

1/03

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'enseignement supérieur  
et de la recherche scientifique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

Projet de fin d'études pour l'obtention du  
Diplôme d'Ingénieur d'Etat en Génie Mécanique

**THEME**

**Caractérisation des propriétés mécaniques d'un assemblage soudé  
en acier Inoxydable 304 L.**

**influence des paramètres d'essais**

*étudié par* : SAMIR ABBA

*Promoteur* : Pr S. RECHAK (E.N.P)

*Copromoteur* : Mme N.BELKESSA (C.S.C)

**Promotion : 2003**



## Dédicaces

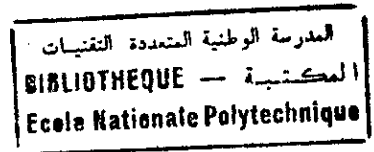
*A ma très chère mère, mon père,  
A mes frères, Sofiane et Arezki  
A ma sœur Lamia  
qui ont été Toujours à mes cotés .*

*A mes grands parents  
A toute ma famille*

*Je dédie ce modeste travail*

*SAMIR ABBA*

## Remerciements



Je tiens à exprimer toute ma gratitude et ma reconnaissance à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail . notamment :

Monsieur le Professeur S. RECHAK ,professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique (ENP) d'EL HARRACH ,qui a assuré la direction de ce travail avec lucidité , ses remarques nombreuses et détaillées qu'il a formulées ont grandement contribué , en mettant en lumière un certain nombre de question susceptibles d'améliorer et donner une forme achevée à ce travail.

Mme N.BELKESSA la copromotrice qui est ( chercheur permanent au centre de recherche scientifique et technique en soudage et contrôle ) pour son aide et son suivi.

Mr MAZA et ABDERRAHMANE nous ont aidé à réaliser les essais sur machine instron.

Je remercie mes copains de la promotion 2003 ainsi que tout les enseignants du département mécanique de L'E.N.P.

ملخص:

الغرض من هذه الدراسة هو تعيين الخصائص الميكانيكية لفولاذ غير قابل للأكسدة من نوع 304L الملحوم بطريقة الإلجام المستخدم لقوس كهربائي وخاصة تأثير معايير التجربة على هذه الخصائص: هذه العناصر هي: سرعة تطبيق القوة، قوة دورية.

كلمات مفتاحية: الإلجام، غير قابل للأكسدة، خصائص ميكانيكية، قوة جذب.

### Résumé :

L'objet primaire de ce travail consiste à étudier le comportement mécanique d'un assemblage soudé à l'arc électrique en acier inoxydable 304 L et l'influence des paramètres d'essais sur le comportement de celui-ci . Pour cela une série d'essais de traction ont été réalisés sur des échantillons prélevés avec variation des paramètres qui sont : la vitesse de déplacement, le cyclage et la précharge.

**Mots clés :** Acier inoxydable, soudage, caractéristiques mécaniques, traction, vitesse de déplacement, cyclage, précharge.

### Abstract:

The first object of this work consists to study the mechanical properties of an austenitic stainless steel welded with submerged arc welding (SMAW) and influence of tensile parameters on the mechanical properties of this one. For that we have realised of tests with variation of tensile parameters which are: rate of displacement, Cycling and preload.

**Key words:** stainless steel, welding, tensile test, displacement rate, cycling, mechanical properties.

## SOMMAIRE

NOTATION.....i

INTRODUCTION GENERALE.....1

### *PARTIE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE*

#### **Chapitre 1 : soudage : généralités et définition**

1. Définitions.....	4
2. les procédés de soudage .....	4
2.1 procédés faisant intervenir la fusion locale des pièces à assembler.....	4
3. cas du soudage à l'arc.....	4
3.1 propriétés de l'arc du soudage.....	4
3.2 principaux procédés du soudage à l'arc .....	8
4. cas du soudage à l'arc à électrode enrobée .....	9
4.1 description du procédé .....	9
4.2 caractéristiques de l'électrode. ....	10
4.3 domaines d'applications .....	12

#### **Chapitre 2: les aciers inoxydables**

introduction.....	14
1 . classification des aciers inoxydables .....	14
1.1 – notions de base.....	14
1.2 – diagrammes fer-chrome.....	14
1.3 – effet du Nickel.....	15
1.4 – classification. ....	16
2 . cas des aciers inoxydables austénitiques .....	16
2.1 composition chimique et additions.....	16
2.2 caractères généraux des structures austénitiques.....	17
2.3 caractéristiques mécaniques .....	18
- données numériques concernant les caractéristiques des acier inoxydables austénitiques.....	20
2.4 classification des nuances d'aciers inoxydables austénitiques.....	20

#### **Chapitre 3 : étude métallurgique**

1. effet du soudage sur le métal.....	24
1.1 transfert de chaleur.....	24
1.2 - vitesse de refroidissement .....	25
1.3 –températures des zones atteintes.....	25
1.5 - influence de la température sur les grains .....	26
2 . soudabilité des métaux ferreux .....	27
2.1 - soudabilité de l'acier .....	27
2.2 – les principaux facteurs influençant la soudabilité des aciers.....	28
2.2.1 – trempabilité .....	28
2.2.2 – le carbone équivalent .....	28

2.2.3 – le préchauffage .....	29
2.2.4 - les phénomènes de fissuration .....	29
2.3 – soudabilité des aciers inoxydables .....	30
2.3.1 – principales propriétés physiques .....	30
2.3.2 – soudabilité des aciers inoxydables austénitiques .....	30
2.3.3 – procédés de soudage utilisés pour souder les aciers inoxydables.....	31

## Chapitre 4 : comportement mécanique des matériaux

Introduction.....	33
1. essai de traction.....	33
1.1 choix et préparation des éprouvettes.....	34
1.2 Diagramme de traction.....	34
1.2.1 grandeurs mesurées .....	34
1.2.2 déformation rationnelle .....	37

## *PARTIE II : PROCEDURES EXPERIMENTALES.*

### Chapitre 5 : soudage du tube et réalisation des essais

1. soudage du tube.....	41
1.1 choix du métal d'apport.....	41
1.2 Choix du procédé de soudage.....	41
1.3 Elaboration de la fiche technique de soudage.....	42
1.4 Soudage du tube. et précautions à prendre (avant le soudage du tube).....	43
2. réalisation des éprouvettes.....	44
2.1 coupage du tube.....	44
2.2 L'usinage des éprouvettes .....	44
3. les essais de traction .....	45
3.1 description de la machine.....	46
3.2 description des essais .....	46
I) essai N°1 (sans précharge).....	46
II) essai N°2 (avec précharge).....	48
III) Essai N°3 (essai avec contrôle de déplacement).....	49
IV) Essai avec cyclage.....	50

