

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

13/95

وزارة التربية الوطنية
MINISTERE DE L'EDUCATION NATIONALE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT **Métallurgie**

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

ETUDE DE L'INFLUENCE DE LA VITESSE
DE REFROIDISSEMENT SUR LE COMPORTEMENT ET LES
PROPRIETES MECANQUES D'UN MULTIMATERIAU REALISE
PAR PROJECTION THERMIQUE

Proposé par :

Dr.N.MESRATI

Etudié par :

MESSAOUDI Salim

Dirigé par :

Dr.N.MESRATI

PROMOTION
Septembre 1995

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التربية الوطنية

MINISTERE DE L'EDUCATION NATIONALE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT Metallurgie

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

ETUDE DE L'INFLUENCE DE LA VITESSE
DE REFROIDISSEMENT SUR LE COMPORTEMENT ET LES
PROPRIETES MECANQUES D'UN MULTIMATERIAU REALISE
PAR PROJECTION THERMIQUE

Proposé par :

Dr.N.MESRATI

Etudié par :

MESSAOUDI Salim

Dirigé par :

Dr.N.MESRATI

PROMOTION
Septembre 1995

Dédicaces



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

A ma chère bien aimée ma femme

A mes très chers parents

A mes soeurs

A mon petit frère Mourad

A tous les amis

A mes amis Noureddine et Lakhdar

A mon cher cousin et ami Mohamed

Je dédie ce modeste travail

Salim Messaoudi

Remerciements



Ce modeste travail n'aurait jamais vu le jour sans la participation de plusieurs personnes, auxquelles je tiens à manifester ma sincère et profonde gratitude.

Mon remerciement va en premier lieu, à mon promoteur Dr.MESRATI Nadir pour son orientation, son aide, son soutien et encouragements.

Je tiens aussi à remercier mon ami Noureddine ADOUANE pour son aide, ainsi que M.Saber pour sa précieuse coopération par son propre micro ordinateur.

Sans oublier à présenter ma gratitude et mes remerciements pour tous les enseignants qui ont contribué à ma formation, en particulier le Dr E.Salhi .

Enfin, mon remerciement à ma famille, parents, femme, frère et soeurs, qui ont été mon appui moral et matériel durant toute ma formation.

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

Chapitre 1 : Traitements de surface et projection thermique

1. 1-LES TRAITEMENTS DE SURFACE.....	3
1. 1.1-Généralités.....	3
1. 1.2-Les traitements conduisant à des couches minces.....	3
1. 1.3-Les traitements conduisant à des couches épaisses.....	4
1. 2-LA PROJECTION THERMIQUE:.....	5
1. 2.1-Introduction:.....	5
1. 2.2-Principe de la projection thermique:.....	5
1. 2.3-Place de la projection thermique parmi les traitements de surface:.....	6
1. 2.4-Les types de projection thermique.....	7
1. 2.4.1-Projection thermique à la flamme.....	8
1. 2.4.2-Projection thermique à l'arc électrique.....	10
1. 2.5 Matériaux utilisés.....	14
1. 2.6-Préparation des surfaces.....	16
1. 2.7-Applications de la projection.....	17
1. 2.8-Formation et structure d'un revêtement.....	17

Chapitre 2 : Diffusion dans les métaux solides & usure des surfaces métalliques.

2.1-LA DIFFUSION DANS LES METAUX SOLIDES.....	19
2.1.1-Introduction.....	19
2.1.2. Relation couples de diffusion binaire - diagramme d'équilibre.....	19
2.1.3-Stabilité et instabilité des interfaces formées par diffusion.....	21
2.2. -USURES DES SURFACES METALLIQUES.....	22
2.2. 1-Introduction.....	22
2.2. 2-Définition.....	22
2.2. 3-Principaux types d'usure.....	22
2.2. 3.a-L'usure abrasive.....	22
2.2. 3.b-L'usure adhésive.....	23
2.2. 3.c-L'usure par fatigue.....	23
2.2. 3.d-L'usure corrosive.....	23

Chapitre 3 : Techniques expérimentales

Introduction.....	24
3.1-Technique de projection.....	24
3.1.1-Equipements et matériaux utilisés.....	24
3.2-Préparation du substrat étudié:.....	26
3.3-Préparation des thermocouples.....	26
3.4-Evolution de la température pendant la projection.....	27
3.5-Cycles de refroidissement.....	28
3.6-Recuit d'homogénéisation.....	31

Chapitre 4 : Analyse métallurgique et mécanique du multimatériau élaboré

4.1.1-Analyse micrographique.....	32
4.2.1-Filiation de la micro-dureté.....	36
4.3-Etude tribologique.....	44

Chapitre 5 : Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE.....	5
--------------------------	---

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

Devant l'intérêt que présentent les multimatériaux dans l'histoire de l'évolution des matériaux, à savoir l'association de deux ou plusieurs éléments permettant d'avoir un produit nouveau qui peut réunir les propriétés et les avantages de chacun, à savoir le coût de production et leurs utilisations à la place des produits performants et chers, deux récentes études ont été faites sur les multimatériaux réalisés par projection thermique : la première a permis l'optimisation des paramètres de projection. La deuxième était complémentaire et a permis de voir l'intérêt des post-traitements pour les multimatériaux [7] et [16].

Dans le cadre de ce mémoire, nous allons étudier un autre facteur, aussi important que les précédents déjà étudiés, qui est l'effet de la vitesse de refroidissement sur la qualité de l'interface substrat / dépôt et le comportement du multimatériau.

Dans ce contexte, notre étude sera comparative entre trois (03) cycles de refroidissement du multimatériau, réalisé par projection thermique, sans et avec post-traitements.

Le présent mémoire comprend cinq (05) chapitres :

- Une introduction générale.
- Le premier chapitre comprend deux sous chapitres : le premier cite les différents traitement de surface. Le second donne un aperçu sur la technique de la projection thermique, sa place et ses applications parmi les traitements de surface.

Le deuxième chapitre comprend aussi deux sous-chapitre qui sont:

Les effets de la diffusion dans les matériaux solide et les phénomènes d'usure des surfaces métalliques.

- Le troisième chapitre concerne les techniques expérimentales utilisées.
- Le quatrième chapitre traite de l'analyse métallurgique et mécanique du multimatériau élaboré.
- Finalement, on termine notre mémoire par une conclusion générale comportant des suggestions.

CHAPITRE I :

TRAITEMENTS DE SURFACE ET PROJECTION THERMIQUE .

1 .1-LES TRAITEMENTS DE SURFACE

1 .1.1-Généralités

Les traitements de surface des aciers ont pour but l'obtention d'une dureté élevée en surface jointe à une ténacité et une ductilité importante à coeur. Ainsi une pièce peut être ramenée à présenter globalement une bonne ténacité, une bonne résistance statique ou dynamique ou en température, tout en offrant des propriétés superficielles spécifiques: résistance à l'usure, aux frottements, à la corrosion, constitution d'une barrière thermique ou électrique... . Devant une large gamme de traitements de surface, il est possible de considérer cinq grands groupes de traitement:

- Les traitements superficiels avec transformation structurale (sans apport de matière).
- Les traitements thermochimiques avec diffusion.
- Les traitements par conversion.
- Les revêtements (ou dépôts).
- Les revêtements organiques. [1],[2].

1 .1.2-Les traitements conduisant à des couches minces

Selon les applications, la zone traitée est en couche mince (moins de quelques dizaines de micromètres), et l'ensemble de ses applications est :

- Les traitements thermochimiques.
- Les traitements thermoioniques.
- Les dépôts chimiques à partir d'une phase vapeur (CVD).

-
- Les dépôts physiques en phase vapeur (PVD).
 - L'implantation d'ions. [2],[3].

1.1.3-Les traitements conduisant à des couches épaisses:

C'est l'ensemble des traitements qui permettent d'avoir la zone traitée en couche épaisse (quelques millimètres ou quelques centaines de micromètres), et qui sont :

- Projection à la flamme.
- Rechargement par soudage à l'arc électrique.
- Projection plasma.
- Canon à détonation.
- Procédé Jet-Kote.
- Utilisation de laser de puissance.
- L'émaillage .
- Application des projections.[2],[3],[4].

.2-LA PROJECTION THERMIQUE:

1 .2.1-Introduction:

En 1909, le docteur Shoop observe une incrustation de plomb consécutive au tir d'une balle contre un mûr en ciment. Il essaie alors de reproduire le phénomène en projetant du plomb fondu avec un vaporisateur, puis en projetant du plomb en poudre à travers une flamme. En 1914, il se tourne vers la projection de métal en fil. C'est depuis, qu'elle vienne l'idée de produire des revêtements par la projection thermique. Cette technique était développée et continue à être développée jusqu' à nos jours.[5],[6].

1 .2.2-Principe de la projection thermique:

Le matériau d'apport solide sous forme de poudre ou de fil est porté à l'état liquide ou pâteux en moyen d'une source de chaleur appropriée (flamme ou arc). Il est pulvérisé sous forme de gouttelettes au moyen d'un courant gazeux. Ce courant gazeux peut être constitué soit par un gaz auxiliaire qui est généralement de l'air, parfois de l'Argon ou de l'Azote, mélangé aux 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 sont véhiculées à grandes vitesses:

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

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.[5].

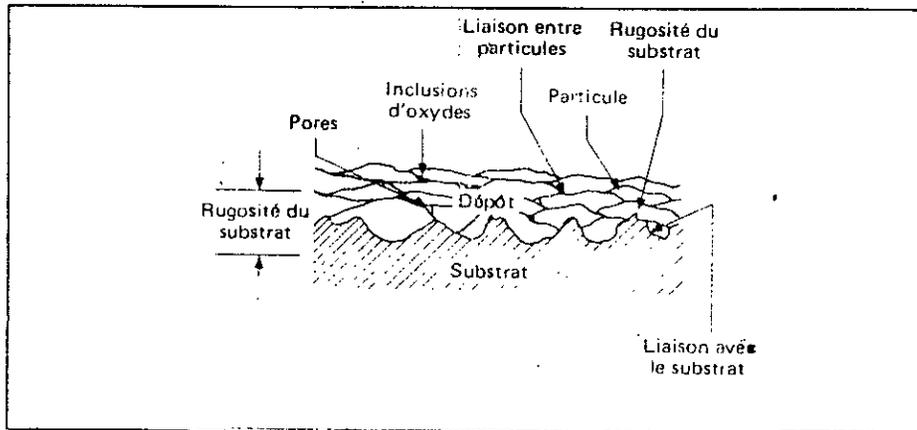


Fig. 1.1 : Coupe d'un dépôt obtenu par projection thermique

1 .2.3-Place de la projection thermique parmi les traitements de surface:

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 les épaisseurs relativement faibles (de l'ordre du deuxième 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 ces revêtement en 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 conduit comme la projection thermique à une grande variété de dépôts sur des substrats qui restent à des températures faibles. Ces 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 telles 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 même au niveau de l'interface [7].

1 2.4-Les types de projection thermique

Les procédés de projections thermiques commercialisés peuvent être divisés en deux catégories suivant la source d'énergie utilisée : flamme ou arc électrique

1 .2.4.1-Projection thermique à la flamme

La projection thermique utilisant l'énergie thermique provenant de la combustion de gaz est connue sous le nom de projection à la flamme.

Les matériaux qui ne se subliment pas et qui fondent à des températures inférieures à 2800°C peuvent être projetés à la flamme.

-Les matériaux utilisés sont des métaux et des alliages métalliques qui se présentent sous forme de fils, de cordons, ou de poudres et des céramiques sous la forme de cordons, de baguettes ou de poudres.

Cette technique utilise un équipement spécifique, citons par exemple :

- Pistolet à poudre (figure 1.2).
- Pistolet à fil (figure 1.3).
- Pistolet à poudre subsonique (figure 1.4).
- Pistolet poudre hypersonique.
- Torche à gaz. [6].

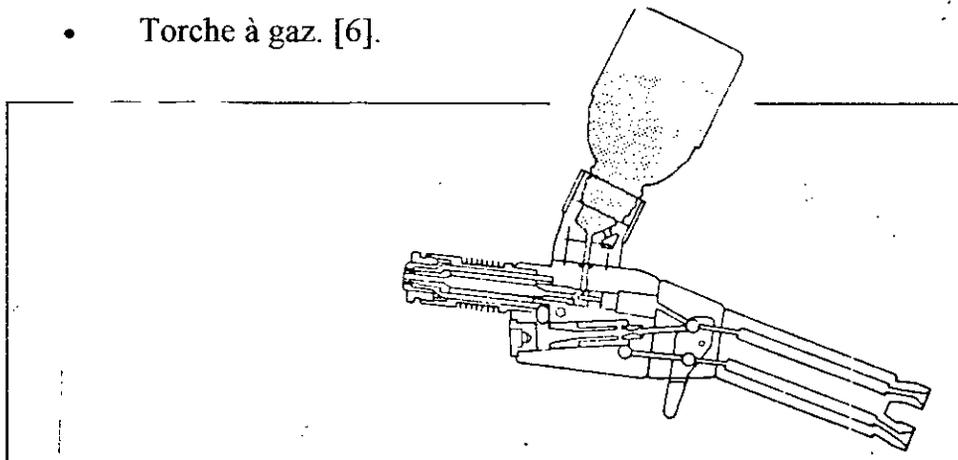


Fig.1.2 : Alimentation du pistolet à poudre par gravité

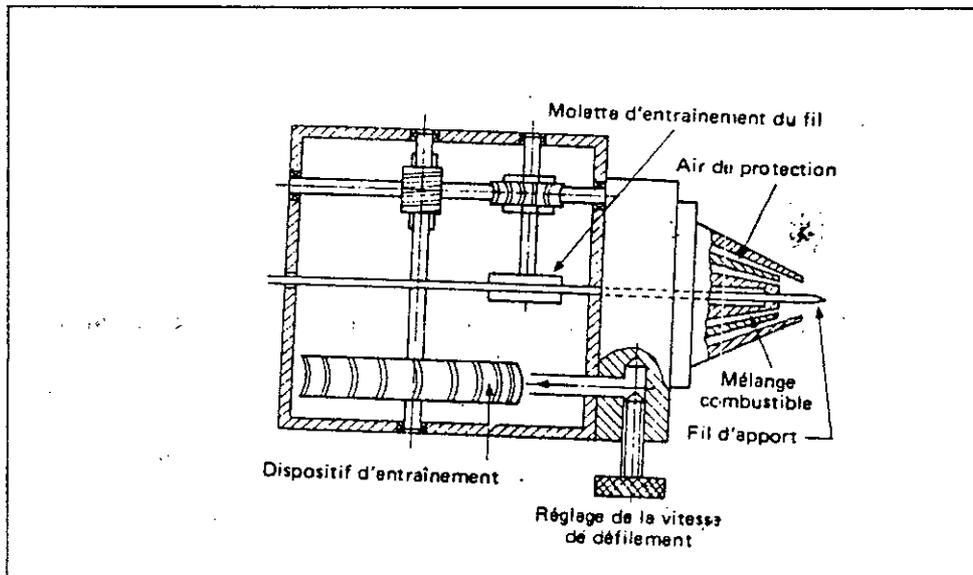


Fig. 1.3. : Pistolet à fil

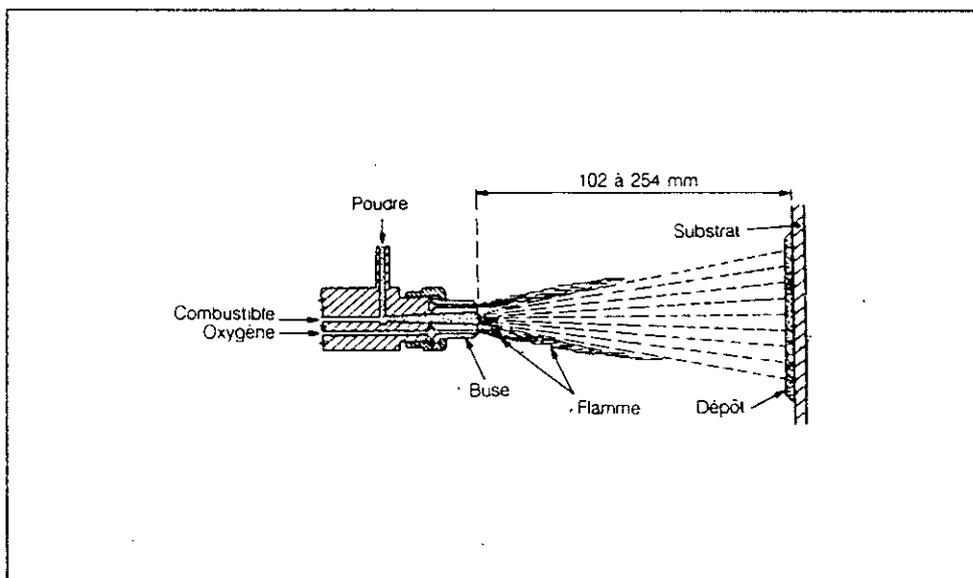


Fig. 1.4 : Pistolet à poudre subsonique

1.2.4.2-Projection thermique à l'arc électrique

Dans cette technique, l'arc électrique est une source d'énergie qui permet à la projection thermique d'augmenter de façon notable sa panoplie de procédé. On trouve deux familles de matériel qui utilisent cette énergie.

- Le pistolet à arc électrique entre deux fils.
- Le pistolet plasma (figure 1.5).

a) Projection plasma

Le plasmogène produit par la torche permet d'atteindre les points de fusion de tous les matériaux existants. En effet, des températures de 16000°C peuvent être engendrées (classiquement 6000°C à 12000°C). On applique à un mélange de gaz (Ar-H_2 , $\text{N}_2\text{-H}_2$) sous pression dans un espace restreint, une énergie élevée sous forme d'un arc électrique (figure 1.6). Les liaisons moléculaire puis les atomes eux-mêmes sont brisés et forment un plasma presque complètement dissocié et ionisé.

L'agitation aléatoire des particules (ions, électrons, particules neutres) est l'essence même de la chaleur produite. Si une ouverture est pratiquée dans l'enceinte, le plasma s'en échappe avec une vitesse importante (des centaines m/s). La température et la vitesse des poudres injectées n'étant plus un facteur limitif, il est possible de déposer pratiquement toutes les céramiques.

La porosité est plus faible ainsi que l'adhérence.

