

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DE BLIDA  
INSTITUT DE MECANIQUE  
Option SDM

MEMOIRE DE MAGISTER

Présenté par : **BENIMAM SMIR**  
Ingénieur d'état diplômé de L'INES Mécanique de Blida  
Proposé par : **Dr. N.MESRATI**

*Thème*

**COMPORTEMENT EN FLEXION TROIS POINTS  
D'UN BIMATERIAU Mo/42CrMo4 REALISE PAR  
PROJECTION THERMIQUE**

Présenté devant le jury :

- Mr N.BACHA .....Président.....Maître de conférences.....U.Blida
- Mr M.HADJL .....Examinateur.....Maître de conférences.....U.Blida
- Mr M.LARIBI .....Examinateur .....Chargé de cours.....ENP/Alger
- Mme O.HANNACHE...Examinatrice....Chargée de cours.....U.Blida
- Mr N.MESRATI .....Rapporteur.....Maître de conférences.....ENP/Alger

## REMERCIEMENTS

*J'exprime ma profonde reconnaissance à Monsieur N.MESRATI, Maître de conférence à l'E.N.P, qui a assuré la direction scientifique de cette étude, tout le long de ces deux années de thèse. Je ne serais trop dire combien je lui suis redevable de m'avoir fait bénéficier de sa compétence indispensable à la réalisation de ce mémoire et de m'avoir partager sa passion pour la recherche .*

*Je remercie très sincèrement Monsieur N.BACHA, Maître de conférence à l'université de Blida, pour l'honneur qu'il m'a fait de présider le jury de ma thèse.*

*Je voudrais aussi remercier Monsieur M.HADJI, Maître de conférence à l'université de Blida, d'avoir accepté d'être membre du jury .*

*Je tiens à exprimer ma reconnaissance à Monsieur M.LARJBI, Chargé de cours à l'E.N.P, pour l'intérêt qu'il a montré à l'égard de mon travail, en acceptant de le jurer.*

*Ma gratitude s'adresse également à Madame HANNACHE, Chargé de cours à l'université de Blida, qui a accepté de porter un jugement sur ce travail*

*Je tiens également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*



## DEDICACE

*A la mémoire de mon père*

*Aux êtres qui me sont les plus chers :*

*Ma mère,*

*Pour tous son sacrifice.*

*Ma femme*

*Mon fils*

*Mes frères*

*Mes sœurs*

*A ma famille*

*A mes amis (es).*

*Je dédie ce travail :*

**BENIMAM SAMIR**

# Sommaire

## Première Partie Recherche Bibliographique

### INTRODUCTION GÉNÉRALE

### Chapitre I Projection Thermique

I-1) INTRODUCTION.....	3
I-2 ) PROJECTION THERMIQUE.....	4
I-2-1) PRINCIPE DE LA PROJECTION THERMIQUE .....	4
I-2-2) DIFFÉRENTS PROCÉDÉS DE LA PROJECTION THERMIQUE .....	4
I-2-2-1) Projection flamme .....	4
II-2-2-2) Projection thermique à l'arc électrique .....	12
I-3) MATÉRIAUX UTILISÉS ET CARACTÉRISTIQUES DES MATÉRIAUX PROJETÉS ..15	
I-3-1) MATÉRIAUX UTILISÉS .....	15
I-3-2) CARACTÉRISTIQUES DES MATÉRIAUX PROJETÉS .....	17
I-3-2-1) Structure.....	17
I-3-2-2) Adhérence .....	19
I-3-2-3) Densité .....	20
I-3-2-4) Dureté .....	20
I-4) PRÉPARATION DES SURFACES.....	21
I-4-1) GÉNÉRALITÉS .....	21
I-4-2) PROPRIÉTÉS DE LA SURFACE .....	21
I-4-3) RUGOSITÉ .....	22
I-5) PARAMÈTRES DE PROJECTIONS .....	23



## Chapitre II

### Notion de la mécanique de la rupture

<b>II-1) INTRODUCTION .....</b>	<b>25</b>
<b>II-2) RAPPELS DE LA MÉCANIQUE DE LA RUPTURE.....</b>	<b>25</b>
II-2-1) LE BUT DE LA MÉCANIQUE DE LA RUPTURE .....	25
II-2-2) NOTIONS DE MÉCANIQUE DE LA RUPTURE .....	26
II-2-2-1) Modes de rupture .....	26
II-2-2-2) Facteur d'intensité de contrainte K .....	29
II-2-2-3) Taux de restitution d'énergie G .....	31
<b>II-3) MÉCANIQUE DE LA RUPTURE ÉLASTO-PLASTIQUE .....</b>	<b>32</b>
II-3-1) ÉCARTEMENT EN FOND DE FISSURE (crack opening displacement COD) .....	33
II-3-2) INTÉGRALE DE CONTOUR J.....	34
II-3-3) COURBE R .....	36
II-3-4) ÉNERGIE ÉQUIVALENTE .....	37
<b>II-4) CONSTANTES ÉLASTIQUES D'UN BIMATÉRIAU .....</b>	<b>39</b>
II-4-1) MODULE D'ÉLASTICITÉ SUIVANT LE SENS TRAVERS $E_t$ .....	39
II-4-2) MODULE D'ÉLASTICITÉ SUIVANT LE SENS TRAVERS $G_{lt}$ .....	40
II-4-3) LE COEFFICIENT DE POISSON $\nu_{lt}$ .....	41
<b>II-5) MESURE DES LONGUEURS DE FISSURE .....</b>	<b>41</b>
II-5-1) MÉTHODE OPTIQUE .....	41
II-5-2) MÉTHODE DES FILAMENTS BRISÉS .....	41
II-5-3) MÉTHODE DU RESSUAGE.....	42

*Deuxième partie*  
*Procédures expérimentales*

*Chapitre III*  
*Procédures expérimentales et résultats*

<b>III -1) ELABORATION DES ÉCHANTILLONS PAR PROJECTION THERMIQUE .....</b>	<b>43</b>
III-1-1) INTRODUCTION : .....	43
III-1-2) MATÉRIAUX ÉTUDIÉS : .....	43
III-1-2-1) Le substrat : .....	43
III-1-2-2) Le revêtement : .....	45
III-1-3) MISE EN ŒUVRE DE LA PROJECTION THERMIQUE .....	46
III-1-3-1) Préparation de la surface à revêtir .....	46
III-1-3-2) Paramètres de projection .....	47
III-1-3-3) Métallisation .....	47
<b>III-2 ) CARACTÉRISATIONS PHYSICO-CHIMIQUES DES BIMATÉRIAUX : .....</b>	<b>49</b>
III-2-1 )INTRODUCTION : .....	49
III-2-2) OBSERVATION AU M.O .....	49
III-2-2-1) Préparation des échantillons : .....	49
III-2-2-2) Résultats .....	53
<b>III-3 ) ANALYSES MÉCANIQUES.....</b>	<b>53</b>
III-3-1) ESSAI DE MICRO DURETÉ .....	53
III-3-2) TEST D'ARRACHEMENT .....	55
<b>III-4) FLEXION TROIS POINTS MONOTONE : .....</b>	<b>56</b>
III-4-1) INTRODUCTION .....	56
III-4-2) MÉTHODOLOGIE D'ESSAI : .....	56
<b>III-5) CARACTÉRISATION ET RUPTURE DE L'INTERFACE MO/42CD4 .....</b>	<b>58</b>
<b>III-6- CALCUL DU FACTEUR D'INTENSITÉ DE CONTRAINTE : .....</b>	<b>60</b>
<b>CONCLUSION GÉNÉRALE.....</b>	<b>65</b>
<b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>	<b>67</b>



*Introduction  
générale*

## *Introduction Générale*

La métallurgie est une science appliquée par excellence, elle a su intégrer les possibilités des technologies de pointe afin d'élaborer des matériaux sans cesse plus performants et adaptés à des domaines d'emploi de plus en plus spécifique.

Les pièces mécaniques qui subissent des efforts extérieurs permanents où elles perdent leurs propriétés superficielles, sont considérées comme un problème nécessitant une résolution rapide. Aussi, la pénurie des pièces de rechange nous incite à étudier la possibilité d'effectuer des revêtements métalliques sur des pièces usées surtout mécaniques ( arbre, vilebrequins...) remises ainsi à la côte d'origine et récupérées. Souvent, les propriétés particulières pour des fins de protection du revêtement s'avèrent intéressantes notamment dans le cas du frottement-usure, fatigue et la fissuration.

De ce fait, de nombreux traitements de surface ont été mis au point et utilisés industriellement pour faire face à ces exigences. Parmi ces traitements, la projection thermique revêt, dans le cadre des matériaux, une importance primordiale. Cette technique a un intérêt particulier dans l'élaboration des multimatériaux et la rénovation des pièces usées en procurant ainsi à l'ensemble des propriétés et des qualités insoupçonnées et extraordinaires.

Malgré les caractéristiques particulières en surface, les pièces réalisées peuvent présenter en service certaines défaillances dues aux sollicitations généralement complexes auxquelles elles sont soumises. Parmi les problèmes rencontrés, figure l'adhérence et la fissuration à l'interface.

Notre étude consiste d'une part, à étudier le rechargement par projection thermique, à l'aide d'un chalumeau oxy-acétylénique, d'un acier de nuance 42CD4 très utilisé dans



l'industrie mécanique ainsi que l'adhérence du dépôt Molybdène projeté thermiquement et d'autre part, à calculer le facteur d'intensité de contrainte du matériau composite résultant. Ceci 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 adhérence du revêtement.

Afin de rendre notre travail plus compréhensif, nous avons jugé judicieux de le composer en deux grandes parties essentielles.

La première concerne une étude bibliographique permettant de présenter le principe de la projection thermique en développant succinctement les équipements qui la compose et les différentes étapes à suivre afin de bien mener l'opération de projection (préparation de la surface, paramètres de projection à respecter...)

Aussi nous présentons quelques approches originales de la mécanique élasto-plastique de la rupture. Et leur application sur les multimatériaux.

La deuxième partie, traite de l'étude expérimentale où l'on présente les matériaux utilisés (substrat et revêtement), la technique de projection et la caractérisation physico-chimique et mécanique des multimatériaux. De même, on donne une méthode expérimentale pour calculer le facteur d'intensité de contrainte.

Cette thèse est clôturée par une conclusion générale émanant des différentes expériences et des conditions opératoires.

Première Partie  
Recherche  
Bibliographique

Chapitre I  
Projection Thermique



## *Chapitre I*

# *Projection thermique*

### **I-1) INTRODUCTION**

C'est en 1909 qu'un ingénieur suisse de Zurich, le docteur Schoop observa l'incrustation de plomb suite à un tir d'une balle contre un mur en ciment. Ce dernier eut l'idée d'obtenir des revêtements métalliques par projection, il a tout d'abord déposé des matériaux à bas point de fusion comme le plomb, en pulvérisant, à l'aide d'un fluide chauffé, du métal fondu, mais les difficultés étaient considérables. L'appareil utilisé était intransportable et souvent le métal se refroidissait au cours de la pulvérisation et n'était plus dans l'état physique voulu pour former un revêtement lors de son impact. Pour cela il a amélioré le procédé en projetant le métal sous forme de poudre, à travers une flamme, malheureusement, il n'était pas facile d'obtenir un revêtement et un débit de poudre régulier, c'est pourquoi dès 1913, le docteur Schoop remplaça la poudre par un fil métallique entraîné par deux molettes.

A titre d'exemple, nous citons les deux applications de cette technique :

- Pendant la guerre de 1914, la projection d'étain sur la face arrière des obus de 75mm a permis le désencuvrage systématique, coup par coup, des canons de 75.
- A la fin de la guerre (1914-1918), le succès de la vente des bustes d'alsaciennes a conduit au (schoopage) en bronze de bustes montés en plâtre.

## **I-2 ) PROJECTION THERMIQUE**

### **I-2-1) PRINCIPE DE LA PROJECTION THERMIQUE**

Les projections thermiques sont des procédés particuliers de dépôt où les particules solides sont injectées dans un gaz à haute température, elles y sont chauffées, fondues, accélérées, et projetées à grande vitesse sur le substrat où elles forment un dépôt de gouttelettes étalées.

Le processus est dit «froid » c'est à dire que le substrat est chauffé à des températures très inférieures à celles atteintes par les particules projetées. Les particules subissent des transformations physiques, elles sont fondues puis refroidies à des vitesses de refroidissements élevées. Le revêtement est construit particule par particule et a une structure lamellaire.

Les propriétés du revêtement dépendent du matériau du départ, des microstructures obtenues, des contraintes résiduelles produites lors de la projection et de la porosité du dépôt. Cependant le système revêtement / substrat est un matériau composite dont les propriétés dépendent aussi de la structure et des propriétés des interfaces présentes.

### **I-2-2) DIFFÉRENTS PROCÉDÉS DE LA PROJECTION THERMIQUE**

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

#### **I-2-2-1) PROJECTION FLAMME**

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



Les matériaux qui ne 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 forme de cordons, de baguettes ou de poudres.

### I-2-2-1-1) Matériels flamme pour fils, cordons ou baguettes

Ce matériel peut être soit manuel, soit automatisé. Les débits des fluides nécessaires à une telle installation sont les suivants :

Gaz combustibles (acétylène, propane, hydrogène ou gaz naturel) débit entre 600 et 1500L/h pour des pressions de 0.5 à 1.2 bars pour l'acétylène et 0.5 à 3 bars pour le propane.

Gaz comburant (oxygène) : débit compris entre 1500 et 1800 L/h pour des pressions de 1.2 à 3.6 bars.

Air comprimé : il est filtré pour éviter la présence d'eau, l'huile et de saletés, selon le matériel de projection utilisé (moteur à air ou moteur électrique), il fourni entre 3.8 et 5 bars de pression pour les débits de 15 à 35 m<sup>3</sup>/h.

La figure 1 représente un pistolet d'un chalumeau oxyacétylénique .

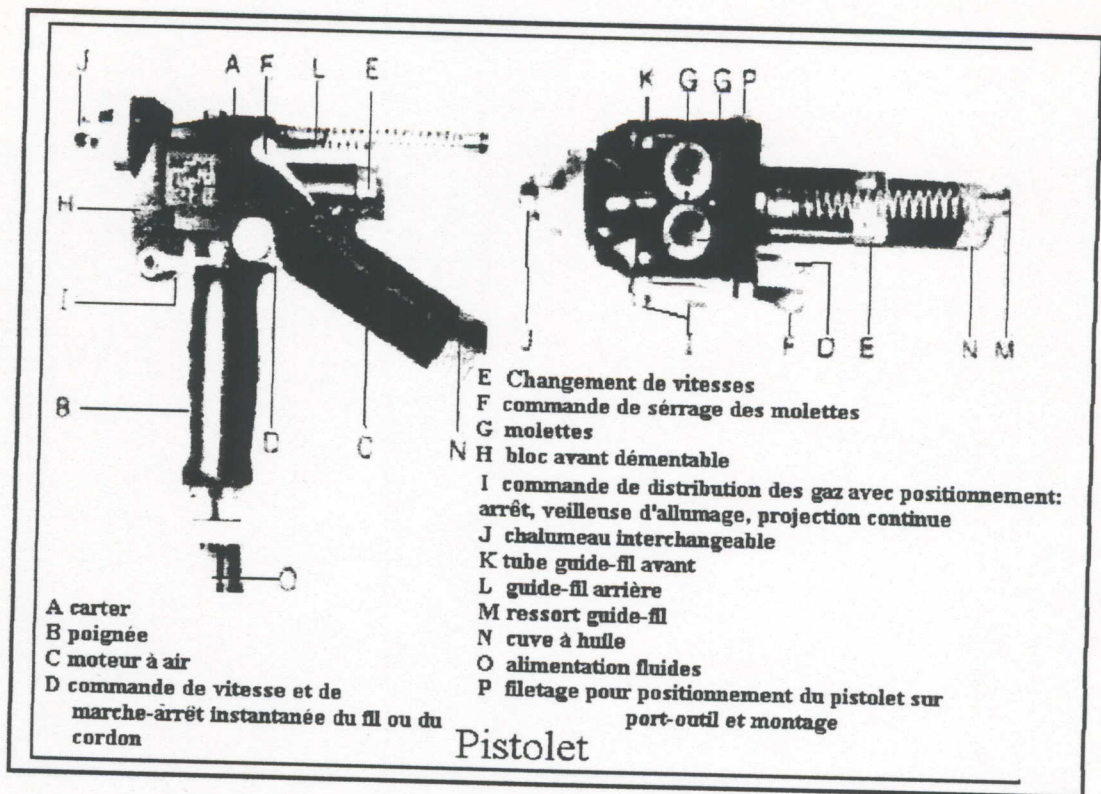


Figure 1- Pistolet fil pour chalumeau oxyacétylénique [1]

Ces pistolets fils se composent de deux parties : une partie gaz et une partie entraînement du fil (figure 2).

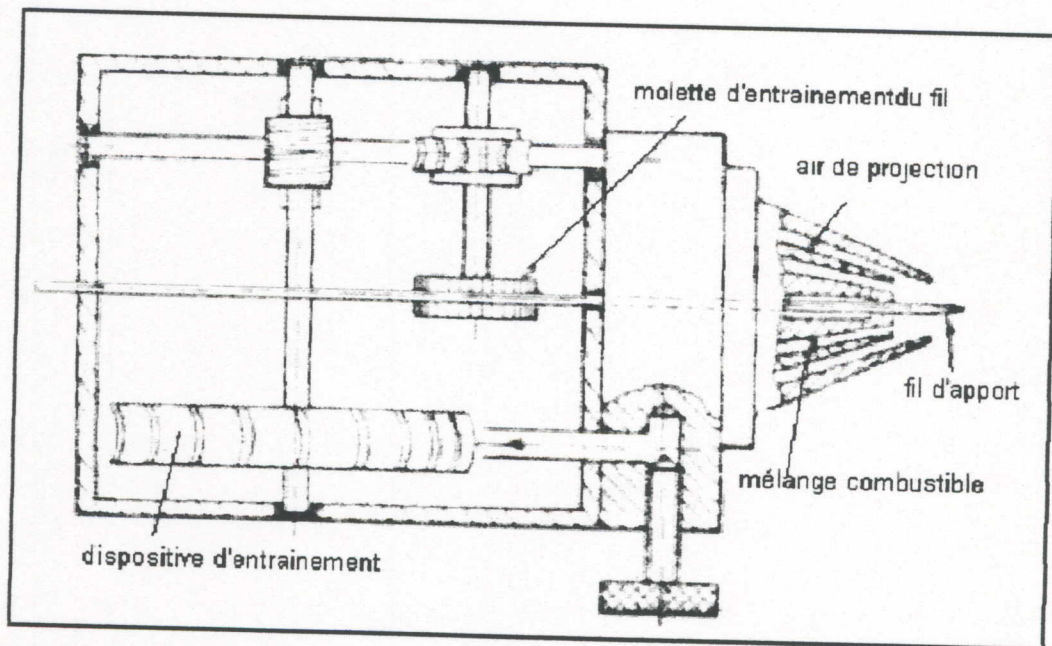


Figure 2 :Schéma simplifié d'un pistolet à fil à entraînement par turbine à air[1]



La partie gaz comprend un mélangeur, une buse à gaz annulaire et une buse à air. Le matériau à projeter passe à travers l'ensemble de ces trois pièces et, après avoir été fondu par les flammes sortant des trous de la buse à gaz, il est pris en charge par l'air comprimé qui propulse sur le substrat le matériau fondu, après l'avoir dispersé en fines particules.

Les matériaux sont entraînés dans le chalumeau par deux molettes exerçant une pression suffisante pour les pousser. Ces molettes sont mises en rotation par des ensembles mécaniques simples entraînés par des turbines, des moteurs à air ou des moteurs électriques.

### **I-2-2-1-2) Matériels flamme-poudre**

Dans ce groupe nous trouvons trois types de matériels :

- Les torches à gaz.
- Les pistolets à poudre subsoniques.
- Les pistolets à poudre hypersoniques.

Les installations nécessaires sont peu différentes de celles décrites précédemment, elles sont en générale très simples mais elles peuvent nécessiter un automatisme très poussé.

Les gaz employés sont les mêmes que ceux décrits au paragraphe précédent, à l'exception de l'air comprimé qui est facultative.

#### **a) Torche à gaz**

Il s'agit de chalumeaux oxy-gaz (en générale oxyacétylénique) utilisés en soudure autogène, équipé d'un petit récipient contenant de la poudre. Celle-ci tombe par gravité dans la canalisation d'un gaz de combustion et est

entraînée par celui-ci jusqu'à la buse pour être introduite dans la flamme qu'elle traverse à faible vitesse avant d'arriver au support à recharger.

La distance de la buse au support est très faible (quelques millimètres), ce qui permet à la flamme d'assurer la fusion de la poudre et le chauffage du support.

La poudre arrive ainsi au substrat chaud mais non fondu, et une liaison de type brasure est assurée entre le métal d'apport et le métal de base.

Les matériaux d'apports sont uniquement des alliages dits auto-fusibles à base de nickel ou de cobalt avec des éléments d'additions tel que le chrome, tungstène, bore, silicium, etc.

Dans ces alliages, il est possible d'introduire des carbures de tungstène (jusqu'à 60% en masse) pour répondre à des applications exigeant un matériau résistant à l'usure.

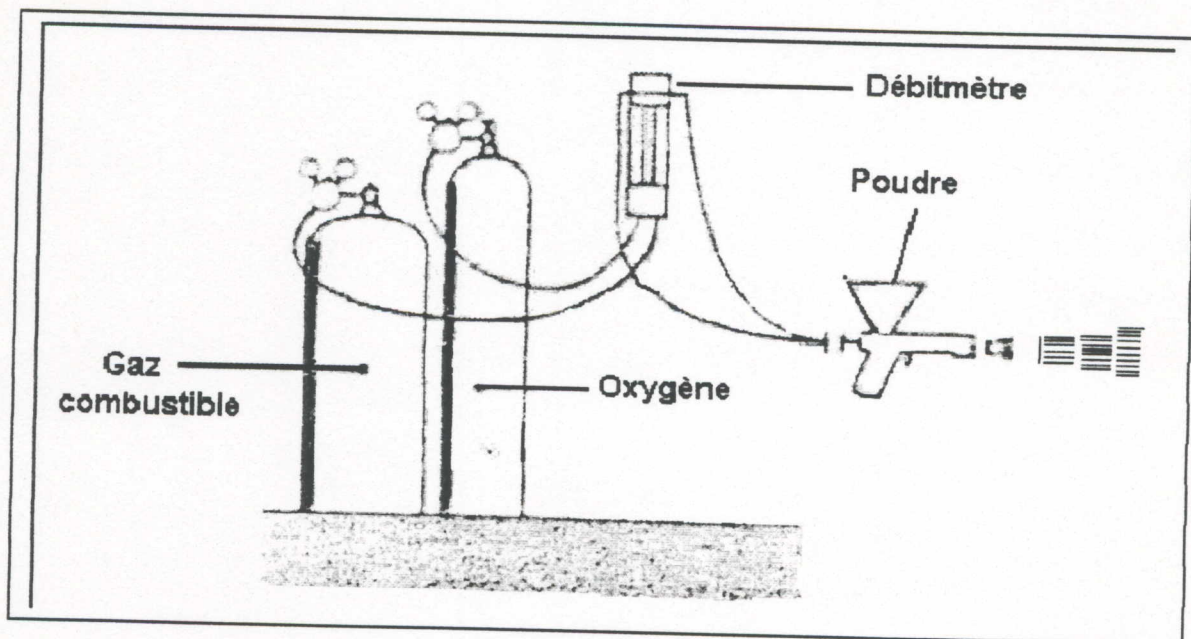


Figure 3: Installation d'un pistolet oxygène-gaz à poudre



### b) Pistolets à poudre subsoniques

Ces pistolets utilisent généralement un mélange oxy-acétylénique. La poudre est stockée dans un réservoir qui peut être intégré au pistolet ou indépendant, et dans ce cas relié au pistolet par un tuyau flexible. La poudre est donc entraînée jusque dans la flamme par sa mise en suspension dans l'un des gaz (fig 4).

