

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE



Mémoire présenté Par: BERARDI Ilyes

En vue de l'obtention Du diplôme de  
Master Académique

FILIERE : GENIE MECANIQUE  
OPTION : CONSTRUCTION MECANIQUE

Intitulé :

**Etude des caractéristiques mécaniques d'un  
Joint de soudure**

NOM et Prénom	Grade	Qualité
DEBIH Ali	MCA	Président
ZAAOUI Moussa	Pr	Encadreur
EL HADI A/ Elmalek	MCA	Examineur

Année universitaire : 2021/2022

# بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## Dédicaces

في نهاية مشواري الدراسي اهدي هذا النجاح

إلى ملاكي في الحياة إلى معنى الحب والحنان والتفاني إلى بسمة الحياة وسر الوجود إلى من كان دعاؤها

سر نجاحي وحنانها بلسم جراحي إلى اغلى الحبايب أُمي الغالية... **صليحة حاجي**

إلى من كله الله بالهيبة والوقار.... إلى من علمني العطاء بدون انتظار.... إلى من احمل اسمه بكل افتخار .. **محمد**

إلى اعز الناس وأقربهم إلى قلبي أخي فارس زهير أشرف ويزيد وأختي فتيحة ...

دخوش احمد وعائلته الكريمة

وأخيرا الى أصدقاء العمر وزملاء الرحلة العلمية من الابتدائي للجامعي وأخص بالذكر أولاد العمي أصدقائي من العائلة.

إلياس

## *Remerciements*

*Je remercie profondément mes très chers parents qui se sont donnés beaucoup de peine dans la vie pour ma réussite, je souhaite que Dieu les Protège et leur donne la santé et la vigueur.*

*Je tiens à remercier **Dr. ZAOUI MOUSSA** mon directeur de thèse et chargé de cours au Département du génie mécanique et ce pour m'avoir dirigé dans mon travail et m'a fait profiter de ses connaissances qui m'ont été d'une Aide appréciable.*

*Un grand merci également au personnel du laboratoire **EATIT-SPA Complexe de M'sila** Pour leur gentillesse et leur disponibilité et pour leurs aides et conseils appréciés pour la réalisation des essais. Je citerai notamment. **FERHATI Cherif GHERBI Abdelatif***

*Je remercie toute ma famille (mon frère Zouhir, Fares, Yazid et achraf) Pour leurs encouragements, et mes grands-parents pour leurs prières  
Merci à tous ceux qui ont été présents et participants dans ce mémoire,  
Et je m'excuse pour ceux que je n'ai pas cités!*

*Remerciements particuliers pour mon enseignante le **Dr. SAOUDI Fatima** Pour leurs aides  
Mes remerciements vont tout d'abord à notre Dieu pour la santé et le  
Je tiens également à remercier mes amis et collègues **B.Ahmed, K, Abdelkader**, leurs aides et soutiens permanents.*

*J'adresse aussi mes remerciements à tous mes amis de l'université Pour  
Leur patience et leur soutien tout au long des périodes d'étude.  
Courage qu'il m'a donnés pour terminer ce modeste travail.*

**ملخص:** إن من الآثار المتبقية على الملحومات وجود القيود الأثرية العالية و المتجمعة عند أطراف التشققات داخل حبل التلحيم, و لوجودها الدور الفعال في إمكانية التآكل تحت القيود, الإعياء, الانكسار الهش و ارتفاع درجة حرارة الانتقال من الانكسار الهش إلى الانكسار المرن. للتقليل من نسبة هذه القيود و الممثلة للسبب الرئيسي في تسريع انتشار التشققات و منه الانكسار المفاجيء لحبل التلحيم, و لضمان الإنشاءات الميكانيكية الملحومة أثناء التشغيل يجب علينا أن نجري بعض المعالجات الحرارية المناسبة و في مختلف مراحل التصنيع. في هذا البحث أثبتنا تجريبيا أنه بإجراء معالجة إحماء إستراحة في درجة حرارة معينة و لمدة زمنية مناسبة, يمكننا التقليل من الأعراض المذكورة أعلاه و ذلك بتحسين الخصائص الميكانيكية لحبل التلحيم.

**الكلمات المفاتيح :** تلحيم, مرونة, قيود أثرية, معالجات حرارية, إنكسار هش

**Abstract :**

*The soldered assemblies are the seat of elevated vestigial constraints, localized to the neighborhood of the axes of soldering cord, their presences cheek has regimental adjutant role vis-à-vis some fashion of tamping ace the corrosion under constraints, the fatigue, the brutal rupture and the increase of the temperature of transition ductile /fragile. To decrease the rate of these constraints that is the main reason of the fragile rupture of the soldering cords and to assure the security of the soldered structures, it is often necessary to do thermal treatments to different stages of the manufacture. In this invoice, we showed experimentally that a treatment of détente softening of steel to an average temperature and during one stationary time is sufficient to decrease the temperature of transition ductile/fragile and it by the improvement of the properties mechanics of the soldering cord.*

**Key- Words:** Welding, resilience, vestigial constraints, thermal treatments, fragile rupture

**Résumé :**

Les assemblages soudés sont le siège de contraintes résiduelles élevées, localisées au voisinage des fissures du cordon de soudure, leurs présences joue un rôle majeur vis-à-vis certains mode d'endommagement telle que la corrosion sous contraintes, la fatigue, la rupture brutale et l'augmentation de la température de transition ductile/fragile. Pour diminuer le taux de ces contraintes qui sont la cause principale de la rupture fragile des cordons de soudure et pour assurer la sécurité des structures soudées, il est souvent nécessaire d'effectuer des traitements thermiques à différents stades de la fabrication. Dans ce mémoire nous avons montré expérimentalement qu'un traitement de recuit de détente à une température moyenne et pendant un temps fixe est suffisant pour diminuer la température de transition ductile/fragile et cela par l'amélioration des propriétés mécanique du cordon de soudure.

**Mots-clefs :** Soudage, résilience, contraintes résiduelles, rupture fragile .

<b>REMERCIEMENTS .....</b>	
<b>DEDICACES.....</b>	
<b>LISTE DES FIGURES.....</b>	
<b>LISTE DES TABLEAUX.....</b>	
<b>INTRODUCTION GENERALE.....</b>	<b>01</b>

## **CHAPITRE-I- GENERALITES SUR LE SOUDAGE.**

<b>I1.INTRODUCTION.....</b>	<b>02</b>
<b>I-2.HISTORIQUE DU SOUDAGE.....</b>	
<b>I-3.DEFINITION.....</b>	
<b>I-4.PHENOMENES DU SOUDAGE.....</b>	
<b>I. 4-1-Les Soudures Autogènes.....</b>	
<b>I-4-2- Les Soudures Hétérogènes.....</b>	
<b>I-5.CLASSIFICATION DES SOUDAGE.....</b>	
<b>I-5-1- Choix Du Procède De Soudage.....</b>	
<b>I-5-2- Procèdes De Soudage.....</b>	
<b>I-6.CARACTERES GENERAUX DE L'OPERATION DE SOUDAGE.....</b>	
<b>I-6-1.Aspect Thermique.....</b>	
<b>I- 6-2.Aspect Chimique.....</b>	
<b>I-6-3.Aspect Thermomécanique.....</b>	
<b>I-7. LA RELATION ENTRE MATERIAU ET PROCEDE DE SOUDAGE.....</b>	

## **CHAPITRE-II DEFAUTS ET CONTROLES.**

<b>II.1 INTRODUCTION.....</b>	
<b>II-2.TYPES DE SOUDURES:.....</b>	
<b>II-2.2. Soudage à la flamme.....</b>	
<b>II-2.2.1. Combustion et chauffage.....</b>	
<b>II-2.2.2. Propriétés chimiques des flammes.....</b>	
<b>II-2.3. Soudage à l'arc.....</b>	
<b>II- 2.3.1. Propriétés de l'arc de soudage.....</b>	
<b>II-2.4. Soudage électrique par résistance.....</b>	
<b>II-2.5. Soudage TIG.....</b>	

II.2- 6 Procédés de Soudage.....	.....
II-2-7- LE SOUDAGE MIG.....	.....
1-Soudage semi-automatique (MIG OU MAG).....	.....
1-1- Introduction.....	.....
1-2. Principe.....	.....
1-3-principe de base.....	.....
1-4- Description du procédé.....	.....
1-5.Caractéristiques du couple fil/protection gazeuse.....	.....
1-5.1. Fil.....	.....
1-5.2. protection gazeuse.....	.....
1-5.3. Fusion d'un fil.....	.....
1-6. Conditions de soudage.....	.....
1-7. Domaines d'applications.....	.....
1-8.- Avantages et inconvénients du procédé de soudage MAG.....	.....

## **CHAPITRE-III- LA METALLURGIE DE SOUDURES.**

III- 1- Métallurgie: .....	.....
III-2- PROPRIETES DES METAUX.....	.....
III. 2.1 Fragilité : .....	.....
III.2.2 Ductilité : .....	.....
III-2-3 Ténacité :.....	.....
III.2.4 Malléabilité :.....	.....
III.2.5 Élasticité :.....	.....
III.2.6 Dureté :.....	.....
III.2.7 Résistance à l'abrasion :.....	.....
III.2.8 Résistance à la corrosion :.....	.....
III.2.9 Magnétisme :.....	.....

III-3 LES JOINTS SOUDES :.....	
III.3.1 POSITION DANS L'ESPACE :.....	
III.3.2 GEOMETRIE DE L'ASSEMBLAGE :.....	
III-4 STRUCTURE ET PROPRIETES DES SOUDURES :.....	
III-5 CLASSIFICATION ET QUALITE DES SOUDURES :.....	
III-6 APTITUDE AU SOUDAGE :.....	
III-7 DÉFORMATIONS LIÉES AU SOUDAGE :.....	
III-7-1 DEFORMATIONS THERMIQUES :.....	
III-8 RETRAITS ET CONTRAINTE RESIDULLES DANS LES ASSEMBLAGE SOUDES .....	
III.8.1 INTRODUCTION :.....	
III.8.2 DEFINITION DES CONTRAINTES RESIDUELLES :.....	
III-9-CONTRAINTES RESIDUELLES GENEREES PAR PLASTICITE DE TRANSFORMATION .....	
III-10 Contraintes et déformations résiduelles générées par le soudage :.....	
III.10.1 Contraintes résiduelles :.....	
III.10.2 Déformations résiduelles :.....	
<b>CHAPITRE-IV- METHODES EXPERIMENTALES.</b>	
IV-1 ESSAI DE TRACTION.....	
IV.1.1 Machines d'essais.....	
IV. 1.2 Préparation des éprouvettes.....	
IV.1.3 Exécution de l'essai de traction.....	
IV.3 ESSAI DE RESILLENCE.....	
IV.3.1 Préparation des éprouvettes.....	
IV.3.2 Machines d'essai.....	
IV.3.3 L'exécution de l'essai de résilience.....	
IV.4 ESSAI DE MICRODURETE.....	

IV.4.1 Préparation des échantillons de la microdureté.....	
IV.4.2 Machine d'essai de microdureté - LEITZ OURIMET 2 .....	
IV.4.3 Exécution de l'essai de micro dureté.....	
IV.5 ETUDE MICROGRAPHIQUE STRUCTURALE.....	
IV.5.1 Construction du microscope métallographique.....	
IV.5.2 Commentaires.....	
IV.6 ETUDE PAR RAYON «X».....	
IV.6.1 Méthode expérimentale de diffraction des rayons X:.....	
IV.7 COMMENTAIRE DES RESULTATS.....	

## **Conclusion**

## **Références bibliographique**

<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	
Fig. I.1 : les zones de la soudure.....	
Fig II -1 Partie constitutive d'un chalumeau.....	
Figure II -2 Exécution d'une Suodure.....	
Figure II -3 Flamme de Chalumeau.....	
Figure II- 4. Soudage à l'électrode enrobée : principe.....	
Figure II- 5 Procédés de Soudage par Résistance.....	
Figure II – 6 Soudage à l'électrode réfractaire TIG: principe.....	
Figure II -6 Soudage MIG et MAG : Schéma de Principe.....	
Figure II – 7 Schéma d'installation.....	
Figure II – 8 Soudage à l'arc avec fil électrodes fusibles ou soudage Semi- automatique .....	
Fig II- 9 Fil fourré pour les Soudage MIG et MAG.....	
Fig II – 9 Longueur de fil.....	
Fig II – 10 Fusion d'un Fil.....	
Figure II-11: le choix du procédé de soudage en fonction des épaisseurs à soude.....	
Fig II – 12.le examen visuel des soudures .....	
Figure 1.1 Du plus fragile au plus ductil . .....	
Fig. II.2 : Dilatation.....	
FigIII.3.....	
Fig. III.4 : Courbe dilatométrique d'un cycle thermique avec changement de phase de l'acier.....	
Fig. III.5 : Répartition des contraintes résiduelles longitudinales de plasticité de dilatation. Cas d'un assemblage mono passe.....	
Fig. III.6 : Répartition des contraintes résiduelles transversales de plasticité de dilatation. Cas d'un assemblage multi passe.....	
Fig. III.7 : Les trois composantes de translation observables sur un assemblage bout à bout rectiligne multi passe.....	
Fig. III.8 : Les trois composantes de rotation observables sur un assemblage bout à bout rectiligne multi passe.....	
Fig. IV.1.....	
Fig IV .2.....	
Fig IV .3.....	
Fig IV.4.....	
Fig IV .5.....	

Figure IV.6 le métal de base avec un G = 50(Ferrite + perlite).....

Figure IV.7 la ZAC + Z.F avec un G = 200 ferrite + bainite .....

Figure IV.8 la Z.F avec G = 50 ferrite + bainite (ferrite + cémentite).....

Figure IV.9 la M.B + ZAC avec G 50 ferrite.....

**LISTE DES TABLEAUX.....**

Tableau II – 1 Protection gazeuses utilisées en Soudages MIG et MAG.....

Tableau III.1 : différents types de soudure.....

Tableau III.2: Influence de certain facteur sur la déformation.....

Tableau IV.1 : Essai de traction.....

Tableau IV.2 : Essai de traction.....

Tableau IV.4: Essai de pliage sans préchauffage.....

Tableau IV.5: Essai de pliage avec préchauffage.....

Tableau IV.6: Essai de résilience avec préchauffage.....

Tableau IV.7 : Essai de résilience sans préchauffage.....

## Introduction Générale

Le soudage est un processus qui consiste à assembler deux pièces métalliques pour les rendre solidaires l'une à l'autre, et cela en les rapprochant et en réchauffant l'endroit de leur contact jusqu'à l'état de fusion avec ou sans métal d'apport, cette opération est caractérisée par trois aspects ; thermique, chimique, et thermomécanique.

L'intérêt de la connaissance métallurgique de l'opération de soudage est de permettre l'interprétation aussi quantitative que possible des phénomènes métallurgiques que cette opération engendre, et par suite de prévoir ces phénomènes pour en tenir compte dans le choix du métal de base, des procédés et des modes opératoires.

Les opérations de soudage d'aciers s'accompagnent de phénomènes thermiques métallurgiques et mécaniques. Ces phénomènes induisent inévitablement des champs de contraintes internes dans le rôle peut être déterminant sur la qualité et la tenue mécanique du composant.

Les applications de la technique du soudage, au sens où nous les envisageons aujourd'hui, ont débuté pratiquement avec le vingtième siècle, mais ce n'est en fait qu'au cours des vingt-cinquième dernières années que ces applications ont pris une réelle ampleur dans le domaine industriel.

L'évolution lente à ses débuts, s'est ensuite accélérée de façon telle qu'on peut affirmer aujourd'hui que bien des conditions de notre vie moderne dépendent de la technique du soudage.

Malgré les accidents spectaculaires survenus dans le passé telles que les ruptures des ponts soudés, produites en Belgique, et en Allemagne, et qui ont été suivies des ruptures analogues des navires soudés aux États-Unis, ces accidents sont cependant avérés très féconds en enseignements. L'analyse critique de leurs causes a fait apparaître des erreurs dans la conception de ces constructions, et l'intervention simultanée de plusieurs facteurs, toujours les mêmes, les études et les recherches relatives à ces facteurs ont conduit à des résultats qui constituent un des fondements de nos connaissances actuelles sur le soudage.

Le grand nombre d'applications du soudage et la grande variété des procédés mis en œuvre résultent non seulement de la diversité des types de matériaux à assembler et de la multiplicité des conditions imposées aux constructions en service, mais aussi de la recherche toujours plus poussée d'une meilleure rentabilité.

Cette recherche a conduit à la mise en œuvre de nouveaux procédés caractérisés par une concentration plus grande de leurs sources de chaleurs, ces nouveaux procédés permettent

d'étendre le domaine d'application du soudage à des matériaux nouveaux caractérisés par leurs très haute température de fusion, et de limiter les déformations dues au soudage.

Les liaisons étroites qui se sont développées entre le soudage et la métallurgie ont ouvert de nouvelles perspectives de développements pour de nombreuses branches de l'industrie; elles ont conduit à une amélioration significative de la qualité des métaux et alliages, en vue de permettre leur assemblage aisé par soudage.

Les problèmes particuliers posés par le soudage ont d'ailleurs souvent été à l'origine d'une meilleure connaissance de certains phénomènes, tels que par exemple celui de la fragilité des aciers à basse température, qui a été mise en évidence de manière particulièrement spectaculaire dans certaines constructions soudées et vis-à-vis de laquelle des précautions et des remèdes ont été étudiés en vue d'en limiter les effets néfastes.

D'une façon générale, les problèmes liés au soudage sont complexes et difficiles à analyser quantitativement, compte tenu du grand nombre de paramètres intervenants.

La plupart des travaux sont consacrés à l'étude de la fissuration en racine et en pied de cordon, lorsque les fissures se propagent dans le métal de base, les fissures sont assez fréquentes et les plus dangereuses.

Aussi de nombreux aciéristes cherchent à améliorer les caractéristiques du métal de base et son comportement vis à vis des cycles thermiques et des contraintes résultants des différents procédés de soudage.

Dans ce travail, l'acier ordinaire TQ46 qui correspond à l'acier E36 selon la normalisation AFNOR, est étudié, pour caractériser l'évolution du mécanisme de rupture après traitement thermique post-soudage.

DE ce fait, notre travail est structuré de la façon suivante :

Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique sur les généralités des soudures, historique, phénomènes et classifications.

Le deuxième chapitre présente une étude sur la métallurgie de soudage, suivie d'une analyse des quatre principales conséquences mécaniques de transformation lors de l'opération de soudage.

Le troisième chapitre traite le problème des différentes formes des défauts de soudure et les méthodes de leurs contrôles.

Le quatrième chapitre concerne l'étude expérimentale, dans lequel le procédé de soudage, les différentes méthodes de préparation des éprouvettes pour réaliser les différents essais mécaniques, pliage, microdureté et résilience, le traitement thermique des échantillons et

Enfin l'exécution des essais qui nous permis de voir de près l'influence du traitement choisi sur les caractéristiques mécaniques du cordon de soudure.

Une discussion des résultats obtenus pour les différents essais effectués sous différentes conditions. Et une conclusion pour terminer cette étude.

# CHAPITRE-I-

## **GENERALITES SUR LE SOUDAGE**

# Chapitre I : Généralités sur le soudage

---

## I-1 INTRODUCTION :

La soudure est le moyen d'assemblage le plus fréquemment utilisé pour la fabrication en atelier. Sur le chantier, son emploi est moins généralisé à cause des difficultés de mise en œuvre liées souvent à des conditions climatiques pas toujours favorables. Pour les charpentes courantes, on préfère l'emploi de boulons.

Les principaux avantages qu'offre l'emploi de la soudure sont:

- La réalisation d'assemblages rigides, donc peu déformables,
- Une diminution du temps de préparation des pièces de l'assemblage par rapport au boulonnage, notamment dans le cas de soudures non pénétrées (pas de trous à percer, réduction du nombre de couvre-joints et de platines),
- Une simplification des assemblages,
- Une amélioration de l'apparence de la construction,
- La réalisation d'un assemblage étanche.

Elle nécessite par contre certaines précautions de mise en œuvre, notamment:

- Le recours à un personnel qualifié,
- La protection des soudeurs sur le chantier contre les intempéries,
- L'utilisation de procédés de contrôles de qualité.

## I-2 HISTORIQUE DU SOUDAGE :

Le soudage est né à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle dans l'esprit des scientifiques, il est passé rapidement dans les mains des techniciens, tout d'abord avec la technique oxyacétylénique, puis avec celles du soudage à l'arc et du soudage par résistance. D'autres procédés sont arrivés ensuite et le 20<sup>ème</sup> siècle a vu la naissance du soudage par Laser est aussi :

- le soudage avec électrode de carbone : Bernardos et Olszewski; Russie.
- le soudage avec électrode fusible nue : Slavianov ; Russie.
- le soudage avec électrode enrobée : Kjell berg ; Suède.
- le soudage par résistance : Thompson ; USA.
- le soudage au gaz (chalumeau) : Picard ; France.

A partir de la troisième décennie de notre époque date le développement rapide des procédés de soudage avec les électrodes enrobées et au chalumeau oxyacétylénique, qui a rendu possible la réalisation des premières œuvres importantes comme les bateaux, les ponts, les bâtiments et les chaudières (surtout en USA et en Angleterre). L'introduction massive de

## Chapitre I : Généralités sur le soudage

---

Soudage par résistance joua le rôle décisif dans le développement rapide de l'industrie automobile. Parmi les nouveaux procédés on peut citer :

- le soudage avec électrode de tungstène : 1924 – USA.
- le soudage sous flux : 1935 – USA.
- le soudage vertical sous laitier : 1950 – URSS.
- le soudage sous la protection gazeuse : 1950 –1960.
- le soudage avec fils fourrés : 1950 –1960.
- le soudage par explosion : 1950-1960.
- le soudage par bombardement électronique : 1956 – France.
- le soudage par laser : 1965.

### **I-3 DEFINITION:**

Le soudage est une opération qui consiste à réunir deux ou plusieurs parties constitutives d'un assemblage de manière à assurer la continuité entre les parties à assembler, soit par chauffage, par intervention de pression, ou par l'un et l'autre, avec ou sans métal d'apport dont la température de fusion est de même ordre de grandeur que celle du matériau de base.

Le soudage est un assemblage définitif exécuté sur des pièces métalliques qui s'impose pour diverses raisons : dimensionnelles (un pont), structurelles (un réservoir), constructive (une carrosserie), de poids (un panneau), économique (un plancher) ou d'autres.

Il peut entrer en compétition avec d'autres modes d'assemblage tels les vissages, le sertissage,

le rivetage, le collage, l'agrafage. L'assemblage par soudage occupe une place importante dans l'univers de la construction des bateaux, des trains, des avions, des fusées, de l'automobile, des ponts tuyaux, des réservoirs et tant d'autres structures qui ne sauraient être construites sans le recours au soudage. De nombreux aciers d'usage général, et notamment des tôles et profilés, sont mis en œuvre par soudage.

Le soudage est une opération d'assemblage où la continuité métallique entre les pièces à souder est assurée par la fusion globale ou de proche en proche de leurs bords. On obtient ainsi, après solidification, un joint homogène de même caractéristique que le métal de base, ou un joint hétérogène dans le cas de métaux différents.

Cette opération peut être assimilée à une opération locale d'élaboration métallurgique et à une opération locale de traitement thermique donnant une structure cristalline dépendant à

## Chapitre I : Généralités sur le soudage

la fois de la composition chimique élaborée et du traitement thermique. Ainsi réalisée, la soudure se décompose en plusieurs zones :

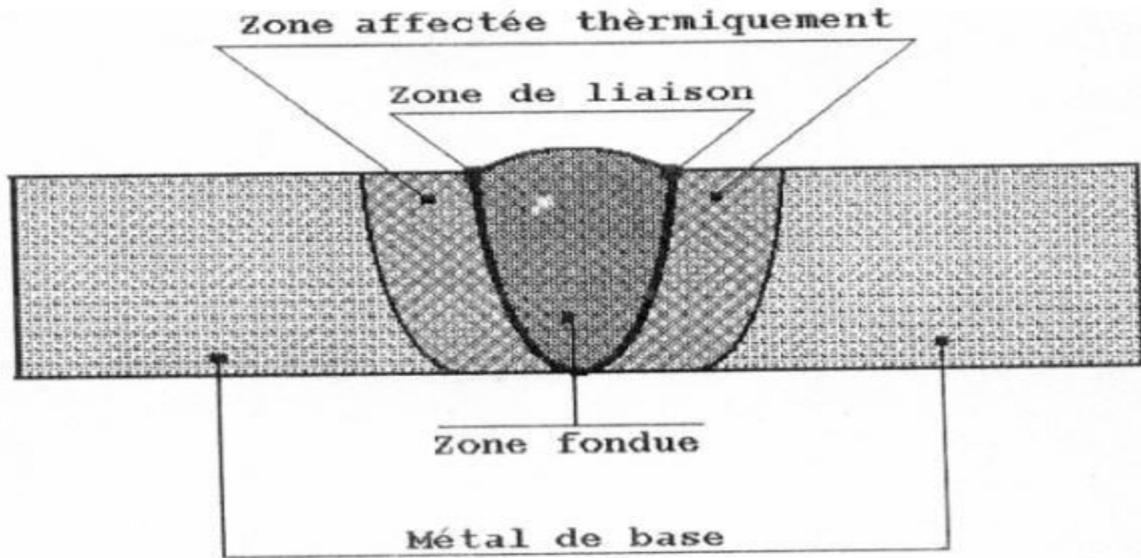


Fig. I.1 : les zones de la soudure

- La zone fondue (nommée ZF) :

Zone où l'état liquide a été atteint et dans laquelle a été élaborée la composition chimique. La structure métallurgique obtenue après solidification, dépend du cycle de refroidissement. On distingue, au sein de cette zone, des gradients de concentration, de la partie la plus fondue vers la moins fondue. Il est donc possible d'examiner la composition d'une soudure ainsi que les variations de dureté. ).

- La zone affectée thermiquement (nommée ZAT) :

Zone se trouvant en bordure de la zone fondue sur une largeur plus ou moins large ayant été soumise à l'élévation de température sans être portée à la fusion. Le chauffage, la composition chimique et la vitesse de refroidissement de cette zone génèrent des modifications plus ou moins importantes de la structure métallurgique.

- La zone de liaison :

Cette zone, située à la frontière entre la zone fondue et la zone affectée thermiquement, correspond à la surface sur laquelle la solidification du métal fondu a commencé.

- Le métal de base :

Au delà de la zone affectée thermiquement, l'élévation de température est insuffisante pour engendrer une quelconque transformation structurale. Cette zone est aussi dite non affectée. La composition chimique de la zone fondue résulte principalement de celles du métal de base et du métal d'apport presque toujours additionné lors de l'opération de soudage. La dilution est alors définie par la proportion de métal de base dans la zone fondue. A ceci,

# Chapitre I : Généralités sur le soudage

---

vient s'ajouter la perte de certains constituants par volatilisation et l'action de l'oxygène et de l'azote de l'air, et l'action des constituants du gaz de soudage.

Le soudage revêt également un aspect thermique particulier du fait de :

- Les rapides changements de température (élévation de température et refroidissement).
- Le faible temps de maintien de la température maximale.
- La localisation du point chaud entraînant un gradient de température important entre les parties chaudes et les parties froides.

Le cycle thermique résultant est responsable de la structure métallurgique des différentes zones de la soudure. Selon l'analyse chimique des matériaux, un cycle rapide peut conduire à une structure fragile ou au contraire douce et ductile.

Le soudage est donc une opération de métallurgie très complexe au cours de laquelle il faut prendre en compte :

- Le métal de base choisi en fonction de la pièce à réaliser pour ses particularités mécaniques, chimiques,...
- Le couple métal d'apport – gaz de soudage, qui contribue à la composition chimique de la zone fondue. Le métal d'apport sera choisi en fonction de la qualité et des caractéristiques que la soudure devra présenter.
- L'énergie de soudage qui régit le cycle thermique induisant la structure de la zone fondue et de la zone thermiquement affectée.

Le dépôt de métal réunissant pour souder deux éléments d'un assemblage s'appelle "cordon" ou "joint", la soudure de deux pièces et d'autant plus facile que leur composition est identique ou très voisine : la fusion se produit pour chacune d'elles à la même température et la pièce réalisée se présente alors sans discontinuité de matière, facilement soudable, exemple : Aciers de type A33 à A48. ).

## **I-4 PHENOMENES DU SOUDAGE :**

Le soudage est un procédé qui se caractérise par une grande complexité de phénomènes physico-chimique et des paramètres qui rentrent en jeu. Dans le soudage, la liaison atomique réalisée au niveau du joint nécessite l'intervention d'une source d'énergie extérieure qui crée une élévation de la température dans les pièces. Les sources d'énergie utilisées sont de type électrique, chimique, mécanique (friction) ou optique (Laser).

On distingue deux grandes classes de soudures :

# Chapitre I : Généralités sur le soudage

---

## **I-4-1 Les soudures autogènes :**

Ce sont des assemblages homogènes car les éléments sont assemblés soit sous le même métal d'apport soit avec un métal d'apport de même nature chimique.

## **I-4-2 Les soudures hétérogènes :**

Elles sont réalisées à l'aide d'un métal d'apport déposé par fusion et d'une nature chimique différent de celle des éléments soudés.

## **I-5 CLASSIFICATION DES SOUDAGE :**

### **I-5-1 CHOIX DU PROCEDE DE SOUDAGE :**

Le choix entre ces procédés est lié aux conditions suivantes :

- Nature des matériaux à souder et formes des pièces.
- Qualité de la soudure à obtenir et diminution maximale des déformations.
- Rapidité de l'exécution, aspect économique.

### **I-5-2 PROCEDES DE SOUDAGE :**

On peut classer les différents procédés de soudage en deux catégories :

- Soudage par fusion :

Il regroupe tous les procédés de soudage comportant une fusion localisée, exécutée avec ou sans utilisation de produit d'apport et sans intervention de pression. On en distingue plusieurs familles. Dans le soudage au gaz, la chaleur nécessaire au soudage est fournie par la combustion d'un gaz ou d'un mélange gazeux avec de l'oxygène (oxyacétylénique : oxygène/acétylène ; oxhydrique : oxygène/hydrogène). Le produit d'apport est une baguette nue.

Dans le soudage à l'arc, la chaleur nécessaire au soudage est fournie par un arc électrique entre une électrode et la pièce :

- Soudage au chalumeau oxyacétylénique :

La source de chaleur est la flamme obtenue à la base d'un chalumeau par combustion de l'acétylène par l'oxygène.

- soudage à l'arc :

La chaleur nécessaire à la fusion des bords de pièces et du métal d'apport est fournie par un arc électrique amorcé est entretenu entre les pièces à souder et une électrode.

- soudage par bombardement électrique :

## Chapitre I : Généralités sur le soudage

---

Ce procédé réalise un soudage autogène sous vide généralement sans métal d'apport, en utilisant un faisceau d'électrons. L'impact des électrons sur le métal à souder provoque la fusion.

- Soudage sans fusion :
- soudage par résistance :

Un courant de très forte intensité circule entre deux électrodes et les pièces à assembler, il provoque par effet Joule un échauffement tel que la soudure se produit à l'enduit des électrodes.

- soudage par friction :

La chaleur nécessaire pour l'obtention de la soudure est engendrée par la rotation et la friction d'une pièce par rapport à l'autre après l'amenée des zones adjacentes à la surface de contact à l'état pâteux. La rotation est arrêtée et on augmente rapidement la force de serrage.

- soudage par brasage (soudo-brasage) :

Le métal d'apport est un laiton Silicium, fondant à 900<sup>0</sup> et ayant la propriété de s'accrocher à des alliages de nature très différents. Ce procédé permet de réaliser la liaison de métaux tels que fontes grises, malléables, aciers durs difficilement soudables.

### **I-6 CARACTERES GENERAUX DE L'OPERATION DE SOUDAGE:**

Pour présenter les caractères généraux de l'opération de soudage, il faut en examiner trois aspects, à savoir :

- L'aspect thermique.
- L'aspect chimique.
- L'aspect thermomécanique.

Mais il ne faut pas perdre de vue le fait que l'objet d'une soudure est de réunir les éléments d'une construction. La continuité ainsi établie confère à la construction soudée un caractère particulier sur lequel il convient aussi de s'arrêter.

#### **I-6-1 ASPECT THERMIQUE :**

La grande majorité des procédés de soudage est caractérisée par l'intervention d'une source de chaleur le plus souvent en mouvement parfois immobile (par exemple le soudage par points), dont la nature et la puissance spécifique qu'elle peut atteindre déterminent les possibilités pratiques d'utilisation. Une intéressante représentation comparative de ces possibilités appelée « tache de chauffe », dont l'étendue rend compte pour les puissances

## Chapitre I : Généralités sur le soudage

---

mises en jeu dans l'emploi des diverses sources de chaleur, de la plus ou moins grande concentration qui caractérise ces sources.

Quoiqu'il en soit, la localisation qui caractérise l'ensemble des procédés du soudage et dont résultent à des degrés divers, les conséquences suivantes :

a) Le soudage comporte, là où ils interviennent, des échauffements rapides, dans de nombreux cas plus rapides que ceux qui correspondent à l'état d'équilibre en phase solide des alliages concernés. Si on veut prévoir ou interpréter l'effet métallurgique de soudage il est donc nécessaire de tenir compte de la vitesse d'échauffement, en particulier lorsqu'on cherche à simuler le cycle thermique de soudage pour reproduire les structures qui en résultent.

b) L'effet d'un échauffement rapide est accusé par la brièveté du séjour à la température maximale, température qui avoisine la température de fusion. Il en résulte que du point de vue métallurgique une certaine compensation intervient entre l'élévation de la température atteinte, d'une part, et la brièveté du séjour à cette température, d'autre part. Ainsi s'explique, à composition chimique identique, la différence que l'on peut constater entre les structures caractéristiques de soudures obtenues par des procédés de soudage différents, selon la brièveté relative du séjour à haute température qui les caractérise. Cet effet de compensation peut aussi être en phase liquide par exemple à propos des pertes par volatilisation dans la zone fondue.

c) Enfin, le gradient de température qui résulte de la localisation de l'échauffement entraîne une vitesse de refroidissement en générale élevée, elle-même fonction, pour chaque matériau, non seulement du procédé de soudage utilisé, mais aussi du mode opératoire pour l'application de ce procédé.

En conclusion, pour les raisons exposées ci-dessus, toute analyse métallurgique des effets de l'opération de soudage doit être précédée et éclairée par une étude thermique approfondie de cette opération.

### **I-6-2 ASPECT CHIMIQUE :**

C'est à juste titre que, aux différences près dues à la brièveté de l'opération de soudage, à tout le moins le soudage par fusion, a pu être comparé à une opération d'élaboration, en raison de l'évolution qui se produit dans la composition chimique du métal fondu. On peut citer les causes d'évolution de la composition chimique du métal fondu soit par le comportement de ses éléments constitutifs soit au contact du milieu qui l'environne (gazeux ou liquide) soit encore en présence du milieu solide constitué par le métal de base lui-même.

## Chapitre I : Généralités sur le soudage

---

**a)** Au niveau du métal fondu proprement dit et de ses éléments constitutifs, la température élevée atteinte durant l'opération peut être à l'origine d'une perte en éléments par volatilisation, perte qui doit être compensée par les additions ou par un mode opératoire approprié. D'autre part, durant le séjour à l'état liquide, des réactions chimiques sont susceptibles de se produire entre éléments présents, qu'ils proviennent du métal de base lui-même ou du métal d'apport mis en œuvre. De telles réactions se traduisent par une évolution des propriétés, mécaniques ou autres et éventuellement par une altération de la compacité, s'il y a formation de composés insolubles ou dégagement de gaz.

**b)** Dans le même temps le métal fondu est susceptible d'être chimiquement influencé par le milieu gazeux qui l'entoure, si un tel milieu existe. C'est bien, à l'origine, le souci de protéger le métal fondu contre l'action néfaste de l'oxygène et de l'azote de l'air qui a conduit à l'élaboration des enrobages et des flux, qui produisent un laitier liquide qui sépare le métal fondu de l'atmosphère, puis à l'utilisation de gaz complètement protecteurs tels que l'argon, ou partiellement protecteurs, tels que l'anhydride carbonique ou les mélanges de ce gaz avec de l'argon.

En fait, les gaz énumérés ci-dessus ne sont les seuls à intervenir, et nous aurons en particulier à examiner, à d'autres points de vue, le rôle de l'hydrogène dans le soudage de l'acier ou d'autres alliages.

**c)** La recherche d'une protection de bain de fusion contre l'atmosphère environnante, ainsi que d'un moyen d'y incorporer des éléments susceptibles d'intervenir, a conduit à la mise au point, des enrobages d'électrodes et des flux qui, au moment de la fusion produisent une phase liquide nommée laitier qui réagit

au contact du bain de fusion et en fait évolue la composition. Il y a donc bien élaboration, mais comme on l'a dit, il s'agit d'une opération rapide, hors des conditions normales d'équilibre.

**d)** Enfin, on a déjà mentionné le fait qu'au contact du métal de base solide qui lui sert de support, une proportion plus ou moins importante de métal de base s'incorpore, par sa propre fusion, au métal fondu. Ainsi se trouve définie la dilution, dont la valeur dépend d'une part du procédé de soudage, par la pénétration qui lui est propre, d'autre part, pour chaque procédé, du mode opératoire.