## *PARTIE III : RESULTATS ET INTERPRETATIONS*

### Chapitre 6 : résultats expérimentaux des essais de traction

Introduction.....	54
1. allure de courbes obtenues.....	54
2. étude des paramètres. ....	54
2.1 essai sans précharge.....	55
2.2 essai avec précharge.....	56
2.2.1 résultats.....	56
2.2.2 évolution des propriétés en fonction de précharge.....	59
2.3 essai avec variation de vitesse.....	61
2.3.1 résultats.....	61
2.3.2 évolution des propriétés en fonction du déplacement.....	62

2.4 le cyclage.....	66
2.4.1 résultats.....	66
2.4.2 analyse de l'évolution des propriétés en fonction du cyclage.....	67
3. conclusion générale.....	68

## NOTATIONS

$A$	Déformation après rupture.
$E$	Module de Young.
$\Delta Lu$	Allongement après rupture.
$Z$	Coefficient de striction.
$Re$	Limite apparente d'élasticité.
$Re_H$	Limite supérieure d'écoulement
$Re_L$	Limite inférieure d'écoulement.
$Rm$	Résistance à la traction.
$\varepsilon$	Déformation rationnelle.
$V$	Vitesse de déplacement.
$S_0$	Section transversale de l'éprouvette.
$L_c$	Longueur calibrée de l'éprouvette.
$L_0$	Longueur entre repère de l'éprouvette.
$\bar{\varepsilon}$	tenseur de déformation
$\bar{\sigma}$	tenseur de contraintes
$\sigma$	Contrainte suivant l'axe x

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
المكتبة — BIBLIOTHEQUE  
Ecole Nationale Polytechnique



Ce travail s'inscrit dans le cadre du projet de recherche intitulé « caractérisation des propriétés mécaniques d'un assemblage soudé ». Ce projet fait partie du programme de recherche du laboratoire de métallurgie / mécanique du centre de recherche scientifique et technique en soudage et contrôle de chéraga à Alger.

Dans le cadre de ce projet nous avons étudié le comportement de l'assemblage vis à vis de l'essai de traction ainsi que l'influence des paramètres sur ce comportement, et modélisé l'essai de traction sur éprouvette soudée.

Les paramètres étudiés sont la précharge, la vitesse de déplacement et le cyclage.

Les aciers inoxydables et particulièrement les aciers inoxydables austénitiques prennent une place très importante dans la construction métallique. Ils sont largement utilisés dans l'industrie chimique, dans la pétrochimie, le nucléaire, la médecine ; dans l'agro-alimentaire et dans la chaudronnerie lourde.

Utilisés souvent comme tuyauterie dans le transport de fluides à haute température et sous de fortes pressions, ces aciers présentent une bonne résistance à la corrosion et de bonnes caractéristiques mécaniques.

dans le cadre de ce mémoire, nous nous sommes intéressés d'une part à la résistance d'un assemblage d'une nuance de ce type d'acier et d'autre part, à l'influence des paramètres d'essais sur son comportement .

Nous avons soudé un tube destiné au transport, ce tube est d'une nuance austénitique du type AISI 304L. Il a un diamètre de 180 mm et une épaisseur de 7 mm.

Dans la première partie, nous exposons l'étude bibliographique menée dans le cadre de ce mémoire. En effet jusqu'à présent, plusieurs études sont faites sur les problèmes liés au soudage de ces aciers. Plusieurs d'entre elles concernent les phénomènes de corrosion de ces aciers une fois soudés. Peu d'études ont été consacrées au comportement mécanique de ces aciers après soudage.

Dans la deuxième partie de ce document, nous décrivons les procédures expérimentales utilisés dans le cadre de ce travail.

Dans la troisième partie, nous présentons et analysons les résultats des différents essais effectués.

Enfin, nous concluons ce document par une conclusion générale ainsi que des recommandations.

# partie I: étude bibliographique

# Chapitre I

SOUDAGE ;  
GENERALITES ET DEFINITIONS

## 1. définition :

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 (continuité de la nature des matériaux assemblés : matériau métallique, matière plastique, etc.), soit par chauffage, soit par intervention de pression, soit par l'un et l'autre, avec ou sans emploi d'un produit d'apport dont la température de fusion est du même ordre de grandeur que celle du matériau de base.

## 2. Les procédés de soudage :[2]

### 2.1 Les procédés faisant intervenir la fusion locale des pièces à assembler :

Il est habituel de distinguer les procédés de soudage faisant intervenir la fusion locale des pièces à assembler en fonction du mode de chauffage utilisé. C'est ainsi que l'on répertorie :

- le soudage aux gaz ;
- le soudage à l'arc ;
- le soudage par faisceau d'électrons ;
- le soudage par faisceau laser ;
- le soudage par résistance ;
- le soudage aluminothermie.

Il faut noter que, dans tous ces procédés, le bain de métal liquide est contenu dans un *creuset* formé par les volumes des pièces à assembler adjacents au plan de joint.

De ce fait, une partie non fondue des pièces, au voisinage du métal liquide, est portée à des températures comprises, suivant la distance à ce dernier, entre la température du solidus du métal et la température initiale des pièces. La fraction de ce volume (la plus proche du métal fondu) dont la structure et, les propriétés évoluent du fait de cet échauffement est appelée « **zone affectée par la chaleur** » (ZAC) ou « **zone thermiquement affectée** » (ZTA).

Par ailleurs, il est indispensable d'éviter toute réaction chimique entre le métal liquide et l'atmosphère ; il sera donc nécessaire de prévoir sa protection.

## 3. Cas du soudage à l'arc :

### 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 :

- *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.

### 3.1.1 Propriétés électriques :

#### ▪ Courant

Pour une longueur d'arc donnée, on augmente le courant en agissant sur la force électromotrice du générateur. Dans le même temps, la tension aux bornes de l'arc s'accroît ainsi que la puissance totale  $UI$  engendrée. Les lois physiques sont telles que la température et le volume ionisé augmentent dans le même temps.

*C'est donc en agissant sur le courant que l'on règle la puissance de l'arc en soudage.*

#### ▪ Tension

Pour un gaz donné, la tension qui apparaît aux électrodes résulte de la distance qui les sépare et du courant qui le traverse.

Lorsque la longueur d'arc augmente, la tension augmente également de façon proportionnelle.