Les dépôts obtenus avec ce matériel présentent, en général, une adhérence moyenne, une faible cohésion des particules, entre elles, et une porosité élevée, à cause de la faible vitesse des particules. Le transport de poudre peut aussi se faire avec un jet d'air comprimé ou bien avec un des gaz neutres. Ces améliorations arrivent à augmenter les qualités des dépôts réalisés avec ce type de matériel.

Leur utilisation est centrée sur les matériaux de type auto-fusibles, ou des auto-adhérents.

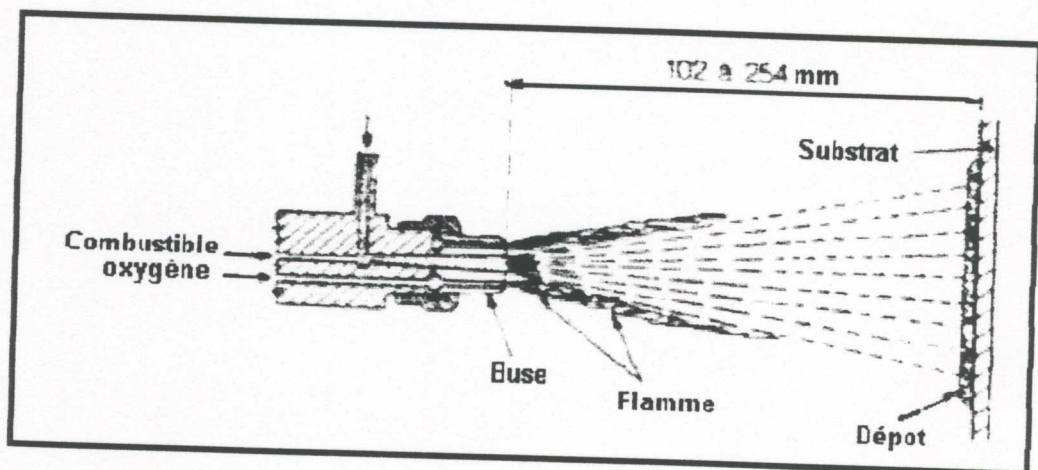


Figure 4: Pistolet à poudre subsonique[1].

Ce matériel est apprécié pour son faible degré de nuisance (faible niveau de bruit) et nécessite peu d'investissement.

On le trouve dans toutes les industries pour résoudre les problèmes de réparation et quelques fois traiter des pièces neuves, sollicitées en abrasion, corrosion, usure, isolation thermique ou électrique.

### **c) Pistolet à poudre hypersonique**

Ce type de matériel peut se diviser en deux catégories :

pistolet à tir discontinu ou pistolet à tire continu.

#### **● Pistolet à tire discontinu**

Sont appelés aussi canons à détonation. Le principe a été mis au point par FELLER et BAIKER [4]. La technique de projection consiste à introduire la poudre à projeter et les gaz oxygène acétylène dans un tube appelé « canon » de 25mm de diamètre et de 1m de longueur, et d'allumer le mélange au moyen d'une étincelle. Cette opération est répétée environ 8 fois par seconde, entre chaque allumage un balayage est pratiqué avec un gaz neutre (Azote). Ce pistolet ( figure 5) est un de ceux qui donnent les meilleurs revêtements du point de vue porosité et adhérence du dépôt [1].

Les matériaux les plus souvent utilisés, sont des carbures de chrome plus nickel chrome, du carbure de chrome, du carbure de tungstène plus cobalt, et de l'alumine etc.



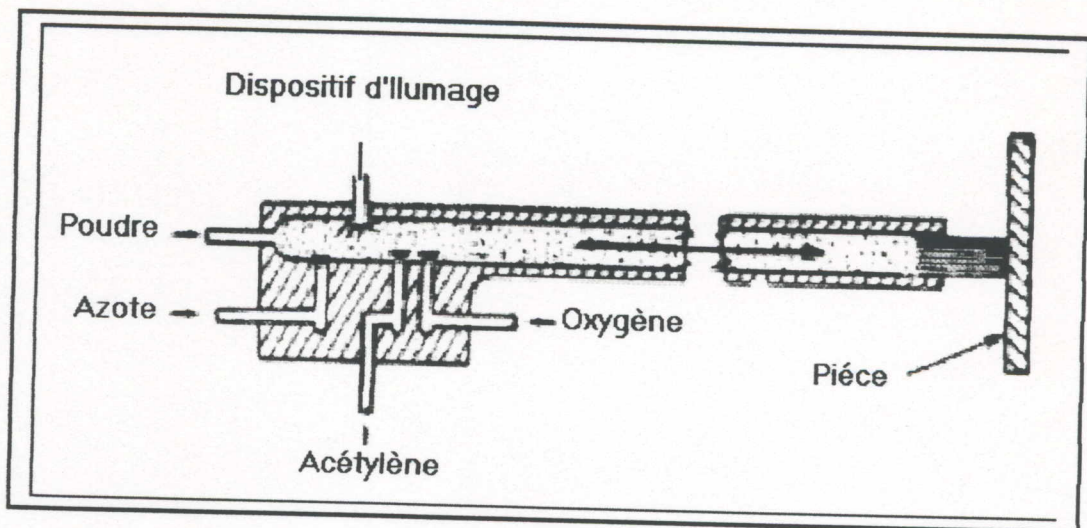


Figure 5: Pistolet à tir discontinu.[1]

● Pistolet à tir continu hypersonique

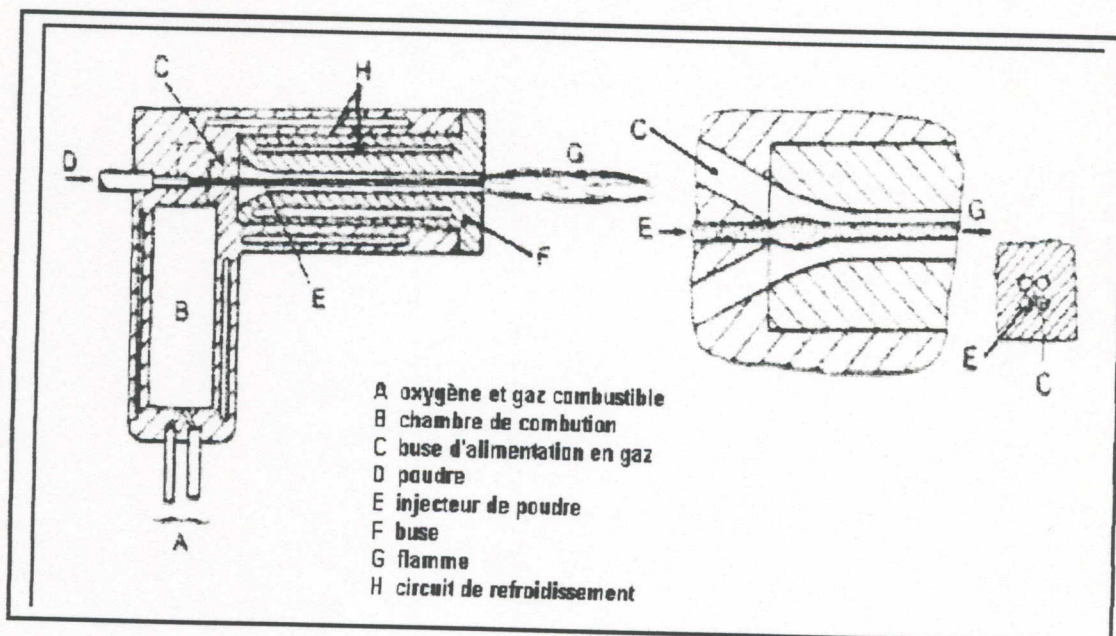


Figure 6: Pistolet à tir continu[1].



Ces équipements ont été mis au point par une société américaine (Browning Engineering Corporation), leur application peut être manuelle ou automatique (figure 6).

Ils utilisent comme principe de base un jet à combustion interne (Rocket), qui donne des vitesses de gaz hypersonique (plus de huit fois la vitesse de son). La poudre introduite dans le gaz d'échappement de la Rocket est concentrée pour être conduite à l'intérieur de la buse qui peut atteindre 300 mm de long. Celle-ci est refroidie par l'eau. Dans ce type de pistolet, on peut utiliser, comme gaz de combustion, des mélanges tels que méthylèneacétylène-propane.

Cet appareil peut projeter des carbures, des oxydes métalliques, des alliages et des métaux. Les dépôts réalisés sont très adhérents et très denses.

#### II-2-2-2) PROJECTION THERMIQUE À L'ARC ÉLECTRIQUE

L'arc électrique est une source d'énergie qui permet à la projection thermique d'augmenter de façon notable sa panoplie de procédés. On trouve deux types de matériels qui utilisent cette énergie :

- Le pistolet à arc électrique entre deux fils.
- Le pistolet plasma.

##### a) Pistolet à arc électrique entre deux fils

Son principe consiste à faire jaillir un arc électrique entre deux fils consommables. Le métal fondu dans l'arc étant en suite projeté sur le support à revêtir par un jet d'air comprimé (figure 7).

Ce pistolet est alimenté par des générateurs de courants continus. Les tensions à l'arc sont comprises entre 25 et 40 V et les intensités entre 100 et 400 A pour des fils de 1.5 à 2 mm de diamètre. L'air comprimé nécessaire à la projection doit être propre et sec avec un



débit d'environ 25 m<sup>3</sup>/h pour une pression d'utilisation de 5 bars. Ces pistolets sont constitués de deux parties, d'ailleurs comme les pistolets fils-flamme : une partie entraînement des fils et une partie fusion et propulsion du métal d'apport.

L'entraînement des fils est assuré par des molettes enserrant et poussant chaque fil. Ces molettes sont mises en rotation soit par des moteurs à air, soit par des moteurs électriques. L'écartement des fils au niveau de l'arc électrique est tenu constant pour éviter les fluctuations de l'arc, qui font varier la dimension des particules projetées. Une console de contrôle permet d'assurer le suivi des paramètres de projection.

Ce pistolet permet de projeter des quantités de métal plus importantes comparativement aux pistolets fils-flamme. Les principaux métaux d'apports projetés sont : le zinc, l'aluminium, le cuivre et certains aciers (à 0.2%C) .

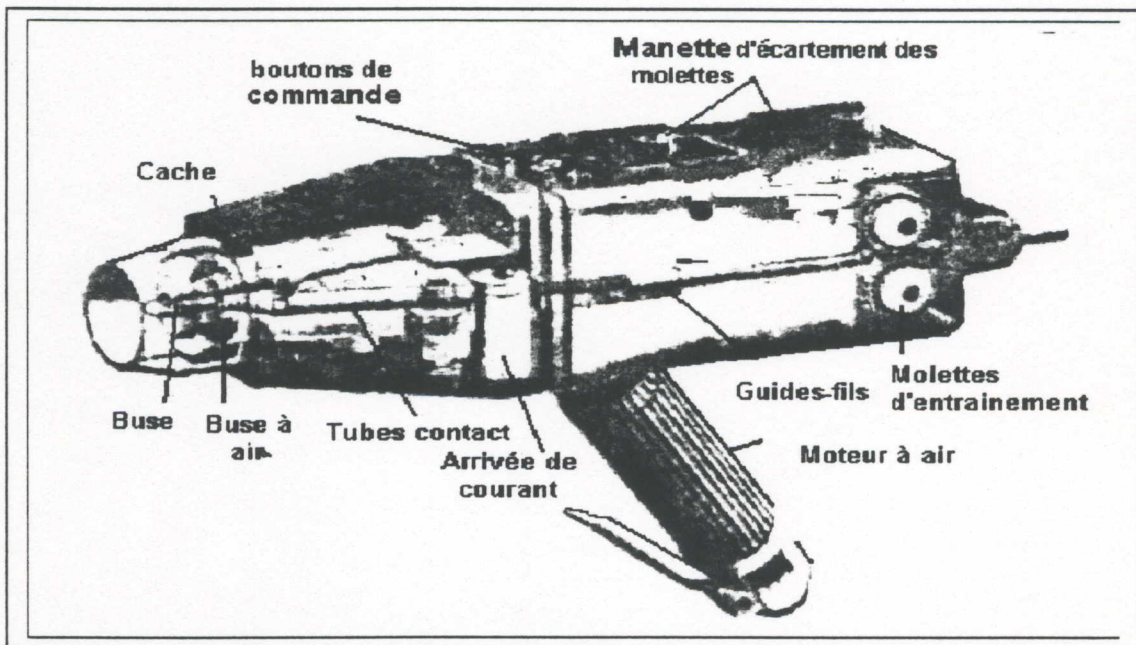


Figure 7: Pistolet à arc électrique[1]

#### b) Pistolet plasma

Le procédé de projection au plasma utilise comme source thermique un arc électrique éclatant dans une buse (Figure 8 ). Cet arc porte un flux d'un gaz inerte (très souvent l'argon, l'azote ou l'hélium) à une température très élevée. Il se présente des températures de l'ordre de 20000°C conduisant ainsi à la fusion des gaz



moléculaires et à l'ionisation partielle des atomes. Ces hautes températures provoquent une forte augmentation de volume du gaz qui s'échappe de la buse élevée. La vitesse d'écoulement du jet de plasma des installations modernes de projection atteint plusieurs fois la vitesse du son. C'est à l'intérieur de ce jet de plasma à haute énergie qu'on injecte au moyen d'un gaz porteur, la matière de revêtement pulvérulente. Les particules sont projetées sur le matériau de base prétraité. Ce procédé de plasma permet de réaliser des revêtements d'excellentes qualités en utilisant comme matériau de projection presque toutes les matières fusibles qui ne se distinguent pas et dont la granulométrie (configuration, taille, répartition granulométrique) est adéquate. La projection plasma a acquis une grande importance, tant sur le plan technique qu'économique, comme système permettant la réalisation des surfaces fonctionnelles [8].

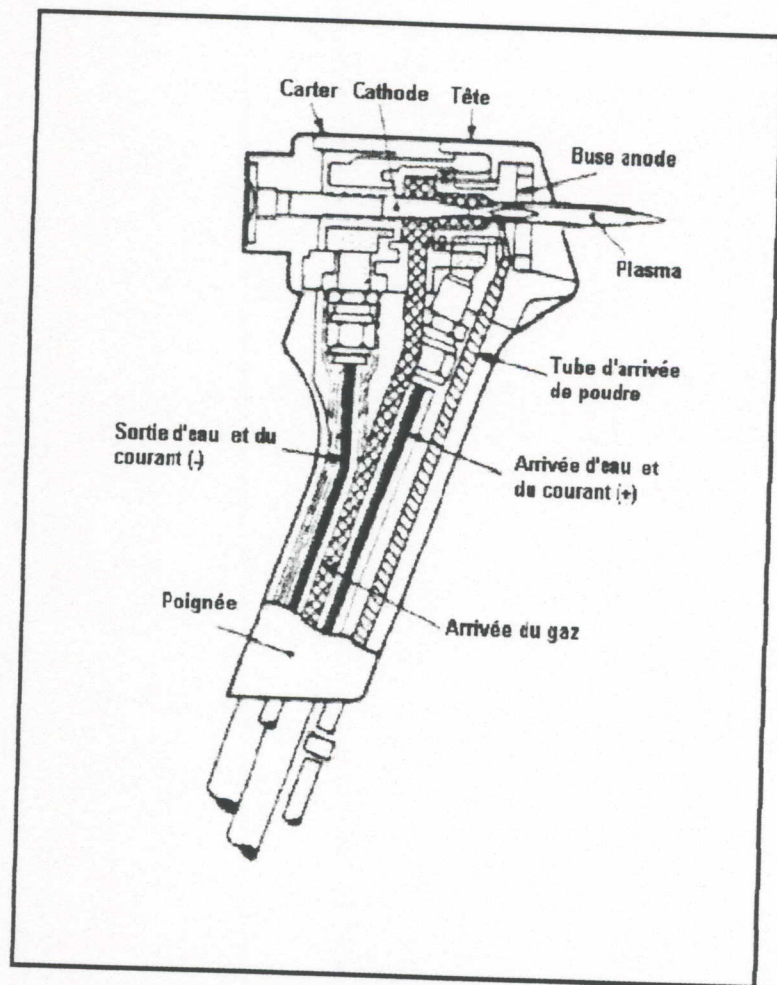


Figure 8 : Coupe d'une torche à plasma[1].



### I-3) MATÉRIAUX UTILISÉS ET CARACTÉRISTIQUES DES MATÉRIAUX PROJETÉS

#### I-3-1) MATÉRIAUX UTILISÉS

Les matériaux utilisés lors de la projection thermique sont très nombreux et leur nombre augmente en fonction d'application nouvelle.

Nous pouvons les classer de la façon suivante :

- Les aciers alliés et non alliés.
- Les alliages de base cobalt.
- Les aciers base nickel.
- Les aciers base cuivre.
- Les alliages de zinc.
- Les carbures.
- Les oxydes.
- Les auto-adhérents (alliages base Ni-Al).
- Les nitrures.
- Les siliciures.
- Les matériaux abrasables (type Ni- Graphite)
- Les matériaux antifriction.
- Les alliages MCRALY (M= Ni, Co, Fe ou une combinaison de deux ou trois d'entre eux), CR = chrome, Al = aluminium, Y = Yttrium)
- 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 des procédés employés pour les projeter.

Les principales formes commercialisées sont :

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

Les fils nus massifs sont les matériaux réservés aux matériels flamme et arc : Ils largement diffusés dans les catégories métaux purs et les aciers. Ces types de produits sont définis par leur diamètre et leur composition.

Les poudres quant à elles, sont tenues à répondre à des critères plus nombreux que les fils :

- Composition.
- Dimension des particules et leur répartition granulométrie.
- Forme des particules : sphériques, lamellaires, cubiques...
- Type d'élaboration : électrofondues, frittées, agglomérées, mélangées, enrobées, composites.
- Coulabilité.
- Densité : tasse ou non tasse.

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

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

Par contre, les baguettes obtenues par frittage, permettent de conditionner des matériaux non tréfilables pour alimenter de façon discontinue des pistolets à fils.

Tous ces produits sont utilisés suivant leur besoin et leur type de projection thermique [1-3].



### I-3-2) CARACTÉRISTIQUES DES MATÉRIAUX PROJETÉS

Les caractéristiques essentielles des matériaux projetés [2],[3],[5],[11] sont :

- la structure.
- l'adhérence.
- la densité.
- la dureté.

#### I-3-2-1) STRUCTURE

Lors du contact avec le substrat, les particules sphériques, grâce à leur énergie cinétique élevée, se déforment en forme de cylindre. Cette déformation a été modélisée par **Madesjski** par la formule suivante, obtenue en négligeant les tensions de surface et que la goutte liquide s'aplatit avant de se solidifier [1] :

$$\frac{D}{d} = 1.29 \frac{(\rho v d)^{0.2}}{\mu} \quad (\text{I-I})$$

Où : D : diamètre moyen de la particule.

d : diamètre initial de la particule.

$\rho$  : densité du liquide.

$\mu$  : viscosité du liquide.

v : vitesse d'impact de la particule.

Pour réaliser la fusion des particules dans le jet de gaz chauds, il faut prendre en compte de nombreux variables du matériau tels 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'équation suivante :

$$\frac{S (K \Delta T)^2}{v \mu} \geq \frac{(LD)^2}{16 \rho} \quad (\text{I-2})$$

(Jet)                      ( Particule)

Où : S : distance de projection

K : conductivité thermique de la couche.

v : vitesse de jet de gaz.

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

$\mu$  : viscosité de 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'équation (I-2), 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 des gaz, l'énergie (conductivité thermique) et la distance de projection.

Il a été constaté par ces essais de modélisation que suivant les paramètres de projection et la nature du matériau, les caractéristiques des dépôts doivent changer. Nous pouvons facilement vérifier la bonne fusion de la particule en plaçant une lame de verre devant le jet afin d'examiner la façon dont la particule s'est écrasée (figure 9).



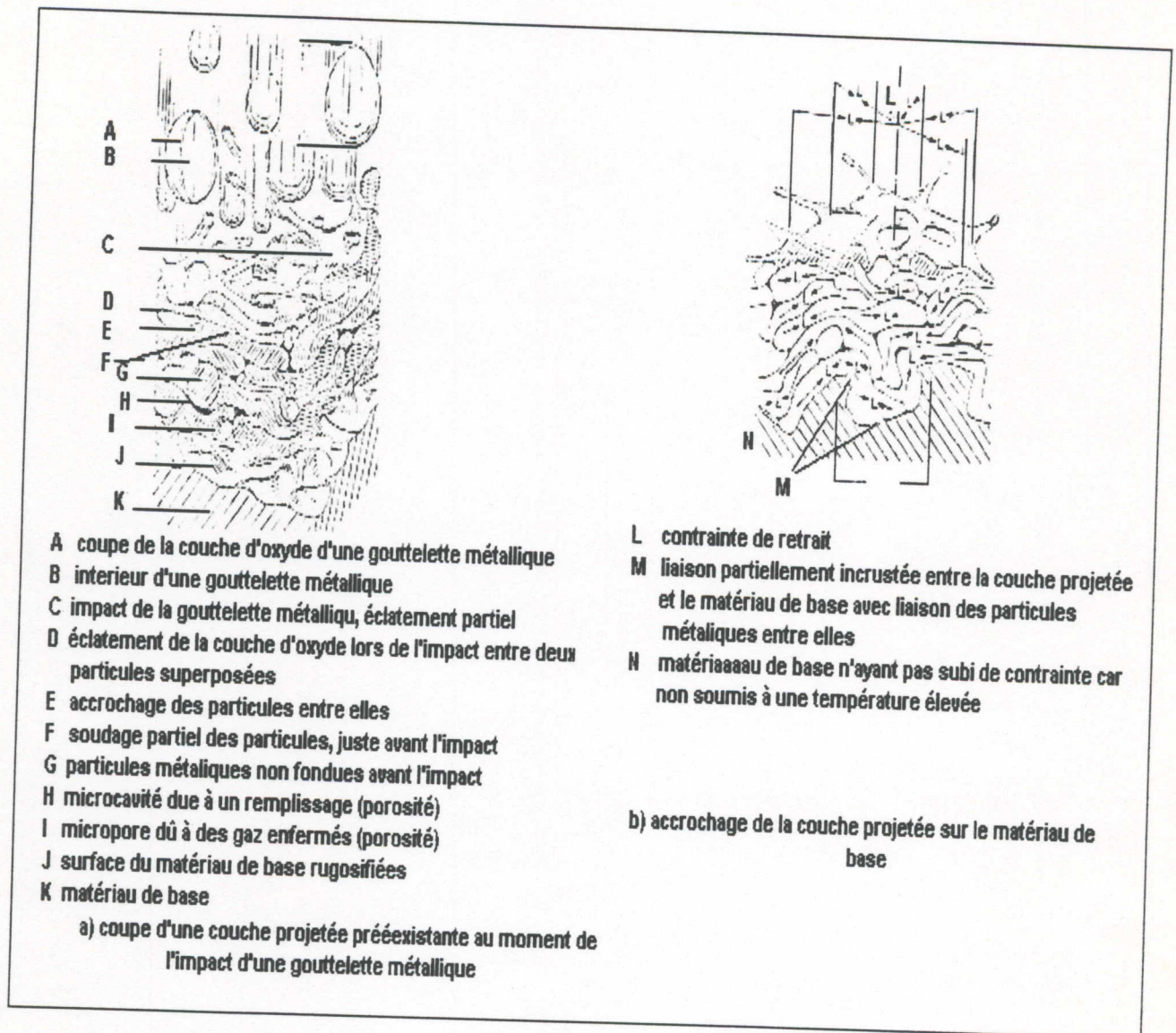


Figure 9: Aspect d'une gouttelette lors de l'impact [1].