## Chapitre I : Généralités sur le soudage

---

### **I-6-3 ASPECT THERMOMECHANIQUE :**

Le caractère localisé de l'opération de soudage et le passage par l'état fondu suivi d'une solidification font intervenir deux comportements physiques importants à savoir le retrait à la solidification et la dilatation thermique qui agissent simultanément pour engendrer déformations et contraintes au niveau des joints soudés.

La prévention des déformations globales provoquées par le soudage et qui sont associées au retrait à la solidification et au refroidissement, pose des problèmes technologiques, mais il faut noter que tout empêchement à la déformation se traduit par la naissance de contraintes résiduelles supplémentaires. Les remèdes à la déformation sont donc, chaque fois que cela est possible, à rechercher dans un mode opératoire qui en réduit l'amplitude, plutôt que dans un effet de bridage des pièces à assembler.

Quant aux contraintes résiduelles, qui naissent au niveau des zones localement déformées à chaud, c'est-à-dire plastiquement, elles s'établissent au cours de refroidissement, affectent un métal redevenu élastique, ce qui leur assigne une valeur maximale égale à la limite d'élasticité de ce métal. D'autre part, mais ceci ne concerne que certains aciers particulièrement trempant, il y a lieu de tenir compte des contraintes associées à la déformation martensitique.

### **I-7 LA RELATION ENTRE MATERIAU ET PROCE DE SOUDAGE :**

Dans certains cas, les gains de performance (mécanique très souvent) ne sont pas compatibles avec une soudabilité satisfaisante avec des procédés conventionnels ou même très avancés. L'innovation dans les procédés permet alors de prendre le relais.

Par exemple les alliages d'aluminium à haute limite d'élasticité tels que ceux alliés au cuivre et au zinc ont vu leur déploiement industriel limité dû à leur médiocre soudabilité en soudage par fusion. Ces matériaux sont en effet très sensibles aux phénomènes de fissuration de solidification susceptible de se produire lors de l'opération d'assemblage.

L'avènement du soudage par friction-malaxage (Friction Stir Welding) faisant intervenir un état pâteux pour assurer une liaison métallurgique a permis de résoudre cette problématique.

Autre cas, l'avènement de matériaux plus résistants mécaniquement répond à la nécessité.

D'alléger les structures. Le soudage, procédé d'assemblage nécessitant un échauffement et en général une fusion localisée des éléments à assembler, provoque des déformations thermomécaniques intervenant lors du chauffage et du refroidissement.

## Chapitre I : Généralités sur le soudage

---

Ces déformations ont tendance à se manifester d'autant plus que les épaisseurs des pièces à assembler sont fines apportant des difficultés opératoires. Certains développements récents sur les procédés de soudage TIG (Tungsten Inert Gas) et MIG/ MAG (Metal Inert Gas / Metal Active Gas), les procédés à forte densité d'énergie (laser, faisceau d'électrons, plasma), le soudage brasage (utilisation de métal d'apport à température de fusion inférieure à celle des matériaux à assembler) peuvent répondre à cette exigence.

# CHAPITRE-II-

## **DIFFERENTS TYPES DE SOUDURE**

## **CHAPITRE II : DIFFERENTS TYPES DE SOUDURE**

---

### **II.1 INTRODUCTION**

On distingue trois types de soudures:

- La soudure homogène, dans laquelle les métaux de base et le métal d'apport éventuel sont tous de même nature.
- La soudure hétérogène de type « A » qui associe des métaux de base de même nature avec un métal d'apport d'une autre nature.
- La soudure hétérogène de type « B » où les métaux de base et le métal d'apport sont tous de natures différentes.

### **II-2.TYPES DE SOUDURES:**

#### **II-2.1. Le soudage à la forge:**

C'est le plus ancien des procédés de soudage de tout les temps. Les bords des pièces à souder sont portés à la température qualifiée de «blanc soudant » (de 950 °C à 1050 °C) estimée à l'oeil par le forgeron. Une fois la température requise atteinte, les parties à assembler sont juxtaposées puis martelées. Ce procédé s'apparente au brasage car il n'y a pas, à proprement parler, de fusion des matériaux de base; ce principe est en partie repris dans le soudage par ultrasons.

#### **II-2.2. Soudage à la flamme**

L'emploi d'une flamme pour le soudage proprement dit, à l'aide d'un chalumeau (figure II.1) En effet, les températures élevées nécessaires au soudage des métaux (aciers notamment) n'ont pu être atteintes que lorsque l'on a pu disposer industriellement d'oxygène comme comburant et d'acétylène comme combustible. ce procédé d'assemblage associées à l'emploi de flammes.

Pour pouvoir réaliser des soudures dans de bonnes conditions un chalumeau doit délivrer, en le dirigeant sur la pièce, un flux gazeux à température la plus élevée possible, et dont les calories auront une concentration maximale sur la surface la plus réduite possible. En outre, la composition chimique de ce flux gazeux est loin d'être indifférente, car des réactions sont possibles (et souhaitables) entre les gaz de combustion produits et le métal liquide.

En accord avec les normes françaises, le terme soudage devrait s'appliquer uniquement pour un assemblage par fusion, où le métal d'apport éventuel est de même nuance que le métal de base. Dans tout le dornâme du soudage, on emploie les termes soudure-soudage pour les assemblages métallurgiquement homogènes comportant une fusion du bord des pièces à assembler (figure II.2).

On emploie le terme soudo-brasage pour une opération dont le processus opératoire est identique (travail de proche en proche), mais dont le métal d'apport est différent du métal de base, dont les bords ne subissent pas de fusion. On emploie le terme brasage pour une

## CHAPITRE II : DIFFERENTS TYPES DE SOUDURE

opération exécutée grâce à un chauffage global des pièces (au four par exemple) et non de proche en proche. Cela impose bien évidemment que le métal d'apport soit différent du métal de base et fonde à une température moins élevée, la liaison étant obtenue par mouillage du métal de base.

La chaleur est produite par une réaction de combustion entre un comburant, l'oxygène, et un combustible, gazeux lui aussi. L'oxygène intervient soit pur, soit en mélange avec l'azote (air), mais, dans ce dernier cas, les températures atteintes sont insuffisantes pour souder l'acier et la plupart des métaux usuels.

Le combustible est toujours un carbure d'hydrogène de formule générale  $C_x H_y$ ; les plus courants sont:

-l'acétylène  $C_2 H_2$ ;

- le propane  $C_3 H_8$ ;

-le butane  $C_4 H_{10}$ ;

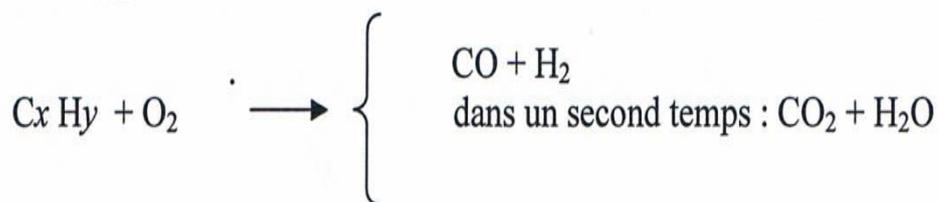
-les gaz dits de synthèse qui sont des mélanges de propane, propadiène, éthylène, méthylacétylène, propylène, etc.;

- le gaz naturel (très peu utilisé). Propane, butane et gaz de synthèse sont tous des gaz de pétrole liquéfiés (GPL).

Une flamme oxy-gaz se compose d'un dard et d'un panache (figure II.3), l'un et l'autre étant le siège de réactions différentes. La température la plus élevée se situe à 1 ou 2 mm de la pointe du dard et, selon la nature du gaz combustible choisi, elle varie de 2700 à 3200°C. Rappelons que l'acier fond vers 1 560°C et que le laiton de soudo-brasage fond vers 870 à 900°C.

La chaleur produite par la combustion se retrouve pour partie dans le dard et pour partie dans le panache. Seule la partie dissipée dans le dard est vraiment utile. C'est pourquoi la chaleur totale de réaction n'est pas un critère de choix du gaz.

Les réactions de combustion sont du type:



## CHAPITRE II : DIFFERENTS TYPES DE SOUDURE

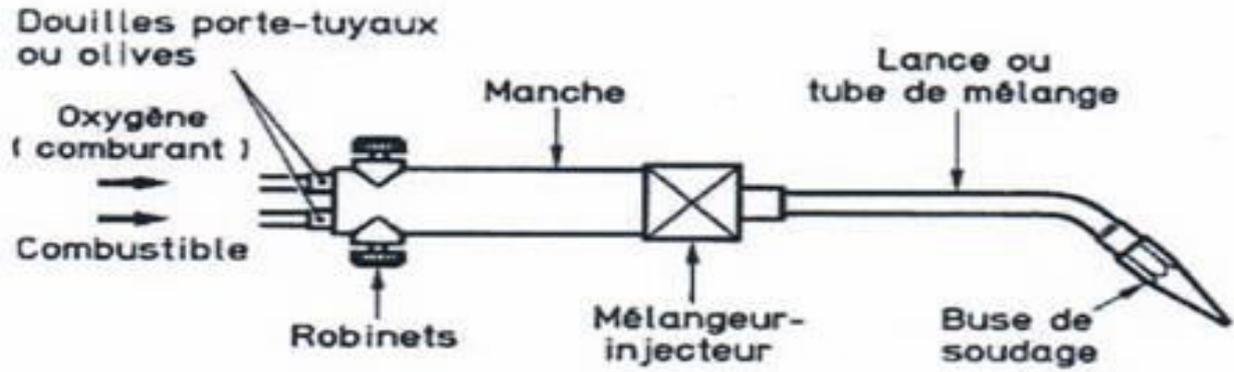


Fig II -1 Partie constitutive d'un chalumeau

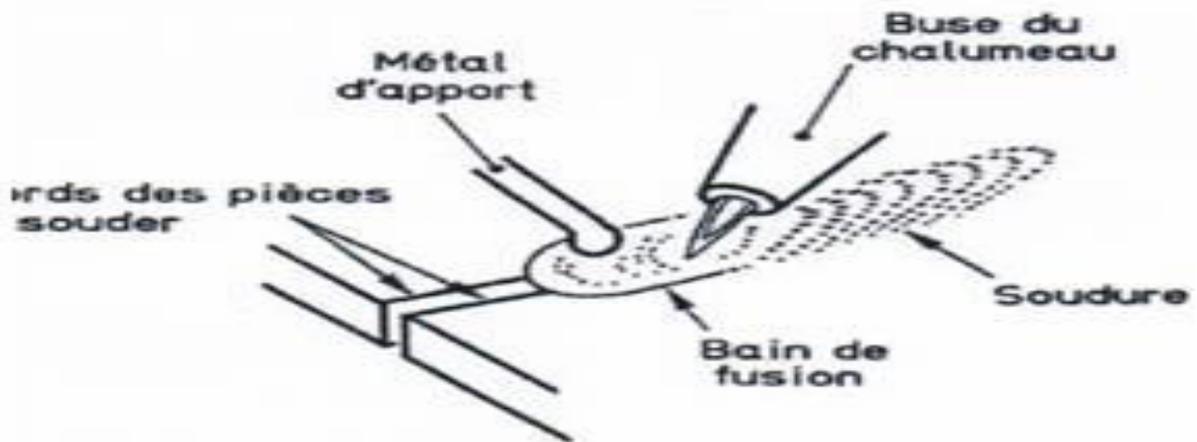


Figure II -2 Exécution d'une Soudure

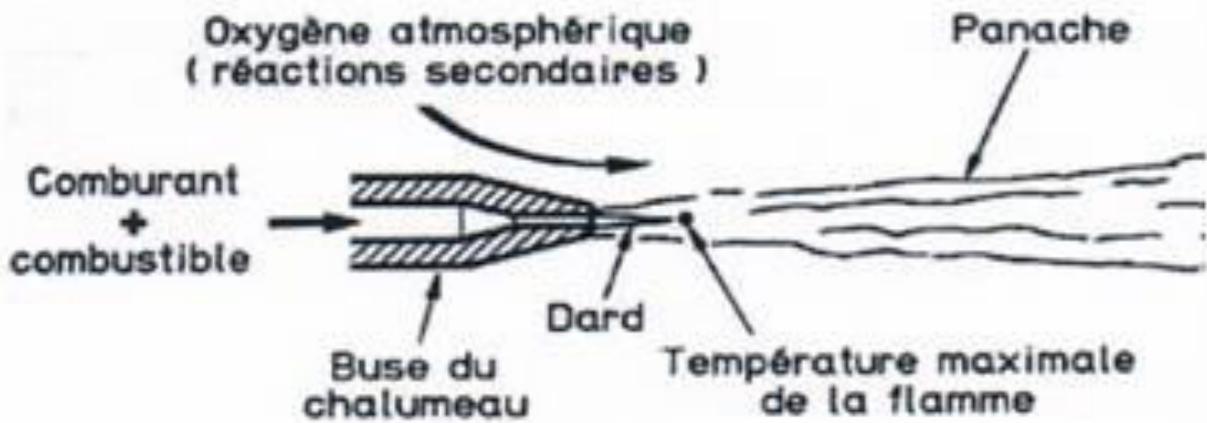


Figure II -3 Flamme de Chalumeau

### II-2.3. Soudage à l'arc

Bernardos (1887) puis Kjellberg (1914) ont été les tout premiers à utiliser le pouvoir de fusion d'un arc électrique en vue de réaliser la soudure des métaux. L'énergie est fournie par un banc d'accumulateurs et le soudage s'exécute au moyen d'une électrode qui va fondre au fur et à mesure, puis va se solidifier en un dépôt qui s'associe intimement au métal des pièces en formant une liaison continue. Les principes fondamentaux de tous les procédés de soudage à l'arc par électrode fusible sont dès lors posés, de même que dans une certaine mesure le principe des procédés à électrode réfractaire.

#### II- 2.3.1. Propriétés de l'arc de soudage

- Un arc est une décharge électrique établie et entretenue dans un gaz entre deux électrodes reliées aux pôles d'un générateur et dégageant lumière et chaleur; il forme une colonne ionisée conductrice qui répond à des lois physiques essentiellement (figure II-4):

- **électriques**, reliant tension et courant, auxquelles se rattachent les caractéristiques et le fonctionnement des générateurs;

- **thermiques** auxquelles se rattachent les phénomènes de fusion.

L'arc électrique est la source de chaleur à la base d'un certain nombre de procédés de soudage s'appuyant sur:

- ses effets thermiques aux électrodes : l'arc de soudage est un arc court entre une électrode, formant l'outil, et les pièces à souder portées localement à la température de fusion;

- les phénomènes de transfert de métal qui s'instaurent naturellement et simultanément de l'électrode, lorsqu'elle est fusible, à la pièce, formant un dépôt continu se diluant avec les bords à souder pour constituer après refroidissement la liaison métallique recherchée. Dans les procédés où l'électrode est réfractaire, il n'y a évidemment pas de transfert de métal électrode-pièce.

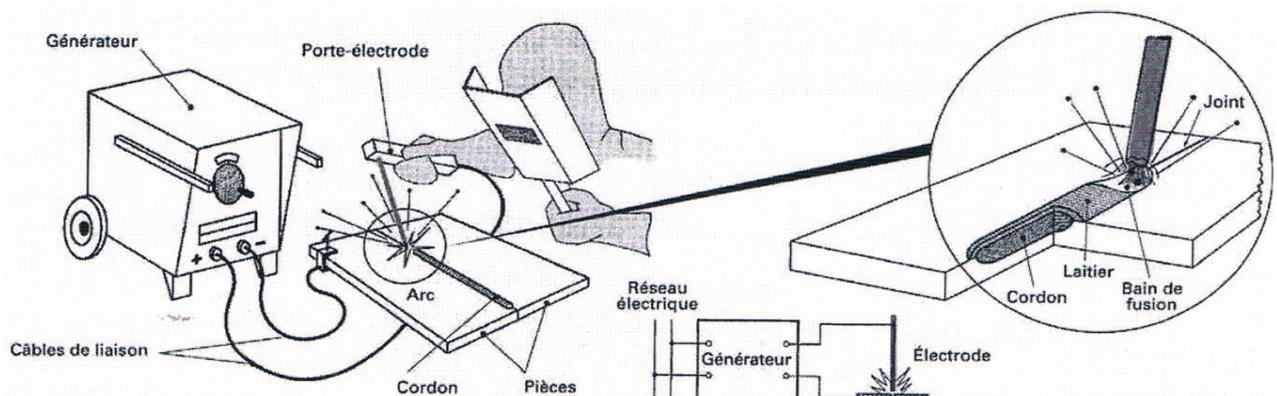
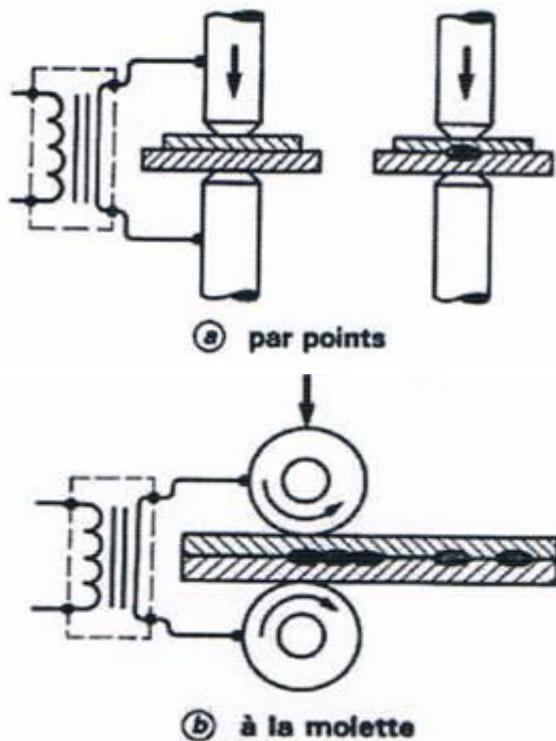


Figure II- 4. Soudage à l'électrode enrobée : principe

### II-2.4. Soudage électrique par résistance

(ou par points, ou à la molette, ou PSE, ou PSR procédé 2 selon l'ISO 4063).

Le soudage est réalisé par la combinaison d'une forte intensité électrique et d'une pression ponctuelle. Ce procédé ne nécessite pas d'apport extérieur. L'intensité électrique chauffe la matière jusqu'à la fusion. La pression maintient le contact entre l'électrode et l'assemblage. Pour souder, une pince plaque l'assemblage avec des embouts, ou des électrodes en cuivre, matière bonne conductrice de l'électricité et de la chaleur, ce qui permet de moins chauffer la zone de contact avec cette pince et d'en éviter la fusion, qui se trouve limitée à la zone de contact entre les deux feuilles à souder. Cette technique est donc dépendante de la résistivité (résistance électrique) des matières, de l'épaisseur totale de l'assemblage et du diamètre des électrodes. Ce procédé est majoritairement utilisé dans l'assemblage de tôle d'acier de faible épaisseur (< 6 mm). Cette technique bénéficie d'un savoir-faire très important et d'une productivité incomparable (dans le domaine d'application). Pour exemple, une caisse automobile est assemblée à plus de 80 % par des points soudés. Il peut s'agir également d'un soudage par bossages', sur des pièces ayant subi au préalable un emboutissement (figure II-5).



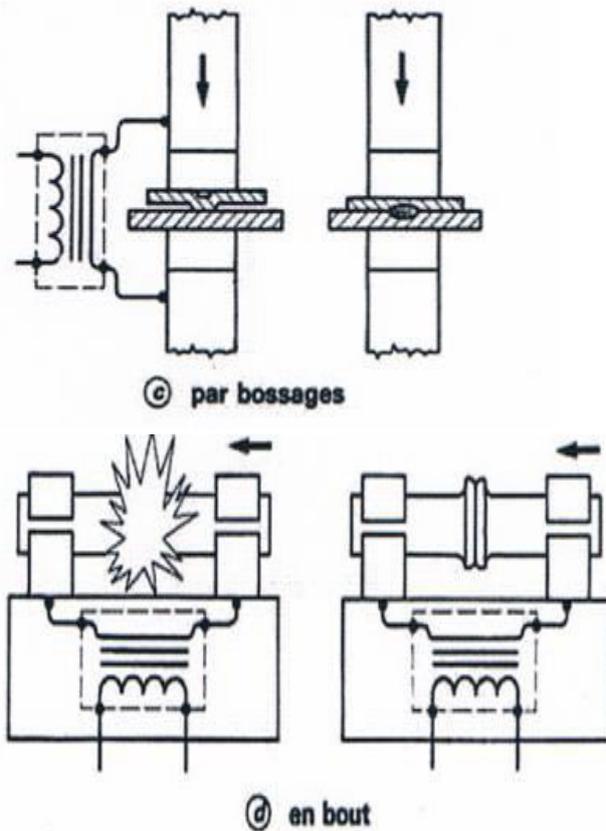


Figure II- 5 Procédés de Soudage par Résistance

### II-2.5. Soudage TIG

Le soudage TIG (figure II-6) est un procédé de soudage à l'arc avec une électrode non fusible. TIG est un acronyme de Tungsten Inert Gas où Tungsten (Tungstène) désigne l'électrode et Inert Gas (Gaz inerte) désignent le type de gaz plasmagène utilisé. L'arc se crée entre l'électrode réfractaire (- du générateur) et la pièce (+ du générateur) sous un flux gazeux. De façon générale, il s'agit d'un gaz ou d'un mélange de gaz rares. (Surtout de l'argon et de l'hélium, ou un mélange de ces deux gaz) L'amorçage se fait grâce au gaz circulant dans la buse qui entoure une grande partie de l'électrode. Le soudage s'effectue en polarité directe (pôle - du générateur relié à l'électrode) pour la majorité des métaux et alliages (aciers, inox, cuivreux, titane, nickel...) sauf dans le cas des alliages légers d'aluminium ou du magnésium où l'on soude en polarité alternée (pendant un laps de temps, l'électrode est reliée au pôle + du générateur). Souder de façon continue en polarité inverse (pôle + relié à l'électrode) détruit cette électrode en la faisant fondre.

## CHAPITRE II : DIFFERENTS TYPES DE SOUDURE

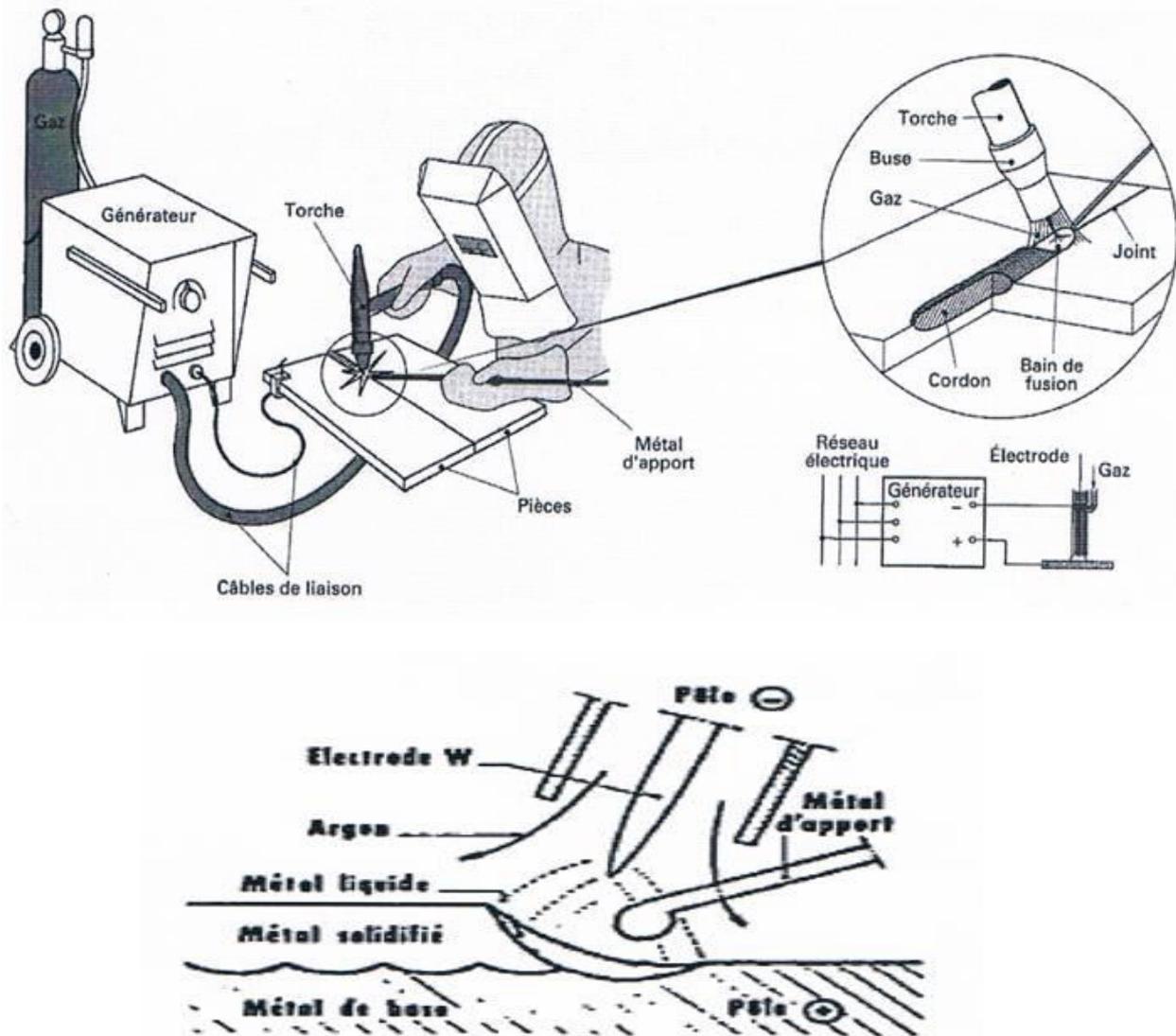
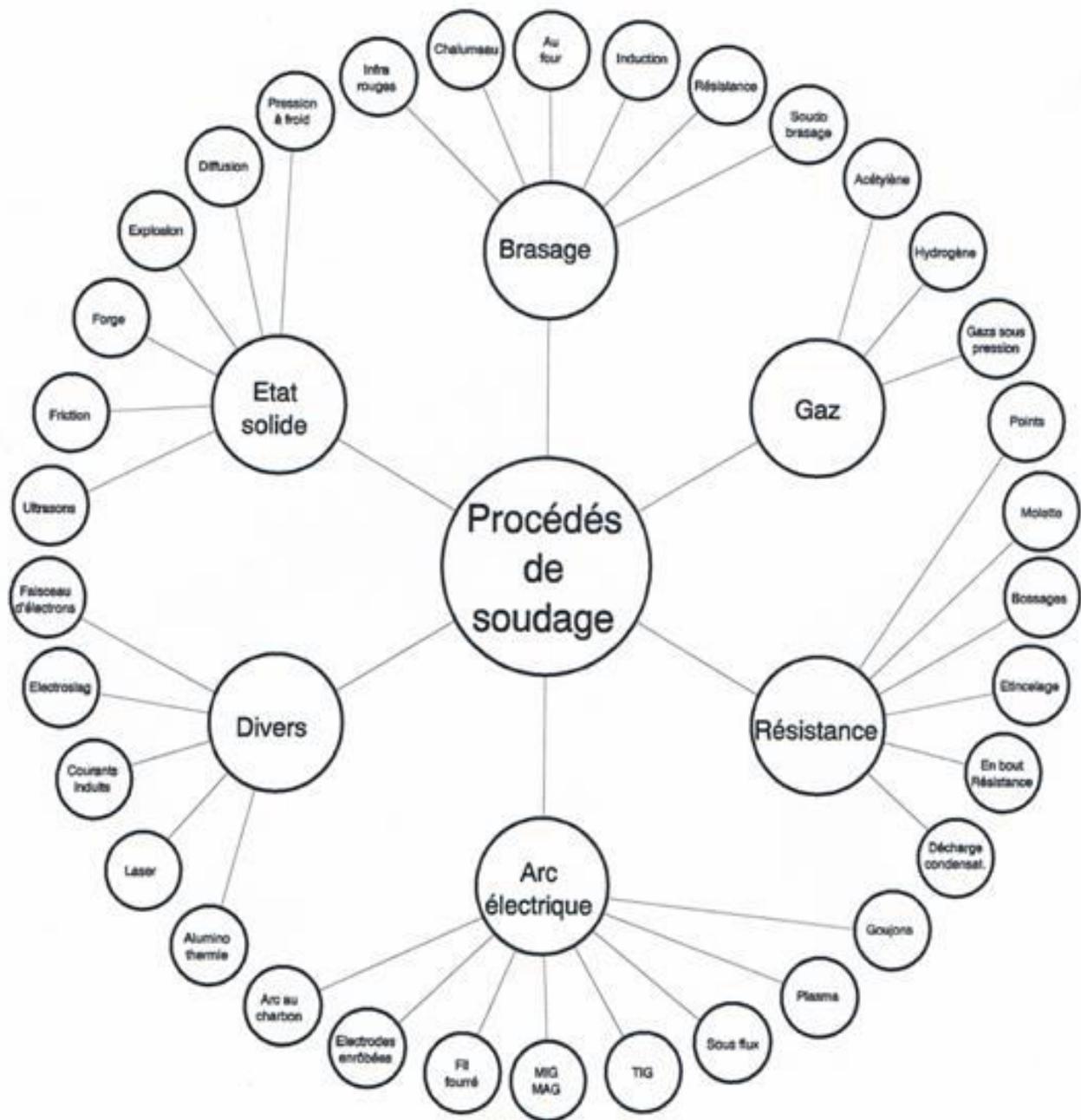


Figure II – 6 Soudage à l'électrode réfractaire TIG : principe

## II.2- 6 Procédés de Soudage



### II-2-7- LE SOUDAGE MIG

#### 1-Soudage semi-automatique (MIG OU MAG)

##### 1-1- Introduction

Depuis de nombreuses années, le soudage MIG/MAG constitue le gros des processus de soudage par fusion. Sa disponibilité universelle en termes d'épaisseur, sortes de matériau, formes de cordon et positions de soudage, explique son succès dans presque tous les domaines de l'usinage des métaux. Les récents développements dans le soudage MIG/MAG sont entre autres le soudage à fil plat, la technologie à source de courant, le soudage pulsé et le soudage au courant alternatif.

Le soudage MIG-MAG (respectivement 131 ou 137, et 135 ou 136 suivant la norme EN ISO 4063), ou encore GMAW selon les normes américaines, est un procédé de soudage semi-automatique. La fusion des métaux est obtenue par l'énergie calorifique dégagée par un arc électrique qui éclate dans une atmosphère de protection entre un fil électrode fusible et les pièces à assembler.

Les acronymes MIG et MAG signifient respectivement Métal inert gas et Métal active gas. La différence entre les deux procédés tient à la composition du gaz. Le procédé MIG utilise un gaz neutre qui ne réagit pas avec le métal fondu (argon ou argon + hélium), contrairement au procédé MAG (mélange d'argon avec du dioxyde de carbone et de l'hydrogène en proportions variables selon les métaux à souder). Le gaz est injecté en continu sur l'arc afin d'isoler complètement le métal en fusion de l'air ambiant.

##### 1-2. Principe

Dans le descriptif du MIG (Métal Inert Gas) et du MAG (Métal Active Gas) de l'article B 7 730, a été évoqué le fait que les phénomènes de transfert de métal relevaient, selon la puissance développée dans l'arc et le diamètre du fil, de deux modes distincts:

- le transfert par vaporisation ou « spray transfert» lorsque la puissance est élevée (épaisseurs à souder fortes);
- le transfert par gouttes ou « dip transfert» lorsque la puissance est réduite (épaisseurs à souder faibles).

Dans le premier cas, la tension d'arc et le courant ont tous les deux une valeur moyenne constante, due à une fusion de fil régulière sous forme de vapeur métallique.

Dans le second cas, en diminuant la vitesse de fil et la tension d'arc, la fusion du fil devient subitement globulaire par formation de gouttes qui se projettent sur la pièce à cadence élevée. On constate que le transfert de chaque goutte engendre un bref court-circuit et une pointe d'intensité de courant. Le régime obtenu, adapté au soudage d'épaisseurs faibles, est appelé soudage en «arc court» ou en « short-arc ».

## CHAPITRE II : DIFFERENTS TYPES DE SOUDURE

Il n'y a pas, en pratique, de passage progressif d'une situation à l'autre. Selon la dimension du cordon et les paramètres de fusion, le transfert se fait soit par pulvérisation soit par gouttes, et on ne peut pas se régler finement sur toute l'étendue de la gamme offerte par le générateur.

Un enregistrement de transfert par gouttes montre l'aspect quelque peu irrégulier du phénomène dont on subit les effets. Cela a donné l'idée que l'introduction d'impulsions régulières dans le courant de soudage permettrait non plus de subir mais de contrôler le transfert. C'est ainsi que la mise en oeuvre de générateurs à transistors, dotés de la fonction « impulsions de courant », a pu conduire à de bonnes conditions de travail sur la quasi-totalité de la gamme d'épaisseurs soudables.

### 1-3- principe de base

Il existe différentes dénominations usuelles pour le soudage MIG/MAG. Les abréviations MIG et MAG correspondent à Métal Inert Gas et Métal Active Gas. MIG n'est donc une appellation correcte que si l'on soude avec un gaz inerte (Ar ou He) en guise de gaz de protection.

La dénomination de soudage MAG doit être utilisée lorsqu'on ajoute un composant actif au gaz ( $\text{CO}_2, \text{O}_2, \dots$ ). Les autres appellations sont le soudage semi-automatique, la dénomination américaine est GMAW, ce qui correspond à Gas Métal Arc Welding. Le principe de base de ce processus de soudage, la fusion d'un fil acheminé en continu dans un arc électrique, est inchangé depuis des dizaines d'années FigIII -6. Principe du soudage MIG et MAG

Figure II – 7 Schéma d'installation

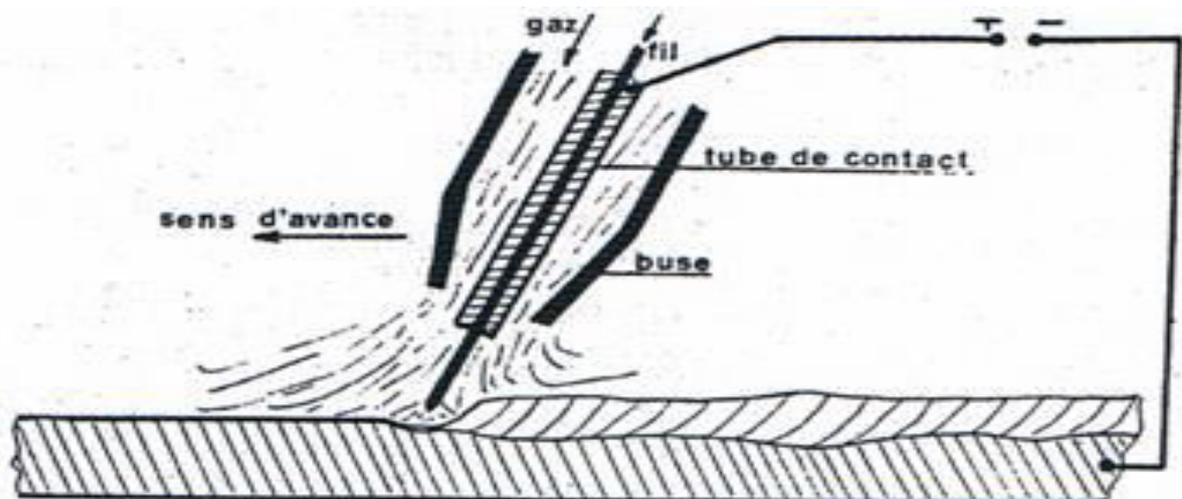


Figure II -6 Soudage MIG et MAG : Schéma de Principe

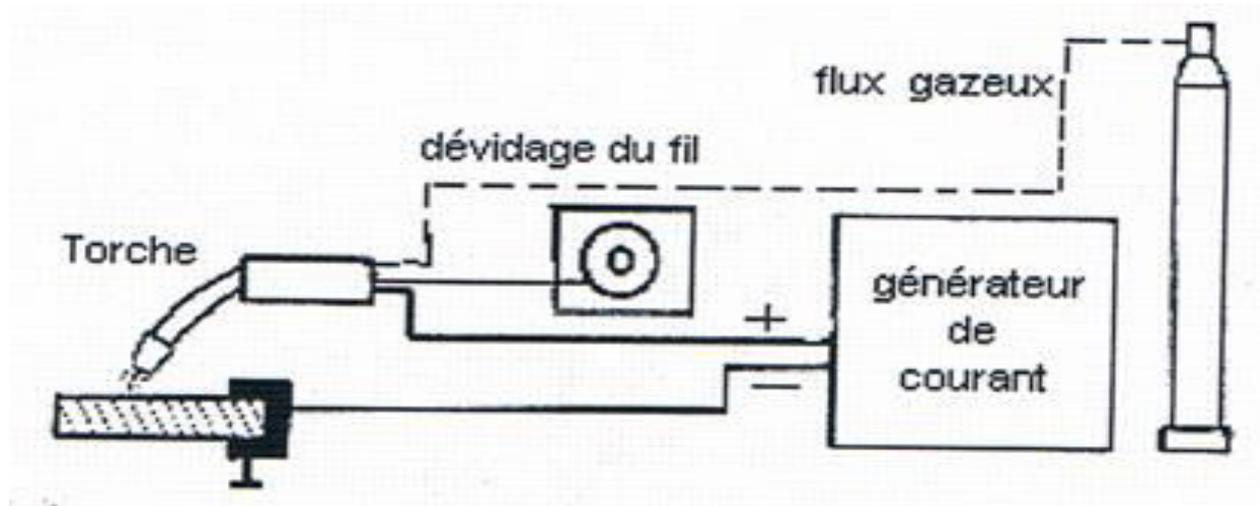


Figure II – 7 Schéma d'installation

### 1-4- Description du procédé

La figure II-8 représente une installation de soudage semi-automatique, procédé que l'on désigne également par les expressions MIG et MAG selon que le gaz est respectivement inerte ou actif (Métal Inert Gas et Métal Active Gas). Dans les pays anglo-saxons, on utilise aujourd'hui de préférence et indifféremment les expressions suivantes

Semi-automatic welding, gas metal arc welding ou GMA, gas shielded arc welding process

Le soudage semi-automatique s'apparente par le fil électrode au soudage sous flux. Bien que parfois actif, le gaz de protection joue un rôle métallurgiquement beaucoup plus restreint que le flux mais simplifie la mise en oeuvre du procédé.