*La mesure de la tension donne par suite une information sur sa longueur.*

#### ▪ Polarité

Un arc électrique peut fonctionner en courant continu ou alternatif.

On aura ainsi l'une des trois situations suivantes :

— *courant continu, électrode reliée au pôle négatif* du générateur et formant cathode. On dit alors que la polarité est DIRECTE ;

— *courant continu, électrode reliée au pôle positif* du générateur et formant anode. On dit alors que la polarité est INVERSE ;

— *courant alternatif* à la fréquence du réseau ou à une fréquence différente, où électrode et pièces sont alternativement anode et cathode. On dit alors que la polarité est VARIABLE.

Ces trois dispositions sont physiquement différentes, elles ont chacune leur champ d'application.

#### ▪ Puissance

Le produit  $UI$  (valeurs instantanées) donne à chaque instant la puissance  $p$  instantanée dissipée dans l'arc. Il est important de rappeler qu'un arc électrique ne répond pas à la loi de Joule (de forme  $Ri^2$ ).

#### On retiendra simplement les quelques règles suivantes:

— pour une distance fixe entre électrodes, la tension d'arc est une fonction croissante du courant;

— pour un courant donné, la tension est une fonction croissante de la distance entre électrodes;

— la puissance dissipée passe par un maximum en fonction de la distance ;

— toutes choses égales par ailleurs, la tension d'arc est en relation avec le ou les potentiels d'ionisation du ou des gaz où l'arc est établi. Ainsi, pour un même courant, à un gaz au potentiel d'ionisation élevé correspond une tension d'arc élevée et par suite une puissance élevée.

### 3.1.2 Propriétés thermiques :

#### ▪ Répartition de la chaleur

La puissance  $p$  dissipée dans l'arc se transforme en quantité de chaleur  $QT$  par unité de temps qui se répartit en trois ( $QT=Q1+Q2+Q3$ ) :

-  $Q1$  et  $Q2$  absorbées respectivement par l'électrode et par les pièces et servant seules au soudage,

-  $Q3$  rayonnée et perdue dans l'espace environnant.

Le rendement  $\eta$  est égal à  $(Q1+Q2)/QT$ .

Ces considérations appellent trois remarques :

- un courant et une longueur d'arc constants donnent lieu, toutes choses égales par ailleurs, à un effet thermique et des conditions de soudage constants ;
- dans un arc à électrode fusible, la variation du rendement avec la longueur d'arc se traduit par un effet autorégulateur particulièrement important pour la stabilité des phénomènes de fusion ;
- lorsque l'on utilise le soudage sous sa forme manuelle, l'action volontaire d'approche ou de recul de l'électrode (tenue à la main par le porte-électrode) constitue un moyen naturel d'ajuster instantanément la puissance de l'arc.

#### ▪ **Transfert de métal**

Lorsque l'électrode est fusible et quelle que soit sa polarité, s'installe dans l'arc le phénomène naturel de transfert de métal par lequel l'extrémité de l'électrode en fusion se projette à grande vitesse ( $10^5$  mm/s) sur le joint à souder. C'est un phénomène fondamental auquel les procédés de soudage à l'arc doivent leur existence.

#### **3.1.3 Formation de la soudure :**

L'arc est donc la source de chaleur extérieure produisant, localement sur la pièce et indépendamment du transfert de métal, un flux de chaleur de valeur suffisante pour obtenir un gradient conduisant à la fusion et à la formation du *cordon de soudure*.

Le flux thermique moyen d'un arc de soudage est de l'ordre de 5 à 100 W/cm<sup>2</sup>.

Comme dans tous les procédés de soudage par fusion, chaque point du cordon a connu une séquence échauffement/fusion/refroidissement à laquelle se rapporte la métallurgie locale de la soudure et les caractéristiques mécaniques finalement obtenues.

La liaison métallique est obtenue par l'intermédiaire du métal provenant de l'électrode, ou métal déposé, et par l'intermédiaire également des deux zones attenantes, plus ou moins importantes, dans lesquelles le métal de l'électrode s'est dilué dans le métal de base.

La (figure. I.1) illustre les différents types de soudures formés par soudage à l'arc.

La technologie et l'économie des applications de soudage à l'arc font intervenir la disposition, la forme et les dimensions du (ou des) chanfrein(s) en fonction de la liaison à réaliser et des épaisseurs en cause (figure. I.2).

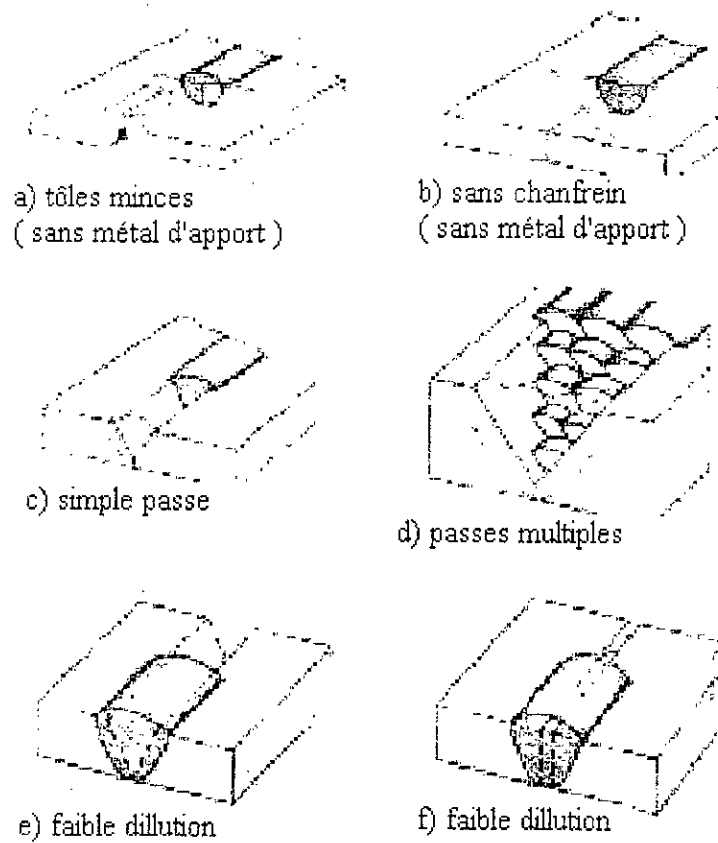


Fig.I.1 – soudage bout à bout .