### I-3-2-2) 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 en moins bien les rugosités du substrat. Néanmoins, en général

l'accrochage du dépôt est seulement mécanique et, suivant les matériaux projetés et les paramètres de projections, l'adhérence varie de 20 à 115 MPa [1].

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'accrochages connues pour leurs bonnes valeurs d'adhérence, telles que l'aluminure de Nickel, le Molybdène ou l'alliage 80Ni-20Cr.

### I-3-2-3) DENSITÉ

Les dépôts projetés sont poreux et cette porosité est plus ou moins importante suivant le mode de projection. La dimension des particules et leurs vitesses ont une influence importante en ce qui concerne la densité des dépôts. Pour les dépôts métalliques, la densité est également fonction du taux d'oxyde formé pendant la projection.

Les dépôts d'aluminium peuvent avoir, suivant la vitesse du 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-dessus de la densité théorique du produit.

### I-3-2-4) DURETÉ

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



Les autres caractéristiques des dépôts :

- La résistance à l'usure.
- Le coefficient du frottement.
- Les caractéristiques électriques.
- Les caractéristiques thermiques

#### **I-4) PRÉPARATION DES SURFACES**

##### **I-4-1) GÉNÉRALITÉS**

La préparation de surface est un facteur primordial et indispensable à 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 (solide ou liquide) et aussi de dissoudre ou de détacher les composés chimiques présents (couche d'oxyde ou autres composés du métal).

L'idéal d'une bonne préparation est de permettre un contact aussi intime 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.

La préparation de surface proprement dite a pour but :

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

##### **I-4-2) PROPRIÉTÉS 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 nuisent à l'adhérence du dépôt.

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

Si les pièces à traiter ne sont pas poreuses, un décapage humide doit être employé. Ce procédé utilise des abrasifs de type oxyde d'aluminium (de granulométrie de 200 à 500  $\mu\text{m}$ ) mélangés à de l'eau. Les additifs de type inhibiteur de rouille peuvent être ajoutés. Ce décapage est destiné principalement à éliminer les produits corrosifs des matériaux déposés antérieurement, ou rugosifier les surfaces destinées à être revêtues. Les pièces ainsi doivent être rincées et séchées [1],[7],[8].

### I-4-3) RUGOSITÉ

Après nettoyage des pièces, il est nécessaire de créer une rugosité en surface de la pièce à revêtir, afin de permettre aux particules en fusion d'épouser les irrégularités de la surface et réaliser ainsi un bon accrochage mécanique. Cette ultime préparation doit être faite pour la bonne tenue des dépôts, et la géométrie de surface peut être obtenue par :

- traitement par impact.
- préparation mécanique des surfaces suivie d'un traitement par impact.

Le choix de la technique de préparation dépend de la nature du revêtement et de son épaisseur.

**a) Traitement par impact :** il permet de préparer la surface par projection d'abrasifs. Celui-ci doit être à angle vif. Ce traitement nettoie la pièce et crée une certaine rugosité de surface dans cette phase du traitement, les paramètres de projection de l'abrasif doivent être contrôlés. En particulier, l'orientation du jet qui doit être comprise entre 30 et 60° par rapport à la normale. L'abrasif doit être maintenu propre et sa granulométrie contrôlée. En outre, pour des emplois spécifiques, la quantité d'abrasifs doit être vérifiée.



**b) Préparation mécanique des surfaces :** cette technique consiste à effectuer un usinage permettant :

- De diminuer la dimension des pièces afin de laisser une épaisseur suffisante pour le dépôt sans cependant nuire à la résistance de celle-ci.
- D'augmenter les surfaces d'accrochage.
- Dans le cas de réparation, cette technique permet de corriger le profil.

#### I-5) PARAMÈTRES DE PROJECTIONS

Les principaux paramètres à prendre en compte lors de la projection thermique sont :

- Les débits de fluides.
- La vitesse de projection des matériaux à projeter
- La distance de tir.
- L'angle d'incidence.

**a) Débit des fluides :** ceux-ci ont une influence importante sur les caractéristiques des dépôts. Les compositions préconisées des mélanges oxy-gaz doivent également être rigoureusement respectées conformément aux abaques. Dans la plupart des cas, les mélanges sont près de la stœchiométrie en favorisant légèrement, soit l'oxygène, soit le gaz en fonction du produit et des caractéristiques des dépôts à obtenir.

**b) Vitesse de distribution des matériaux :** les matériaux à projeter se présentent sous différentes formes ( fils, poudre, cordons ou baguettes ). Dans tous les cas, l'injection de ces produits dans la flamme se fait en fonction de la puissance du chalumeau, de la nature des produits et des caractéristiques souhaitées du dépôt.

**c) Distance de tir :** ce paramètre varie de 60 à 250 mm, suivant le mode de projection employé, la fusion des particules et leur vitesse changent. En règle

générale, la distance de projection joue un rôle dans les caractéristiques des dépôts tels que la porosité, l'adhérence, la cohésion.... etc.

**d) Angle d'incidence :** la projection sur un substrat est généralement avec un angle d'incidence de  $90^\circ$ . Dans ce cas, le dépôt s'accroche normalement et est homogène. Si cet angle est inférieur à  $45^\circ$ , la porosité du dépôt augmente ainsi que la cohésion entre les particules.



Chapitre III

Notion de la mécanique  
de la rupture

## Chapitre II

# Notion de la mécanique de la rupture

### II-1) INTRODUCTION

La nécessité de comprendre l'endommagement des multimatériaux sous l'effet de sollicitations extérieures a conduit à la mise en place, ces dernières années, de concepts nouveaux en mécanique de la rupture. En effet, la théorie classique de l'endommagement développée pour les matériaux isotropes métalliques ou céramiques est insuffisante pour rendre compte des phénomènes qui interviennent dans un assemblage substrat-revêtement.

Le comportement vis à vis d'un tel composite est fortement dépendant :

- Du niveau et de répartition des contraintes résiduelles : celles-ci résultent de la différence entre les propriétés élastiques et thermiques des matériaux liés.
- De la proportion relative de métal et de sa contrainte d'écoulement plastique.
- De la distribution des défauts dans les trois milieux : dépôt, zone inter faciale et métal de base.
- De la résistance intrinsèque de chacun des milieux.

A cette anisotropie correspond une anisotropie dans les mécanismes mis en jeux lors de sollicitations mécaniques, et l'endommagement peut intervenir soit par rupture fragile ou ductile dans le dépôt, soit par rupture fragile ou ductile dans l'interface ou encore par rupture ductile dans le métal.

### II-2) RAPPELS DE LA MÉCANIQUE DE LA RUPTURE

#### II-2-1) LE BUT DE LA MÉCANIQUE DE LA RUPTURE

Les structures sont en général calculées de telle sorte que les contraintes ne dépassent en aucun point la limite d'élasticité du matériau. Un tel mode de calcul met les structures à l'abri de la rupture classique du type ductile. Mais il existe un autre mode de rupture ( type fragile ou semi-fragile) qui peut intervenir lorsque les circonstances deviennent anormales :

- Basses températures.
- Grandes vitesses d'application de la charge.



- Défauts préexistants ou créés en service.

Les essais classiques de rupture fragile (par exemple l'essai de résilience) ne permettent pas de définir une grandeur susceptible de prendre en compte le phénomène fondamental de caractériser quantitativement la résistance d'un matériau à la propagation brutale d'un défaut, en introduisant la notion de ténacité à rupture : c'est le but de la mécanique de la rupture.

Les ruptures brutales dont il s'agit ici peuvent être classées en deux catégories :

- a) **Les ruptures fragiles** proprement dites, qui concernent les matériaux avec une transition ductile-fragile marquée (cas des aciers doux).
- b) **Les ruptures ductiles à faible déformation plastique** : ils concernent les matériaux à très haute résistance pour lesquels il n'existe pas une dépendance nette entre la résilience et la température : les facteurs essentiels sont alors les inclusions et les défauts.

## II-2-2) NOTIONS DE MÉCANIQUE DE LA RUPTURE

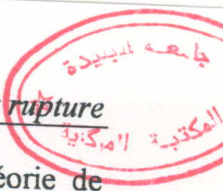
### II-2-2-1) MODES DE RUPTURE

L'état général de propagation d'une fissure à l'intérieur d'un matériau se ramène à la superposition de trois modes de rupture principaux (fig. 10 a,b et c).

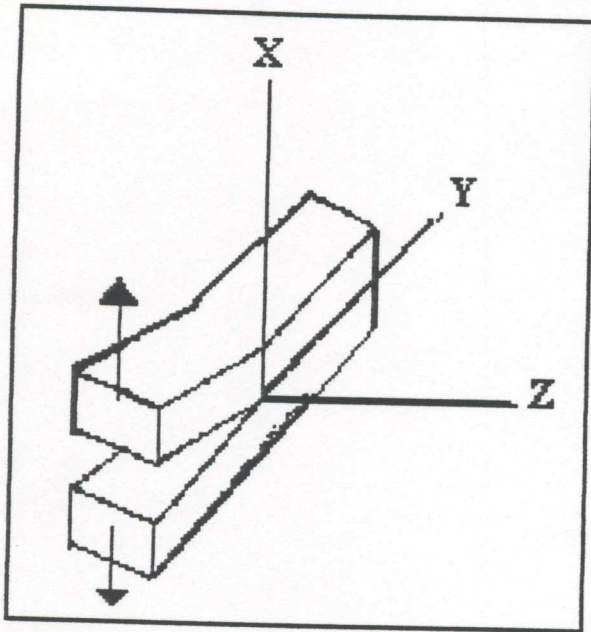
Une surface de rupture plane correspond au mode I, et une surface inclinée correspond à la superposition des modes II et III.

La mécanique de la rupture est une philosophie de conception visant à développer un critère de ruine prenant en considération les fissures existant au sein du matériau. Pour cela, il est important de pouvoir comparer un facteur de charge à un paramètre caractéristique du matériau.

La première étape consiste donc en la définition d'un facteur caractérisant la sévérité de la situation obtenue par application d'une charge sur une pièce fissurée. Ce facteur s'obtient par considération des contraintes de déformations élémentaires illustrées sur la figure 10 a,b et c

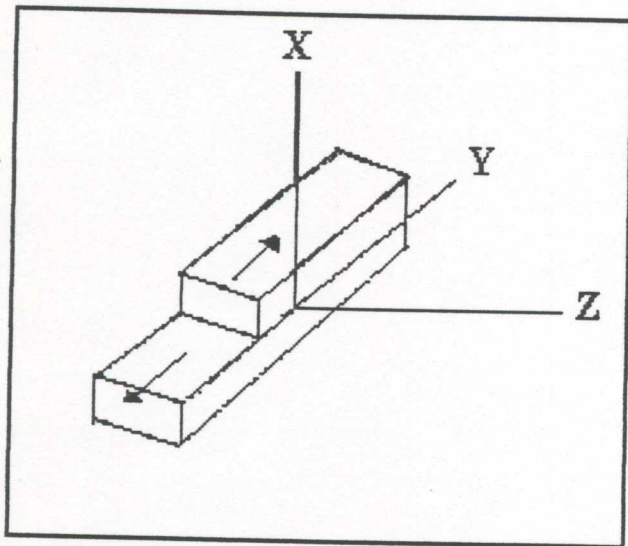


Ces contraintes ont été calculées par IRWIN [13-14] à l'aide de la théorie de l'élasticité. Elles sont exprimées par les relations ci-dessous :



$$\begin{aligned} \sigma_{12} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi.r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \\ \sigma_{11} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi.r}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \\ \sigma_{22} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi.r}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \\ \sigma_{33} &= \nu(\sigma_{11} + \sigma_{22}) \quad \text{(II-1)} \\ \sigma_{13} &= \sigma_{23} = 0 \\ u_2 &= \frac{K_I}{G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin \frac{\theta}{2} \left( 1 - 2\nu - \cos^2 \frac{\theta}{2} \right) \\ u_3 &= 0 \end{aligned}$$

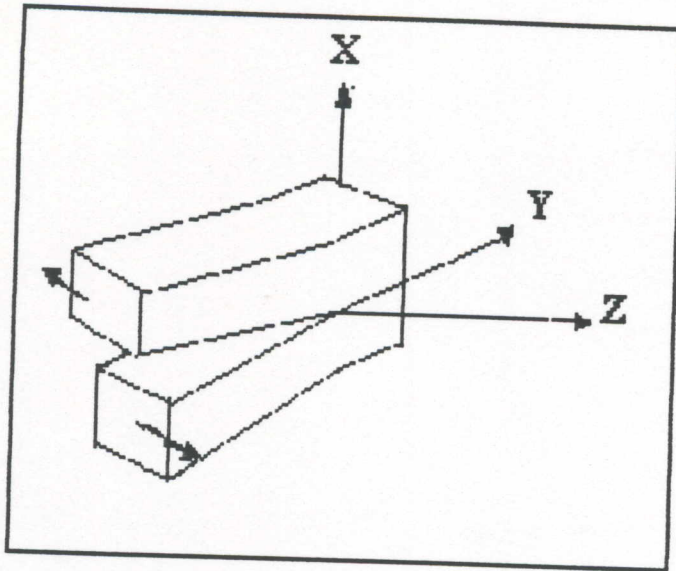
Figure 10 a : Mode I, Ouverture



$$\begin{aligned} \sigma_{11} &= \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi.r}} \sin \frac{\theta}{2} \left( 2 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right) \\ \sigma_{22} &= \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi.r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \\ \sigma_{12} &= \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi.r}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad \text{(II-2)} \\ u_1 &= \frac{K_{II}}{\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin \frac{\theta}{2} \left( 2 - 2\nu + \cos^2 \frac{\theta}{2} \right) \\ u_2 &= \frac{K_{III}}{\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cos \frac{\theta}{2} \left( -1 + 2\nu - \cos^2 \frac{\theta}{2} \right) \end{aligned}$$

Figure 10 b : Mode II, Glissement-plan





$$\begin{aligned}
 \sigma_{13} &= -\frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi.r}} \sin \frac{\theta}{2} \\
 \sigma_{23} &= \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi.r}} \cos \frac{\theta}{2} \\
 u_3 &= \frac{K_{III}}{\mu} \sin \frac{\theta}{2} \\
 \sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_{12} &= 0 \\
 u_1 = u_2 &= 0
 \end{aligned}
 \tag{II-3}$$

Figure 10 c : Mode III, Glissement anti-

Dans les relations précédentes  $\nu$  est le coefficient de Poisson et  $G$  le module d'élasticité de cisaillement, reliés au module de Young par la relation :

$$2G(1+\nu) = E \tag{II-4}$$

les facteurs  $K_I, K_{II},$  et  $K_{III}$  caractérisent à la fois la géométrie de la fissure et la nature des sollicitations. Ils sont appelés facteurs d'intensité de contrainte et s'expriment en  $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$  dans les trois modes I, II, III.

Pour nous, on s'intéresse surtout au Mode I qui est considéré comme le Mode le plus dangereux. L'expression générale de  $K_I$  est de la forme :

$$K_I = \alpha \sigma \sqrt{\pi a} \tag{II-5}$$

Où  $\alpha$  étant un facteur correctif tenant compte de la géométrie de la fissure et du type de sollicitation.

Une structure sera considérée comme sûre, si l'inégalité suivante est vérifiée

$$\alpha\sigma\sqrt{\pi a} < K_{Ic} \quad (\text{II-6})$$

$K_{Ic}$  : valeur critique du facteur d'intensité de contrainte, caractéristique du matériau

La détermination expérimentale de cette propriété intrinsèque exige que l'on procède à des essais dans des conditions où la fissure est connue et où d'autre part, on connaît la fonction  $K_I = K_I(CL, Q, g, a)$ .

CL : représente les conditions aux limites

Q : l'intensité du chargement.

g : la géométrie.

a : la longueur de la fissure.

#### II-2-2-2) FACTEUR D'INTENSITÉ DE CONTRAINTE K

Le facteur d'intensité de contrainte, introduit par Irwin [19] permet à lui seul à caractériser l'intensité du champ de contrainte au voisinage du fond de fissure. Il est fonction du chargement et est proportionnel aux forces appliquées. Il dépend d'une part de la fissure et d'autre part des dimensions du milieu fissuré.

Il convient donc d'établir l'expression analytique du facteur d'intensité de contrainte K pour chaque cas de géométrie du milieu. La référence [14] fournit une liste appréciable de valeurs des facteurs d'intensités de contrainte selon les trois Modes (KI, KII et KIII) Pour un grand nombre de configurations et de chargements, rappelons que ces valeurs sont obtenues expérimentalement.



Dans le cas des éprouvettes d'essai, utilisées couramment en mécanique de la rupture, l'expression de K peut se mettre sous la forme :

$$K = \frac{P\sqrt{a}}{BW} Y\left(\frac{a}{W}\right) \quad (\text{II-7})$$

où : P est la charge nominale appliquée à la pièce en newtons

B est l'épaisseur de l'éprouvette en mm.

W est la largeur de l'éprouvette en mm

a est la longueur de la fissure en mm

$Y\left(\frac{a}{W}\right)$  est un polynôme qui dépend du type d'éprouvette et qui est sans dimensions physiques

Pour une éprouvette de flexion en trois points ( figure 11), l'expression du facteur d'intensité de contrainte est donnée par la relation suivante :

$$K_I = \frac{3PL}{2BW^2} \sqrt{\pi a} f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (\text{II-8})$$

Le facteur de correction  $f\left(\frac{a}{W}\right)$  dépend du rapport  $\frac{L}{W}$

- Pour  $\frac{L}{W} = 4$

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = 1.090 - 1.735\left(\frac{a}{W}\right) + 8.020\left(\frac{a}{W}\right)^2 - 14.18\left(\frac{a}{W}\right)^3 + 14.57\left(\frac{a}{W}\right)^4$$

- Pour  $\frac{L}{W} = 8$

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = 1.107 - 2.12\left(\frac{a}{W}\right) + 7.71\left(\frac{a}{W}\right)^2 - 13.55\left(\frac{a}{W}\right)^3 + 14.25\left(\frac{a}{W}\right)^4$$

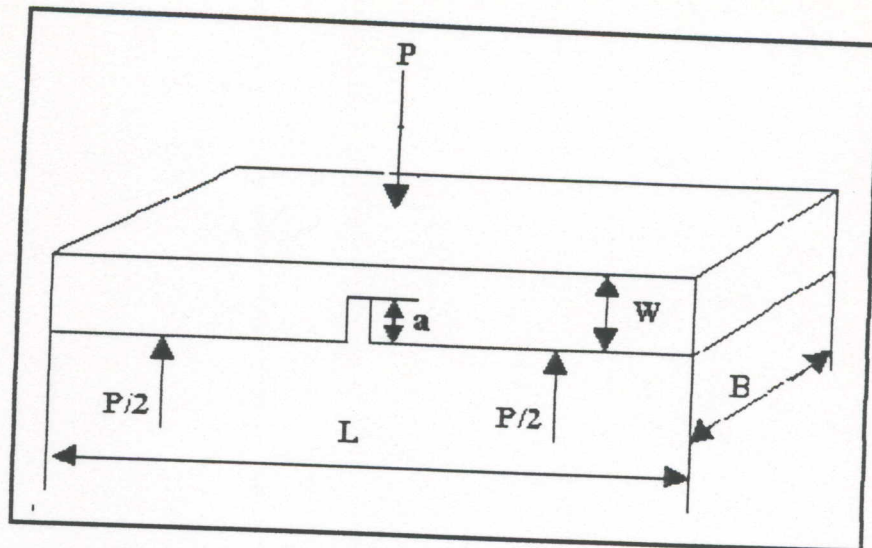


Figure 11: Éprouvette de flexion trois points

Dans le cas d'une extension d'une fissure par le phénomène de fatigue, le facteur d'intensité de contrainte  $K$  se modifie puisque c'est une fonction croissante de la longueur de fissure  $a$ .

### II-2-2-3) TAUX DE RESTITUTION D'ÉNERGIE $G$

Griffith [18-19] a abordé le problème de la rupture des corps fissurés d'un point de vue énergétique. Lorsque la propagation de la fissure a lieu, la géométrie de celle-ci change.

Ainsi, la conservation de l'énergie totale du système s'exprime par :

$$dW_{tot} = dW_{élast} + dW_s + dW_{cin} = 0$$

(II-9)

Sachant que

$dW_{élast}$  : Variable de l'énergie élastique

$dW_{ext}$  : Variation d'énergie potentielle des forces extérieures

$dW_s$  : Energie dissipée dans la séparation qui est égale à  $2\gamma dS$

$dW_{cin}$  : Variation d'énergie cinétique.

$\gamma$  : Tension superficielle.

$dS$  : Element de surface.



La fissure se propage de façon instable si l'énergie cinétique augmente  $dW_{cin} > 0$  soit :

$$\frac{\partial}{\partial S} (W_{\text{élast}} + W_{\text{ext}}) + 2\gamma < 0 \quad (\text{II-10})$$

Nous posons la définition du paramètre  $G$  représentant le taux de restitution d'énergie :

$$G = -\frac{\partial}{\partial S} (W_{\text{élast}} + W_{\text{ext}}) \quad (\text{II-11})$$

Le critère de propagation de Griffith se traduit par :  $G > 2\gamma$  (II-12)

L'initiation de la propagation à partir de la configuration de la fissure est possible lorsque  $G=2\gamma$ . Si les sollicitations extérieures sont telles que à tout moment on a l'égalité  $G=2\gamma$ , alors il n'y a pas d'accroissement de l'énergie cinétique. On dit que la rupture est contrôlée, dans ce cas c'est une croissance stable de la fissure.