L'appareillage comporte : une source de courant continu, un ensemble de dévidage d'une bobine de fil constitué par un dévidoir et un entraîneur, une bouteille de gaz avec détendeur et débitmètre, une torche spécifique du procédé et divers accessoires.

L'arc étant visible, les accessoires de protection sont identiques à ceux du soudage à l'électrode enrobée.

La torche a pour rôle de guider le fil sur la soudure et d'amener le courant à son extrémité par un tube contact.

De la même façon qu'en soudage sous flux. Lors du soudage, l'appui sur la gâchette commande l'ouverture automatique de la vanne de gaz, la fermeture du contacteur qui met le générateur sous tension faisant apparaître.

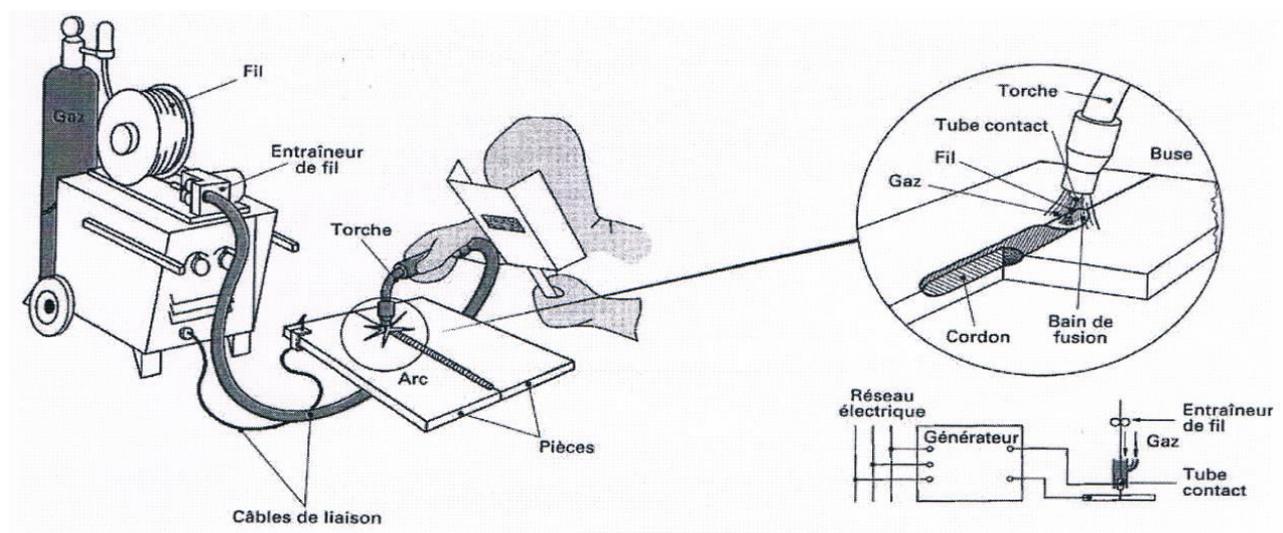
La tension à vide, et également le moteur de l'entraîneur qui dévide le fil. L'arc s'amorce au contact électrode pièce et la fusion s'installe instantanément pour former le cordon.

## CHAPITRE II : DIFFERENTS TYPES DE SOUDURE

L'avance du fil électrode à vitesse constante, conjuguée avec la caractéristique horizontale du générateur, rend le fonctionnement de l'arc et le processus de fusion indépendants de l'opérateur dont le seul rôle ne réside plus que dans le guidage du cordon sur le joint, d'où le caractère

Semi-automatique du soudage manuel .Le cordon ne se recouvre d'aucun laitier après soudage ; c'est un des avantages de ce procédé qui peut se conduire dans toutes positions.

Le soudage semi-automatique peut s'automatiser facilement. Il peut s'appliquer sur la presque totalité des matériaux soudables sans grande difficulté pour le mettre en oeuvre, de là son intérêt dans tous les domaines industriels



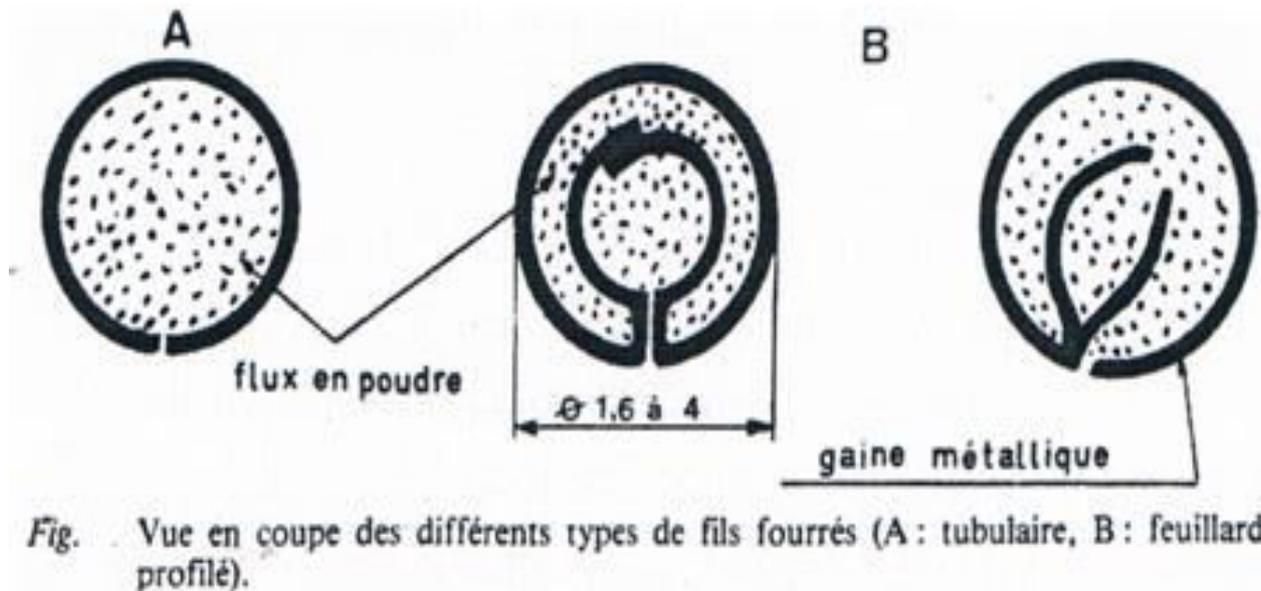
**Figure II – 8 Soudage à l'arc avec fil électrodes fusibles ou soudage Semi-automatique**

### 1-5.Caractéristiques du couple fil/protection gazeuse

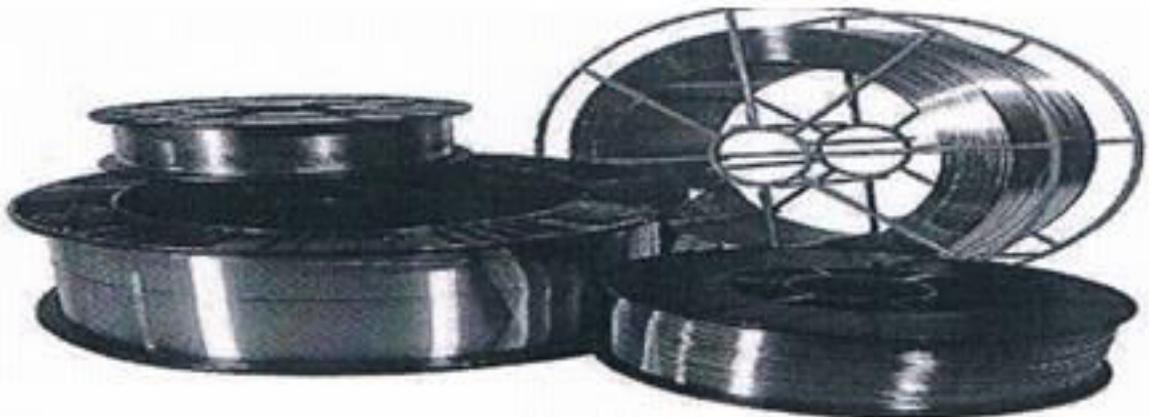
#### 1-5.1. Fil

L'électrode est, comme pour le soudage sous flux, un fil, de grande longueur(fig II.9), enroulé sur un touret ou une bobine isolante, dont le matériau correspond au métal à souder (acier doux ou allié, acier inoxydable, alliage d'aluminium ou de cuivre). Les fils d'aciers sont protégés de l'oxydation par un cuivrage électrolytique qui a également pour rôle de faciliter l'arrivée du courant à son passage dans la torche. Des proportions importantes de silicium (0,3 à 1,2 %) et de manganèse (0,9 à 1,3 %) jouent un rôle désoxydant pour compenser les effets des gaz de protection actifs.

Les diamètres normalisés vont de 0,6 à 2,4 mm, voire 3,2 mm (fig. II.9)



**Fig II- 9 Fil fourré pour les Soudage MIG et MAG**



**Fig II – 9 Longueur de fil**

### 1-5.2. protection gazeuse

La protection gazeuse est, selon le cas, inerte ou active et oxydante (les protections réductrices sont peu utilisées). C'est ce qui établit la distinction d'appellation MIG (inerte) ou MAG (actif) dans l'utilisation du procédé, le matériel de soudage ne présentant pas, par ailleurs, de différences notables.

Les protections gazeuses communément employées sont données dans le tableau II-1.

Les producteurs et distributeurs de gaz de soudage proposent des mélanges prêts à l'emploi soit à la demande des utilisateurs, soit avec des proportions et des additifs qu'ils ne divulguent pas et auxquels ils donnent une marque de fabrique.

De même que pour les autres procédés, la protection gazeuse joue différents rôles.

## CHAPITRE II : DIFFERENTS TYPES DE SOUDURE

---

### a)- Rôle électrique

Le potentiel d'ionisation varie d'un type de protection à l'autre. Ainsi d'environ 16 V pour l'argon pur, il est de 25 V pour l'hélium et cela explique la pénétration supérieure que permet ce dernier. Ces deux gaz produisent des conditions énergétiques conduisant à des transferts par pulvérisation (spray arc), généralisés pour les métaux non ferreux surtout.

L'addition, directe ou par l'intermédiaire de CO<sub>2</sub>, d'oxygène à l'argon abaisse plus ou moins la tension et la puissance de l'arc et agit sur le mode de transfert, qui s'effectue alors par gouttes avec possibilité, par action sur les paramètres électriques, d'en modifier le volume et la fréquence.

On peut, à la limite, en diminuant la tension délivrée par le générateur, obtenir un transfert globulaire avec mise en court-circuit de celui-ci. Cette situation est physiquement recherchée, car elle permet de souder des épaisseurs très faibles et d'étendre considérablement le domaine d'application du procédé MAG. On l'appelle soudage à arc court (short arc).

### b)- Rôle métallurgique

Il s'entend pour les mélanges actifs, c'est-à-dire dans le cas du soudage MAG. L'origine des mélanges actifs vient en grande partie de la recherche d'une protection mieux appropriée que l'argon dans l'application du procédé au soudage des aciers. L'emploi du CO<sub>2</sub> est possible moyennant une adaptation des sources de courant ainsi que des fils d'apport.

De telles qualités de fils se sont généralisées et conviennent parfaitement au soudage sous argon additionné d'oxygène, voire de CO<sub>2</sub>, avec des effets sur le mode de transfert du métal, en particulier, et sur les caractéristiques de soudures.

Dans les applications du procédé aux métaux réfractaires, aux alliages d'aluminium et de magnésium, la protection gazeuse est essentiellement inerte et constituée par de l'argon ou de l'hélium et le procédé est le MIG.

### c)-Rôle mécanique

Le gaz de protection est apporté au niveau de la torche par une buse annulaire. Il peut l'être dans certains cas par une arrivée latérale. L'arrivée de gaz comporte un effet de souffle qui peut être mis à profit, si besoin.

Le débit et la pression du gaz sont les paramètres indépendants, qui sont à déterminer en fonction de la protection qu'il doit assurer. Des débits de 10 à 20 L/min sont couramment utilisés. La consommation et le prix du gaz sont des facteurs économiques importants de l'emploi du procédé.

### 1-5.3. Fusion d'un fil

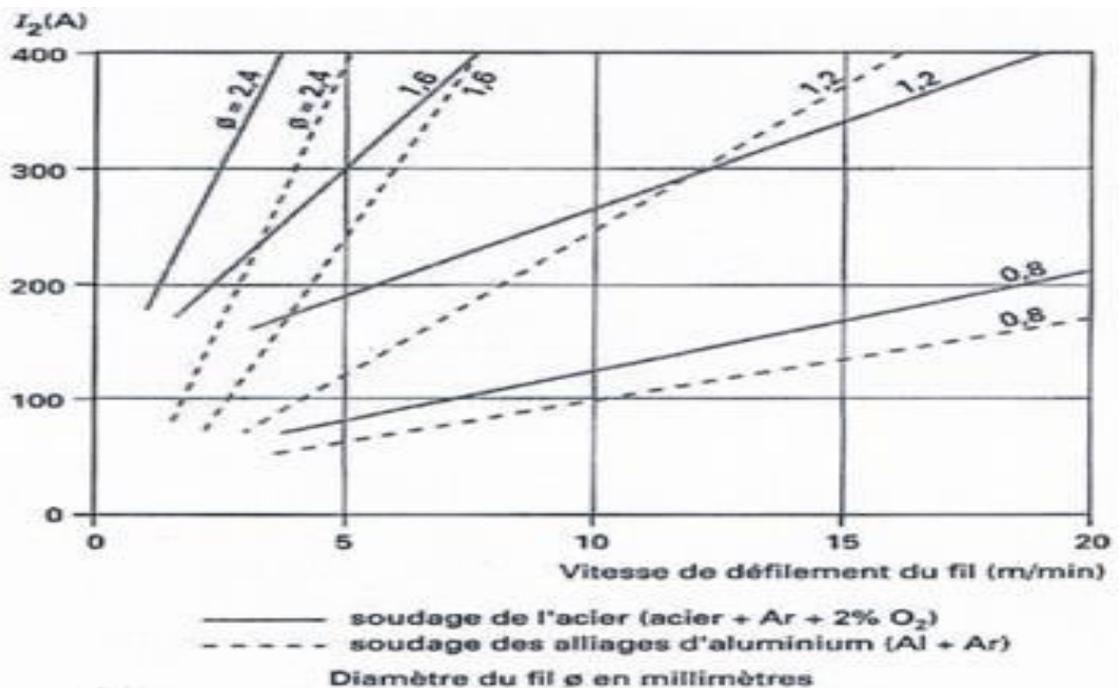
On a représenté sur la (figure II-10), à titre d'exemple, les caractéristiques de fusion de fils d'aciers et de fils d'alliages légers. Les matériaux courants sont fusibles sous gaz avec

## CHAPITRE II : DIFFERENTS TYPES DE SOUDURE

des taux de fusion variables selon le cas et par suite le procédé s'applique largement dans tous les domaines. La gamme des intensités et l'emploi de fils de petits diamètres réservent cependant le procédé à une utilisation sur des épaisseurs faibles (quelques millimètres). Il couvre en pratique toutes les possibilités du soudage à l'électrode enrobée, mais reste limité par rapport au soudage sous flux qu'il complète en bas de gamme.

Procédé	Gaz	Applications
MIG	Ar	Tous métaux en principe
	He	Alliages d'aluminium
	Ar + He	Alliages d'aluminium et de nickel
MAG	Ar + 1 à 2 % O <sub>2</sub>	Aciers au carbone avec fils désoxydants
	Ar + 3 à 5 % O <sub>2</sub>	
	Ar + 20 à 30 % CO <sub>2</sub>	
	Ar + 5 % O <sub>2</sub> + 15 % CO <sub>2</sub>	
	CO <sub>2</sub>	
	CO <sub>2</sub> + 5 % O <sub>2</sub>	

**Tableau II – 1 Protection gazeuses utilisées en Soudages MIG et MAG**



**Fig II – 10 Fusion d'un Fil**

### 1-6. Conditions de soudage

Le soudage MIG ou MAG emploie exclusivement du courant continu, le pôle positif à l'électrode. Le générateur a des caractéristiques secondaires horizontales (plates) et son réglage porte sur la tension secondaire à vide, proche de la tension d'arc. La puissance est

## CHAPITRE II : DIFFERENTS TYPES DE SOUDURE

---

alors réglée par l'automatique, pour lequel le soudeur assure uniquement le guidage de la torche contrairement au soudage manuel.

En pratique, les conditions de soudage partent de la nature des matériaux à souder et de leurs épaisseurs qui déterminent la qualité de fil, son diamètre et une fourchette de courant. La tension du générateur est ensuite réglée pour ajuster la longueur d'arc.

On distingue trois modes de fonctionnement: statique, en arc court, en courant pulsé.

### **a)-Fonctionnement statique**

La tension et le courant sont constants et stables (l'arc est dit calme). Ces conditions se rencontrent lorsque le transfert de métal s'effectue par pulvérisation.

Cette situation est celle des fortes intensités (300 à 400 A) et des applications sur fortes épaisseurs (de l'ordre du centimètre).

### **b) - Fonctionnement en arc court**

La recherche d'un gaz de protection moins onéreux que l'argon ou l'hélium pour des applications courantes sur acier a fait apparaître que le CO<sub>2</sub> est à même de résoudre le problème. Mais la puissance dans l'arc est réduite et, pour un diamètre de fil donné, le transfert s'effectue alors nécessairement par gouttes. À la limite, l'arc devient erratique. L'adjonction d'une inductance est alors essentielle dans la limitation des pointes de courant et des projections.

Ce fonctionnement dit en arc court a permis d'appliquer le procédé à des assemblages de tôles d'acier minces (carrosseries). Sur la figure 1-10 sont représentées les formes de la tension et du courant en corrélation avec le transfert d'une goutte.

### **c)-Fonctionnement en courant pulsé**

En observant les variations de l'intensité instantanée, on a compris que les pointes de courant au moment du court-circuit jouaient un rôle dans la formation et la projection des gouttes, d'où l'idée de pulser le courant afin de gouverner le phénomène de transfert et de le régulariser. Les générateurs modernes à transistors apportent une réponse à cet objectif. Ils ont permis de souder des épaisseurs faibles, d'absorber de plus grands écarts d'accostage et de souder en position.

### **1-7. Domaines d'applications**

Le soudage MIG- MAG est né de l'intérêt d'appliquer au soudage à l'électrode continue, à la place de la poudre minérale, une protection gazeuse. En fonctionnement manuel, il offre, par rapport au soudage à l'électrode enrobée, l'option dite semi-automatique dans laquelle l'opérateur n'a de rôle que dans le guidage de la torche et n'èifa plus aucun dans la fusion de l'électrode.

L'emploi de CO<sub>2</sub> en short arc constitue une avancée pratique très importante qui a permis au procédé de s'imposer dans le domaine des épaisseurs minces d'aciers au carbone peu ou faiblement alliés constituant la base de la chaudronnerie légère, de la petite et moyenne mécano soudure et de la serrurerie industrielle(fig II-11). Il s'est développé dans la construction automobile sous forme semi- automatique mais surtout automatique à laquelle il est parfaitement adapté.

## CHAPITRE II : DIFFERENTS TYPES DE SOUDURE

Il offre toutes les possibilités du soudage manuel quant aux positions d'emploi en corniche, au plafond, etc. L'absence de laitier rend le travail plus propre et sans reprise définition, car la fusion spray arc permet d'obtenir des surfaces de dépôt très lisses.

Le soudage MIG est la solution semi-automatique et automatique des assemblages en alliages d'aluminium et en aciers inoxydables dans la chaudronnerie des réservoirs transportés, des silos propres et des conteneurs des industries agro-alimentaires. Malgré les tentatives faites dans la composition des fils et des gaz, très vite limitée en comparaison avec les flux ou les enrobages, les soudures MIG - MAG ne sont pas performantes du point de vue mécanique (manque de compacité) et métallurgique ( appauvrissement des liaisons en éléments d'apport). Le procédé n'est donc pas pris en considération dans les cas critiques.

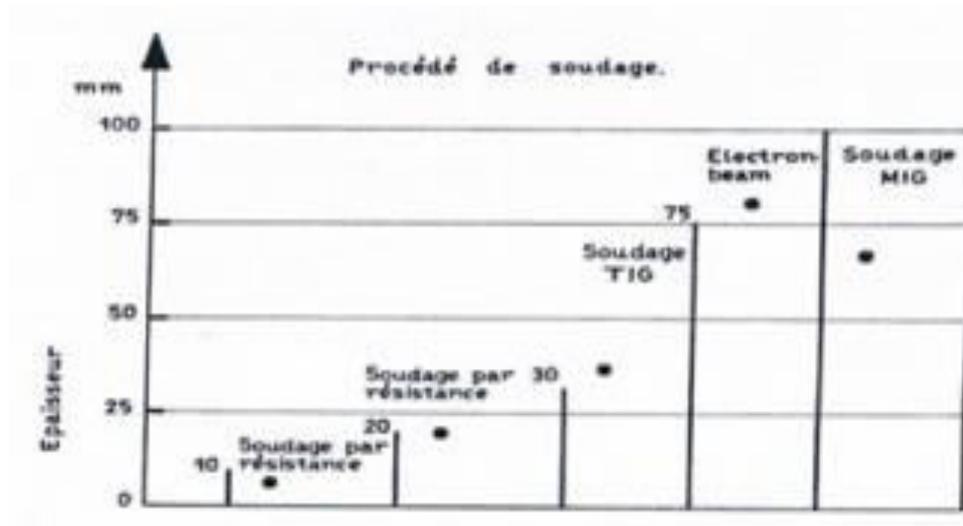


Figure II-11: le choix du procédé de soudage en fonction des épaisseurs à souder

### 1-8.- Avantages et inconvénients du procédé de soudage MAG

#### a)- Avantages

- Rentabilité du procédé
- Vitesse très élevée en soudage
- Taux de dépôt de métal élevé
- Pas de dégrassage du laitier
- Possibilité de soudage dans toutes les positions
- Procédé automatisable et utilisé en robotique

#### b)- Inconvénients

- Longueur possible d'un cordon sans points d'arrêt très important

## CHAPITRE II : DIFFERENTS TYPES DE SOUDURE

- Plage d'épaisseurs de soudage très importante
- Contrôle relativement aisé de la pénétration en régime de court-circuit
- Aspect de cordon correct.

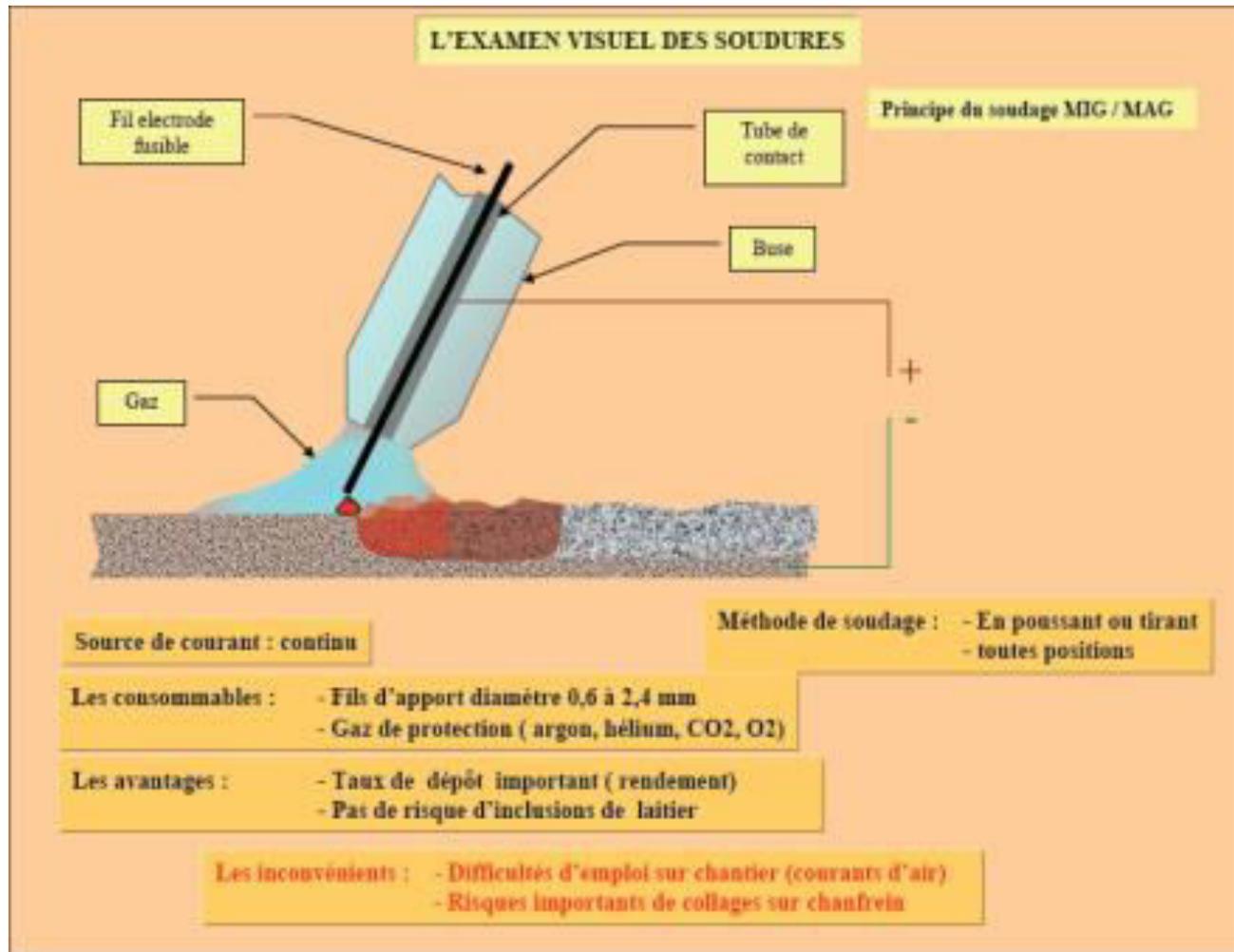


Fig II – 12.L'EXAMEN VISUEL DES SOUDURES

# CHAPITRE-III-

## **LA METALLURGIE DE SOUDURES**

### III-1 MÉTALLURGIE :

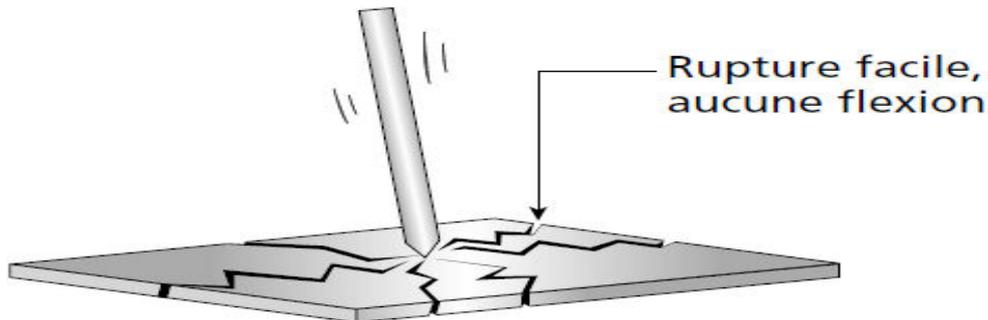
Le travail du soudeur s'effectue sur une vaste gamme de métaux. Afin d'être en mesure de choisir ou de justifier le choix d'un procédé de soudage et d'un métal d'apport approprié, on doit évidemment connaître les propriétés et la soudabilité de la pièce à souder. C'est là que des notions de métallurgie trouvent toute leur utilité. Ce deuxième chapitre propose donc un aperçu des propriétés physiques de différents métaux et présente, plus particulièrement, les métaux les plus communément soudés.

### III-2 PROPRIETES DES METAUX

Les métaux se distinguent en fonction de différentes caractéristiques qui leur confèrent des propriétés spécifiques. Celles-ci déterminent non seulement leur soudabilité, mais aussi la fonction du métal dans un assemblage :

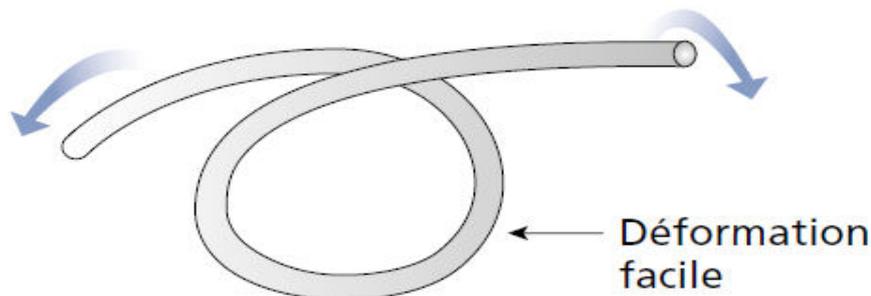
#### III-2-1 Fragilité :

La fragilité désigne la caractéristique d'un métal qui se brise facilement sous l'effet d'un choc ou d'une déformation. Il se déforme peu ou pas du tout, et se casse facilement.



#### III-2-2 Ductilité:

À l'opposé, la ductilité représente la capacité d'un métal à se déformer sans se rompre. Il peut être étiré, allongé ou soumis à des forces de torsion. Les matériaux ductiles sont difficiles à casser parce que les fissures ou les défauts créés par une déformation se propagent difficilement.



## CHAPITRE III : LA METALLURGIE DE SOUDURES

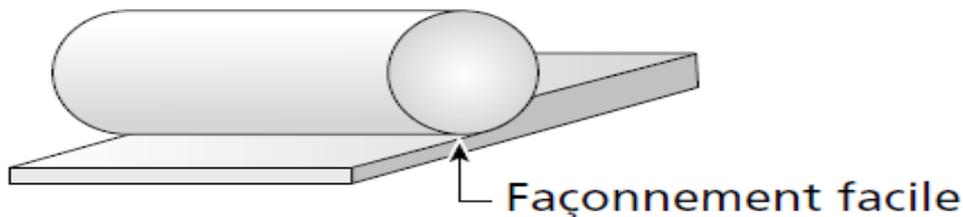
### III-2-3 Ténacité :

La ténacité correspond à la capacité des matériaux à résister aux chocs sans se briser ni s'écailler. Les marteaux et les équipements utilisés pour déformer ou couper des plaques d'acier (matrices, poinçons, etc.) sont constitués de matériaux de haute ténacité.

### III-2-4 Malléabilité :

La malléabilité est une caractéristique qui permet au métal de se laisser façonner. Elle réfère à la résistance relative du métal soumis à des forces de compression, comme le forgeage ou le laminage. Un exemple de matériel extrêmement malléable, quoique non soudable, est la pâte à modeler.

Notons que la malléabilité d'un matériau croît avec l'augmentation de la température.



En soudage, on travaille généralement avec des matériaux ductiles et malléables. La figure 1.1 présente certains matériaux en fonction de leur ductilité/malléabilité.

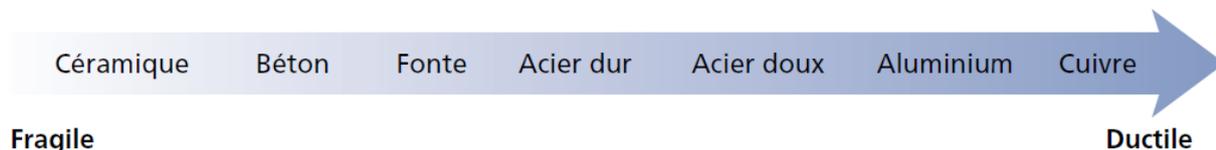


Figure 1.1 Du plus fragile au plus ductile.

### III-2-5 Élasticité :

L'élasticité désigne la capacité d'un matériel à reprendre sa forme originale après avoir subi une déformation. C'est le cas typique d'un ressort qu'on étire puis qu'on relâche.

### III-2-6 Dureté :

La dureté est la capacité d'un corps à résister à la pénétration d'un corps plus dur que lui. Elle se caractérise aussi par sa résistance aux rayures. Le diamant constitue le matériau le plus dur. Les aciers à haute teneur en carbone sont durs, les aciers doux, un peu moins, et l'aluminium est de faible dureté.

### III-2-7 Résistance à l'abrasion :

Les matériaux durs présentent aussi une bonne résistance à l'abrasion, c'est-à-dire qu'ils ne s'usent pas facilement par frottement. En termes pratiques, ils sont plus difficiles à meuler.

### III-2-8 Résistance à la corrosion :

La résistance à la corrosion désigne la capacité d'un matériau à ne pas se dégrader sous l'effet de la combinaison chimique de l'oxygène et du métal. Un métal ferreux résistant à la corrosion ne rouille pas ; c'est le cas des aciers inoxydables et de certains autres aciers d'alliage.

### III-2-9- Magnétisme :

Le magnétisme est une propriété caractéristique des métaux ferreux, qui les rend sensibles aux aimants.

## III-3 LES JOINTS SOUDES :

Pour définir complètement un joint soudé, il faut considérer sa forme, pour le calcul et sa position dans l'espace, pour la mise en œuvre :

### III-3-1 POSITION DANS L'ESPACE :

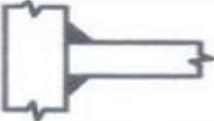
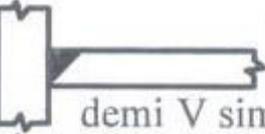
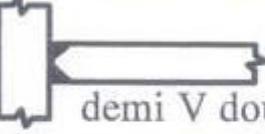
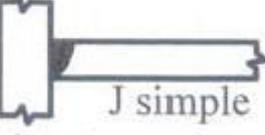
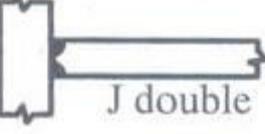
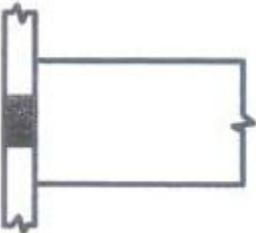
Quatre types de position sont à considérer :

- soudure à plat
- soudure horizontale,
- soudure verticale,
- soudure au plafond.

### III-3-2 GEOMETRIE DE L'ASSEMBLAGE :

Le tableau ci-dessous, définit les différents types de soudure en fonction de la géométrie des pièces à assembler.

## CHAPITRE III : LA METALLURGIE DE SOUDURES

TYPES COURANTS D'ASSEMBLAGE SOUDES			
types de soudures	types d'assemblages		
	assemblage bout-à-bout	assemblage en T	assemblage à clin
soudure d'angle			
soudure en entaille			
soudure en bout à pleine pénétration	 V simple  V double  U simple  U double	 demi V simple  demi V double  J simple  J double	
soudure en bout à pénétration partielle	 V double  U double	 demi V double	
soudure en bouchon			

## CHAPITRE III : LA METALLURGIE DE SOUDURES

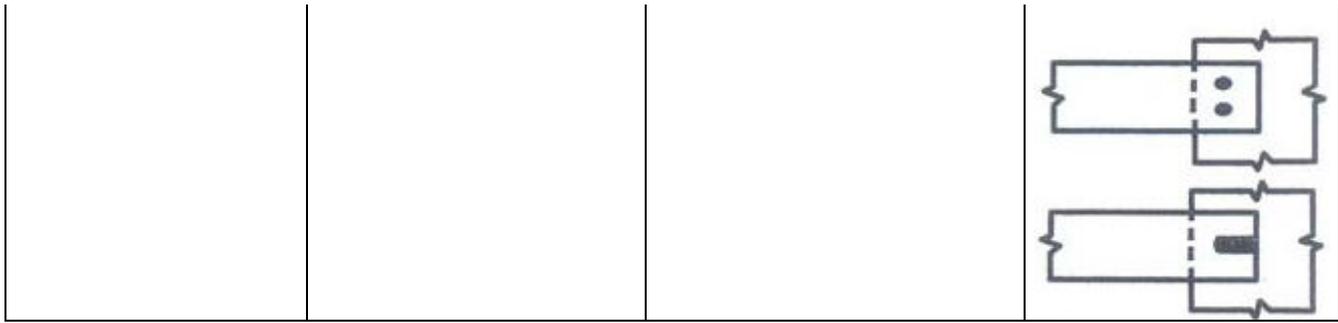


Tableau III.1 : différents types de soudure.