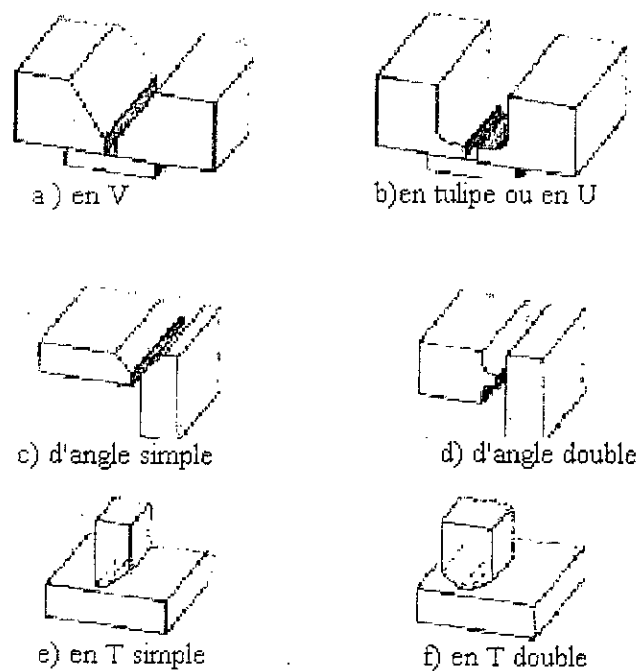


Fig.I.2– principe de la technique du chanfrein .

### 3.2 Les principaux procédés de soudage à l'arc :

L'apport de la chaleur utilisée pour former le bain de métal fondu est assuré ici par un arc électrique. Il est nécessaire de faciliter son amorçage et indispensable de le stabiliser. Pour ce faire on a recours :

- soit à des gaz ou des mélanges de gaz facilement ionisables ;
- soit à des composés fusibles et volatils (flux) placés, solides, au voisinage du plasma de l'arc.

Le choix de ces produits (gaz ou composés fusibles) se fait de telle sorte qu'ils puissent assurer aussi la protection du métal fondu. C'est ainsi que les composés fusibles devront former un laitier surnageant au-dessus de celui-ci (et éventuellement susceptible de réagir chimiquement avec lui pour l'affiner) tandis que les gaz seront souvent des gaz inertes (argon, hélium ou des mélanges additionnés parfois d'hydrogène) et parfois du dioxyde de carbone (dont la décomposition dans l'arc donnera du monoxyde de carbone protecteur et de l'oxygène qui sera fixé par des éléments introduits par les produits d'apport).

Dans ce cadre, de nombreux procédés ont été développés que l'on peut classer en fonction des conditions dans lesquelles jaillit l'arc entre les deux pièces à assembler ou entre ces dernières et une électrode .

#### a) procédés où l'arc jaillit entre les deux pièces à assembler :

On peut citer :

- ❖ le **soudage par pression à l'arc mû par un champ magnétique** : l'arc jaillit et se déplace entre les surfaces à assembler sous l'effet d'un champ magnétique piloté ; après fusion superficielle, les pièces à assembler sont pressées l'une contre l'autre (il y a donc formation d'un bourrelet) ;
- ❖ le **soudage à l'arc des goujons** : l'arc jaillit entre l'extrémité du goujon et la zone de la pièce support où il doit être implanté. Après création d'un bain de métal fondu à la surface de la pièce et fusion de l'extrémité du goujon, celle-ci est plongée dans le métal fondu et maintenue en position jusqu'à achèvement de la solidification ; la protection du métal fondu peut être assurée par un gaz ou par mise en place d'une bague réfractaire de confinement.

#### b) procédés où l'arc jaillit entre l'électrode et les pièces à assembler :

Ici, il faut distinguer les procédés qui font intervenir une électrode fusible de ceux qui font intervenir une électrode réfractaire (non fusible).

##### 1) Procédés mettant en œuvre une électrode fusible :

- ❖ Le **soudage à l'arc avec électrode enrobée** : l'électrode est constituée par :
  - une âme métallique qui assure la conduction du courant et sert de métal d'apport .
  - un revêtement adhérent appelé enrobage qui est constitué de composés qui vont concourir à la formation du laitier protecteur, d'autres produits qui vont se volatiliser dans le plasma d'arc et, éventuellement, de corps métalliques qui participeront à la formation du bain de métal fondu ; cet enrobage peut être :

- cellulosique
- rutile
- basique



❖ Le **soudage à l'arc avec fil fourré** : l'électrode est *un fil électrode fourré* constitué par une enveloppe métallique tubulaire remplie d'une poudre – flux – dont la composition et le rôle sont comparables à ceux de l'enrobage d'une électrode .

❖ Le **soudage à l'arc sous flux en poudre** : L'électrode est un fil plein. En aval de la torche (par rapport à la direction d'exécution de la soudure), une buse distribue le flux en poudre à l'intérieur duquel jaillira l'arc et dont la partie fondue constituera le laitier protecteur, l'ensemble restant recouvert d'une couche de flux non fondu. Il existe deux types de flux en poudre :

❖ Le **soudage à l'arc sous protection gazeuse avec fil électrode fusible** : l'électrode est un fil plein. Une arrivée annulaire du gaz assure la protection du métal fondu. Ce gaz peut être de deux types :

— **neutre** (argon avec, généralement, une petite proportion d'oxygène et mélangé parfois avec de l'hélium), le procédé est alors désigné à l'aide de la locution « **soudage MIG** » ;

— **actif** (dioxyde de carbone pratiquement pur ou mélangé à des gaz neutres) ; le métal du fil contient alors des éléments d'addition susceptibles de fixer l'oxygène libéré par la dissociation du dioxyde de carbone. Le procédé est alors désigné à l'aide de la locution « **soudage MAG** ».

Dans certain cas, en soudage MAG, il est possible de substituer un fil fourré au fil plein en bénéficiant alors de l'action métallurgique du flux sur le métal fondu et d'une double protection de ce dernier par le gaz et par le flux).

## 2) Procédés mettant en œuvre un électrode réfractaire :

L'électrode non consommable est constituée par une pointe de tungstène portée par une torche dotée d'une arrivée annulaire du gaz qui va assurer la protection du métal fondu. Ce gaz est neutre (argon). Le procédé est désigné à l'aide de la locution « **soudage TIG** ».

L'introduction éventuelle d'un métal d'apport peut être réalisée directement dans le bain de métal fondu soit sous forme de baguettes, soit sous forme de fil.