-Dans sa version classique, la torche à plasma travaille dans l'atmosphère et depuis quelques années se sont développés les procédés suivants :

- La projection plasma sous pressions partielle
- La projection plasma sous atmosphère contrôlée (argon) [8], [2], [9], [10].

b) Canon à détonation

Le canon est basé sur le principe du contrôle de l'explosion d'un mélange gaz (N_2 , O_2 , C_2 , H_2) plus une poudre dans un tube (longueur 1 à 1,5m diamètre 2 à 3cm) fermé à une extrémité et refroidi à l'eau (figure 1.7).

La poudre et le mélange gazeux sont injectés simultanément dans le fond du canon. Un allumeur déclenche l'explosion, la brève combustion qui suit engendre des températures élevées (3200 à 4100°C) provoquant une détente violente des gaz et par suite une accélération des particules à la sortie du tube. Au cours de cette réaction, la poudre en fusion (si les particules sont assez fines) est projetée sur le substrat à très grande vitesse (plus de 800m/s) où elle se dépose sur une surface de 30mm de diamètre sur une épaisseur de quelques micromètres. Ce cycle répété 4 à 8 fois par seconde produit un jet quasi continu de particules. Les épaisseurs projetées peuvent aller de quelques micromètres à 2mm. Le dépôt présente une faible porosité (moins de 1%). [2], [8], [9], [10].

Remarque :

Cette technique est particulièrement utilisée pour les dépôts de carbone. [2].

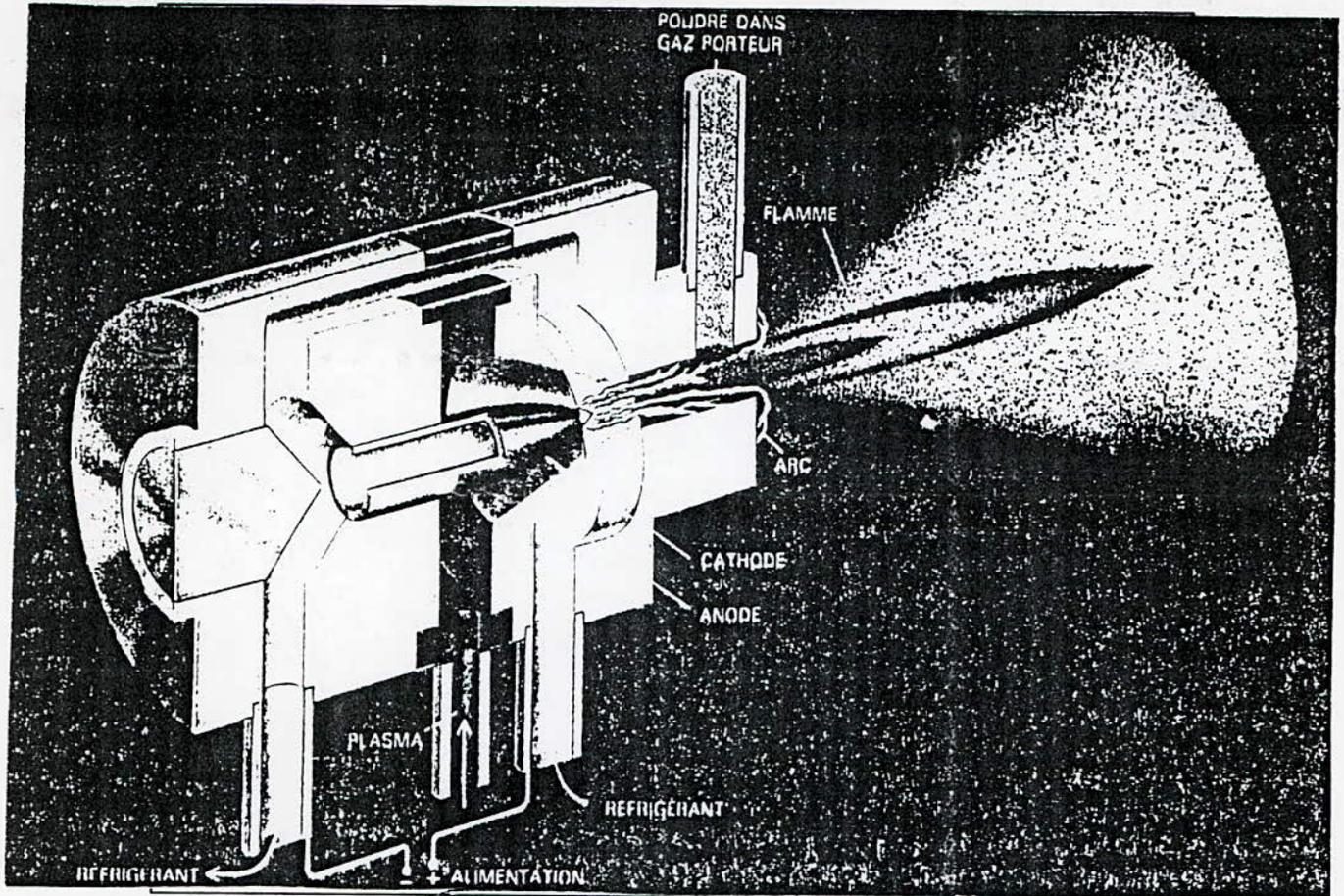


Fig. 1.5 : Torche à plasma.

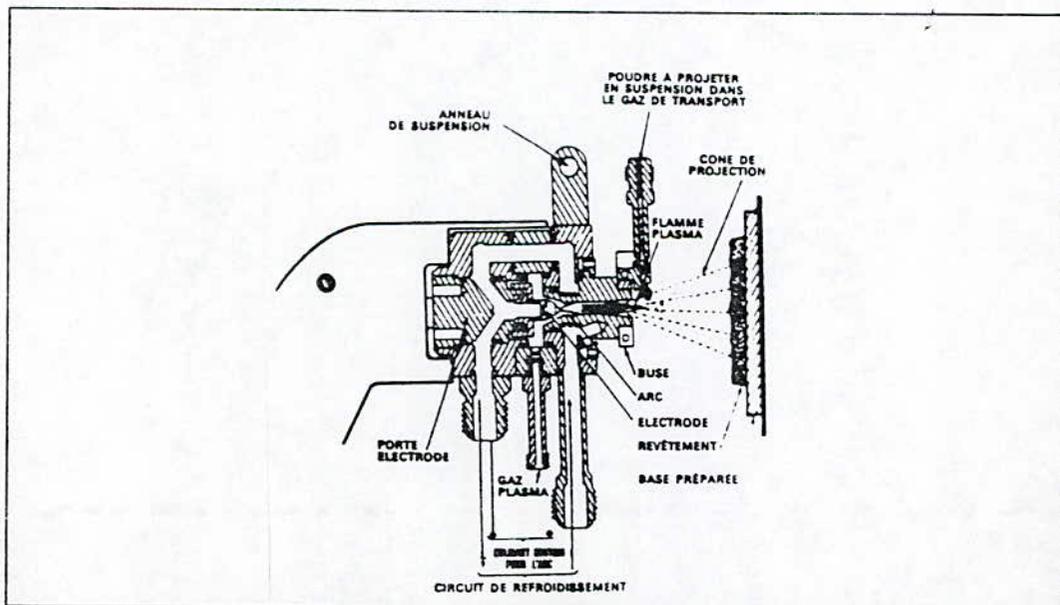


Fig. 1.6 : Projection plasma.

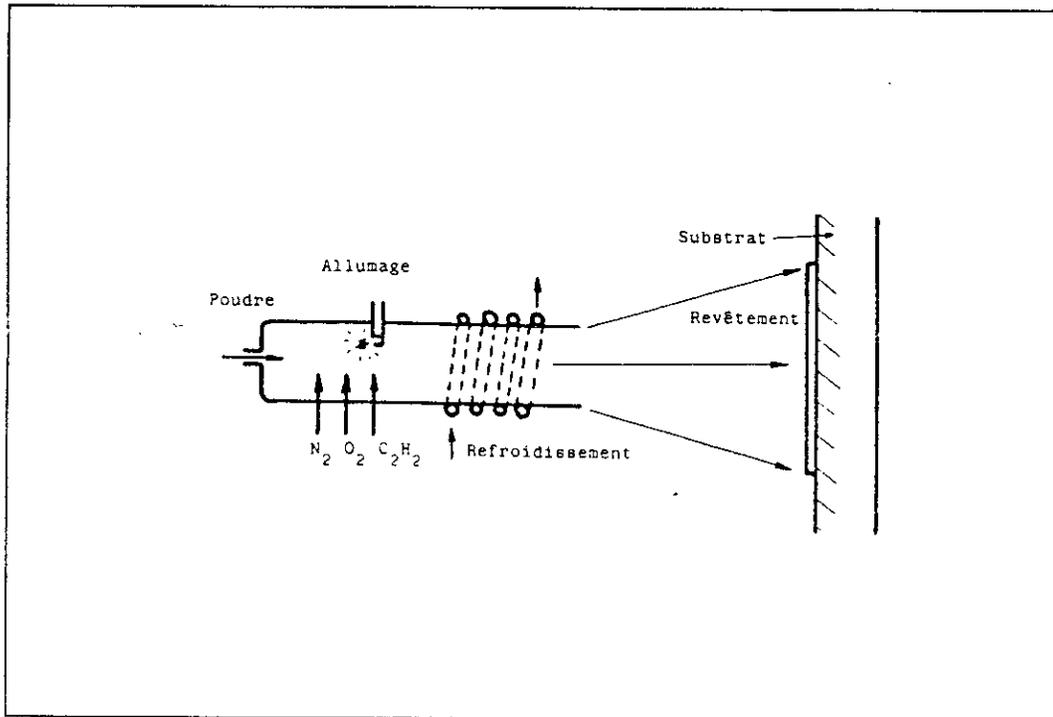


Fig. 1.7 : Schema de principe du canon à détonation.

1.2.5 Matériaux utilisés

En associant les différentes techniques de projection thermique, nous pouvons dire que les matériaux utilisés sont très nombreux et que leur nombre augmente en fonction d'applications nouvelles.

Nous pourrions 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 matériaux purs,
- Les oxydes,
- Les carbures,
- Les auto-adhérents (alliages à base Ni-Al),
- Les nitrures,
- Les silicures,

-
- Les matériaux abrasifs (type Ni-graphite),
 - Les matériaux antifrictions,
 - Les alliages $MCoAlY$ (M=Ni, Co, Fe ou une combinaison de deux ou trois d'entre eux)
 - Les matières plastiques (polyamide, polyéthylène, ..etc.)

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 principales formes commercialisées sont :

- Les fils nus massifs ou les fils fourrés
- Les poudres
- Les cordons
- Les baguettes [6], [10].

Ces matières présentent certaines caractéristiques telles que

a) Adhérence

En général l'accrochage du dépôt est mécanique et varie suivant les matériaux projetés et le procédé employé pour les matériaux dont l'adhérence est faible, on utilise des sous-couches d'accrochage connues pour leurs bonnes valeurs d'adhérence, telle que l'alliminure de nickel.

b) la densité

Sa porosité est plus ou moins importante selon le mode de projection, la forme et la vitesse des matériaux utilisés pour les dépôts métalliques. La densité est fonction du taux d'oxydes formés pendant la projection.

c) la dureté

la dureté du dépôt dépend des paramètres de projection

d) les 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 [6], [7].

Toutefois, d'autres caractéristiques peuvent intervenir dans le choix des matériaux à projeter telles que :

- La résistance à l'usure
- la résistance à la corrosion

1.2.6-Préparation des surfaces

L'adhérence des revêtements dépend pour une très grande part de l'état de surface du substrat. Ce dernier doit être débarrassé des corps gras et d'autres matières étrangères. D'autre part, il est presque toujours indispensable de créer une rugosité régulière. Les meilleurs résultats sont généralement obtenus par un sablage ou un grenailage d'intensité proportionnée à la dureté du substrat [12].

1.2.7-Applications de la projection

Les principales applications de la projection thermique se résument en :

- protection contre la corrosion
- Résistance à l'usure
- Barrière thermique
- Protection électrique
- Façonnage d'objets céramiques-métalliques ou des matériaux

composites.

En plus de ces fameuses applications, la projection thermique joue un rôle important dans la récupération et la rénovation des pièces mécaniques usées.

1.2.8-Formation et structure d'un revêtement

Les particules qui sont projetées sur un substrat s'écrasent sur celui-ci pour réaliser une superposition de couches qui donnent l'allure général d'un dépôt obtenu par projection thermique (figure 1.8 et 1.9).

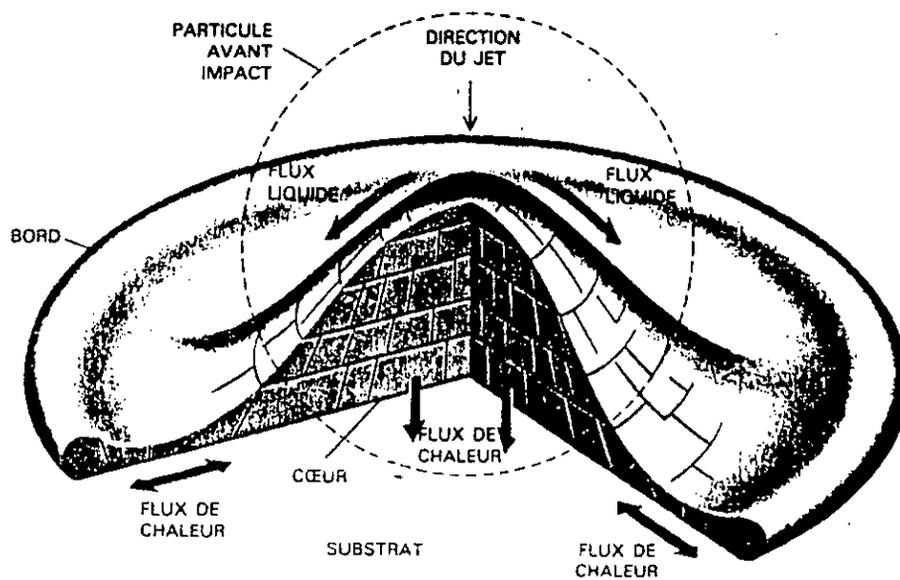


Fig. 1.8 : la géométrie d'une particule lors de l'impact.

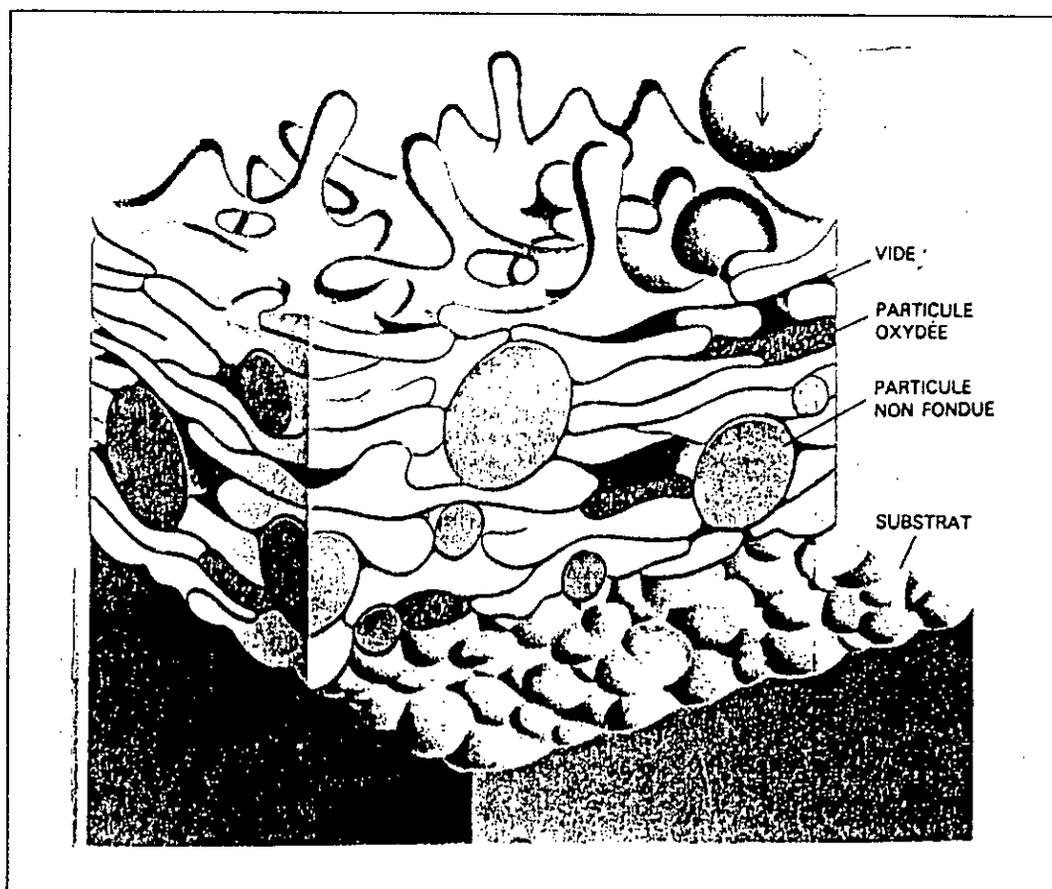


Fig. 1.9 Edification d'un revêtement

CHAPITRE 2 :

**DIFFUSION DANS LES METAUX SOLIDES
ET USURE DES SURFACES METALLIQUES .**

2.4-LA DIFFUSION DANS LES METAUX SOLIDES

2.4.1-Introduction

Les phénomènes de diffusion à l'état solide correspondent à des sauts effectués par les atomes dans les défauts de cristal, sous l'effet de l'agitation thermique. Ce n'est qu'à haute température, entre $T_f/2$ et T_f (T_f étant la température de fusion), que le transport des atomes prend réellement de l'importance à grande distance dans le réseau cristallin.

La diffusion est un phénomène important, qui est à la base de tous les traitements de surface, surtout les traitements thermiques industriels conditionnant les propriétés structurales des matériaux en service. [13], [14].

2.4.2. Relation couples de diffusion binaire - diagramme d'équilibre

A) Les deux éléments A et B sont totalement solubles à l'état solide (figure 2.1 a)

Tout traitement thermique en condition isotherme du couple AB conduit à deux gradients de concentration complémentaires de 0 à 100% ayant une allure monotone. Toutefois, les métaux de base n'ayant pas forcément des coefficients de diffusion identiques, malgré leur parenté proche (au niveau du rayon atomique, structure cristalline, ...etc.), il s'ensuit que l'un des deux envahisse plus rapidement la partie opposée du couple : ainsi les deux gradients ne sont pas centrés sur

l'interface initiale $x=0$, mais déportés vers l'élément qui diffuse le moins vite (figure 2.1 : b).