### III-4 STRUCTURE ET PROPRIETES DES SOUDURES :

Le métal fondu solidifié a une structure de matériau moulé et des propriétés caractéristiques de l'acier coulé, c'est-à-dire un rapport de la limite élastique à la résistance ultime plus grand que celui de l'acier de structure. Le métal fondu est un mélange de métal de base et d'acier fondu provenant de l'électrode. Pour l'acier de structure, la composition de l'électrode est choisie d'habitude de telle sorte que le métal fondu qui en résulte soit plus résistant que les éléments à assembler. Éventuellement, des conditions particulières peuvent passer outre ce choix. Par exemple, quand on veut assembler de l'acier inoxydable et de l'acier au carbone-manganèse, on doit utiliser une électrode en acier hautement allié afin d'éviter les fissures dans le métal fondu.

Quand le bain de fusion se refroidit et se solidifie, la plus grande partie de la chaleur s'écoule à travers le métal de base le long du joint. L'acier est alors soumis à des cycles d'élévation de température et de refroidissement, analogues à ceux conférés par un traitement thermique.

Le contrôle de la ZTA se fera par:

- la composition de l'acier (équivalent Carbone).
- la vitesse de refroidissement de la ZTA.

A son tour, la vitesse de refroidissement est déterminée par:

- l'énergie de l'arc, c'est-à-dire l'énergie linéaire de soudage sur le joint.
- Le type de joint.
- l'épaisseur de l'acier.
- La température du plat ou du profilé avant le soudage, par exemple le préchauffage.

Une méthode de détermination de l'interaction de ces différents facteurs, afin d'éviter l'apparition des fissures dans la zone thermiquement affectée (ZTA).

En plus de son effet sur la vitesse de refroidissement, on utilise le préchauffage pour :

- Disperser l'hydrogène du bain de fusion et de la zone ZTA. La présence d'hydrogène dans la ZTA augmente le risque de fissure s'il y a trempe. L'hydrogène provient

## CHAPITRE III : LA METALLURGIE DE SOUDURES

---

principalement du flux. Une électrode appropriée, stockée correctement, peut réduire le risque d'absorption de l'hydrogène.

- Enlever l'humidité de surface dans des conditions d'hygrométrie élevée ou sur le chantier.
- Amener l'acier à des conditions ambiantes normales (20°C).

### III-5 CLASSIFICATION ET QUALITE DES SOUDURES :

Lors du dimensionnement, on attribuera aux soudures l'une des quatre classes de qualité données ci-dessous

- **Classe A** Qualité spéciale :  
pour les cordons fortement sollicités dans des éléments de construction spéciaux, hormis les charpentes métalliques usuelles, par exemple les conduites forcées. les éléments de centrales nucléaires à hautes exigences de sécurité.
- **Classe B** Qualité supérieure, exigence élevée :  
pour les soudures complètement pénétrées dans les éléments où la plastification des sections est admise pour toutes les soudures dont la rupture aurait des conséquences graves  
pour les détails de construction où la résistance à la fatigue est fortement mise à contribution.
- **Classe C** Qualité normale, exigence moyenne :  
pour les soudures complètement pénétrées dans les éléments où les sections restent élastiques.  
pour les cordons d'angle porteurs (cas normal)  
pour les détails de construction où la résistance à la fatigue est faiblement mise à contribution.
- **Classe D** Qualité minimale, exigence modérée :  
pour les soudures faiblement sollicitées ou constructives  
pas autorisées en cas de fatigue, de chocs, de températures inférieures à -10°C.

Pour chacune de ces classes, les normes SN EN 25817 prescrivent

- des valeurs limites pour les défauts internes et externes à la soudure,
- des mesures minimales à prendre lors de la fabrication,
- des exigences relatives aux contrôles

Le choix de la classe de qualité est primordial aussi bien pour la sécurité de la structure que pour l'économie de la fabrication et du montage. L'ingénieur prêtera donc une attention particulière à ce choix qui est dicté par les critères suivants:

## CHAPITRE III : LA METALLURGIE DE SOUDURES

---

- conséquences d'une rupture pour l'utilisateur ou l'environnement,
- nature et importance des actions et des sollicitations,
- sensibilité du détail de construction à la fatigue ou à la rupture fragile,
- type de comportement (élastique ou plastique) de la section.

### III-6 APTITUDE AU SOUDAGE :

L'aptitude au soudage doit être évaluée en tenant compte de la soudabilité du matériau, des possibilités de soudage et des dispositions constructives. Le comportement des matériaux de base et des matériaux d'apport peut être évalué en fonction de certains paramètres de soudage (type de cordon, position et procédé de soudage, etc.), à l'aide de la qualification du mode opératoire de soudage.

Des mesures particulières sont nécessaires pour les travaux de soudage de pièces de forte épaisseur de même que pour des températures de matériau inférieures à + 5 °C. Les pièces sont de forte épaisseur si:

- $t > 30$  mm pour les aciers de construction jusqu'à S 355
- $t > 25$  mm pour les aciers à plus haute résistance.

De telles mesures peuvent comprendre entre autres:

- la prise en considération de spécifications supplémentaires du fournisseur
- l'ordre d'exécution des cordons de soudure
- le préchauffage
- le contrôle de la température durant le soudage
- le traitement thermique ultérieur au soudage (post chauffage).

Lors du choix des dispositions constructives, il faut tenir compte du fait que certains matériaux ne peuvent pas être soudés, ou ne peuvent l'être qu'en respectant des conditions très strictes:

- le soudage est interdit pour les aciers de précontrainte, les tiges d'ancrage et les boulons à haute résistance
- les aciers à haute teneur en carbone (par ex. E295, E335 ou E360 selon la norme SN EN 10 025) ne peuvent être soudés que dans des conditions particulières
- pour le soudage des aciers d'armature, voir la norme SIA 262
  
- le soudage est interdit pour les éléments d'acier coulé en continu, non traités thermiquement, tant qu'aucune qualification du mode opératoire de soudage n'a été effectuée pour la livraison concernée.

## CHAPITRE III : LA METALLURGIE DE SOUDURES

Selon les matériaux et l'épaisseur des pièces à assembler, les zones à souder doivent, le cas échéant, être préchauffées. Le préchauffage peut avoir les objectifs suivants:

- éviter les durcissements des zones affectées par la chaleur en réduisant la vitesse de refroidissement.
- réduire les contraintes résiduelles dues au soudage par l'allongement préalable des pièces et par l'abaissement de la limite d'élasticité du matériau
- éviter la formation de fissures générées par l'hydrogène dans le cas des aciers soudables à grains fins à haute résistance; ce point est en particulier à prendre en considération pour des aciers à grains fins améliorés.

### III-7 DÉFORMATIONS LIÉES AU SOUDAGE :

Lors du soudage, les métaux sont chauffés à des températures très élevées. Cela cause un phénomène de dilatation et de retrait qui n'est pas uniforme sur toute la surface parce que la source de chaleur est localisée autour de la zone à souder. Des déformations peuvent donc survenir à la suite du refroidissement de la zone thermiquement atteinte (ZTA).

Les principales méthodes pour éviter la déformation visent à limiter ou à contrer l'ampleur de la dilatation et du retrait du métal chauffé. On peut les classer en trois catégories : les méthodes thermiques (préchauffage, chauffage et post chauffage), les méthodes de maintien (pointage, bridage, déformations préalables, etc.) et la séquence de soudage.

#### III-7-1 DEFORMATIONS THERMIQUES :

Le phénomène de dilatation et de retrait thermique des métaux varie en importance en fonction du coefficient de dilatation de chaque métal. Il varie aussi en fonction des contraintes imposées sur la dilatation.

Paramètres	Déformation
Température <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Étendue de la ZTA <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Coefficient de dilatation du métal de base <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

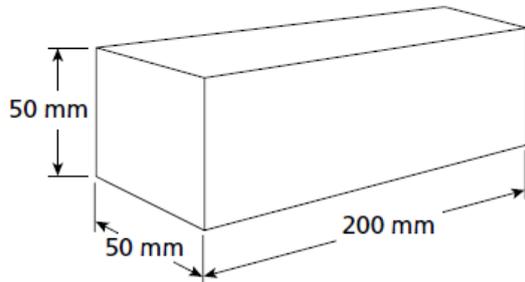
Tableau III.2: Influence de certain facteur sur la déformation.

Cependant, les contraintes sont parfois imposées au métal, par exemple lorsqu'on le maintient dans un étai. Dans ce cas, le métal ne peut reprendre sa forme initiale, car les

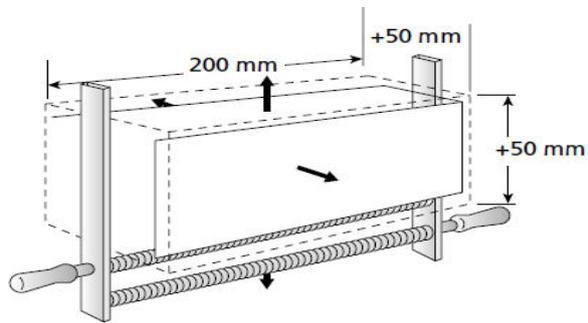
## CHAPITRE III : LA METALLURGIE DE SOUDURES

dimensions qui ne se dilatent pas se contractent quand même. La figure .III.1 montre les résultats de l'application de contraintes dans une ou deux dimensions.

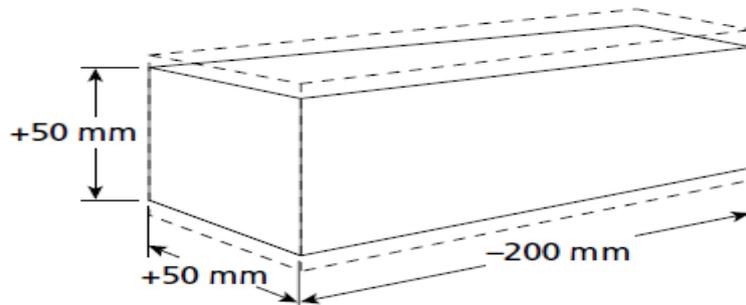
A) Une dimension bloquée :



Barre avant le chauffage



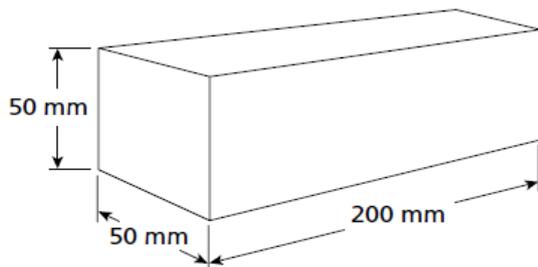
Contrainte empêchant la dilatation dans une direction



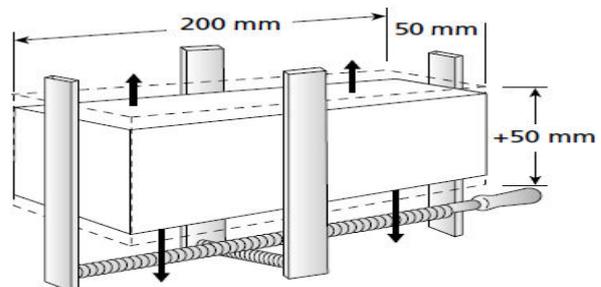
Dilatation ne se produisant que dans deux sens

La dimension qui n'a pu se dilater s'est quand même contractée ; elle redevient plus petite qu'au départ. Par contre, les deux autres dimensions redeviennent plus grandes.

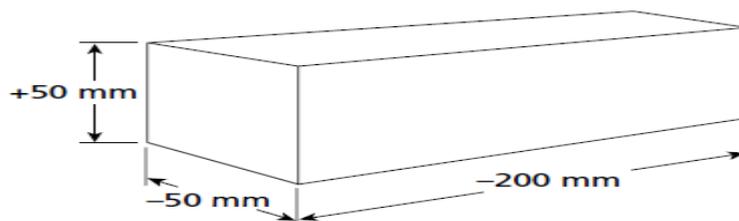
B) Deux dimensions bloquées :



Barre avant le chauffage dans deux directions



Contraintes empêchant la dilatation dans deux directions



Dilatation s'effectuant dans une dimension

## CHAPITRE III : LA METALLURGIE DE SOUDURES

Les dimensions qui n'ont pu se dilater se sont quand même contractées ; elles redeviennent plus petites qu'au départ. Par contre, l'autre dimension redevient plus grande.

Fig. III.2 : Dilatation.

### III-8 RETRAITS ET CONTRAINTE RESIDUELLES DANS LES ASSEMBLAGE SOUDES :

#### III-8-1 INTRODUCTION :

Dans les assemblages soudés, il ya pratiquement toujours des retraits et des contraintes résiduelles .en effet, les parties chauds des pièces tendent à se dilater, mais ne pourront pas vaincre la résistance des parties froides ; elles se verront donc comprimées, refoulées plastiquement ;(la température étant supérieure à  $650^0$  C l'acier rentre dans le domaine plastique ) .au refroidissement , le retrait s'opère donc sur les dimensions d'origine ; le métal en refroidissement ,rentre dans le domaine élastique, mais ne peut subir un retrait libre puisque le métal froid s'y oppose en "le bridant ", d'où la formation de contraintes résiduelles dues au retrait empêché.

Au point de vue retrait on distingue habituellement :

- Le retrait longitudinal : se produit dans la direction du cordon de soudure, il est en général assez faible, étant donné la présence, dans les pièces soudées, de zones importantes ou la température est nettement moins élevée qu'au voisinage de la soudure; Fig. III.3.a.
- Le retrait transversal : se produit dans le plan des pièces assemblées, perpendiculairement à la direction du cordon de soudure ; il résulte des contractions permanentes des pièces et du métal déposé ; Fig. III.3.a.
- Le retrait suivant l'épaisseur des pièces est, comme le retrait longitudinal, contrarié par la présence des zones importantes ou la température est nettement moins élevée qu'au voisinage de la soudure ; il souvent négligé ;
  - Le retrait angulaire : est défini par la rotation des pièces assemblées, dans le cas des soudures à chanfreins dissymétriques. Fig. III.3.b. Et Fig. III.3.c

Parmi ces différents retraits, le retrait transversal est le plus important.

Au point de vue des contraintes résiduelles, on appelle en général "bridage", le retrait empêché qui en est la cause.

Les contraintes résiduelles sont dites "directes" ou indirectes, suivant que le bridage est du aux pièces elles-mêmes ou à des causes extérieures. On distingue également, suivant la direction du retrait empêché correspondants, les contraintes longitudinales, transversales et suivantes l'épaisseur, ainsi que celles dues à un éventuel retrait empêché.

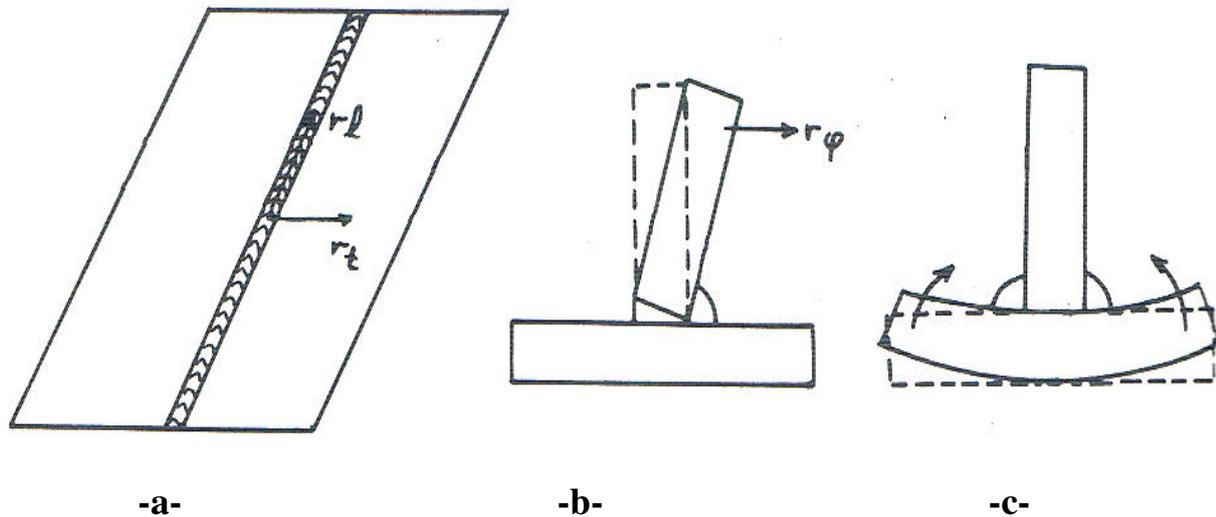


Fig. III.3.

### III-8-2 DEFINITION DES CONTRAINTES RESIDUELLES :

Les contraintes résiduelles dans un composant ou de la structure sont contraintes provoquées par les couches incompatibles interne permanent. Ils peuvent être générés ou modifiés à chaque étape du cycle de vie des composants, de la production de matériel original à l'élimination finale. Le soudage est l'une des causes les plus importantes des contraintes résiduelles et produit généralement de fortes contraintes de traction dont la valeur maximale est approximativement égale à la limite d'élasticité des matériaux à assembler, équilibrée par une diminution des contraintes résiduelles de compression ailleurs danlecomposant.

Les contraintes de traction résiduelles peuvent réduire le rendement ou provoquer une panne de produits manufacturés. Ils peuvent augmenter le taux d'endommagement par fatigue, fluage ou dégradation de l'environnement. Ils peuvent réduire la capacité de charge en contribuant à l'échec par rupture fragile ou causer d'autres formes de dommages tels que le changement de forme ou de craquelures. Contraintes résiduelles de compression sont généralement bénéfiques, mais provoquer une diminution de la charge de flambement.

Les contraintes résiduelles peuvent être mesurées par des techniques non-destructives, notamment la diffraction des rayons X, diffraction des neutrons et des méthodes optiques magnétiques et ultrasoniques; par des techniques de destruction locale, y compris le forage et le tore et les méthodes de trou profond, et par des méthodes de sectionnement y compris l'enlèvement de bloc , fendage, découpage, la superposition et la méthode des contours. Le choix de la technique de mesure optimale doit tenir compte de la résolution, la matière

## CHAPITRE III : LA METALLURGIE DE SOUDURES

---

Volumétrie, la géométrie et l'accès.

Prévision des contraintes résiduelles par la modélisation numérique du soudage et autres procédés de fabrication a augmenté rapidement ces dernières années. Modélisation du soudage est techniquement et de calcul informatique, la simplification et l'idéalisation du comportement du matériau, les paramètres du procédé et de la géométrie est inévitable. La modélisation numérique est un outil puissant pour la prédiction des contraintes résiduelles, mais la validation en se référant aux résultats expérimentaux est essentielle.

En tenant compte des contraintes résiduelles dans l'évaluation de la performance du service varient selon le mécanisme de rupture. Il n'est généralement pas nécessaire de tenir compte des contraintes résiduelles dans les calculs de la résistance statique des matériaux ductiles.

Concevoir des procédures pour la fatigue ou le flambement des structures soudées en général vous devez tenir compte pour la soudure induite par les contraintes résiduelles, et il n'est donc pas nécessaire de les inclure explicitement. Les contraintes résiduelles ont un effet majeur sur la rupture dans les régimes fragiles et transitoires, et donc l'intensité de contrainte,  $K$ , ou le taux de libération d'énergie,  $J$ , en raison de contraintes résiduelles doivent être calculés et inclus dans l'évaluation de fracture.  $K$  ou  $J$  peuvent être obtenus en fonction de la répartition des contraintes, taille de la fissure et de la géométrie par diverses méthodes, y compris les solutions manuelles, les fonctions de poids, et l'analyse par éléments finis.

Les contraintes résiduelles dans des structures comme soudés peuvent être minimisés par un choix approprié des matériaux, des processus de soudage et les paramètres, la géométrie structurelle et la séquence de fabrication.

### **III-9-CONSTRAINTES RESIDUELLES GENEREES PAR PLASTICITE DE TRANSFORMATION :**

Les matériaux tels que les aciers ferritiques et martensitiques, qui sont caractérisés par une transformation de phase au chauffage ainsi qu'au refroidissement, sont le siège d'une discontinuité de dilatation thermique aux températures de transformation (Fig. III.4), lesquelles se modifient par hystérésis thermique, et donnent lieu, selon la vitesse de refroidissement, à une transformation martensitique ( $\gamma \rightarrow \alpha'$ ), partielle ou totale, qui s'accompagne d'une expansion volumique en rapport avec la concentration en martensite et la teneur en carbone de l'acier.

En soudage, une telle transformation, qui s'effectue au-dessous de  $T_{pp}$  (400 à 200 °C environ), s'observe localement en ZAT au voisinage de la ZL, et il en résulte une

## CHAPITRE III : LA METALLURGIE DE SOUDURES

modification non moins locale dans la distribution des CR générées auparavant par les phénomènes de plasticité de dilatation, lesquelles s'étendent sur des volumes de matière considérablement plus importants.

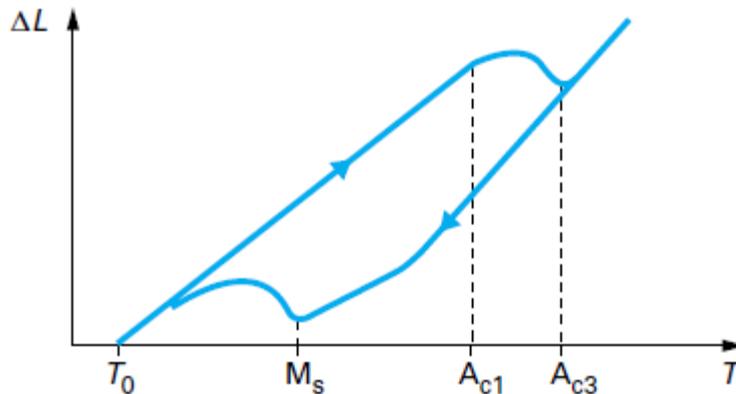


Fig. III.4 : Courbe dilatométrique d'un cycle thermique avec changement de phase de l'acier

### III-10 Contraintes et déformations résiduelles générées par le soudage :

#### III-10-1 Contraintes résiduelles :

La figure (III.5) représente schématiquement la répartition des CR longitudinales de plasticité de dilatation ( $\sigma_x$  parallèle au cordon de soudure) en fonction d'un axe transversal quelconque situé en région courante d'un assemblage mono passe. En l'absence d'un préchauffage, il y a lieu d'observer que la zone plastifiée (qui s'étend sur la ZF, la ZAT et le métal de base) est le siège d'une traction dont le niveau est au moins égal à la limite d'élasticité du métal (ou alliage) de base.

Il convient également d'observer l'important gradient de contrainte séparant la zone plastifiée (ZP) tendue des zones comprimées qui la bordent et qui produisent, dans le cas de pièces minces, un phénomène de voilement dont les ondes constituent à l'évidence un facteur aggravant sur le plan de résistance de l'ensemble au flambement sous effort de compression extérieur.

Les figures (III.6a et III.2b) représentent, de leur côté, la répartition des CR transversales de plasticité de dilatation ( $\sigma_y$  perpendiculaire au cordon de soudure) en fonction de l'épaisseur et en région courante d'un assemblage multi passe. Quelle que soit la préparation retenue en vue de l'exécution (chanfrein à simple ou à double ouverture), il est remarquable qu'un MOS multi passe conduise à la création de CR de traction sur chacune des peaux des pièces soudées. Le niveau de contrainte obtenu dépend logiquement de l'auto bridage dû à l'épaisseur, lequel inclut la répartition spatiale des températures, générée par

### CHAPITRE III : LA METALLURGIE DE SOUDURES

chacune des passes, qui demeure l'élément déterminant dans la création des zones plastifiées élémentaires.

Il est important de noter qu'à l'inverse d'une préparation à simple ouverture (chanfrein V) qui est génératrice d'une traction dans la région de défauts potentiels qu'est la racine, la préparation à double ouverture (chanfrein X) tend à comprimer cet endroit, minimisant de la sorte la nocivité de ces mêmes défauts qui se situent par ailleurs au voisinage de la fibre neutre des éléments.

Enfin, sur pièces épaisses soudées à l'aide d'un MOS multi passe et quel que soit le type de préparation, il y a lieu de signaler que les racines des joints en aciers ferritiques font l'objet d'un effet thermomécanique produit par la déformation plastique due au retrait, dans un intervalle de températures nocif dans lequel peut apparaître un phénomène de vieillissement réversible de la zone fondue.

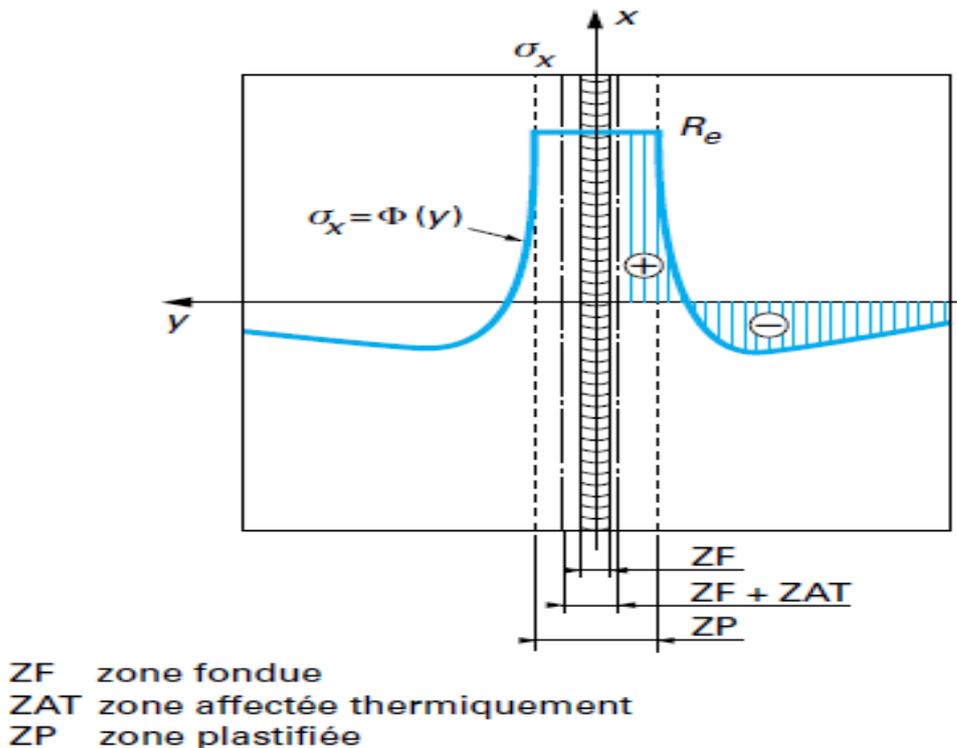


Fig. III.5 : Répartition des contraintes résiduelles longitudinales de plasticité de dilatation.  
Cas d'un assemblage mono passe

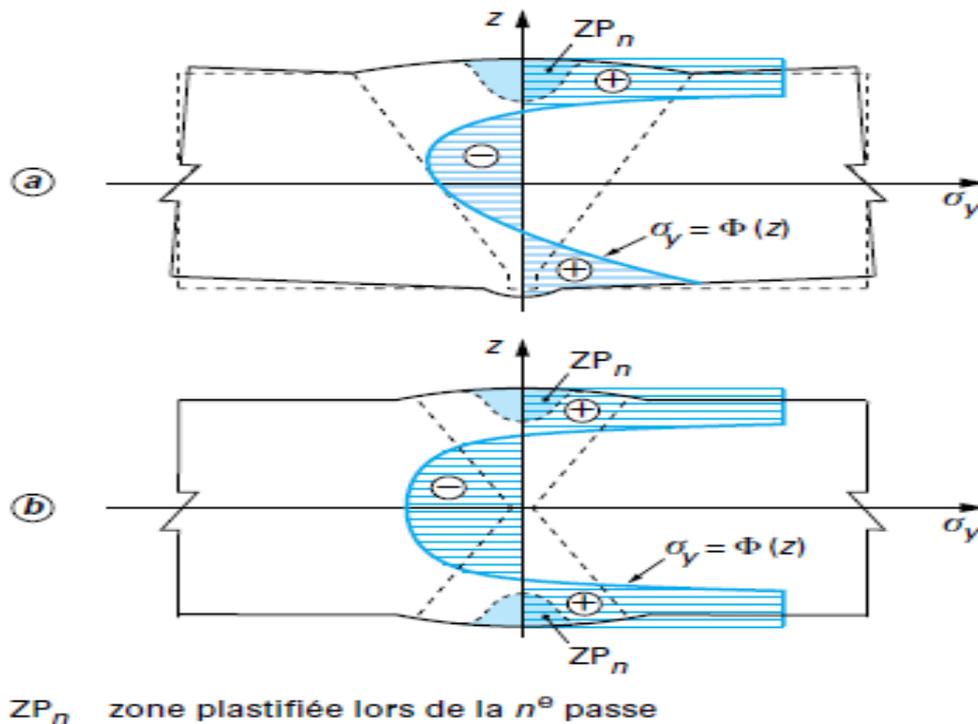


Fig. III.6 : Répartition des contraintes résiduelles transversales de plasticité de dilatation.  
Cas d'un assemblage multi passe

### III-10-2 Déformations résiduelles :

La figure (III.7) représente schématiquement les trois composantes de translation observables sur une soudure bout à bout rectiligne multi passe, à savoir :

- retrait longitudinal (translation RL) de faible amplitude, puisque auto bridé ;
- retrait transversal (translation RT) dont l'amplitude est fonction du MOS (les dépôts nombreux, en passes étroites sont particulièrement déformants de ce point de vue) ;
- retrait dans l'épaisseur (Rz) d'amplitude variable (très souvent négative, c'est-à-dire traduisant un épaissement au voisinage du joint), sans conséquence notable sur la fabrication.

Les figures (III.8a, III.2b et III.2c) représentent de leur côté chacune des trois composantes de rotation visibles sur ce même assemblage multi passe :

- effet de pliage (rotation P) de forte amplitude sur préparation à simple ouverture (les dépôts nombreux, en passes étroites sont particulièrement déformants de ce point de vue) ;
- effet de serrage (rotation S) d'amplitude positive ou négative selon la vitesse de soudage (effet particulièrement gênant lors du soudage mono passe sur pièces minces) ;

Effet de cintrage (rotation C) conduisant en principe à un gauchissement de la plaque soudée par suite de l'inversion du cintrage en cours de soudage et du voilement dans le cas de pièces minces.

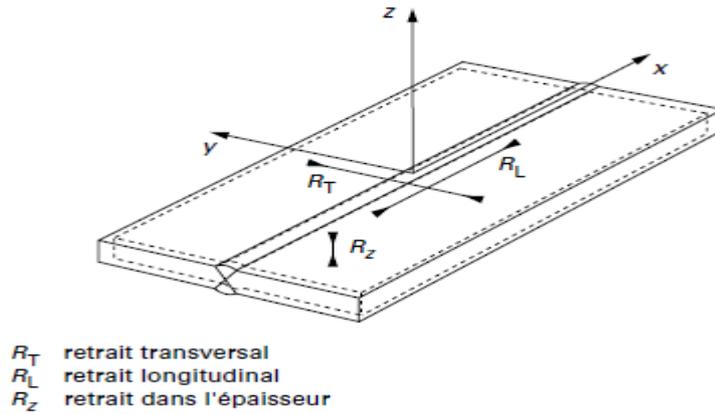


Fig. III.7 : Les trois composantes de translation observables sur un assemblage bout à bout rectiligne multi passe.

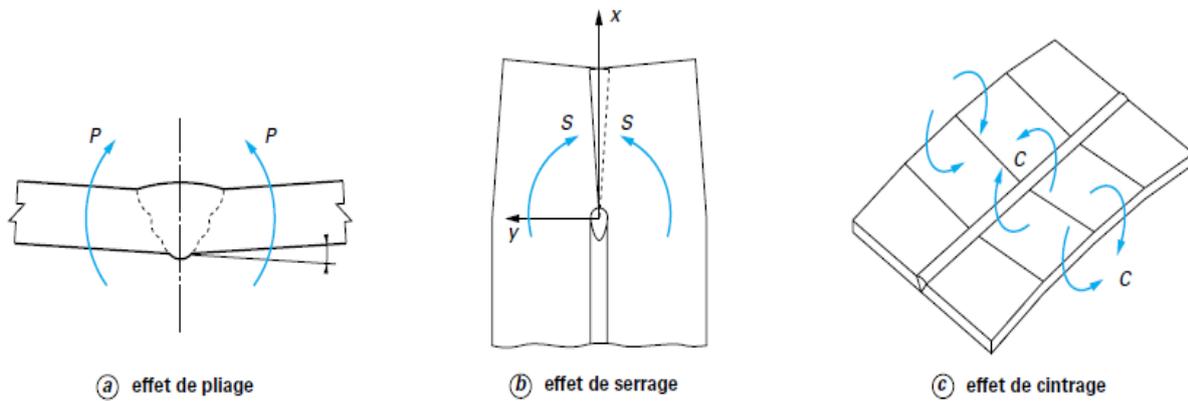


Fig. III.8 : Les trois composantes de rotation observables sur un assemblage bout à bout rectiligne multi passe.

Les contraintes résiduelles résultent d'un empêchement du retrait thermique au refroidissement faisant suite à une plastification associée à un échauffement localisé.

Les contraintes résiduelles apparaissent dès le début du refroidissement et atteignent leur maximum à la fin du refroidissement.

La valeur des contraintes résiduelles est d'autant plus élevée que les déformations sont plus empêchées, c'est à dire que le bridage est plus élevé. Elles ne dépassent pas la limite d'élasticité du métal qu'elles affectent.

# CHAPITRE-IV-

**ETUDE**

**EXPERIMENTALE**

## CHAPITRE IV : ETUDE EXPERIMENTALE

### IV-1 ESSAI DE TRACTION

La disposition la plus fréquente proposée pour l'essai de traction d'assemblages plans comportant une soudure bout à bout par fusion est celle qui consiste à prélever une éprouvette prismatique (ou, plus rarement, cylindrique). Perpendiculaire à la soudure, qui se trouve au milieu de la partie calibrée, la surépaisseur étant arasée au niveau du métal de base.

Lorsqu'une telle éprouvette est soumise à l'essai de traction jusqu'à rupture, on observe que la cassure (Fig IV.1) apparaît soit dans la zone fondue [Cas (a)] soit dans le métal de base [Cas (b)].

Si la cassure a lieu dans les zones fondue, on peut noter une charge de rupture, mais la valeur de cette charge, dépend, pour une largeur « L » d'éprouvette donnée, de la largeur « I » de la zone fondue. Par un effet de consolidation dû au métal de base voisin, la déformation diminue et la charge augmente lorsque la largeur de la zone fondue diminue.

D'autre part, la mesure de l'allongement est impossible, car l'étendue de la zone déformée est insuffisante pour qu'un résultat significatif puisse être noté. Si la cassure a lieu dans le métal de base [Cas (b)], on peut évidemment noter une valeur de la charge de rupture de ce dernier, cependant que la mesure de l'allongement est douteuse, en raison du raidissement créé par le cordon de soudure dans la partie calibrée de l'éprouvette. Quand à la zone fondue, on n'apprend rien sur son compte. Notons enfin qu'on peut observer un commencement de striction dans le métal de base, du côté non rompu, symétrique de la zone rompue, par rapport au métal fondu.

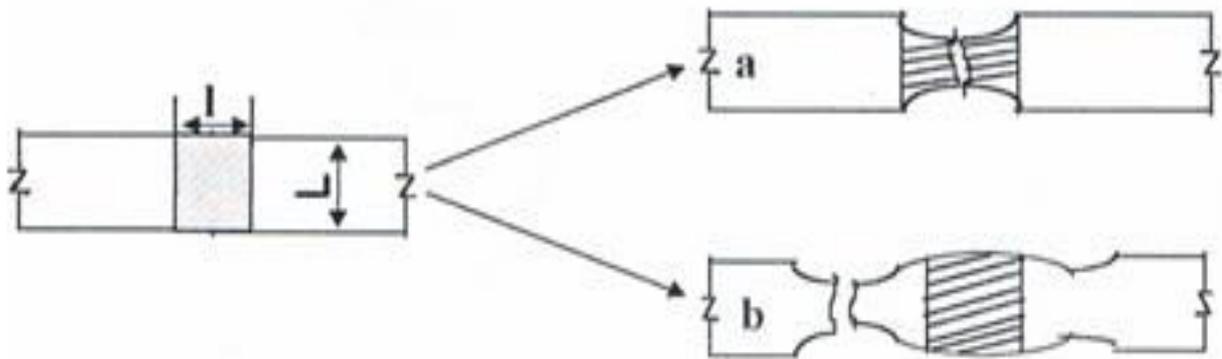


Fig. IV.1

Ces commentaires restreignent fortement la portée de l'essai de traction transversal et expliquent la direction du texte de la norme A89-200 qui s'y rapporte, où l'on prescrit simplement de relever la charge de rupture et de noter la position de la cassure. En présence de ces inconvénients, on pourrait aussi penser, toujours pour des assemblages plans, à prélever et essayer des éprouvettes de traction dans lesquelles la soudure serait disposée suivant l'axe longitudinal de l'éprouvette. Ainsi, lors de l'essai, tous les points d'une même section de la partie calibrée sont soumis au même allongement. Mais cette homogénéité de plastification ne se maintient que jusqu'au moment où s'amorce une rupture en un point de

## CHAPITRE IV : ETUDE EXPERIMENTALE

la section, par exemple dans la soudure (Fig IV-2) rupture qui entraîne un déchirement des zones voisines, avec une déformation différente. C'est pourquoi l'éprouvette longitudinale n'est pas habituellement utilisée pour l'essai de traction, mais seulement, pour l'essai de pliage.

