts projetés sont poreux. Cette porosité est plus ou moins importante suivant le mode de projection. La dimension des particules et leur vitesse ont une influence importante en ce qui concerne la densité des dépôts.

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

#### **I.4.2.4. Dureté :**

Les matériaux projetés thermiquement sont constitués de particules juxtaposées, liées entre elles. Ceci se traduit en général par une dureté, sans rapport avec la dureté de chacune des particules, mais représentative de la compacité du dépôt. La dureté du dépôt obtenu dépend toujours des paramètres de projection.

Toutefois d'autres caractéristiques peuvent intervenir dans le choix du matériau à projeter, on cite :

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

#### **I.4.2.5. Contraintes résiduelles :**

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

### **I.5. Préparation des surfaces :**

#### **I.5.1. Généralités :**

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

L'idéal d'une bonne préparation est de permettre un contact aussi cohérent que possible entre la

surface à recouvrir et le revêtement à exécuter, ou de conduire à une surface suffisamment active chimiquement pour faciliter les réactions.

Donc en somme, la préparation de surface a pour but :

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

### **I.5.2. Propreté de la surface :**

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

### **I.5.3. Rugosité :**

La propreté de la surface à revêtir est nécessaire mais pas suffisante pour obtenir une bonne adhérence, pour cela, il faut créer une rugosité en surface, afin de permettre aux particules en fusion d'épouser les irrégularités en surface et réaliser ainsi un bon accrochage mécanique. Ce genre d'état de surface peut être obtenue par un traitement par impact ou une préparation des surfaces suivie d'un traitement par impact.

### **I.5.4. Traitement par impact :**

Il s'agit de préparation de surface par projection d'abrasif. Celui-ci doit être à angle vif. Ce traitement nettoie la pièce et crée une certaine rugosité appropriée de la surface (de 3 à 10  $\mu\text{m Ra}$ ).

### **I.5.5. Préparation mécanique des surfaces :**

Cette technique consiste en un usinage qui permet de diminuer la dimension des pièces sans nuire à la résistance mécanique de celles-ci et d'augmenter les surfaces d'accrochage.

Parfois, cette technique est utilisée également pour la correction de profil.

## **I.6. Les équipements de la projection thermique :**

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

### **I.6.1. Projection thermique à la flamme :**

#### **I.6.1.1. Pistolet à poudre : (fig 3a)**

Ce dispositif est généralement alimenté avec des fluides tel que l'oxygène comme carburant et l'acétylène, le propane ou l'hydrogène comme combustible.

La poudre est distribuée par gravité ou par un distributeur assez élaboré autonome du pistolet utilisant un gaz 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.



### **I.6.1.2. Torche à gaz :**

Il s'agit d'un chalumeau oxy-gaz, équipé d'un petit récipient contenant la poudre à projeter. 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. Les alliages utilisés avec ce type d'équipement sont dits auto fusibles à base de Nickel ou de Cobalt additionnés de Cr, W, Si.

### **I.6.1.3. Pistolet à fil : (fig 3c)**

Ce pistolet se compose 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, après avoir été fondu par la flamme et en sortant des trous de la buse à gaz, est pris en charge par l'air comprimé qui le propulse sur le substrat. Ce pistolet projette pratiquement tous les matériaux tréfilables, ainsi que des matériaux céramiques sous formes de baguettes ou de cordons. Toutefois, cette technique exige au préalable une bonne préparation de surface.

## **I.6.2. Projection thermique à l'arc électrique :**

### **I.6.2.1. Torche à plasma : (fig 3d)**

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

On peut ainsi fondre et pulvériser des matériaux dont le point de fusion peut atteindre 1800° C. Cependant des précautions doivent être prises pour ceux qui sont susceptibles de subir des transformations à hautes températures dues à des phénomènes tels que : température de fusion très proche de la température d'évaporation (type magnésie) ou de produits qui se décomposent (cas du carbure de silicium pur).

Néanmoins, c'est le pistolet qui offre la plus étendue gamme de revêtements et il est présent dans de nombreuses industries.

### **I.6.2.2. 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, à titre d'exemple, il y a risque de perte de carbone dû à l'oxydation à haute température.

### **I.6.2.3. Pistolet à détonation :**

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

### **I.6.3. Nouveautés :**

En raison de l'importance et la polyvalence de la technique de projection dans la réalisation des multi-matériaux, de nouveaux équipements et installations sont apparus sur le marché ces dernières années :

- projection plasma (atmosphère APS),
- projection plasma VPS (plasma sous vide),
- plasma sous pression réduite,
- plasma IPS (sous gaz inerte) qui garantit une grande pureté chimique.

Ou encore des nouveautés toutes récentes à savoir :

- plasma technique CAPS (équipement robotisé),
- projection haute vitesse vélocité (équipé de canon à détonation),
- technique de la flamme à haute vitesse (HVOF),

Signalons toutefois que cette dernière utilise le gaz (oxygène + propane) est en voie de développement dans notre pays (Algérie) vue la disponibilité permanente du propane.

- enfin le plasma laser.

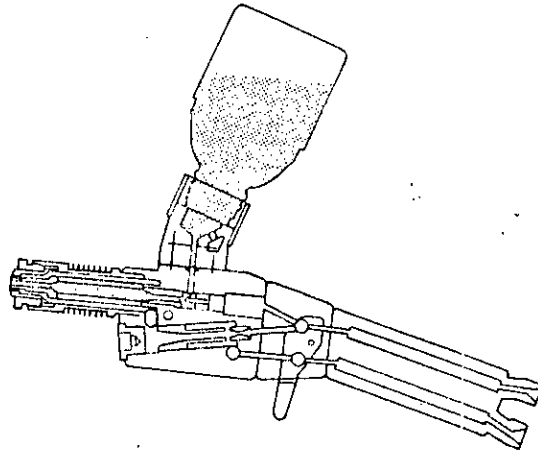


Fig 3a : Alimentation du pistolet à poudre par gravité.

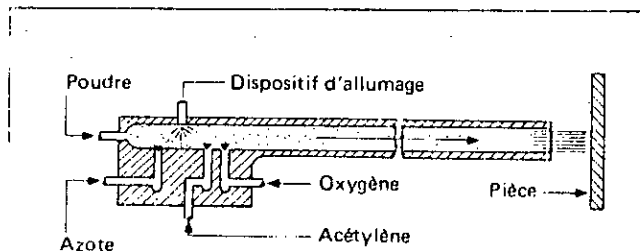


Fig 3b : Pistolet à détonation.

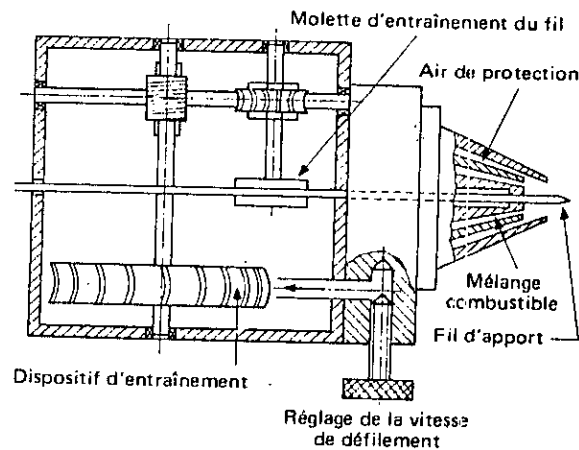


fig 3c : Pistolet à fil.

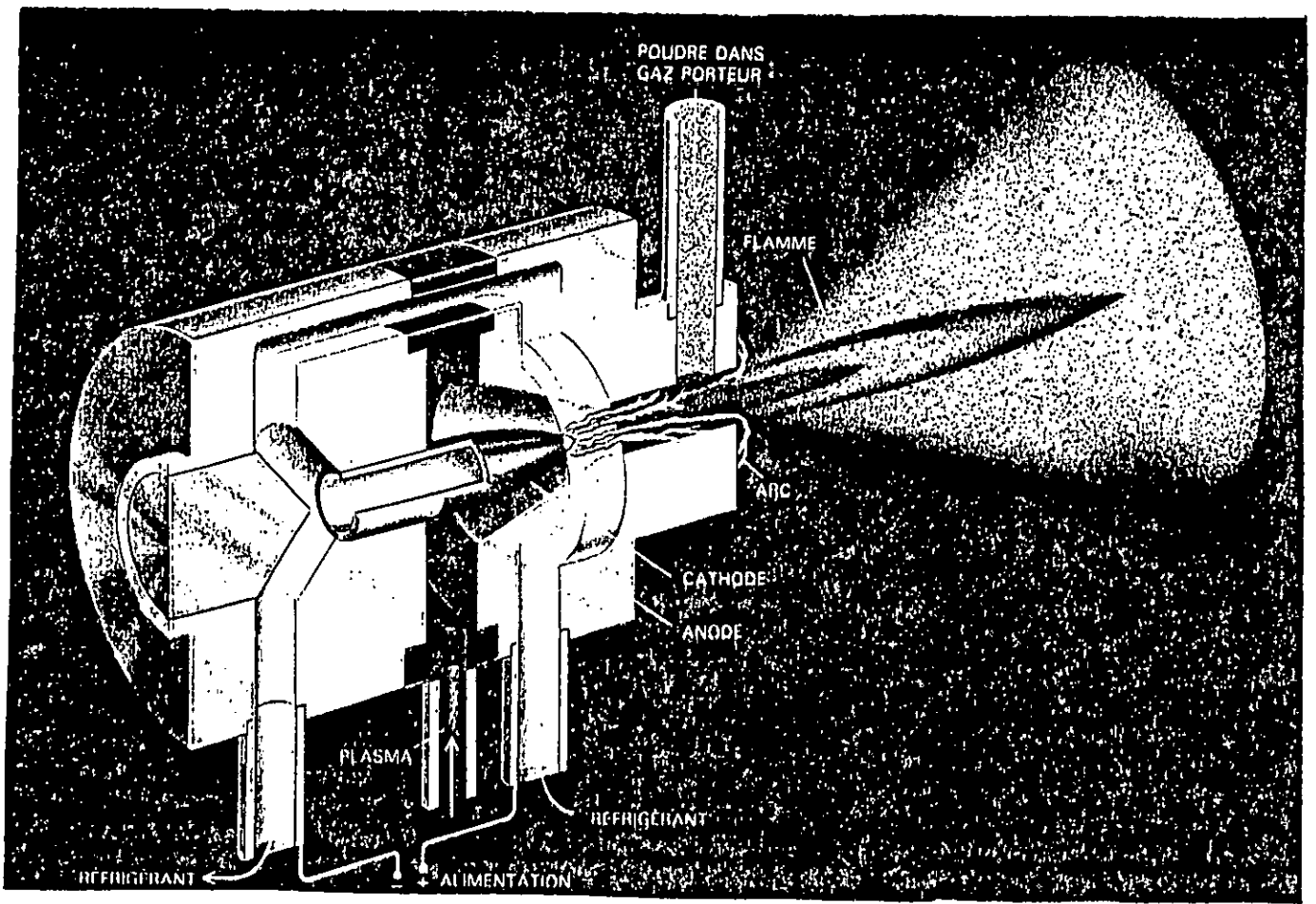


fig 3d : Torche à plasma.

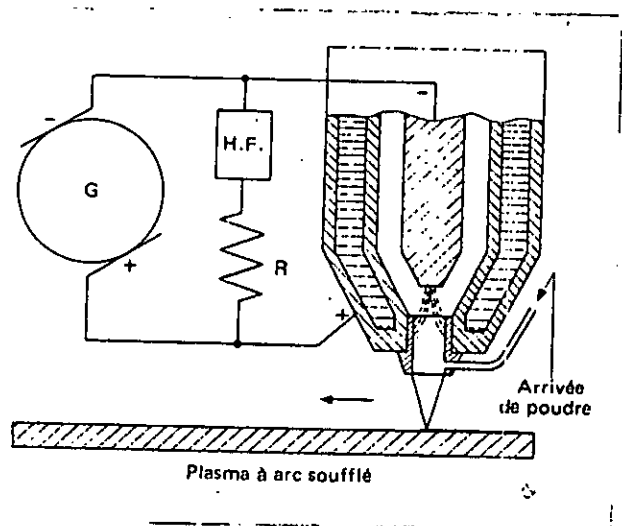


fig 3e : Plasma à arc soufflé.

## **I.7. Conduite de la projection :**

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

### **I.7.1. Sous-couches d'accrochage :**

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

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

Les sous-couches les plus utilisées sont : Molybdène, Nickel-Aluminium (80-20), Nickel-Aluminium (95-5), Nickel-chrome (80-20) etc...

### **I.7.2. Dépôt :**

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

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

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

### **I.7.3. Post-traitement des dépôts projetés :**

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

Ces traitements sont de quatre ordres :

#### **I.7.3.1. Colmatage :**

C'est une opération qui, par absorption, réaction chimique ou tout autre mécanisme, permet de boucher les porosités ouvertes et d'apporter d'autres propriétés désirées à un revêtement.

On distingue :

- le colmatage naturel : les porosités se compactent au vieillissement,
- le colmatage artificiel : les porosités sont bouchées par application d'un vernis ou d'une peinture réactive, de peintures non réactives fluides et d'un produit d'imprégnation.

#### **I.7.3.2. Imprégnation :**

Elle consiste à introduire différents produits colmatant pour éviter les inconvénients de la porosité

des dépôts. En général, ce sont des résines ayant un bon pouvoir pénétrant. Elles polymérisent à l'intérieur du dépôt pour étancher celui-ci et lui permettre de résister à certains agents corrosifs.

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

### **I.7.3.3. Traitements thermiques :**

Non seulement ils tendent à fermer les porosités, ils permettent d'améliorer l'adhérence et même de transformer la structure des couches déposées. Ces traitements permettent aussi de rendre les couches déposées plus ductiles, moins contraintes et d'augmenter la résistance au choc.

Pour cela nous avons accordé un intérêt particulier à ce post-traitement dans la partie expérimentale.

### **I.7.4. Image et caractéristiques du dépôt :**

#### **I.7.4.1. L'image du dépôt : (fig 4a)**

La micrographie d'un dépôt projeté à haute température est généralement traumatisante pour le chercheur, car les revêtements (en particulier les céramiques) révèlent une multitude de défauts : ils sont criblés de fissures formées lors du refroidissement brutal et ont une structure en nid d'abeilles avec des alvéoles remplies d'air et piégées dans les dépôts. De tels défauts peuvent rendre inutilisable un revêtement qui doit subir des contraintes mécaniques.

Paradoxalement, c'est à la porosité qu'on doit les plus importantes applications des revêtements céramiques, lesquels sont utilisés pour isoler les parties métalliques exposées à de très hautes températures. D'une part la porosité augmente le pouvoir isolant des céramiques, d'autre part, comme la céramique est friable, des pores ne fragilisent pas le matériau mais au contraire le renforcent en interrompant la propagation des fissures qui se forment inévitablement lorsque des forces agissent sur le matériau. Ces revêtements d'isolation thermique résistent ainsi aux contraintes mécaniques résultant des cycles thermiques répétitifs.

#### **I.7.4.2. Caractéristiques des dépôts : (fig 4b)**

Les gouttes du matériau heurtent une surface rendue rugueuse par usinage ou abrasion. La vitesse de projection dépend de la superficie à recouvrir et de la célérité du déplacement de la buse.

L'édification d'un revêtement par projection thermique est de nature chaotique. Les particules fondues s'étalent et s'éclaboussent quand elles heurtent la cible; elles se fixent d'abord sur les irrégularités de la surface rugueuse puis se lient entre elles. Des pores se forment dans le dépôt piège de l'air, des particules surchauffées s'oxydent, d'autres ne peuvent pas fondre et sont simplement noyées dans le dépôt où elles créent un défaut.

### **I.8. Applications de la projection thermique :**

La projection thermique peut être utilisée dans deux domaines distincts :

#### **I.8.1. Réalisation de revêtements sur des supports de nature divers :**

##### **I.8.1.1. Barrières thermiques :**

La principale utilisation de la projection thermique est la réalisation de revêtements minces ou épais,

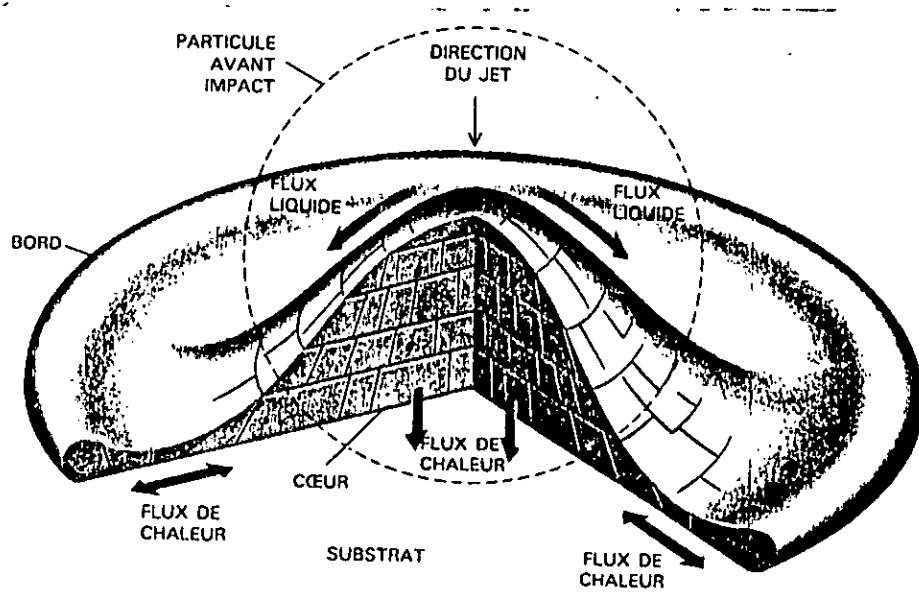


fig 4a : Géométrie d'une particule lors de l'impact.

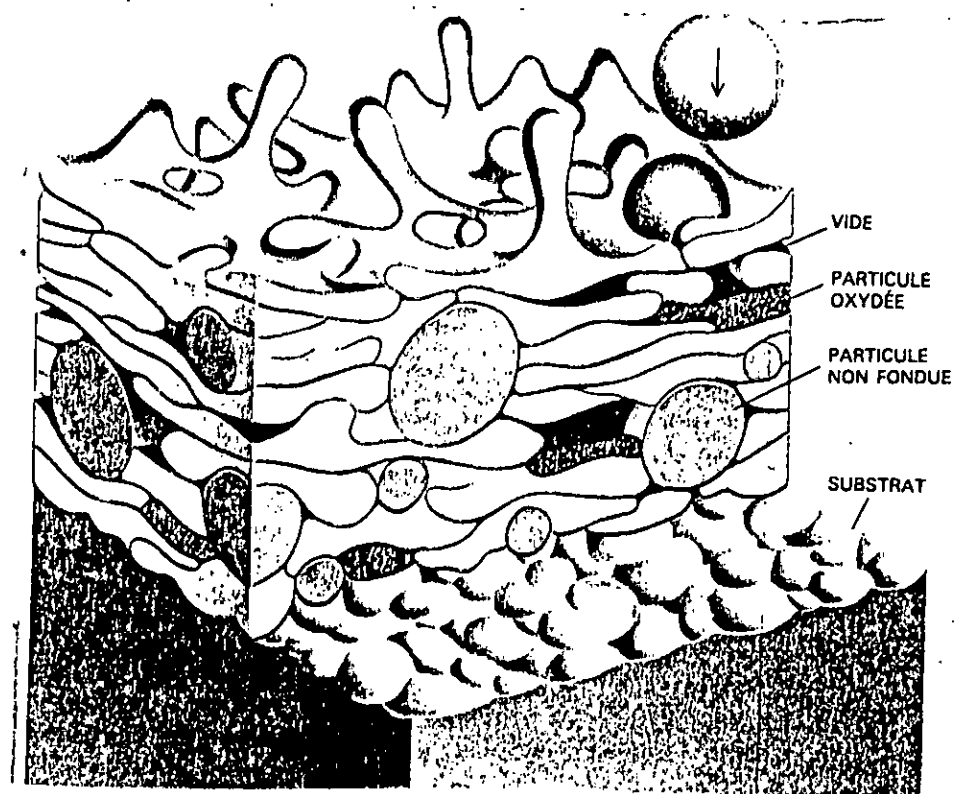


fig 4b : Edification d'un revêtement.

simple ou composites, sur les supports les plus divers.