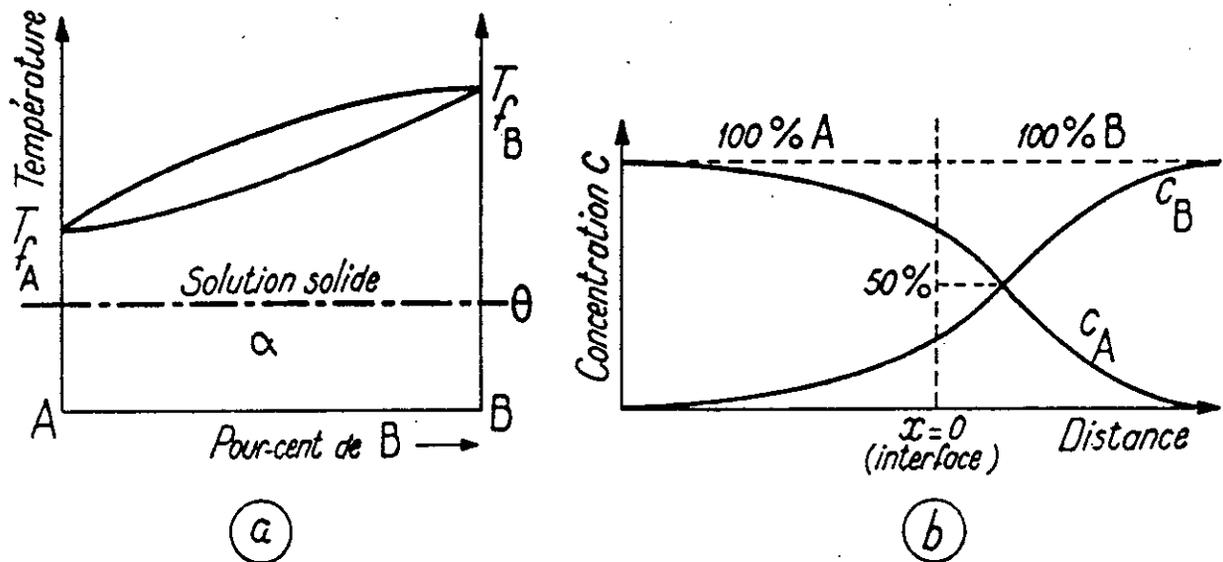


Fig. 2.1 : Gradients de diffusion entre deux métaux totalement solubles à l'état solide.

B) Les deux éléments sont partiellement solubles, appartenant à un diagramme donnant un ou plusieurs domaine biphasés

Tout traitement de diffusion effectué en condition isotherme à l'état solide donne comme précédemment un gradient de concentration correspondant à la phase α du côté de A et un gradient de concentration correspondant à la phase β du côté de B (figure 2.2 : a). Toutefois, lorsque la diffusion a été suffisante pour atteindre les limites de solubilité C_α et C_β , elle ne peut se poursuivre qu'en formant les deux phases α et β .

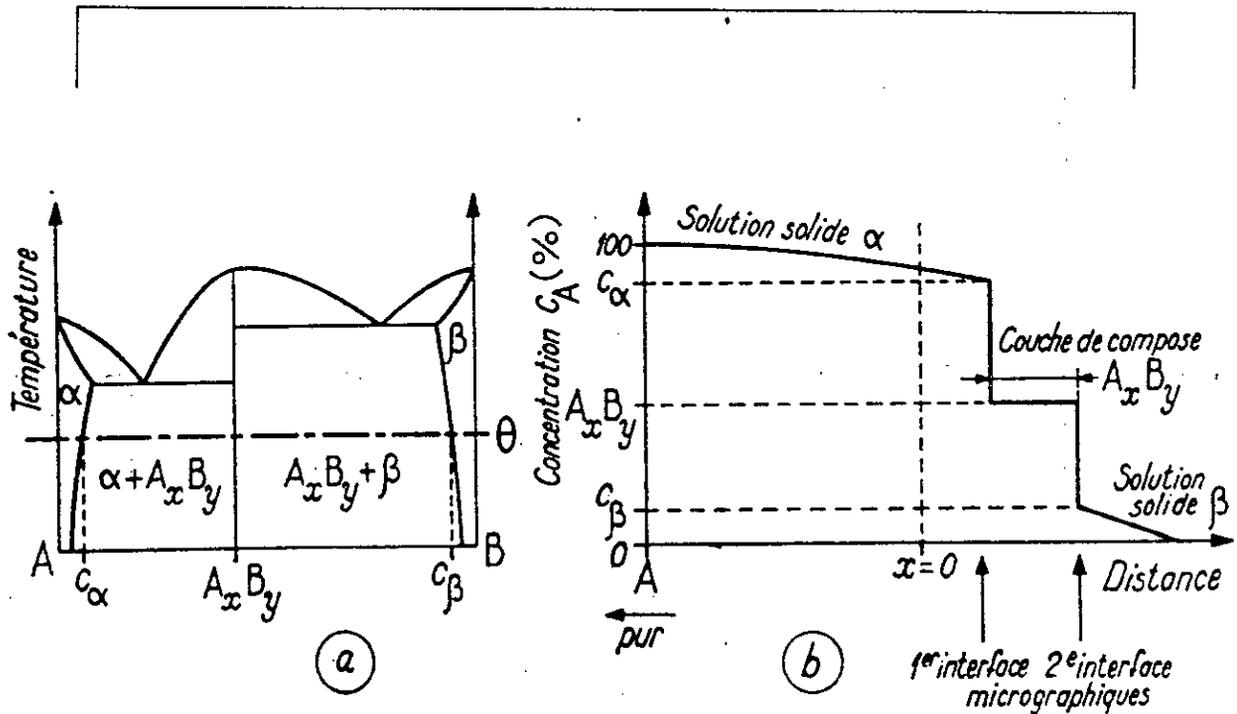


Fig. 2.2 : Gradients de diffusion entre deux métaux A et B non totalement solubles et conduisant à la formation d'un composé défini $A_x B_y$.

2.1.3-Stabilité et instabilité des interfaces formées par diffusion

La formation micrographique d'une interface par diffusion limitant deux phases est rarement dans un état d'équilibre stable puisqu'elle est le siège continu d'un transfert d'atomes, dans un système qui est lui-même hors d'équilibre. Il est en outre, difficile de contrôler si les compositions chimiques dans une interface sont bien celles de l'équilibre thermodynamique. [13], [15].

2.2 -USURES DES SURFACES METALLIQUES

2.2. 1-Introduction

La dégradation des surfaces par usure est l'un des problèmes usuels; il s'agit d'un phénomène rarement catastrophique qui se traduit par une augmentation des pertes par frottement ou par une dégradation de la surface des pièces antagonistes. Les traitements de surface sont de plus en plus souvent utilisés pour résoudre des problèmes de résistance à l'usure.

2.2. 2-Définition

L'usure peut être définie comme étant la perte progressive du matériau à sa surface par émission de débris lorsqu'il est soumis au frottement.

La connaissance des mécanismes de dégradation de surfaces est indispensable lorsqu'il s'agit de choisir le traitement le mieux adapté parmi les solutions disponibles.

2.2. 3-Principaux types d'usure

Parmi les types d'usure qui sont reconnus, on cite les plus connus.

2.2. 3.a-L'usure abrasive

L'usure par abrasion est définie comme étant la perte progressive du matériau à sa surface par action mécanique d'un abrasif.

pour améliorer la résistance à l'usure par abrasion, un traitement de surface aura essentiellement comme finalité:

- d'augmenter la dureté à la surface,

-
- d'augmenter la résistance à la corrosion pour éviter la génération des particules d'oxydes,
 - apporter un maximum de phases dures dans une matrice de dureté minimale.

2.2. 3.b-L'usure adhésive

C'est un phénomène purement superficiel dont le mécanisme crée un transfert du matériau le plus mou vers la surface la plus dure.

Pour réduire le processus d'usure par adhésion, il est recommandé de choisir des matériaux insolubles, de régler la charge et la vitesse pour être en régime d'usure modéré et utiliser une lubrification adéquate.

2.2. 3.c-L'usure par fatigue

La fatigue des surfaces est introduite essentiellement par le frottement de roulement ou de roulement glissement sous fortes charges répétées, entraînant des contraintes de traction superficielles, conduisant à des microdéformations plastiques et à de ruptures localisées par fatigue.

Pour lutter contre cette usure, il faut choisir le traitement de surface qui permet d'avoir une bonne métallurgie des surfaces et utiliser une lubrification adéquate.

2.2. 3.d-L'usure corrosive

Elle se définit comme le 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.

Pour réduire l'action de ce phénomène, il est recommandé de faire un apport d'éléments durs et nobles à la surface et d'utiliser une lubrification avec des additifs appropriés.

Remarques

Selon l'assemblage et le mécanisme d'usure qui intervient, l'usure peut être :
bénéfique, normale ou catastrophique.

L'étude et la protection contre l'usure nous permettent d'économiser des sommes considérables et de faire un saut technologique en développant des dispositifs existants.

CHAPITRE 3
Techniques expérimentales

Introduction

Comme cité précédemment (Réf. chap. 2), l'objectif de notre travail expérimental est l'étude de l'influence de la vitesse de refroidissement sur les revêtements réalisés par la technique de métallisation.

Notre étude expérimentale est comparative entre trois cycles de refroidissement:

- Refroidissement à l'eau
- Refroidissement à l'huile
- Refroidissement à l'air libre

Elle consiste à déterminer les courbes de refroidissement de chaque cycle y compris la température de la gouttelette métallique au moment de son contact avec la surface rugueuse du substrat.

La technique de la projection thermique a été réalisée à l'entreprise "Algérie métallisation", entreprise privée de métallisation des pièces mécaniques usées.

3.1-Technique de projection

3.1.1-Equipements et matériaux utilisés

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

Il a été conçu et développé pour réduire la fatigue de l'opérateur et produire des revêtements de hautes qualités bien que sa manoeuvre est manuelle.

Nous avons respecté tous les paramètres de projection préconisés par le constructeur, ainsi que ceux optimisés par les anciens ingénieurs de l'ENP qui ont travaillé dans ce domaine, afin d'avoir une bonne adhérence.

Les pièces à recharger sont fixes et le jet du métal est projeté sur la surface latérale de chaque pièce à un angle normale.

A-Sous couche d'accrochage

Dans notre cas et vu l'importance de la sous couche d'accrochage, pour toutes les pièces à recharger, nous avons utilisé une sous-couche d'accrochage réalisée par la déposition d'un alliage Ni-Al pour une épaisseur d'environ 0.1 mm.

B-Dépôt

Nous avons réalisé un revêtement composite par projection simultanée de deux fils en acier allié:

- acier au Chrome-Nickel.
- Acier au Manganèse.

Remarques

Pour déterminer la température de contact, la projection a été effectuée de manière permanente sur l'échantillon.

Pour déterminer les courbes de refroidissement, la projection a été réalisée d'une manière alternative; tous les échantillons du même cycle ont été revêtus au même temps.

3.2-Préparation du substrat étudié:

Le matériau est un acier allié du type 35CD4, qui est très utilisé en industrie mécanique. Il nous a été dispensé par la société nationale des véhicules industriels (SNVI).

Les échantillons qui permettent de suivre le cycle de refroidissement étaient percés afin de pouvoir placer le thermocouple de mesure.

Nous avons prévu sept (7) échantillons pour chaque cycle dont les dimensions sont les suivantes:

Diamètre $\varnothing = 20\text{mm}$, Epaisseur $e = 10\text{mm}$

Avant l'opération de la projection, les échantillons ont subi un nettoyage par le trichloroéthylène à plusieurs reprises pour s'assurer de la propreté de la surface. Après le nettoyage, nous avons procédé à la rugosification de la surface par grenailage.

Remarques

Le nettoyage débarrasse la surface (interfaciale) de toutes les impuretés organiques (graisse, l'huile d'usinage...) qui peuvent altérer le contact interfacial substrat-dépôt en formant une barrière pour la diffusion.

3.3-Préparation des thermocouples

Les thermocouples utilisés dans nos expériences et dont la jonction est du type alumel-chromel, ont été réalisés à l'atelier de mécanique de l'ENP. L'étalonnage des thermocouples s'effectue en les trempant à l'eau de température 18°C , juste après la formation de leur jonction. Par la suite un contrôle de fiabilité est fait pour chaque

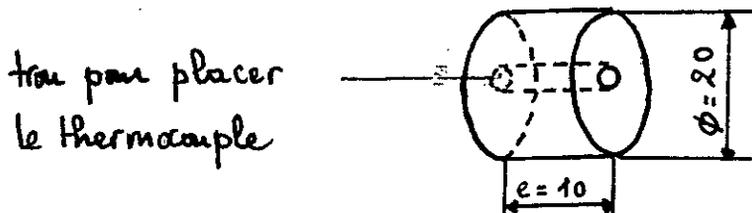


fig 3.1bis: Schéma de l'échantillon

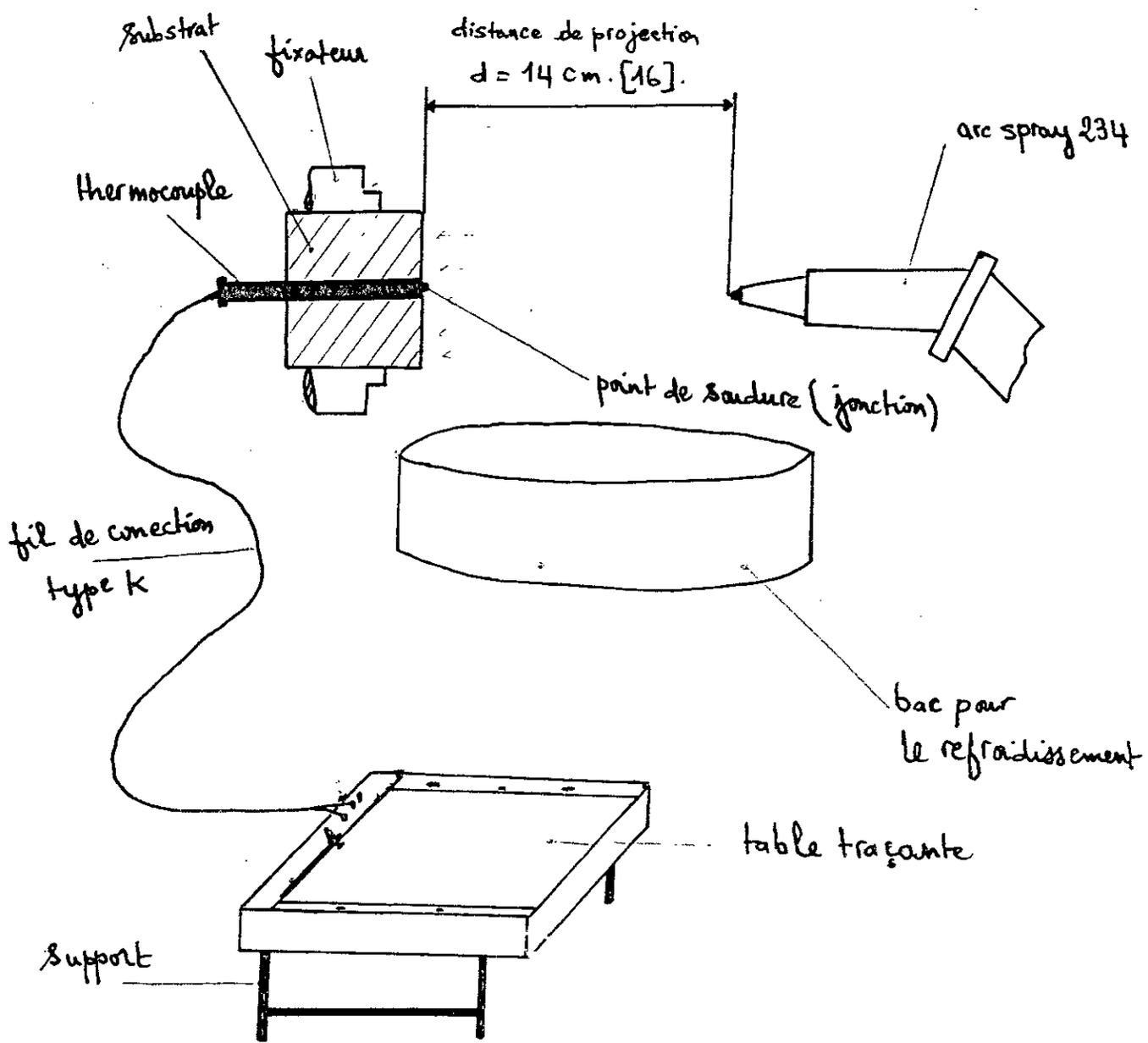


fig 3.2 bis: Schéma du montage réalisé

thermocouple de manière à s'assurer de sa justesse (performance). Le contrôle se divise en:

a-Contrôle au microscope optique : c'est pour observer tous les défauts externes (fissures, pores, ...).

b-Contrôle de justesse : ce contrôle consiste à le comparer avec un thermocouple digital très performant.

Les thermocouples jugés bons présentent les caractéristiques suivantes:

une différence de ± 6 à 10 °C à la température ambiante, par rapport au thermocouple digital. Cette différence s'annule à haute température (500°C).

il met 44 à 46 secondes pour atteindre la température d'un four cylindrique fixée à 500°C , contrairement au thermocouple digital qui fait 40 à 41 secondes.

3.4-Evolution de la température pendant la projection

La première courbe obtenue est présentée sur la figure 3.1 et nous a permis de déterminer la température de la gouttelette projetée au moment de son accrochage sur la surface rugueuse du substrat.

La projection du jet était d'une manière permanente afin de permettre le chauffage continu du point de soudure (jonction) du thermocouple. Ainsi, la plus haute température atteinte était 402°C après un temps de 59 secondes depuis le début de la projection.