Finalement, la seule utilisation qui puisse être faite de l'essai de traction, fournissant les grandeurs qui peuvent normalement en être attendues (résistance, limite d'élasticité, allongement et striction), a lieu sur éprouvette prélevée longitudinalement dans le métal fondu d'assemblage plans (Fig IV-3).

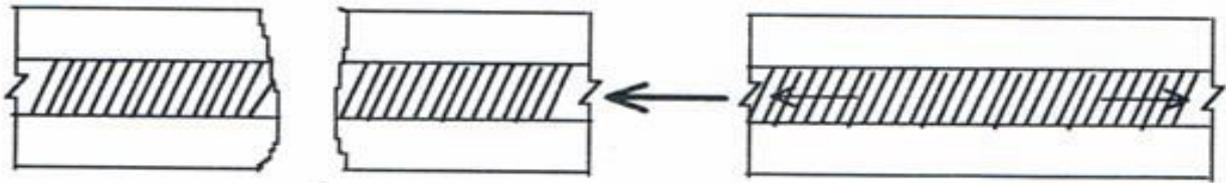


Fig IV .2

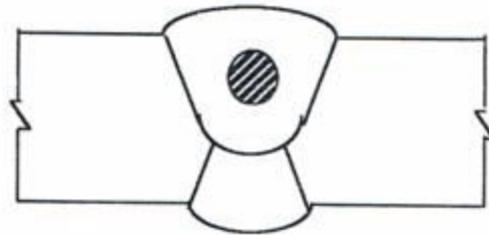


Fig IV .3

### IV.1.1 Machines d'essais

Pour notre essai on utilise UPD qui est:

- Une machine d'essai universelle pour exécution d'essais de traction, compression, flambage, flexion, pliage, cisaillement, dureté.. etc; sous sollicitations constantes, continues et ondulées sur des éprouvettes et élément de construction en acier, fonte métaux non ferreux, matières synthétiques, bois, tissu, . . . etc.

- Une construction à deux espaces d'essai correspondant aux normes (DIN5 1220; D [N5 1221), précision de mesure supérieure à la classe 1.

L'ensemble des éléments indispensables à une installation prête au fonctionnement sont les suivantes:

- Cadre de la machine type UPD 0,1
- Dispositif d'amorçage aux choix.
- Poste de commande et de mesure au choix dynamomètre pendulaire type MHP ou mesure électronique de la force, type MHE.
- Centrale de pompe.

### IV. 1.2 Préparation des éprouvettes

Pour la préparation des éprouvettes, on passe trois grandes parties sont:

- Partie débutage.
- Partie construction ou soudage.
- Partie usinage.

#### a - Partie débutage:

La première partie consiste en la préparation des tôles à assembler; pour notre nuance (TQ46) le découpage est réalisé à froid pour obtenir des tôles de dimension 300mm de longueur et de 125mm de largeur; après le découpage on obtient trois types de tôles de différentes épaisseurs: 10mm, 12mm, 15mm. Le découpage est fini, en réalise un chanfreinage d'un angle de 30° dans une machine à chanfreinage à froid « PULLMAX X91 ».

Pour les différentes épaisseurs 10mm, 12mm et 15mm, les dimensions et la forme de ces tôles (finie) sont représentée en figure ci-dessous.



#### b - Partie construction ou soudage:

La seconde partie consiste à régler les paramètres du soudage dont:

- Nous avons utilisé une protection gazeuse de 100 % CO<sub>2</sub> avec un débit de 16l/min.
- Le fil utilisé pour le soudage est un fil plein SG3 de diamètre  $\varnothing = 1,2$  mm.
- La vitesse d'avance du fil d'apport est réglée par l'opérateur de telle manière à obtenir un bon arc. Avant de procéder au remplissage, on réalise le pointage des deux tôles à assembler pour éviter d'éventuelles déformations dues au retrait.

Il est à noter qu'on a 4 types d'éprouvettes:

- La première éprouvette est l'assemblage des tôles de 15mm d'épaisseur dont le soudage est réalisé sans préchauffage.
- Le deuxième type d'éprouvette est l'assemblage de deux tôles l'une de 10 mm d'épaisseur et l'autre de 12mm d'épaisseur, dont le soudage est réalisé sans préchauffage.
- Le troisième type d'éprouvette est l'assemblage de deux tôles de 12mm d'épaisseur dont le soudage est réalisé avec un préchauffage de 100°C.
- Le quatrième type d'éprouvette est l'assemblage de deux tôles de 12mm d'épaisseur, dont le soudage est réalisé avec un préchauffage de 200°C.

## CHAPITRE IV : ETUDE EXPERIMENTALE

### c-L'exécution du joint soudé:

Pour l'exécution du joint soudé, on fait le choix de la tension et l'intensité du courant de soudage suivant l'épaisseur de la pièce à souder.

Il est à noter qu'on laisse un jeu de l'ordre de (1,5 à 2,5)mm entre les deux tôles à assembler. Pour cette opération, on cite les cas suivants

- Assemblage de deux tôles de même épaisseur I 5mm, on fait le choix de réglage pour la passe de pénétration: la position (4-2), qui nous donne une tension  $U = 42,5 \text{ V}$  et intensité  $I = 265 \text{ A}$ .

Pour les passes de chargement et de finition, on fait le choix de la position (4-4) qui nous donne une tension  $U = 48 \text{ V}$  et intensité  $I = 314 \text{ A}$ .

Le nombre de passe égale à 5 qui sont réalisées sans préchauffage.

Le deuxième type d'assemblage est le soudage de deux tôles de différentes épaisseurs, l'une de 10mm d'épaisseur et l'autre de 12mm; le soudage est réalisé sans préchauffage avec 4 passes, la première passe de pénétration avec une tension  $U = 35,5 \text{ V}$  et intensité  $I = 186 \text{ A}$ . Les passes de chargement et de finition sont réalisé avec une tension  $U = 42,5 \text{ V}$  et intensité de courant  $I = 265 \text{ A}$ .

Le troisième assemblage est effectué pour deux tôles de même épaisseur I 2mm, le soudage est réalisé avec un préchauffage de  $100^\circ\text{c}$  et un nombre de passes égale à 4. Pour la première passe  $U = 35,5 \text{ V}$  et  $I = 186 \text{ A}$ , pour les autres passes  $U = 42,5 \text{ V}$  et  $I = 265 \text{ A}$ .

Même caractéristiques de soudage sont utilisée pour le quatrième type qui est l'assemblage de deux tôles de même épaisseur (12mm) avec un préchauffage de  $200^\circ\text{c}$ .

Après l'opération de soudage, on fait meuler les pièces pour obtenir une bonne finition de soudage.

### d- Le but d'utilisation du Préchauffage

Le préchauffage des pièces à assembler permet de

- Diminuer la vitesse de refroidissement dans le domaine de transformation de L'austenite.

- Réduire la teneur en hydrogène à la fin de refroidissement.

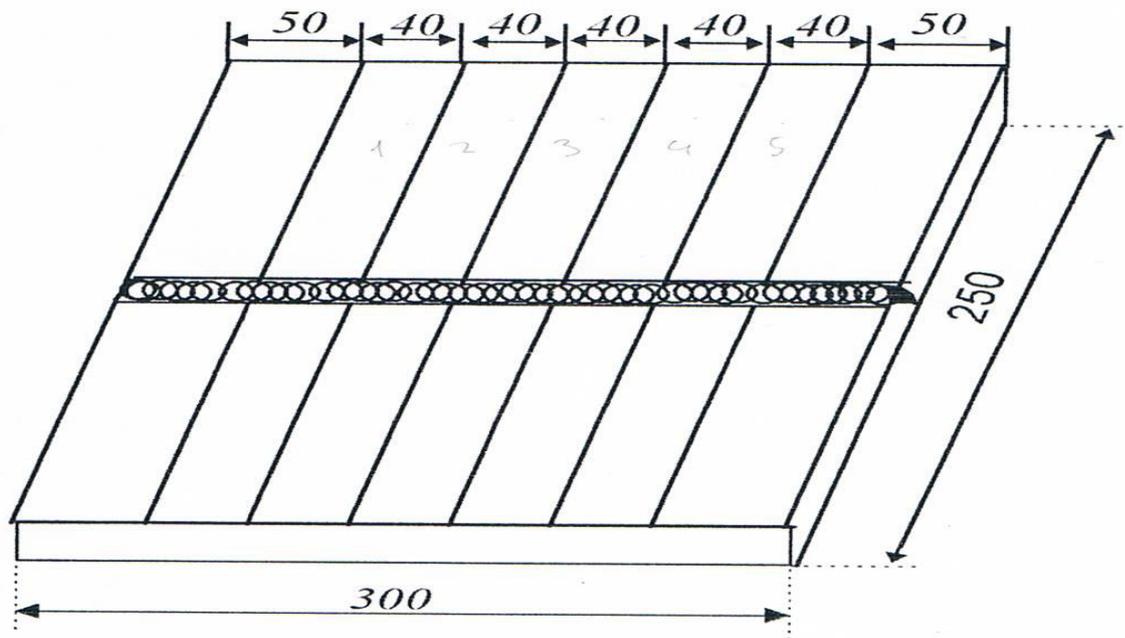
- Ralentir la croissance des contraintes.

Ces divers effets tendent à diminuer le risque de fissuration à froid mais il ne seront suffisants que si la température de préchauffage est telle que l'on évite la formation d'une structure à forte proportion de martensite dans la ZAT.

### e - Partie usinage:

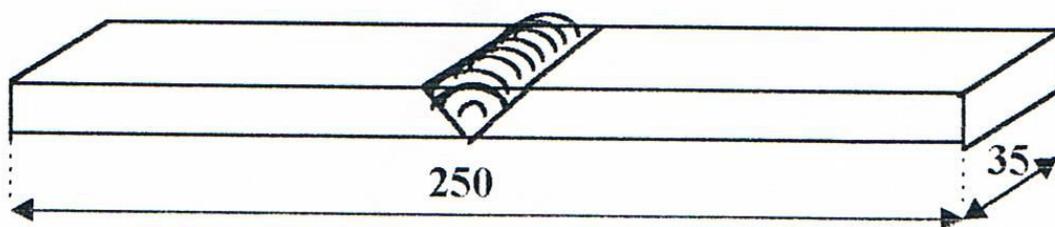
L'opération de soudage est finie, on fait le découpage des pièces avec une scie mécanique comme est représentée dans le schéma suivant:

## CHAPITRE IV : ETUDE EXPERIMENTALE



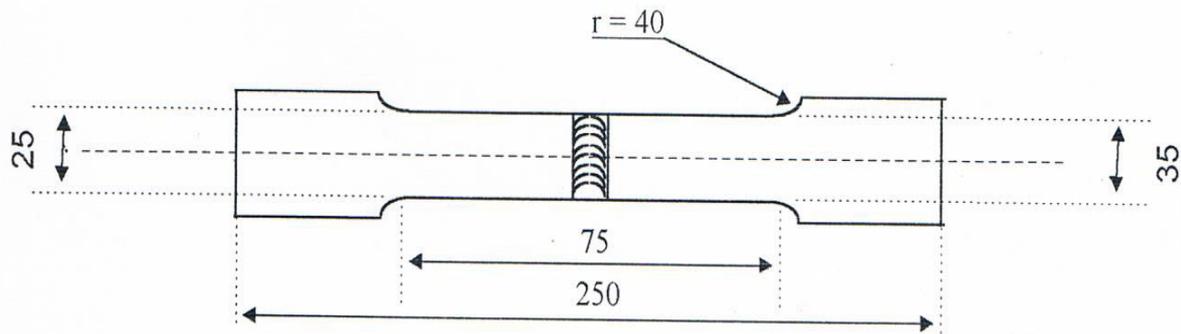
Après le découpage, les deux pièces de largeur 50mm sont à rejeter, les autres pièces (40mm de largeur) passent à l'usinage.

A la première étape, on fait le fraisage pour les pièces avec une fraise de diamètre  $\varnothing = 160\text{mm}$  avec une vitesse de rotation  $V_r = 355\text{ tr/min}$  pour obtenir des pièces de 35mm de largeur et 250mm de longueur, comme est représenté dans la figure suivante:



La deuxième étape consiste à l'usinage de la gorge avec une fraise de diamètre  $\varnothing = 80\text{mm}$  avec une vitesse de rotation  $V_r = 400\text{ tr/min}$ , après cette opération on obtient les éprouvettes de traction avec les dimensions, comme est représenté dans le schéma suivant:

## CHAPITRE IV : ETUDE EXPERIMENTALE



### 1V.1.3 Exécution de l'essai de traction

Les éprouvettes sont prêtes à l'essai, on prépare le poste de commande de la machine pour sa mise en marche, on prend les mesures de l'éprouvette avant l'essai, puis on la fixe dans un dispositif d'amarrage, on vérifie la bonne fixation de l'éprouvette et on fait démarrer l'essai ; Au cours de l'opération on peut lire la limite d'élasticité et la force de rupture à l'aide d'une poste de commande et de mesure MHE.

Après la rupture on reprend l'opération pour les autres éprouvettes et on obtient les résultats qui sont représenté dans les tableaux IV-(1,2 et3).

**Tableau IV.1 : Essai de traction**

#### a) Eprouvettes d'épaisseur 15/15 - sans préchauffage

a: Rupture du métal de base; b → g: Rupture au niveau du cordon

N°	épaisseur	dimension (mm)	section (mm <sup>2</sup> )	force à la limite élastique (kN)	limite élastique (N/mm <sup>2</sup> )	force à la rupture (kN)	résistance à la traction (N/mm <sup>2</sup> )	L <sub>0</sub> (mm)	L <sub>1</sub> (mm)	A %	section après rupture (mm <sup>2</sup> )
a	15/15	25,15 × 15,09	379,513	183,5	483,5	218	574,5	60	75,0	25	111,80
b	15/15	25,06 × 15,24	381,914	180	471,5	205	537	60	68,8	15	244,76
c	15/15	24,64 × 15,09	371,818	183	492	217	584	60	70,5	17,5	272,19
d	15/15	24,95 × 15,11	376,995	180	477,5	210	557	60	69,3	15,5	266,25
e	15/15	24,72 × 15,22	376,238	185	492	208	553	60	70,4	17,5	285,36
f	15/15	24,80 × 15,19	376,712	191	507	218	579	60	73,6	23	273,00
g	15/15	24,87 × 15,08	375,040	186	496	194	517,5	60	66,9	11,5	286,00

## CHAPITRE IV : ETUDE EXPERIMENTALE

### b) Eprouvettes d'épaisseur 10/12 - sans préchauffage

A E ➔ G : Rupture du métal de base : F : Rupture au niveau du cordon

N°	épaisseur	dimension (mm)	section (mm <sup>2</sup> )	force à la limite élastique (kN)	limite élastique (N/mm <sup>2</sup> )	force à la rupture (kN)	résistance à la traction (N/mm <sup>2</sup> )	L <sub>0</sub> (mm)	L <sub>1</sub> (mm)	A %	section après rupture (mm <sup>2</sup> )
A	10/12	25,04 x 10,06	251,902	122,5	486,5	177,5	705	60	71,8	20	106,59
B	10/12	25,12 x 10,04	252,205	128	507,5	160	634,5	60	70	17	101,75
C	10/12	25,11 x 9,88	248,087	139,5	562,5	173,5	699,5	60	72,5	21	101,20
D	10/12	25,07 x 9,86	247,190	141	570,5	174,5	706	60	71,5	19	121,60
E	10/12	25,18 x 9,88	248,778	140	563	173,5	697,5	60	69,9	16,5	107,30
F	10/12	25,20 x 10,06	253,512	135,5	534,5	167,5	661	60	64,4	7,5	231,00
G	10/12	25,14 x 9,92	249,389	143	573,5	174,5	670	60	73,2	22	110,40

**Tableau IV.2 : Essai de traction**

### Eprouvettes d'épaisseur 12/12 - sans préchauffage à 100 °C

12,13,14 et 17: Rupture du métal de base; 11,15 et 16 Rupture au niveau du cordon

N° éprouvette	dimension (mm)	section (mm <sup>2</sup> )	force à la limite élastique (kN)	limite élastique (N/mm <sup>2</sup> )	force à la rupture (kN)	résistance à la traction (N/mm <sup>2</sup> )	L <sub>0</sub> (mm)	L <sub>1</sub> (mm)	A %	section après rupture (mm <sup>2</sup> )
11	24,90x12,30	306,270	159,5	521	168	548,5	60	75,2	25,5	170,19
12	24,86x11,89	295,585	158	534,5	167,5	567	60	73,3	22	124,89
13	24,71x11,95	295,285	133	450,5	150,5	510	60	67,8	13	230,04
14	24,92x11,88	296,050	160,5	542	172	581	60	74,4	24	143,20
15	25,01x12,29	307,373	156,5	509	172,5	561,5	60	76,6	28	151,36
16	25,06x12,35	309,491	133,5	431,5	156	504	60	66,8	11,5	255,46
17	25,03x11,97	299,609	134	447,5	169,5	566	60	73,3	22	129,60

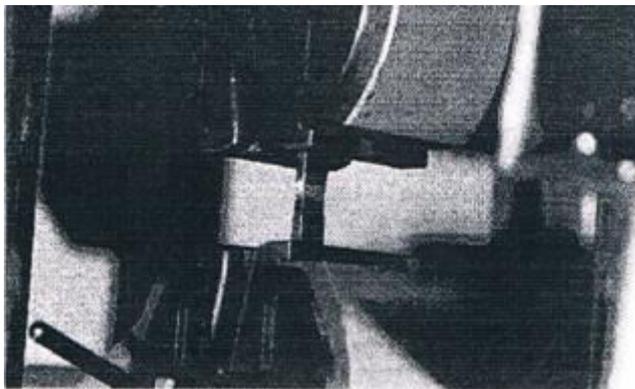
## CHAPITRE IV : ETUDE EXPERIMENTALE

**Tableau IV.3 : Essai de traction**

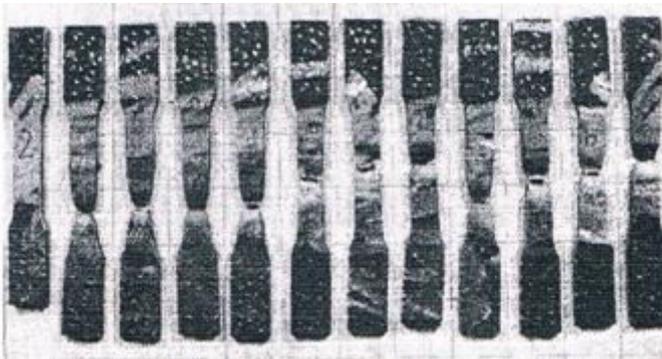
**Eprouvettes d'épaisseur 12/12 - sans préchauffage à 200 °C**

a: Rupture du métal de base; b → g: Rupture au niveau du cordon

N° éprouvette	dimension (mm)	section (mm <sup>2</sup> )	force à la limite élastique (kN)	limite élastique (N/mm <sup>2</sup> )	force à la rupture (kN)	résistance à la traction (N/mm <sup>2</sup> )	L <sub>0</sub> (mm)	L <sub>1</sub> (mm)	A %	section après rupture (mm <sup>2</sup> )
01	24,40x11,91	290,604	93,5	322	123,5	425	60	74,3	24	114,70
02	24,75x11,89	294,178	86,5	294	123,5	420	60	75,4	25,5	113,15
03	24,30x11,85	287,955	88,5	307,5	122,5	625,5	60	73,4	22,5	107,64
04	24,60x11,96	294,216	90	306	124	421,5	60	74,2	23,5	103,62
05	24,90x10,52	311,748	160	513,5	172,	552	60	75,7	26,5	157,92
06	25,05x12,45	311,873	157	503,5	172,5	553	60	74,2	23,5	221,09
07	25,01x12,44	311,124	158	508	169,5	545	60	71,6	19,5	210,12
08	24,31x11,92	289,775	85	293,5	122	421	60	75,5	26	115,05
09	25,01x12,45	311,375	156	501	172	552,5	60	73,4	22,5	188,18



**Photo IV. 1: Epreuve de traction au cours de l'essai**



**Photo IV. 2: Epreuve de traction après rupture**

### IV.2 ESSAI DE PLIAGE

L'application des essais de pliage classique aux assemblages soudés présente aussi des difficultés

- associées à la plus au moins grandes hétérogénéité des assemblages à éprouver néanmoins, en raison de sa simplicité de mise en œuvre et des possibilités qu'il offre quant à l'évaluation de la qualité des soudures.

L'essai de pliage est très largement utilisé, surtout sur éprouvette transversales, moins souvent sur éprouvettes longitudinales, dans les deux cas, la sur épaisseur et le-bourrelet de pénétration sont arasés, en raison de la difficulté d'exécution de l'essai qu'entraîne leur présence.

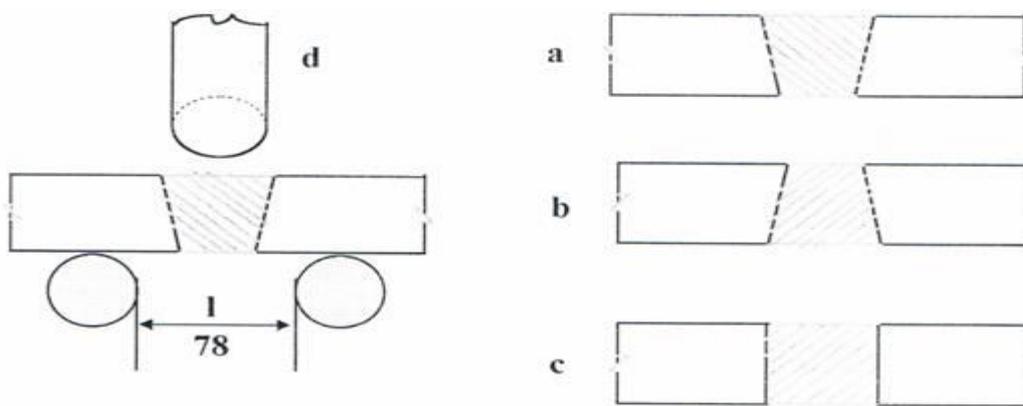


Fig IV.4

L'essai de pliage transversal (NFA 89-203) se pratique (Fig IV-4) de manière à ce que soit mis en tension soit l'endroit (a) soit l'envers (b) soit encore la surface d'une tranche (c) de l'assemblage essayé. L'angle de pliage imposé est de  $180^{\circ}$ , une fois cet angle obtenu, on examine l'aspect de la partie tendue, où débouchent les éventuels défauts. Les côtes du dispositif de mise en œuvre (diamètre du mandrin et écartement des appuis) sont fonction de l'épaisseur de l'éprouvette, qui est celle des épaisseurs assemblées ou celle de l'échantillon Prélevé. En fait, l'essai n'a de sens que l'allongement au niveau de la partie tendue et à peu près uniforme dans la zone fondue et le métal de base voisine, dans le cas contraire, l'un des deux subit une déformation excessive par rapport à l'autre.

C'est précisément pour remédier à cette situation que la norme (A89-204) propose, dans le cas d'une telle hétérogénéité d'allongement entre métal fondu et métal de base, de pratiquer l'essai de pliage sur une éprouvette longitudinale c-à-d, dans laquelle la zone fondue occupe l'axe, rien n'est changé par ailleurs au conditions d'essai, si non évidemment que l'essai sur le côté n'est pas proposé.

Les difficultés résultants de l'effet de l'hétérogénéité locale des assemblages soudés au cours des essais de traction ou de pliage ont conduit à diverses dispositions qu'il convient de rappeler ici sans s'y attarder, car elle ont aussi des inconvénients, elles ont consisté à localiser la déformation et la cassure de l'endroit voulu, les plus souvent la zone fondu, en y réduisant la section des éprouvettes (Fig.IV.5) au moyen des divers artifices peuvent s'avérer utiles à des fins de comparaisons (de produits d'apport ou de modes opératoires),

## CHAPITRE IV : ETUDE EXPERIMENTALE

mais ils ne fournissent pas de données quantitatives susceptibles de figurer dans les normes ou des règlements, ou encore moins être prise en compte dans les calculs.

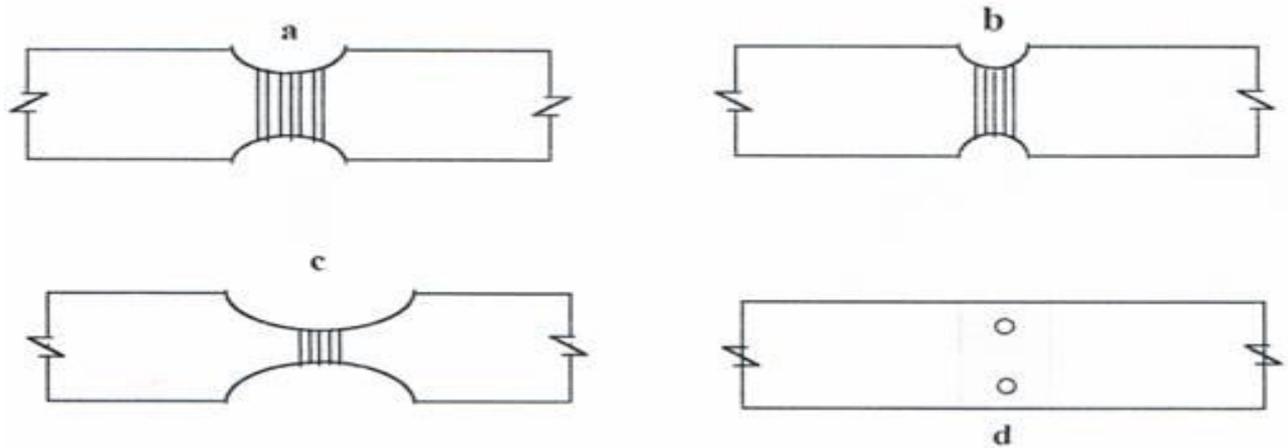


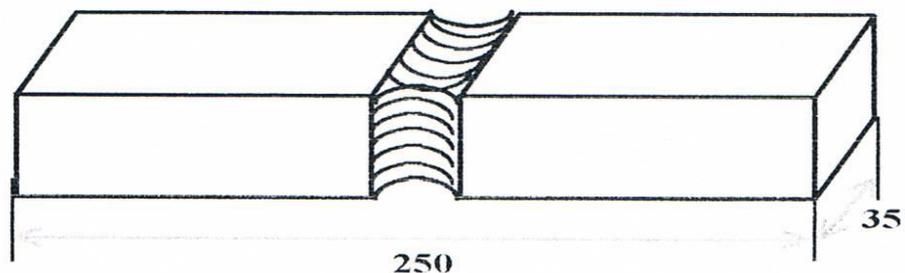
Fig IV .5

### IV.2.1 Préparation des éprouvettes

Les éprouvettes de pliage sont passées par leur préparation par les mêmes étapes des parties de débitage et de construction et avec les mêmes conditions de soudage.

Après l'assemblage des tôles et l'obtention des pièces de dimension 300mm x 250mm ces derniers passent au perçage dans une perceuse avec foret de 12mm de diamètre qui tourne avec une vitesse  $V_r = 500 \text{ tin}$ , le perçage se fait au niveau du cordon de soudure comme est représenté dans la figure suivante:

Après le perçage les pièces sont passées aux découpages qui se fait avec un scie mécanique a la fin de cette opération on obtient les éprouvettes de pliage, comme est représenté dans la figure suivante:



## CHAPITRE IV : ETUDE EXPERIMENTALE

### IV.2.2 Exécution d'essai de pliage

L'essai de pliage se fait sur la même machine de traction type -UPD- on pose l'éprouvette sur deux appuis cylindrique de diamètre 50mm qui se distant entre eux de 128mm.

Après y avoir déposer l'éprouvette, en commence l'essai par alimentation du poste de commande

- MHE, qui fournit une pression hydraulique à un cylindre de 40mm de diamètre, à son tour applique une force de pliage sur l'éprouvette. L'essai continue jusqu'à la première apparition des microfissures, sachant que l'essai se fait pour les faces de l'éprouvette ( pénétration - finition). Après l'essai on fait mesurer l'angle de pliage et on obtient les résultats qui sont représentés dans les tableaux IV(4 et 5).

**Tableau IV.4: Essai de pliage sans préchauffage**

Epaisseur	N°	FACE DE PLIAGE	
		RACINE	PASSE DE FINITION
10/12	a	67°	
	b	44°	
	c	40°	
	d		53°
	e		97°
	f		61°
15/15	a	32°	
	b	24°	
	c	32°	
	d		28°
	e		48°
	f		48°

**Tableau IV.5: Essai de pliage avec préchauffage**

N° échantillon	FACE DE PLIAGE	
	RACINE	PASSE DE FINITION
1a		
1b	21°	
1c	37°	
1d		86°
1e		140°
2a	30°	98°
2b	44°	
2c	41°	
2d		94°
2e		103°
2f		136°

### IV.3 ESSAI DE RESILLENCE

L'essai qui demeure le plus utilisé pour évaluer la sensibilité à la rupture fragile au niveau du joint soudé est l'essai de résilience, qui présente l'avantage d'être très simple et qui portant sur une éprouvette entaillée de petites dimensions offre la moyenne d'une détermination localisée et permet donc d'effectuer des comparaisons en fonction de la position de l'entaille au sein de la soudure essayée, de plus l'essai peut facilement être exécuté à des températures inférieures à l'ambiante, ce qui permet de faire appel à la notion de température de transition. Actuellement, les aciers sont spécifiés sur la base de la valeur de la résilience (Charpy V) à des températures échelonnées, cet usage s'est étendu au cas des soudures, qu'il s'agisse de la qualification des produits d'apport ou des essais sur assemblages, ces derniers essais sont régis toujours sur assemblages plans et tubulaires, par la norme française A89-202 qui précise la disposition à prendre pour positionner (en épaisseur et en distance) l'entaille à l'endroit voulu de l'assemblage, on peut faire au sujet de ces dispositions les observations suivantes:

a) en principe le fond de l'entaille doit être perpendiculaire à la surface de l'assemblage, c'est à dire, la surface de laminage dans le cas d'un produit laminé, pour cette position à moins que la zone de liaison et les isothermes soient elles même perpendiculaires aux surfaces, la cassure intéresse, à partir du fond de l'entaille, une zone dont la structure n'est pas homogène, la désignation de cette position est donc purement conventionnelle c'est aussi souvent le cas pour l'essai dans le métal fondu

b) la norme A89-202 prévoit l'obligation où peut se trouver l'expérimentateur de disposer l'entaille parallèlement à la surface en réalité, cette disposition n'existe pas:, l'inconvénient mentionné ci-dessus, de plus elle interdit toute comparaison avec la résilience du métal de base toujours déterminée sur entaille perpendiculaire à la peau.

c) pour permettre l'extension de l'essai de résilience à des assemblages portant sur des épaisseurs incompatibles avec la cote normale de l'éprouvette (10 x 10)mm, la norme prévoit l'usage d'éprouvette à section réduite (largeurs : 7,5mm et 5 mm).

L'énergie de rupture étant comme pour l'éprouvette normale rapportée à la section rompue, ici encore, il n'y a pas de comparaison possible avec la résilience du métal de base, à moins de procéder à une détermination comparative sur une éprouvette géométrique identique.

#### IV.3.1 Préparation des éprouvettes

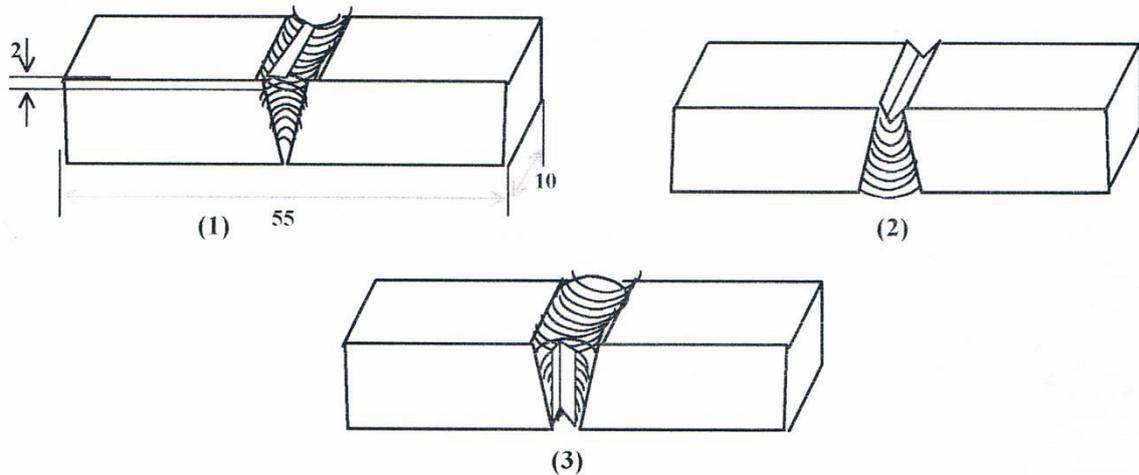
Les éprouvettes de résilience sont réalisées par le même procédé de soudage bout à bout, en gardant les mêmes paramètres que les éprouvettes de traction et de pliage. On fait le découpage même une scie mécanique. L'usinage des éprouvettes se fait avec une fraiseuse universelle puis une

Entaille de 45° par une vitesse de rotation égale à 300 tr/min sachant que l'entaille est réalisée sur les trois côtés de l'éprouvette:

- Dans la face de finition.
- Dans la face de pénétration.
- Dans le sens perpendiculaire à la face de remplissage.

La figure suivante nous montre la forme et les dimensions de telles éprouvettes

## CHAPITRE IV : ETUDE EXPERIMENTALE



### IV.3.2 Machines d'essai

La machine d'essai est un mouton-pendule de type PSW, il sert à conduire les essais de résilience par choc selon CHARPY (DIN 50115 ).

Le mouton pendule est exécuté selon norme DIN 51222, avec des dispositifs supplémentaires, on peut aussi conduire des essais de résilience selon 1ZOD ainsi que des essais de traction par choc.

Le mouton-pendule se compose de la chabotte en fonte, de roulement à friction réduite pour le pendule et du bras de levage avec déclenchement de sécurité (manoeuvré à l'aide des deux mains). Les contre-supports et appuis sont vissés aux chahottes; un dispositif d'alignement des éprouvettes se trouve au contre-support de droite.

Après rupture de l'éprouvette, le pendule qui n'est pas encore stabilisé est arrêté à l'aide du frein électromagnétique en actionnant le bouton poussoir.

Le mouton-pendule a une puissance de travail égale à 300 joules avec un angle de levage maximal égale à 161,45 grades, il pèse 20,394 Kg, sa longueur  $L = 770$  mm.

### IV.3.3 L'exécution de l'essai de résilience

Après refroidissement des éprouvettes dans une MINi-CRYOSTAT à une température

(-23°C) pendant un temp suffisant, on les places ensuite sur l'enclume de la machine pour les subissent au choc.

La lecture de l'énergie d'impact consommée par l'éprouvette est effectuée directement sur le cadran en Joule avec l'aiguille principale et l'aiguille témoin. En outre, ce cadran est gradué en degrés. Après la lecture des résultats on obtient les tableaux IV.(6, 7)

#### \*Remarque:

Pendant l'enlèvement de l'éprouvette pour les placer sur l'enclume de la machine, il y a un gradient de température pendant deux à trois secondes, donc la loi de Fourier intervient automatiquement, à cause des différentes températures du milieu.

## CHAPITRE IV : ETUDE EXPERIMENTALE

**Tableau IV.6: Essai de résilience avec préchauffage**

a) les éprouvettes sont à la température de 100°C

N° d'échantill.	position de Lentail	Dimension (mm)	Section (mm <sup>2</sup> )	Puissance (J)	Angle (grad)	K (DJ/cm <sup>2</sup> )
A	racine	10×8	80	65	40	8.5
B	racine	9.5×8	79.2	52	34	6.5
C	racine	9,7x8	77.6	30	22.5	4
D	cote	9,7x8	77.6	105	59	13.5
E	cote	10×8	80	71	42.5	9
F	cote	10x8	80	59	37	7.5
G	finition	9,8x8	78.4	88	50	11.5
L	finition	9,9x8	79.2	98	53.5	12.5
M	finition	9,8x8	78.4	110	58	14

b) les éprouvettes sont à la température de 200°C

N° d'échantill.	position de l'entail	dimension (mm)	section (mm <sup>2</sup> )	puissance (J)	angle (grad)	K (DJ/cm <sup>2</sup> )
A	racine	10 x 8	80	54	35	7
B	racine	10 x 8	80	36	26	4,5
C	racine	10 x 8	80	65	40	8,5
D	côté	9,9 x 8	79,2	64	39,3	80,81
E	côté	10 x 8	80	23	18,5	3
F	côté	9,8 x 8	78,4	96	52,5	12,5
G	finition	10,1 x 8	80,8	24	18	3
H	finition	9,9 x 8	79,2	22	18	3
I	finition	10 x 8	80	65	40	8,5

## CHAPITRE IV : ETUDE EXPERIMENTALE

Tableau IV.7 : Essai de résilience sans préchauffage

N°	épaisseur	dimension (mm)	section (mm <sup>2</sup> )	position de l'entail	puissance (Joule)	angle (grad)	K (DJ/cm <sup>2</sup> )
1	10/12	10,0 x 8	80	racine	114	59,5	14,5
2	10/12	10,1 x 8	80,8	racine	87	49	11
3	15/15	9,9 x 8	79,2	côte	117	61	15
4	15/15	10,2 x 8	81,6	côte	78	45	9,5
5	15/15	10,3 x 8	82,4	racine	96	52,5	12
6	15/15	10,1 x 8	80,8	racine	111	58,5	14
7	15/15	10,3 x 8	82,4	finition	100	54	12
8	15/15	10,1 x 8	80,8	finition	-	-	-
9	15/15	10,0 x 8	80	finition	120	62	15
10	15/15	10,2 x 8	81,6	côte	-	-	-
11	10/12	9,7 x 8	77,6	côte	80	46	10,5
12	10/12	10,0 x 8	80	finition	106	56,5	13,5
13	10/12	10,1 x 8	80,8	finition	110	58	14
14	10/12	9,9 x 8	79,2	racine	-	-	-
15	10/12	10,0 x 8	80	finition	-	-	-
16	10/12	9,8 x 8	78,4	côte	72	42,5	9,5

### IV.4 ESSAI DE MICRODURETE

Du point de vue scientifique, on peut séparer les essais de dureté des essais de microdureté par le fait que les premiers intéressent un nombre quelque fois très important de grains de métal, alors que les seconds sont destinés en principe à définir les propriétés à l'intérieur des grains soit de la matrice, soit de ses divers constituants.