### II-3) MÉCANIQUE DE LA RUPTURE ÉLASTO-PLASTIQUE

La grande majorité des aciers à basse et moyenne limite élastique utilisés dans les grandes structures telles que navires, ponts, réservoirs sous pression, etc.. sont en épaisseur trop faible pour que soit réalisée dans les conditions normales de vitesse de mise en charge et de température l'état de déformation plane nécessaire à la validité du concept  $K_{Ic}$ . Bien qu'il soit possible d'utiliser dans certaines cas des relations empiriques reliant  $K_{Ic}$  à  $K_c$ , l'approche la plus prometteuse réside dans le développement d'une analyse élasto-plastique comme extension de l'analyse linéaire élastique classique. Les concepts les plus intéressants de ce point de vue seront ici passés en revue. Ce sont :

- L'écartement en fond de fissure.
- L'intégrale  $J$
- La courbe  $R$
- L'énergie équivalente

**II-3-1) ÉCARTEMENT EN FOND DE FISSURE (crack opening displacement COD)**

En 1961, WELL proposa de caractériser le comportement du voisinage d'une fissure aiguë par l'écartement des deux lèvres en fond de fissure (COD), ce dernier possédait un avantage considérable sur  $G_I$  et  $K_I$  qu'on peut mesurer même lorsque la zone plastique devient très importante, ce qui est justement le cas dans les pièces de faible épaisseur. L'utilisation d'un modèle de plastification en fond de fissure proposé par Dugdale, permet d'exprimer le COD ( $\delta$ ) selon la relation :

$$\delta = 8 \frac{\sigma_e a}{\pi a} \ln \frac{1}{\cos \frac{\pi \sigma}{2 \sigma_e}} \quad (\text{II-13})$$

où  $\sigma$  est la contrainte perpendiculaire de la fissure de longueur  $2a$

En développant en série cette expression, on obtient :

$$\delta = 8 \frac{\sigma_e a}{\pi E} \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{\pi \sigma}{2 \sigma_e} \right)^2 + \frac{1}{12} \left( \frac{\pi \sigma}{2 \sigma_e} \right)^4 + \dots \right] \quad (\text{II-14})$$

Pour  $\sigma < \frac{3}{4} \sigma_e$ , le terme de cette série suffit à fournir une approximation raisonnable pour  $\delta$ . Introduisant alors  $K_I^2 = \sigma^2 \pi a$ , ce qui nous permet d'écrire :

$$\delta = E \sigma_e = K_I^2 \quad (\text{II-15})$$

Cette relation prouve qu'il existe une relation linéaire entre  $\delta$  et  $K_I^2$ .

De la même façon, on peut développer en série une expression de  $G_I$  :

$$G_I = \frac{\pi \sigma^2 a}{E \sigma_e} \left[ 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{\sigma}{\sigma_e} \right)^2 + \dots \right] \quad (\text{II-16})$$



Par identification, on obtient :  $GI = \sigma_e \delta$  (II-17)

La longueur critique de fissure  $2a_c$  peut être directement reliée au COD critique  $\delta_c$  par la relation suivante :

$$2a_c = f \cdot \delta_c \quad \text{(II-18)}$$

où  $f = 1/\pi(\epsilon - 5 \times 10^{-4})$  si  $\epsilon \geq 0.001$

$f = 2/\pi$  si  $\epsilon \leq 0.001$ .

$\epsilon$  désigne ici la déformation totale (Plastique et élastique) en fond de fissure .

### II-3-2 ) INTÉGRALE DE CONTOUR J

L'intégrale J, introduit par Rice, caractérise la singularité du champ de contraintes, au fond de la fissure, par une approche énergétique [17],[19]. Elle est définie comme suite: soit un milieu plan élastique fissuré et soit un contour C entourant la parties de la fissure, n étant sa normale extérieure ( figure 12).

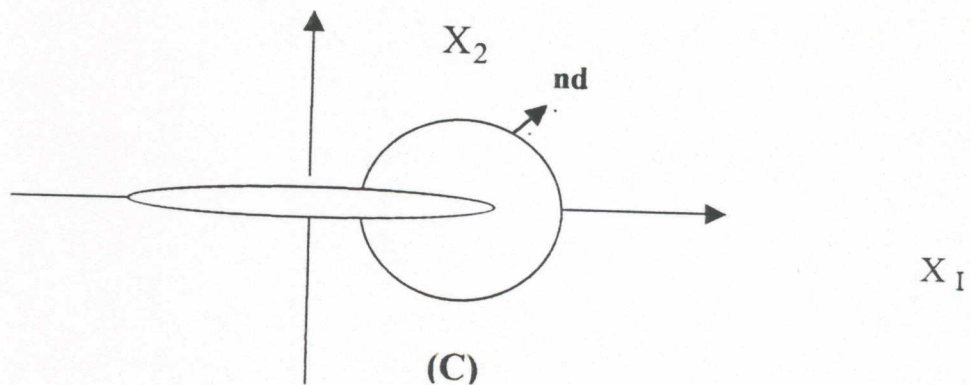


Figure 12: Champ de contraintes au fond d'une fissure

L'intégrale de Rice est :

$$J = \int_c \left( U_{eI} n_i - \sigma_{ij} n_j \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) dS \quad \text{(II-19)}$$

$U_{\text{él}}$  : Énergie élastique

$\sigma_{ij}$  : Tenseur de contraintes

$u_i$  : Déplacements

Cette intégrale est indépendante du contour d'intégration. Il a été montré que, pour un milieu élastique, le taux d'énergie élastique disponible ou taux de restitution d'énergie est strictement égal à cette intégrale :  $G = J$

L'intégral  $J$  est lié au facteur d'intensité de contrainte pour un cas bidimensionnel par la relation suivante :

$$\text{En déformation plane } J = \frac{1-\nu^2}{E} K_I^2 \quad (\text{en mode I}) \quad (\text{II-20})$$

$$\text{En contrainte plane } J = \frac{1}{E} K_I^2 \quad (\text{en mode I}) \quad (\text{II-21})$$

La mesure de  $J$  se fait par la méthode de la complaisance, selon la technique présentée par Begley et Landes [13], et qui est fondée sur le fait que, sous un déplacement imposé  $d$ ,  $J$  est égale à la variation de l'énergie de déformation élastique  $U$  par unité d'épaisseur  $t$  :

$$J = -\frac{1}{t} \frac{dU}{da} \quad (\text{II-22})$$

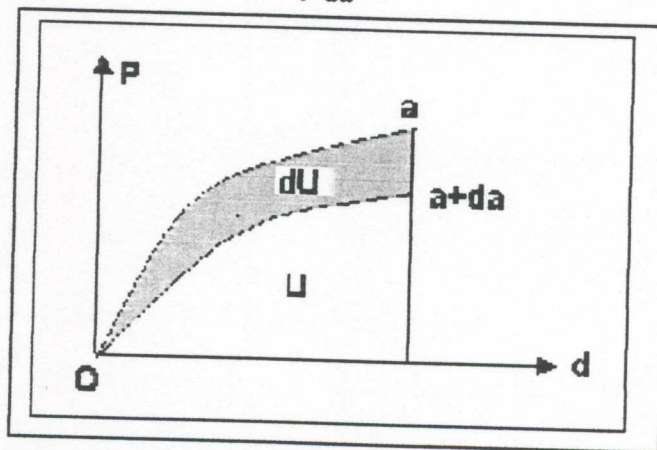


Figure 13: variation de l'énergie de déformation en fonction de la longueur de la fissure [13]



## II-3-3) COURBE R

L'idée de base du concept de courbe-R, est que la fissure ne se propose que si la force d'extension est supérieure à la résistance à la propagation. Ce concept est illustré sur la figure ci dessous :

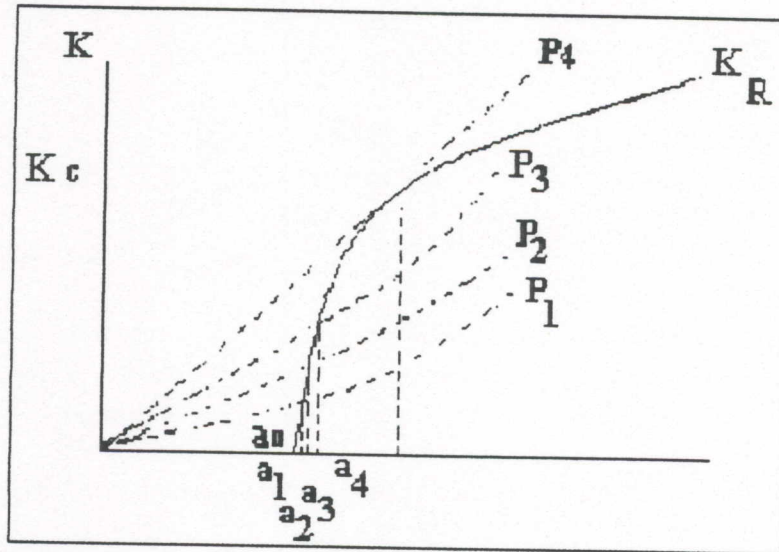


Figure 14: Variation des courbes  $K_R$  en fonction de  $a$  [13]

On distingue deux types de courbe :

Les courbes  $K-a$  (en pointillés) donnent pour différentes forces  $P_i$  la variation du facteur d'intensité de contrainte  $K$  avec la longueur de fissure  $a$ .

La courbe  $K_R-a$  (trait fort), donne la valeur de  $K_R$  qui est une fonction de la longueur initiale de la fissure  $a_0$ , pour l'obtenir, il suffit de connaître la charge appliquée  $P$  et la longueur effective de la fissure.

Sous les charges  $P_1, P_2$  et  $P_3$ , la fissure est stable : elle s'arrête aux longueurs  $a_1, a_2$  ou  $a_3$ . Au contraire, lorsque la charge atteint  $P_4$ , la rupture se produit de façon brutale, après que la fissure ait crû de façon stable jusqu'à la longueur  $a_4$ .

Les courbes  $K-a$  s'obtiennent par complaisance pour chaque valeur de la charge.

**II-3-4) ÉNERGIE ÉQUIVALENTE**

Le concept de cette méthode est que lorsque l'on essaye une série d'éprouvettes homothétiques d'épaisseurs différentes, les points correspondants au maximum de la courbe force-déplacement des lèvres de la fissure (cette courbe sert à la détermination de  $K_{Ic}$ ) se placent sur une courbe unique et sont d'autant plus près de l'origine que l'éprouvette est épaisse. Cette constatation est illustrée sur la figure 15, la force  $F$  et le déplacement  $\Delta$  ayant été rationalisés par division par  $b^2$  et  $b$  respectivement ( $b$  est l'épaisseur de l'éprouvette).

Supposons que l'épaisseur  $b$  soit suffisante pour que l'on puisse valablement mesurer  $K_{Ic}$  :

$$b_2 \geq 2.5 \left( \frac{K_{Ic}}{\sigma_e} \right)^2$$

Soit alors :

$$K_B = \frac{F_2}{t_2} \sqrt{\frac{\alpha b_1}{2}} f\left(\frac{a}{b}\right)$$

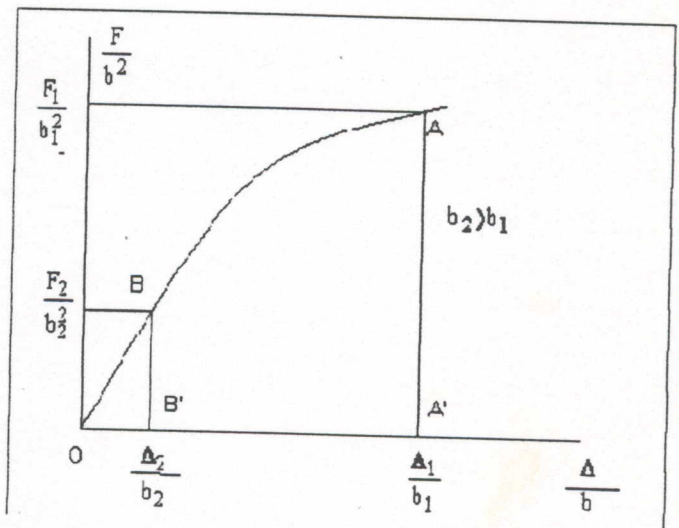


Figure 15 : Courbe servant à la détermination de  $K_{Ic}$

$$\alpha = \frac{\text{Aire}(OAA')}{\text{Aire}(OBB')}$$

et  $f\left(\frac{a}{b}\right)$  est le polynôme utilisé pour la détermination de la ténacité  $K_{Ic}$  d'une éprouvette compacte normalisée :

$$f\left(\frac{a}{b}\right) = \left[ 29.6 \left(\frac{a}{b}\right)^{\frac{1}{2}} - 185.5 \left(\frac{a}{b}\right)^{\frac{2}{3}} + 655.7 \left(\frac{a}{b}\right)^{\frac{5}{2}} - 1017 \left(\frac{a}{b}\right)^{\frac{7}{2}} + 638.9 \left(\frac{a}{b}\right)^{\frac{9}{2}} \right] \quad (\text{II-23})$$





La quantité  $K_B(b_1)$  est une borne inférieure de  $K_{Ic}$ , d'autant plus précise que  $b_2 - b_1$  est faible. La figure 16 indique comment  $K_B$  et  $K_{Ic}$  varient relativement avec la température.

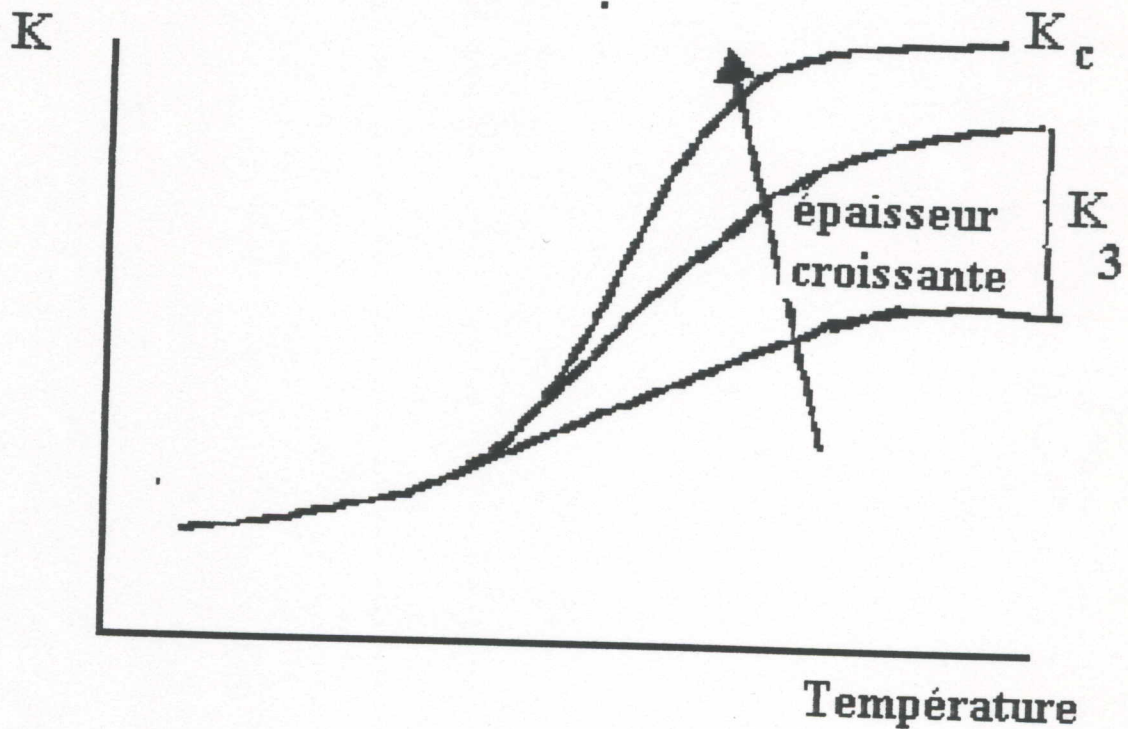


Figure 16 : Variation de  $K_B$  et  $K_{Ic}$  en fonction de la température

L'avantage de ce concept est évident : il permet d'obtenir une valeur approchée allant dans le sens de la sécurité en disposant d'un essai sur une éprouvette de dimensions trop importante.

Il a été par ailleurs montré qu'une liaison existe entre le concept de l'énergie équivalente et celui de l'intégrale J

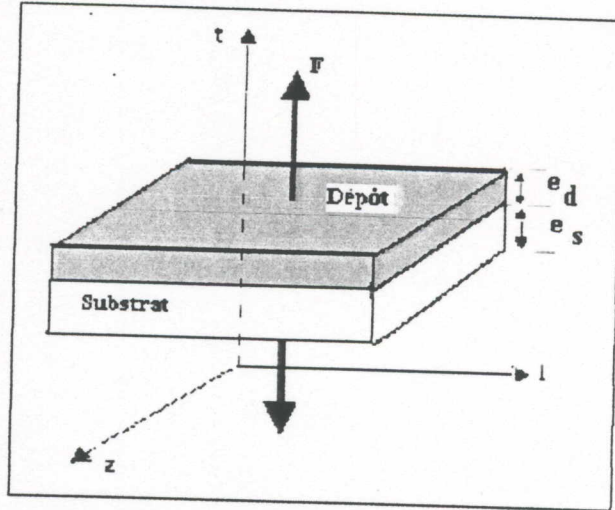
$$\alpha = \frac{J_1}{J_2} \times \frac{b_1}{b_2}$$

( II-26)

**II-4) CONSTANTES ÉLASTIQUES D'UN BIMATÉRIAU**

**II-4-1) MODULE D'ÉLASTICITÉ SUIVANT LE SENS TRAVERS  $E_t$**

On examine ici une association de deux matériaux (substrat et dépôt) de caractéristique distincte, avec une géométrie et sollicitation simple, dans le but d'estimer les caractéristiques élastiques de l'interface.



**Figure 17: Représentation schématique du bimatériau**

Néanmoins, on doit calculer le module de Young  $E$  équivalent pour les deux matériaux, c'est-à-dire  $E$  de l'interface [32-33] selon la relation suivante:

$$\text{Où : } E_e = E_s \left[ \frac{1}{(1 - V_d) + \frac{E_s}{E_d} V_d} \right] \quad (\text{II-27})$$

$$V_d = \frac{\text{volume de dépôt}}{\text{volume total}}$$

$V_d$  est appelé la teneur du dépôt

En conséquence, la teneur en volume du substrat est telle que :

$$V_s = \frac{\text{volume de substrat}}{\text{volume total}}$$



Ou encore:

$$V_s = 1 - V_d$$

 $E_{\acute{e}}$  = module d'élasticité équivalent (interface)

 $E_s$  = module d'élasticité du substrat

 $E_d$  = module d'élasticité du dépôt

### II-4-2) MODULE D'ÉLASTICITÉ SUIVANT LE SENS TRAVERS $G_{lt}$

Il est de même pour  $G_{lt}$ , selon le schéma donné sur la figure 18, on le calcule par la formule II-28.

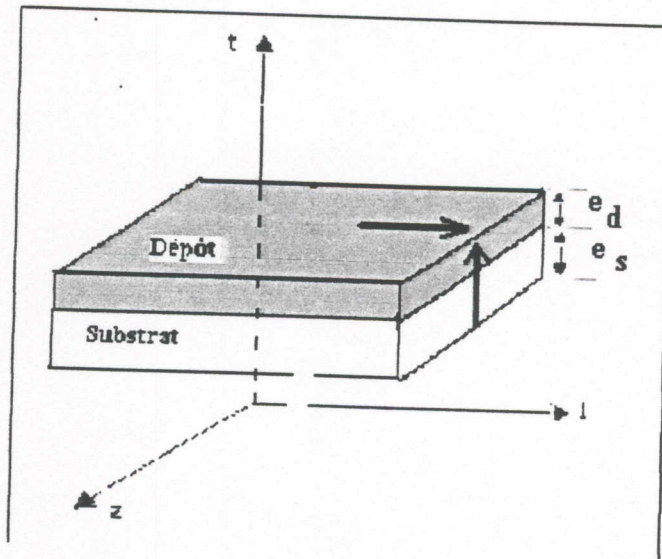


Figure 18: Représentation schématique des efforts agissant sur le bimatériau

$$G_{\acute{e}} = G_s \left[ \frac{1}{(1 - V_d) + \frac{G_m V_d}{G_d}} \right]$$

(II-28)

 $G_{\acute{e}}$  = module de cisaillement équivalent (Interface)

 $G_s$  = module de cisaillement du substrat

 $G_d$  = module de cisaillement du dépôt

**II-4-3) LE COEFFICIENT DE POISSON  $\nu_{lt}$** 

En considérant de nouveau le chargement défini dans le paragraphe précédent, le coefficient de poisson de l'interface est donné par la formule suivante :

$$\nu_{lt} = \nu_s V_m + \nu_d V_d$$

$\nu_{lt}$  = Coefficient de poisson équivalent (Interface)

$\nu_s$  = Coefficient de poisson du substrat

$\nu_d$  = Coefficient de poisson du dépôt

**II-5) MESURE DES LONGUEURS DE FISSURE**

La mesure de la longueur de la fissure est l'un des problèmes pratiques les plus délicats à résoudre : une fissure fermée est bien souvent invisible à l'œil nu. D'autre part, le front de la fissure est rarement rectiligne, autrement dit la longueur de la fissure dépend de là où on la mesure.

Les méthodes les plus utilisées dans ce contexte sont : méthode optique, méthode de filaments brisés, méthode du ressuage ... etc.

**II-5-1) MÉTHODE OPTIQUE**

Elle consiste tout simplement à suivre optiquement l'évolution de la fissure ; un microscope mobile et un éclairage astucieux permettent d'améliorer la précision des mesures. La mesure de la fissure proprement dite se fait soit en utilisant un réticule monté dans le microscope, soit en utilisant des repères solidaires de l'éprouvette ( graduations gravées ou déposées par un procédé photochimique, empreintes de micro dureté etc....).

**II-5-2) MÉTHODE DES FILAMENTS BRISÉS**

Des filaments sont tendus sur la surface de l'éprouvette, en travers du chemin supposé de la fissure et perpendiculairement à celui-ci. Les fils se brisent les uns après les autres au fur et à mesure que les lèvres de la fissure s'écartent, c'est-à-dire au fur et à mesure que la fissure se propage.



**II-5-3) MÉTHODE DU RESSUAGE**

Cette méthode consiste à effectuer un test de ressuage sur le spécimen, les fissures non apparentes à l'œil nu peuvent être mises en évidence par ce test, c'est-à-dire l'application sur la surface à contrôler d'un liquide capable de s'infiltrer dans les crevasses et fissures, suivi après nettoyage de l'application d'un liquide développeur faisant apparaître le liquide pénétrant précédemment absorbé par les défauts. Le ressuage est efficace sur des défauts et fissures de taille suffisamment faible pour que le liquide pénétrant ne soit pas enlevé lors du nettoyage superficiel précédent l'application du liquide développeur.

On peut utiliser d'autres méthodes telles que la méthode par ultrasons, la méthode de la complaisance, la méthode de l'émission acoustique, la méthode par courant de Foucault et la méthode potentiel [13].

Deuxième partie  
Procédures  
expérimentales

Chapitre III

Procédures expérimentales  
et  
Résultats



## Chapitre III

### Procédures expérimentales et résultats

#### III -1 ) ELABORATION DES ÉCHANTILLONS PAR PROJECTION THERMIQUE

##### III-1-1) INTRODUCTION :

Ce chapitre présente la procédure d'élaboration des bimatérial par la technique de la projection thermique au chalumeau oxyacétylénique l'arc ainsi que les processus relatifs à la préparation des éprouvettes. Notons que ces bimatérial ont été réalisés à l'entreprise «Algérie Métallisation» spécialisée dans la récupération et la rénovation des pièces mécaniques usées.