## 4. Cas du soudage à l'électrode enrobée : [4]

### 4.1 Description du procédé :

Le soudage à l'arc à l'électrode enrobée (**SAEE**) , appelé soudage manuel à l'arc, s'exécute d'une façon très simple, schématisée sur la (figure. I.3).

L'appareillage comporte une source de courant continu ou alternatif, une pince porte-électrode et l'électrode proprement dite, un câble de liaison et un câble de masse.

L'opérateur tient, en outre, un masque de protection contre le rayonnement lumineux intense de l'arc éblouissant et dangereux pour la vue. La source étant sous tension, l'arc s'amorce par contact électrode-pièce et produit instantanément la fusion de l'électrode, la production de vapeurs et la formation du cordon qui, après refroidissement, se présente comme indiqué sur la( figure. I.4), recouvert du laitier vitrifié dû à l'enrobage fondu .

La fusion de l'électrode et la formation progressive du cordon entraînent un réflexe d'approche de la main de l'opération conditionné par le maintien d'un arc stable.

Toutes les caractéristiques du procédé, à savoir son fonctionnement, sa mise en œuvre et les caractéristiques des soudures obtenues, reposent sur deux éléments fondamentaux :

— la *technologie des électrodes*;

—l'habileté de l'opérateur.

L'électrode enrobée constitue en effet le paramètre essentiel de ce procédé. Déterminée et construite en fonction du matériau à souder, elle impose, entre autres, la nature et l'intensité du courant que devra délivrer le générateur et est à l'origine des taux de dépôt, de la qualité des soudures, etc. Quant au soudeur, il contrôle la fusion du métal et la régularité du cordon, et doit avoir pour cela une formation professionnelle appropriée.

Le soudage à l'électrode enrobée s'applique particulièrement bien à toutes les formes d'assemblages en aciers au carbone, peu ou fortement alliés, et sous certaines conditions aux alliages d'aluminium et de cuivre.

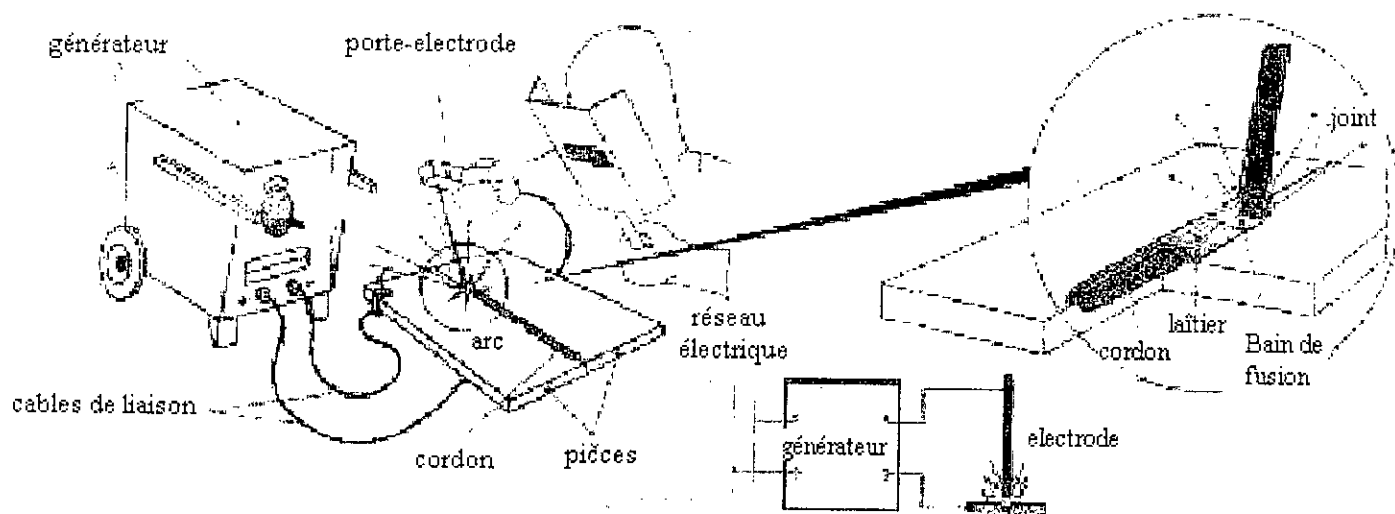


Fig. I.3 – soudage à l'électrode enrobée : principe

## 4.2 Caractéristiques de l'électrode :

Une électrode enrobée se présente sous la forme d'une baguette comportant une âme métallique conductrice et un enrobage composite généralement non conducteur (figure. I.5). L'électrode doit correspondre aux matériaux et aux épaisseurs à souder, mais également aux caractéristiques métallurgiques et mécaniques que l'on désire pour les soudures. C'est pourquoi il en existe un grand nombre de types différents finement répertoriés et normalisés (NF A 81-300).

### 4.2.1 L'âme métallique :

L'âme métallique conduit le courant, apporte le métal, forme le cordon et comporte des éléments d'alliages devant assurer une grande part des caractéristiques désirées de la soudure. Le métal de l'âme est en général très proche du métal de base à souder. La section est choisie en fonction du taux de dépôt désiré, lui-même fonction des épaisseurs en présence et de l'assemblage à réaliser. Elle détermine par suite le courant de soudage à utiliser. La longueur n'excède pas 400 à 500 mm, pour des raisons évidentes de fabrication et d'emploi.

## 2.2 L'enrobage :

L'enrobage est constitué par un mélange de corps très divers agglomérés autour de l'âme par un liant.

il existe une grande diversité d'enrobages dont l'élaboration relève souvent de secrets de fabrication. Les éléments les plus employés sont des minerais, silicates, carbonates, matières organiques, métaux en poudre, graphite, etc.

Différentes épaisseurs d'enrobage existent dans les normes :  $\phi$

minces, semi-épais et épais, respectivement  $< 140 \%$ ,  $140 \text{ à } 180 \%$  et  $> 180 \%$  du diamètre de l'âme.

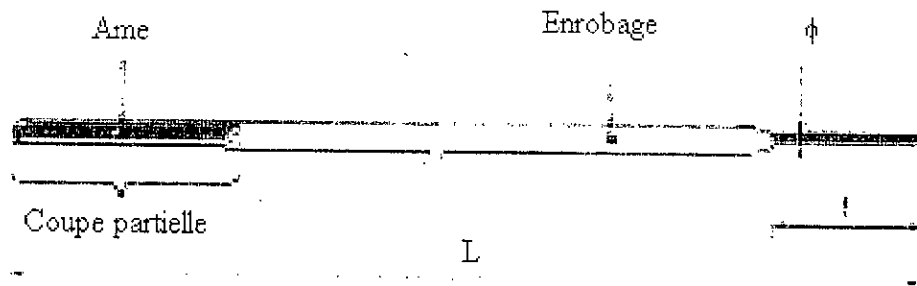


Fig. I.5 - caractéristiques d'une électrode enrobée.