On peut distinguer, en pratique, deux domaines qui correspondent en général à des types d'appareils différents:

a) La dureté sans charge réduite allant de 1,96 à 98 N, le domaine le plus caractéristiques comprenant les charges de 1,96 à 19,6 N.

b) La microdureté, depuis 1,96 N jusqu'à des charges descendant aux centième de newton, le domaine le plus courant comportant des charges comprises entre 0,049 et 0,49 N.

Ces domaines correspondent à des techniques expérimentales entièrement différents: la pénétration des plus petites micro-empreintes est de l'ordre de 0,5 m, c-à-d de l'ordre de 0,5 m; c'est à dire de l'ordre grandeur des rugosités d'une pièce ayant subit une rectification, alors que les charges réduites provoquent des empreintes de 7 à 40 µm.

## CHAPITRE IV : ETUDE EXPERIMENTALE

Les mesures de microdureté, pour donner des résultats satisfaisants doivent être faites en précisant tous les paramètres, charge appliquée, vitesse de mise en charge, préparation de l'échantillon (mode de polissage).

Les structures micrographiques nécessitent des précautions multiples- comme l'élimination des vibrations au cours des mesures, et des qualités particulières pour les appareils (forme de diamant, -caractéristique optique, précision mécanique).

Dans ces conditions, la microdureté permet d'obtenir des résultats extrêmement intéressants, en ce qui concerne en particulier:

- Les petits échantillons (Aiguilles, fils, rubans minces)
- Les couches superficielles (Couches cimentées, nutritées, dépôts électrolytiques)
- Des matières dures et fragiles (Carbures, verres, aimants susceptibles de se fissurer, sauf sous très faible charge)
- Les divers constituants des alliages ont peu apprécié la variation des grains de dureté dans une solution solide non homogène, en fonction de diffusion, des éléments ou de celle des différentes phases précipitées.

De nombreux microduremètres ont été mis au point, comportant un dispositif assurant le maintien sans aucun déplacement de la pièce, un appareil pour appliquer la charge à vitesse contrôlée un microscope de puissance élevée.

### IV.4.1 Préparation des échantillons de la microdureté

On prend des échantillons de chaque type d'éprouvette utilisée dans les essais de traction, pliage et résilience, et pour la préparation de ces échantillons on fait en découpage par une trépanneuse à disque lubrifiée puis on les passe par une surfaceuse à bande lubrifiée pour obtenir une surface plane et horizontale (Non rugueuse); pour avoir une surface miroitante on fait un premier polissage lubrifié avec toilumerie (du gros grain au fin grain) puis en deuxième polissage avec une patte à diamant à trois différents diamètres (0,25 m, 1,0 m ,215 m). Après le polissage, on fait l'attaque chimique par une solution de (acide nitrique + alcool), on fait cette opération pour localiser les différentes zones de l'échantillon (MB-ZAC - Csoudure), enfin on nettoie avec de l'eau potable et

- en le fait sécher par un séchoir.

### IV.4.2 Machine d'essai de microdureté - LEITZ OURIMET 2 -

C'est un micro duremètre pour dureté vickers , knoop et à la rayure avec une charge de  $S_p$  (0,05 N) à 200 p (  $\approx 20N$ ).

Dureté vickers: On utilise pour cet essai diamant en forme de pyramide. à base carré, angle aux sommet entre faces opposées  $136^\circ$  , profondeur de pénétration égale à  $1/7$  de la diagonale de l'empreinte.

dureté vickers HV( KP/mrn<sup>2</sup>) égale à 
$$\frac{1854,4.P}{d^2}$$

P = Charge appliquée (p)

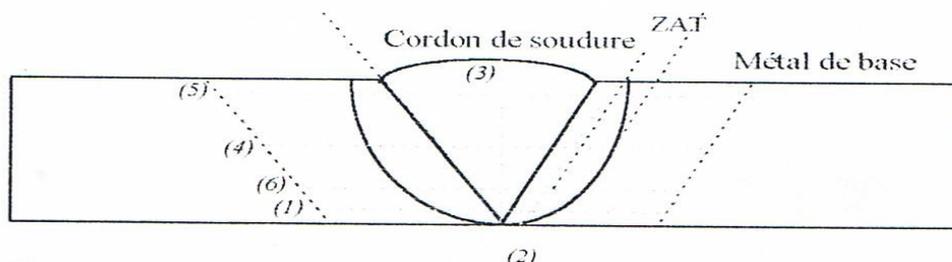
d = Moyenne des deux diagonales de l'empreinte ( $\mu.m$ ).

Un tube de microscope avec dispositif de pénétration est associé à notre machine, ce dispositif de pénétration est fixé à demeure sur le tube du microscope, et monté sur un dispositif de rotation avec les objectifs 10x et 50x.

## CHAPITRE IV : ETUDE EXPERIMENTALE

### IV.4.3 Exécution de l'essai de micro dureté

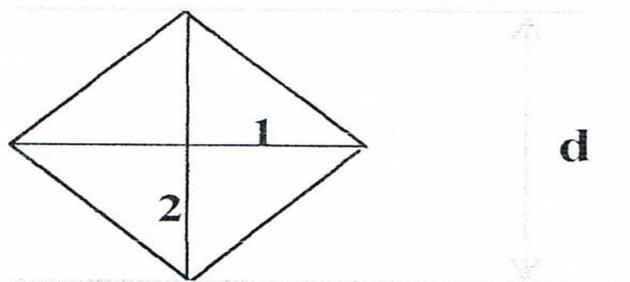
Les différentes zones des échantillons sont déterminées au cours de notre essai on fait un balayage presque total de l'échantillon de droite à gauche et de hautain bas, avec un pas de 0,5mm comme elle est représentée dans la figure suivante:



1-2-3-4-5 et 6 sont les nombres de passe prioritaire

On applique une charge  $F = 4,903(N)$  sur l'échantillon avec une vitesse constante jusqu'à ce qu'on voit le signal sur le microduromètre qui indique que l'essai est terminé, si on voit à l'aide de microscope; associé au microduromètre on trouve une empreinte sur l'échantillon qui ressemble au schéma suivant

$$1 = 2$$



A l'aide d'une règle graduée sur le microscope on prend la longueur de la diagonale de l'empreinte et on calcule la dureté vickers HV à l'aide de la formule suivante (Documentation DIN).

$$HF = \frac{189 \times 10^3 \times F}{d^2}$$

Suivant les formules ci-après et à l'aide des tableaux de dureté Brinell HB on obtient la résistance  $R_p$  correspondante.

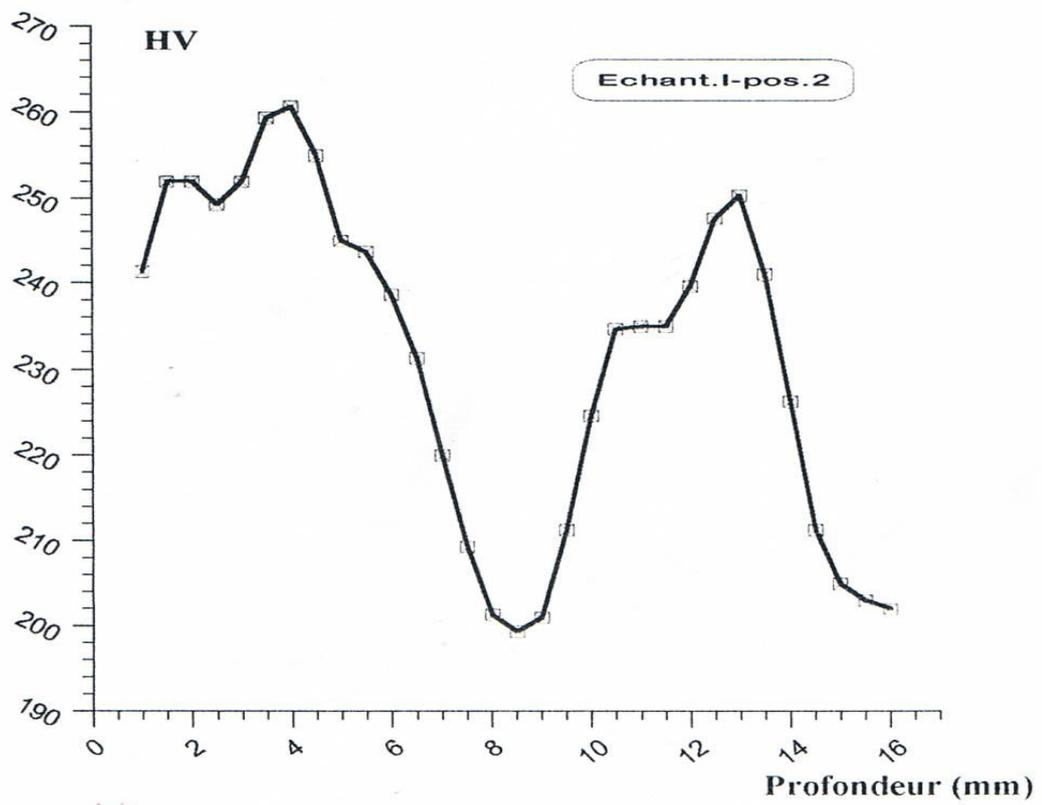
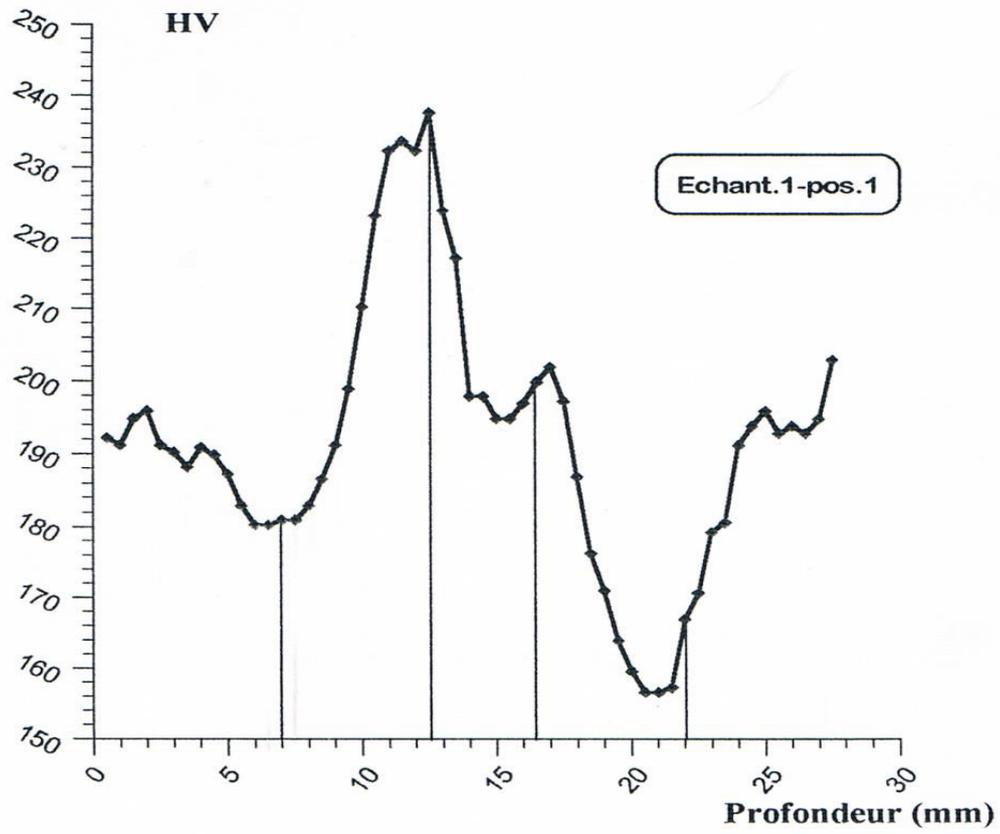
$$HB = 0,95 HV.$$

$$R_p = 3,375 HB$$

On reprend cette opération pour chaque empreinte et on obtient les résultats (lui sont présentés aux graphes suivants:

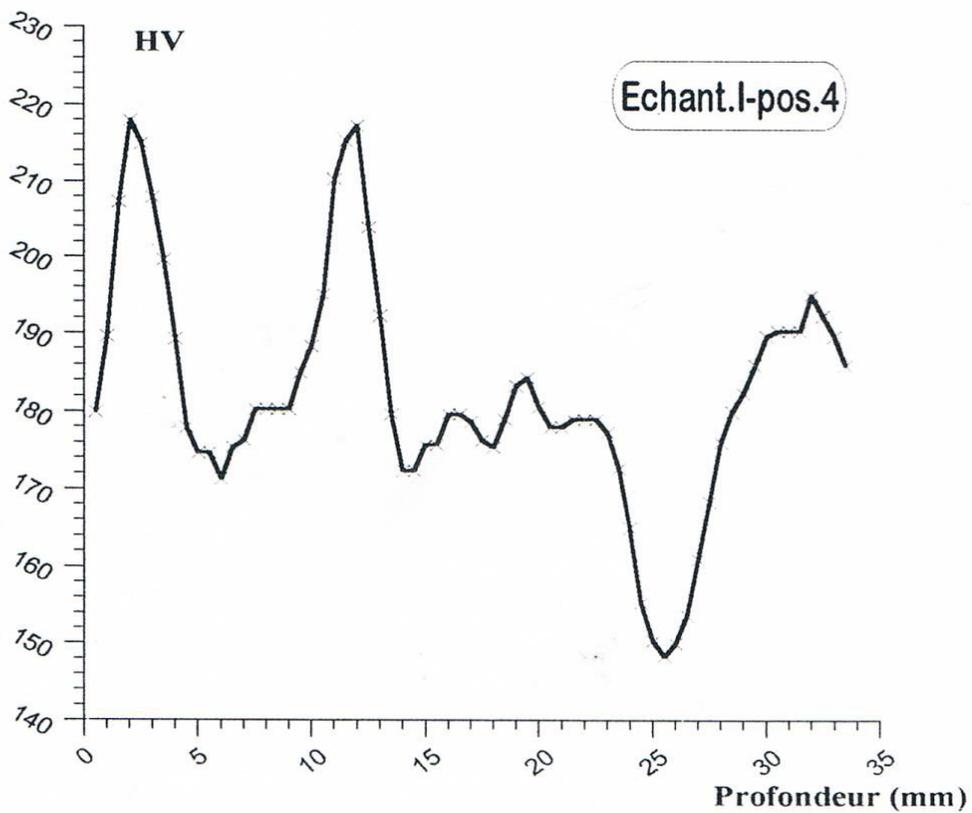
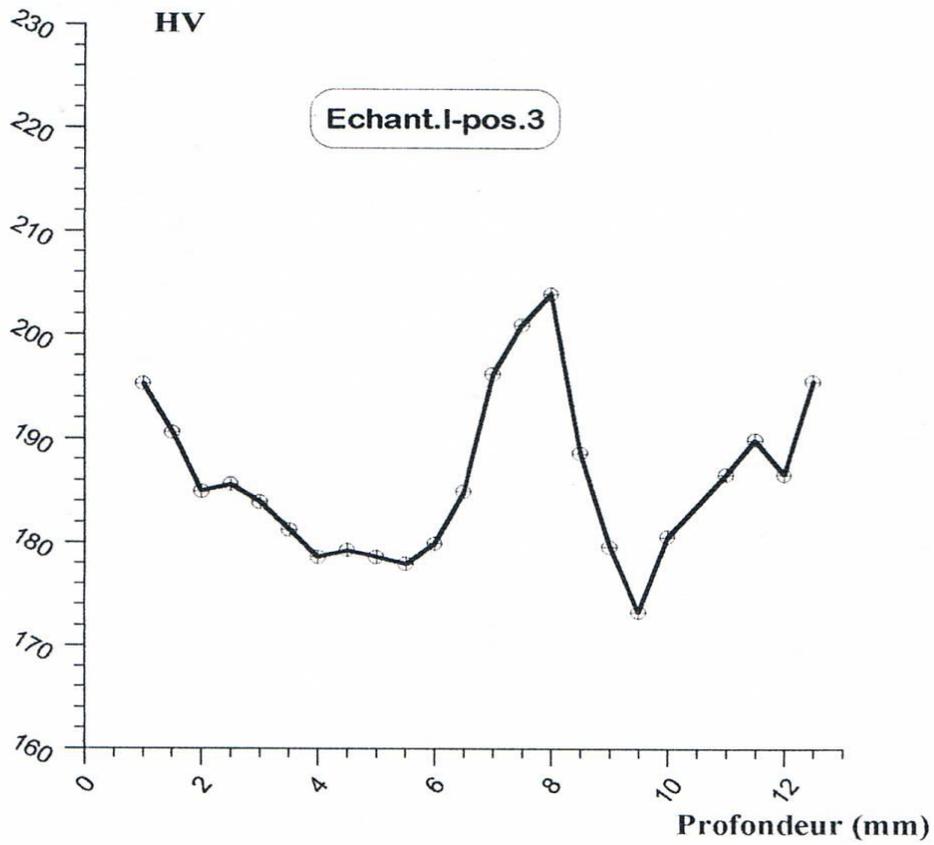
# CHAPITRE IV : ETUDE EXPERIMENTALE

$\theta = 100^\circ\text{C}$



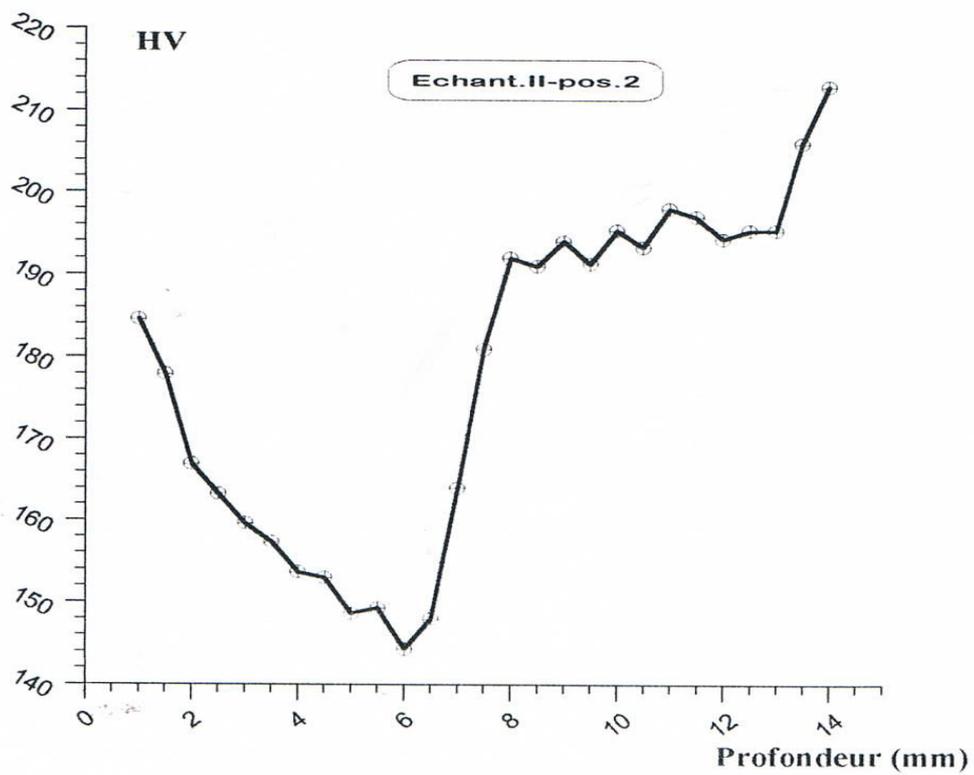
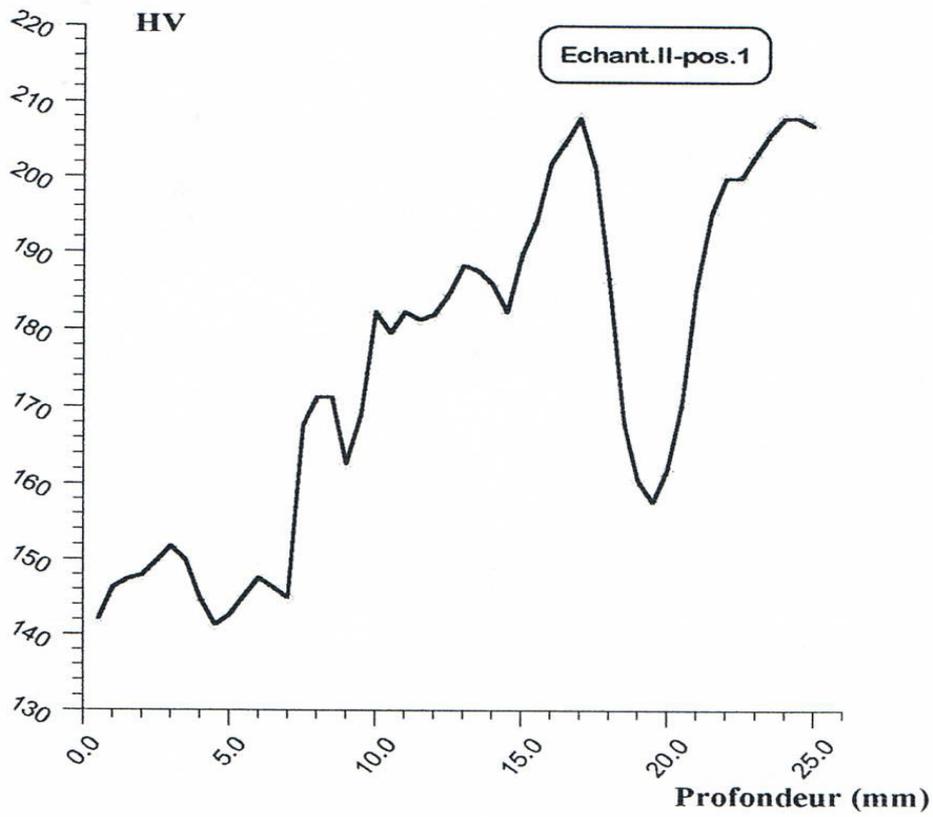
# CHAPITRE IV : ETUDE EXPERIMENTALE

$\theta = 100^{\circ}\text{C}$



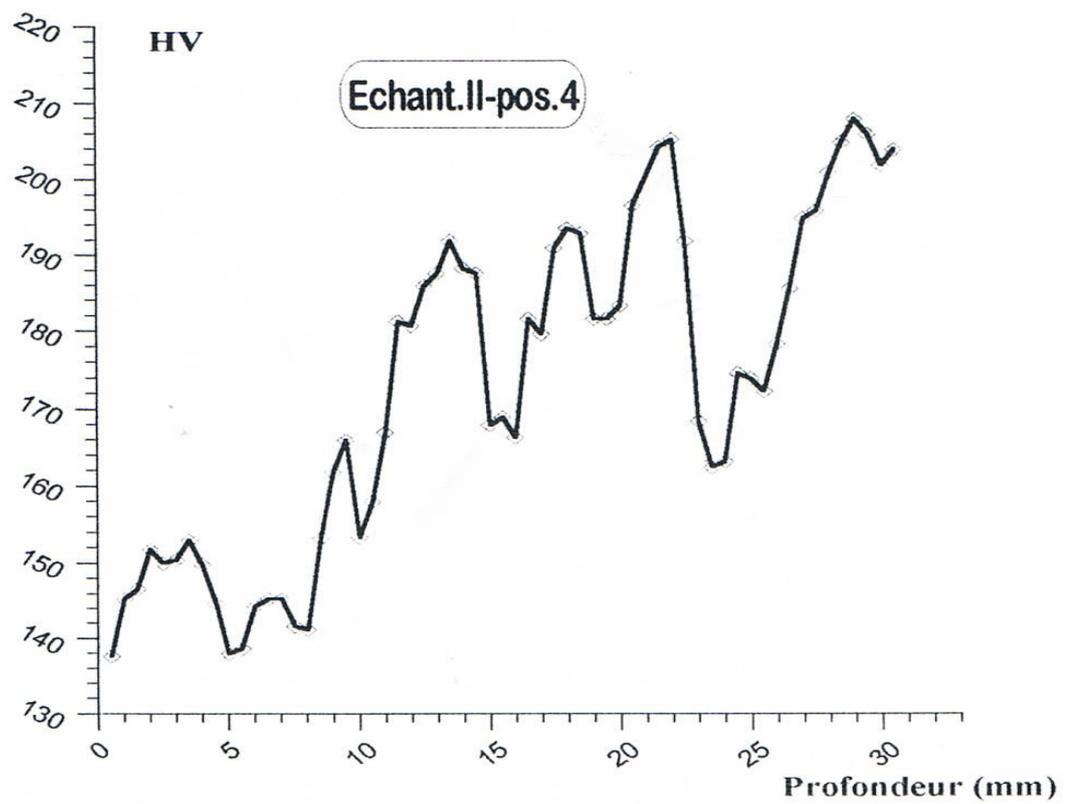
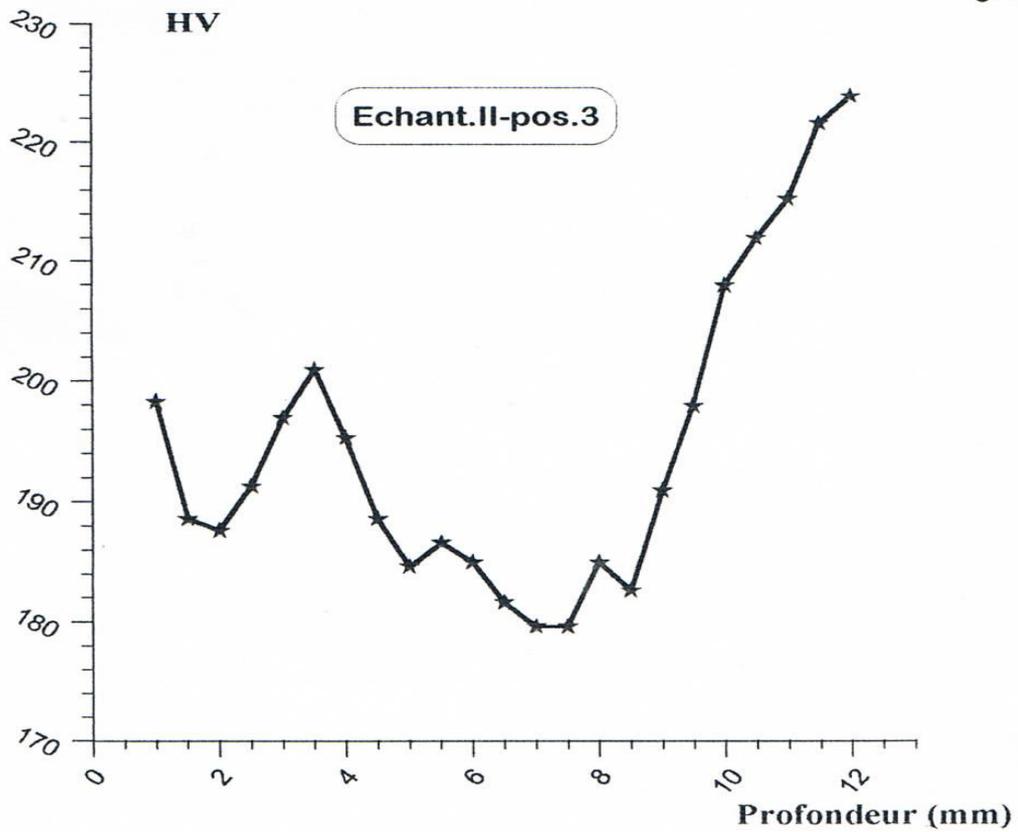
# CHAPITRE IV : ETUDE EXPERIMENTALE

$\theta = 200^{\circ}\text{C}$



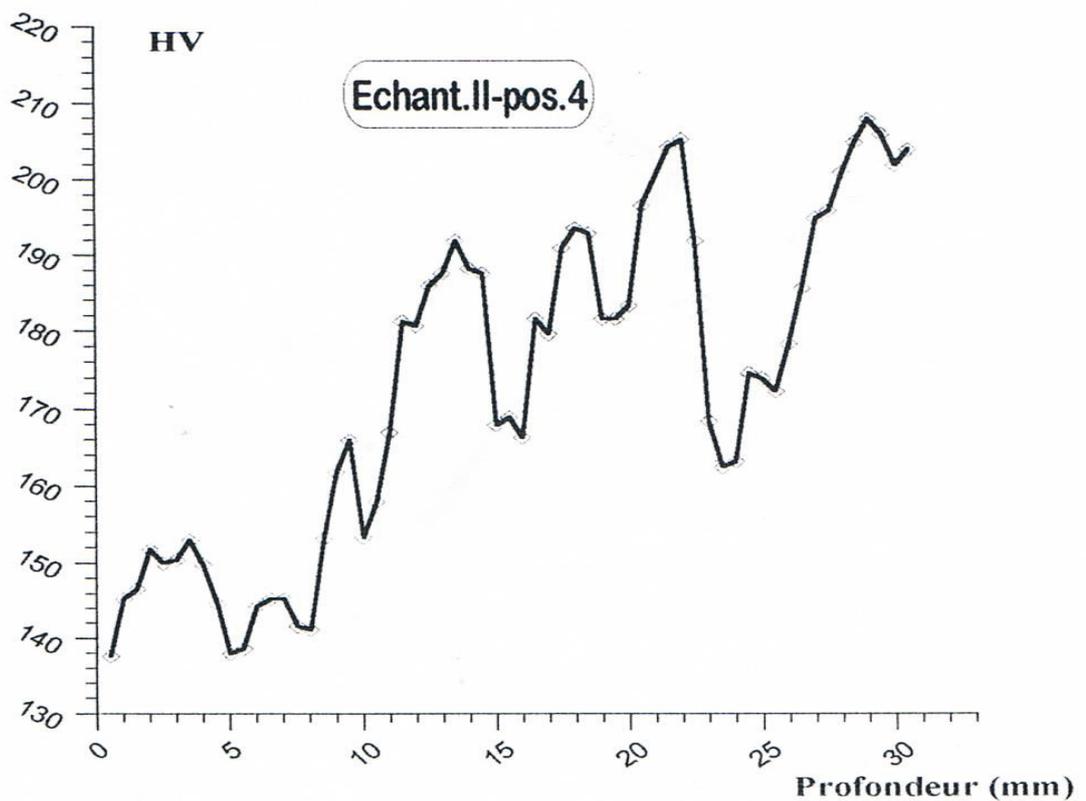
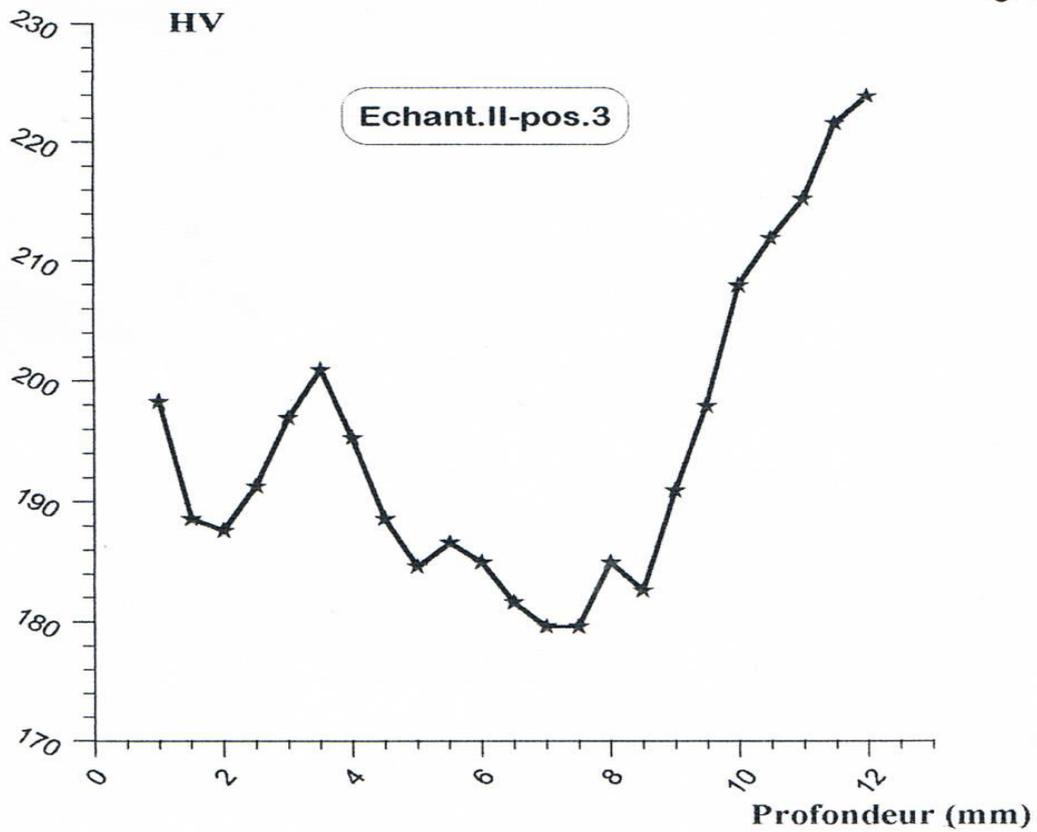
# CHAPITRE IV : ETUDE EXPERIMENTALE