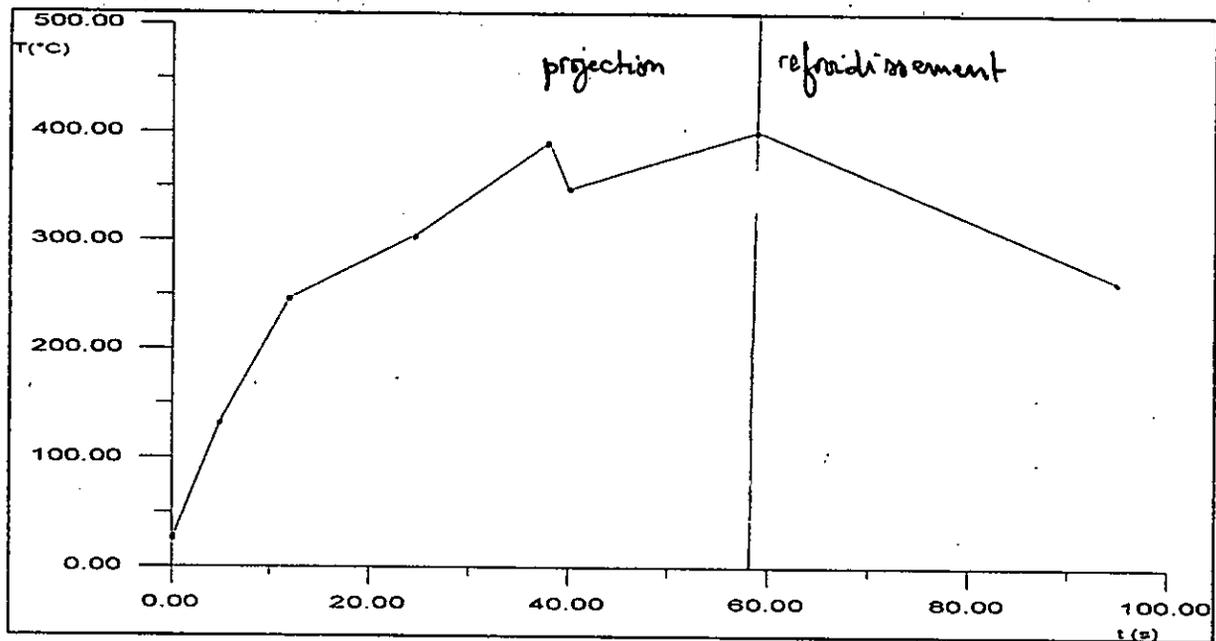


Fig.3.1 : Evolution de la température pendant la projection

3.5-Cycles de refroidissement:

Les cycles de refroidissement réalisés sont montrés sur les figures suivantes.

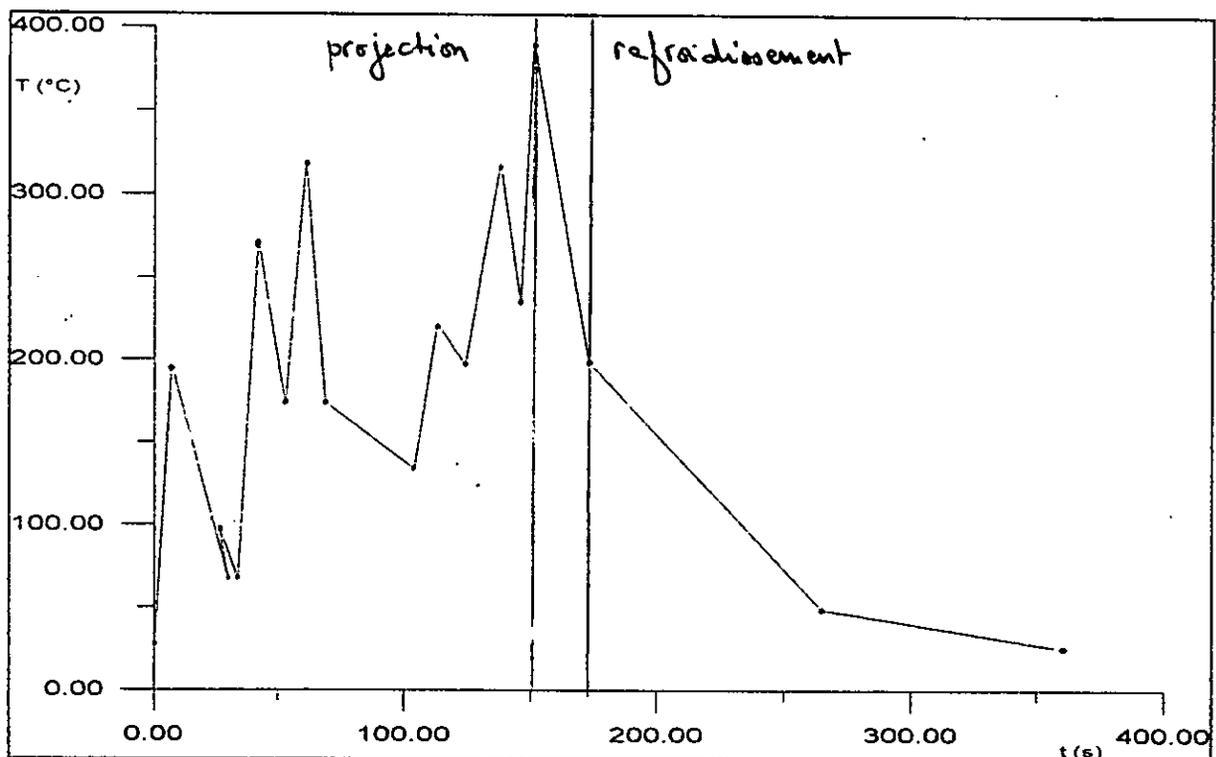


Fig.3.2 : Cycle de refroidissement à l'eau.

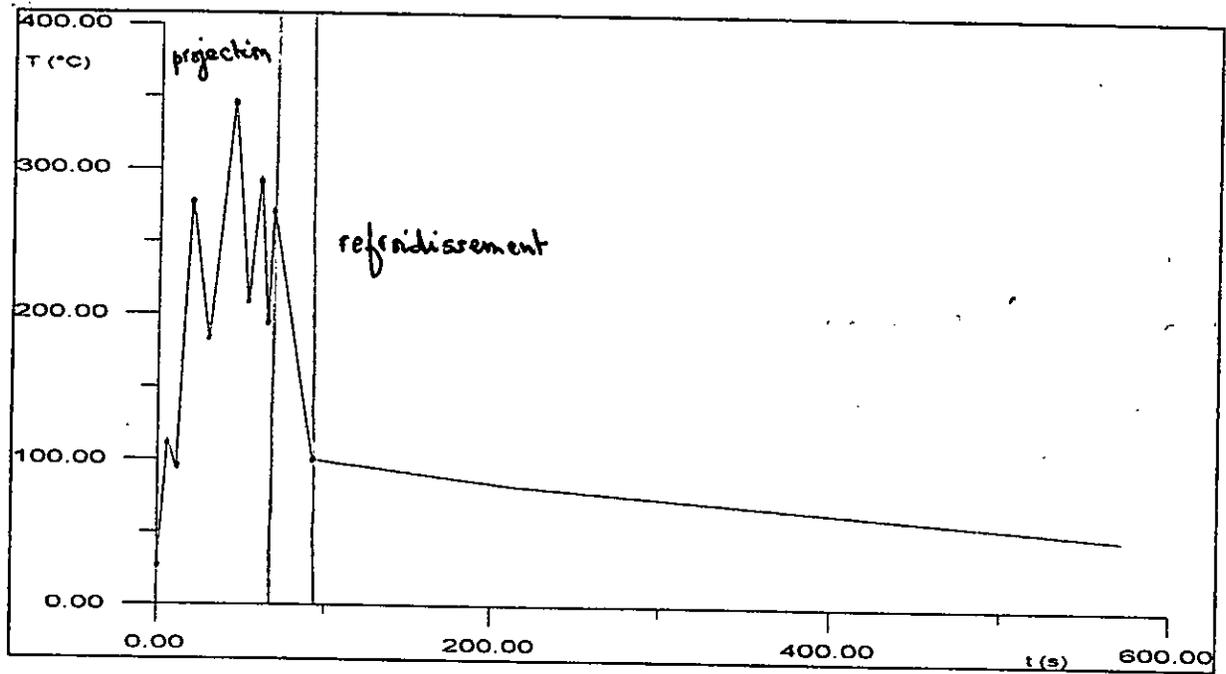


Fig.3.3 : Cycle de refroidissement à l'huile.

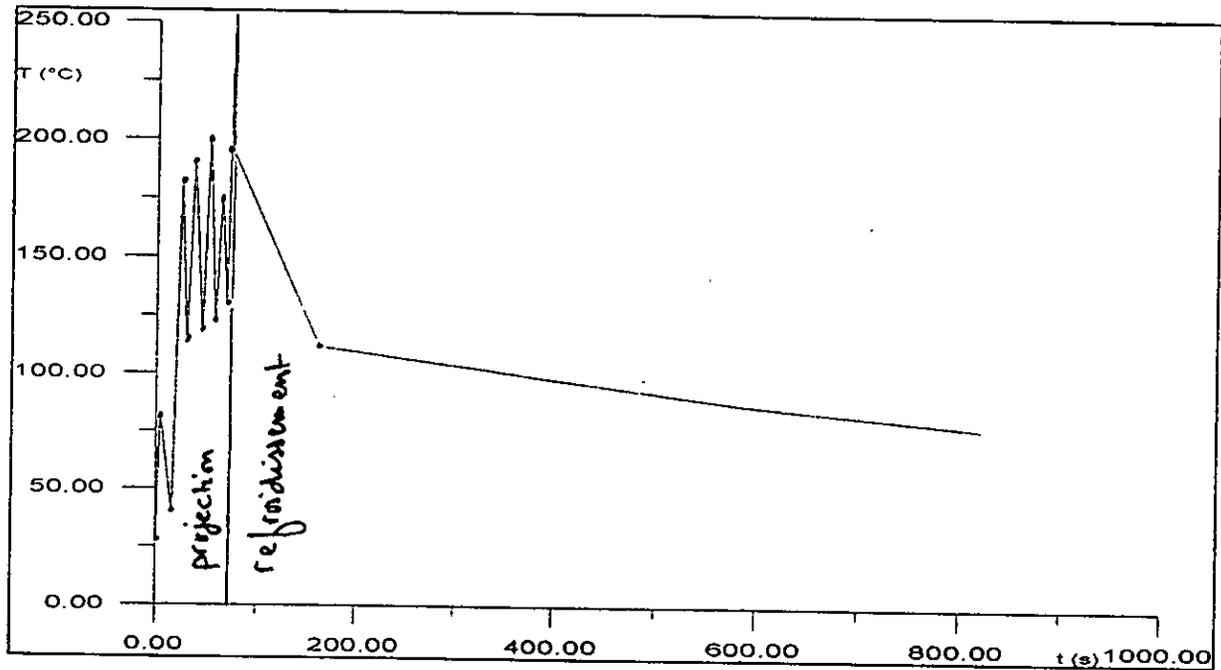


Fig.3.4 : Cycle de refroidissement à l'air libre.

D'après les courbes obtenues, notre étude comparative sur les cycles de refroidissement montre que le temps de refroidissement est différent pour chaque cycle. La vitesse de refroidissement la plus élevée est celle de l'eau puis celle de l'huile, par contre celle de l'air libre est lente et dépasse 20 minutes.

Malgré cette différence, au niveau de la vitesse de refroidissement et vu les températures de projection atteintes pour les trois cycles qui sont respectivement 391°C, 348°C et 202°C, on affirme par ces résultats que la vitesse de refroidissement n'a pas d'influence sur les propriétés mécaniques de ce revêtement, puisque les points de transformation des alliages déposés sont plus élevés (plus de 780°C) que les températures prélevées par les thermocouples utilisés.

Donc, on préfère laisser l'avantage à d'autres essais (métallographie, micro duretés, usure) pour mieux voir cette influence; si elle existe, au niveau de la microstructure (grains, micro porosité) et au niveau des propriétés mécaniques.

Toujours pour améliorer la qualité de l'interface (Adhérence) des différents revêtements on a effectué des post-traitements.

3.6-Recuit d'homogénéisation

On a opté pour le traitement de l'homogénéisation pour des raisons qui ont pour but l'activation thermique des réactions de diffusion entre le substrat et le dépôt.

Une fois les échantillons revêtus, on leur a fait subir un recuit d'homogénéisation à 1060°C dans un four électrique, avec un temps de maintien de deux (02) heures. Le temps de maintien est compté à partir du moment où les échantillons ont été introduits dans le four.

Le traitement d'homogénéisation s'est déroulé sous atmosphère non contrôlée et le refroidissement a eu lieu à l'air libre.

Remarque

Le temps de maintien est choisi à partir des études précédentes d'optimisation des post-traitements[7].

CHAPITRE 4
Analyse métallurgique
et mécanique
du multimatériau élaboré

4.1.1-Analyse micrographique

Pour contrôler la qualité de nos dépôts et pour mettre en évidence les contrastes interfaciaux, la majorité de nos photos ont été prises au niveau de l'interface substrat/dépôt. Cette analyse nous permet 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 obtenue après post-traitements.

Avant de procéder à l'observation micrographique, nous avons préparé les surfaces au polissage mécanique sur du papier abrasif à grains de plus en plus fins (120,360,600 et 1000). La finition a été faite sur papier feutre à l'aide d'une suspension d'alumine à $0.03\mu\text{m}$.

La mise en évidence de la structure micrographique a été réalisée par une attaque chimique au nital à 4% acide nitrique pendant près de 12 secondes.

La première remarque à faire après notre observation métallographique, c'est l'existence de quelques plages d'oxydes dans le dépôt plus que dans la sous couche d'accrochage pour tous les cycles avec une bonne apparition de celles-ci sur les échantillons sans post-traitement.(figures 4.1, 4.3 et 4.5).

Signalons aussi, que malgré l'existence des oxydes, l'homogénéité du dépôt et la densification étaient bonnes avec une faible présence de porosité.

La constatation la plus importante à faire est l'amélioration de l'interface substrat/dépôt après post-traitement.

Effectivement, on croit qu'il y a un éventuel réarrangement des inclusions non métalliques. Ce constat peut être confirmé pour les échantillons ayant subits un post-traitement, où on observe une diffusion du dépôt vers le substrat. Cette dernière

s'accompagne (pour tous les cycles) de la formation de composés intermétalliques de formes quelconques, ces composés peuvent être du NiCr, NiAl₃ et des carbures alliés (Carbures de chrome surtout),(figures 4.2, 4.4, et 4.6), ce qui nous permet d'avoir une meilleure stratification des couches projetées et une densification élevée du dépôt. Cela nous donne une adhérence purement métallique (chimique) du dépôt renforcée par les composés intermétalliques qui se sont précipités au niveau de l'interface.

Du point de vue microstructure, on note la disparition totale d'une couche qu'on suppose être une porosité au niveau de l'interface substrat/sous couche d'accrochage après le post-traitement.

D'une manière générale, on conclut que l'activation thermique joue un rôle important dans l'inter diffusion au niveau de l'interface, ce qui améliore l'adhérence du multimatériau .

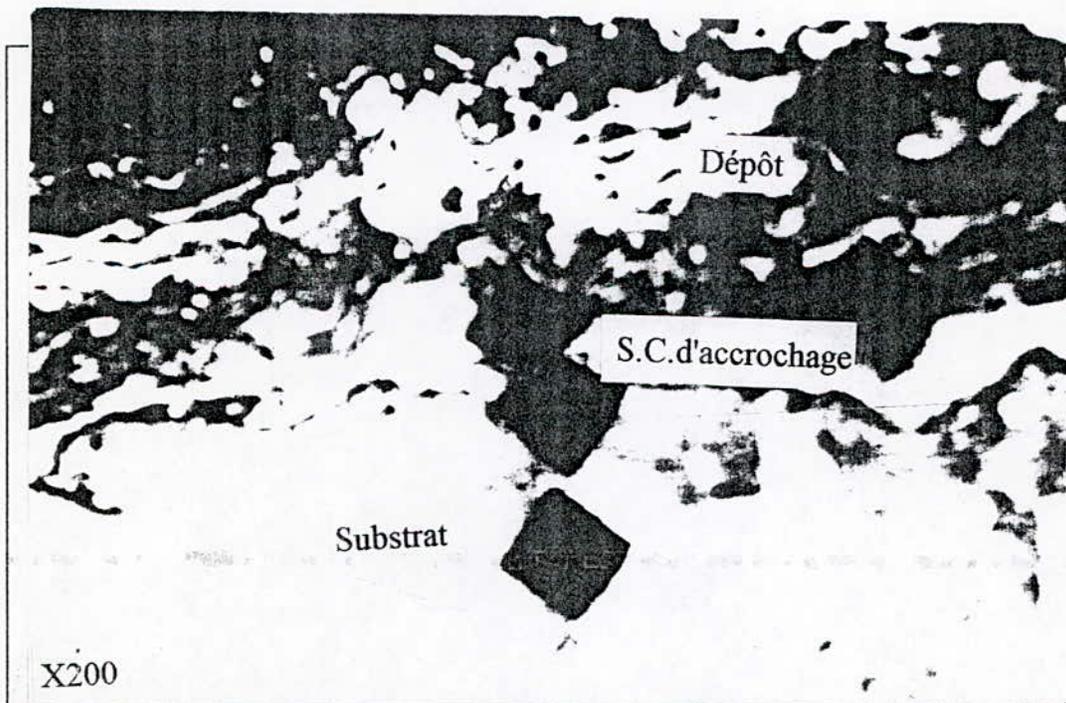


Fig.4.1 : Interface du couple substrat/dépôt
Refroidissement à l'eau sans post-traitement.