### ▪ Types d'enrobage

Selon les réactions intervenant dans le bain de soudure, on ramène les différents types d'enrobage à cinq grandes classes qui, du fait de certains composants, présentent chacune des caractéristiques

majeures (NF A 81-300) et dont les plus importantes sont :

- **enrobage acide** (symbole  $A$  ou  $RA$ ) : réservé à des aciers de bonne soudabilité ;
- **enrobage basique** (symbole  $B$  ou  $RB$ ) : courant continu, laitier facile à détacher ;
- **enrobage cellulosique** (symbole  $C$  ou  $RC$ ) : forte pénétration, arc relativement instable, soudage en position, bonnes caractéristiques mécaniques des soudures ;
- **enrobage rutile** (symbole  $R$  et  $RR$ ) (le rutile est l'oxyde de titane  $TiO_2$ ) : stabilisation de l'arc en alternatif et en continu, pénétration moyenne, bonnes caractéristiques mécaniques des soudures ;
- **enrobage oxydant** (symbole  $O$ ) : stabilisation de l'arc en alternatif et en continu, faible pénétration, belle apparence du cordon, travaux courants.

Le symbole  $S$  est relatif aux enrobages spécifiques non répertoriés.

### ▪ Rôles de l'enrobage

#### • Rôle électrique

C'est le premier rôle essentiel de l'enrobage ; il permet d'amorcer l'arc et de le maintenir de façon stable par les vapeurs et divers dégagements gazeux qui y prennent place. Le potentiel d'ionisation des éléments dégagés définit directement, pour un courant donné, la tension d'arc. Selon la composition de l'enrobage, cette tension peut varier dans de larges limites comprises entre 4 et 30 V. Deux conséquences en résultent :

- la stabilité de l'arc et sa facilité d'amorçage et de réamorçage d'autant plus aisées que la tension d'arc est basse, grâce par exemple à des éléments tels que le potassium, le sodium aux potentiels d'ionisation très bas ;

- toutes choses égales par ailleurs, la puissance obtenue dans l'arc et par suite la fusion de l'électrode et la pénétration qui lui sont liées, d'autant meilleures que la tension est élevée.

En découleront les principales conditions d'utilisation :

- type de courant approprié (alternatif ou continu) ;
- tension d'amorçage (à vide) du générateur ;
- pénétration et taux de dépôt ;
- diversité d'emploi, etc.

#### ▪ Rôle métallurgique

L'enrobage doit, pour exercer son second rôle essentiel de protection pendant le soudage, émettre des vapeurs chassant l'air de la zone d'arc et posséder des qualités neutres, légèrement réductrices ou au pouvoir oxydant contrôlé.

Pendant et après la fusion, l'enrobage forme du laitier et surnage par sa faible densité au-dessus du bain jusqu'au refroidissement complet au cours duquel il se solidifie tout en conservant son action protectrice ; il doit être enlevé par piquage.

#### ▪ Rôle mécanique

Le laitier que forme l'enrobage a en outre un certain nombre d'autres effets purement mécaniques sur :

- le bombé du cordon ;
- la dilution et la pénétration par effet de creuset ;
- la possibilité de travailler en position par la viscosité et l'adhérence.

### 4.3 Domaines d'application :

Hormis quelques tentatives de mécanisation ou d'automatisation, le soudage à l'électrode enrobée est un procédé exclusivement manuel qui se rencontre en pratique dans tous les domaines industriels dont il satisfait les besoins à quelques réserves près. Il revêt en effet une *simplicité* et une *flexibilité* inégalées grâce à :

- un *équipement on ne peut plus simple* ;
- une *électrode enrobée* qui, sous une forme pratique et d'acquisition facile, véhicule le métal d'apport et la protection, et rassemble les paramètres métallurgiques, unique adaptation de ce procédé à la nature des travaux et des matériaux mis en œuvre, principalement les métaux ferreux.

Ces avantages sont à opposer aux inconvénients :

- d'un *fonctionnement cadencé* ;
- d'une *capacité et d'une productivité limitées*.

C'est ainsi qu'il s'impose :

- dans les travaux de soudage surtout lorsqu'ils sont très diversifiés : chaudronnerie générale, serrurerie, mécano soudure ;
- sur les chantiers : ponts, navires, pipelines, charpentes, etc., dans des travaux de nature hautement technique.

# Chapitre II

LES ACIERS INOXYDABLES

## Introduction :

Les aciers inoxydables sont caractérisés par la présence de chrome en quantité minimale de 11 à 12 % qui leur confère leur caractère lié essentiellement au fait que le chrome est très facilement oxydable à l'air ; cela entraîne la formation à la surface des pièces d'une couche dite passive composée d'oxydes durs et résistants qui fait ainsi écran en empêchant l'attaque du métal par les produits corrosifs au contact desquels il peut se trouver.

Il est important de bien se rappeler que tout fluide corrosif ou toute opération de fabrication susceptible de détruire cette couche passive entraînera inévitablement un risque important de destruction du métal sous-jacent.

## 1. Classification des aciers inoxydables :

### 1.1 Notions de base :

ces aciers contiennent tous du chrome. Le carbone et le nickel vont également influencer sur les qualités de ces aciers. Les autres additions qu'on peut rencontrer sont, dans tous les cas, du manganèse et du silicium et accessoirement de l'azote, du molybdène et du cuivre ; ces additions ne joueront que fort peu sur les caractères de base.