##### III-1-2) MATÉRIAUX ÉTUDIÉS :

###### III-1-2-1) LE SUBSTRAT :

Compte tenu de sa disponibilité dans l'industrie algérienne et de son utilisation en construction mécanique pour la réalisation des pièces soumises aux vibrations, aux chocs mécaniques et à l'usure tel que : les vilebrequins, les axes, les essieux... nous avons utilisé un acier faiblement allié de nuance **42CD4** comme matériau de base.

L'analyse spectrochimique d'un échantillon de cet alliage réalisé sur un spectromètre type DV4, a donné la composition chimique suivante tableau 1

Éléments	% atomique	Éléments	% atomique	Éléments	% atomique
Fe	97.130	C	0.390	V	0.000
S	0.026	Cu	0.240	Ni	0.000
Mn	0.800	Cr	0.009	Al	0.009
Si	0.200	Mo	0.190	Zn	0.000

**Tableau 1 : Composition chimique de l'acier 42CD4**

Les éprouvettes sont de forme de barreaux cylindriques. Le premier qui, après avoir été rectifié au tour parallèle jusqu'à un diamètre de 25mm, a été découpé en petits échantillons sous forme de disque de 25mm de diamètre et 5mm d'épaisseur (fig. 19) réservés pour effectuer les tests d'arrachement.

Le second barreau, de 170mm de diamètre qui, après avoir été usiné par la fraiseuse pour qu'il devienne prismatique à une section  $100 \times 50 \text{ mm}^2$ , a été coupé par une scie mécanique, pour obtenir une plaque de dimension  $100 \times 50 \times 2.5 \text{ mm}^3$ . Cette dernière a été découpée en échantillons sous forme de parallélépipèdes de dimensions  $50 \times 4 \times 2.5 \text{ mm}^3$  (fig. 20) destinés pour les essais de flexion.

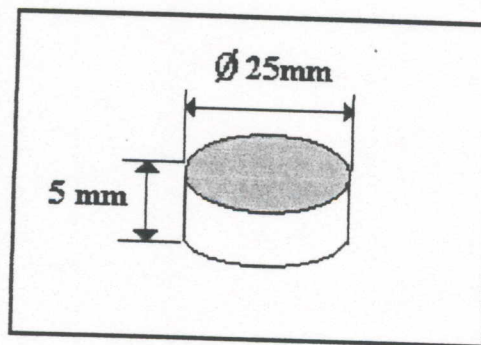


Figure 19: Éprouvette de l'essai d'arrachement

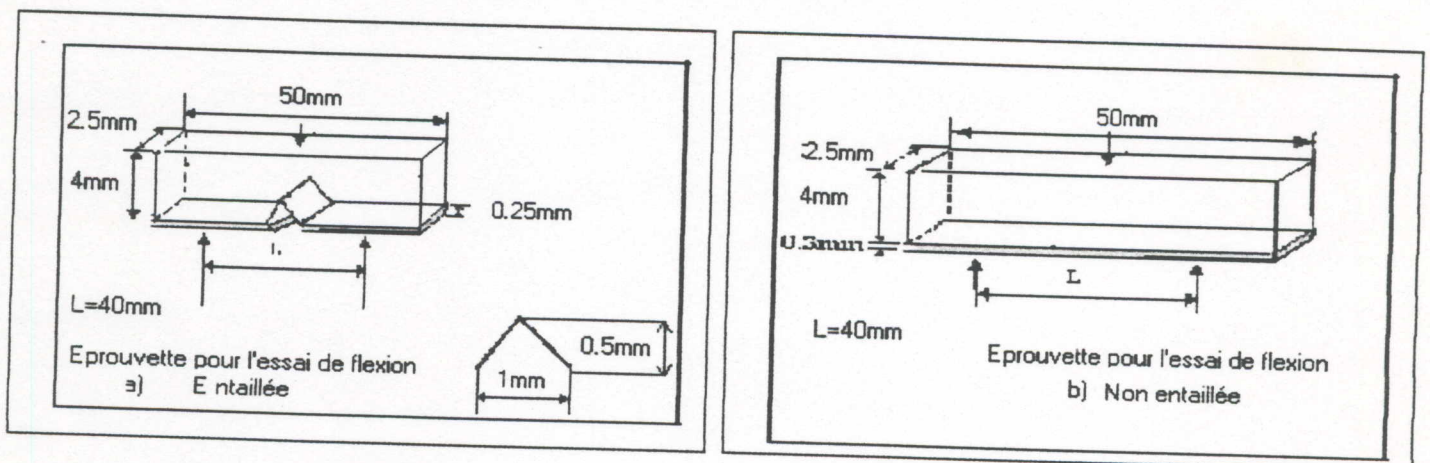


Figure 20: Éprouvettes pour l'essai de flexion



### III-1-2-2) LE REVÊTEMENT :

Comme matériau de dépôt, nous avons choisi le Molybdène par ce qu'il est très adhérent sur les aciers, il ne nécessite pas une sous couche d'accrochage pour adhérer avec notre matériau de base le 42DC4. [6]. Aussi le Molybdène est très résistant, vis à vis frottement et l'usure. En projection thermique (Plasma), le molybdène possède une micro dureté variant entre 168-183 H<sub>v</sub> [23].

L'analyse des fils de Mo (avant dépôt) par la méthode de fluorescence X a révélée la composition chimique suivante tableau 2.

Éléments	% massique	Indice d'erreur
Mg	0.1	0.02
Si	0.19	0.01
K	0.124	0.01
Ca	0.35	0.02
Cr	0.037	0.004
Fe	0.057	0.007
GE	0.005	0.002
Nb	0.036	0.014
Mo	98.84	0.06
Au	0.008	0.004
Hg	0.21	0.01

**Tableau 2: Composition chimique du fils de molybdène**

Le Molybdène est un métal blanc argenté de masse volumique 10.33g/cm<sup>3</sup>. Il appartient au sixième groupe du tableau périodique. Il cristallise dans le système cubique centré avec un paramètre  $a = 0.31472$  à 25°C. Sa masse atomique est de 95.94g, et son numéro atomique est 42. Le tableau 3 regroupe quelques unes de ces propriétés.

Propriétés thermiques	Propriétés thermodynamiques	Propriétés mécaniques (à 20°C)
T° de fusion : (2623± 8)°C	Enthalpie de fusion : 28KJ/mol	Module d'Young E= 324.8 Gpa
T° d'ébullition : (4627±20)°C	Enthalpie de vaporisation : 589KJ/mol	Module de cisaillement G = 120 Gpa
Coefficient de dilatation linéique (K <sup>-1</sup> ) 5,1 . 10 <sup>-6</sup> à 27°C . 5,5 . 10 <sup>-6</sup> à 1000°C. 7,2 . 10 <sup>-6</sup> à 2000°C.	/	Coefficient de Poisson ν= 0.32
Conductivité thermique(W. cm <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ) 122 à 500°C. 101 à 1000°C 82 à 1500°C	/	/

Tableau 3: Propriétés thermiques, thermodynamique et mécaniques du Molybdène

### III-1-3) MISE EN ŒUVRE DE LA PROJECTION THERMIQUE

Avant de procéder à la projection du Molybdène sur le substrat, celui-ci doit être préparé avec beaucoup de précaution car c'est une étape déterminante quant à la qualité de l'adhérence du dépôt.

#### III-1-3-1) PRÉPARATION DE LA SURFACE À REVÊTIR

**a) Dégraissage** : les échantillons utilisés au cours de la projection sont des parallélépipèdes de dimensions 50x4x2.5mm<sup>3</sup> et des disques de 25mm de diamètre et 5mm d'épaisseur. Ils sont dégraissés et nettoyés avec une solution de trichloréthylène afin d'éliminer les salissures composées principalement de graisse d'huile et de sueur des mains [7-8].

**b) Décapage mécanique** : cette opération consiste à préparer la surface d'accrochage par un meulage permettant de rugosifier la surface de l'échantillon.



**c) Sablage** : parmi les différentes méthodes de rugosification, nous avons utilisé le grenailage. Ce traitement 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 de grenaille utilisée est de 7 bars. Ce pré traitement garantit une bonne adhérence, les particules pénètre les interstices de la surface rugueuse et pour ainsi dire s'agrippent à ses aspérités.[7].

### III-1-3-2) PARAMÈTRES DE PROJECTION

Afin que la couche projetée s'amalgame le mieux possible avec le substrat, nous avons utilisé les conditions regroupées dans le tableau 4.

Pression d'air dans le moteur	3.8 bars
Pression d'oxygène	1.6 bars
Pression d'acétylène	1 bar
Vitesse d'avance du fil métallique	0.064 m/s
Angle de tir	90°
Distance pistolet - échantillon	160 mm

**Tableau 4: Paramètres de mise en service du pistolet.**

### III-1-3-3) MÉTALLISATION

Généralement, les dépôts métalliques sont réalisés après la projection d'une sous couche d'accrochage, nécessaire pour une bonne adhérence. Par contre le Molybdène on le dépose sans avoir recours à cette couche car l'expérience a prouvé que le Molybdène est un élément très adhérent sur les aciers[30],[ 35].

Dans notre cas, nous avons utilisé un chalumeau oxyacétylénique combiné avec une buse électrique amènent l'air comprimé nécessaire à la pulvérisation qui constitue l'organe de fusion et de projection du métal (figure 21). Au chalumeau est associé un triple robinet qui l'alimente en gaz carburant et de combustible et en air de projection. Un bloc mécanisme assure l'entraînement du fil, serré entre deux molettes. Un moteur à air entraîne mécanisme.

Le pistolet ainsi défini est relié à un appareillage de mesure et de contrôle des pressions et débits de gaz rassemblé sur un tableau. A ce tableau arrivent ordinairement l'air épuré et les gaz déjà détendus en un premier stade à la sortie des bouteilles.

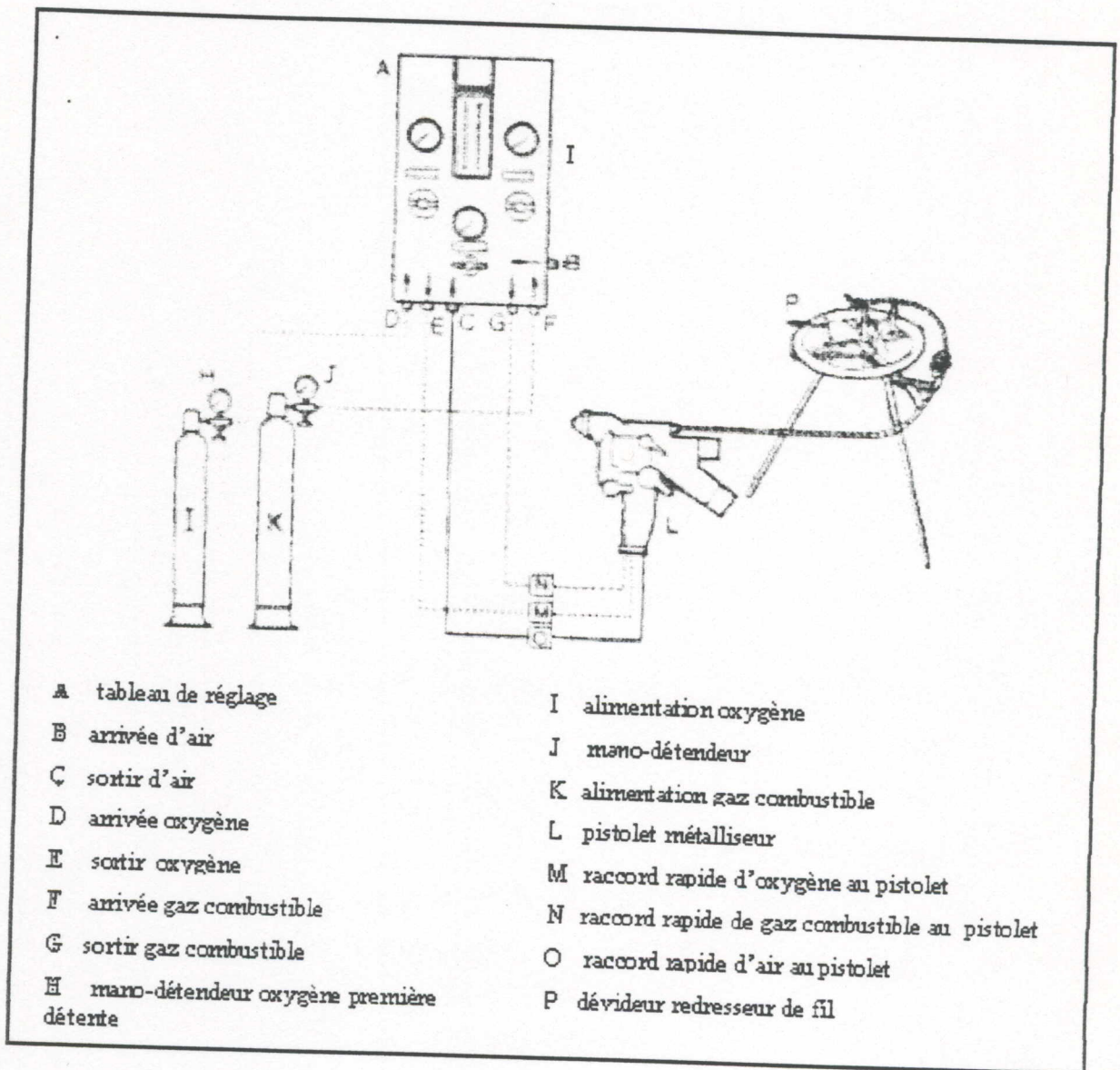


Figure 21 : Installation type d'un chalumeau oxyacétylénique



**III-2 ) CARACTÉRISATIONS PHYSICO-CHIMIQUES DES BIMATÉRIAUX :****III-2-1 ) INTRODUCTION :**

Parmi les moyens utilisés pour la caractérisation de notre interface, figurent le microscope optique (M.O) et des mesures de micro dureté. Ces techniques permettent d'avoir des informations sur la microstructure, la morphologie et la composition des différentes couches ainsi que sur la formation des composés intermétalliques et les carbures au niveau de l'interface.

**III-2-2) OBSERVATION AU M.O****III-2-2-1) PRÉPARATION DES ÉCHANTILLONS :**

L'observation au M.O est effectuée sur des surfaces convenablement préparées ayant subies des polissages mécaniques avec des papiers abrasifs à granulométrie de plus en plus faible (120,320,600). Les différentes structures observées ont été effectuées au niveau de l'interface, comprenant le dépôt et substrat.

Les micrographies obtenues montre respectivement les trois types d'échantillons étudiés, le bimatériau non entaillé avec une épaisseur de dépôt de 0.3mm (figure 22-23) le bimatériau non entaillé avec une épaisseur de dépôt de 0.25mm (figure 24-25) et enfin le bimatériau non entaillé avec une épaisseur de dépôt de 0.2mm (figure 26-27).

Ces photos ont été prises avant et après l'essai de flexion trois points monotone afin de nous permettre de voir l'effet des efforts extérieurs sur le revêtement préconisé, ainsi que son adhérence avec le substrat.



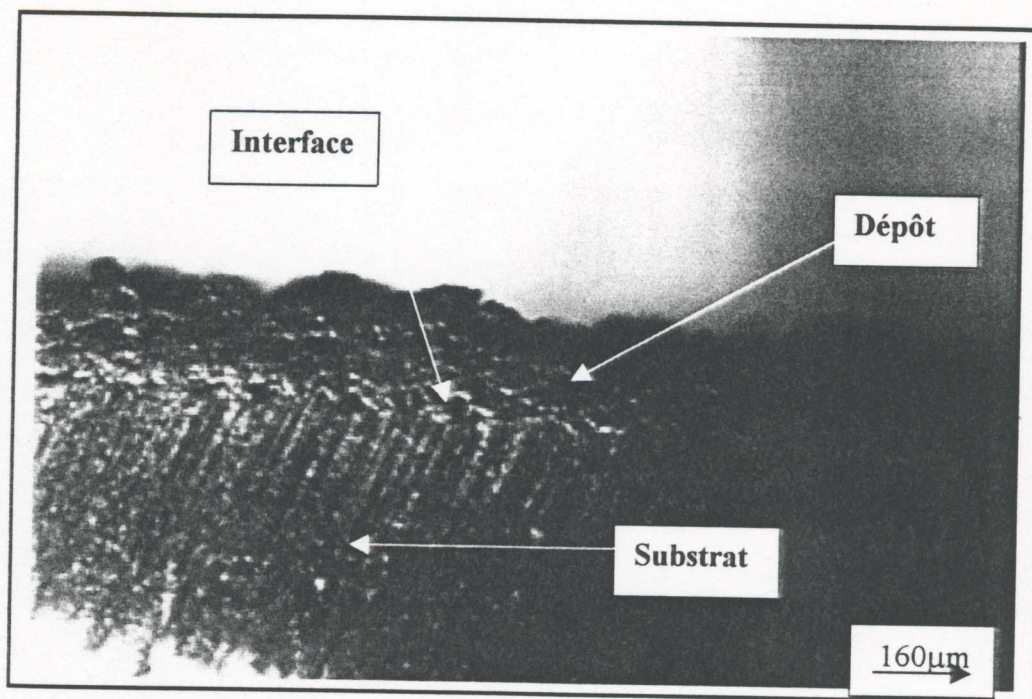


Figure 22 :Multimatériau avec un dépôt de 0.2mm d'épaisseur avant l'essai de flexion

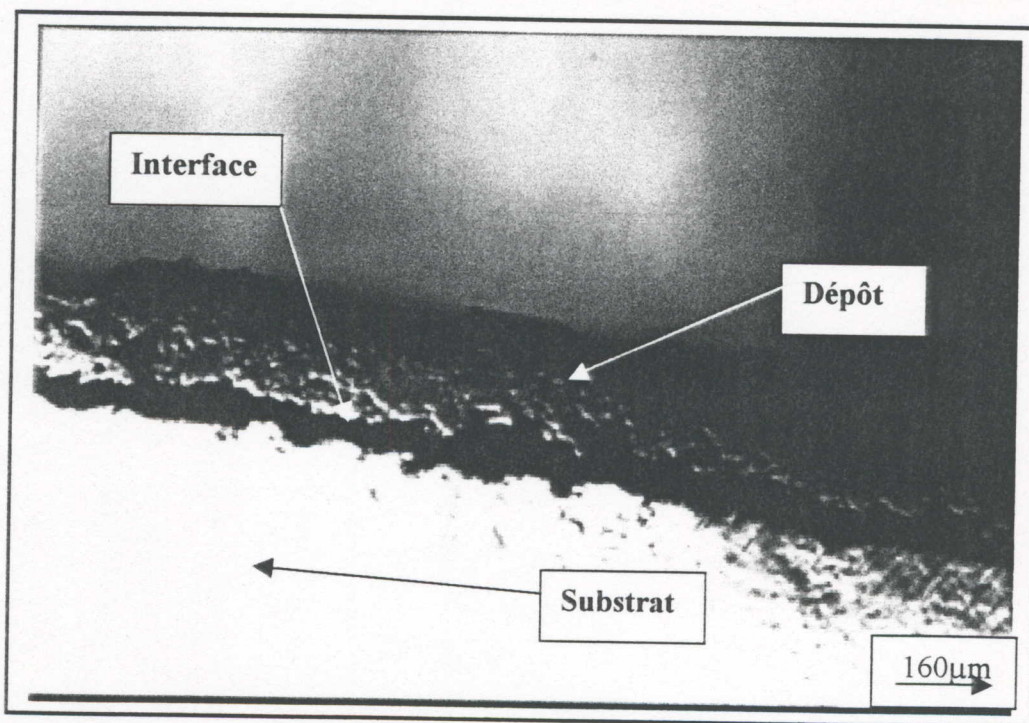


Figure 23 :Multimatériau avec un dépôt de 0.2mm d'épaisseur avant l'essai de flexion



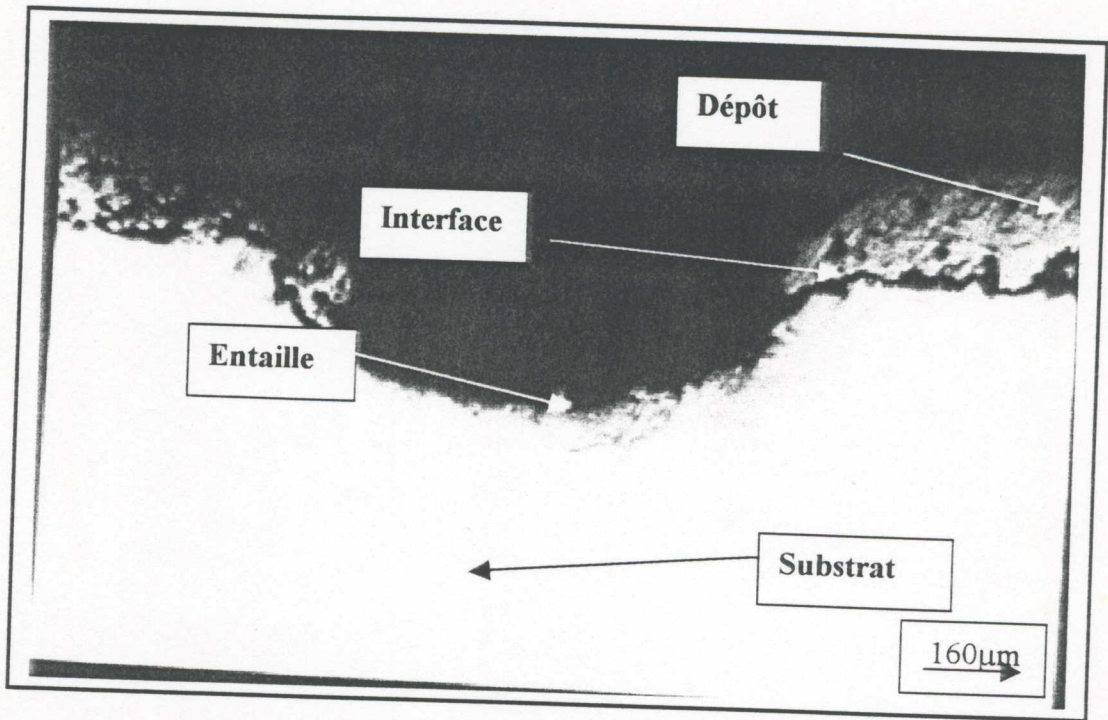


Figure 24 :Multimatériau entaillé avec un dépôt de 0.25mm d'épaisseur avant l'essai de flexion