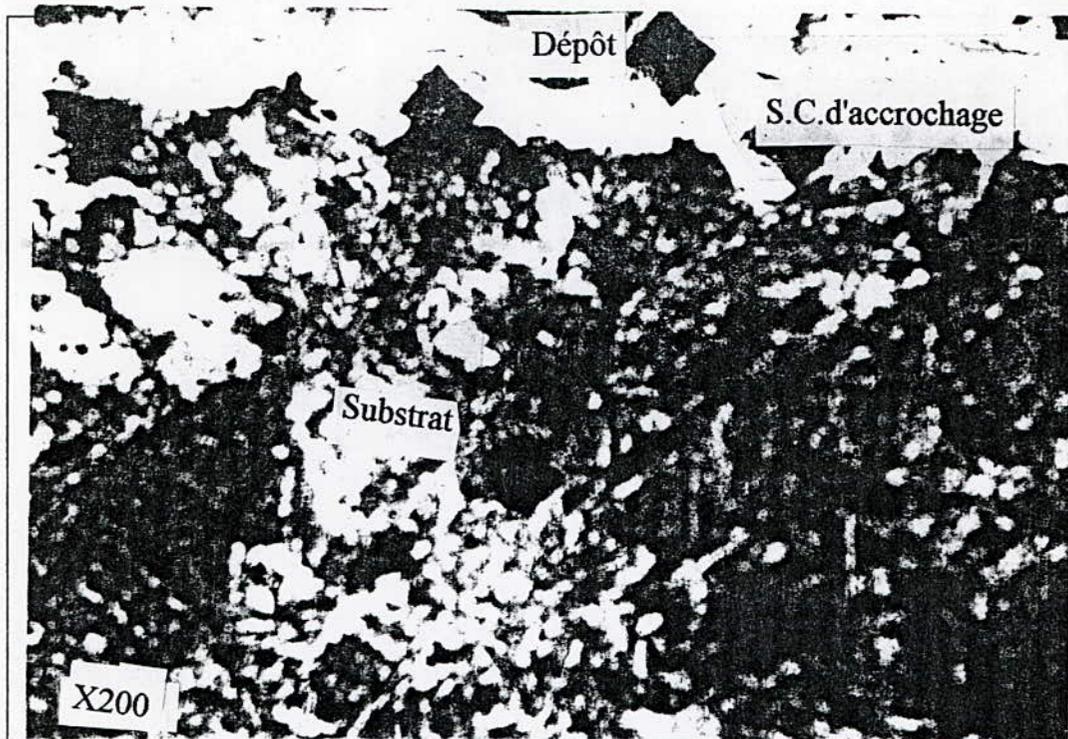


Fig.4.2 : Interface du couple substrat/dépôt

Refroidissement à l'eau avec post-traitement

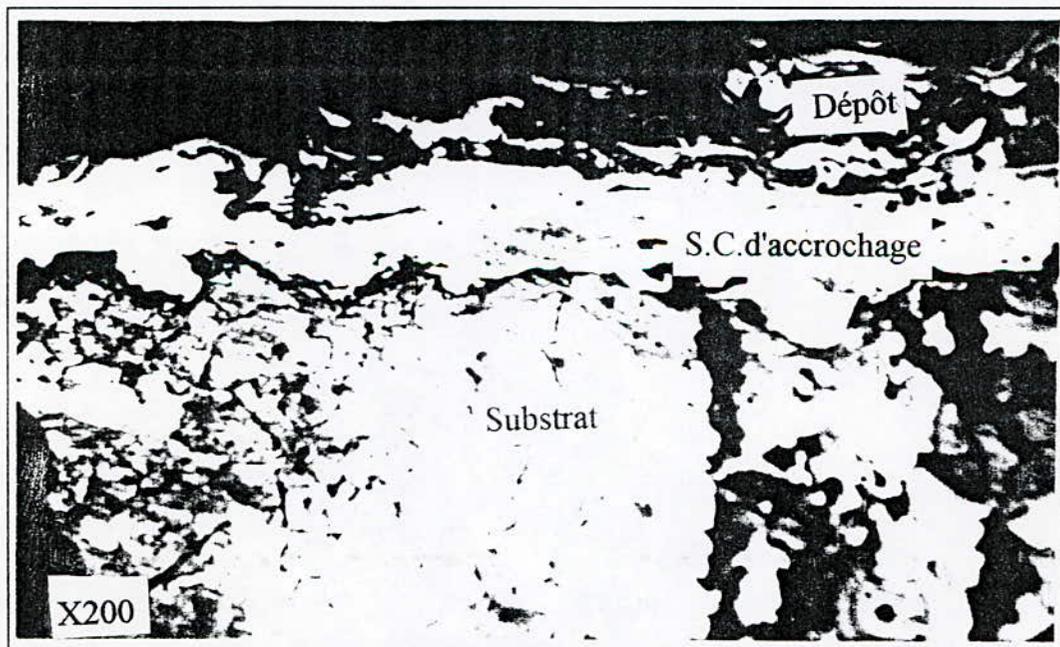


Fig.4.3 : Interface du couple substrat/dépôt

Refroidissement à l'huile sans post-traitement

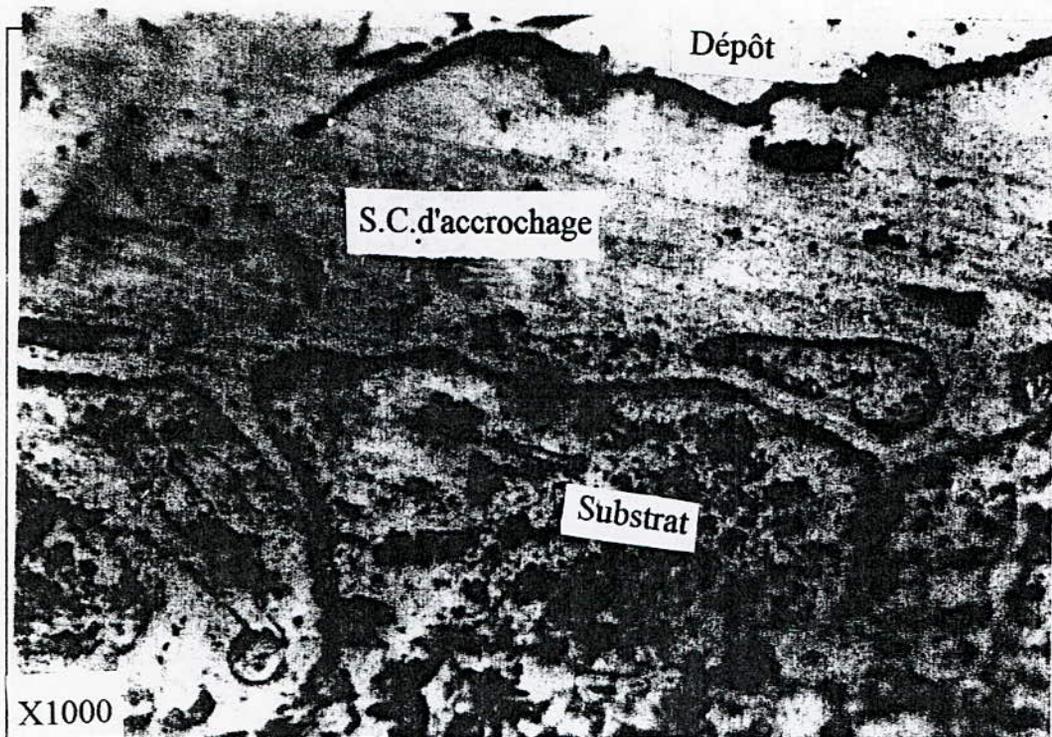


Fig.4.4 : Interface du couple substrat/dépôt

Refroidissement à l'huile avec post-traitement

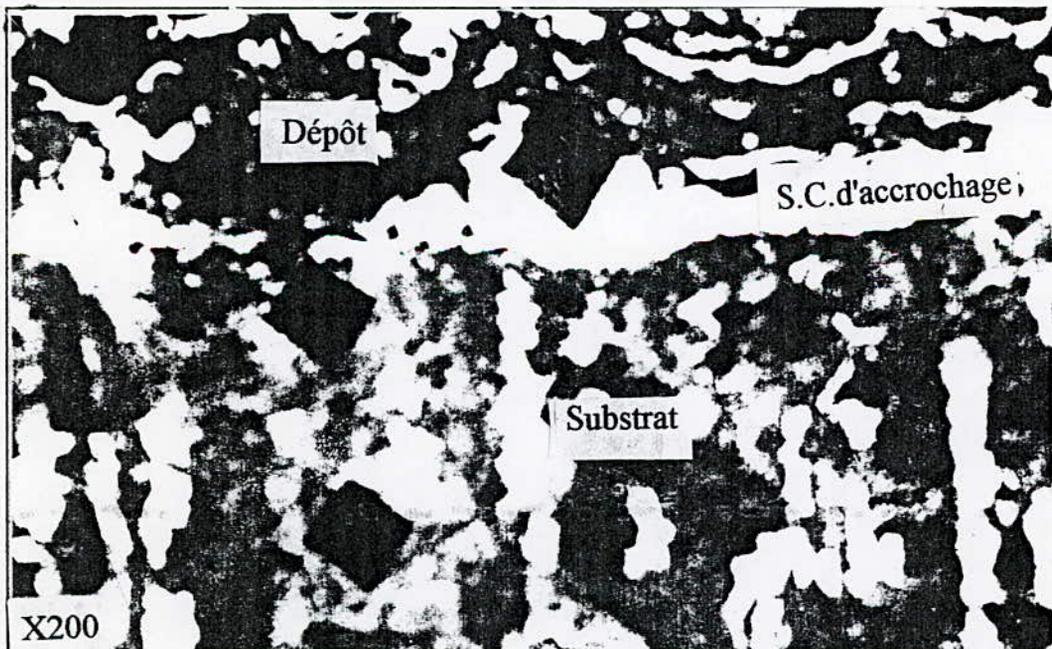


Fig.4.5 : Interface du couple substrat/dépôt

Refroidissement à l'air libre sans post-traitement

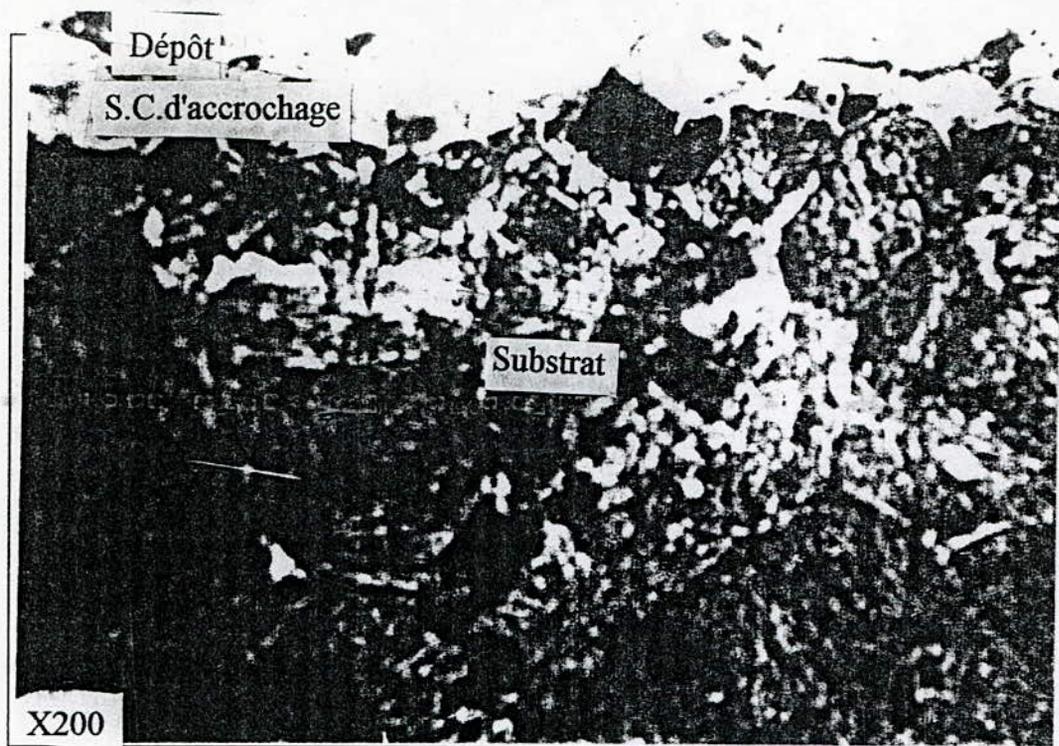


Fig.4.6 : Interface du couple substrat/dépôt

Refroidissement à l'air libre avec post-traitement

De ce qui précède, toutes les remarques et constatations s'appliquent pour chaque cycle de refroidissement, ce qui confirme notre première conclusion déduite des courbes de refroidissement sur la base des valeurs de températures prélevées à l'interface.

Ces hypothèses peuvent être confirmées par des analyses plus poussées de caractérisation physico-chimique des différentes zones interfaciales.

4.2.1-Filiation de la micro-dureté

Dans notre cas, on a utilisé la micro dureté, car à travers l'élaboration de notre multimatériau on était appelé à créer des interfaces entre le substrat et des couches spécifiques du point de vue microstructure et épaisseurs.

La charge 700g était la charge minimale qui nous a permis d'obtenir une empreinte sur le multimatériau réalisé.

D'après les figures 4.7, 4.9, 4.11 et 4.13,4.15,4.17, la microdureté a augmenté au niveau de l'interface et a diminué dans le dépôt après le post traitement, ce qui nous permet d'avancer que la diffusion a eu lieu du dépôt vers le substrat. Ceci explique la formation de composés intermétalliques et des carbures et améliore ainsi l'adhérence métallurgique.

On constate aussi que la microdureté est la même pour tous les cycles de refroidissement, ce qui est un autre appui à notre première conclusion confirmant la non influence des vitesses sur les propriétés mécaniques du multimatériau ainsi réalisé.

Donc, on peut juger à la limite des moyens utilisés la validité de la mesure des températures à l'interface.

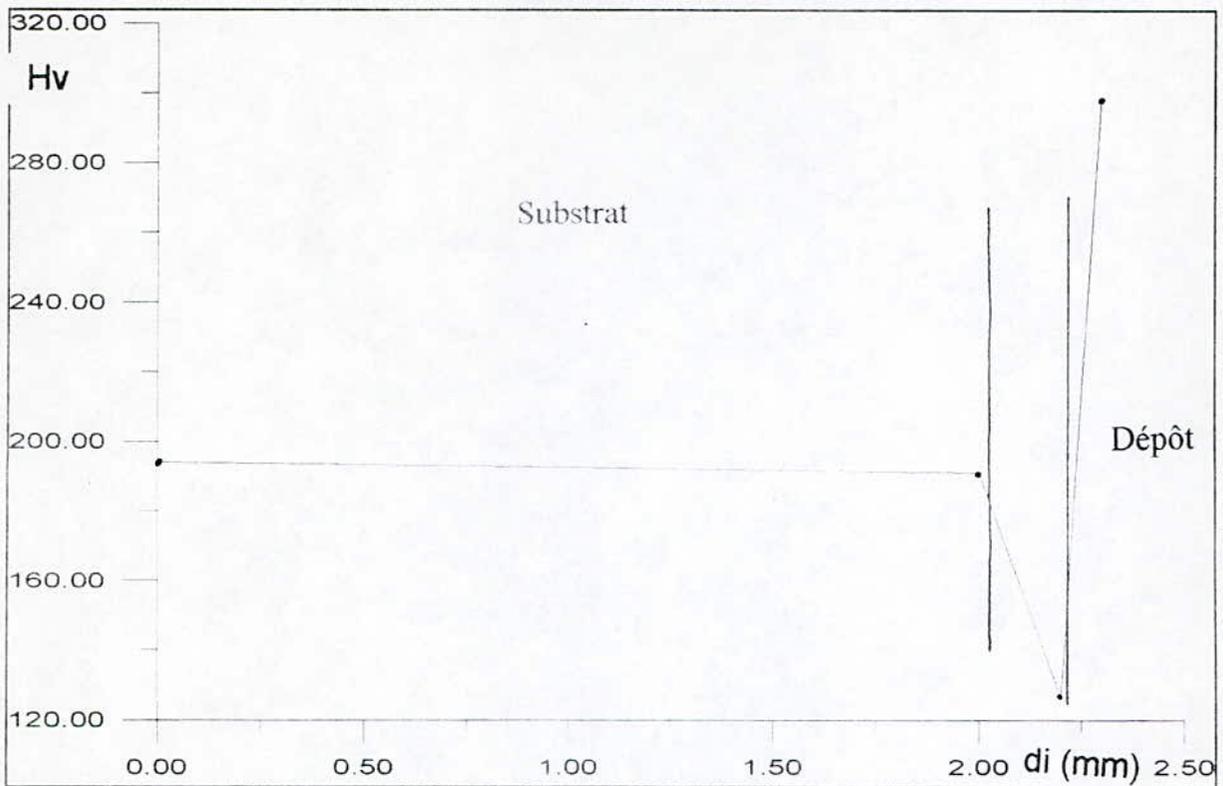


Fig.4.7 : Evolution de la microdureté dans les multimatériaux refroidis à l'eau sans post-traitement

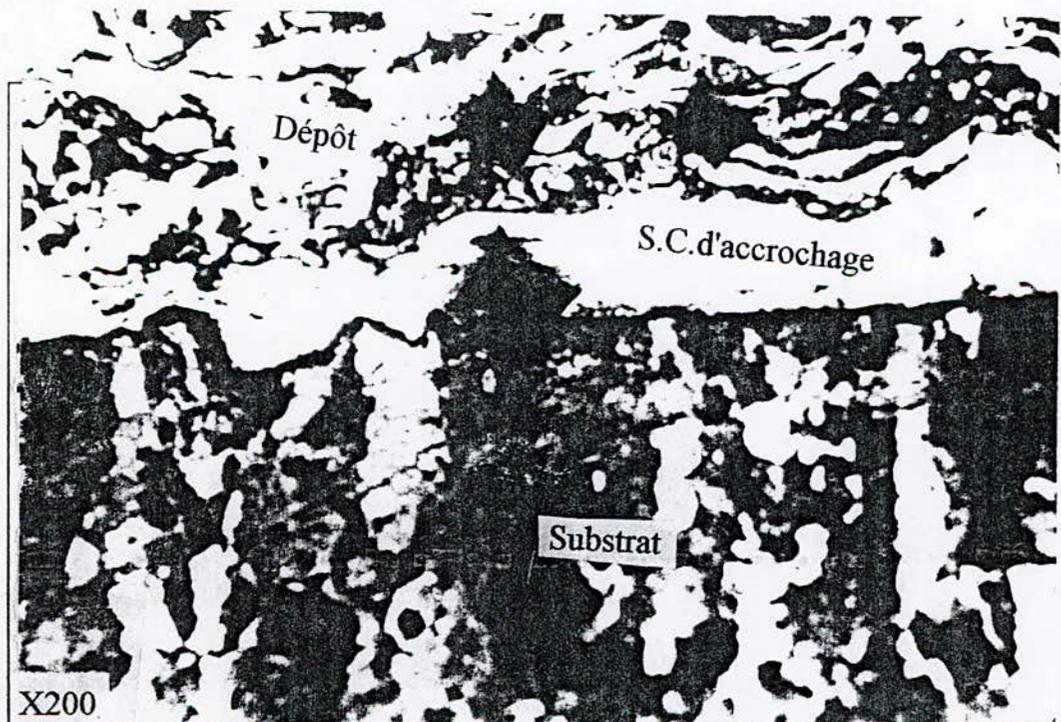


Fig.4.8 : Empreintes des microduretés pour le multimatériau refroidi à l'eau sans post-traitement