Les essais de revêtements sur pistons et chambre de combustion de moteur diesel en cours ont enregistré des résultats extrêmement encourageants dans la réalisation de barrières thermiques.

#### **I.8.1.2. Protection contre la corrosion et l'abrasion :**

D'excellents résultats ont été enregistrés dans la protection de moules de coulée en coquilles des alliages légers. La durée de vie des moules a été considérablement améliorée avec un fin revêtement d'oxydes réfractaires et de silicate de zirconium.

Toutefois, il existe des cas où les résultats bien qu'encourageants ne sont pas concluants jusqu'ici, citons le cas des métaux fondus, surtout les alliages légers, tels le laiton et le cuivre qui posent depuis toujours des problèmes difficiles sur le plan de la corrosion.

#### **I.8.1.3. Protection électrique :**

L'alumine, excellent isolant électrique, est très fréquemment utilisée dans l'industrie de l'électronique pour isoler des pièces métalliques diverses, des fils thermocouples, des bobines d'induction, etc...

#### **I.8.1.4. Protection contre l'oxydation :**

La protection des aciers ou des métaux réfractaires à température élevée est un problème vaste et complexe dans lequel la projection thermique peut être de quelque utilité. Ainsi on peut protéger des aubes de turbines complètes avec des revêtements peu poreux que l'on peut rendre étanche ensuite. Pour cela on fait un revêtement d'alumine suivi d'une cuisson sous l'hydrogène ou sous l'argon à 1.200°C.

#### **I.8.1.5. Résistance à l'usure :**

Les revêtements de carbures de tungstène et de chrome et les alliages spéciaux sont très appréciés pour la dureté et la résistance à l'usure qu'ils confèrent aux pièces revêtues, principalement pour les revêtements exécutés sur des parties d'équipement hydraulique, les sièges de vannes, les matrices de forge etc...

#### **I.8.2. Façonnage d'objets céramiques - métalliques ou de matériaux composites :**

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

Les corps composites peuvent être faits de couches superposées de matériaux différents, ou bien le mélange des deux constituants.

Ces mélanges s'obtiennent soit par projection simultanée avec deux chalumeaux, soit avec une torche si celle-ci est alimentée par deux distributeurs de poudre contenant chacun l'une d'entre elles, ou encore s'il est alimenté par un seul distributeur contenant le mélange des poudres préparées à l'avance.

En conclusion, nous pouvons dire que la technique des dépôts relève d'une importance capitale dans la rectification et la récupération de matériaux usés, en particulier la projection thermique qui met en relief l'intérêt de son application, sur le plan de la recherche appliquée du point de vue protection des



pièces aux multiples sollicitations mécaniques et chimiques.

La polyvalence de la projection thermique fait qu'avec cette technique on peut projeter tous les métaux, en plus, pratiquement tous les céramiques sans contraintes de températures, ni d'épaisseur. Sa promotion vertigineuse dans les grandes industries fait qu'actuellement son équipement est totalement robotisé et automatisé, ce qui résout le problème d'incertitude des paramètres de projection.

## CHAPITRE II - USURE DES SURFACES

### II.1. Définition :

«Usure» est un terme général qui englobe tous les phénomènes de frottement entraînant perte de cote, de forme et de poids par émission de débris d'une surface métallique par suite de l'usage que l'on en fait.

### II.2. Intérêt de l'étude de l'usure :

#### II.2.1. Intérêt économique :

L'usure est la principale cause de la mise hors service des organes de machines, car plus en diminuent les effets du problème de contact de deux surfaces, on arrive à économiser annuellement des sommes considérables.

#### II.2.2. Intérêt scientifique :

Les programmes de tribologie qui comportent plusieurs disciplines scientifiques ; mécanique des solides, des fluides, physique du solide, chimie etc... , ont pour objet d'apporter aux ingénieurs et techniciens des données leur permettant d'améliorer les dispositifs existants ou d'en construire de nouveaux malgré la complexité du remède et les solutions non maîtrisées vu la diversité des facteurs influençant l'usure.

### II.3. Classification de l'usure :

Trois grandes classes d'usure sont à distinguer, à savoir :

#### II.3.1. L'usure bénéfique :

Son importance décroît dans le temps et conduit à un meilleur état de surface.

Appelée aussi «usure de rodage», l'usure bénéfique conduit à une meilleure adaptation aux mouvements affectés à un organe fonctionnel.

#### II.3.2. L'usure normale :

Usure très lente conduisant la détérioration progressive du matériau jusqu'au vieillissement.

#### II.3.3. L'usure catastrophique :

C'est la plus néfaste, elle conduit à la destruction rapide et complète des surfaces.

### II.4. Principaux types d'usure :

#### II.4.1. L'usure adhésive :

Le principal symptôme de l'usure adhésive est le transfert du matériau d'une des surfaces frottantes

sur la surface du corps antagoniste.

Pour lutter contre une telle usure, il est recommandé de choisir des matériaux naturellement insolubles, de régler la charge et la vitesse pour être en régime d'usure modéré et utiliser une lubrification adéquate. (fig 5b)

#### II.4.2. L'usure abrasive :

L'usure par abrasion se définit comme la perte progressive du matériaux à sa surface par action mécanique d'un abrasif. (fig 5c)

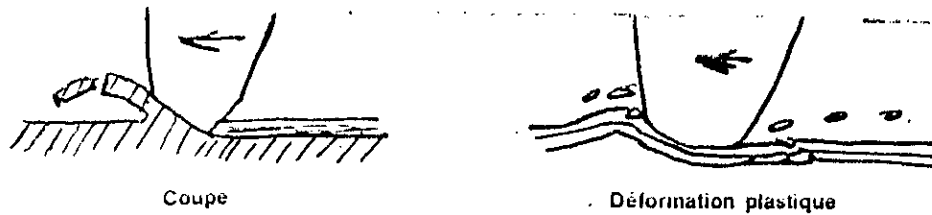


fig 5c : Usure abrasive.

Selon l'analyse la plus courante des phénomènes d'abrasion, on distingue deux configurations principales, l'abrasion deux corps selon que l'abrasif est libre ou qu'il est lié, et l'abrasion à trois corps. (fig 5d).

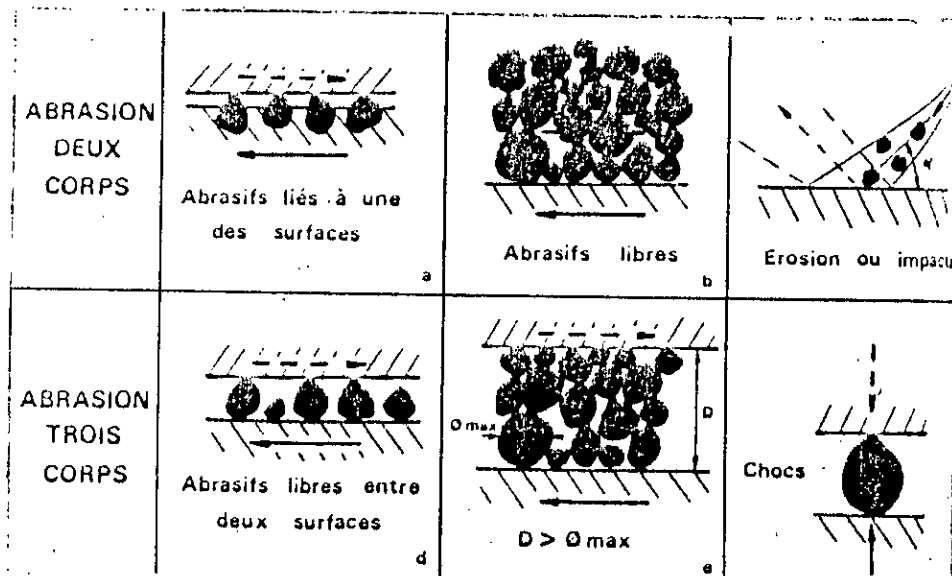
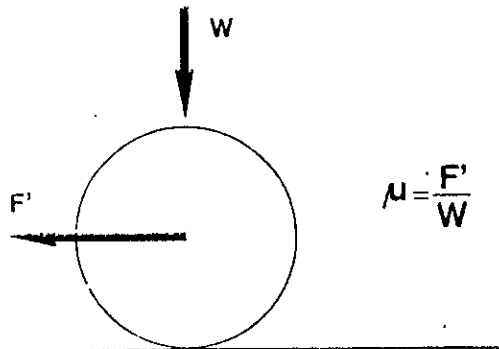


fig 5d : Configuration mécanique de l'abrasion.

L'usure abrasive se manifeste par des polissages, des griffures et des arrachements de copeaux

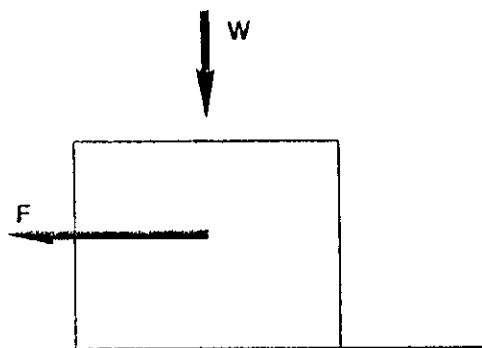
## FROTTEMENT DE ROULEMENT



$\mu$  = coefficient de frottement de roulement  
 $F'$  = force appliquée au solide pour le faire rouler  
 $W$  = charge normale appliquée au solide

Fig. 1. — Types de frottement.

## FROTTEMENT DE GLISSEMENT



$$\mu_s = \frac{F_0}{W}$$

$$\mu = \frac{F}{W}$$

$W$  = charge normale appliquée  
 $F_0$  = force nécessaire pour provoquer le mouvement du solide  
 $\mu_s$  = coefficient de frottement statique  
 $F$  = force nécessaire pour maintenir le mouvement du solide à vitesse constante  
 $\mu$  = coefficient de frottement de glissement

fig 5a : Types de frottement.

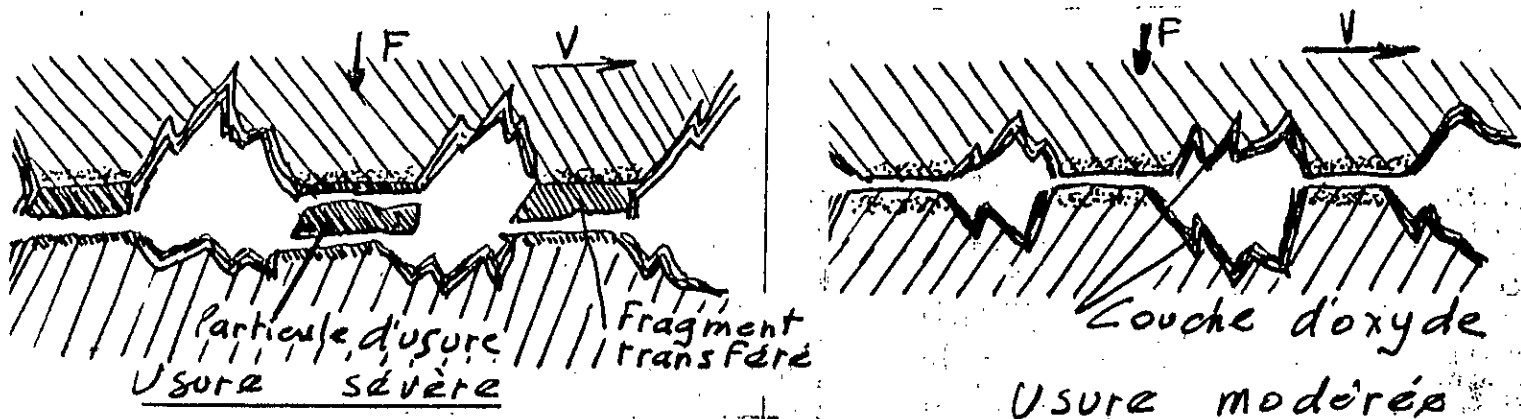


fig 5b : Usure adhésive.

### **II.4.3. L'usure érosive :**

C'est une forme d'usure abrasive due au contact avec un milieu contenant des particules solides dures, les causes de l'érosion peuvent être multiples :

- érosion par cavitation,
- érosion chimique,
- érosion électrique,
- érosion par rabotage,
- érosion par impact.

Pour lutter contre l'usure érosive, il faut accroître la dureté des matériaux et dans le cas de l'érosion par fluide, il est impératif de filtrer les fluides pour éliminer les particules de grandes tailles.

### **II.4.4. L'usure par fatigue :**

Des charges trop fortes peuvent détériorer les surfaces, on peut observer des déformations plastiques sur les métaux ductiles et des cassures sur des matériaux fragiles.

### **II.4.5. L'usure corrosive :**

Elles se définissent comme un processus d'usure dominé par une réaction chimique ou électrochimique avec le milieu environnant. Cette forme d'usure devient importante aux hautes températures et dans des atmosphères humides.

## **II.5. Fonctionnement et mécanismes d'usure d'un vilebrequin :**

### **II.5.1. Fonctionnement d'un vilebrequin : (fig 8)**

Dernier organe de l'équipage mobile d'un moteur, le vilebrequin est susceptible de transformer un déplacement rectiligne alternatif en un déplacement rotatif continu. Le vilebrequin est, avec les pistons la pièce la plus sensible d'un moteur.

Pratiquement exempt de contraintes thermiques, le vilebrequin est, par contre soumis à des efforts mécaniques alternés d'autant plus sévères qu'ils varient notablement d'un point à un autre. De plus un vilebrequin n'est pas un organe admis à être remplacé périodiquement, tant à cause de son prix que des travaux importants que son remplacement nécessite. (voir fig 6 et 7)

### **II.5.2. Usure du vilebrequin :**

Le vilebrequin doit pouvoir assurer son service sans usure notable aussi longtemps que le piston, il doit donc conserver son jeu de ligne d'arbre en évitant la dégradation des coussinets ainsi que celle des portées.

Les principales causes de l'usure des portées sont les vibrations induisant une usure par corrosion de contact.

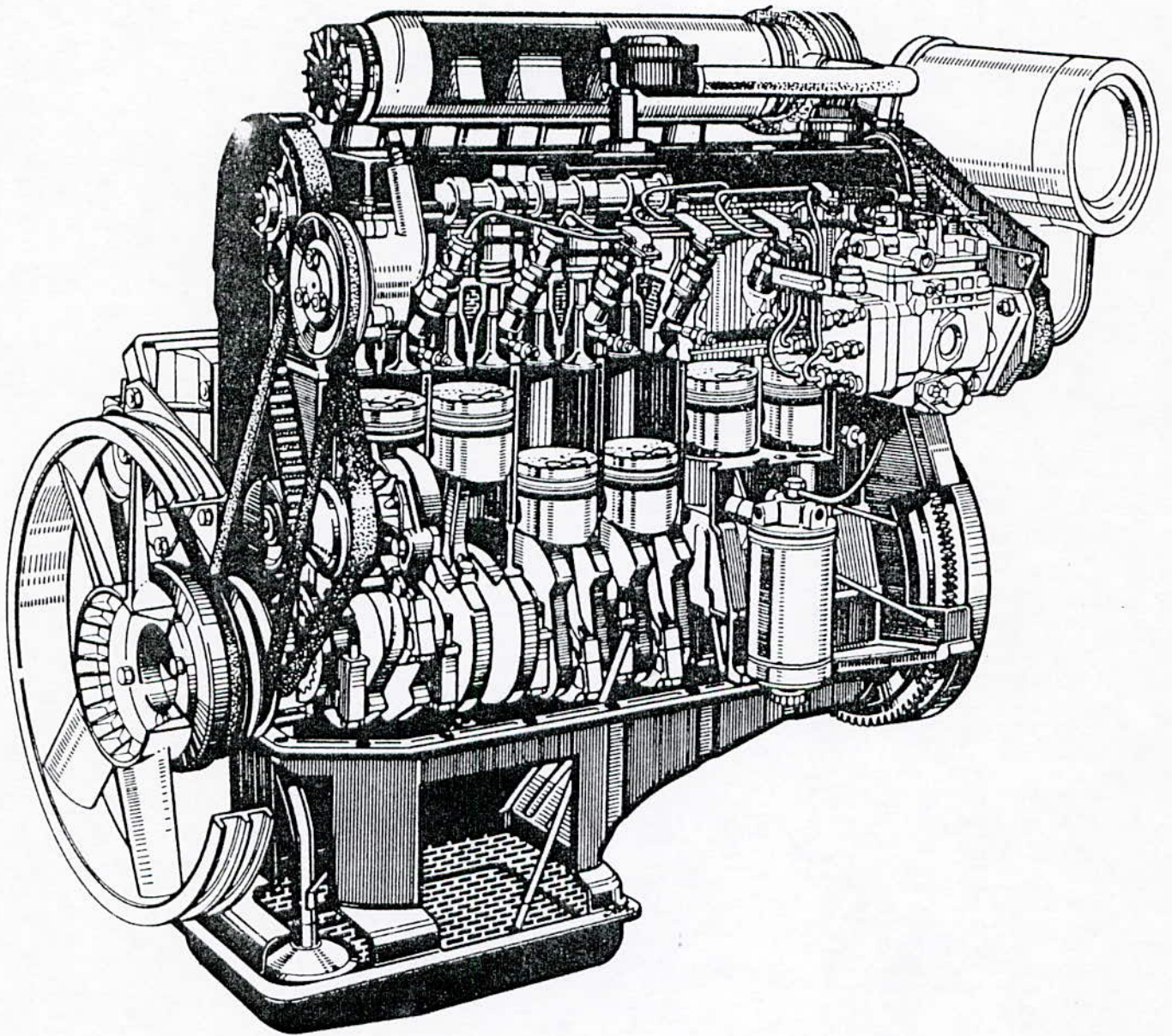


fig 6 : Image d'un moteur classique.

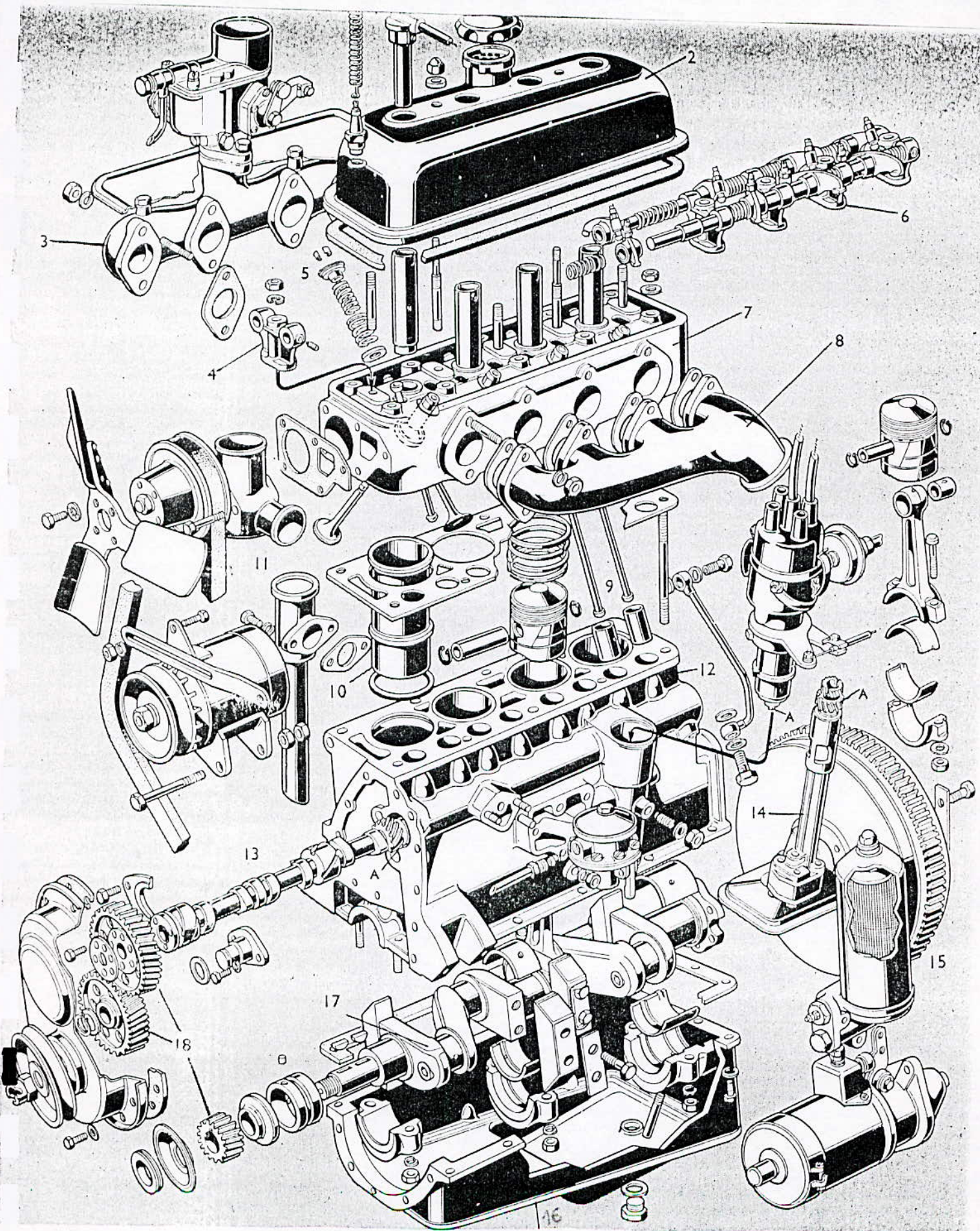


fig 7 : Ensemble des pièces composant un moteur classique.