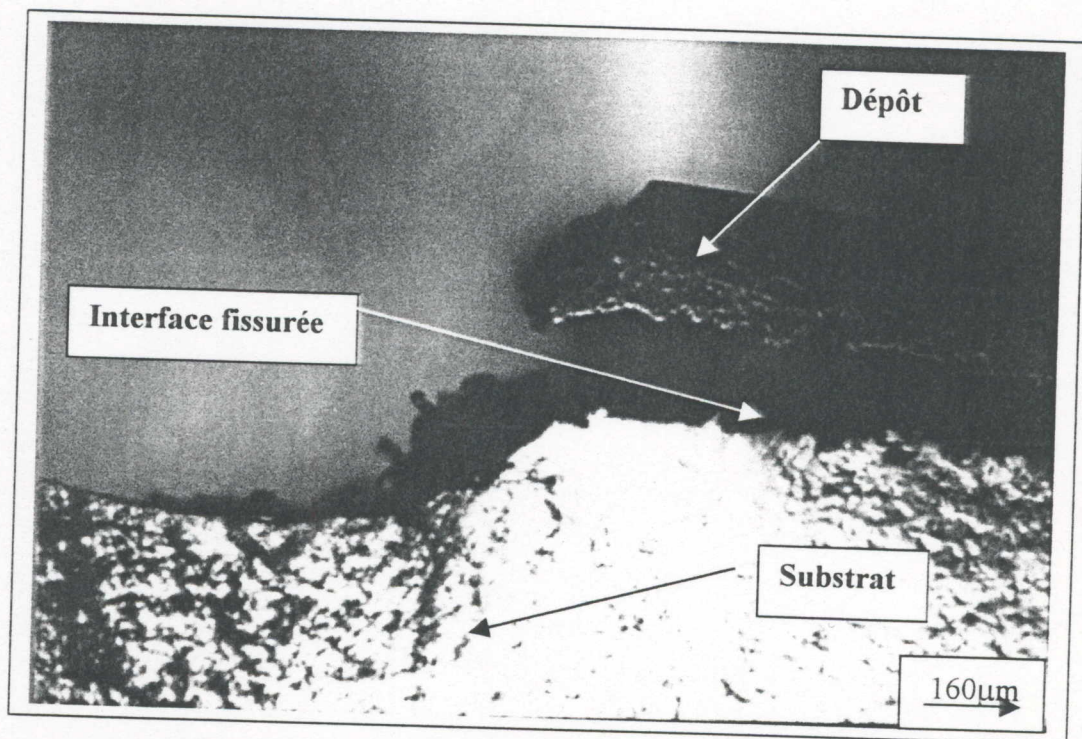


Figure 25 :Multimatériau entaillé avec un dépôt de 0.25mm d'épaisseur après l'essai de flexion



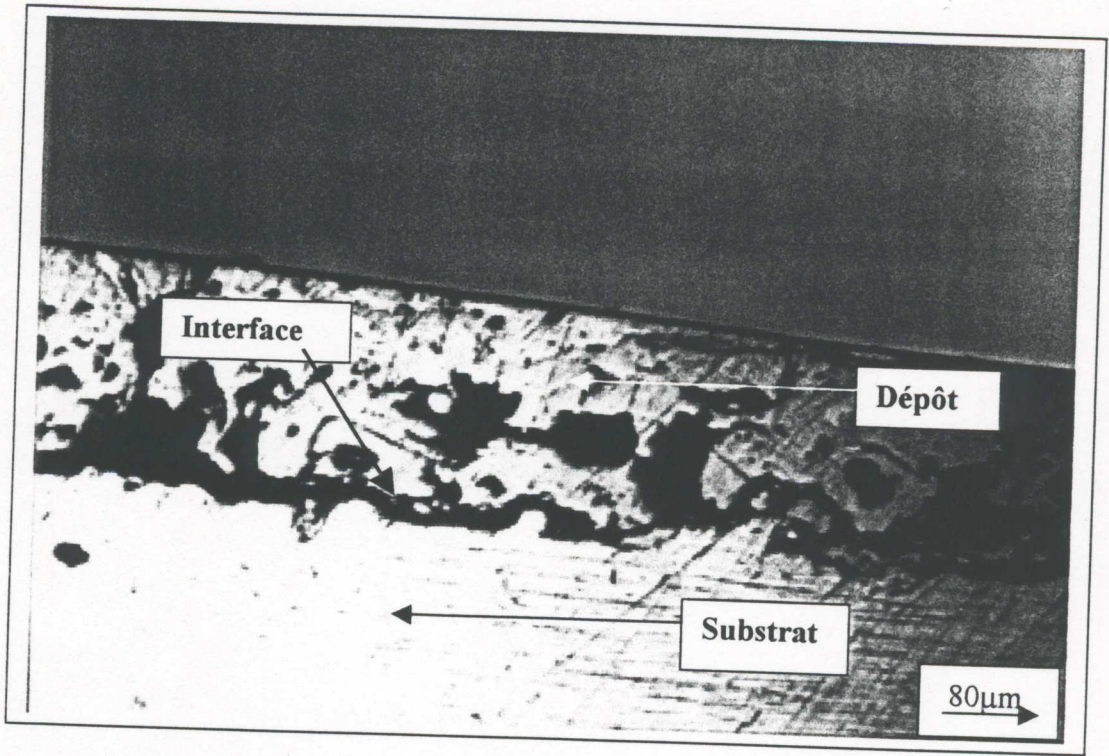


Figure 26 :Multimatériau avec un dépôt de 0.3mm d'épaisseur avant l'essai de flexion

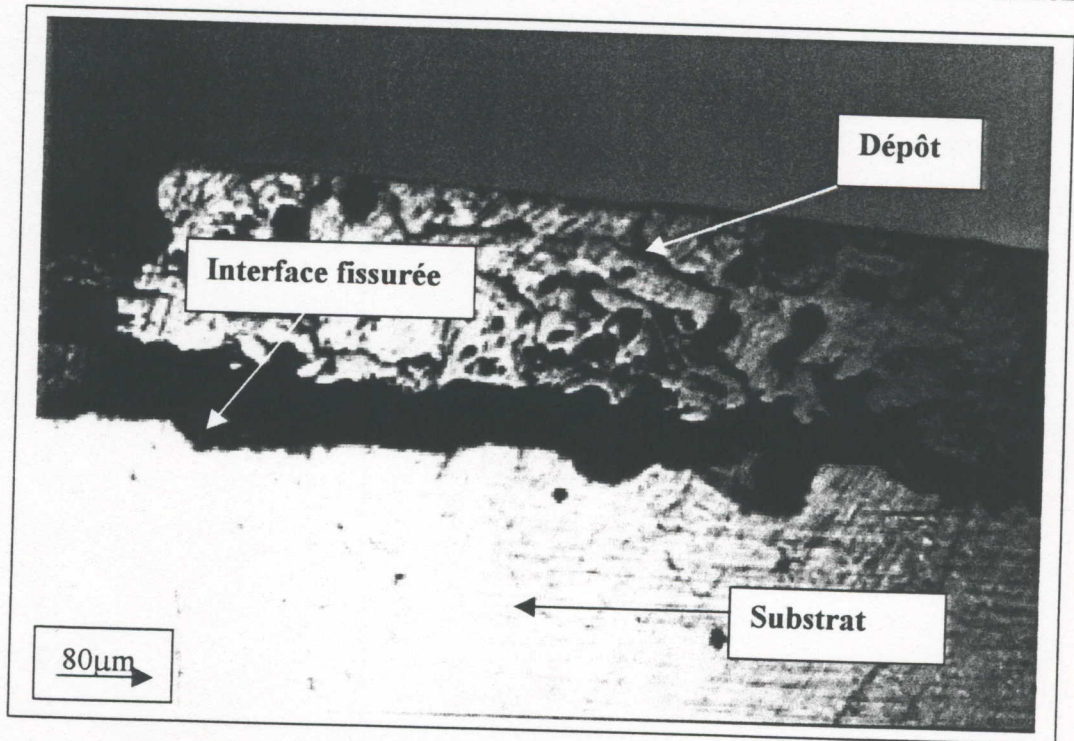


Figure 27 :Multimatériau avec un dépôt de 0.3mm d'épaisseur après l'essai de flexion



### III-2-2-2) RÉSULTATS

L'examen en microscopie optique nous a permis de faire la différence entre le dépôt, le substrat et l'interface, comme il nous a permis de mesurer les longueurs de fissures provoquées lors de l'essai de flexion et les épaisseurs des dépôts .

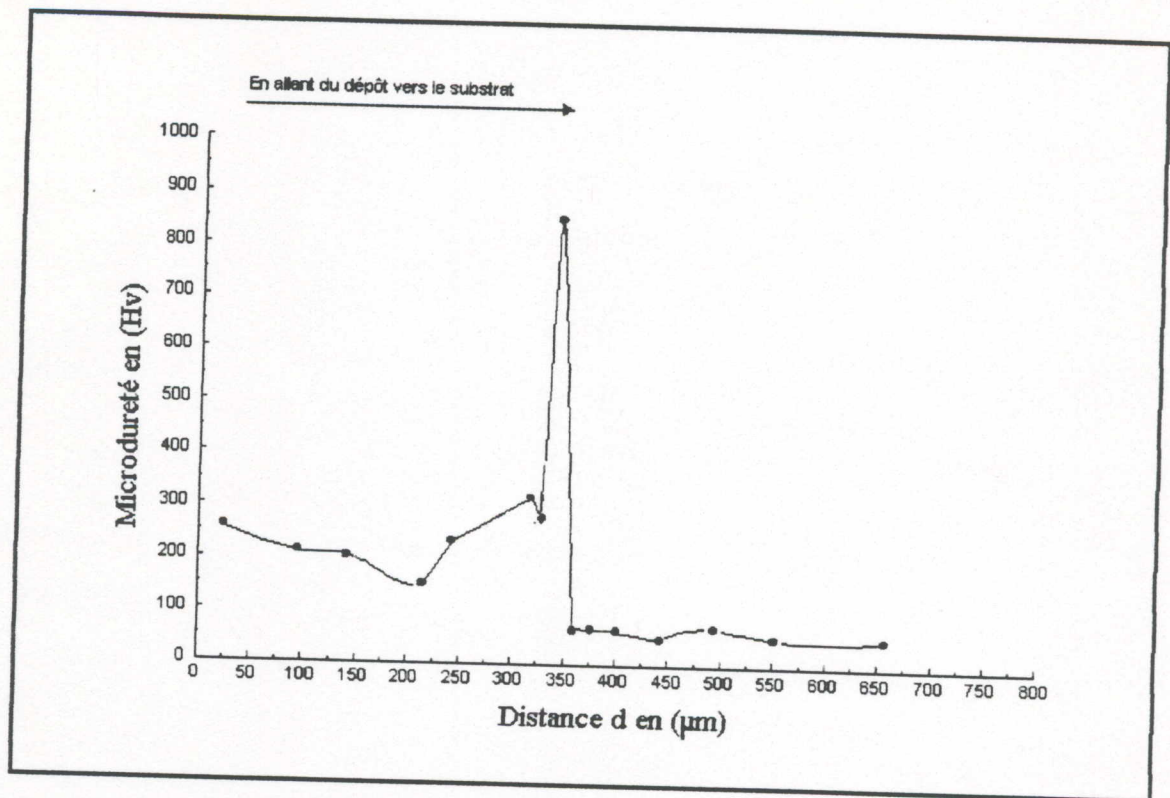
### III-3 ) ANALYSES MÉCANIQUES

#### III-3-1) ESSAI DE MICRO DURETÉ

Les mesures de micro dureté « Vickers » ont été effectuées sur la surface de l'échantillon en faisant une succession de pointés alignés selon une même direction, en allant du dépôt vers le substrat .

Il faut noter que les échantillons testés ont subi un polissage préalable. La valeur de la micro dureté obtenue représente la moyenne arithmétique de trois essais différents . Pour tous nos essai, la charge était de 0.49 N et le pas était variable.

La figure 28 présente la courbe schématisant la variation de la micro dureté d'un échantillon de 0.35 mm d'épaisseur de dépôt pour des différents endroit en allant du matériau d'apport vers le substrat.



**Figure 28: Évolution de la micro dureté dans un multimatériau pour une épaisseur de dépôt  $e=0.35\text{mm}$**

La première remarque qu'on peut faire sur cette courbe c'est que la micro dureté du dépôt est supérieure à celle du substrat. C'est un résultat encourageant vis à vis de notre objectif qui consiste à avoir un matériau résistant aux conditions sévères de frottement et d'usures sachant que, le Molybdène est conseillé dans ce type de confrontation, à savoir la possibilité de perdre quelques aspérités pendant le rodage, qui par la suite joueront le rôle de lubrifiant diminuant ainsi le coefficient de frottement et donc l'usure du matériau [35].

La deuxième remarque retenue est l'augmentation importante de la micro dureté vers l'interface, due essentiellement à l'écrouissage créé par la projection successive des couches de dépôts.



### III-3-2) TEST D'ARRACHEMENT

La qualité de l'accrochage du Molybdène sur l'acier 42CD4 peut être déterminée par un test d'arrachement (fig. 29).

La technique consiste à coller les deux surfaces par une résine synthétique à prise rapide (tree bond) ou l'équipement est un appareil de traction. L'observation de la localisation de la rupture (à l'interface revêtement/substrat) fournit une indication sur le degré d'adhérence du dépôt sur le métal de base.

Ainsi, nous pouvons estimer la contrainte de la rupture nécessaire pour l'arrachement du dépôt.  $\sigma = F / S \approx 7.2 \text{ daN/mm}^2$  [35].

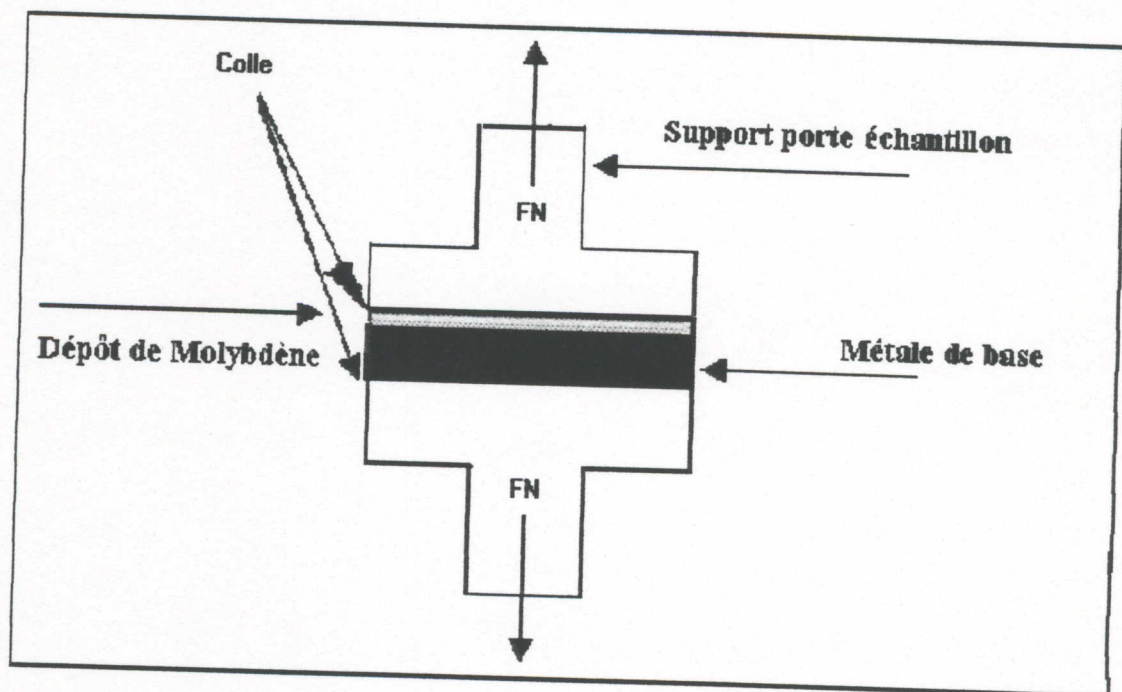


Figure 29: Représentation schématique du test d'arrachement

### III-4) FLEXION TROIS POINTS MONOTONE :

#### III-4-1) INTRODUCTION

Selon les couples substrat-revêtement élaborés par projection thermique, les propriétés mécaniques de chacun des matériaux peuvent être très différentes. Il faut s'assurer que lors de sollicitation mécaniques, elles ne sont pas à l'origine d'interaction entre substrat revêtement susceptible d'endommager le multimatériau.

Compte tenu de ces perspectives, il est certain que la connaissance de l'adhérence et la rupture de ces nouveaux devient un sujet de préoccupation plus que jamais d'actualité.

Nous nous proposons dans un premier temps, à partir d'essai de flexion trois points monotone de mesurer les longueurs de fissures qui seront produites l'interface lors du chargement.

Dans un second temps, nous tenterons à déterminer les facteurs d'intensité de contraintes des éprouvettes entaillées et non entaillées, avec des épaisseurs différentes.

#### III-4-2) MÉTHODOLOGIE D'ESSAI :

Les essais de flexion trois points monotone sont réalisés suivant les recommandations de la norme française NFT-104 et 105. et les éprouvettes utilisées sont données dans la figure 20.

L'appareillage est composé d'un ensemble de flexion trois points, doté d'un capteur d'effort à juges de déformation et d'un capteur de déplacements inductif. La panne centrale de rayon 5mm ainsi que les appuis latéraux de rayons 2.5mm sont en acier figure (30).

Le principe de mesure consiste à suivre en continu la force appliquée  $F$ , qu'on a fait varier à chaque changement d'éprouvette, et de définir le déplacement provoqué  $d$  (flèche). Un système multitâche permet l'acquisition et le traitement des données ainsi que le tracé des courbes d'évolution.



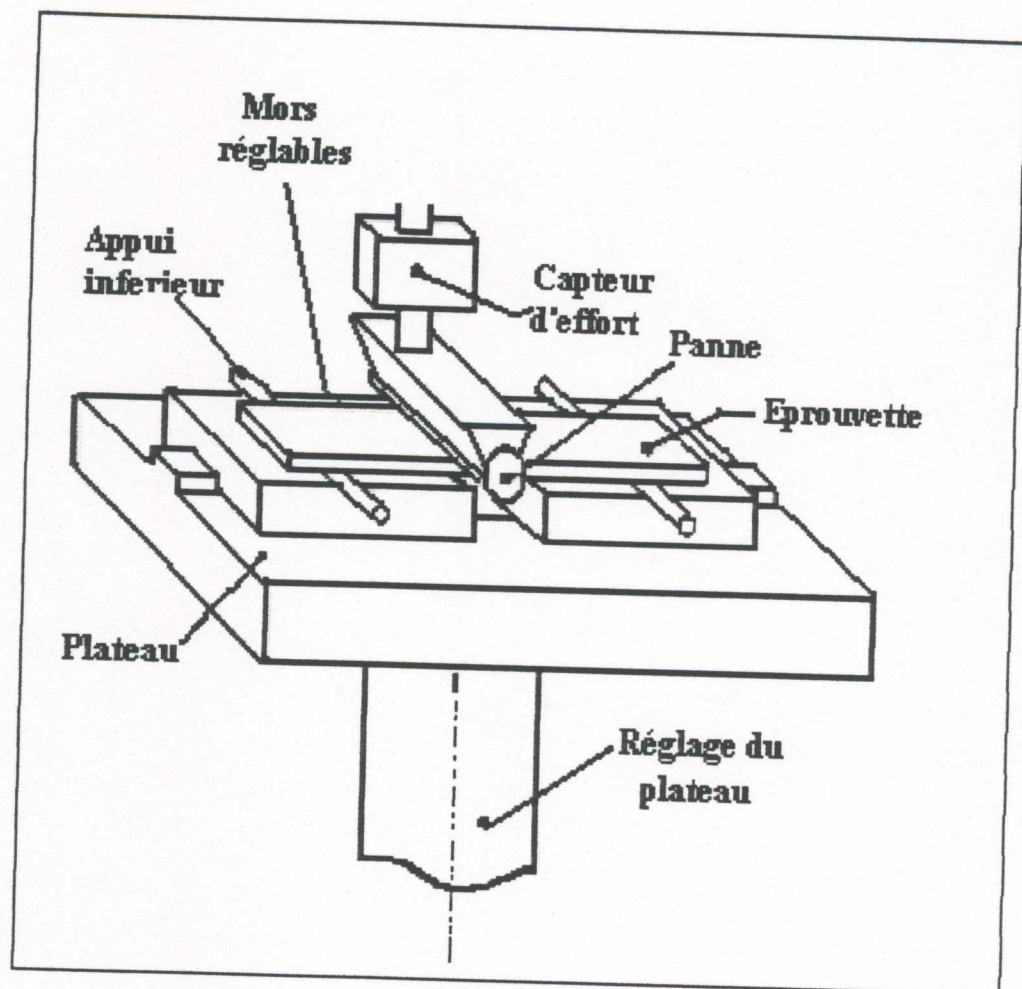


Figure 30 : Principe et dispositif de l'essai de flexion

L'enregistrement de l'effort  $F$  en fonction du déplacement  $d$  et la mesure de la longueur de la fissure appropriée, nous ont permis de déterminer l'énergie nécessaire pour produire une telle fissure.

Les conditions expérimentales utilisées pour nos essais sont :

- vitesse de sollicitation : 20mm/mn
- température d'essai : 27°C
- longueur entre appuis : 40mm

### III-5) CARACTÉRISATION ET RUPTURE DE L'INTERFACE MO/42CD4

La tenue de l'interface du couple Mo/42CD4 a été caractérisée par des essais de flexion trois points monotone réalisés sur trois différents types d'éprouvettes.

- Epreuves non entaillées avec une épaisseur de dépôt de 03mm (figure 31)
- Epreuves non entaillées avec une épaisseur de dépôt de 0.2mm (figure 32)
- Epreuves entaillées avec une épaisseur de dépôt de 0.25mm (figure33).

L'analyse métallographique des éprouvettes ainsi élaborées a permis de mettre en évidence l'épaisseur des dépôts, la longueur des fissures et la qualité de l'interface.