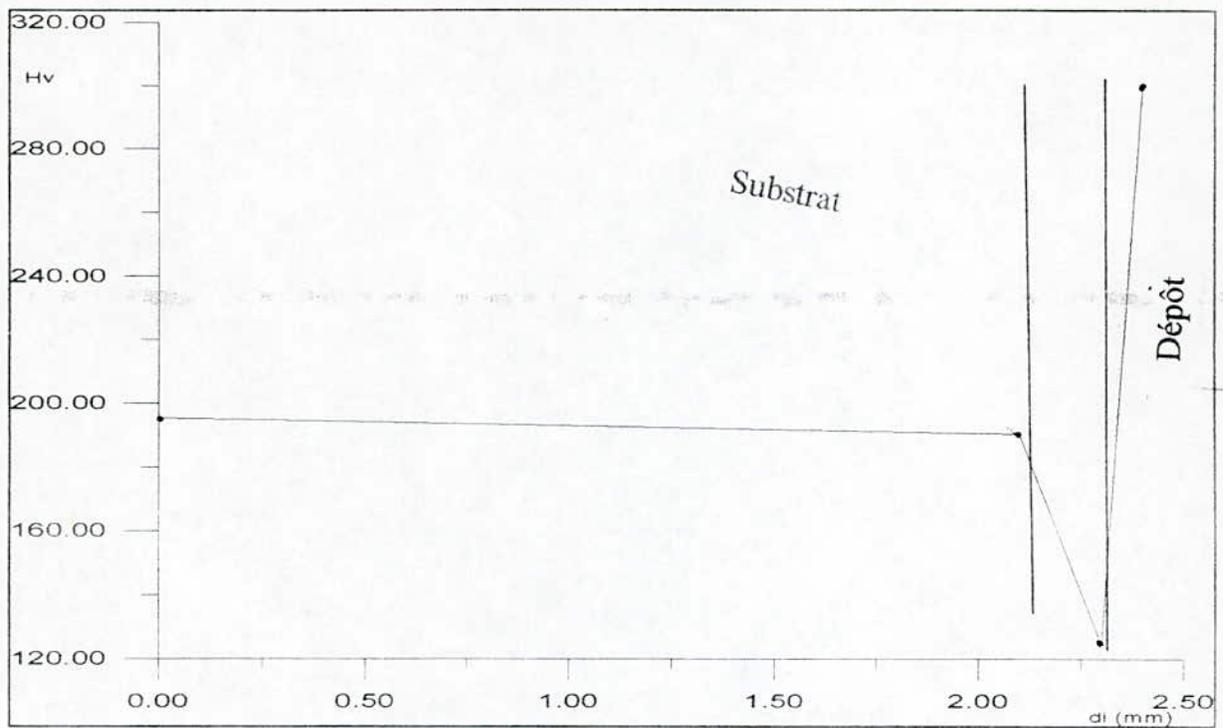


Fig.4.9 : Evolution de la microdureté dans le multimatériau refroidi à l'huile sans post traitement

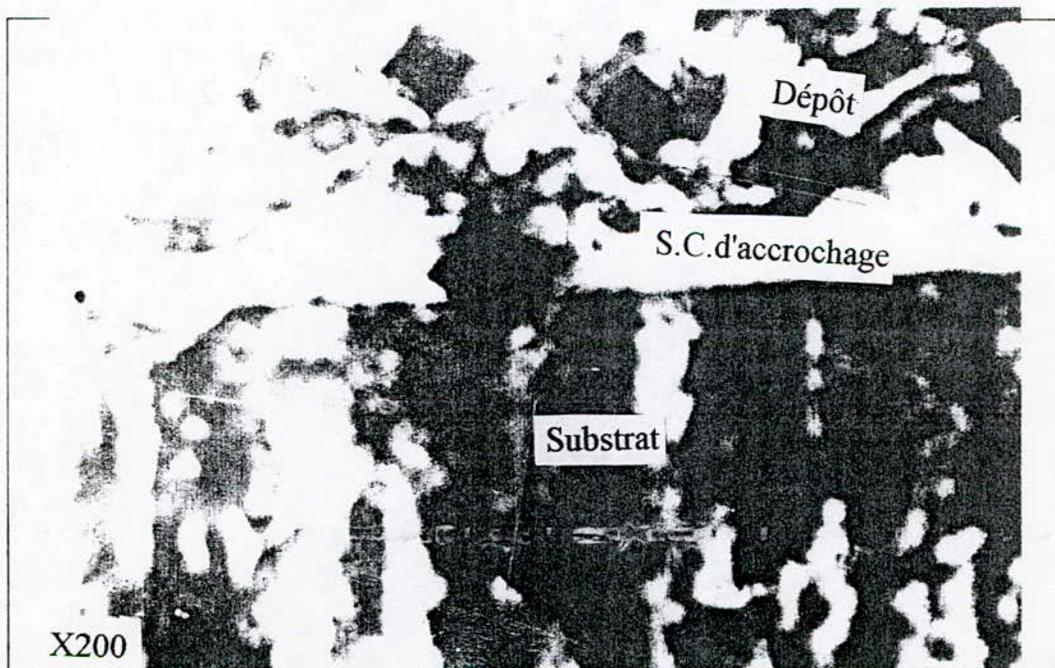


Fig.4.10 : Empreintes des microduretés pour le multimatériau refroidi à l'huile sans post-traitement

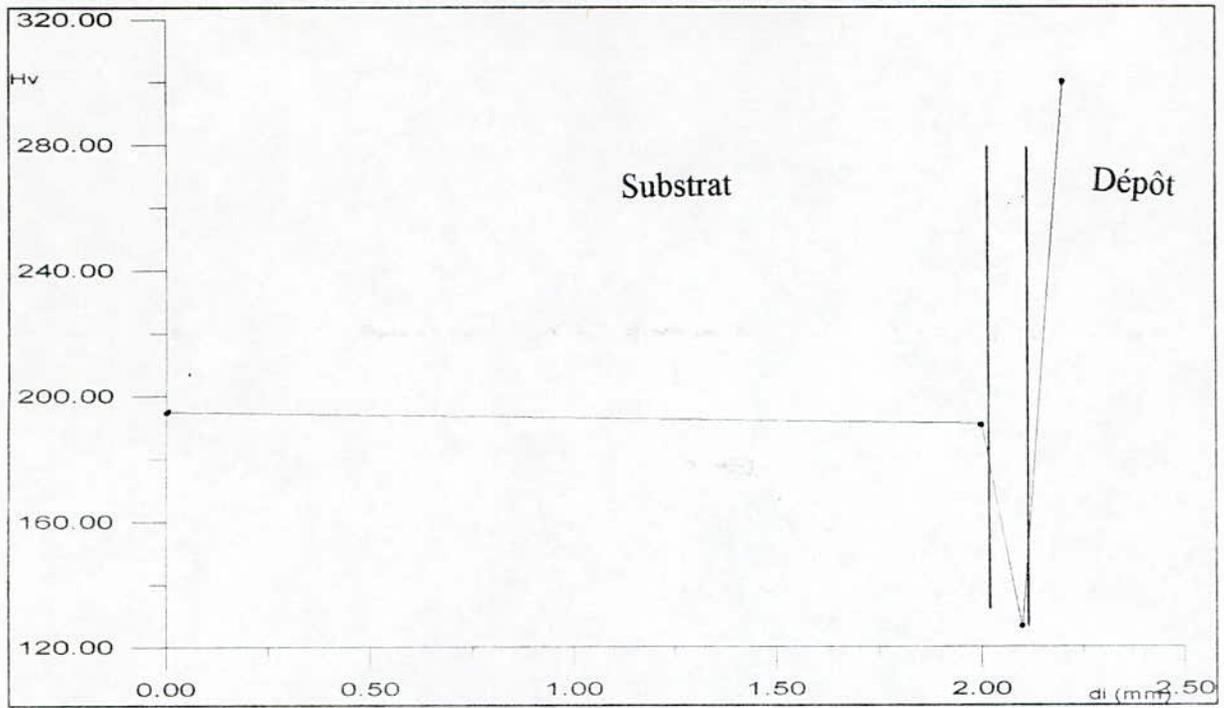


Fig.4.11 : Evolution de la microdureté dans le multimatériau refroidi à l'air libre sans post traitement

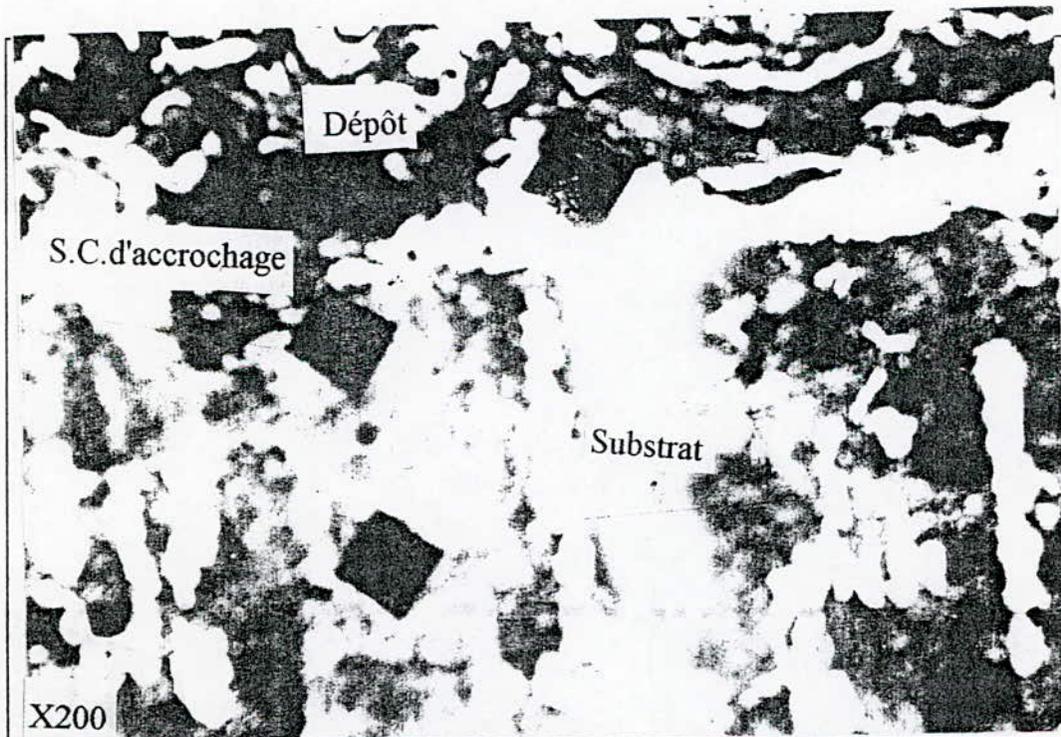


Fig.4.12 : Empreintes des microduretés pour le multimatériau refroidi à l'air libre sans post-traitement

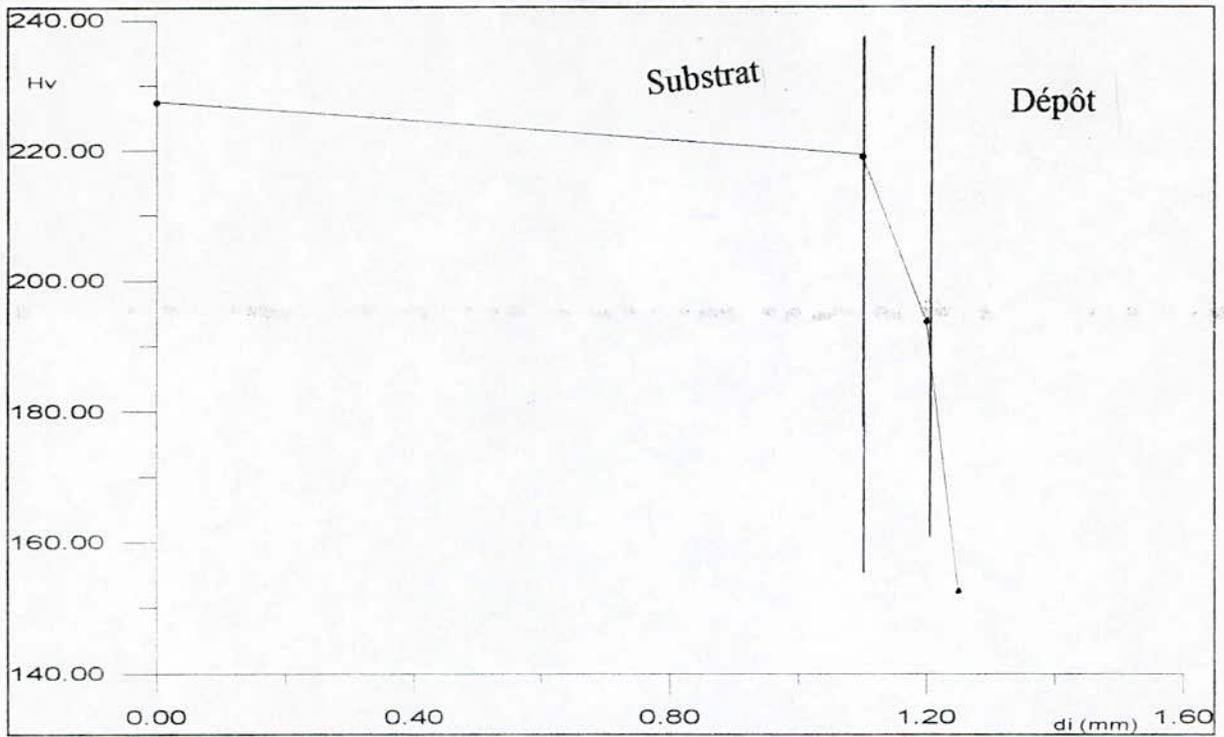


Fig.4.13 : Evolution de la microdureté dans le multimatériau refroidi à l'eau avec post traitement

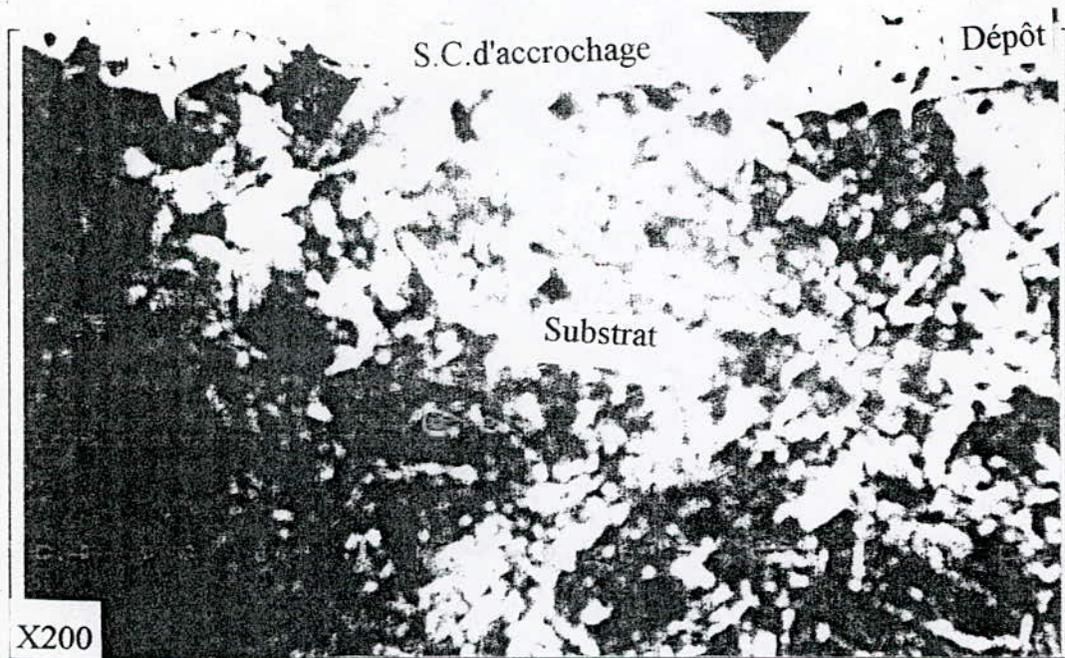


Fig.4.14 : Empreintes des microduretés pour le multimatériau refroidi à l'eau avec post-traitement

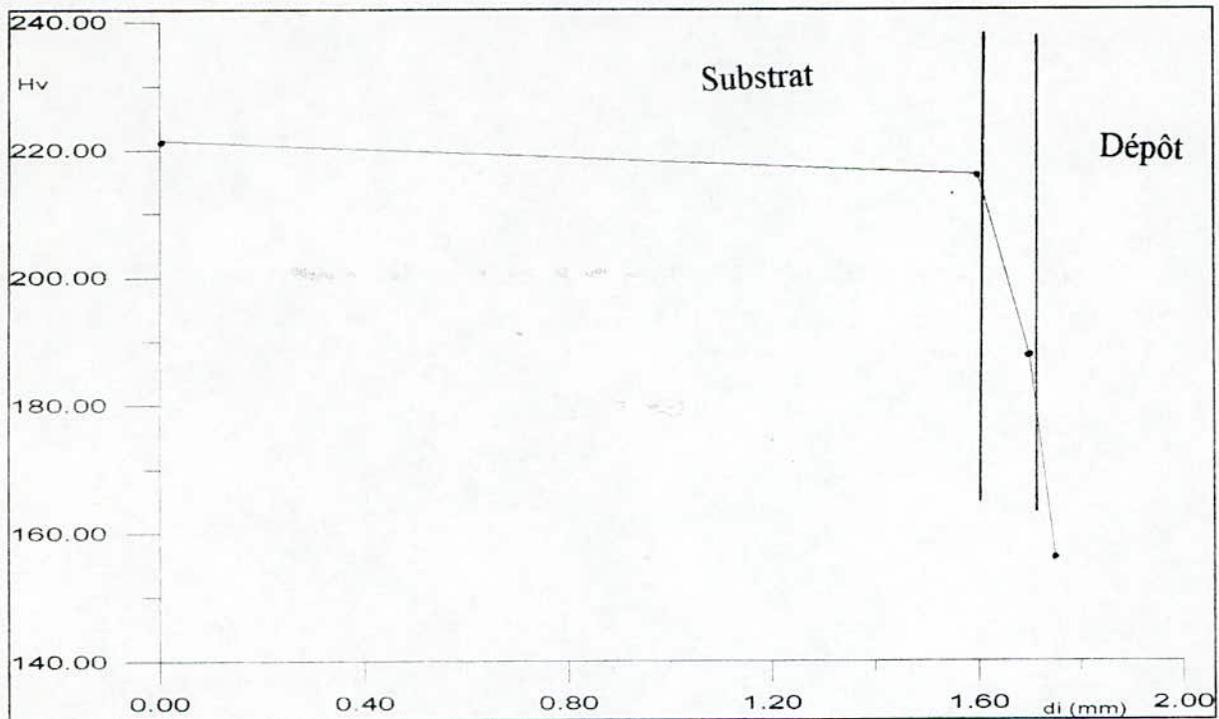


Fig.4.15 : Evolution de la microdureté dans le multimatériau refroidi à l'huile avec post traitement