- 1. Puits de bougie.
- 2. Couvre-culasse.
- 3. Pipe d'admission.
- 4. Palier des rampes de culbuteurs.
- 5. Ressorts et cuvettes de ressorts de soupapes.
- 6. Rampes de culbuteurs.

- 7. Culasse.
- 8. Collecteur d'échappement.
- 9. Poussoirs et tiges de culbuteurs.
- 10. Chemise de cylindre et son joint.
- 11. Reniflard du carter.
- 12. Bloc-moteur.

- 13. Arbre à cames.
- 14. Pompe à huile.
- 15. Filtre à huile.
- 16. Carter inférieur formant bassin d'huile.
- 17. Vilebrequin.
- 18. Pignons de commande de distribution.

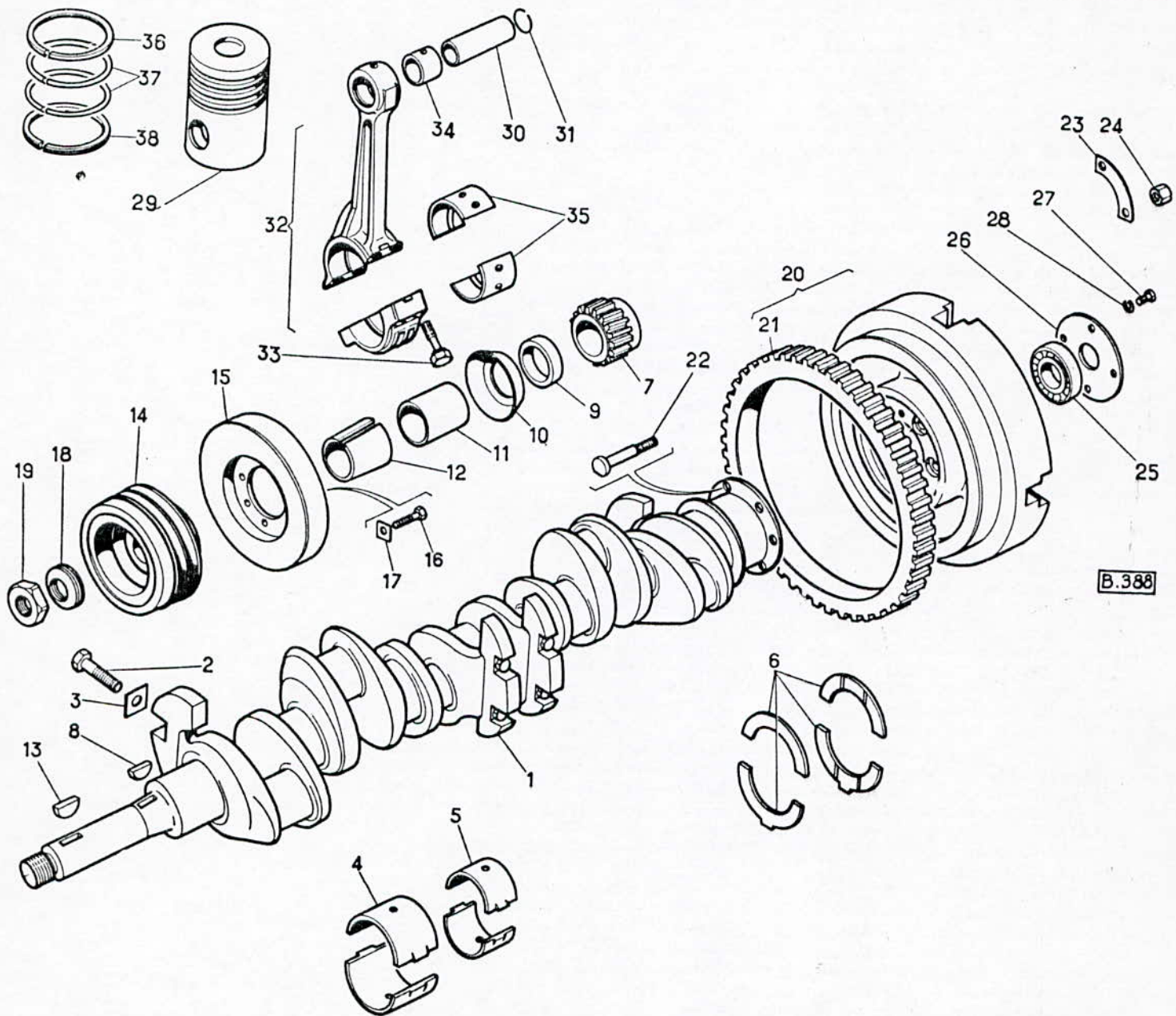
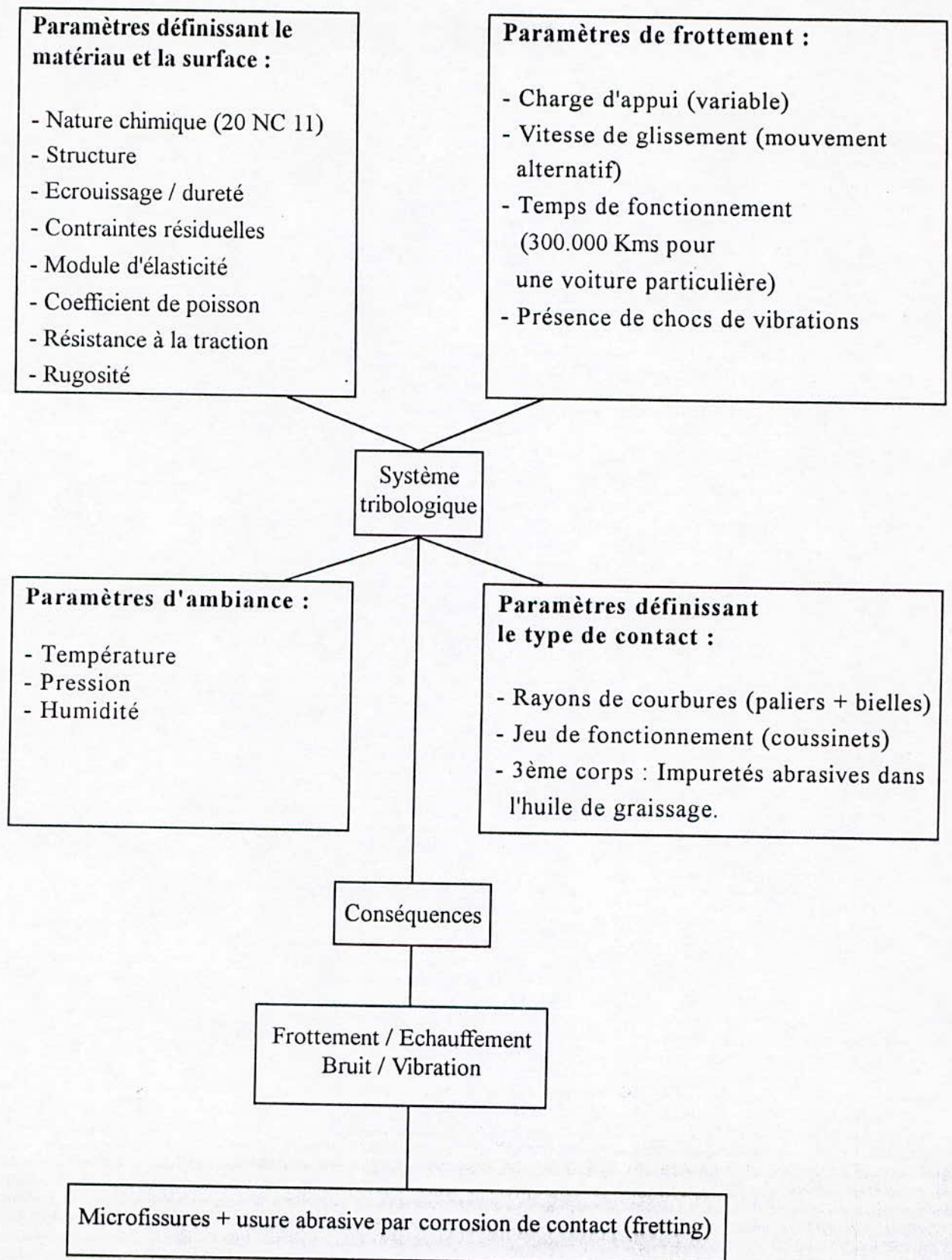


fig 8 : Figure d'un vilebrequin.



Repère	Désignation	Repère	Désignation
01	Vilebrequin forgé.	17	Frein de vis.
02	Vis fixant les contrepoids.	18	Rondelle élastique.
03	Frein des vis.	19	Ecrou de blocage.
04	Coussinets avant milieu et arrière.	20	Volant.
05	Coussinets intermédiaires.	21	Couronne dentée sur volant.
06	Jeu de flasques.	22	Vis fixant le volant.
07	Engrenage de distribution.	23	Frein d'écrou.
08	Clavette disque 8 X 13.	24	Ecrou H.
09	Petite entretoise contre engrenage.	25	Roulement à billes.
10	Tôle garde-huile sur entretoise.	26	Rondelle de retenue de roulement.
11	Grande entretoise sur vilebrequin.	27	Vis H fixant la rondelle de retenue.
12	Bague fendue.	28	Rondelle W 8.
13	Clavette disque 8 X 16.	29	Piston.
14	Poulie de ventilateur sur vilebrequin.	30	Axe de piston.
15	Damper élastique.	31	Arrêt d'axe de piston.
16	Vis fixant le damper.	32	Bielle baguée avec chapeau et vis.

**Tableau 1 : Nomenclature d'un vilebrequin.**



**Fig 9** : Les paramètres principaux du système tribologique d'un vilebrequin.

## CHAPITRE III - TRAITEMENTS THERMIQUES

### III.1. Définition :

Ensemble d'opérations de chauffages et de refroidissements, destinées à modifier les propriétés et les caractéristiques d'un produit métallurgique de manière à adapter son aptitude à un emploi déterminé.

Les aciers, les fontes et certains alliages d'aluminium et de cuivre sont sensibles à leurs effets.

### III.2. But des traitements thermiques :

L'intérêt de l'application des traitements thermiques consiste à faire coexister dans une pièce destinée à un usage défini les valeurs maxima admissibles des caractéristiques (généralement mécaniques) qui varient en sens inverse, à savoir :

(Résistance à la rupture  $R_m$  - Résistance élastique  $R_e$  - Dureté  $H$ ) avec (Allongement  $A\%$  - Résilience  $K$ ).

Les opérations de traitements thermiques comportent un cycle composé d'un chauffage, d'un maintien à température, d'un refroidissement. Elles sont destinées à produire des constituants de trempe, de revenu, et de recuit.

Signalons toutefois, que dans les cas difficiles le choix d'aciers spéciaux permet de seconder l'effet du traitement thermique malgré qu'il soit préférable d'utiliser un acier ordinaire convenablement traité à la place d'un acier ordinaire ayant subi un mauvais traitement.

### III.3. Classification des traitements thermiques :

En raison du développement important des applications industrielles des traitements thermiques, la gamme de ces derniers est très diversifiée. Pour cela nous nous sommes efforcés de présenter de façon synthétique les principaux traitements et de rappeler très succinctement leur principe et les propriétés qu'ils confèrent à une pièce mécanique.

#### III.3.1. La Trempe :

C'est le plus important et le plus délicat de tous les traitements thermiques. Il consiste essentiellement en un chauffage, à une température assez élevée, suivi d'un refroidissement généralement rapide, et a pour effet d'augmenter considérablement la dureté ainsi que la résistance à la rupture et élastique du métal. Par contre, la résilience et l'allongement se trouvent considérablement diminués.

Les constituants directs de la trempe sont : la martensité, la troostite, la bainite.

Les différents facteurs de trempe sont :

- la composition chimique du métal,
- la température de chauffage,
- le temps de maintien en température,
- la loi de refroidissement,

rappelons, que deux types de traitements existent, à savoir : la trempe avec refroidissement continu (TRC) ou refroidissement par étapes.

### **III.3.2. Le revenu :**

Le revenu est un traitement thermique appliqué essentiellement aux états trempés. Il consiste à chauffer le métal après trempe à une température à A1.

Ce traitement a pour effet d'augmenter la résilience, l'allongement, la striction, mais de diminuer la résistance à la rupture, la résistance élastique, ainsi que la dureté.

Son but principal est de diminuer certains effets néfastes produits par la trempe (en particulier la fragilité); il s'applique toujours après une trempe martensitique.

Les principaux types de revenus sont :

#### **III.3.2.1. Revenu de détente :**

Il se pratique à une température généralement inférieure à 200°C.

Il provoque :

Une baisse très modérée de  $R_m$ , une remontée sensible de  $R_e$  et de  $Z$  %. La dureté  $H$  dépendant de  $R_m$  et de  $R_e$  subit peu de variation. Il est pratiqué sur des aciers soumis à de très fortes sollicitations, sans chocs, où destinés à conserver localement une très grande dureté (couches cémentées).

#### **III.3.2.2. Revenu banal ou classique :**

Il se pratique à des températures comprise entre 500°C et  $A_{c1}$ .

Il provoque :

La précipitation du carbone conduisant à :

Une augmentation des caractéristiques ( $K$ ,  $A$  %,  $Z$  %)

Une diminution plus ou moins importante de ( $H$ ,  $R_m$ ,  $R_e$ )

Ce type de revenu permet d'établir un compromis entre les caractéristiques suivant les conditions d'emploi des pièces après traitement.

#### **III.3.2.3. Revenu de durcissement :**

Il se pratique à des températures comprises entre 200 à 600 °C.

Entre 200 et 300°C, ce traitement provoque la transformation de l'austérite résiduelle en bainite, la température de traitement est à situer avec les courbes T.T.T. de l'acier considéré.

Entre 450 et 600°C - deux cas peuvent se présenter :

\* la transformation de l'austérite non transformée par un premier revenu, ce traitement prend le n de déstabilisation et se pratique généralement sur des aciers rapides ou certains aciers fortement alliés.

\* la précipitation de carbure très fins qui entraîne un relèvement des caractéristiques ( $R_m$ ,  $R_e$ ,  $H$ ). Ce type de durcissement est dit secondaire.

Au delà de 600°C, le phénomène de coalescence (grossissement par diffusion des précipités) amorce un adoucissement avec abaissement de ( $R_m$ ,  $R_e$ ,  $H$ ) et une augmentation de ( $K$ ,  $A$  %,  $Z$  %).

### **III.3.3. Le recuit :**

Traitement thermique ayant pour but d'amener un métal traité, dans un état d'équilibre physico-chimique, structural et mécanique, ce traitement est applicable aux pièces hors équilibres et se pratique avec : un chauffage, un maintien à température, un refroidissement suffisamment lent pour éviter la formation de constituants de trempe.

Les principaux types de Recuit sont :

#### **III.3.3.1. Recuit d'adoucissement :**

Il détruit les effets la structure d'une déformation ou d'un traitement thermique tout en affinant le grain. Il se pratique avec un chauffage à  $AC_3$ , un maintien d'homogénéisation de la température et un refroidissement lent.

Pratique sur les aciers mous alliés avec refroidissement à l'air calme, il prend le nom de recuit de normalisation. Celui-ci est principalement utilisé afin d'améliorer l'usinabilité.

#### **III.3.3.2. Recuit de coalescence :**

Il consiste à préparer la structure des aciers destinés à une déformation à froid. Il consiste en une série de chauffage et de refroidissement autour de  $AC_1$  (recuit pendulaire).

#### **III.3.3.3. Recuit d'affinage structural :**

Succession rapide du chauffage jusqu'à  $AC_3 + 25^\circ C$  et du refroidissement.

#### **III.3.3.4. Recuit de recristallisation :**

Il s'effectue à une température d'autant plus basse et fournit des cristaux d'autant plus fins que le taux d'écrouissage est plus important.

#### **III.3.3.5. Recuit d'homogénéisation :**

Il consiste en un chauffage à haute température (solidus moins  $150^\circ C$ ) pendant une durée pouvant atteindre une dizaine d'heures. Ce recuit est destiné à réduire plus ou moins les hétérogénéités de composition chimique engendrées par le processus de solidification.

On sait, en effet, qu'un alliage brut de solidification ou peu corroyé n'a pas, en général, une composition chimique uniforme. Celle-ci évolue localement avec les ségrégations apparues pendant la solidification.

Pour réduire ces hétérogénéités, on fait intervenir la diffusion en portant l'acier à haute température et le maintenant à cette température pendant le temps nécessaire pour obtenir le résultat souhaité.

Le calcul approximatif des conditions opératoires peut se faire selon la méthode proposée par THELNING, méthode qui consiste à admettre que la teneur locale en l'élément considéré varie

sinusoïdalement avec la distance. Il est alors possible d'appliquer les lois de la diffusion et l'on parvient à l'équation suivante :

$$\Delta C = \Delta C_0 \cdot \exp(-\pi^2 \cdot Dt / l^2)$$

avec :

- :  $\Delta C$  : écart maximal de la teneur visé après le traitement (%)
- $\Delta C_0$  : écart maximal de teneur avant le traitement (%)
- $t$  : durée du maintien à température (s)
- $l$  : distance entre un point où la teneur est maximale et le point le plus voisin où elle est minimale (cm)
- $D$  : coefficient de diffusion à la température du traitement (cm<sup>2</sup>/s)

où

$$D = D_0 \cdot \exp(-Q / R.T)$$

avec :

- $D_0$  (cm<sup>2</sup>/s) : facteur de fréquence.
- $Q$  (J mol<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>) : énergie d'activation de la diffusion.
- $T$  (°K) : température absolue de traitement.
- $R$  (8,314 mol<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>) : constante des gaz parfaits.

Dans ce qui suit notre travail expérimental, notre choix est porté sur ce traitement, car il répond parfaitement au problème posé, qui consiste en l'amélioration de l'adhérence d'un dépôt projeté à chaud sur une pièce usée (dans notre cas, il s'agit d'un vilebrequin) en amorçant le phénomène d'interdiffusion entre le dépôt et le substrat constituants notre multimatériaux.

## CHAPITRE IV - TECHNIQUES EXPERIMENTALES

### IV.1. Position du problème :

Très familier chez les automobilistes en particulier et le monde industriel en général, le vilebrequin détient un rôle stratégique dans la partie dynamique d'un moteur et une place prépondérante dans le domaine économique.

Organe de haute précision, le vilebrequin est sensible à la moindre trace de coup, de rayure ou d'oxydation.

Cependant, tout défaut d'aspect ou un degré d'usure prononcé (au-delà des tolérances fixées) entraîne sa rénovation ou son échange standard. Dans ce dernier cas, il est livré équipé de ses coussinets et de ses bielles. Quant aux travaux de rénovation, ils sont du ressort d'ateliers spécialisés.