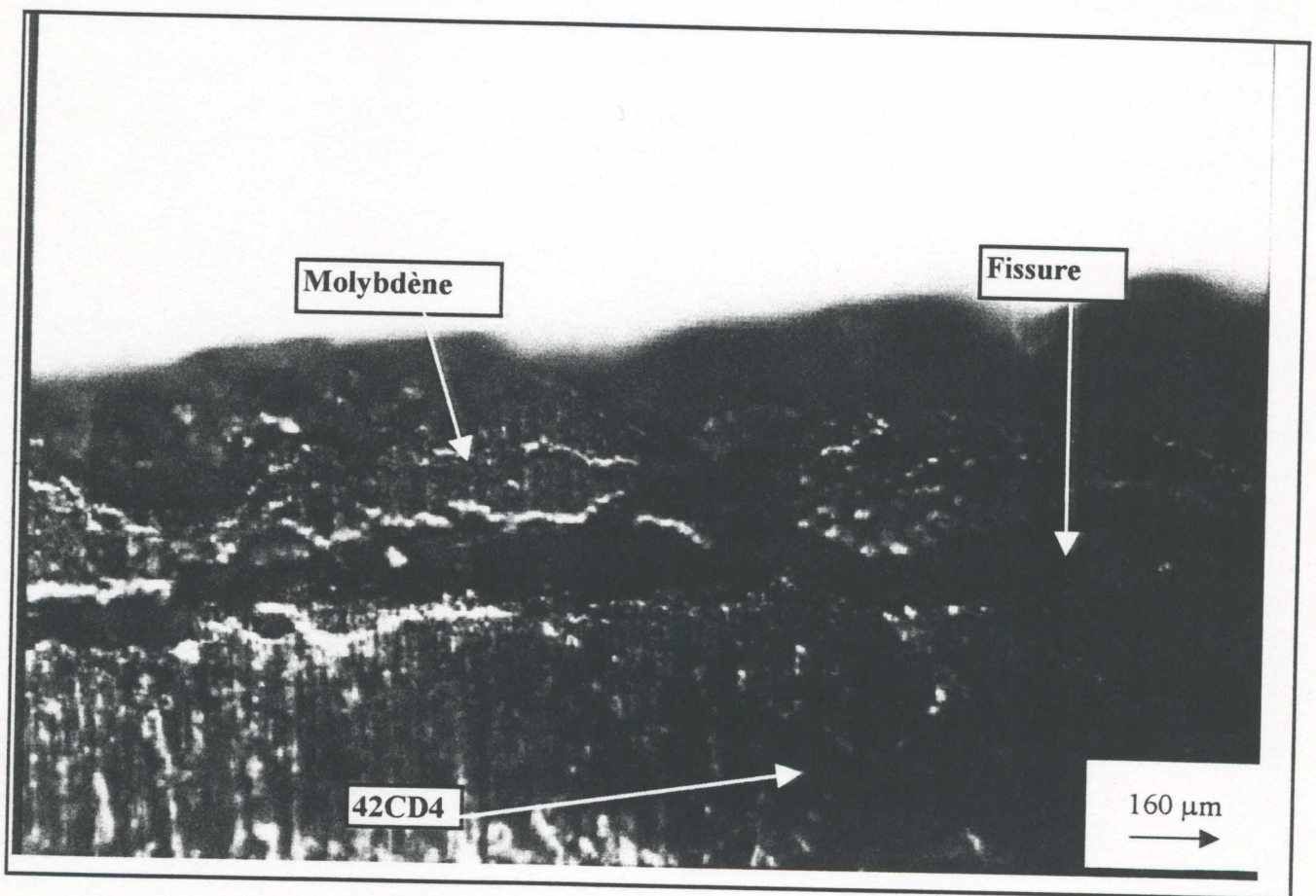


Figure 31: Echantillon non entaillé avec une épaisseur  $e = 0.3\text{mm}$



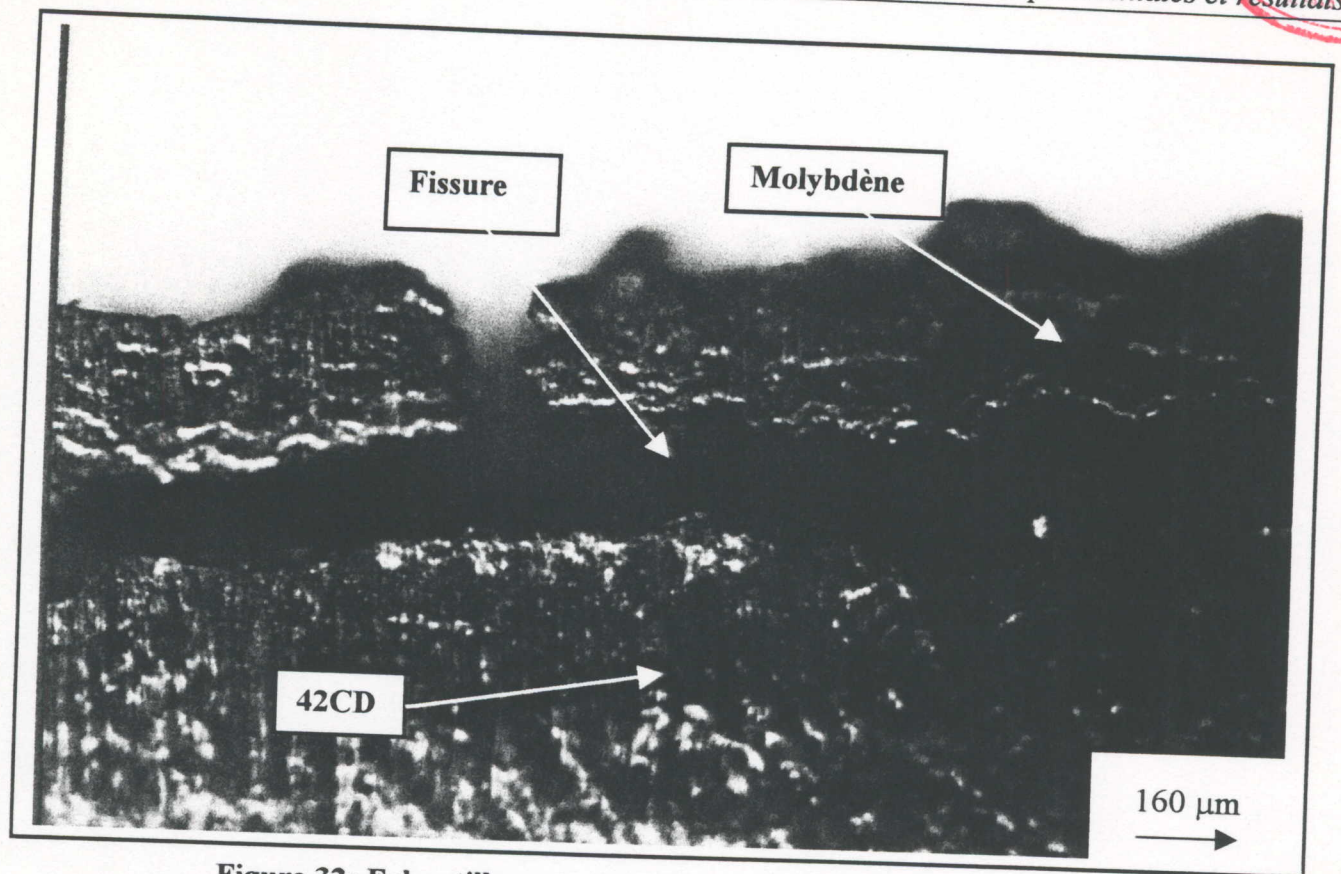


Figure 32: Echantillon non entaillé avec une épaisseur  $e = 0.2\text{mm}$

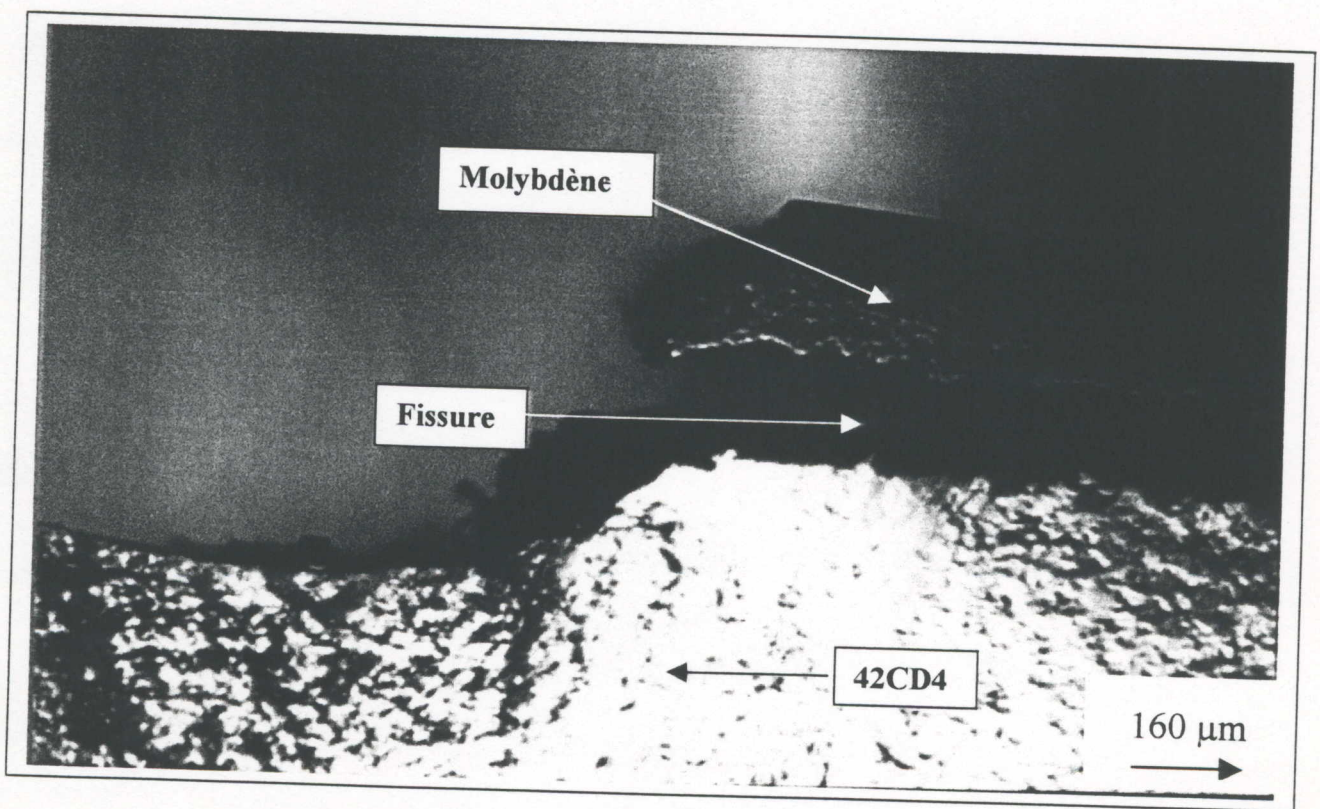


Figure 33: Echantillon entaillé avec une épaisseur  $e=0.25\text{ mm}$



### III-6- CALCUL DU FACTEUR D'INTENSITÉ DE CONTRAINTE :

L'essai de flexion trois points a provoqué des fissures à l'interface dont la mesure des longueurs a été réalisée à l'aide d'un microscope optique.

Pour calculer le facteur d'intensité de contrainte, nous avons utilisé la technique de la méthode de la complaisance [13] qui se résume comme suit :

- 1) Après obtention des courbes (charge appliquée en fonction du déplacement) pour chaque type d'éprouvette, on détermine le déplacement  $d_i$  correspondant à chaque force appliquée  $F_i$ , (voir annexe A).
- 2) La longueur de la fissure  $a_i$  étant mesurée sur les micrographies.
- 3) Le calcul de l'énergie de déformation  $U_i$  a été effectué pour chaque longueur de fissure  $a_i$  en fonction des différents déplacements  $d_i$ .  $U$  est calculée à partir des courbes charge-déplacement représentées à l'annexe A,  $U$  = l'aire de la surface limitée par le tracé de la courbe et l'axe des abscisses (l'axe représentant le déplacement  $d$ ). Ainsi, on a obtenu un diagramme donnant  $U$  en fonction de  $a$  pour chaque valeur de  $d$ .
- 4) Une formule mathématique correspondant à l'évolution de l'énergie  $U$  en fonction de la longueur de fissure a été déduite (voir les figures 34, 35 et 36).
- 5) La dérivée  $dU/da$  par rapport à l'épaisseur  $B$  nous donne finalement la valeur de  $J$ .

Sachant que la formule empirique de l'intégrale  $J$  donnée par Begley et Landes [13] s'exprime en fonction de la variation de l'énergie de déformation élastique  $U$  par unité d'épaisseur  $B$ .

$$J = -\frac{1}{B} \frac{dU}{da}$$

Les facteurs  $J$  et  $K_I$  étant reliés entre eux par:

$$J = \frac{K_I^2}{E}$$

en contraintes planes

et

$$J = \frac{1-\nu^2}{E} K_I^2$$

en déformations planes.



Et puisque l'épaisseur du dépôt n'est pas très importante, nous sommes donc en état de contraintes planes d'où  $K_I = \sqrt{J \times E}$ .

Néanmoins, on doit calculer le module de Young  $E$  équivalent pour les deux matériaux [32-33] selon la relation suivante :

$$E_e = E_s \left[ \frac{1}{(1-V_d) + \frac{E_s}{E_d} V_d} \right]$$

$$V_d = \frac{\text{volume de dépôt}}{\text{volume total}}$$

$V_d$  est appelé la teneur du dépôt

La teneur en volume du substrat est déterminée par la formule :

$$V_s = \frac{\text{volume de substrat}}{\text{volume total}}$$

$$\text{Ou: } V_s = 1 - V_d$$

$E_e$  = module d'élasticité équivalent

$E_d$  = module d'élasticité du dépôt

$E_s$  = module d'élasticité du substrat

L'énergie de déformation pour les différents cas étudiés est déterminée par méthode analytique donnant ainsi  $U$  en fonction de la longueur de la fissure  $a$  (figures 34, 35 et 36).

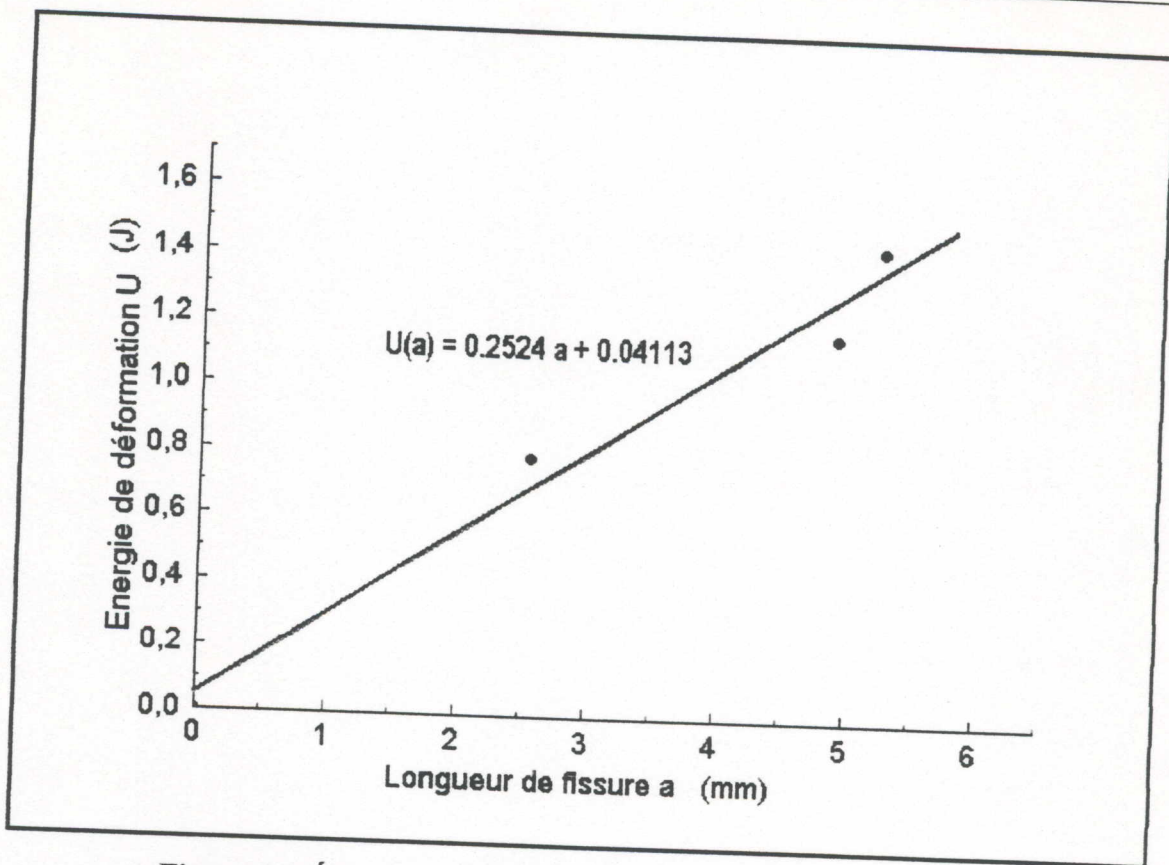


Figure 34 : Échantillon sans entaille et d'épaisseur  $e = 0.3\text{mm}$

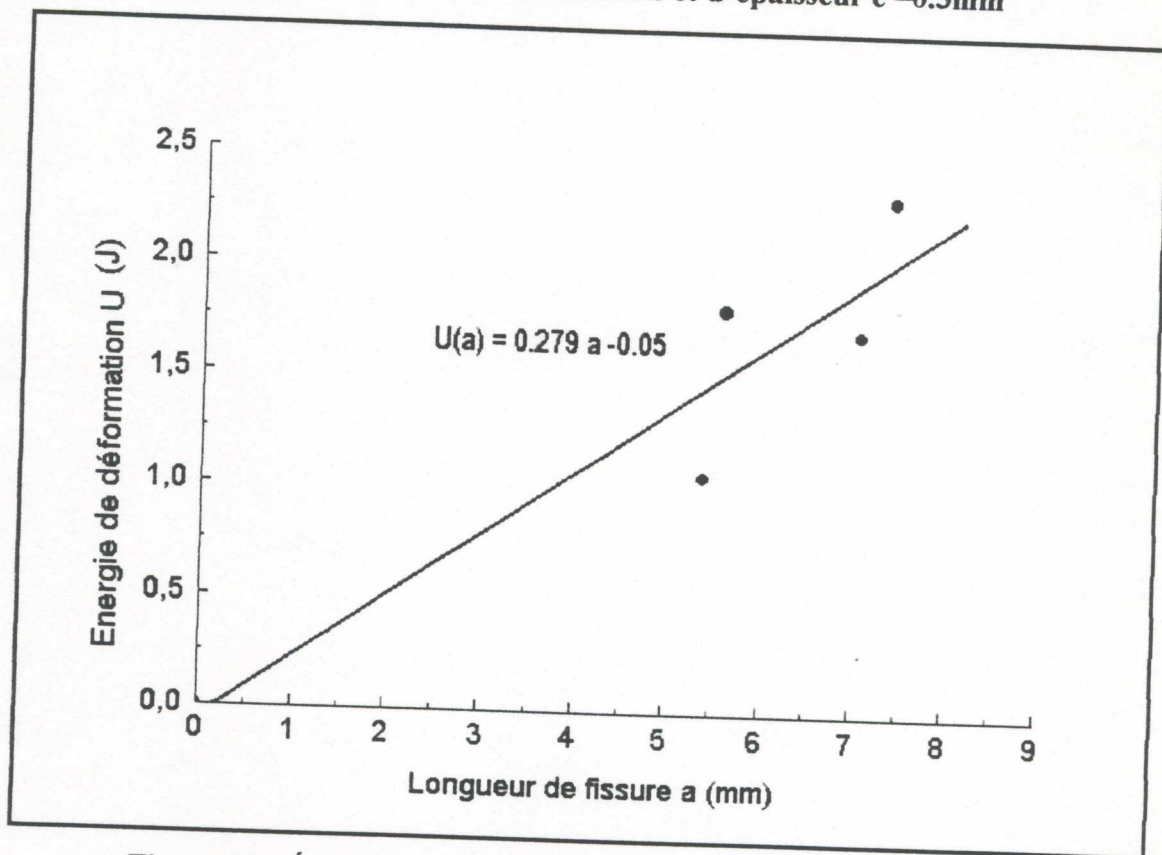


Figure 35 : Échantillon sans entaille et d'épaisseur  $e = 0.2\text{mm}$



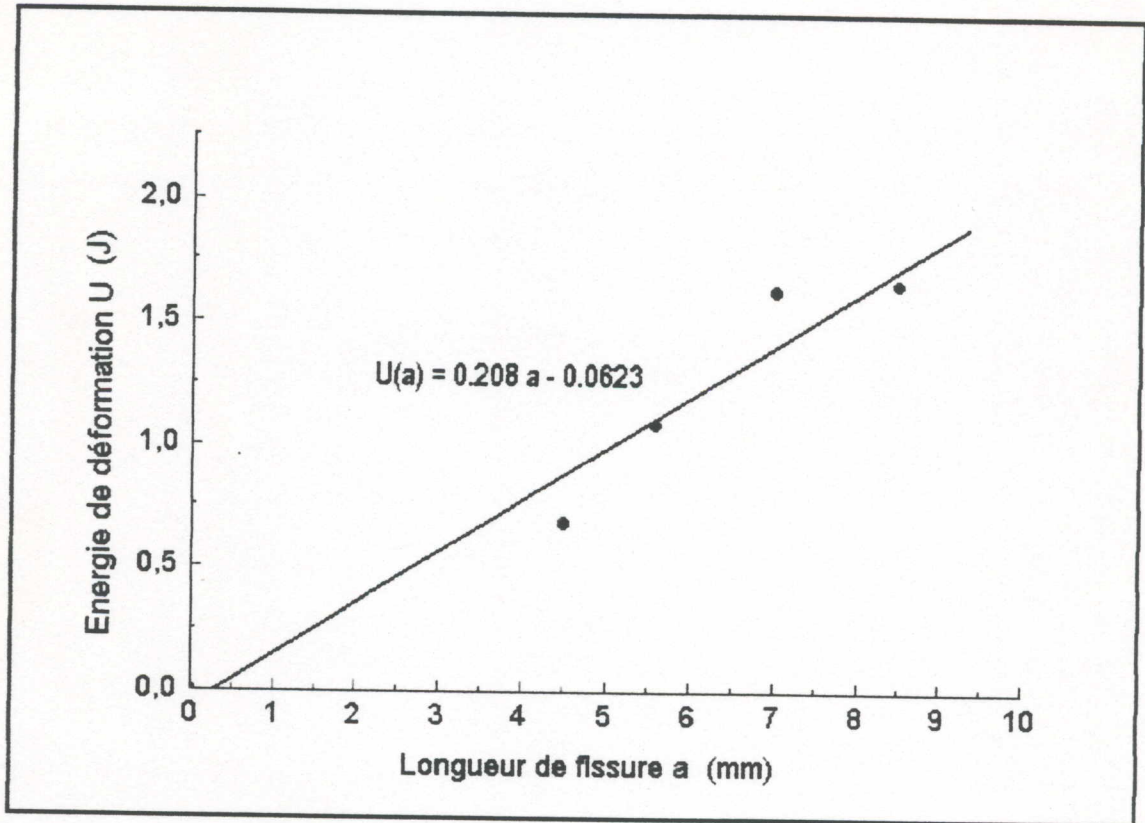


Figure 36 : Échantillon entaillé avec une épaisseur  $e = 0.25\text{mm}$

Les applications numériques nous ont donné les valeurs suivantes du facteur d'intensité de contrainte (tableau 5).

Échantillon n°	Valeur du facteur d'intensité de contrainte $K_1$ ( $\text{MPa} \cdot \sqrt{m}$ )
1	138
2	160.08
3	130.5

Tableau 5: Valeurs des facteurs d'intensité de contrainte

- Échantillon 1 : multimatériau non entaillé avec une épaisseur de dépôt  $e=0.3\text{mm}$
- Échantillon 2 : multimatériau non entaillé avec une épaisseur de dépôt  $e=0.2\text{mm}$
- Échantillon 3 : multimatériau entaillé avec une épaisseur de dépôt  $e=0.25\text{mm}$

La figure 37 montre l'évolution du facteur d'intensité de contrainte en fonction de l'épaisseur du revêtement avec la présence de défaut.