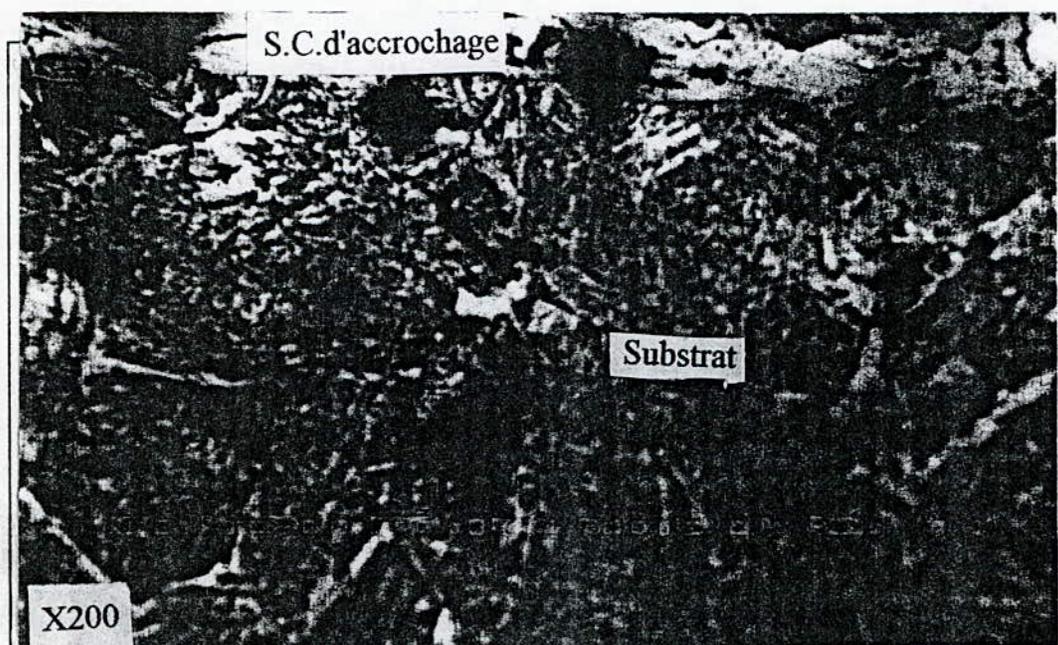


Fig.4.16 : Empreintes des microduretés pour le multimatériau refroidi à l'huile avec post-traitement

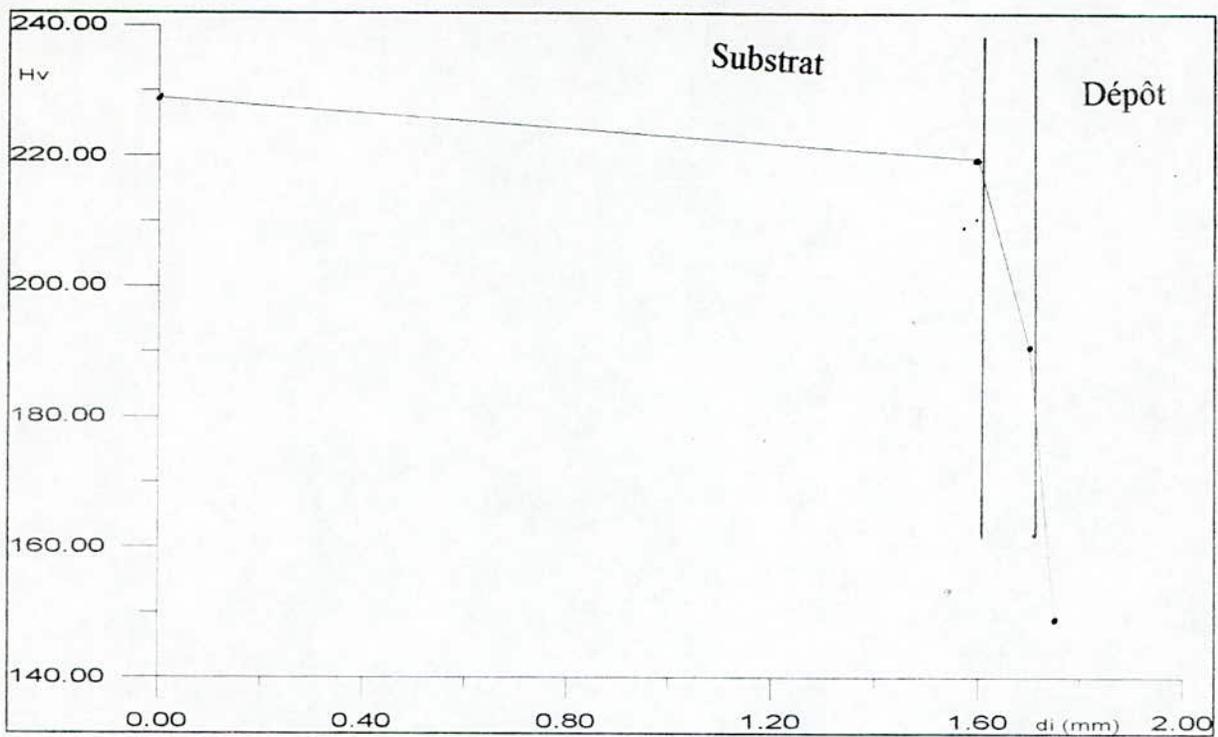


Fig.4.17 : Evolution de la microdureté dans le multimatériau refroidi à l'air libre avec post-traitement

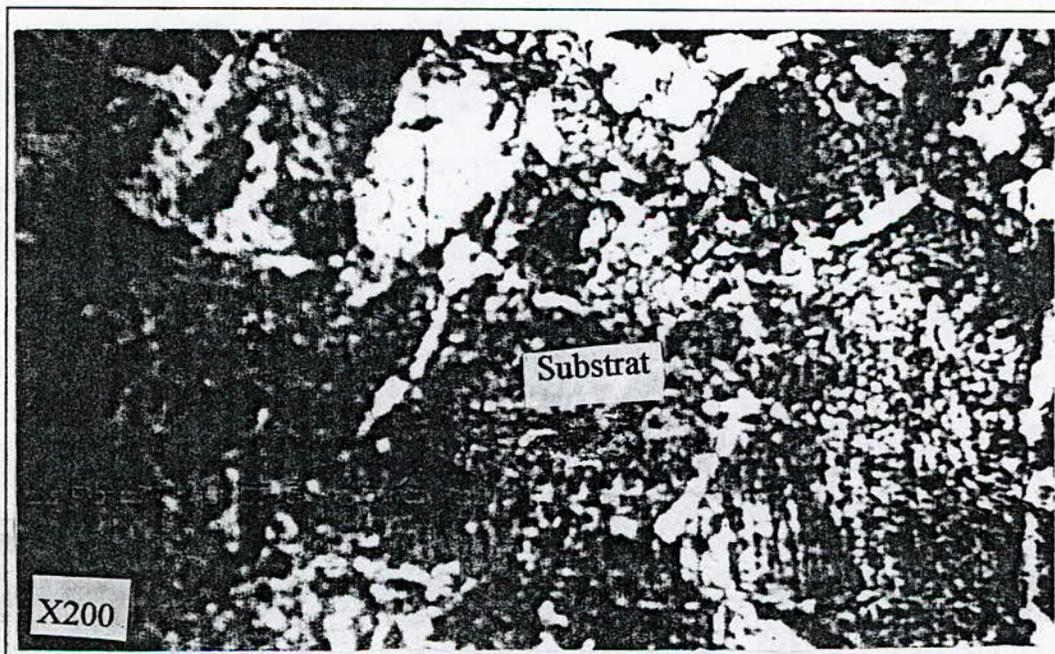


Fig.4.18 : Empreintes des microduretés pour le multimatériau refroidi à l'air libre avec post-traitement

4.3-Etude tribologique

Le tribomètre utilisé est un frictio-analyseur de type (JPS) relié à un compteur électrique qui lui même est relié à une table traçante. Cette table nous a permis de suivre l'évolution du moment total résistant en fonction du temps d'usure (voir figures 4.19, 4.21, 4.22, 4.23 et 4.24).

Le calcul du coefficient de frottement est choisi quand la courbe commence à prendre une allure constante; dans notre cas, ce sera après 20minutes environ à partir de la formule suivante:

$$f = \frac{M_T - 0.01143}{0.2352}$$

M_T :Moment total [Nm].

f :Coefficient de frottement.

avec: $M_T = M_f + M_i$ (catalogue du tribomètre).[7],[15].

$M_f = f.p.r.g$: Moment de frottement.

$M_i = 0.01143$ [Nm] moment initial.

$p = 1.2$ Kg : La charge.

$r = 0.02$ m : Rayon de la piste.

$g = 9.81$ m/s² : Constante de gravité.

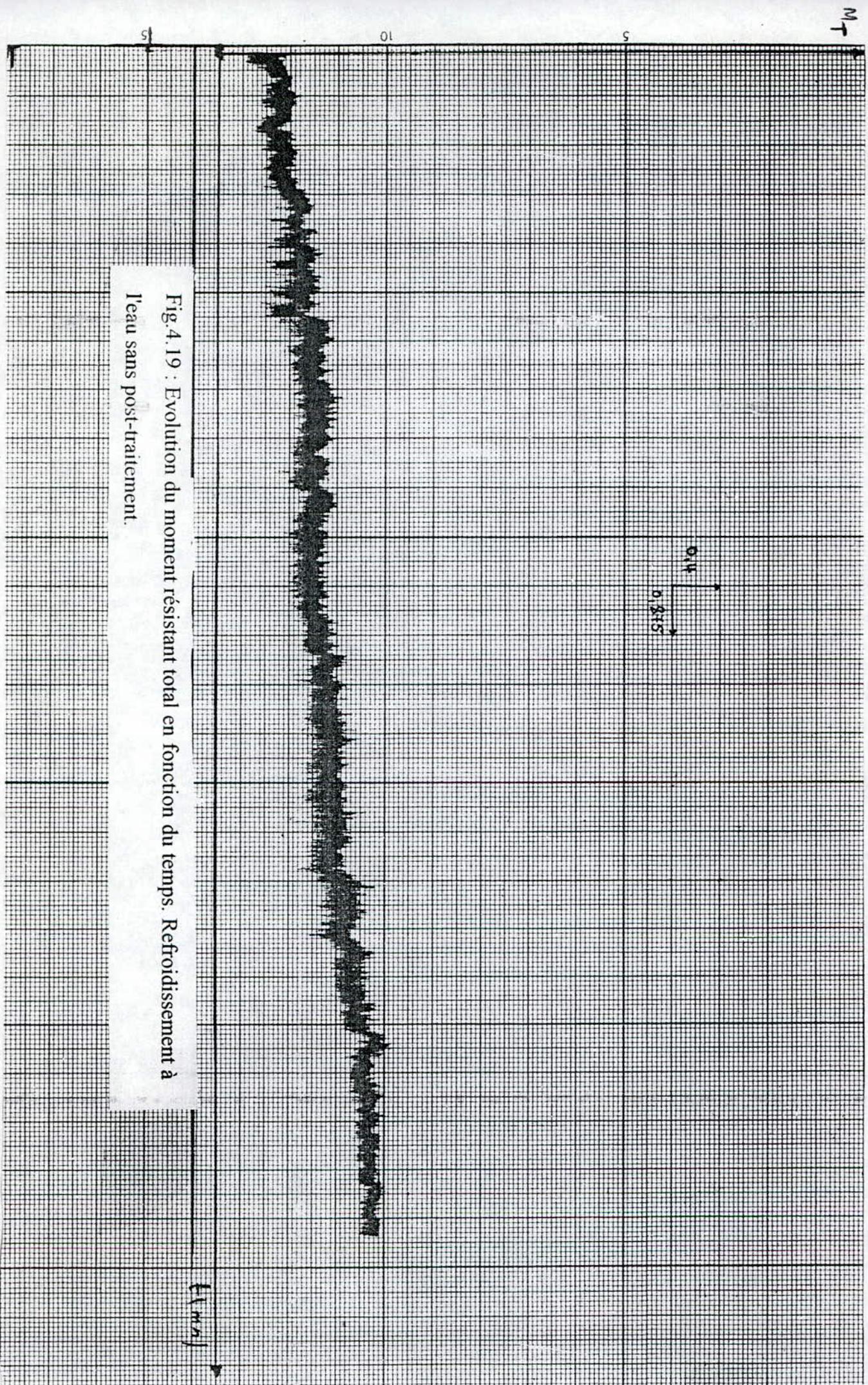


Fig.4.19 : Evolution du moment résistant total en fonction du temps. Refroidissement à l'eau sans post-traitement.

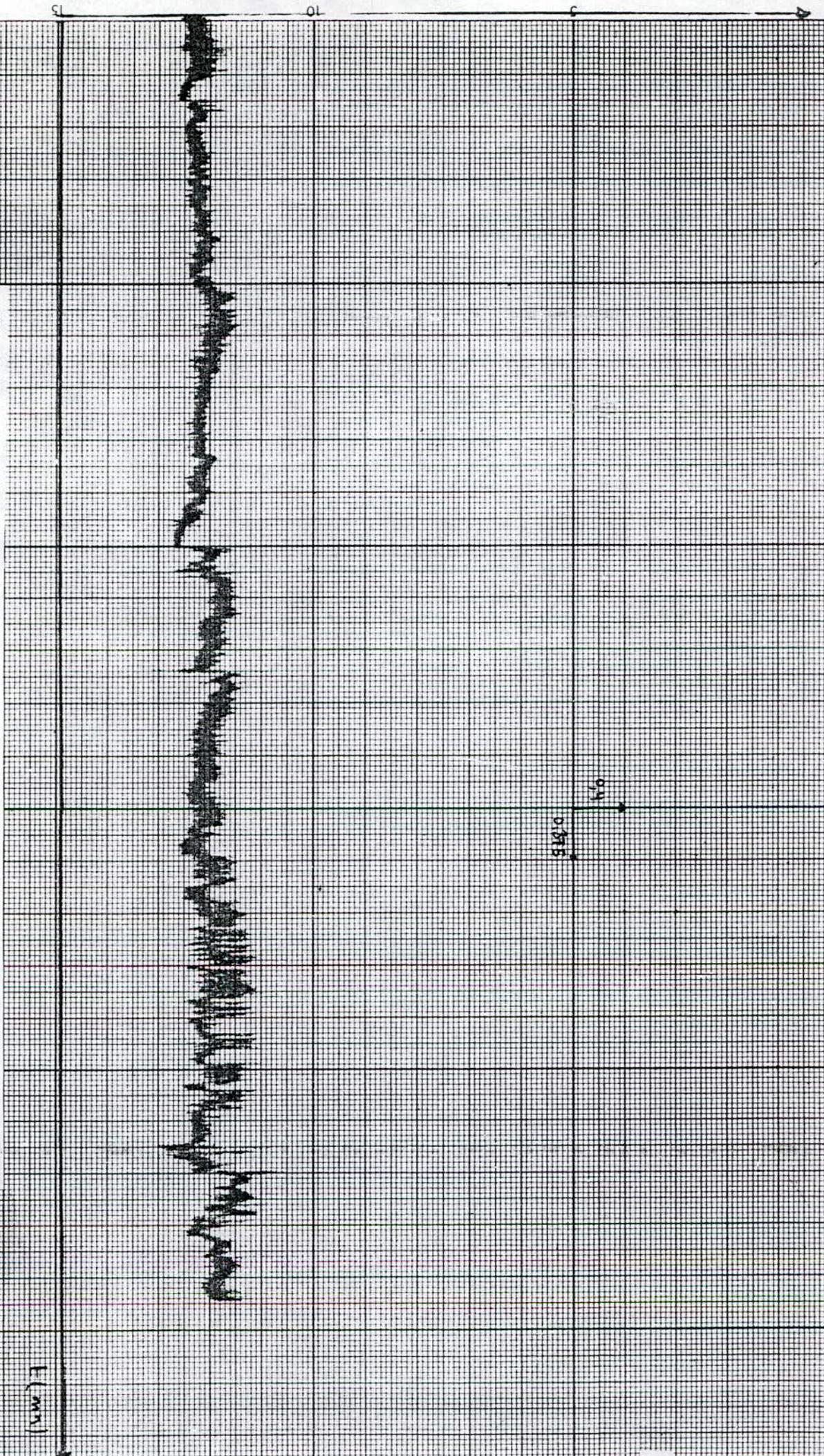


Fig.4.20 : Evolution du moment résistant total en fonction du temps. Refroidissement à l'huile sans post-traitement.