Basés essentiellement sur l'enlèvement de matière, ils s'exécutent sur machine à rectifier. Dans ce cas, la rectification qui exige le remplacement des coussinets peut se faire à trois reprises, de la côte d'origine jusqu'à la troisième côte avec des normes bien fixées par le constructeur.

une fois hors côte, la perfection n'est plus possible, le vilebrequin est hors service, il est systématiquement remplacé.

Etant donné les considérations citées précédemment, l'objectif principal de notre étude est de concrétiser la possibilité de récupération de la côte d'origine d'un vilebrequin hors côte, rectifier auparavant à une, deux ou trois reprises, en faisant appel à la technique de rechargement par métallisation. Ainsi, le dépôt d'une couche métallique permet de ramener l'organe aux côtes nominales.

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

### IV.2. Equipement utilisé :

**IV.2.1. Pistolet utilisé :** C'est un pistolet de projection thermique de marque SPRAY 234, de production anglaise utilisant l'arc électrique comme source d'énergie, il a été conçu pour alléger la fatigue de l'opérateur et produire des revêtements de hautes qualités.

Appareil souple et portatif il se manipule aussi bien manuellement que mécaniquement et la qualité des dépôts qu'il produit dépendent du débit de matière projetée, ce dernier est fonction d'un certain nombre de paramètres, à savoir :

Pression d'air dans le compresseur	4 à 5,5 bars
Pression d'air dans la buse de projection	3 bars
Vitesse d'avance du fil métallique	0,064 m/s
Tension du générateur	30 V
Intensité de courant	100 A

**Tableau 2** : Paramètres de mise en service du pistolet.

#### IV.2.2. Paramètres de projection :

Certains paramètres de projection (distance de projection, vitesse de rotation de la cible, débit de matière projeté, angle de projection etc...) qui ont une influence majeure sur la mouillabilité des particules projetées, et donc sur la qualité du revêtement, n'étaient pas maîtrisés par l'entreprise et sont choisis aléatoirement en fonction des pièces traitées.

C'est dans ce sens, qu'une étude récente est réalisée en collaboration avec notre entreprise d'accueil et ayant pour objectif l'optimisation des paramètres de projection pour lesquels on a opté dans notre étude.

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

**Tableau 3** : Paramètres de projection.



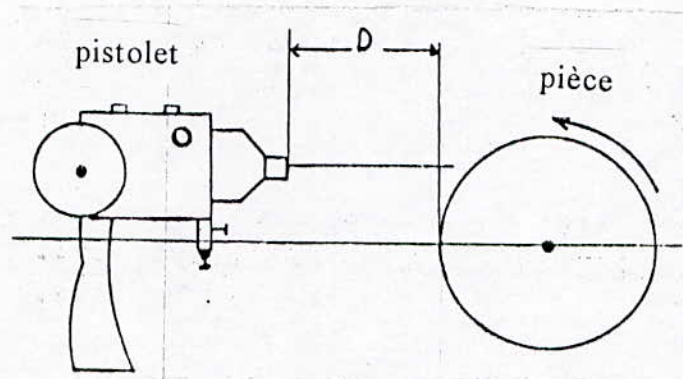


Fig. 10 : Position du pistolet de projection par rapport à la pièce à recharger.

### IV.3. Matériaux utilisés :

#### IV.3.1. Substrat :

Deux critères ont motivé le choix de notre matériau de base, alliage au Chrome - Nickel de type 20 NC11.

1. La disponibilité et l'utilisation de cet acier faiblement allié dans l'industrie algérienne constitue le critère économique de notre choix. [13]

2. Le deuxième critère ; d'ordre technique : montre que la plus part des constructeurs de vilebrequins utilisent un acier de ce type, choix recommandé d'ailleurs par la littérature [10] [14]

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

Eléments	Fe	C	Ni	Cr	Mn	Si
Composition	93,45	0,110	3,730	1,560	0,3170	0,308

Tableau 4 : Résultats de l'analyse spectrochimique.

Après un traitement de trempe à l'huile effectuée à 850 C°, et un revenu à 550 C° avec un maintien de 45 mn, l'acier présente les caractéristiques mécaniques suivantes : [21]

Re (dN/mm <sup>2</sup> )	Rc (dan/mm <sup>2</sup> )	A %	Kcn	HB
> 70	> 85	> 12	> 8	200

**Tableau 5 :** Caractéristiques du matériau avant la projection.

#### **IV.3.2. Sous-couche d'accrochage :**

Dans le souci de réaliser une meilleure adhérence et d'avoir un compromis des propriétés mécaniques et thermiques entre le dépôt et le substrat, il est fortement recommandé d'utiliser la sous-couche d'accrochage. Déposée en première, cette dernière, ayant une épaisseur allant de 0,1 à 0,2 mm, prise en sandwich entre le dépôt et le substrat est composé d'un alliage NI - Al désigné par la nuance 75E.

Nous avons par ailleurs jugé judicieux de réaliser un revêtement sans sous-couche d'accrochage pour laquelle une étude comparative a été faite.

#### **IV.3.3. Dépôt :**

Nous avons réalisé un revêtement composite par projection combinée de deux fils en acier de nuances respectives 55 E et 65 E sur une épaisseur de 1,0 mm.

\* 65 E : acier au chrome Manganèse.

\* 55 E : acier inoxydable 18/5.

Par ailleurs, une opération de rectification s'effectue en fin de projection afin de bien ajuster la côte nominale désirée et de réaliser un glaçage de la surface pour faciliter le rodage du vilebrequin.

#### **IV.4. Préparation des échantillons :**

Douze échantillons identiques de nuance 20 NC11 ont été confectionnés en tenant compte de la commodité des essais nécessaires pour cette étude d'une part, et d'approcher le plus possible la configuration des paliers d'un vilebrequin d'autre part.

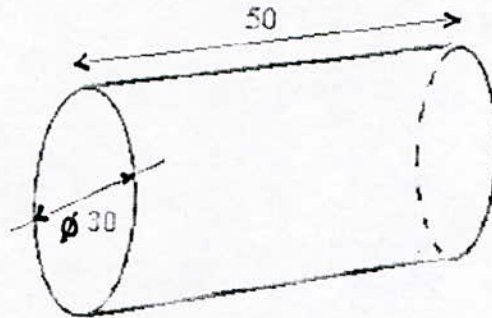


Fig. 11 : Schéma de l'échantillon utilisé.

#### IV.4.1. Préparation mécanique (décapage mécanique) :

Cette opération a été effectuée sur une rectifieuse cylindrique. Elle consiste en un enlèvement de matière sur une épaisseur ne dépassant pas le dixième de millimètre, afin de corriger le profil de la pièce et de la débarrasser de toute bavure et de tous les oxydes.

#### IV - 4.2. Décapage chimique :

On a utilisé le trichloro-éthylène ( $\text{CHCl}_3$ ) pour le dégraissage des échantillons qui ont été contaminés pendant l'usinage. Cette opération permet de débarrasser toutes traces de peintures, d'huiles ou d'impuretés se trouvant à la surface.

#### IV.4.3. Rugosification :

Parmi les diverses techniques de rugosification, nous avons utilisé le grenailage qui est recommandé pour les dépôts épais. Cette opération qui consiste à cribler la surface par un jet de particules métalliques permet d'obtenir une surface fin prête pour recevoir le dépôt. La pression du jet de la grenaille qui est de 07 bars. Cette opération se fait avec beaucoup de soins et avec un maximum de sécurité.

#### IV - 5. Post-traitements :

Parmi les différents post-traitements pratiqués sur les multimatériaux réalisés par projection thermique, nous avons opté pour les traitements thermiques. Par ailleurs, le choix du traitement préconisé est le recuit d'homogénéisation.

Les raisons qui ont motivé notre choix émanent de la recherche bibliographique [14] [19]. Une fois nos échantillons revêtus, on leur a fait subir un recuit d'homogénéisation à 1050 C° dans un four électrique, avec un temps de maintien variant comme indiqué ci-dessous :

Les douze échantillons dont six ont été rechargé sans sous-couche d'accrochage et six avec sous couche d'accrochage ont été combiné deux à deux (un avec sous-couche et un sans sous-couche) pour être maintenus par paire respectivement à 1, 2, 3, 6 et 9 H.

La dernière paire n'a pas subit de traitement dans le but de pouvoir faire une étude comparative.

Le temps de maintien est compté à partir du moment où les échantillons ont effectivement atteint 1050 C°.

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

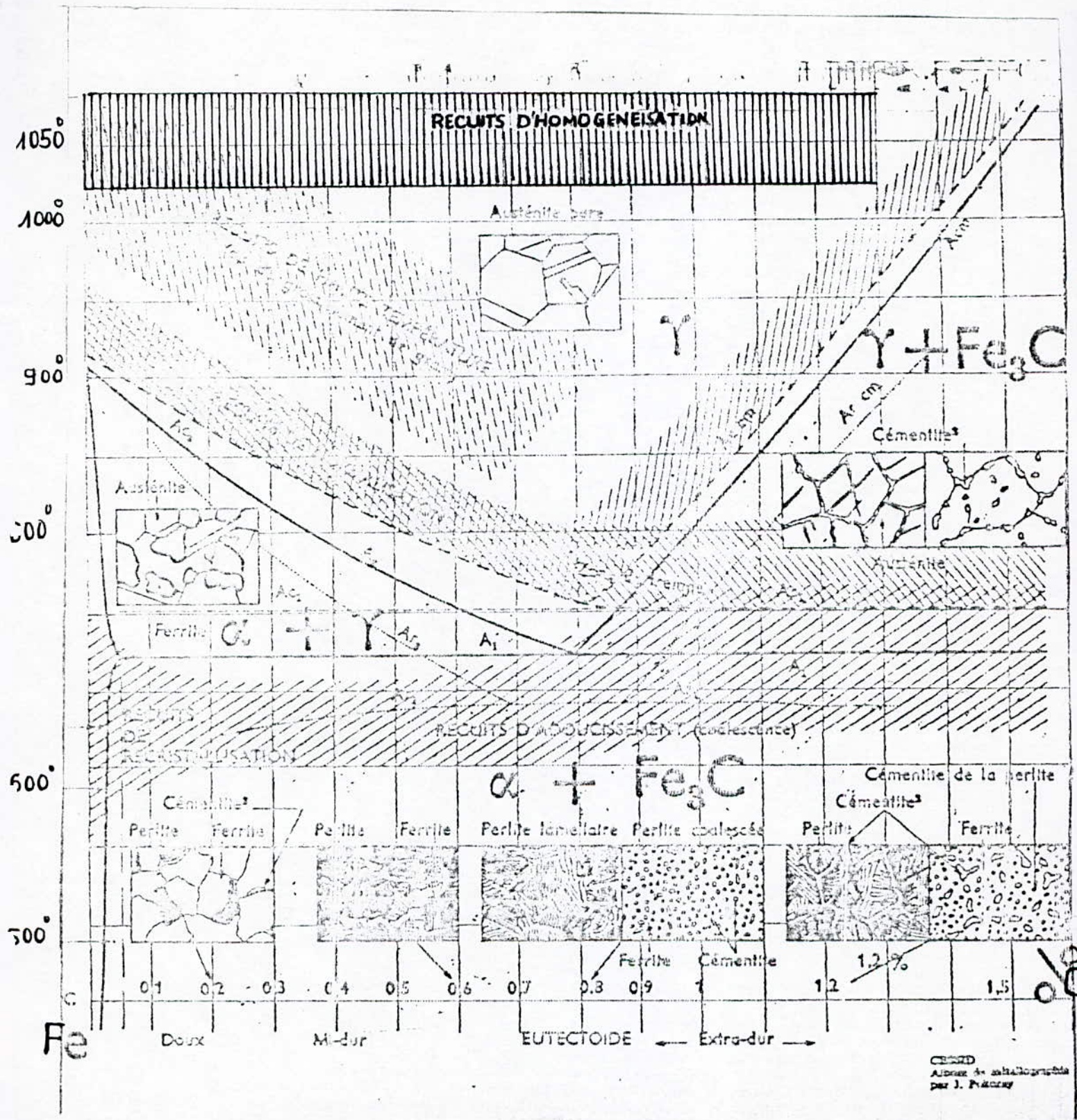


Fig. 12 : Diagramme d'équilibre Fe - C

## CHAPITRE V - ANALYSES METALLURGIQUES ET MECANIQUES DU MULTIMATERIAU OBTENU :

### V.1. Analyse micrographique et interprétations :

#### V.1.1. Introduction :

La micrographie est la première méthode utilisée pour contrôler la qualité d'un dépôt [15]

Ce procédé réservé à l'examen de surfaces ayant de bonnes qualités réfléchissantes permet d'observer et de mesurer la surface réelle, d'évaluer les critères physiques des écarts géométriques. Il permet en effet de visualiser la nature des phases en présence et de mettre en évidence la grandeur et la forme des grains, les divers constituants du multimatériau, ainsi que la structure particulière de certains traitements et révèle les défauts infimes (inclusions, microfissures, porosités, écaillages, etc...)

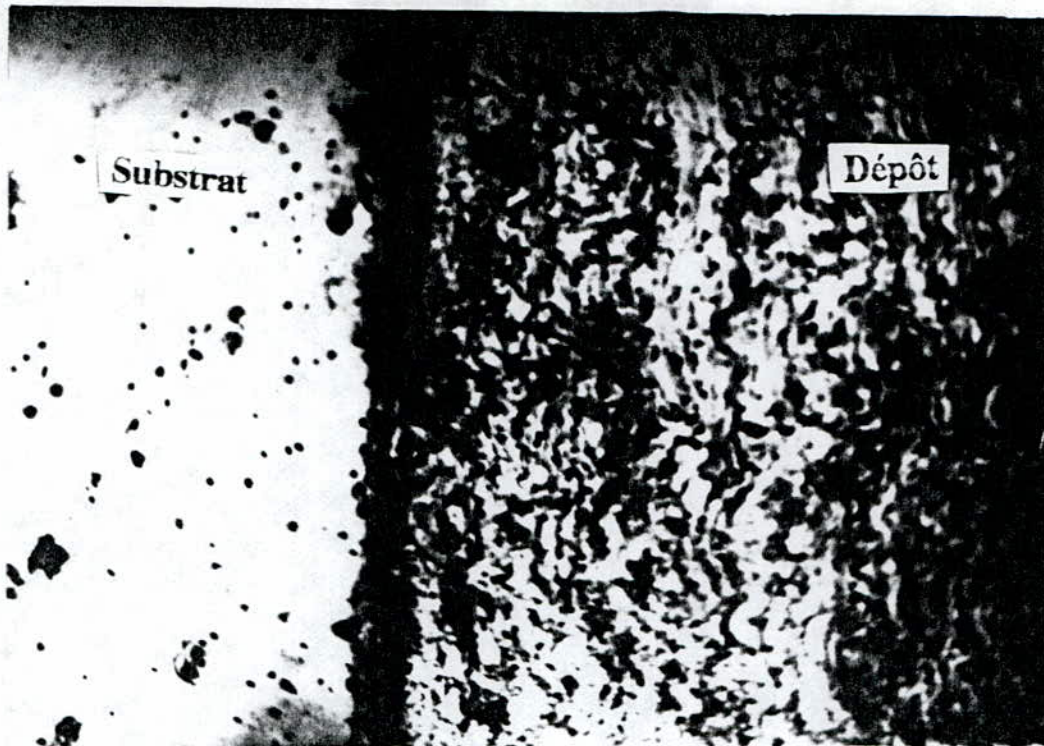
Une fois la projection et les post-traitements réalisés, nous avons procédé à l'observation micrographique avant l'opération de finition à la rectifieuse pour permettre la prise de photographies sur un dépôt épais.

L'examen est effectué au microscope optique avec un grossissement de 200 sur des surfaces convenablement préparées ayant subis des polissages mécaniques sur du papier abrasif à grains de plus en plus fins (120, 320, 600 et 1.000). Après chaque passe du polissage, un nettoyage aux ultrasons a été effectué. La finition a été faite sur papier feutre à l'aide d'une suspension d'alumine.

La mise en évidence de la structure micrographique est réalisée par une attaque chimique au Nital à 5 % (95° % Alcool éthylique et 5 % Acide Nitrique) pendant près de 10 secondes).

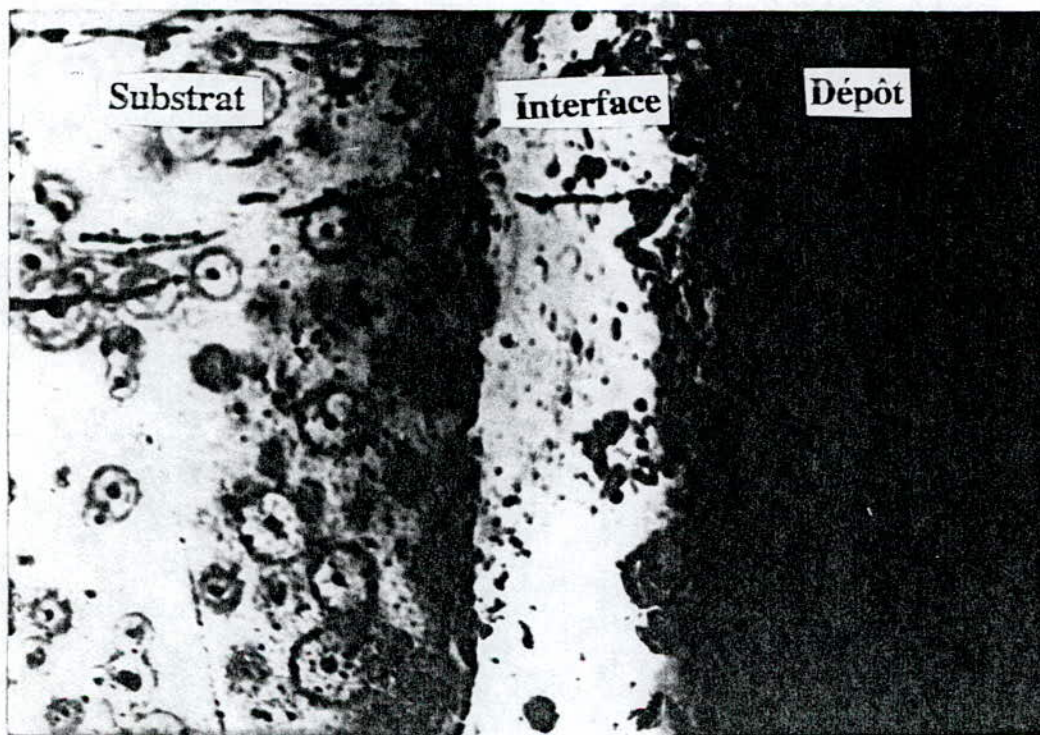
Les observations microscopiques et les photos ont été effectuées au niveau de l'interface et sur le substrat pour les douze échantillons étudiés, (traités et non traités) afin de mettre en évidence les processus physico-chimiques qui en découlent, à savoir l'inter diffusion entre le dépôt et le substrat et les écaillages qui sont produits.

Ainsi dans ce qui suit, seront illustrées les photographies de nos échantillons au niveau de l'interface et du substrat lorsque le multimatériau est réalisé avec ou sans sous-couche d'accrochage respectivement pour les différents traitements subis.