$\theta = 200^{\circ}\text{C}$

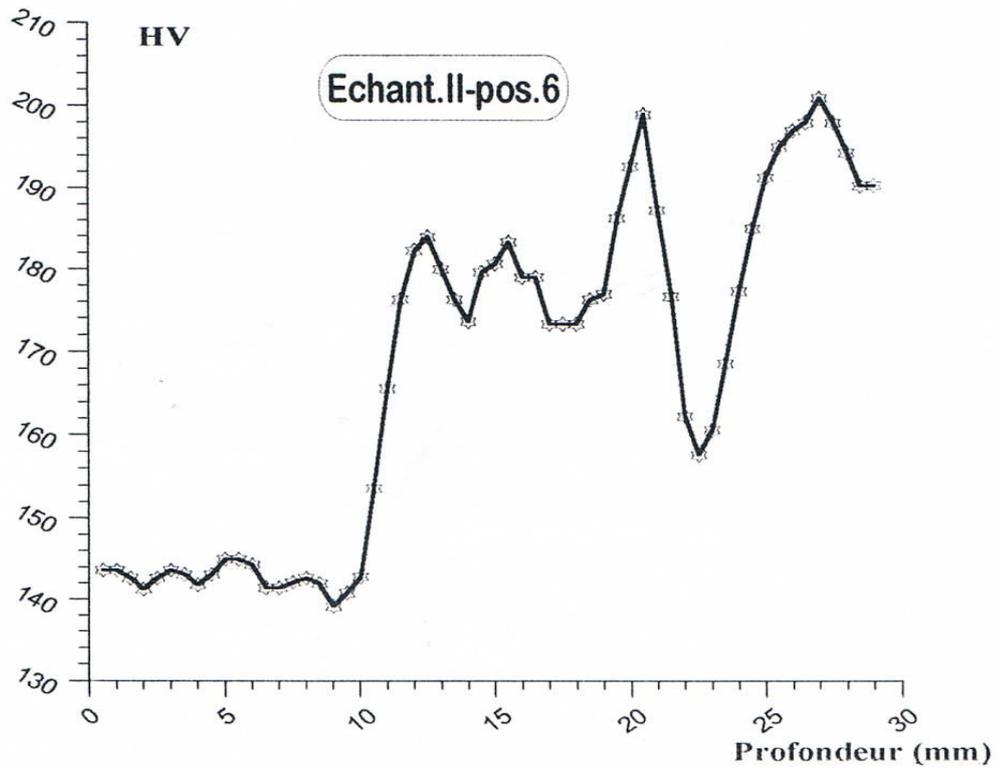
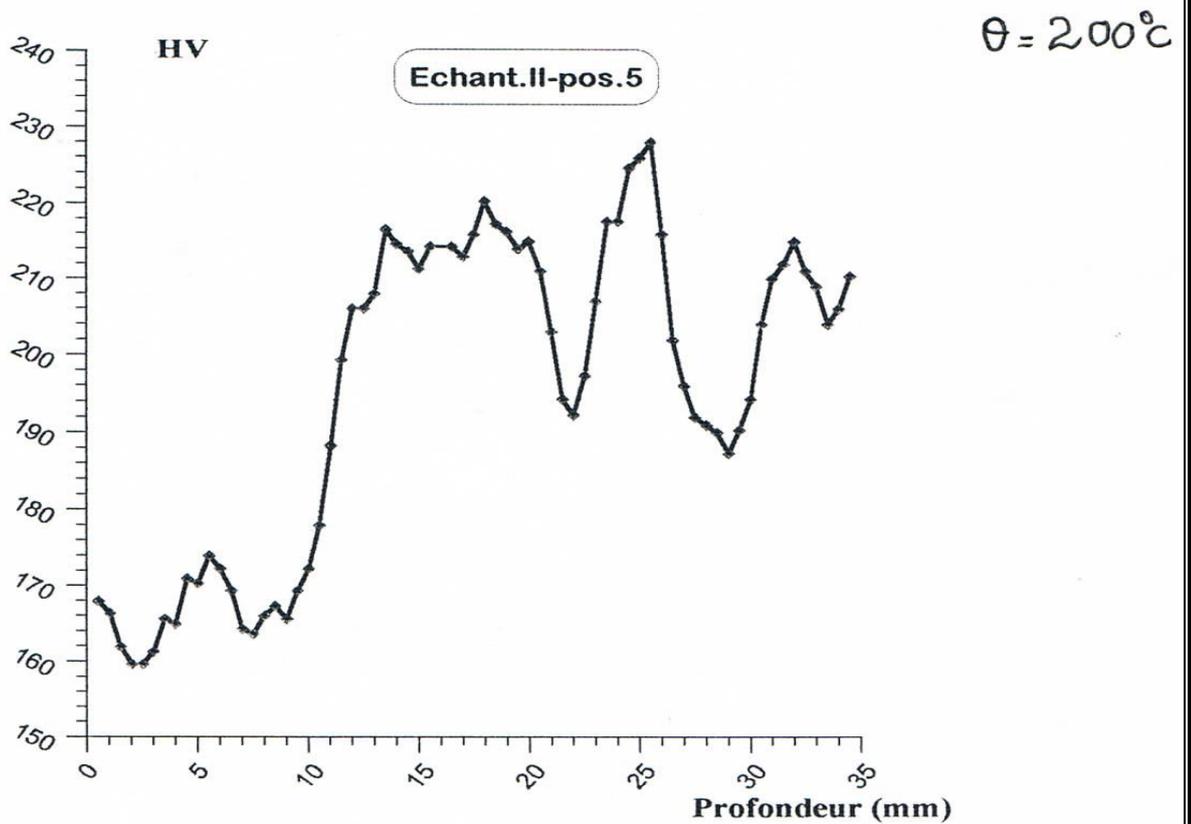


# CHAPITRE IV : ETUDE EXPERIMENTALE

$\theta = 200^\circ$

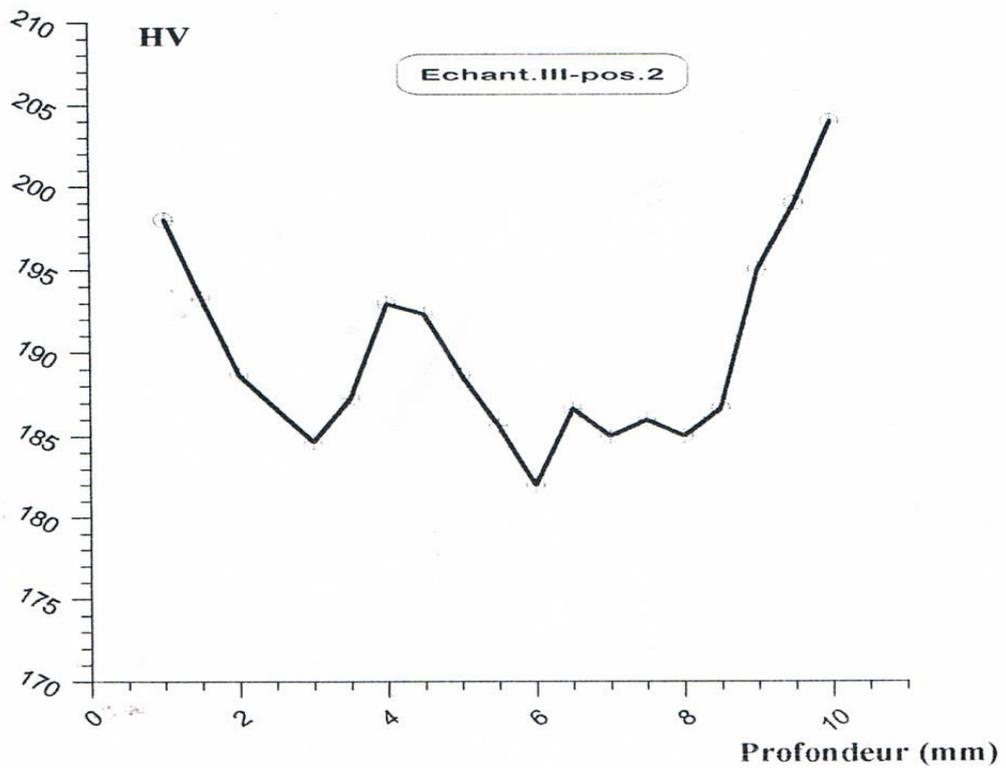
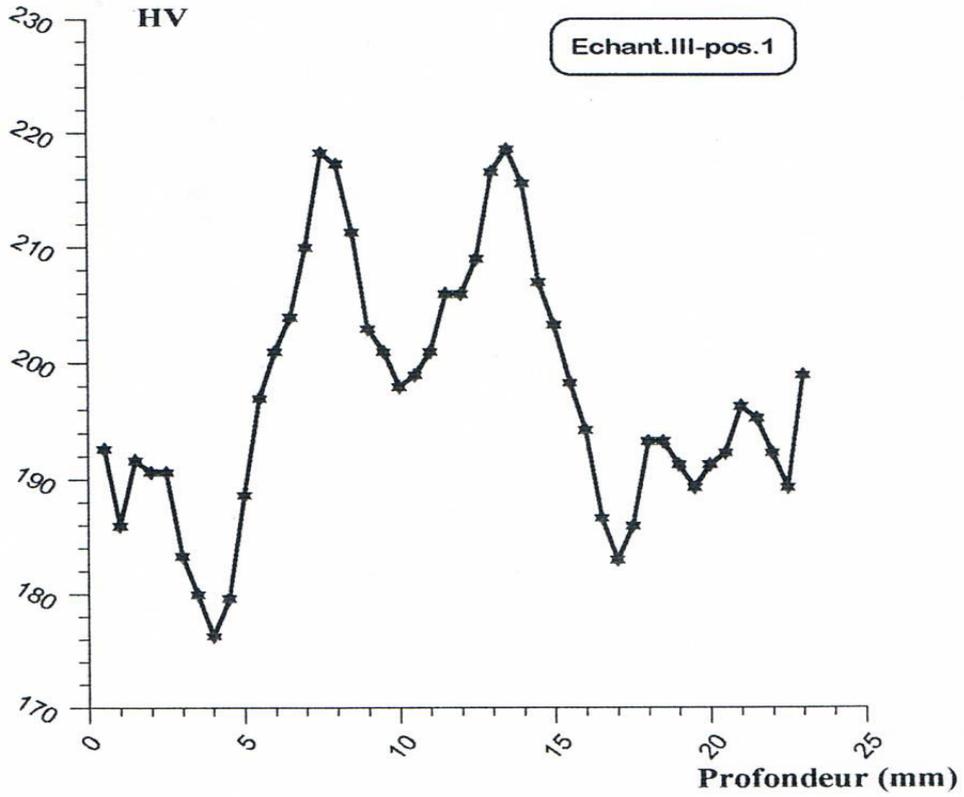


# CHAPITRE IV : ETUDE EXPERIMENTALE



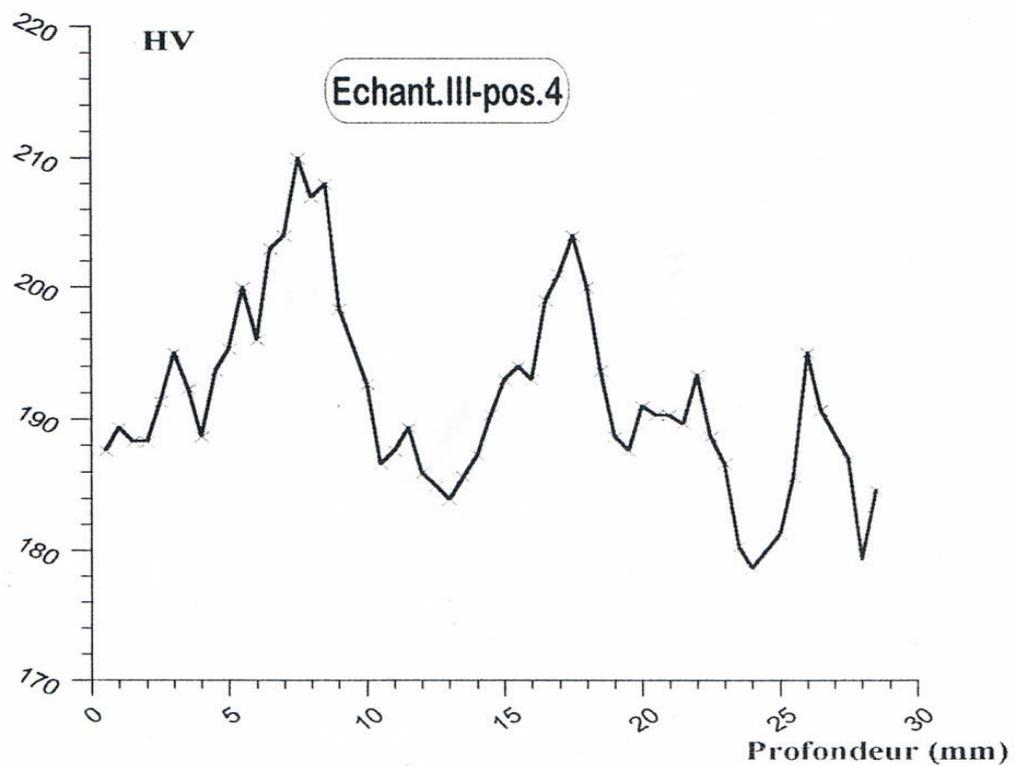
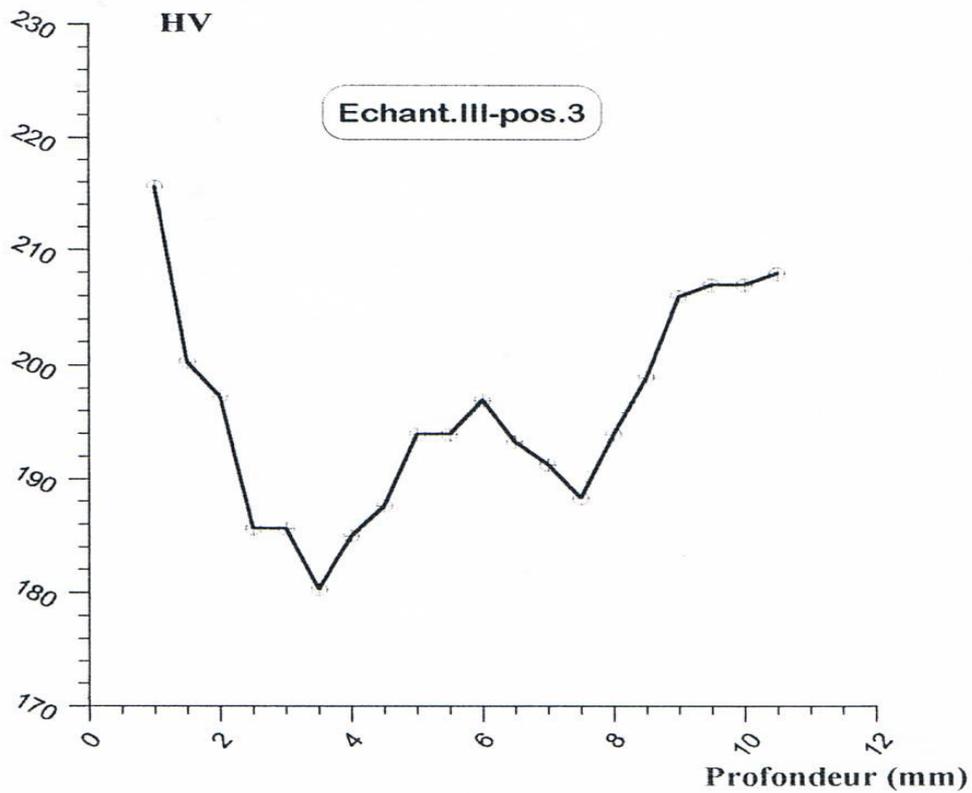
# CHAPITRE IV : ETUDE EXPERIMENTALE

Sans pre  
Ep 10/12



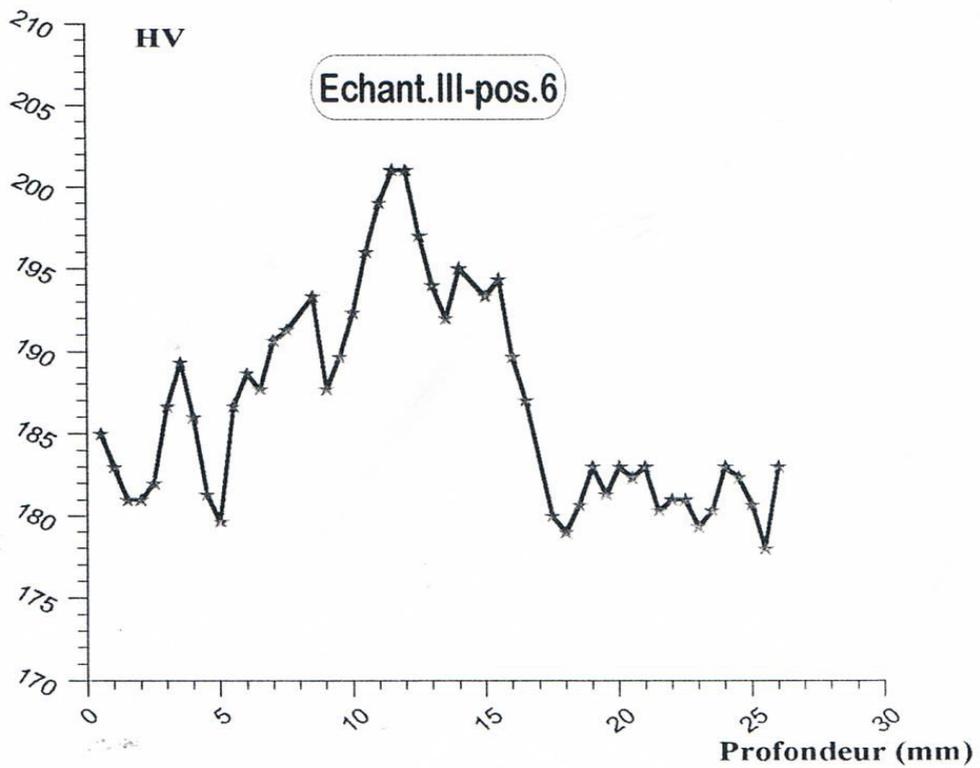
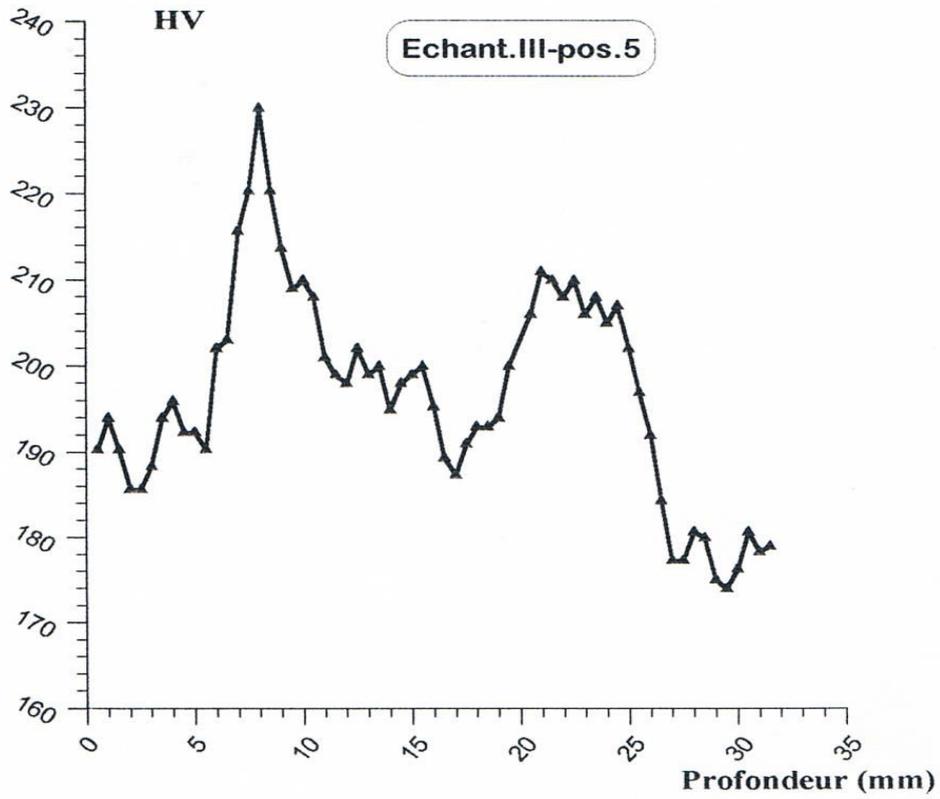
# CHAPITRE IV : ETUDE EXPERIMENTALE

Sans pre  
Ep 10/12



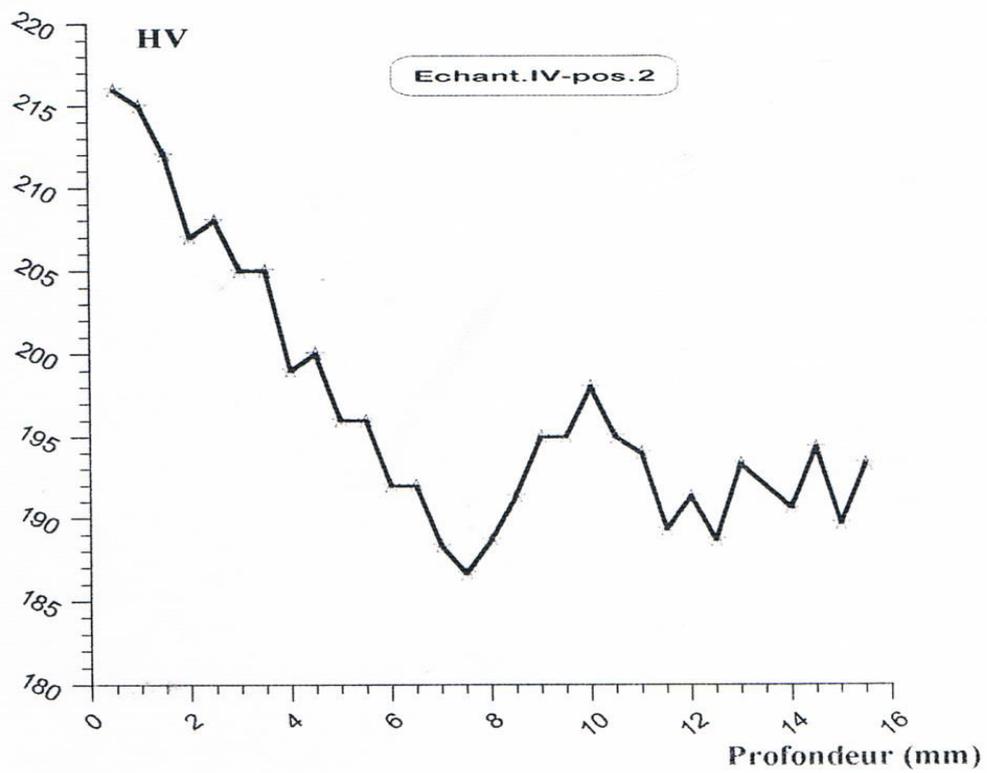
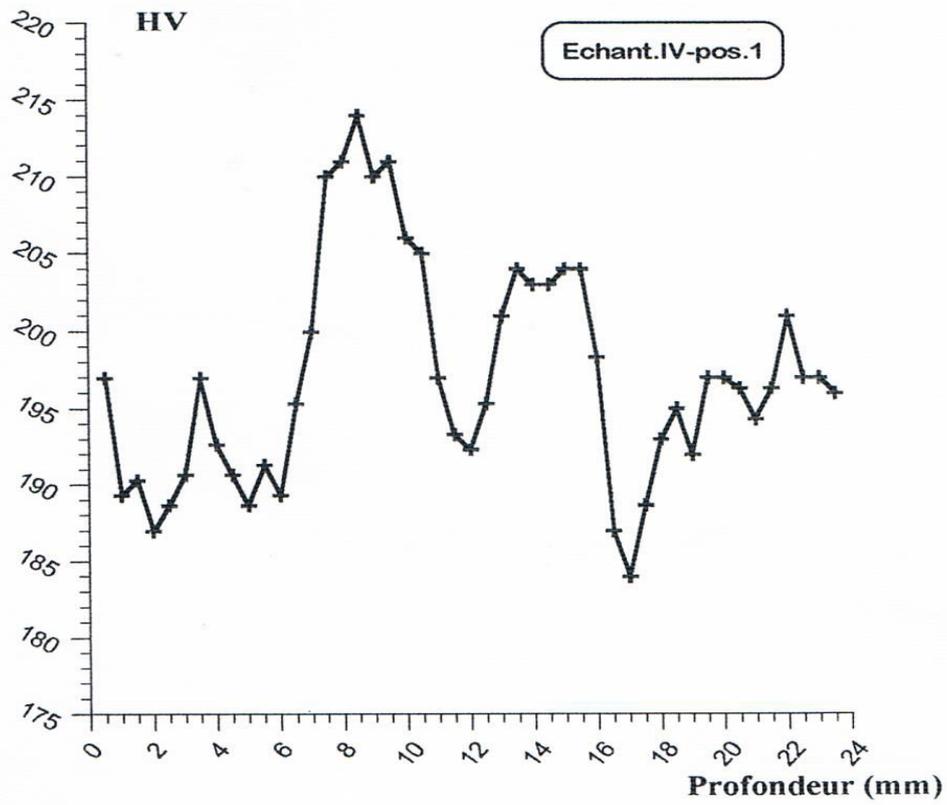
# CHAPITRE IV : ETUDE EXPERIMENTALE

Sans pre  
Ep 10/12



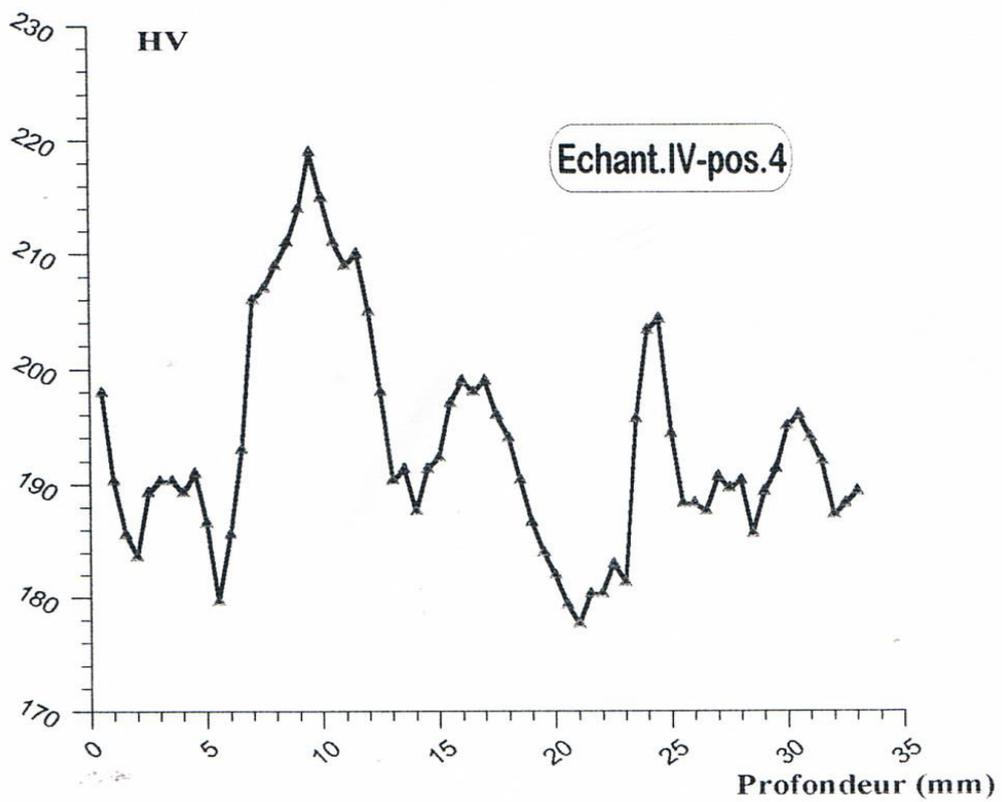
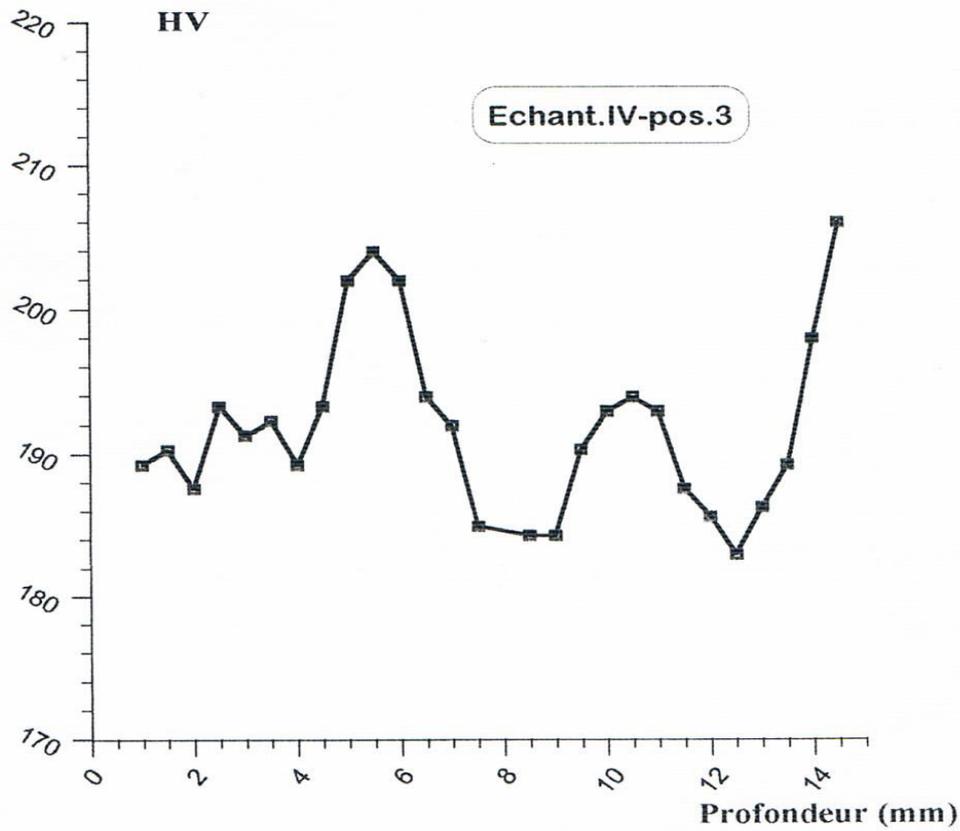
# CHAPITRE IV : ETUDE EXPERIMENTALE

Sans pre  
Sp 15/15



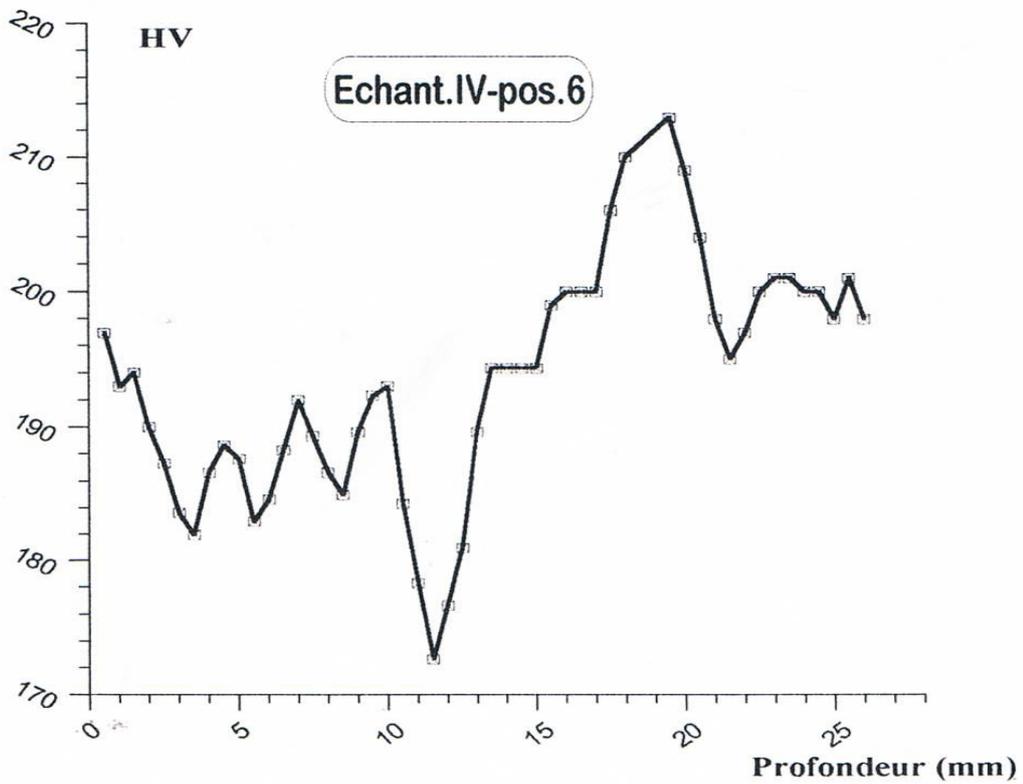
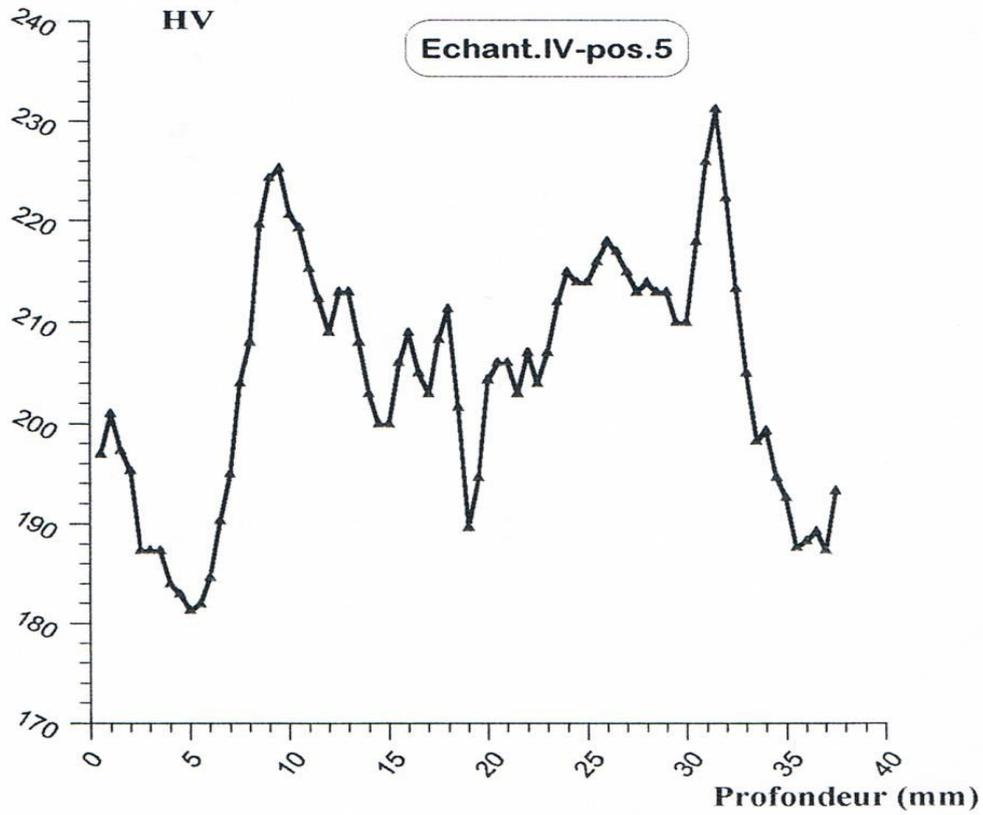
# CHAPITRE IV : ETUDE EXPERIMENTALE

Sans pre  
EP 15/15



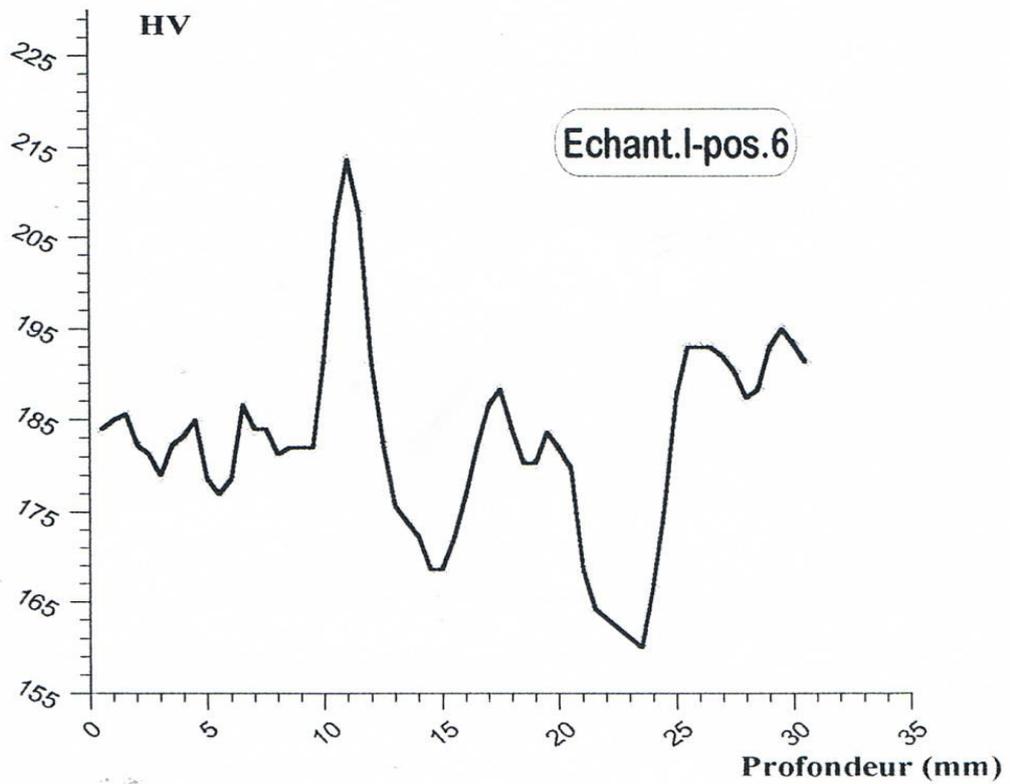
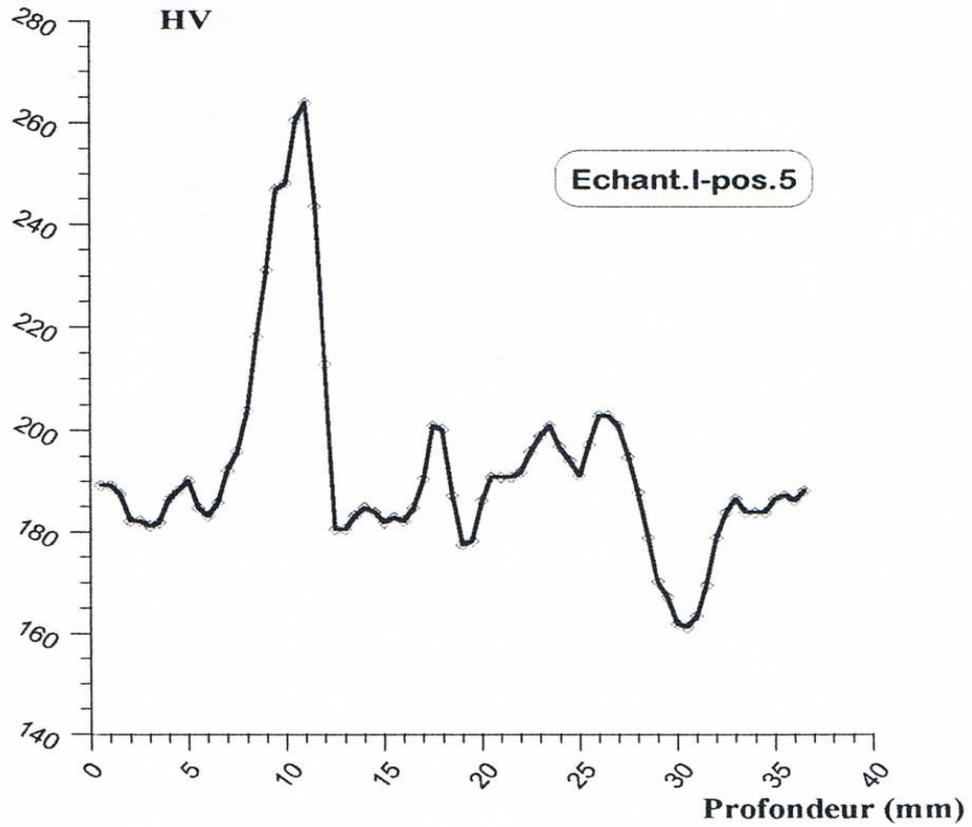
# CHAPITRE IV : ETUDE EXPERIMENTALE

Sans pre  
EP 15/15



# CHAPITRE IV : ETUDE EXPERIMENTALE

$\theta = 100^{\circ}\text{C}$



## CHAPITRE IV : ETUDE EXPERIMENTALE

### IV.5 ETUDE MICROGRAPHIQUE STRUCTURALE

Cette étude ou cet expérience a pour but la mise en oeuvre de la structure de l'échantillon et des inclusions non métalliques lors de l'observation à l'aide du microscope.