### 1.2 Diagramme fer-chrome :

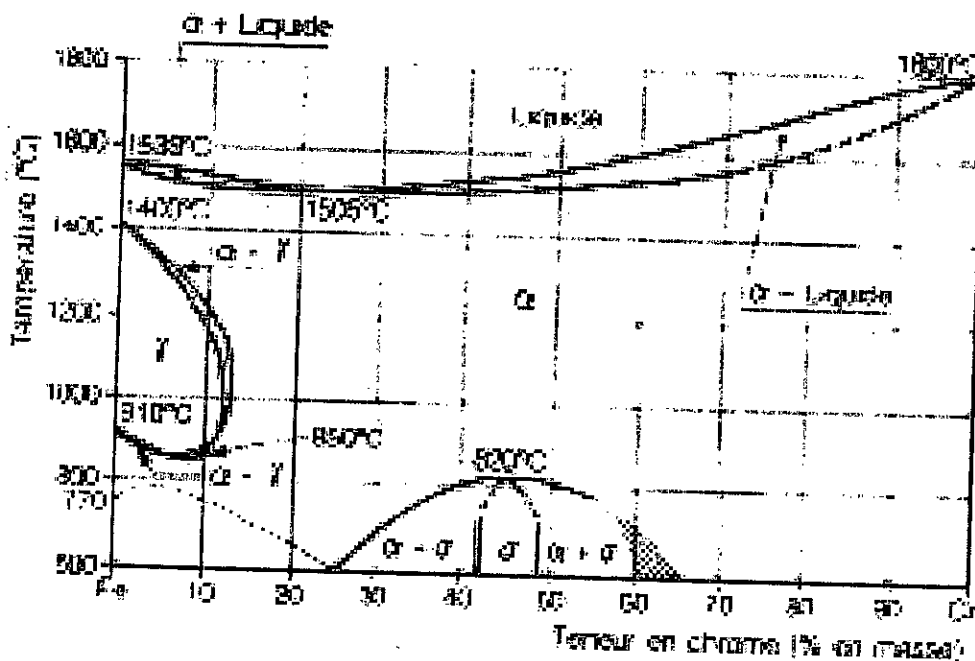


fig. II.1 diagramme des alliages fer-chrome : C < 0.01

Sur ce diagramme, représenté sur les figures I.1 et I.2, nous pouvons faire les remarques suivantes.

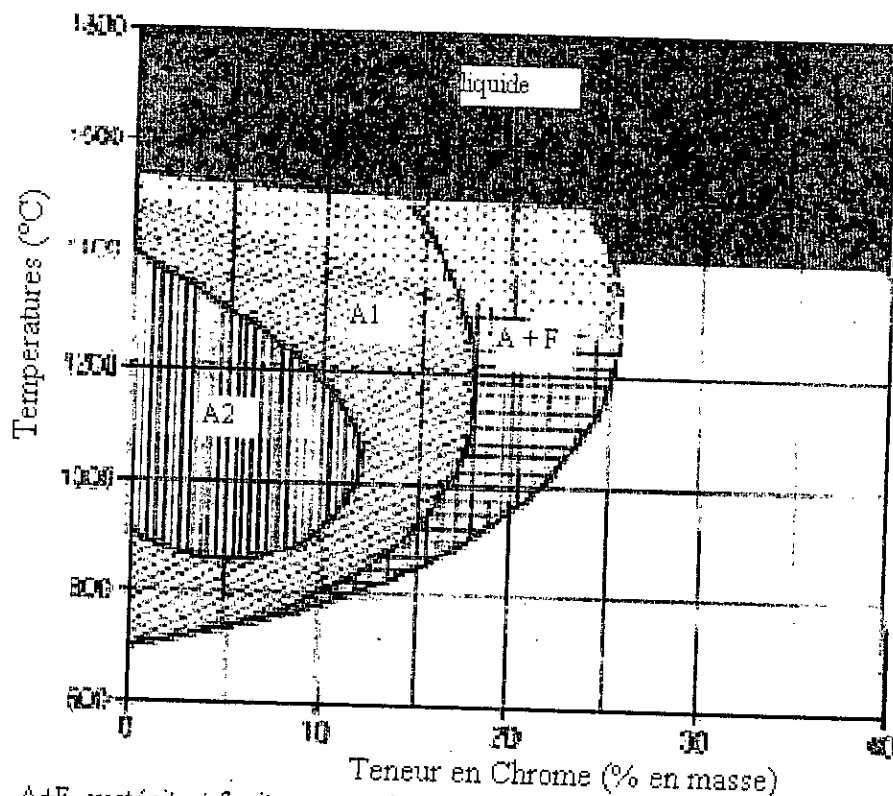
— Les aciers dont la droite de refroidissement traverse la boucle  $\gamma$  sont dits **martensitiques** ou **semi-ferritiques**, ils comportent des points de transformation.

— L'étendue de la boucle  $\gamma$  dépend essentiellement de la teneur en carbone :

- pour  $C = 0$ , l'acier est martensitique jusqu'à une teneur en chrome de 10,5 % environ ;
- pour  $C = 0,6$  %, l'acier est martensitique jusqu'à une teneur en chrome de 25,5 % environ.

— Au-delà de la boucle  $\gamma$ , l'acier est **ferritique**.

— À partir de 25 % de chrome et jusqu'à 65 à 70 %, des constituants fragiles peuvent se former au-dessous de 850 °C environ ; un de ces constituants fragiles est la phase  $\sigma$ .



A+F austénite + ferrite: zone a deux phases dans les alliages Fe-Cr-C (C=0.6%)

A1 austénite : boucle  $\gamma$  dans les alliages Fe-Cr-C (C=0.6%)

A2 austénite : boucle  $\gamma$  dans les alliages Fe-Cr (sans carbone)

Fig. II.2- influence du carbone dans les alliages fer-chrome

### 1.3 Influence du nickel :

Si le nickel est ajouté en quantités inférieures à 1 %, il n'a que peu d'incidence sur le comportement des aciers. Entre 1 et 6 %, ses effets n'offrent que peu d'intérêt, mais, au-delà de 6 % à 8 %, sa présence se traduit par un effet gammagène et l'acier devient austénitique à toutes les températures ; il ne comporte alors plus aucun point de transformation.

## 1.5 Classification :

L'étude des aciers inoxydables doit être partagée entre différentes familles dont chacune comprendra des aciers inoxydables de comportements voisins :

- aciers inoxydables ferritiques ;
- aciers inoxydables austénitiques.
- Aciers inoxydables martensitiques.
- Les aciers inoxydables austénitiques.

Nous étudierons en détail la famille des aciers inoxydables austénitiques en examinant successivement :

- la composition chimique de base et les additions ;
- les caractéristiques mécaniques ;
- le soudage ;

## 2. Cas des aciers inoxydables austénitiques :

### 2.1 Composition chimique et addition :

#### 2.1.1 Eléments de base :

Ce sont essentiellement le chrome et le nickel :

- le chrome doit être supérieur à 16 % pour assurer l'inoxidabilité ;
- le nickel doit être supérieur à 8 % pour obtenir la structure austénitique.