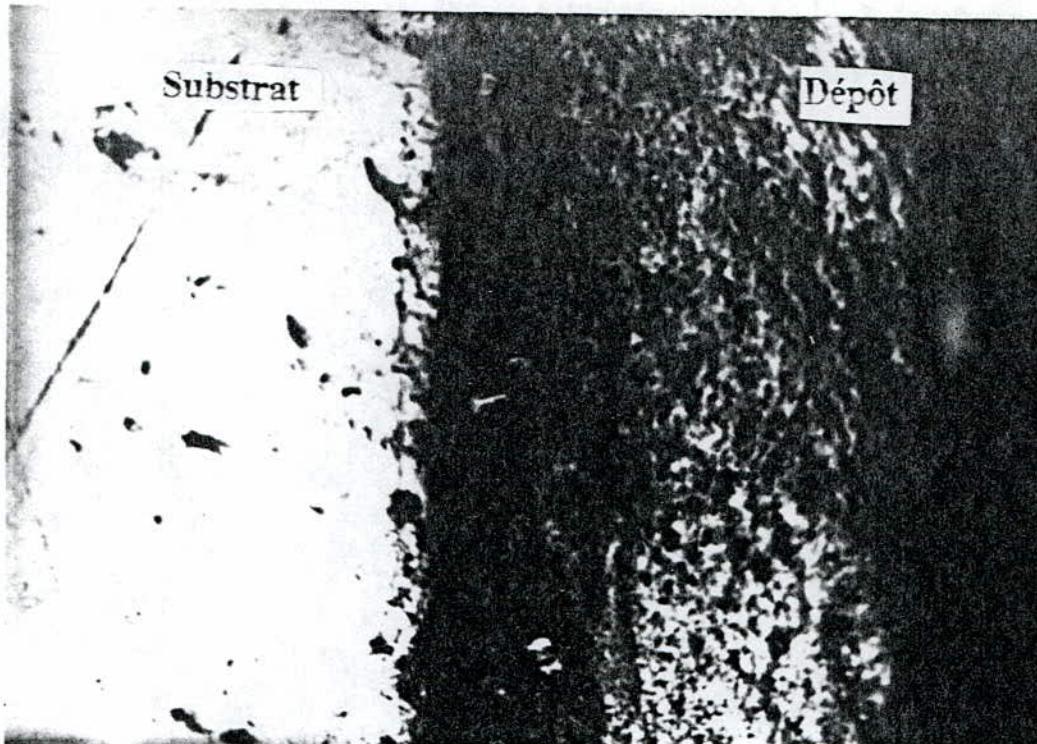
x 200

Photo n°1 : Interface sans traitement sans sous-couche.



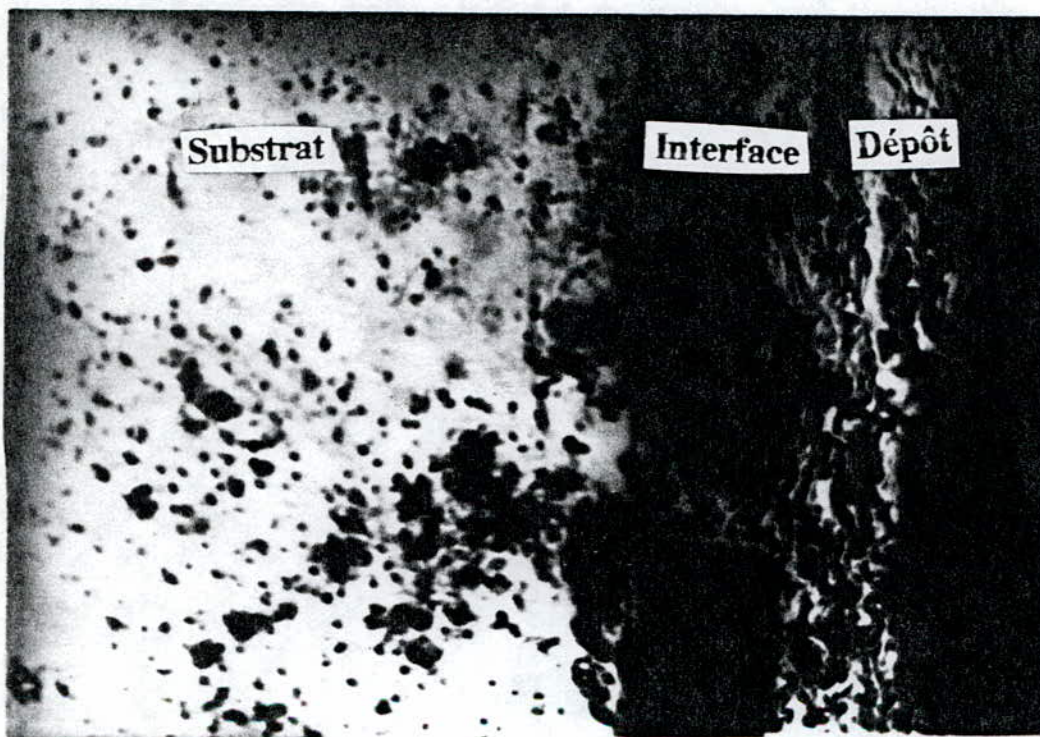
x 200

Photo n°2 : Interface sans traitement avec sous-couche.



x 200

Photo n°3 : Interface sans sous-couche t = 1h.



x 200

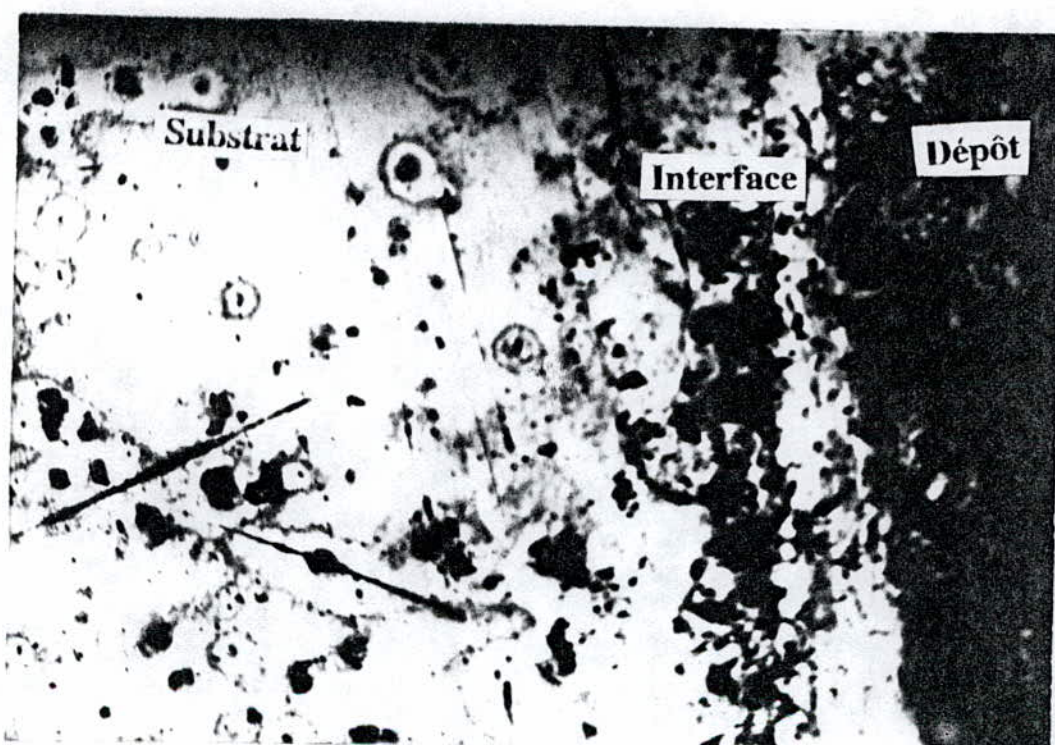
Photo n°4 : Interface avec sous-couche t = 1 h





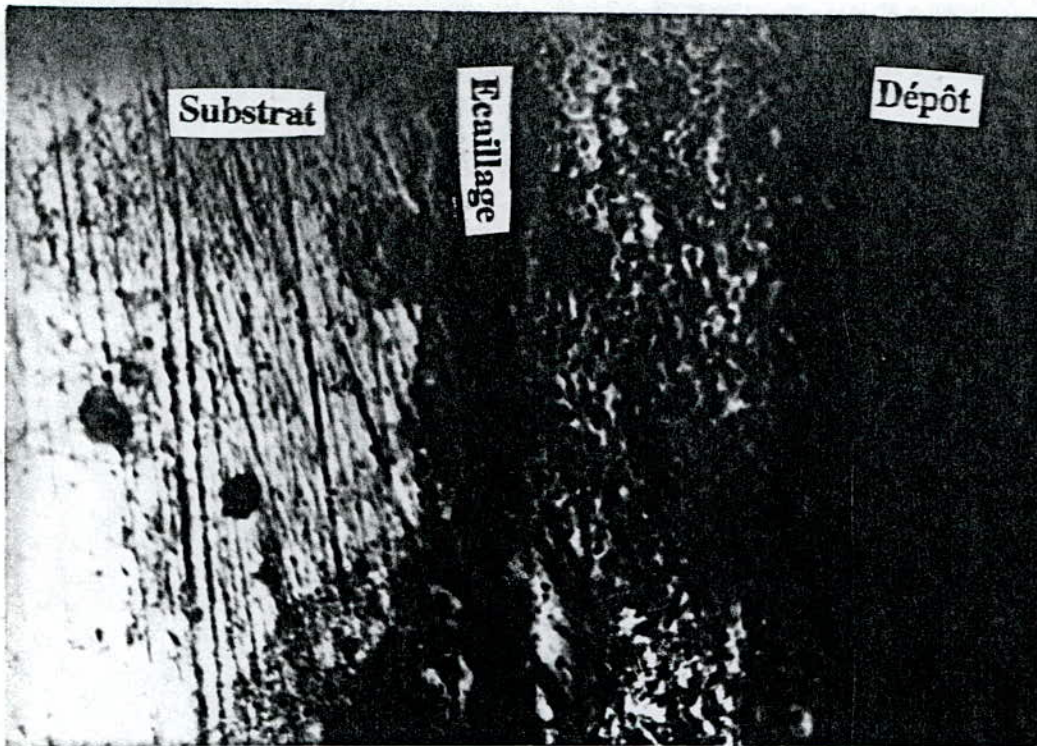
x 200

Photo n°5: Interface sans sous-couche. t = 2 h.



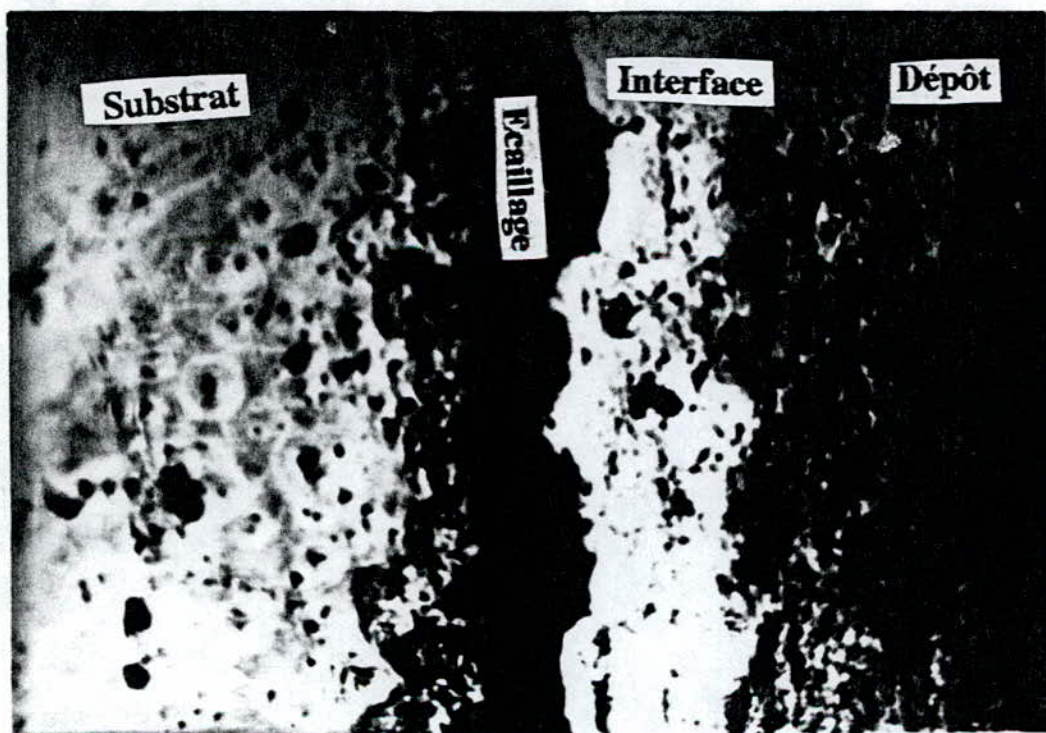
x 200

Photo n°6: Interface avec sous-couche. t = 2 h.



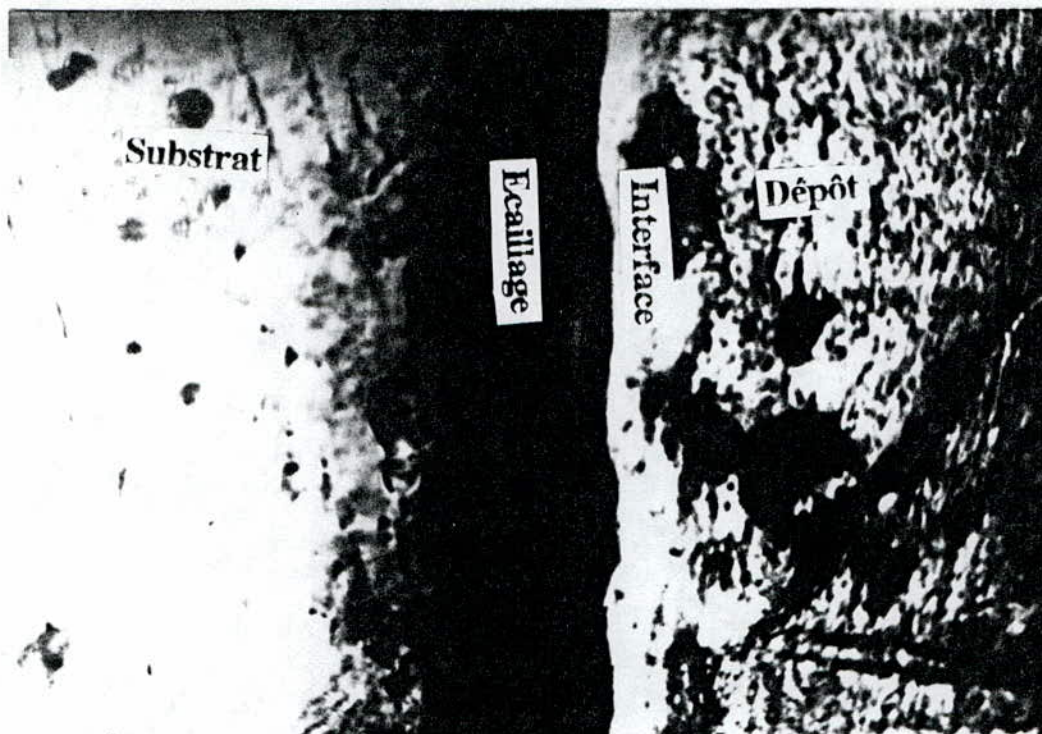
x 200

Photo n°7: Interface sans sous-couche t = 3 h



x 200

Photo n°8 : Interface avec sous-couche t = 3 h



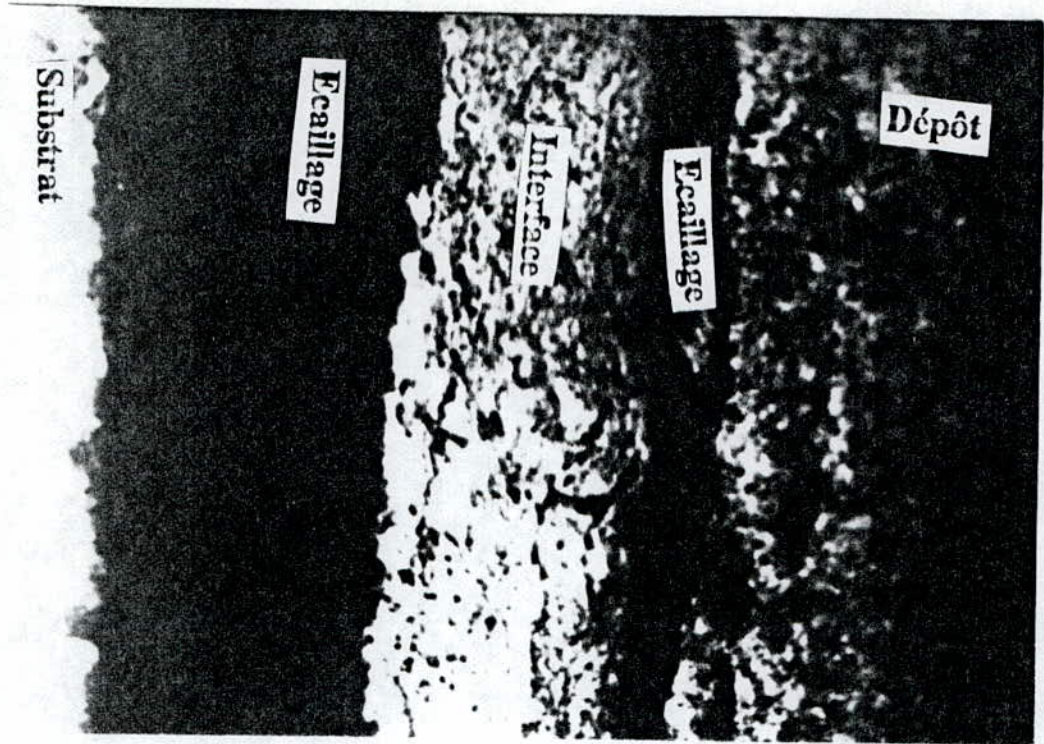
x 200

Photo n°9 : Interface avec sous-couche.  $t = 6$  h



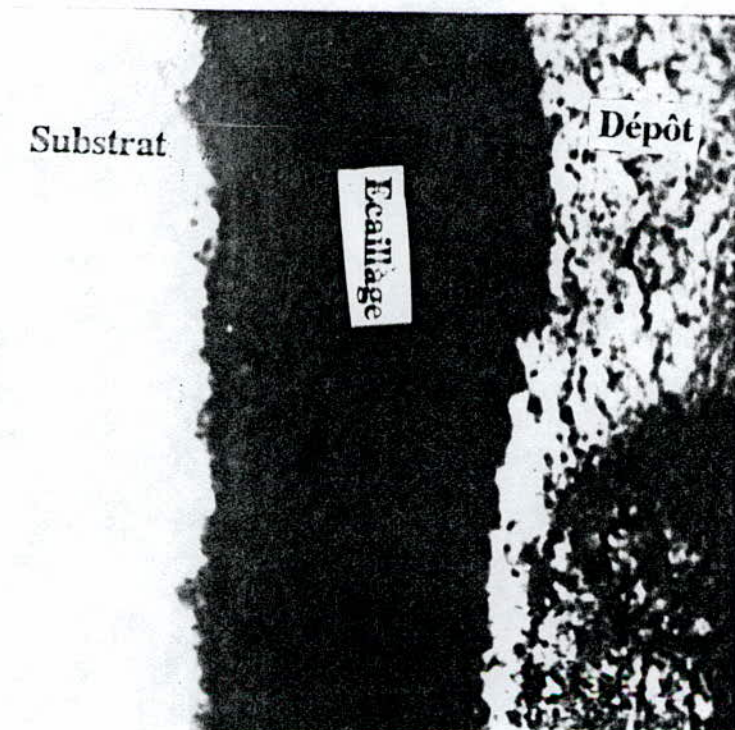
x 200

Photo n°10 : Interface sans sous-couche.  $t = 6$  h



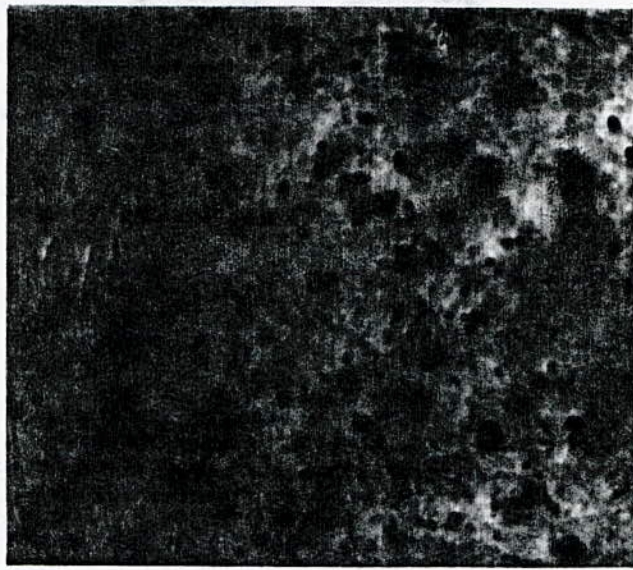
x 200

Photo n°11 : Interface avec sous-couche  $t = 9h$ .