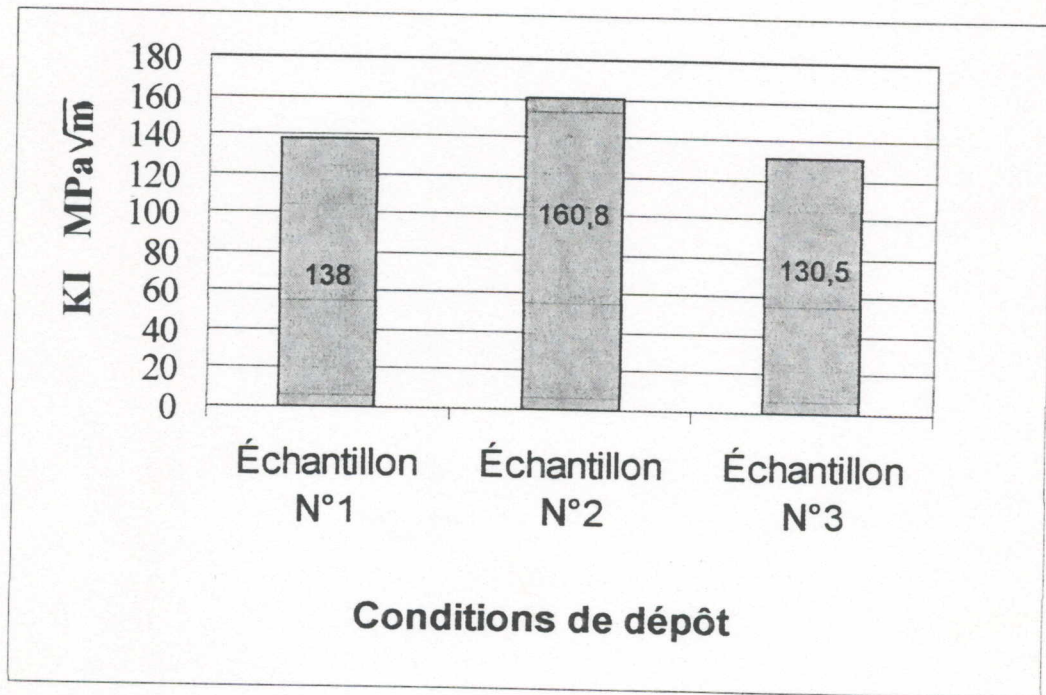


Figure 37 : Évolution du facteur d'intensité de contrainte pour les trois type d'échantillons étudiés

D'après les calculs et les résultats trouvés, on peut dire que le multimatériau non entaillé, réalisé avec une épaisseur de dépôt  $e=0.2\text{mm}$ , possède le meilleur facteur d'intensité de contrainte, suivi par celui non entaillé avec une épaisseur de dépôt  $e=0.3\text{mm}$ . Le facteur d'intensité de contrainte le plus petit concerne le multimatériau entaillé avec une épaisseur  $e=0.25\text{mm}$ .

Pour cela, on conclut que, avec une projection thermique réalisée avec un chalumeau oxyacétylénique, et dans les conditions de projection précédemment préconisées, il faut traiter les pièces avec un revêtement mince pour ne pas avoir un nombre important de porosités. En cas de présence d'un défaut profond sur la surface à revêtir, comme une entaille par exemple, il faut changer l'appareillage, pour pouvoir revêtir le défaut avec une couche plus épaisse avec de meilleures propriétés.



*Conclusion générale*

## CONCLUSION GÉNÉRALE

L'utilisation des revêtements métalliques est actuellement très répandue dans divers domaines de l'industrie ( mécanique, biomédical etc....).

L'intérêt d'un tel revêtement est de conférer à la pièce des propriétés superficielles capables de répondre aux exigences industrielles. Ainsi, la pièce peut présenter des propriétés de protection surtout contre la corrosion, l'usure, le frottement, la fatigue et la fissuration.

Notre travail a consisté dans un premier temps à présenter les techniques de la projection thermique utilisées, ainsi que leurs domaines d'emploi. Aussi, nous avons présenté quelques règles sur la mécanique de la rupture et celle de la rupture élasto-plastique. L'application de ces lois aux matériaux composites a été prise en considération.

En ce qui concerne notre étude expérimentale, nous avons étudié un revêtement de Molybdène sur un acier de construction mécanique 42CD4, réalisé par projection thermique au chalumeau oxyacétylénique.

Par suite, nous nous sommes intéressés à l'étude de la fissuration à l'interface et l'influence des efforts extérieurs sur l'adhérence du dépôt avec le substrat.

Les différentes observations ont montré la nature des matériaux (dépôt et substrat) composants le bimatériel et leur l'interface avec une liaison purement mécanique.

Les mesures de micro dureté ont montré que celle du dépôt est supérieure à celle du substrat. Ce résultat est favorable dans le cas du comportement tribologique.

Des fissures sont apparues à l'interface après l'essai de flexion dont on a pu mesurer les longueurs par le biais du microscope optique et par suite on a calculé leur énergie de déformation.

Par l'utilisation d'une méthode expérimentale, on a calculé les facteurs d'intensité de contrainte des trois types d'échantillons : non entaillé avec une épaisseur de dépôt  $e=0.3\text{mm}$ , non entaillé avec une épaisseur de dépôt  $e=0.2\text{mm}$  et entaillé avec une épaisseur de dépôt  $e=0.25\text{mm}$ . Le résultat indique que le meilleur facteur d'intensité de contrainte



### *Conclusion générale*

---

(K<sub>I</sub>) est celui des bimatériaux réalisés avec une épaisseur de dépôt  $e=0.2\text{mm}$  (couche mince). Comme on a remarqué aussi que les multimatériaux ayant une épaisseur de dépôt  $e=0.3\text{mm}$ , après l'essai de flexion, possèdent des longueurs de fissures plus importantes que celles des premiers ..

Pratiquement, on peut dire que pour un revêtement métallique par projection thermique avec un chalumeau oxyacétylénique, et dans les mêmes conditions que les nôtres, il faut revêtir les pièces par une couche mince. Pour les dépôts importants, il faut penser à appliquer des post-traitements permettant de diminuer les porosités et les contraintes résiduelles présentes.

La présence de défauts profonds sur la surface à revêtir, comme les entailles par exemple, exige l'utilisation d'appareillages plus sophistiqués et des paramètres de projection plus appropriés.

*Références  
bibliographiques*



RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **M. DOCUS**  
Revêtement par projection thermique.  
Technique de l'ingénieur M5. M1645 (1992).
- [2] **W.E. BALLARD**  
Metal spraying and flame deposition of ceramics and plastic.  
4ème édition, London (1963)
- [3] **H. CLAIRE, E. CRAWELL**  
Thermal spray coating  
Metal Hand book. Vol. 5. Ninth edition (1982)p.361
- [4] **MOHAND AMOKRANE BRADAI**  
Étude des mécanismes de dégradation par fatigue et caractérisation d'un multitraitement  
réalisé par projection thermique.  
Thèse de magistère E.N.P (1995)
- [5] **J.H. ZAAT**  
Proceeding of the 9<sup>th</sup> international thermal spraying conference,  
la Haye, mai (1980) pp.19-23
- [6] **Guide pratique de la projection thermique**  
CETIM (1989).pp 83-91
- [7] **P.CHANGNON, P.FAUCHAIS**  
The international journal of ceramic (1993) pp.104-119.
- [8] **H.S. INGHAM, A.P. SHEPARD**  
Manuel de projection à la flamme.  
METCO inc. Westbury, Long Island, New York (1965).
- [9] **N. MESRATI, NGUYEN DU, D.TREHEUX**  
Revue de Métallurgie - CIT/Science et Génie des Matériaux, 12 (1993) pp.1673-1680.
- [10] **C. COLIN**  
Les mécanismes de l'usure et du frottement. Traitement thermique N°208 (1987) pp. 79-96.
- [11] **P.CHAGNON, A.TRONCHE, P.FAUCHAIS**  
Frottement des dépôts d'alumine projetés par plasma.  
Industrie céramique N° 805 (1986) pp.319-324.
- [12] **R. LABBENS**  
Introduction à la mécanique de la rupture.  
Édition Pluralis, Paris (1980).

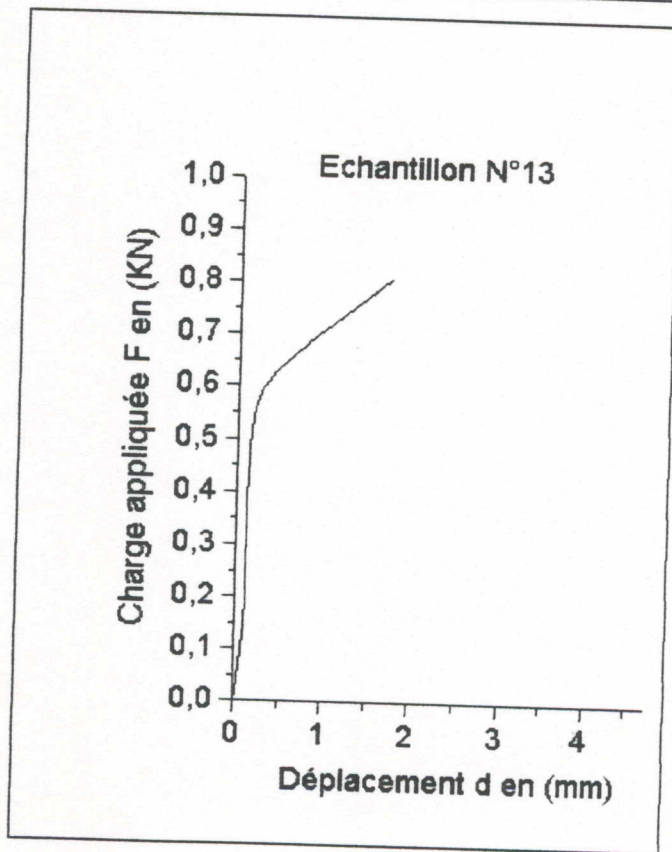
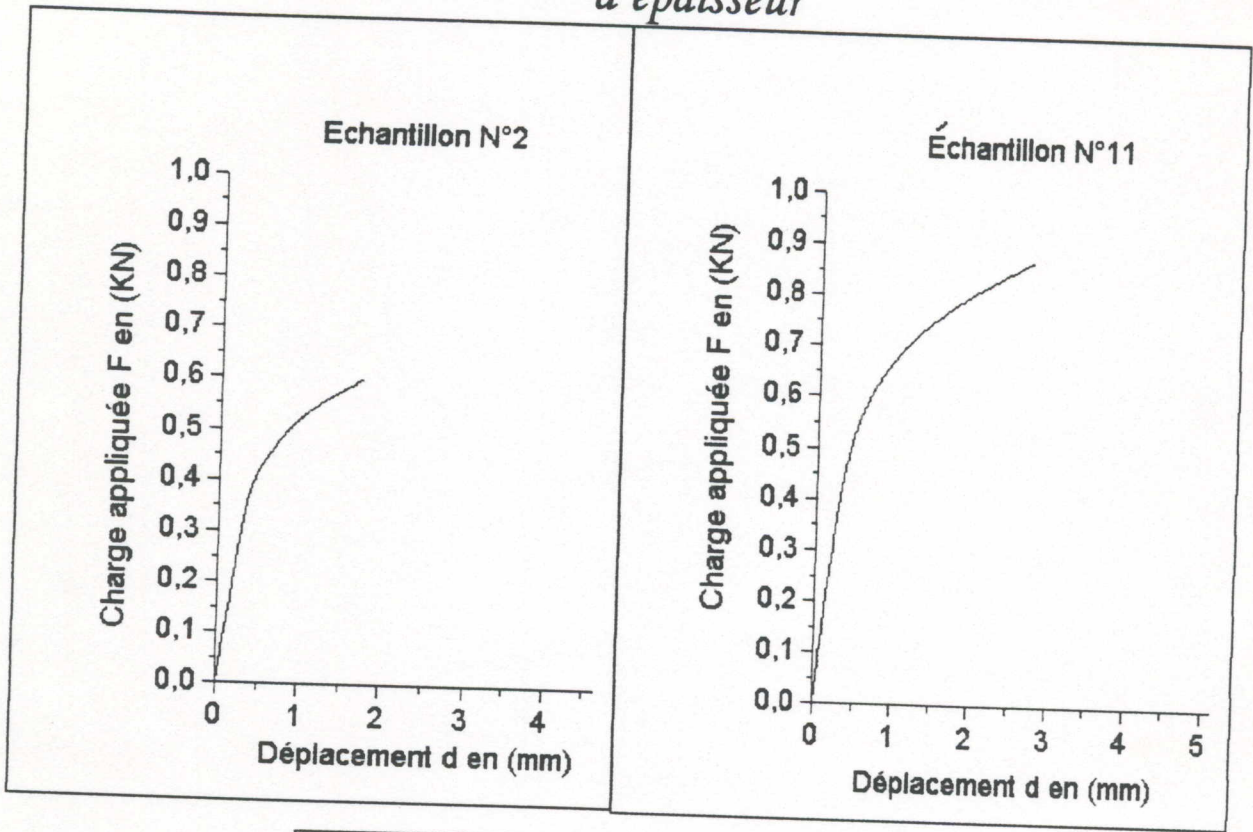
- [13] **B. BARTHELEMY**  
Notion pratique de la mécanique de la rupture.  
Édition Eyrolles, Paris (1980).
- [14] **G. PLUVINAGE**  
Mécanique élastoplastique de la rupture.  
Édition Cepadues (1989).
- [15] **H. D. BUI**  
Mécanique de la rupture fragile.  
Édition Masson (1978)
- [16] **J. LEMAITRE, J. L. CHABOCHE**  
Mécanique des matériaux solides.  
Édition Bordas, Paris (1985)
- [17] **A. BRAND, J. F. FLAVENOT, R. GREGOIRE, C. TOUNIER**  
Données technologiques sur la fatigue  
CETIM(1992)
- [18] **J. BAILON, C. BATHIAS**  
Fatigue des matériaux et des structures.  
École d'été, Québec (1978)
- [19] **D. FRANÇOIS, A. PINEAU, A. ZAOUI**  
Comportement mécanique des matériaux.  
Edition Hermès (1992)
- [20] **G. FANTOZZI**  
Rupture des matériaux : Propriétés mécaniques et comportement élastique des matériaux.  
I. N. S. A de Lyon (1989)
- [21] **G. FANTOZZI**  
Mécanique non linéaire de la rupture.  
I. N. S. A de Lyon (1989)
- [22] **M. RUHLE, A.G. EVANS, B. J. DALGLEISH, P. G. CHARALAMBIDES**  
The fracture energy of bimaterial interfaces.  
Mat. Sci, and Eng A 126 (1990) pp 53-64.
- [23] **A.R LANSDOWN AND A.L.PRICE**  
The pergamon materials engineering pratise series. Materials to resist wear  
Pergamon press Oxford (1986)
- [24] **P. BALLADON, J. HERITIER, C. JARBOIN**  
Strain-Hardening effects on fracture toughness and ductile crack Growth in austenitic  
stainless steels.  
American Society for testing and materails (1985)pp 293-307



- [25] **M. S. HU, A. G. EVANS**  
The cracking and decohesion of thin films on ductile substrates.  
Acta metallurgica. Vol 37 n°3 (1989).pp 917-925
- [26] **B.COQUILLET**  
Tenue en fatigue de fils d'acier inoxydable austénitique  
Thèse de doctorat, E.C Lyon (1987).
- [27] **H. HERMAN**  
Structural materials : Properties, Microstructure and Processing,  
Materials Science and Engineering. Volume A 149 N° 2 (1992).
- [28] **B. AGIUS, M. FROMENT**  
Surfaces, interfaces et films minces.  
Édition Dunod (1990).
- [29] **H. ADJROUH**  
Adhérence et réactivité des multimatériaux à base de graphite.  
Thèse Docteur Ingénieur. E.C Lyon (1992).
- [30] **N. MESRATI**  
Réalisation et analyse de l'adhérence dans des multimatériaux type Al(Si) -ZrO<sub>2</sub> et  
graphite -Metal ou céramique. Thèse Docteur ingénieur. E.C Lyon (1989).
- [31] **P. PUGET**  
Étude des mécanismes de dégradation en fatigue des matériaux composites  
Unidirectionnels. Thèse E.C. Lyon (1988).
- [32] **G. FANTOZZI**  
Rupture des matériaux: Propriétés mécaniques et comportement élastique des  
matériaux. I.N.S.A de Lyon (1999).
- [33] **DANIEL GAY**  
Matériaux composites 3ème édition revue et augmentée .  
Edition Hermès ( 1991)pp. 265-275
- [34] **D. TREHEUX**  
Traitements de Surface et Protection Contre la Corrosion. École d'Été, Aussois (1987).  
Les éditions de physique, Paris (1989).
- [35] **A. RAZALI**  
Étude du comportement tribologique d'un revêtement de Molybdène réalisé par  
projection thermique sur un acier 25CD4. Thèse de magistère (1998)

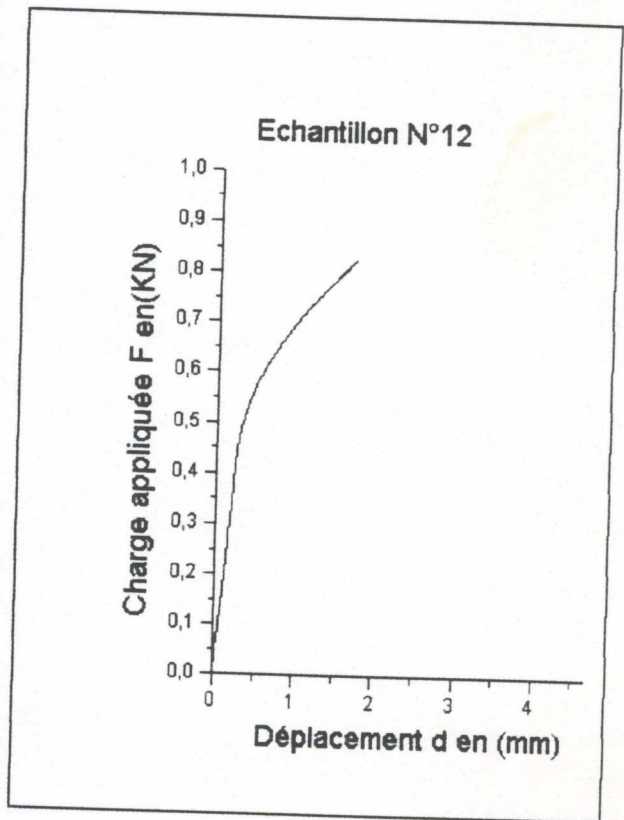
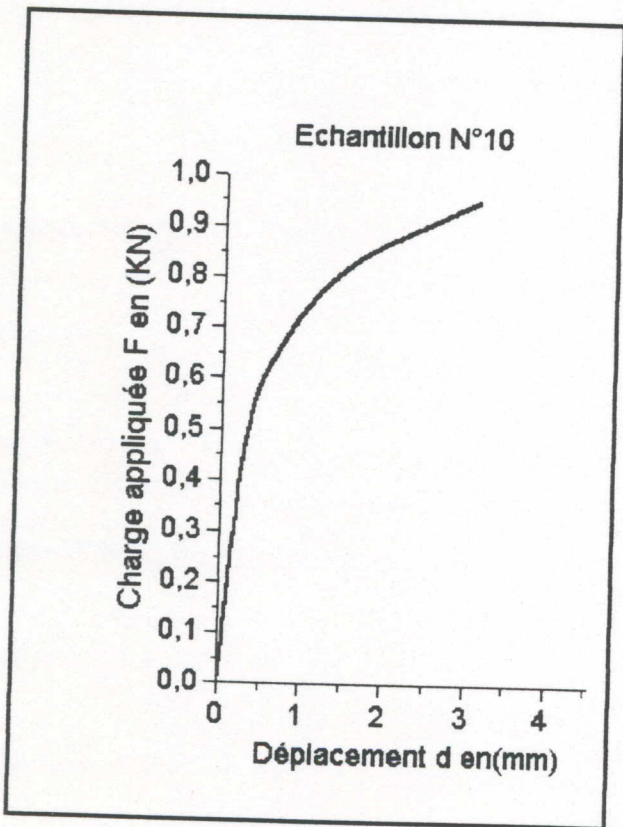
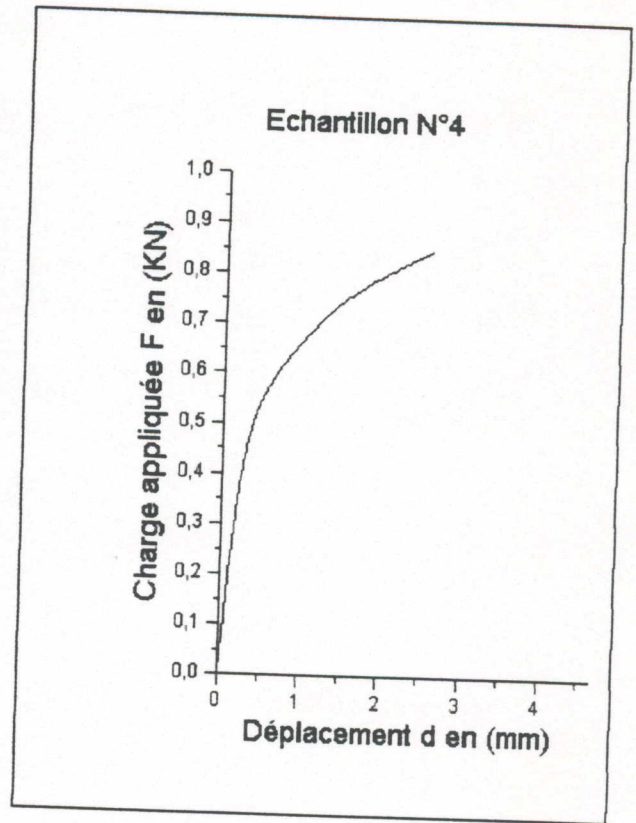
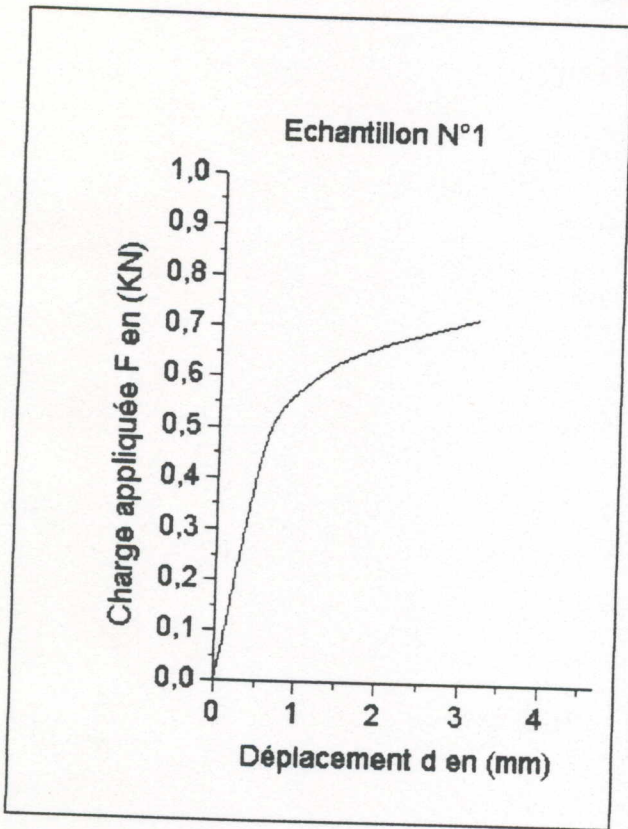
Annexe A

Les courbes charge déplacement pour les échantillons de 0.2mm d'épaisseur





Les courbes charge déplacement pour les échantillons de 0.3mm d'épaisseur



Les courbes charge déplacement pour les échantillons non entaillés avec une épaisseur de dépôt  $e=0.25\text{mm}$