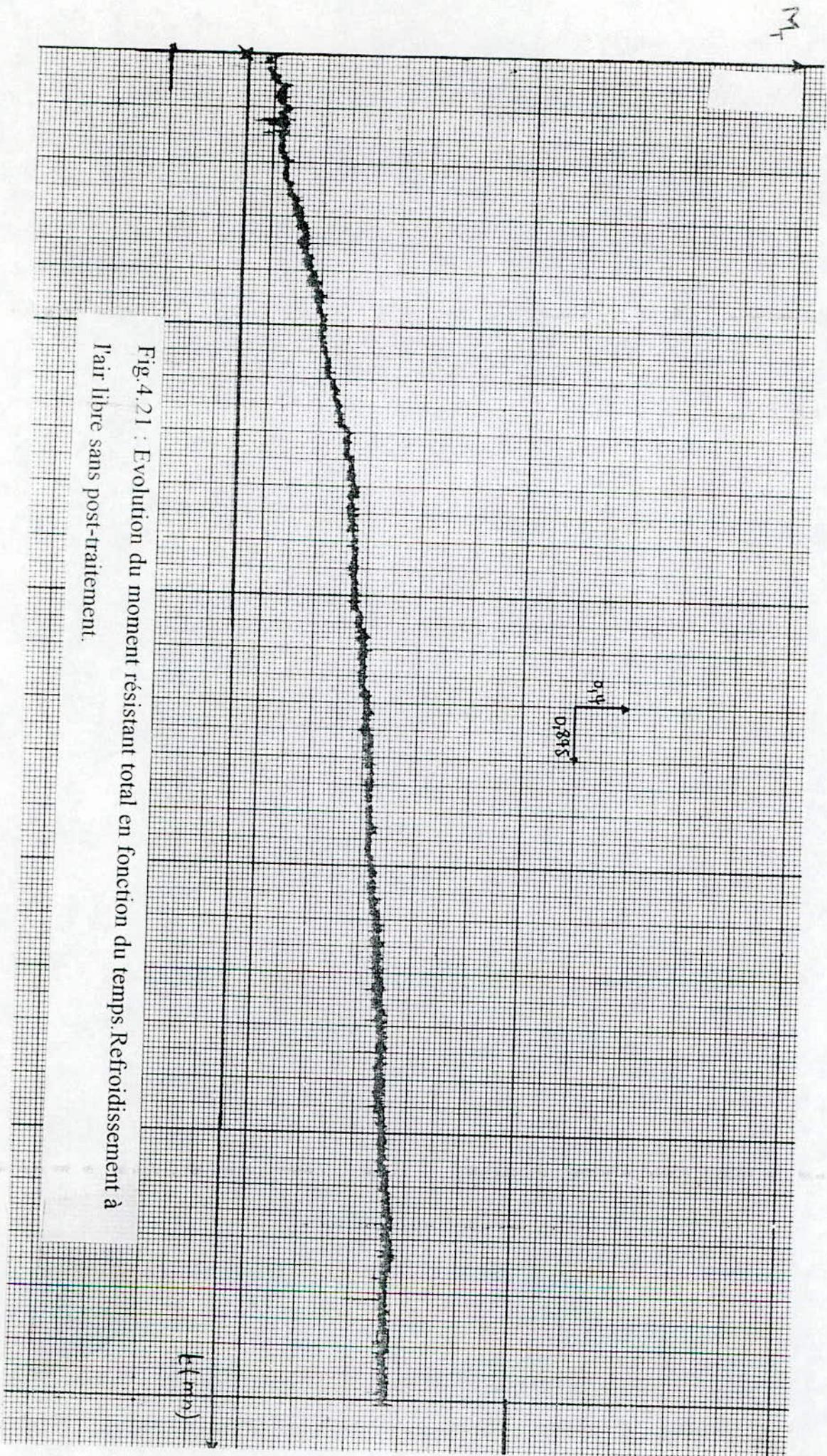


Fig.4.21 : Evolution du moment résistant total en fonction du temps. Refroidissement à l'air libre sans post-traitement.

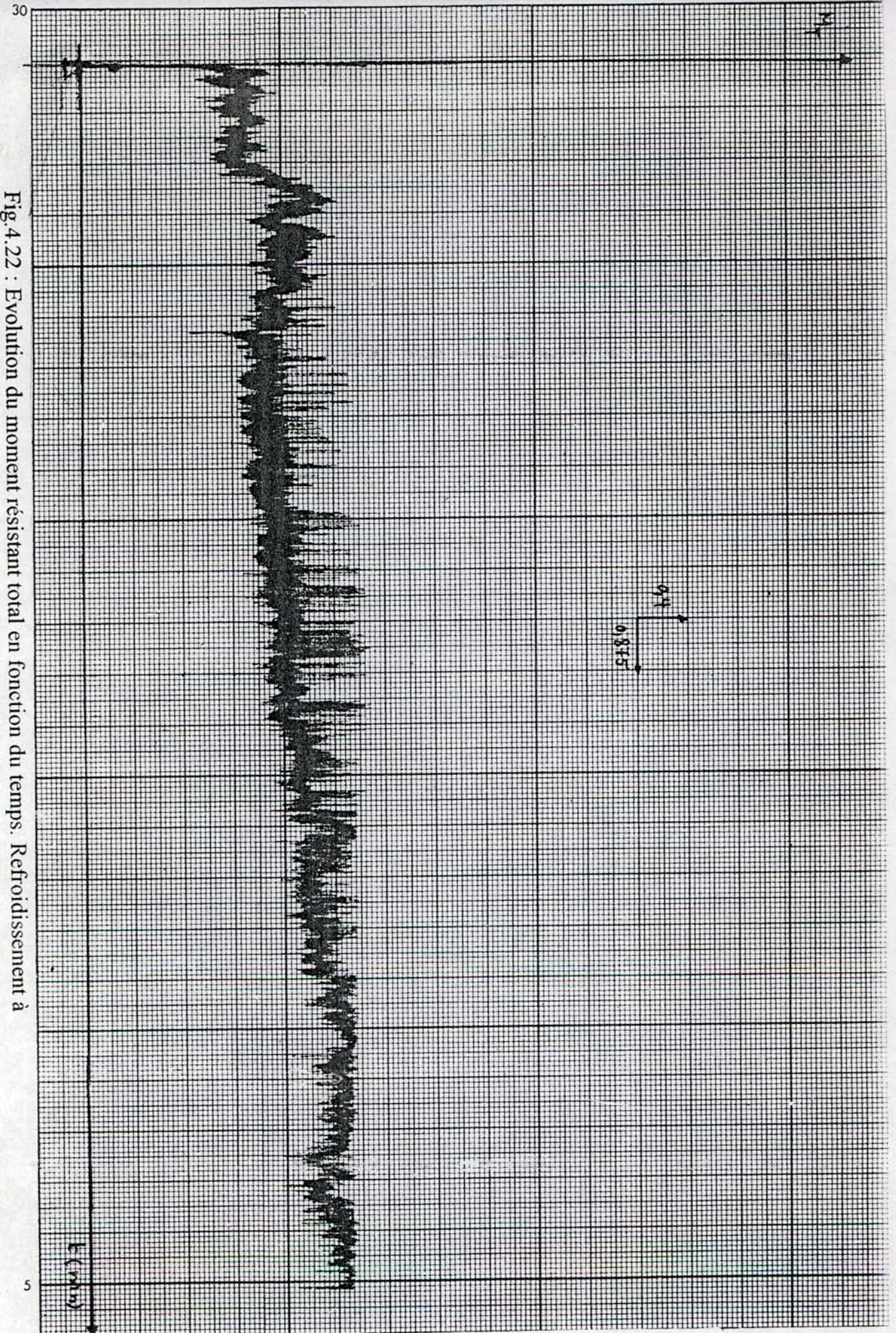


Fig.4.22 : Evolution du moment résistant total en fonction du temps. Refroidissement à l'eau avec post-traitement.

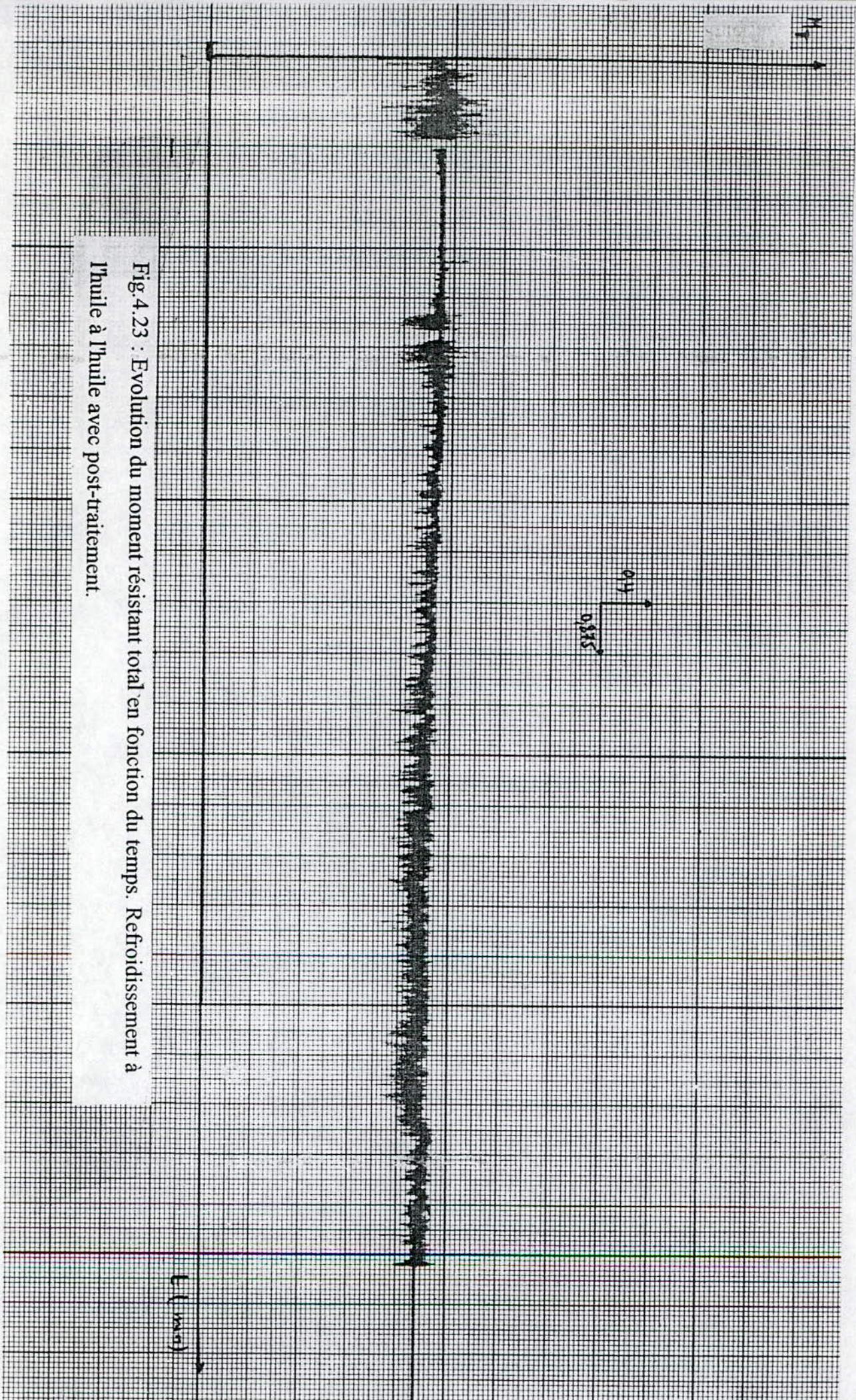


Fig. 4.23 : Evolution du moment résistant total en fonction du temps. Refroidissement à l'huile à l'huile avec post-traitement.

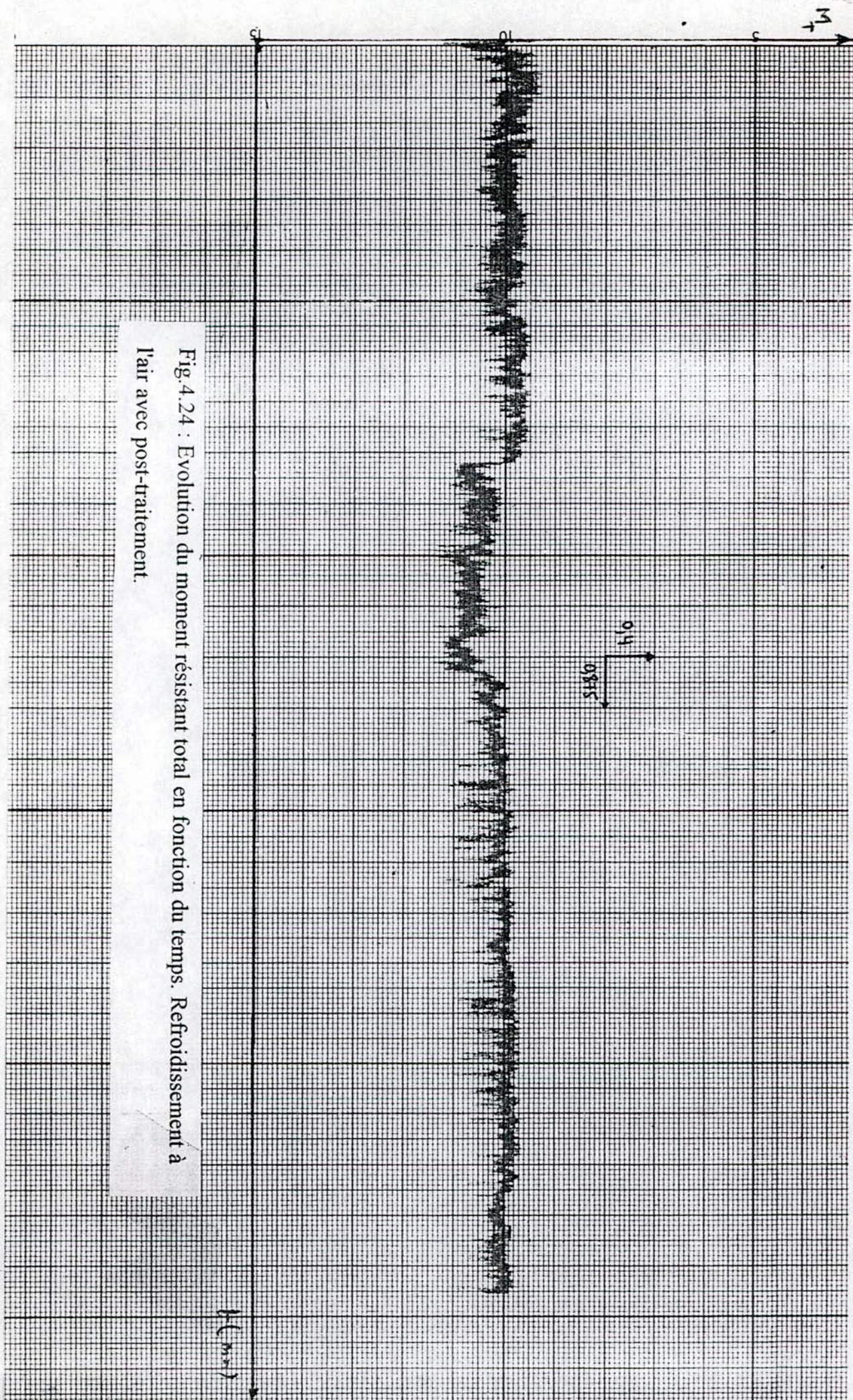


Fig.4.24 : Evolution du moment résistant total en fonction du temps. Refroidissement à l'air avec post-traitement.

CHAPITRE 5
Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE:

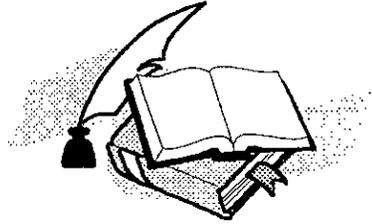
Notre étude comparative consistait de suivre l'influence de la vitesse de refroidissement et du post traitement sur les propriétés mécaniques et l'adhérence des multimatériaux réalisés par projection thermique.

Les analyses thermiques, métallurgiques et mécaniques basées sur l'étude des courbes de refroidissement, la micrographie, la microdureté et l'usure mécanique ont montré que:

1. la vitesse de refroidissement n'a pas d'influence sur les propriétés mécaniques et comportement d'un multimatériau réalisé par projection thermique.
2. Contrairement à la vitesse de refroidissement, les post-traitements ont un intérêt de point de vue propriétés mécaniques pour les pièces mécaniques rechargées à l'arc électrique. En effet le post traitement engendre normalement le processus inter diffusion du couple dépôt/substrat; ce qui conduit à la formation des composés intermétalliques et des carbures au niveau de l'interface et diminue la porosité dans le dépôt de l'interface. Ici des analyses plus poussées (RX, microanalyses ... etc.) s'avèrent indispensables pour confirmer la formation de ces composés qui ne peuvent qu'améliorer la qualité de l'accrochage au niveau des interfaces obtenues à travers l'élaboration du multimatériau étudié.

Nos recommandations sont dans ce sens à s'avoir la caractérisation physico-chimique de la zone interfaciale, pour une meilleure compréhension des différents phénomènes, à savoir entreprendre une même étude sur les revêtements par projection plasma et une étude complémentaire technico-économique sur la métallisation des pièces mécaniques avec post-traitements.

Bibliographie



[1] : **J.BARRALIS - G.MAEDE**

"Précis de métallurgie"

6eme édition

NATHAN 1991

[2] : **D.TREHEUX - A.B.VANNES**

"Traitement de surface et revêtements"

Ecole Centrale de Lyon

[3] : **Mme S.MATHIEU (Sollac)**

"traitement de surface de revêtements"

La revue de métallurgie CIT Janvier 1989

[4] : **L.LACONCELLE**

"Information à l'usage du concepteur"

[5] : "Guide de la projection thermique" 1989

LETM

[6] : **MAURICE DUCOS**

"Revêtement par projection thermique"

Technique de l'ingénieur M5, M1645 1990

[7] : **C.DEHMAS**

"Etude de l'influence des post-traitements sur l'adhérence et le comportement mécanique d'un multimatériau réalisé par projection thermique"

PFE (ENP)

Juillet 1994

[8] : **HERBERT HERMAN**

"les revêtements par projection plasma"

Pour la science N° 133 Novembre 1988

[9] : **Prof.Drs.J.H.ZOOT**

"Général aspects of thermal spraying"

9th international thermal spraying conference. 1980

[10] : **M.RUHLE - A.G.EVANS - F.M.ASHBY et J.P.HIRTH**

"Métal-céramic-interface"

Acta-scripta métallurgica proceeding series 4. Janvier 1989

[11] : **P.MAZARS**

"Démarche pour le choix d'un revêtement"

Galvano-Organo-Traitements de surface technique Sept 89

[12] : **R.LINGUET - G.RODIER et J.ROGER**

"Revêtement céramiques par projection à haute température "

Bulletin de la société française de céramique. E2532

[13] : **PIERRE GUIRALDENQ**

"diffusion dans les matériaux"

Ecole centrale de Lyon

[14] : **YVES QUERE**

"Physique des matériaux"

Edition Marketing. Copyright 1988

[15] : **M.A.AISSAT**

"Etude, réalisation et caractérisation d'un slurry-coating appliquée aux alliages ferreux"

P.F.E (E.N.P). Juillet 1994

[16] : **FEZZOUA**

"Etude du comportement d'un revêtement réalisé par projection thermique pour une pièce mécanique"

P.F.E (E.N.P) Juillet 1993.