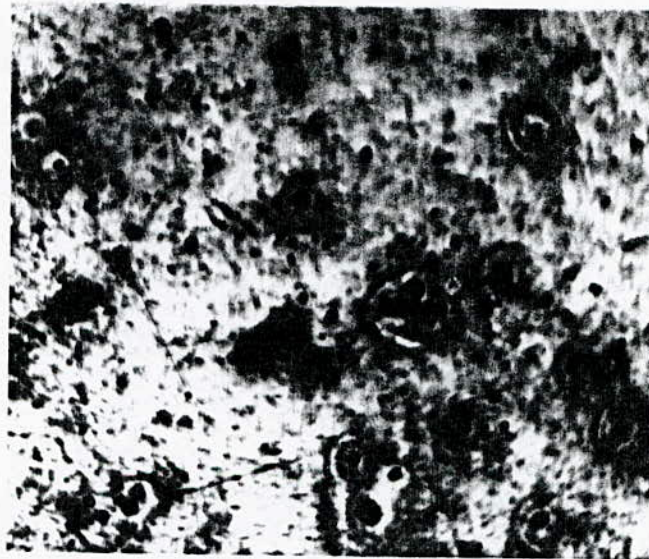
x 200

Photo n°12 : Interface sans sous-couche  $t = 9h$ .



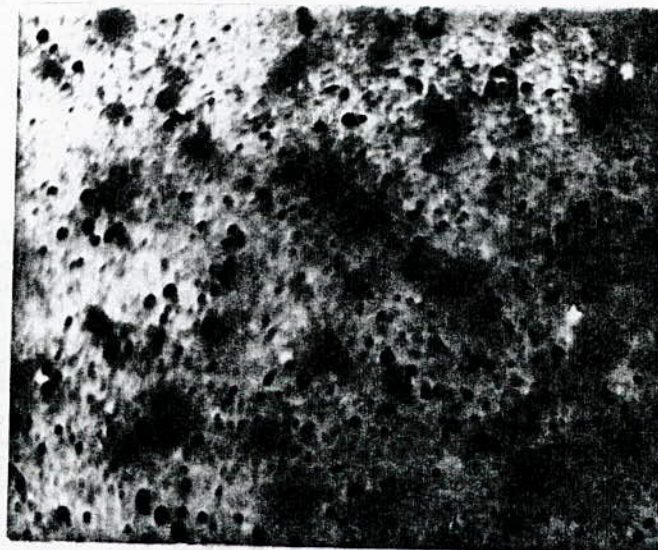
x 200

Photo n°13 : Substrat sans traitement.



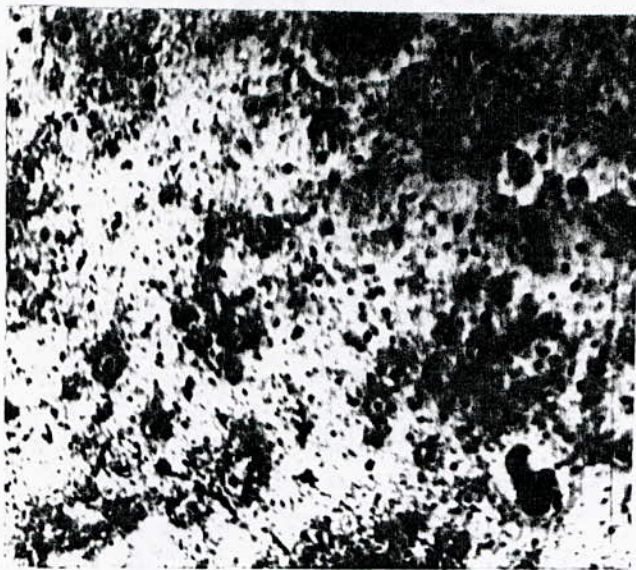
x 200

Photo n°14 : Substrat avec t = 1 h.



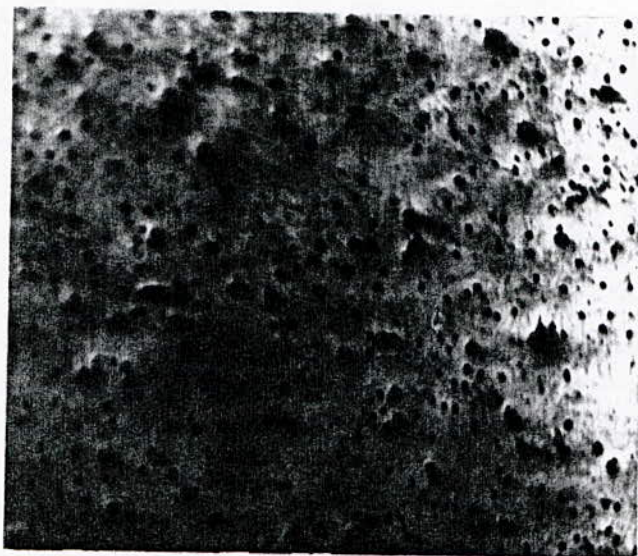
x 200

Photo n°15 : Substrat avec t = 2 h.



**x 200**

Photo n°16 : Substrat avec  $t = 3$  h.



**x 200**

Photo n°17 : Substrat avec  $t = 6$  h.



**x 200**

Photo n°18 : Substrat avec  $t = 9$  h.

## V.1.2. Interprétation :

Ce qu'il faut signaler en premier lieu de notre observation métallographique, c'est le début d'écaillage qui se produit pour un traitement de 3 h, celui-ci s'amplifie pour 6 h et davantage pour le traitement de 9 h.

Signalons également que pour un traitement de 3 h et 6 h, l'écaillage se produit entre le substrat et l'adhérent pour les échantillons où cette sous-couche a été déposée, contrairement à un traitement de 9 h où l'écaillage se produit simultanément entre le substrat et la sous-couche et entre la sous-couche et le dépôt.

Cette observation témoigne d'un écaillage total du dépôt si on augmenterait indéfiniment le temps de traitement. Les photos 1 et 2 montrent que pour les échantillons non traités, la projection entraîne une forte concentration d'éléments non réarrangés de part et d'autre de l'interface et elles mettent en évidence un dépôt criblé de pores renfermant des particules non fondues et des oxydes.

Pour un traitement d'une heure (photo 3 et 4) on constate nettement un début de réarrangement des inclusions et d'affinement des carbures. Ce constat se confirme pour les échantillons traités à 2, 3 et 6 h (photo n° 5 à 10) où l'on observe un début de diffusion du dépôt vers le substrat. Cette dernière s'accompagne particulièrement pour un traitement de 2 h de la formation de composés intermétalliques de formes plus ou moins irrégulières, Ces composés sont vraisemblablement de Ni Cr et Ni Al<sub>3</sub> ainsi que des carbures de chrome de forme sphériques ce qui nous permet d'avoir une meilleure stratification des couches projetées et une densification élevée du dépôt. Cela dit, un traitement de 2 h, voir également de 3 h, nous donne une adhérence purement métallurgique du dépôt renforcée par les composés intermétalliques qui se sont précipités au niveau de l'interface.

Concernant la métallographie du substrat, les photos ont été prises aux alentours de l'interface et celles-ci montrent que pour un traitement continu allant jusqu'à 6 h, on assiste à un réarrangement progressif des particules avec une meilleure dispersion en tailles et en formes de celles-ci dans la matrice [photo n°15 - 17]. Néanmoins, pour un traitement de 9 h [photo n°18] on relève la réapparition du processus inverse constaté également pour l'échantillon non traité et celui traité à 1 h [photo 13 et 14] à savoir la dispersion aléatoire des particules n'obéissant à aucune homogénéité de taille, ni de forme.

## V.2 Dureté et micro dureté :

### V.2.1. Introduction :

La notion de dureté peut être reliée à celle de la résistance à la pénétration statique du corps à étudier par un autre corps plus «dur». Dans notre étude celle-ci est influencée par l'étalement et la cohésion des particules, la porosité, l'épaisseur du dépôt, ainsi que la précipitation de phases intermétalliques et des carbures ; toutefois, elle demeure une méthode précieuse pour déterminer la qualité d'un revêtement. [13]

Des essais de dureté Brinell (la charge est de 187,5) et de micro dureté (la charge est de 1.000) ont été effectués suivant la surface transversale indiquée par la figure 13, afin de comparer la dureté du revêtement à celle du substrat et de voir l'influence des post-traitements sur celle-ci au voisinage de l'interface.

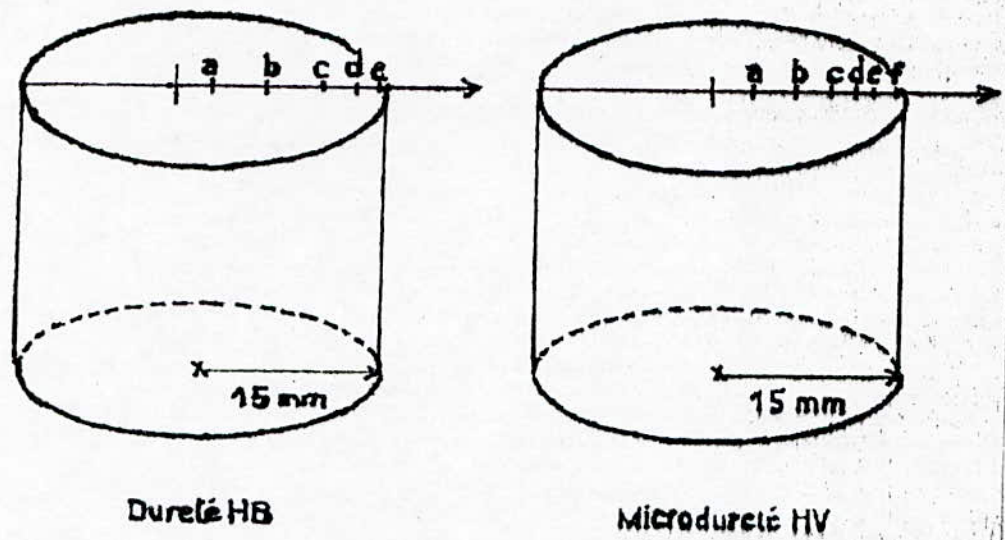


Fig. 13 : Répartition des prises de duretés HB et de microdureté HV.

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

Dans ce qui suit, seront présentés les tableaux de valeurs des duretés et micro duretés en fonction de la profondeur de pénétration ainsi que les courbes.



Temps (h)		S.T	1h	2h	3h	6h	9h
Position (mm)							
a:	0.20	363	464	477	555	464	555
b:	04	393	354	503	555	464	538
c:	09	393	383	505	507	426	538
d:	13.50	360	470	507	458	420	480
e:	14.25	300	420	464	450	407	570

**A: Dureté HB du multimatériau sans adhérent**

Temps (h)		S.T	1h	2h	3h	6h	9h
Position (mm)							
a:	0.20	393	354	477	555	455	507
b:	04	393	345	477	507	492	492
c:	09	393	337	507	504	460	477
d:	13.50	383	321	550	525	460	492
e:	14.25	345	265	585	480	458	495

**B: Dureté HB du multimatériau avec adhérent**

Temps (h)		S.T	1h	2h	3h	6h	9h
Position (mm)							
a:	05	339	269	686	533	313	551
b:	10	321	185	305	498	321	571
c:	13.60	400	219	378	339	276	498
d:	13.80	439	290	330	389	290	467
e:	14.20	229	257	498	498	305	515
f:	14.80	236	229	467	515	313	482

**C: Microdureté HV du multimatériau sans adhérent**

Temps (h)		S.T	1h	2h	3h	6h	9h
Position (mm)							
a:	05	269	313	571	453	515	551
b:	10	185	276	305	482	467	467
c:	13.60	219	378	219	405	276	439
d:	13.80	290	378	239	401	486	413
e:	14.20	257	401	330	185	305	498
f:	14.80	229	378	339	453	330	415

**D: Microdureté HV du multimatériau avec adhérent**

**Tableau 6: Valeurs de la dureté et de la microdureté en fonction de la position radiale.**

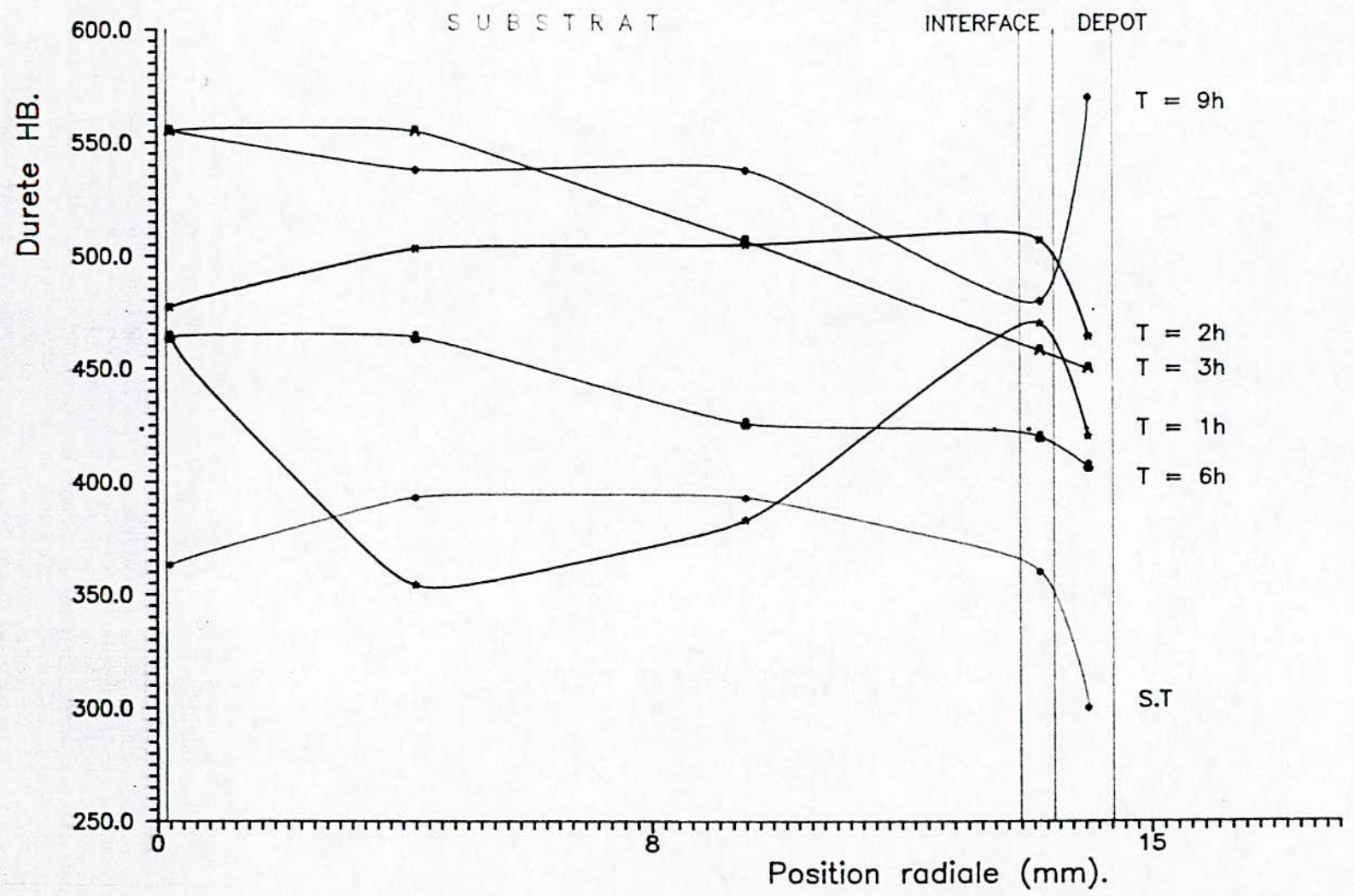


Fig 14: Evolution de la durete HB dans le multimateriau realise sans adherent.

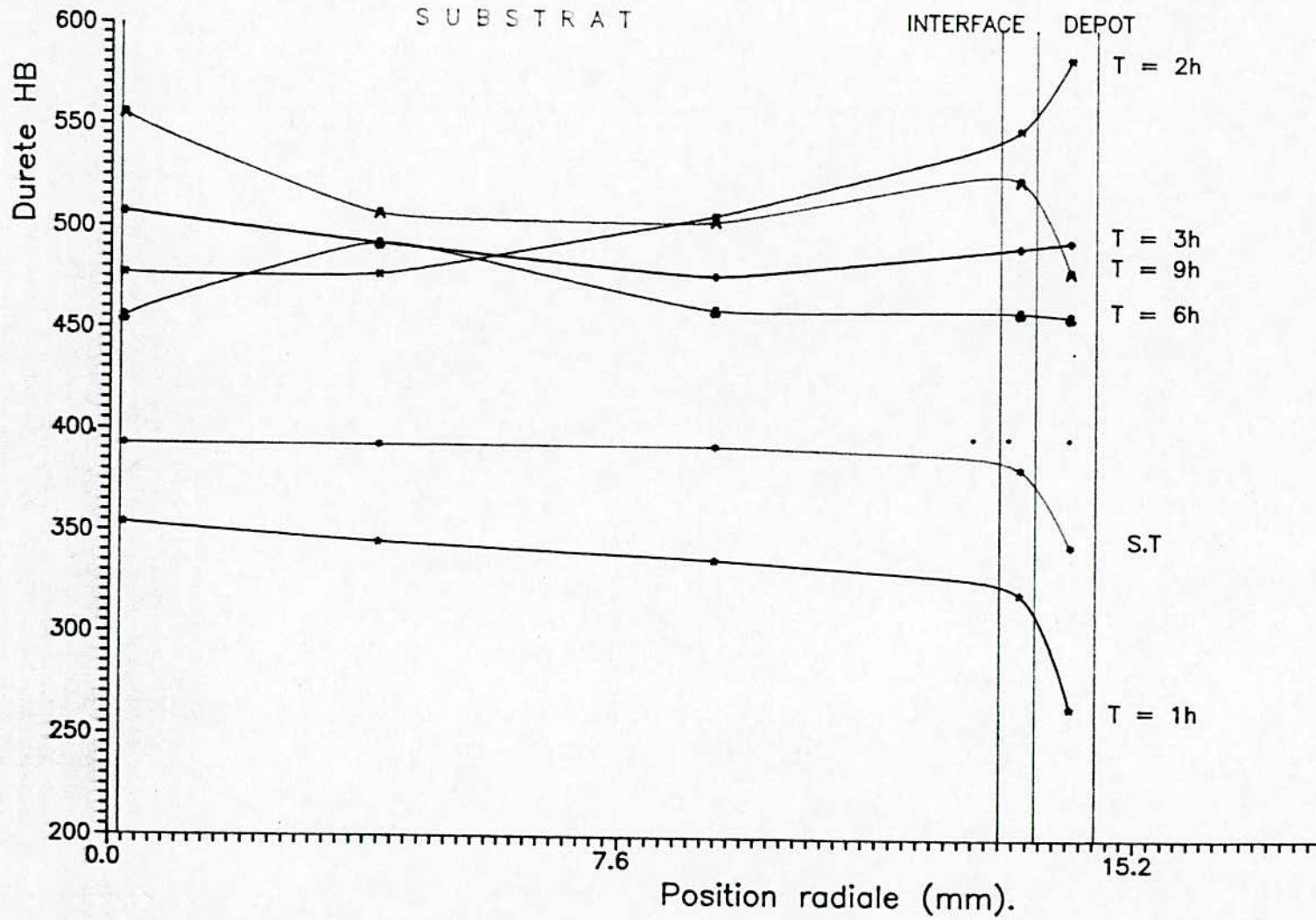


Fig15 :Evolution de la durete HB dans le multimateriau realise avec adherent.