#### IV.5.1 Construction du microscope métallographique

Le microscope métallographique est un appareil utilisé pour observer et photographier la microstructure des métaux dont les objectifs sont oculaires et assure des grossissements variant de 70 à 150 fois.

Le microscope comprend deux parties fondamentales, une optique et l'autre mécanique. La partie optique sert au grossissement de l'image d'une surface de l'échantillon et donne la possibilité d'étudier la microstructure, la partie mécanique se compose du corps de l'appareil du mécanisme d'avance de la platine et d'avance micrométrique de l'**objectif**.

#### IV.5.2 Commentaires

- La photo N°1: Représente le métal de base avec un  $G = 50$   
 $\Theta_0 = 100^\circ$ ,  $e = 12 - 12$  c'est une structure (Ferrite + perlite).
- La photo N°2: Représente la ZAC + Z.F avec un  $G = 200$ . C'est une structure ferrite + bainite.
- La photo N°3 : Représente la Z.F avec  $G = 50$  . C'est une structure ferrite + bainite (ferrite + cémentite)
- La photo N°4: Représente la M.B + ZAC avec  $G = 50$ . C'est une structure ferrite.

### IV.6 ETUDE PAR RAYON «X»

1) Les rayons X sont des ondes électromagnétiques de longueur d'onde comprise entre 0,1 Å

et 10 Å. Les rayons X utilisés en radiocristallographie ont des longueurs d'ondes voisines de 1 Å, d'ordre de grandeur des distances interatomiques dans les cristaux métalliques. Quand un faisceau de rayon X tombe sur un matériau métallique une partie du faisceau pénètre dans le matériau, elle est pour une part, transmise (si l'échantillon est suffisamment mince) et, pour l'autre part, absorbée, l'autre part du faisceau est diffusée, c-à-d réémise sous forme d'un rayonnement X de même longueur d'onde que le rayonnement incident, dans des conditions différentes de celles du faisceau incident, ce dernier phénomène est à la base de la diffraction des rayons X par les cristaux,

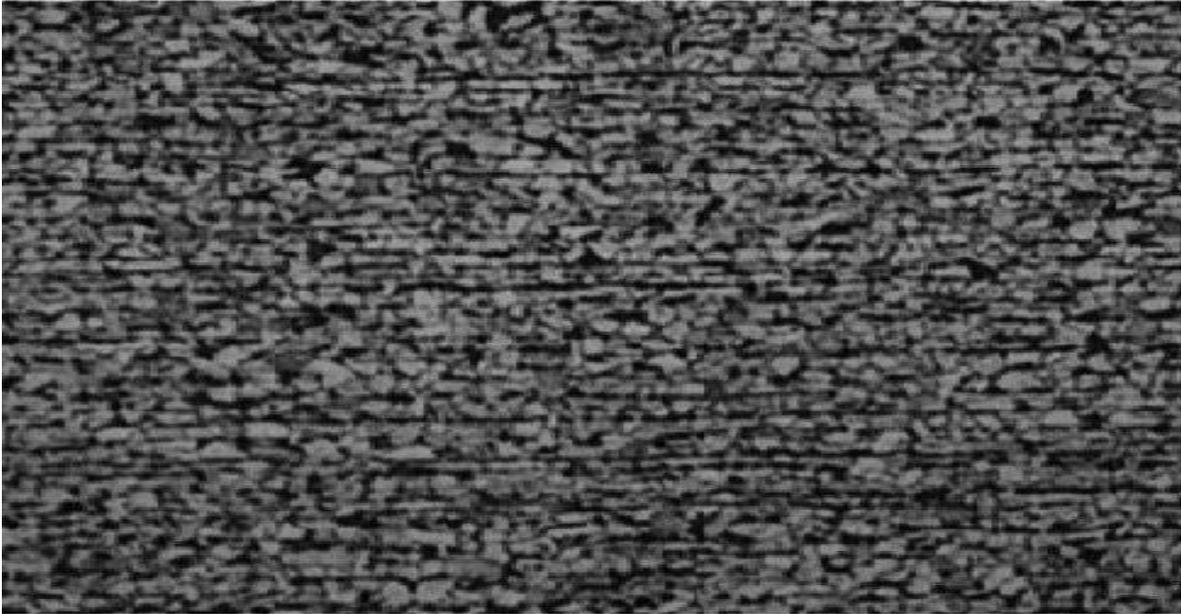
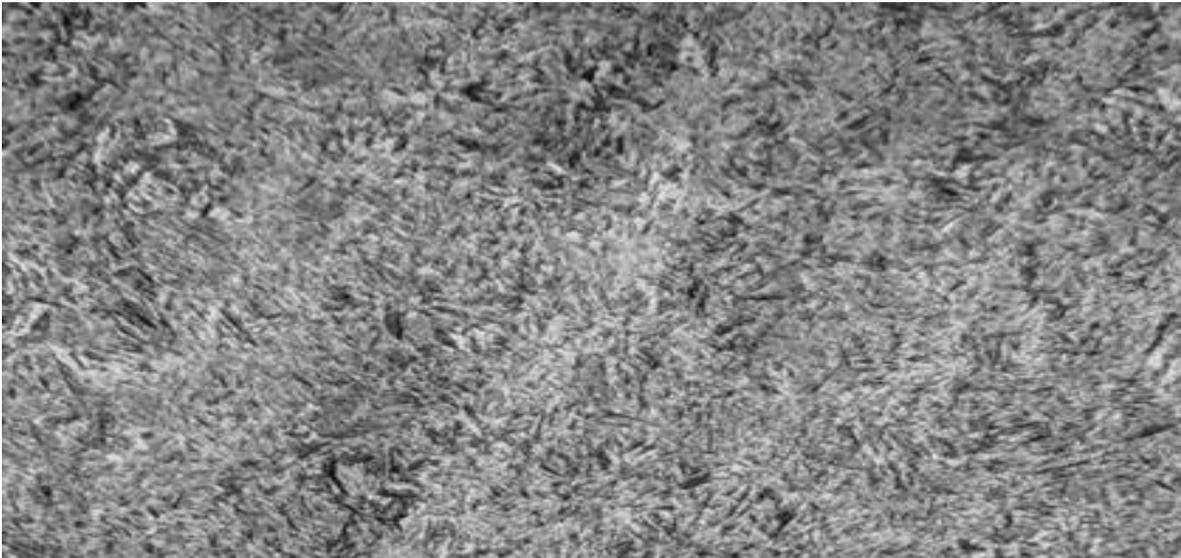


Figure IV.6 le métal de base avec un  $G = 50$  (Ferrite + perlite).



**Figure IV.7** la ZAC + Z.F avec un  $G = 200$  ferrite + bainite

## CHAPITRE IV : ETUDE EXPERIMENTALE

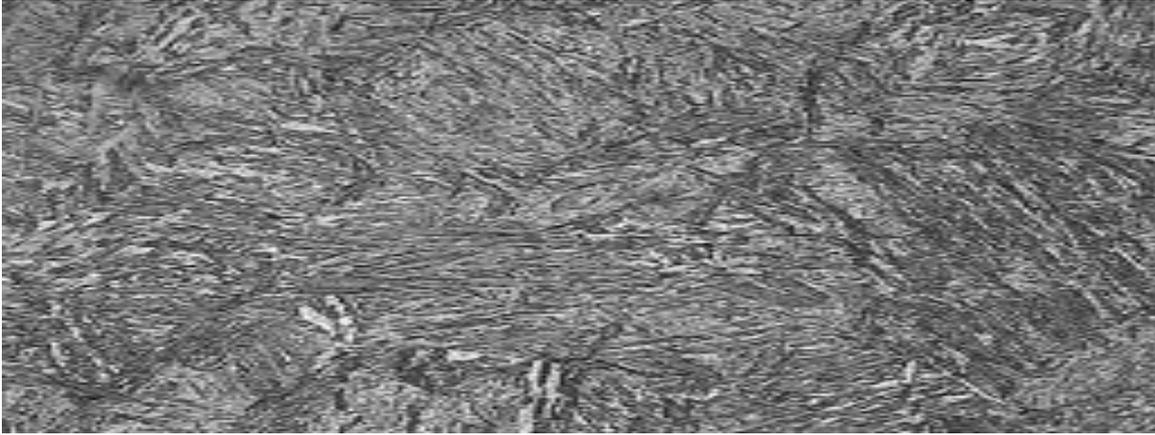


Figure IV.8 la Z.F avec G = 50 ferrite + bainite (ferrite + cémentite)

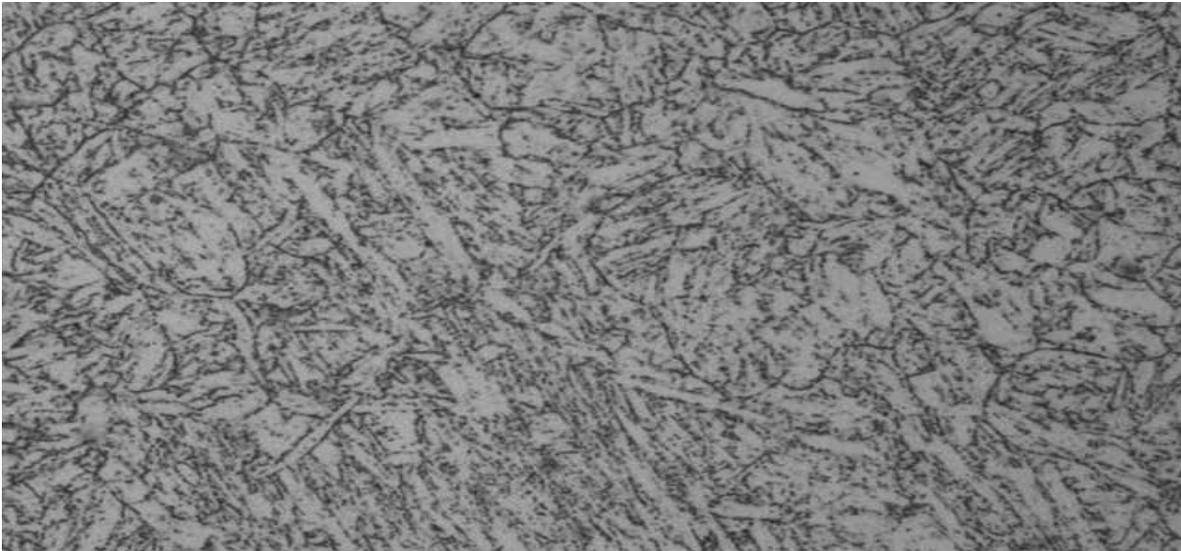


Figure IV.9 la M.B + ZAC avec G=50 ferrite.

### IV.6.1 Méthode expérimentale de diffraction des rayons X:

Les différentes techniques d'analyse cristalline des corps solides dérivent de trois méthodes principales différentes, chacune possèdent plusieurs méthodes dérivées. Ces trois méthodes différentes par le type de rayonnement utilisé (mono ou polychromatique) et par caractère mono ou polycristallin du solide étudié. Elles sont indiquées dans le tableau suivant:

classification des diverses méthodes expérimentales de diffraction des rayons x	
type de solide étudié	
Monocristallin	polycristallin

## CHAPITRE IV : ETUDE EXPERIMENTALE

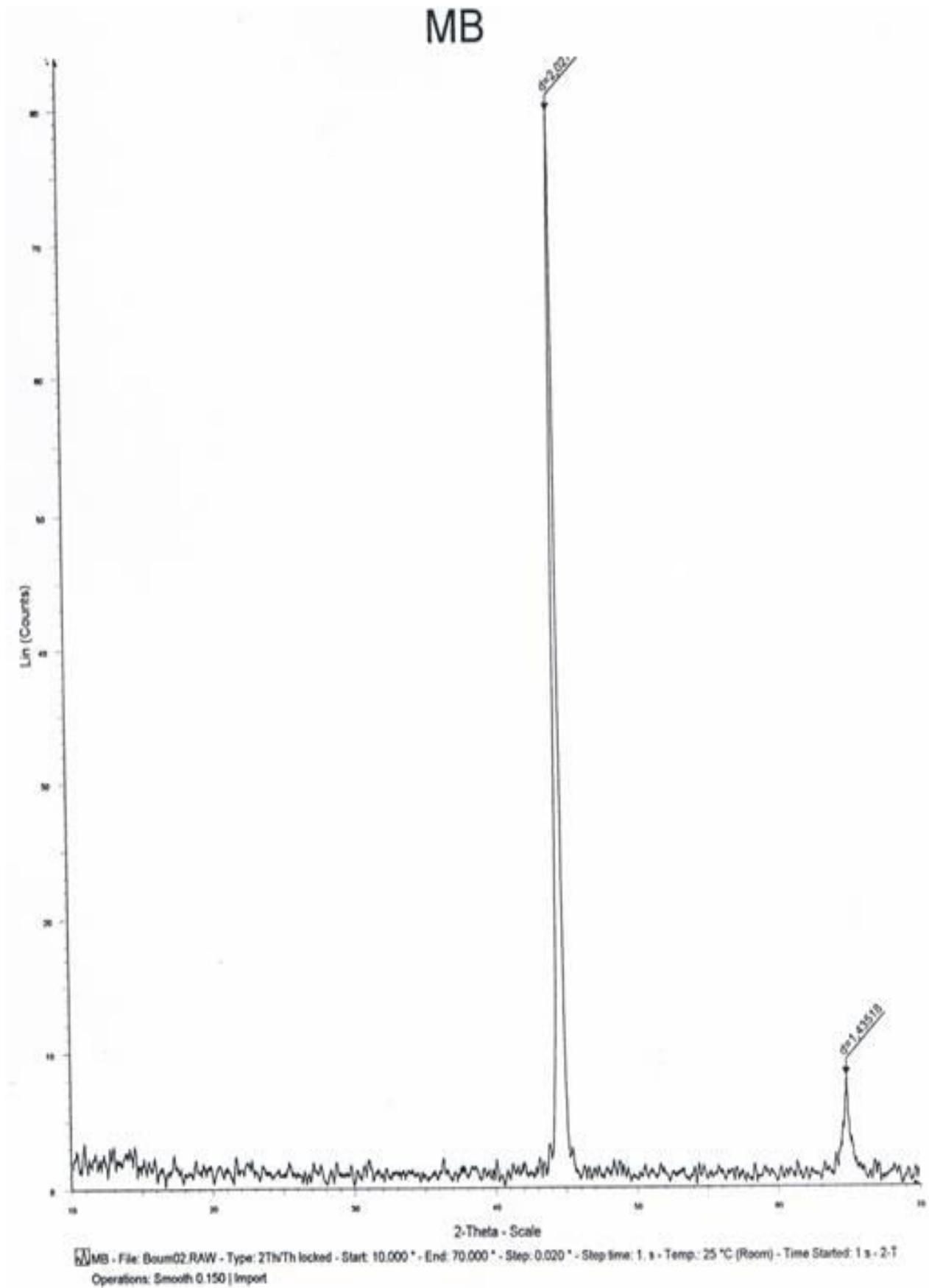
Type de rayons x	Mono	methode de cristale tournant	methode des poudres ou dedy-scherre
	poly	methode de laue	

On utilisant le modèle de « Debye Scherrer » on obtient les courbes suivantes: -

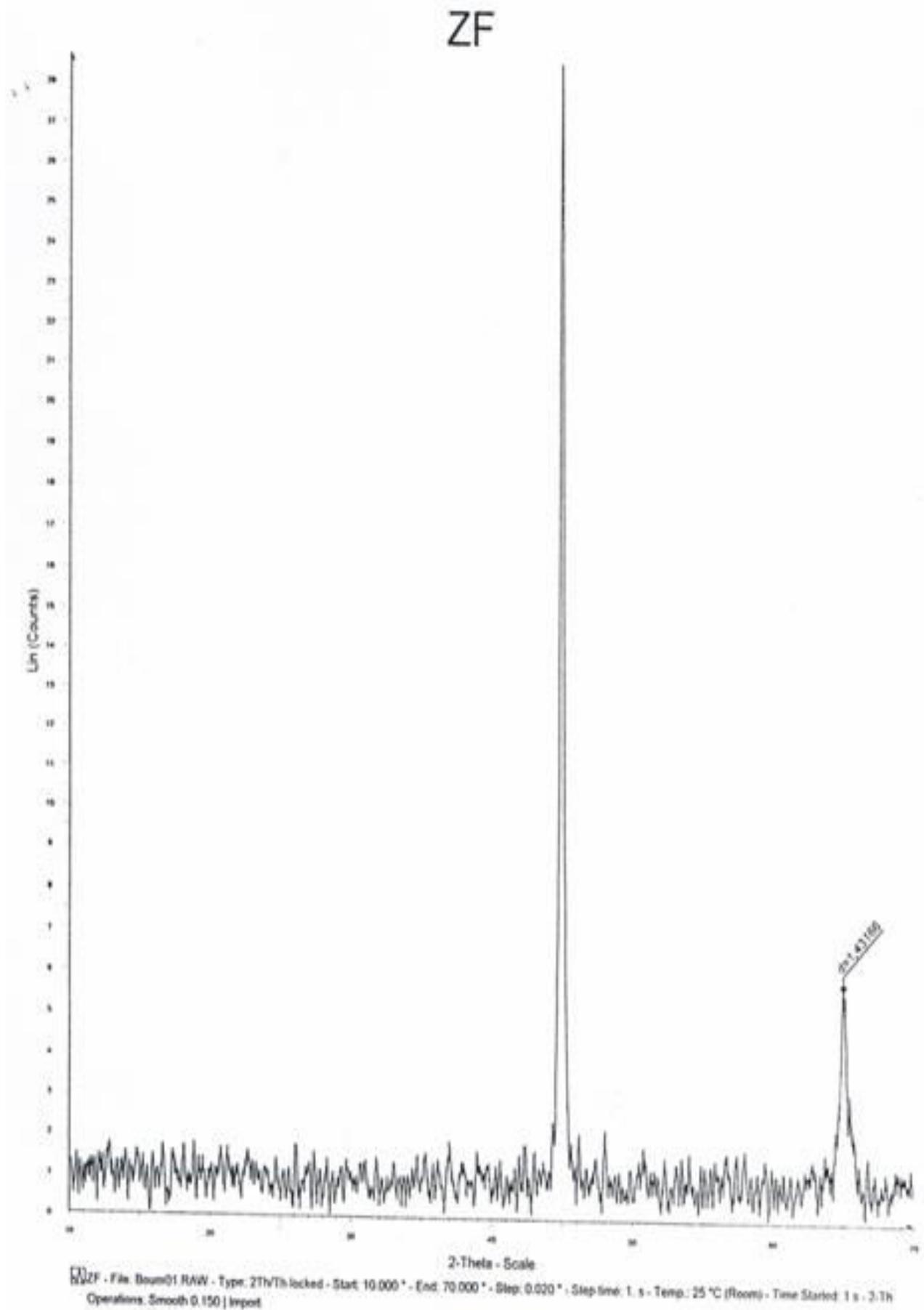
Observation:

Les pics obtenus correspondent à une « ferrite ».

# CHAPITRE IV : ETUDE EXPERIMENTALE

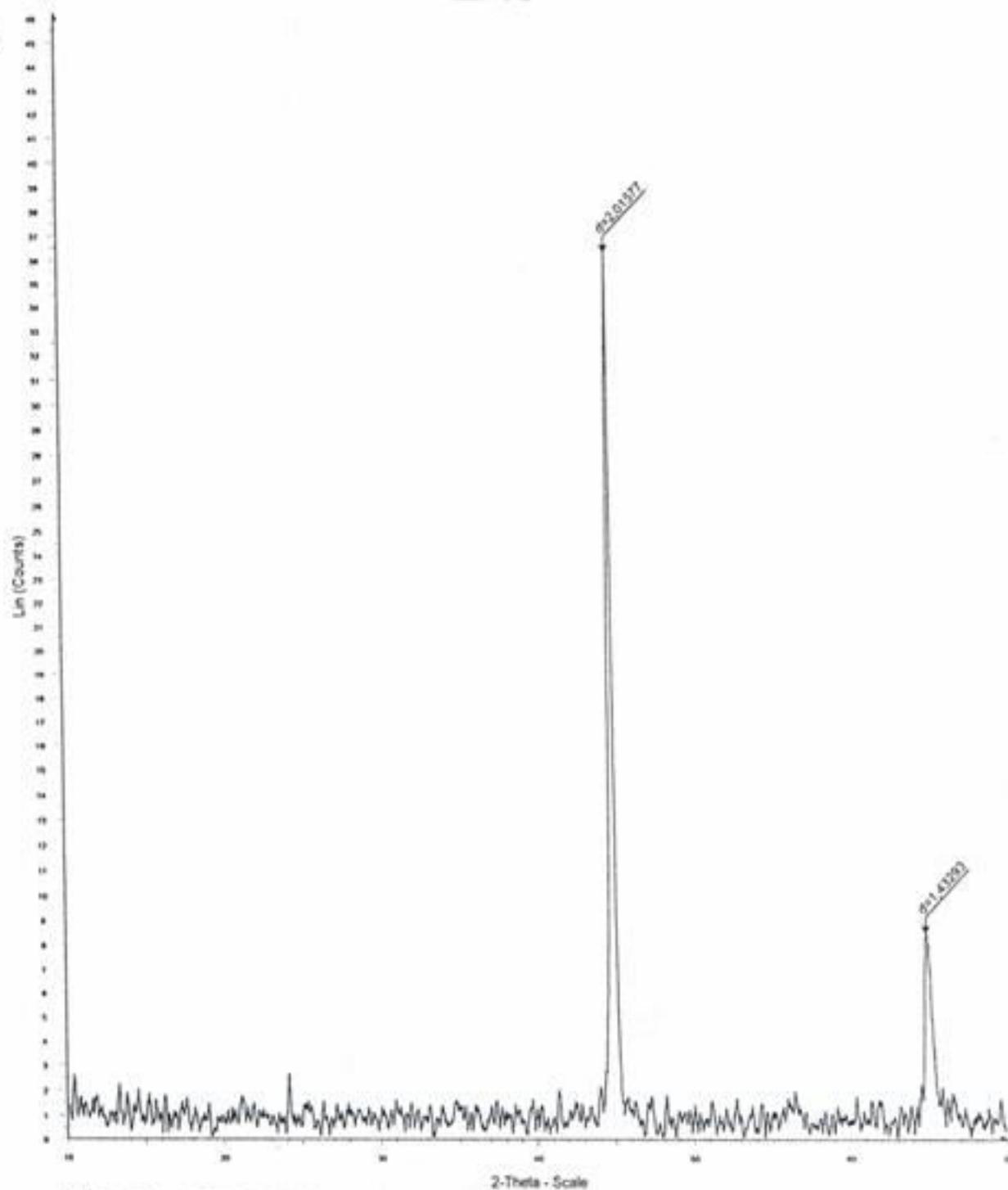


# CHAPITRE IV : ETUDE EXPERIMENTALE



# CHAPITRE IV : ETUDE EXPERIMENTALE

## ZAC



ZAC - File: Bound3.RAW - Type: 2Th/Th locked - Start: 10.000° - End: 70.000° - Step: 0.020° - Step time: 1. s - Temp: 25 °C (Room) - Time Started: 1 s - 2 - Operations: Smooth 0.150 | Import

## CHAPITRE IV : ETUDE EXPERIMENTALE

### IV.7 COMMENTAIRE DES RESULTATS

#### . Essai de traction:

La consultation de nos tableaux pour l'essai de traction nous donne les remarques suivantes:

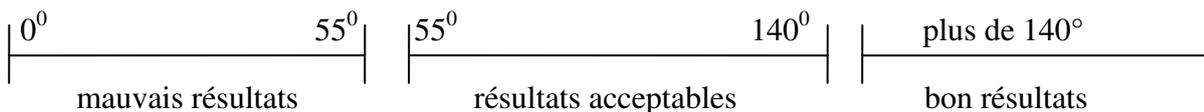
-Pour les éprouvettes assemblées à  $\Theta_0 = 100^\circ\text{C}$  et après avoir vue les trois facteurs précédents (limite d'élasticité, résistance à la traction, et allongement) on remarque que ces valeurs sont si importantes.

-Pour les valeurs des éprouvettes assemblées à  $\Theta_0 = 200^\circ\text{C}$  sont aussi admettantes car dans ce cas elles sont approchées d'être comme celles des éprouvettes assemblées à  $\Theta_0 = 100^\circ\text{C}$ .

-Dans le cas des éprouvettes assemblées sans préchauffage on remarque le même commentaire comme celle de  $200^\circ\text{C}$ .

#### . Essai de pliage:

Le commentaire sur les résultats obtenus exige tout d'abord la représentation des différents plage



Après avoir vue nos résultats sur les deux tableaux on distingue par suite conclusion suivante: L'éprouvette N° Id prend une valeur «  $140^\circ$  » qui est comprise dans l'intervalle  $55^\circ \rightarrow 140^\circ$  (résultats acceptables) alors on peut dire que le phénomène de préchauffage à  $100^\circ$  est satisfaisant. Par contre, les autres valeurs ne vérifie pas les conditions exigées.

#### . Essai de résilience:

La fiabilité d'une construction dépend en plus d'une limite d'élasticité élevée, une bonne résistance à la rupture fragile (essai au choc) mais dans de nombreux cas ceci n'est pas vrai. Voir nos tableaux on remarque que les valeurs de « K » les plus importantes ci-celles qui correspondent aux valeurs des éprouvettes assemblées à  $\Theta_0 = 100^\circ\text{C}$  et  $\Theta_0 = 200^\circ\text{C}$  ne contiennent pas les conditions voulus.

#### • Essai de microdureté:

Autant que notre projet sert à étudier les cordons de soudures et pour cela on va comparer les différents échantillons qu'on a:

eprouvette	N° d'échantillon	Moyenne de durette
Sans préchauffage	03	199
$\Theta_0 = 100^\circ\text{c}$	01	189
$\Theta_0 = 200^\circ\text{c}$	02	198

Pour avoir une structure ductile il faut diminuée la durté (inférieur à  $350\text{ Hv}$ ), c.à.d relaxer les contraintes résiduelles due en laminage pour cela on à fait le préchauffage a

## CHAPITRE IV : ETUDE EXPERIMENTALE

deux températures différentes ( $Q_1 = 100^\circ\text{C}$  et  $Q_2 = 250^\circ\text{C}$ ), afin d'obtenir les résultats (voir tableau ci-dessus). qui vous indique qu'il y a une décroissance proportionnelle à l'essai de préchauffage à  $100^\circ\text{C}$ , par contre à  $200^\circ\text{C}$  on remarque une augmentation du duré, et pour mieux éclaircir on constate que la diminution de la dureté exige que notre éprouvette doit soumise à un préchauffage.

malgré que le métal est le même ( de l'éprouvette) on remarque d'après nos tableaux et leurs courbes de dureté qu'il existe une hétérogénéité c.à.d que le valeurs (AG) du courdon ne convient pas avec les valeurs (Ad).

Cette hétérogénéité montre qu'il existe plusieurs ou bien des différentes structures dans nos éprouvettes, à cause de la distribution de la chaleur de préchauffage qui n'est pas uniforme sur toute la surface de l'éprouvette.

### CONCLUSION

Après avoir eu l'occasion de se trouver dans le C.P.G ,et voir de plus pressé qui déroule, afin de réaliser notre problème qui concerne " Conception des joints soudés"

On a traité le problème sur deux plans; le plan expérimental ,et bibliographique.

Sur le plan expérimental: on a fait des divers essais qui entre en jeux lors du soudage.

- Sur le plan bibliographique :on a imposé tout les détails concernant les caractéristiques de L'engin, le plan d'enchaînement de soudure pour les différentes pièces qui compose le monobloc

- Dans le chapitre II nous avons étudié les caractéristiques de l'acier au seindudomii métallurgique, avec ses zones principales et l'influence de la présence d'hydrogène, oxygène et de - l'azote sur la performance des joints. On a étudié les différentes formes de la fissuration, ainsi que le paramètre de carbone équivalent.

On a présenté les deux principes de traitements thermiques (préchauffage ,post chauffage)des joints soudés

- c i Et dans lethe chapitre on a interprétey'nosessis pour sjvoi l'influence de préchauffage envers les carac,téristiques mécaniques, et métallurgique de notre pièce (mono-bloc)

e8t'pour suite, on que ce phénomène (préchauffage) nous donne des résultats acceptable qui

permet de les considérer comme une solution applicable, mais avec précautions, car cela est bien claire surtout dans la microdurée iforme (d'hétérogénéité)

### RECOMMANDATIONS PRATIQUES

On doit dire qu'une parfaite compréhension du problème posé permet de donner conseils qu'ont aux moyens d'investigation ainsi que l'étude qui devraient être menues afin de résoudre le problème de fissuration sur le monobloc des pelles 9210

1- On a vue avant tout et avec l'oeil nue qu'il y a:

Mauvais réglage d'intensité.

- L'angle de soudage ( $70^\circ$ - $80^\circ$ ) et non respectable.

## CHAPITRE IV : ETUDE EXPERIMENTALE

---

- Défaut de pénétration.

2-11 faut bien revoir la technique de préchauffage.

Au terme de notre travail, nous dirons que nous sommes polarisés seulement sur l'aspect métallurgique et l'autre aspect (mécanique) sera étudié par l'autre binôme (Mr Dabouz et Lamri).

## Conclusion générale

La première remarque dans ce travail traite les conséquences métallurgiques après une opération de soudage et les propriétés mécaniques des matériaux, ce qui nous a permis un bon choix du la nuance utilisée.

Le métal de base des constructions soudées doit répondre à un certain nombre de critères principaux. Assurer la stabilité fonctionnelle de l'ensemble (c.à.d) permettre un certain durée de vie exigée par la fonction qu'il doit remplir, tel que la tenue de l'ensemble aux basses températures, et il doit répondre aux spécifications réglementaires.

L'énergie de soudage dépend de la tension de la tension d'arc, de l'intensité et de la vitesse de soudage. Elle influe sur la ductilité du matériau et directement sur le niveau de la résilience que l'on obtiendra. Elle ne doit être, ni trop élevée, ni trop faible, pour les aciers elle se situe en général entre 20 et 35 kJ/cm, variable en fonction de la nature de l'acier ainsi que l'épaisseur des tôles a soudés.

La zone affectée par la chaleur présente une résilience supérieur à celle du métal de base, ce phénomène est dû à l'autorevenu de la martensite provoqué par l'effet des passes de soudage successives. Le traitement de détente améliore toujours la résilience de la ZAT.

La différence remarquée sur les valeurs de la dureté entre les différentes zones, due essentiellement aux changements structuraux apportés par le cycle thermique du procédé de soudage et le cycle du traitement thermique appliqué.

Les propriétés mécaniques de l'acier E36 ont été caractérisées par l'intermédiaire de plusieurs essais avant et après traitement thermique. Pour les essais de résilience, les éprouvettes ont été prélevées dans le sens transversal du cordon de soudure, effectuées dans des conditions normales. Les essais de résilience ont montré que le métal de base et le cordon de soudure sont devenu très résilient à cause du traitement thermique appliquée.

Un choix judicieux du procédé de soudage et de l'état des produits d'apport permet de réduire au maximum la teneur en hydrogène dans la zone fondue, la zone affectée par la chaleur la cause principe du risque de la rupture fragile du cordon.

Enfin, la fiabilité d'une structure soudée dépend de plusieurs facteurs :

Le choix d'un métal de base avec des caractéristiques répondant aux exigences d'une telle construction, une limite élastique élevée et une bonne résistance à la rupture fragile.

Un choix convenable de tous les paramètres de soudage

Une préparation judicieuse des pièces à assembler

Le choix d'un métal d'apport qui permet de donner au cordon la composition désirée, avec d'excellentes qualités mécaniques de résistance au choc et aux déformations

Le choix judicieux du traitement thermique pré soudage ou post-soudage pour améliorer les caractéristiques mécaniques du cordon de soudure.

## Références Bibliographique

- [1] N.CAVALLO. Contribution à la validation expérimentale de modèles décrivant la ZAT lors d'une opération de soudage, thèse de doctorat, INSA, Avril 1998
- [2] P.GROSTABUSSIAT SOPHIE. Conséquences mécaniques des transformations structurales dans les alliages ferreux, thèse de doctorat, INSA Lyon, Déc. 2000
- [3] P.HAUSILD. Transition ductile-fragile dans un acier faiblement allié thèse de doctorat, Ecole centrale de paris, Septembre 2002
- [4] R.BOURGEOIS. Mémothech, Génie des matériaux, édition éducative 2001
- [5] H.Surderland. Caractéristiques et choix des matériaux, Dunod 1987
- [6] M.Bramat. Propriétés des joints et essais, soudage et techniques connexes, Vol.39, Jan/Fév. 1985
- [7] R.VARISELLAZ. Soudage élément de conception et de réalisation, Dunod 1987
- [8] C.LEYMONIE , R.BOUVEROT. Contribution à l'étude des traitements thermiques après soudage d'aciers faiblement alliés.  
Soudage et techniques connexes N°1/2 1970
- [9] P.BERTHET. Déformations et contraintes en soudage, publications de la soudure autogène EYROLLES 1988
- [10] H.GRANJON. Bases métallurgiques de soudage, publications de soudage et de ses applications 1995.
- [11] A.COMPA, Technologie professionnelle générale pour les mécaniciens,  
FOCHER  
1971.
- [12] B.CHASSIGNOLE, Influence de la structure métallographique des soudures en acier inoxydable sur le contrôle non destructif par ultrasons, thèse de doctorat, INSA, Lyon. Décembre 2000
- [13] (Document SAF) Installation de soudage MIG/MAG à technologie onduleur  
(Document SAF)
- [14] J.LIGNON , R.MAILLEBUAU, Métaux ferreux, Fascicule 9, DELAGRAVE
- [15] L.LAICHE, Etude mécanique et métallurgique dans les joints de soudure sur le monobloc des pelles 9210 et 9211, thèse de magister, Université de BATNA, Juillet 1998
- [16] C.CHAUSSIN, Manuel pratique des aciers et de leurs traitements thermiques  
Dunod 1981

- [17] I.LAKHTINE, Métallographie et traitements thermiques des métaux edition MIR 1978)
- [18] M.ZAOUI, Caractérisation mécaniques et métallurgiques des joints de soudure, étude comparative entre deux procédés de soudage, le soudage MIG et le soudage au chalumeau, thèse de magister, Juin 2000.
- [19] D.Ayrault , D.De Dinechin, Evaluation expérimentale de l'effet des conditions de dépôt sur les contraintes résiduelles en soudage multi passes, Publication, Matériaux 2002.
- [20] P.Agati, N.Mattera, Mécanique, Collection Durrande 1984
- [21] G.Karadeniz, Travaux pratiques des matériaux « Métaux », Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, Février 2003
- [22] L.DE RYCK, L.LE GUYADER, Essai de traction pur, Mai 2002
- [23] H.P.Lieurade, Spécial mécano soudage, CETIM Informations N°118, Septembre 1990
- [24] G.Bernerd Les effets métallurgiques des traitements thermiques post-soudage (Note technique N°04, CETIM, 1979)
- [25] R. Dietrich, J.P.Trotignon, Précie de construction mécanique AFNOR-NATHON 1979
- [26] C.BOUHELIER, Traitements thermiques des constructions chaudronnées Note technique de CETIM N°21, Décembre 1981
- [27] B.BARTELEMY, Notions pratiques de mécanique de la rupture, (RYROLLES 1980)
- [28] C.OLIVIER , A. BISANTI, Extrait du rapport d'enquête sur l'accident maritime du bateau de TITANIC 2001
- [29] A.ZEGHLOUL, Concepts fondamentaux de la mécanique de la rupture, Cours, Mécanique de la rupture, Université de METZ 03/04)
- [30] J. Bernrd, Métallurgie générale, Masson 1984
- [31] W.Kurz, J.P.Mercier, Introduction à la science des Matériaux, 1991
- [32] L.P.Astrid, Rupture par clivage de microstructure d'aciers bainitiques btenués en Conditions de soudage, thèse de doctorat, ENS des Mines de Paris, Mai 2001