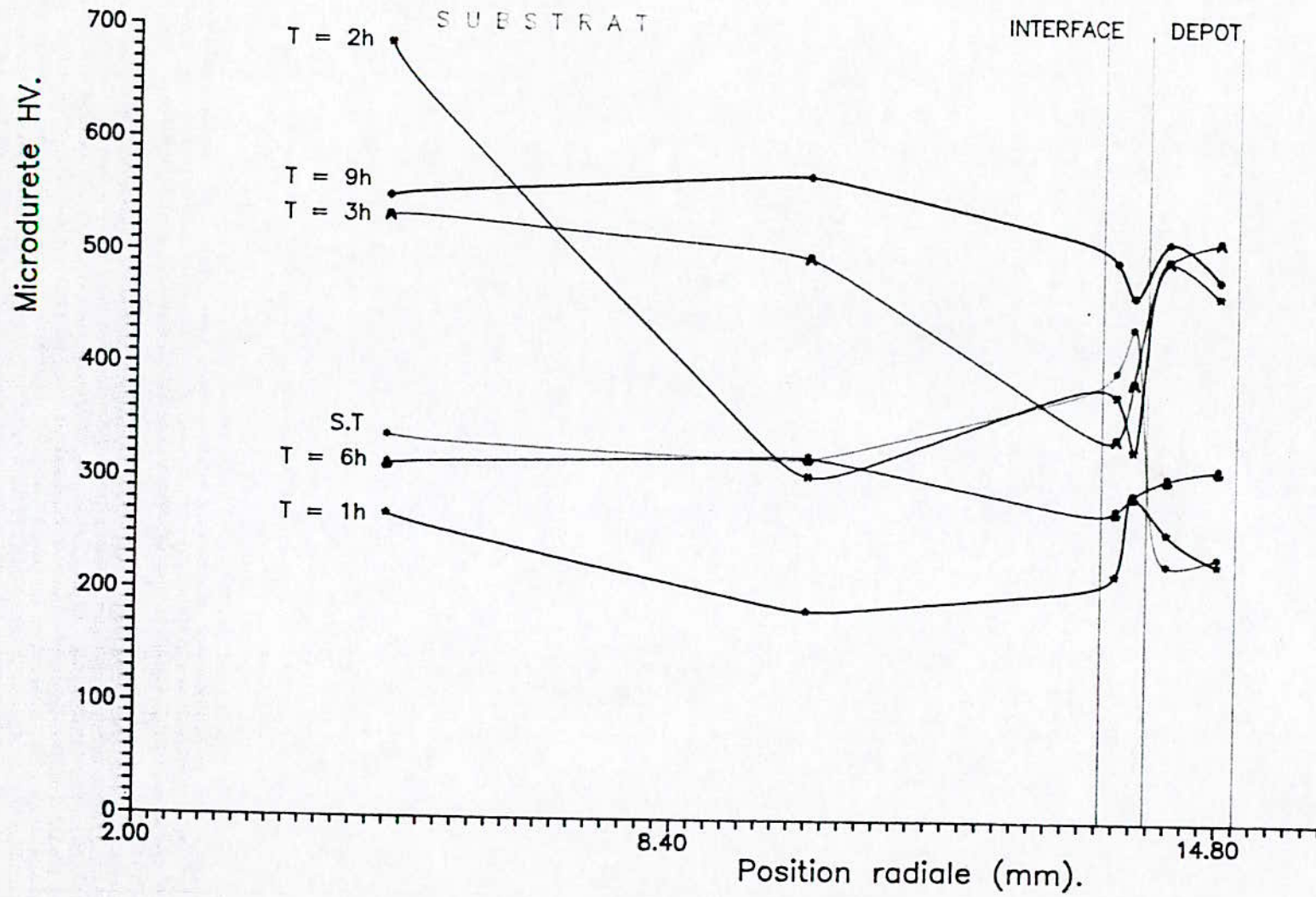


Fig16 :Evolution de la microdurete HV du multimateriau realise sans adherent

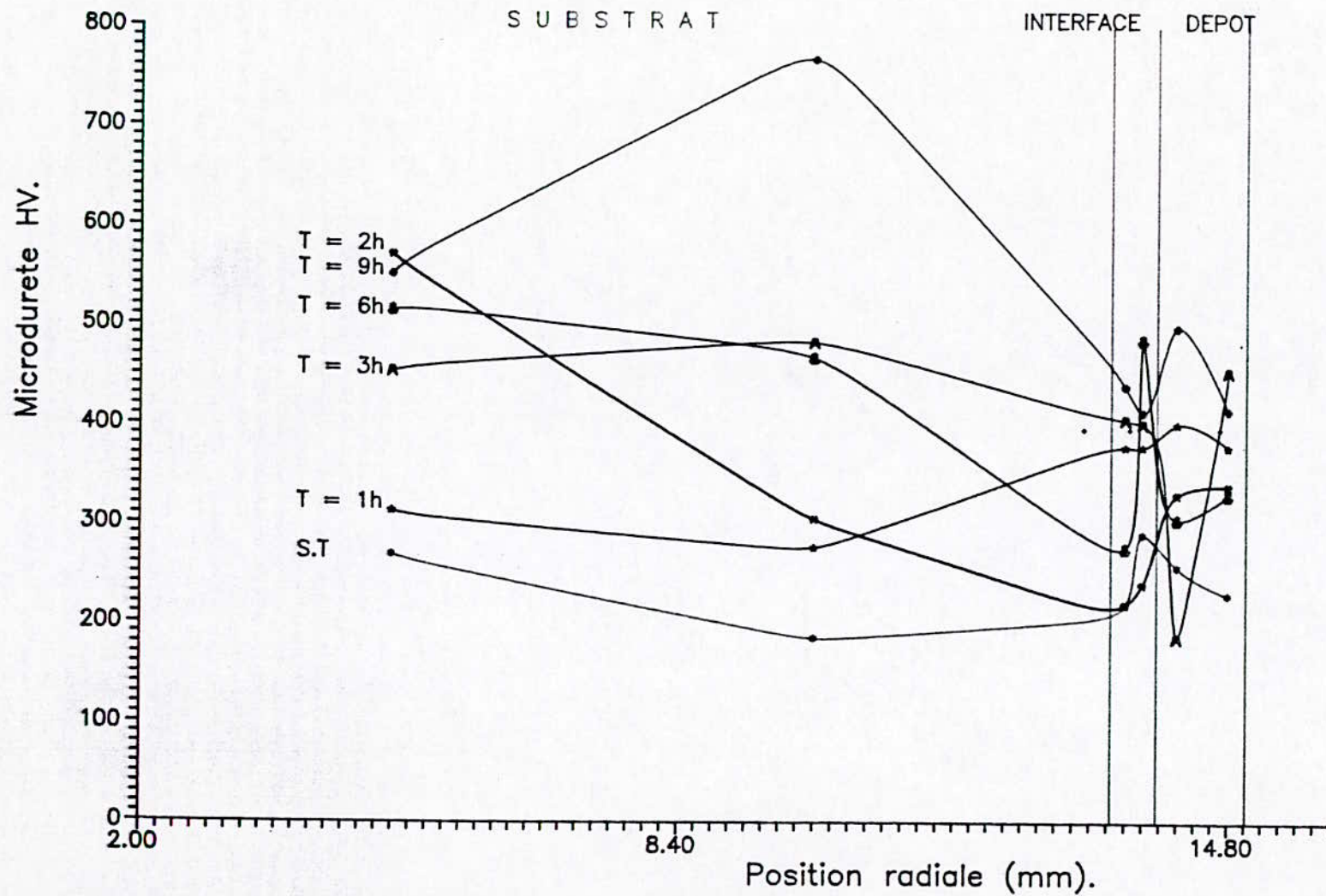


Fig17: Evolution de la microdurete HV dans le multimateriau realise avec adherent.

### **V.2.2. Interprétation :**

Concernant les duretés HB, on remarque que celles-ci s'échellonnent sur un ordre de grandeur appréciable.

Pour un traitement de 2 h à 3 h (Fig. 14 et 15) les valeurs enregistrés viennent confirmer l'analyse métallographique, ainsi elles mettent en évidence la bonne dispersion des carbures et la diminution de la porosité, car même si les valeurs ne sont pas les plus élevées, elles illustrent par ailleurs l'uniformité de la dureté en allant du substrat vers l'interface, puis vers le dépôt. Ce résultat est fort intéressant car l'uniformité des propriétés entre le dépôt et le substrat est ce qu'il y a de plus recherché de la projection thermique dans l'industrie. Ce constat met également en évidence l'importance de la sous couche d'accrochage dans la concrétisation de ce genre de compromis.

Dans le cas d'un traitement porté à 6 h et 9 h, on remarque que la dureté a tendance à prendre des valeurs très élevées particulièrement dans certains endroits précis du multimatériau. Ce résultat est non concluant car il atteste de la non uniformité de cette caractéristique sur tout le multimatériau.

Pour ce qui est de la microdureté HV, celle-ci n'est pas vraiment concluante du point de vue variation, elle a été faite beaucoup plus pour mettre en évidence la présence des pores, d'oxydes (particules non fondues), les carbures, ainsi que les inclusions.

Pour les échantillons traités à 2 et 3 h (Fig. 16 et 17) : la microdureté nous renseigne sur la nature des phases présentes à l'interface car avec des valeurs si élevées, on s'aperçoit bien vite de l'existence de composés intermétalliques très stables et homogènes engendrés par la diffusion, ce qui appuie notre observation métallographique.

### **V.3. Test d'arrachement :**

#### **V.3.1. Introduction :**

Le test d'arrachement consiste à soumettre un échantillon réchargé, jusqu'à la rupture, à un effort progressif d'extension.

La manipulation exige une préparation spécifique et minutieuse des échantillons (voir Fig. 18).

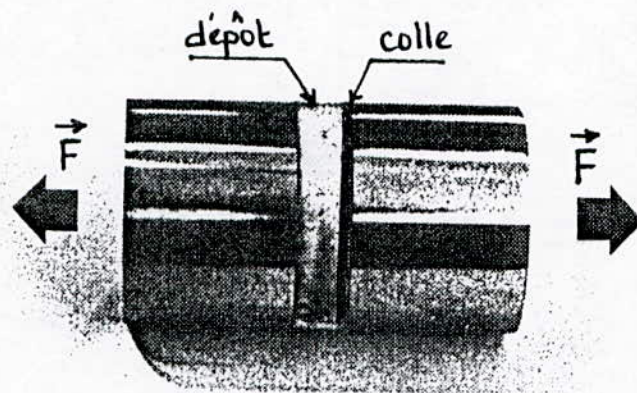


Fig. 18 : Echantillon relatif au test d'arrachement.

On prend un échantillon ayant été rechargé sur la face transversale, celui-ci est lié à un autre échantillon standard de même dimension et de même forme, ce lien est assuré par une colle type «threebond» conçue spécialement pour ce test, en effet, celle-ci est dotée d'un pouvoir collant très fort sur les matériaux.

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

Néanmoins, nous avons été contraint de rectifier nos échantillons sur les côtes pour réaliser un meilleur serrage entre les mâchoires de la machine.

Notre test consiste à tirer de part et d'autre des extrémités de l'éprouvette réalisée jusqu'à rupture. Cette dernière peut se produire au niveau de la colle, ou au niveau du dépôt, c'est-à-dire l'arrachement de la calotte déposée sur la surface transversale, et à chaque rupture, on enregistre la charge nécessaire.

On signale, toutefois, que l'ensemble des échantillons ont été soumis aux mêmes conditions opératoires.

Le calcul de la contrainte de rupture consiste à diviser la charge enregistrée par la section du dépôt. Cette dernière est constante pour toutes les éprouvettes et elle est égale à 706,50 mm<sup>2</sup>, ( $r = 15$  mm).

Dans ce qui suit seront illustrés les tableaux de valeurs et les diagrammes relatifs au test d'arrachement.

Temps (h)	S.T	1h	2h	3h	6h	9h
Contrainte $\sigma$ (daN/mm <sup>2</sup> )	7.40	9.00	11.70	10.92	0.15	0.00

**A: Multimatériau sans adhérent.**

Temps (h)	S.T	1h	2h	3h	6h	9h
Contrainte $\sigma$ (daN/mm <sup>2</sup> )	11.50	13.00	17.58	15.53	6.00	0.10

**B: Multimatériau avec adhérent.**

**Tableau 7 : Contrainte de rupture en fonction du temps de traitement.**



"Multimateriau sans adherent"

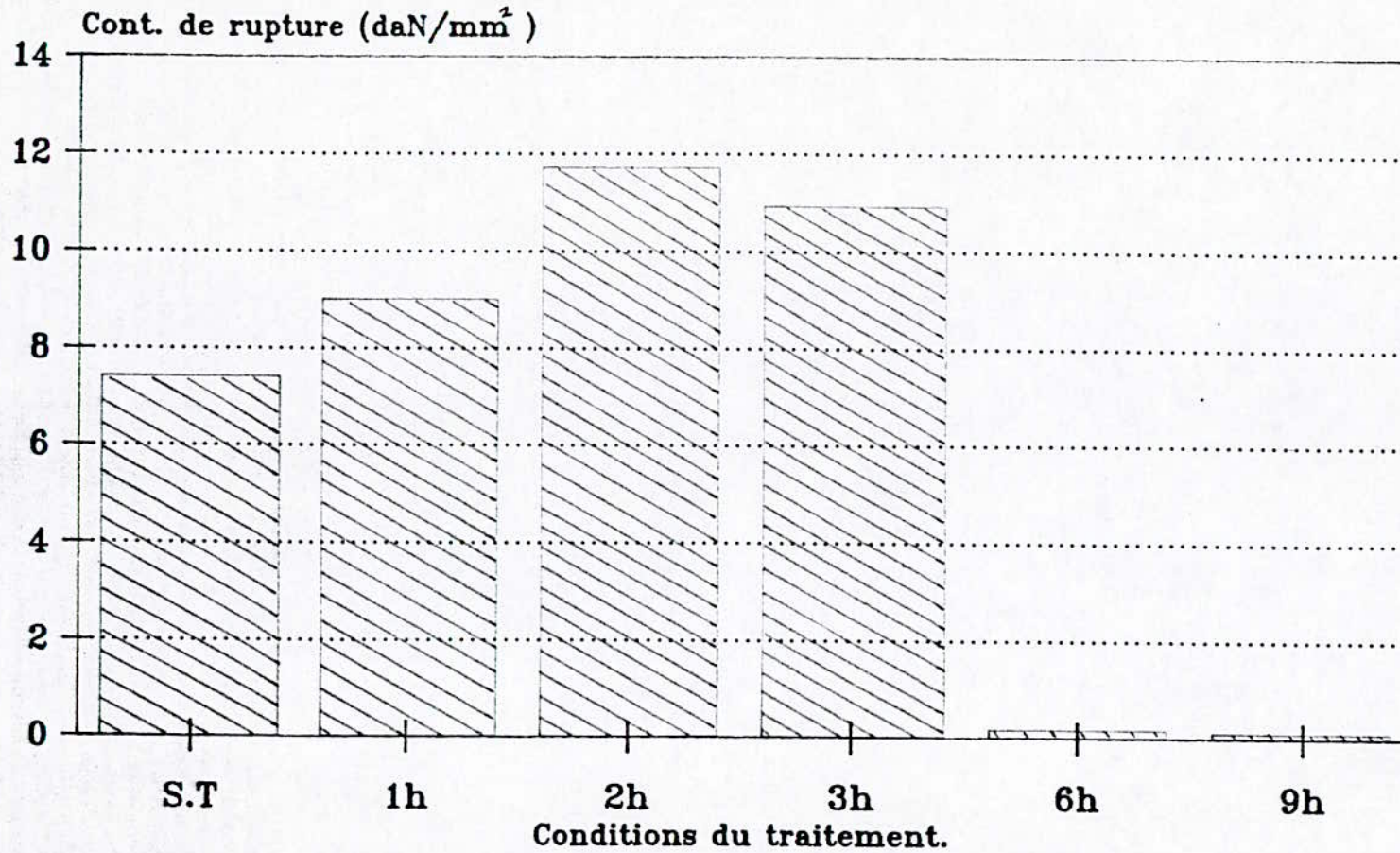


Fig 19 Evolution de la contrainte de rupture en fonction des conditions de traitement

"Multimateriau avec adherent"

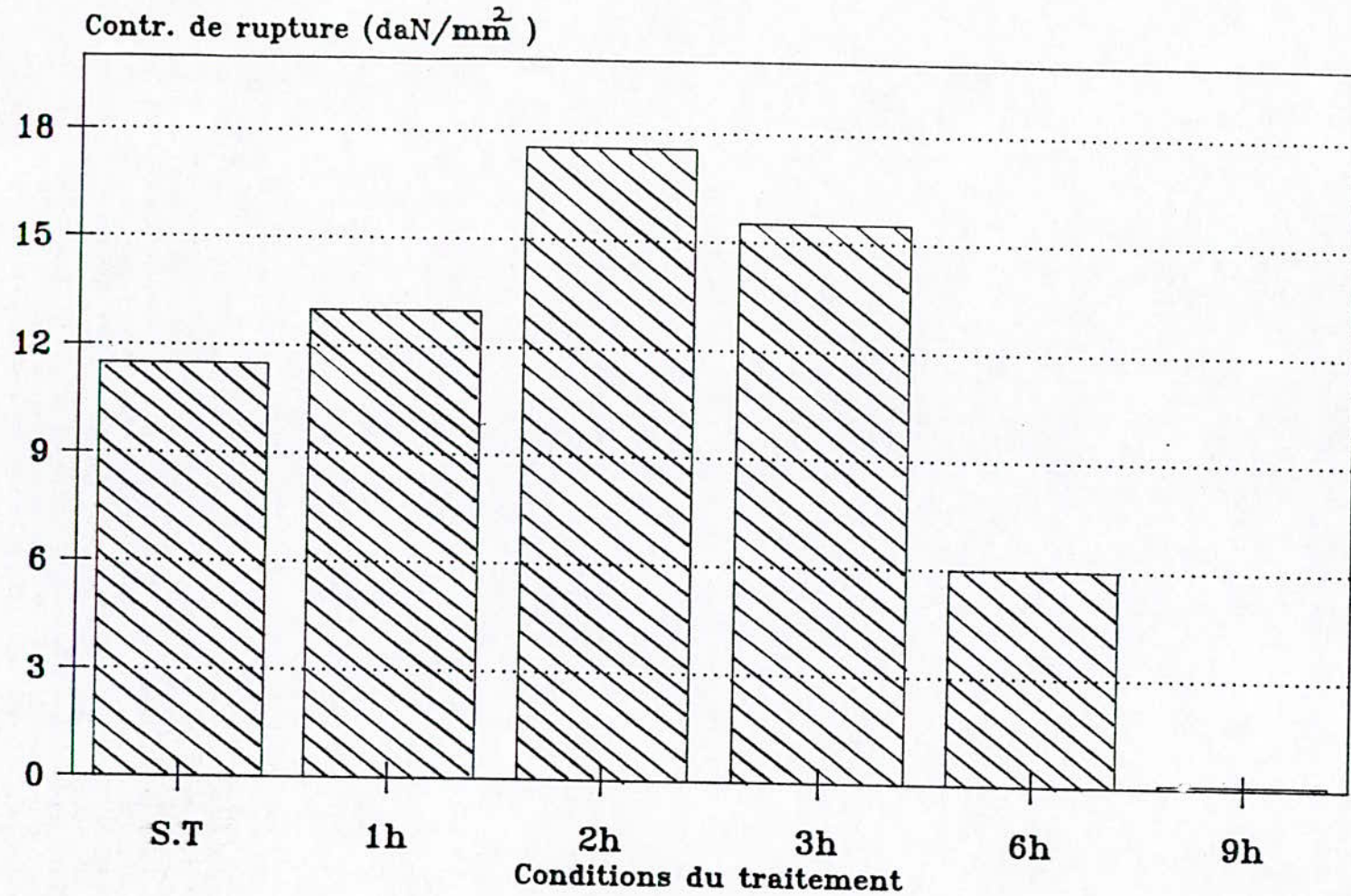


Fig 20: Evolution de la contrainte de rupture en fonction des conditions de traitement

### V.3.2 : Interprétation :

Ce qui est important à signaler en premier lieu des histogrammes illustrés sur les fig 19 et 20 c'est la mise en évidence de la sous-couche d'accrochage. On constate, en effet, que l'ordre de grandeur des contraintes de rupture pour un multimatériau avec adhérent est supérieur à celui sans adhérent.

On remarque également que l'accrochage d'un dépôt traité à 2H est nettement meilleur à celui non traité et traité à 1H, ce qui confirme nos analyses précédentes (Etude métallographique et dureté). Ce constat met en évidence la diffusion des éléments du dépôt à travers l'interface d'où la formation des composés intermétalliques et des carbures. Contrairement à un traitement de 6H et 9H, où les contraintes de rupture sont très faibles, cela s'explique par le phénomène d'écaillage qui s'est produit lors du chauffage.

## V.4. EXAMEN TRIBIOLOGIQUE :

### V.4.1 : Introduction :

L'objectif principal de la réalisation d'un revêtement sur une pièce mécanique est d'augmenter la durée de vie de cette dernière. C'est de ce soucis que nous avons réalisé un examen tribiologique sur le multimatériau réalisé.

Le tribomètre dont nous disposons est un frictioanalyseur de marque JPS qui permet :

- la mesure précise d'un coefficient de frottement à un instant déterminé et dans des conditions définies.
- l'analyse de l'évolution de ce coefficient en fonction des variations du temps et des conditions appliquées.
- la mesure de l'usure des matériaux.

La mise en route de l'appareil consiste à :

- Etablir la pression d'air à 3 bars avant toute autre manipulation et de mettre en route le moteur, ce qui est indispensable à la rotation de l'outil d'usure qu'on appelle la «piste». Cette dernière est une roue de 40 mm de diamètre.
- Fixer l'échantillon à étudier sur la tête du porte échantillon porté sur un bras par une queue d'arronde, l'immobiliser par la suite à l'aide d'une vis.
- Etablir l'équilibre à l'aide d'un contrepoids situé à l'arrière.
- Enfin, il est impératif de charger l'échantillon à l'aide des masses marquées pour pouvoir stabiliser la piste et la pièce.

Néanmoins, malgré la bonne conception du porte échantillon, construit pour recevoir des formes de frotteurs diverses, nous avons été amenés à rectifier nos échantillons sur une lon

gueur de 20 mm pour les faire adapter à la queue d'arronde, et d'usiner un méplat pour une meilleure fixation par la vis de serrage.

- Une fois l'appareil en marche, en relie l'enregistreur qui nous donne le couple total en fonction du temps;

Les réglages qui nous ont été recommandés par l'entreprise (SNTF) sont :

- Vitesse de rotation de la piste : 1500 trs/mn.
- Charge posée sur l'échantillon : 1200 gr.
- Couple initial du moteur nécessaire à la rotation de la piste : 1 lbs.Pi ( ce qui correspond à 0,01143 N.M) sachant que : 1lbs = 0,45 et 1 pouce = 25,4 mm:
- Durée optimale d'un test : 25 mm.

Ces paramètres sont invariants pour l'ensemble des tests effectués.

La méthode de détermination du coefficient de frottement à partir d'un examen tribologique réalisé sur un frictioanalyseur, repose sur la connaissance du moment du couple engendré par la piste sur l'échantillon étudié, celui-ci se déduit de la connaissance du couple initial produit par le moteur, nécessaire à la rotation de la piste et du couple final relevé sur le diagramme enregistré par la table traçante.

$$MF = M_i + M_f$$

Avec :

- MF : moment final ( N. m)
- M<sub>i</sub> : moment initial (N. m)
- M<sub>f</sub> : moment de frottement (N. m)

M<sub>f</sub> à son tour est donné par :

$$M_f = f \cdot m_p \cdot r_p \cdot g$$

avec :

- f : Coefficient de frottement.
- m<sub>p</sub> : masse qui repose sur l'échantillon (kg)
- r<sub>p</sub> : rayon de la piste (m)
- g : constante de gravité (m/s<sup>2</sup>).

d'où :

$$f = \frac{M_f}{m_p \cdot r_p \cdot g} = \frac{M_F - M_i}{m_p \cdot r_p \cdot g}$$

où

$$\begin{cases} M_i = 0.01143 \text{ N.m} \\ m_p = 1200 \text{ gr} = 1.2 \text{ Kg} \\ g = 9.81 \text{ m/s}^2 \\ r = 20 \text{ mm} = 0.02 \text{ m} \end{cases}$$

enfin, 
$$f = \frac{M_F - 0.01143}{1.2 \cdot 0.02 \cdot 9.81} = \frac{M_F - 0.01143}{0.2352}$$

le moment  $M_f$  est donné par l'enregistreur en fonction du temps.

En effet, nous avons constaté qu'après 25 mn, temps qui nous a été recommandé par l'entreprise, le graphe prend une allure constante. Il s'agit en fait du moment final moyen, ou moment total moyen.

Une légère empreinte s'observe sur l'échantillon à la fin du test.

Dans ce qui suit seront illustrés les tableaux de valeurs et les diagrammes relatifs au test tribologique.

Temps (h)	S.T	1h	2h	3h	6h	9h
Moment final (N.m)	0.0991	0.0802	0.0800	0.0661	0.1673	0.2331
Coeff. f	0.47	0.39	0.29	0.33	0.76	1.04

**A: Usure du substrat.**

Temps (h)	S.T	1h	2h	3h	6h	9h
Moment final (N.m)	0.1085	0.0873	0.0614	0.0755	0.1908	0.2566
Coeff. f	0.51	0.42	0.31	0.37	0.86	1.14

**B: Usure du dépôt.**

**Tableau 8** : coefficient de frottement en fonction du temps de maintien.

"Usure du substrat"

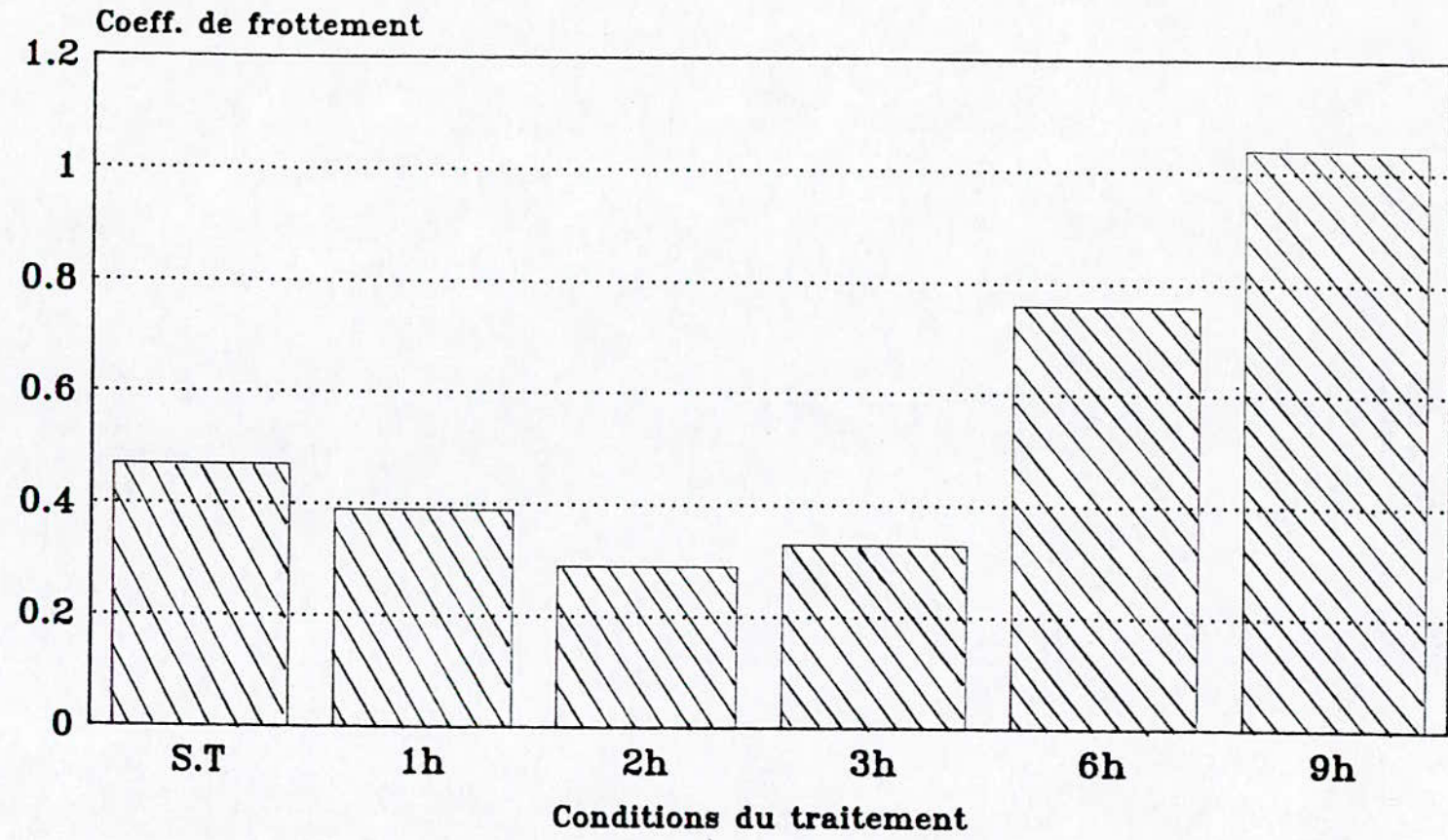


Fig 21 : Variation du coefficient de frottement en fonction des conditions du traitement

"Usure du dépôt projete"

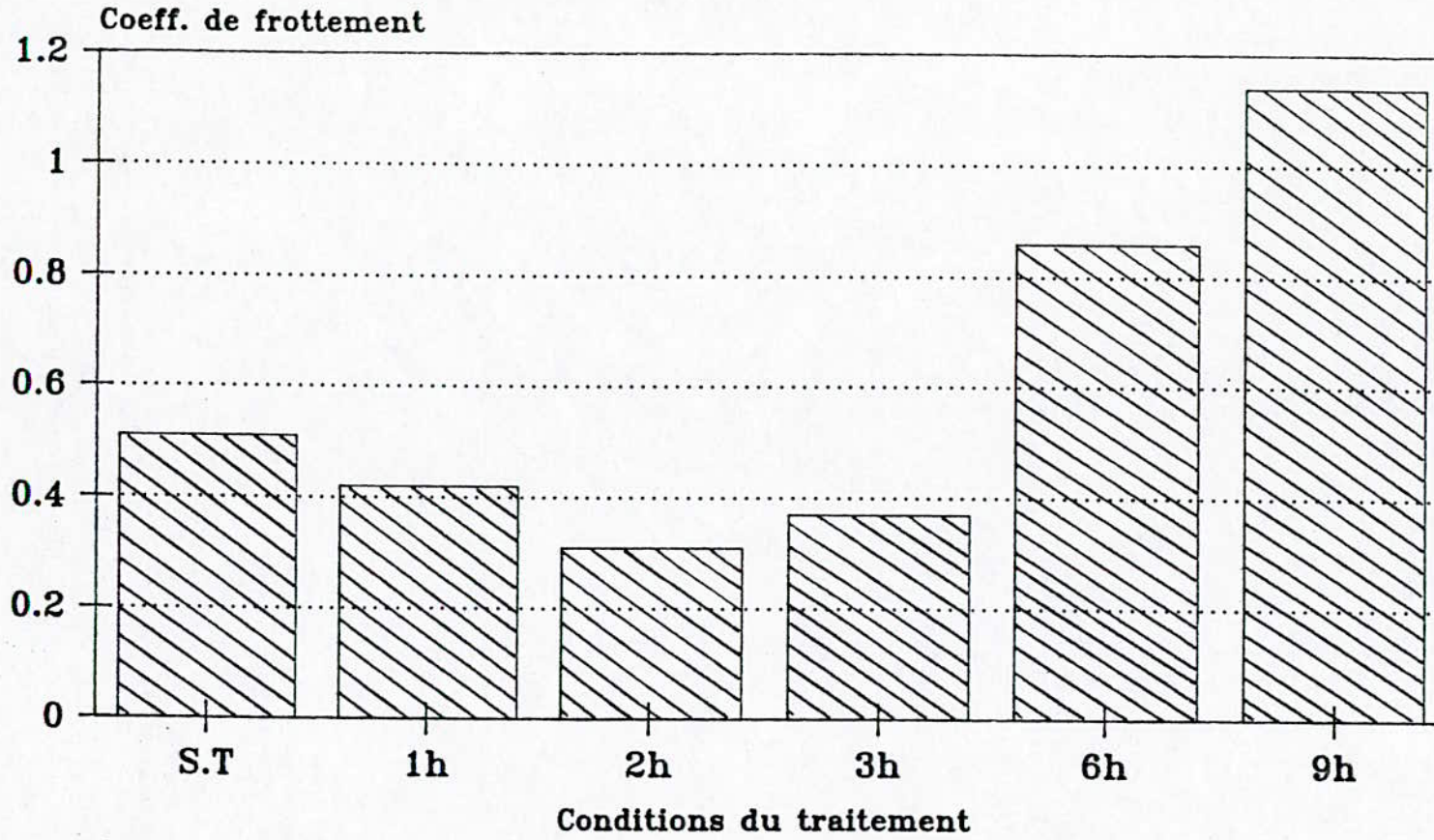


Fig 22: Variation du coefficient de frottement en fonction des conditions du traitement

#### ✓.4.2 Interprétation :

Ce que l'on peut tirer des histogrammes illustrés sur les Fig 21 et 22 est la valeur minimale que prend le coefficient lors d'un traitement de 2H simultanément sur le dépôt et le substrat. Ceci est confirmé auparavant par le test d'arrachement, attestant effectivement que le traitement de 2H réalise le meilleur compromis.

Il est important également de signaler que le coefficient de frottement pour un traitement donné varie peu du dépôt au substrat.

Et celui-ci est nettement meilleur pour un dépôt traité jusqu'à 3H que pour un dépôt non traité, ce qui révèle l'importance des post-traitements dans la résistance à l'usure des dépôts projetés à chaud.

Enfin, pour 6H et 9H, dans le même sens que le test d'arrachement, on constate que la résistance à l'usure diminue. Ceci témoigne de l'écaillage qui s'est produit.

#### **Conclusion:**

Il ressort des différentes analyses effectuées que le post-traitement de 2H avec sous couche d'accrochage est le plus recommandé, en effet, il réalise une convergence positive des diverses propriétés.

-L'étude métallographique, le test d'arrachement et le test d'usure révèlent la forte liaison entre la microstructure homogène, formée de composés intermétalliques et de carbures bien dispersés et les deux propriétés mécaniques suscitées pour le traitement de 2H.

-La dureté et encore plus la microdureté montrent une certaine disparité des résultats pour les différents temps de maintien en ce sens que certains (6H et 9H) ont conduit à des duretés relativement élevées en certains endroits. Contrairement aux autres maintiens où les duretés sont moins élevées mais plus homogènes. Ceci est certainement due à la présence d'oxydes engendrée par l'atmosphère de projection et du séjour prolongé dans la même atmosphère (air) pour les dits-post-traitements.



## Conclusion générale

Devant l'ampleur des problèmes de dégradation des métaux et des progrès asymptotiques résultant des nombreuses recherches appliquées dans le domaine de la projection thermique en l'occurrence, l'élargissement de son domaine d'application du point de vue des équipements et des matériaux projetés ainsi que l'optimisation des paramètres de projection, notre étude a permis de mettre en évidence l'importance des post-traitements sur les multimatériaux réalisés par rechargement à l'arc électrique dans le domaine de rénovation des pièces mécaniques, particulièrement le vilebrequin pour lequel, on a montré que la maîtrise des post-traitements est d'une importance primordiale pour la réussite du procédé de revêtement et de son influence sur la qualité du multimatériau réalisé.

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

- Les post-traitements d'une durée de maintien dépassant 3h engendrent un écaillage du dépôt qui s'amplifie au fur et à mesure que le temps de maintien augmente, ceci s'accompagne d'une porosité et d'un taux d'oxyde élevé, avec une répartition aléatoire des éléments.

Contrairement à cela, nous avons montré qu'un post-traitement de 2h à 3h réalise un meilleur compromis car il engendre le processus d'inter-diffusion dépôt-substrat, ce qui conduit à la formation de composés Intermétalliques au niveau de l'interface ainsi que des carbures. Ces derniers nous permettent d'avoir un accrochage purement métallurgique.

- en plus de l'analyse physico-chimique, le test d'arrachement et l'examen tribologique ont permis non seulement de confirmer le résultat précédent, mais de recommander le maintien de 2h pour un dépôt réalisé avec sous couche d'accrochage. En effet, celui-ci réalise le meilleur compromis entre les propriétés mécaniques recherchées et la conduite technico-économique des procédés.

Par ce modeste travail, on a pu montrer l'intérêt de la projection thermique à l'arc électrique et son application pour la rénovation et la récupération des pièces mécaniques ainsi que l'influence des post-traitements dans l'amélioration de l'adhérence et des propriétés mécaniques des dépôts projetés à chaud.

En dépit des résultats obtenus, cette étude pourrait être complétée par l'analyse d'autres paramètres sur la conduite des post-traitements thermiques sciemment l'influence d'une atmosphère contrôlée (vide, gaz...). Et afin de mieux connaître les phénomènes interfaciaux qui se produisent et la réactivité des éléments pendant la diffusion, une analyse par des méthodes plus performantes (MEB, Microsonde...) est également souhaitable.

## BIBLIOGRAPHIE

- [ 1 ] / Guide pratique de la projection thermique -  
CETIM 1989
- [ 2 ] / **P. CHIGNON** and **P. FAUCHAIS** 1986  
"Thermal Spraying of ceramics"
- [ 3 ] / **H. CLAIRE** and **E. CRAWEL** 1982  
"Thermal spray coating"  
METAL hand book vol.5, Ninth édition
- [ 4 ] / **MAURIS DUCOS** 1990  
"Revêtements par projection thermique" M16455  
Techniques de l'ingénieur M5
- [ 5 ] / **J. CAUCHETIER**  
"Revêtement par projection des métaux"
- [ 6 ] / **M. E. BALLARD** 1963  
"METAL sparing and flamme déposition of céramics  
and plastics" 4ème édition, London
- [ 7 ] / Manuel d'entretien du pistolet Arcspray
- [ 8 ] / "Les lubrifiants moteur : perte par usure et frottement"  
IFP, Paris Technip 1979
- [ 9 ] / **C. COLIN** 1987  
"Les mécanismes de l'usure et du frottement"  
Traitement thermique N°208 pages 79-96
- [10] / **P.CHAFNON, A.TRONCHE** et **P. FAURI** 1986  
"Frottement des dépôts d'Alumine projeté par plasma"

- [11] / **Fredéric C. NASH** 1983  
 "Technologie automobile"  
 Trad. Guy Vanbon-Tronto
- [12] / **B. MALKI** Juillet 1992  
 Mémoire de fin d'études d'ingénieur, ENP  
 "Etude de la projection thermique sur deux pièces mécaniques  
 d'un moteur Diesel"
- [13] / **A. FEZZOUA** Juillet 1993  
 Mémoire de fin d'étude d'ingénieur, ENP  
 "Etude du comportement d'un revêtement réalisé  
 par projection thermique sur une pièce mécanique"
- [14] / **R. DIETRICH** 1984  
 "Precis de construction mécanique"  
 Vol.2 METHODES, fabrication et normalisation
- [15] / **M. DESBOIS, R. ARMAO et B. VIEUX**  
 "Le moteur diesel"
- [16] / **M. DESBOIS**  
 "La technologie de la réparation Automobile" 1959  
 Tome 1 le Moteur
- [17] / **G. POMEX et P. RABBE** 1968  
 "Ruptures de FATIGUE de pièces de machines"
- [18] / **J. C MAROSELLI** 1958  
 "L'automobile et ses grands problèmes"
- [19] / **C. ELOY** 1980  
 AIDE MEMOIRE "Fabrication en construction Mécanique"
- [20] / **A. CANSTANT, G. HENRY et J. C CHARBONNIER** 1992  
 "Principes de base des traitements thermiques  
 thermochimiques des aciers"
- [21] / **G. LEMASSON et L. BLAIN** 1983  
 "Matériaux de constuction mécanique et électrique"