En outre, ces aciers contiennent tous :

- du carbone dont la teneur peut être classée en trois catégories :  
 $C < 0,030 \%$  : aciers dits à bas carbone,  
 $0,03 \% C < 0,08 \%$  : aciers dits à carbone moyen,  
 $C > 0,08 \%$  : aciers dits à carbone élevé ;
- du manganèse dans la limite maximale de 2 % sauf cas particuliers ;
- du silicium dans la limite maximale de 1 % sauf cas particuliers ;
- du soufre et du phosphore en tant qu'impuretés dans la limite maximale de 0,040 %.

#### 2.1.2 Additions diverses :

Ces diverses additions correspondent à la recherche d'un effet particulier et peuvent être un ou plusieurs de ceux définis ci-dessous.

##### a) Stabilisation du carbone,

pour éviter la formation de carbures de chrome lorsque la teneur en carbone dépasse 0,030 % et pour protéger l'acier contre le risque de corrosion intergranulaire :

- par addition de titane :

$$4 \text{ à } 5 C < Ti < 0,6 \%$$

- par addition de niobium plus tantale :

$$8 \text{ à } 10 C < Nb + Ta < 1,1 \%$$

##### b) Amélioration de la résistance à la corrosion en présence de certains fluides :

- par addition de molybdène dans la proportion, sauf cas particuliers, de 2 à 4 %, qui améliore la tenue à la corrosion en présence de produits halogènes ou d'acides réducteurs ;
- par addition de cuivre dans la proportion, sauf cas particuliers, de 1 à 2 % qui améliore la tenue à la corrosion en présence, par exemple, d'acide sulfurique ;



— par addition de silicium dans la proportion de 3 à 4 % qui améliore la tenue à la corrosion en présence d'acide nitrique très concentré (supérieur à 85 % en acide pur).

c) **Amélioration des caractéristiques mécaniques** par addition d'azote dans la proportion de 0,12 à 0,20 % ; en l'absence d'addition volontaire d'azote, les aciers austénitiques peuvent en contenir sous forme d'impuretés dans la limite maximale de 0,08 à 0,10 %.

**d) Amélioration des caractéristiques de fluage**

au-delà de 500° C par addition de bore dans la limite maximale de 0,004 5 % (la norme NF A 35-580 indique jusqu'à 0,006 0 %, mais il est préférable de se tenir en dessous).

**e) Recherche de conditions particulières :**

— *diminution des risques de fissuration au cours du soudage*, par addition de manganèse dans la proportion de 6 à 8 % dans les aciers de base et surtout dans les produits de soudage des nuances 25 Cr et 20 Ni et 18 Cr-8 Ni sans ou avec molybdène ;

— *en variante des nuances classiques* en remplaçant une partie du nickel par du manganèse dans la proportion de 6 à 10 %, la teneur en nickel se trouvant alors ramenée de 10 % à 5 à 8 % ;

— *renforcement de la tenue à l'oxydation aux hautes températures* par augmentation de la teneur en silicium jusqu'à environ 1,5 %.

**Remarque :**

ces variations importantes des compositions entraînent évidemment des différences de comportement en fabrication et en soudage, ce qui implique une classification pour l'étude de ces aciers.

**2.2 Caractères généraux des structures austénitiques :**

Les structures austénitiques ont des caractères très particuliers qu'il faut bien connaître pour déterminer les conditions optimales de mise en œuvre et de soudage.

a) La structure est entièrement austénitique à l'état de livraison après hypertrempe entre 1 025 et 1 150°C suivie d'un refroidissement rapide à l'air ou à l'eau ; la faible teneur en ferrite que l'on peut constater (entre 0 et 5 %) ne modifie absolument pas le comportement global. La structure est cubique à faces centrées, ce qui conduit à de fortes capacités de déformation.

b) Absence de point de transformation : il s'ensuit qu'il ne pourra y avoir de recristallisation (donc d'affinage des grains) que s'il y a eu, préalablement au traitement thermique, un écrouissage suffisant (au minimum 20 à 25 %). Cela veut également dire que si l'on traite thermiquement des pièces ou des ensembles inégalement écrouis, seules seront recristallisées les parties fortement écrouies (plus de 20 %) ; dans les autres parties ayant subi des écrouissages plus faibles, on constatera un grossissement du grain et, dans l'ensemble, les contraintes internes auront tendance à augmenter.

c) Possibilité d'apparition de ferrite à la suite d'effets thermiques différents de celui du traitement thermique d'hypertrempe ou tels que ceux provoqués par le formage à chaud ou le soudage : les phénomènes entraînant la formation de ferrite doivent être parfaitement contrôlés et maîtrisés car, pour certaines applications, il faut des taux de ferrite ultra-bas (<1%) ou pour d'autres, soit des taux de ferrite compris entre 5 et 8 %, soit des taux de ferrite inférieurs à 8 %.

d) La courbe de traction diffère de celle des aciers au carbone non alliés ou légèrement alliés ce qui confère à ces aciers un comportement très particulier .

e) Ces aciers ont un bon comportement aux basses et très basses températures(jusqu'à  $-269^{\circ}\text{C}$ , soit 4 K).

f) Ils ont une bonne stabilité aux températures élevées.

g) Leur coefficient de dilatation linéique est de l'ordre de  $1,6$  à  $1,8 \text{ mm}/(\text{m} \cdot 100^{\circ}\text{C})$  ou  $16 \times 10^{-6}$  à  $18 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  contre  $1,2 \text{ mm}/(\text{m} \cdot 100^{\circ}\text{C})$  ou  $12 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  pour les aciers ferritiques.

## 2.3 Caractéristiques mécaniques :

### 2.3.1 Caractéristiques de traction :

Le point le plus important découle de la forme particulière de la courbe de traction représentée sur figure II.3 : il n'y a plus de droite de proportionnalité *efforts/déformations* et on ne trouve plus de zone d'instabilité plastique permettant de définir avec précision la limite élastique de l'acier. On peut dire que ces aciers n'ont pas de limite élastique parfaitement définie ; il se produit donc un fluage, même à la température ambiante, et cela quel que soit l'effort exercé. En cas de maintien de la charge pendant un certain temps, on constate que la déformation par fluage s'arrête, il y a donc un **Effet de consolidation**.

Un examen approfondi de la figure II.3 montre, d'une part :

- la courbe de traction normale *OACR* d'un acier hypere trempé ;
- le module d'élasticité apparent, qui correspond au coefficient angulaire de la droite *OE*, de l'ordre de  $175\ 000$  à  $180\ 000 \text{ MPa}$  et donc plus faible que celui des aciers ferritiques.

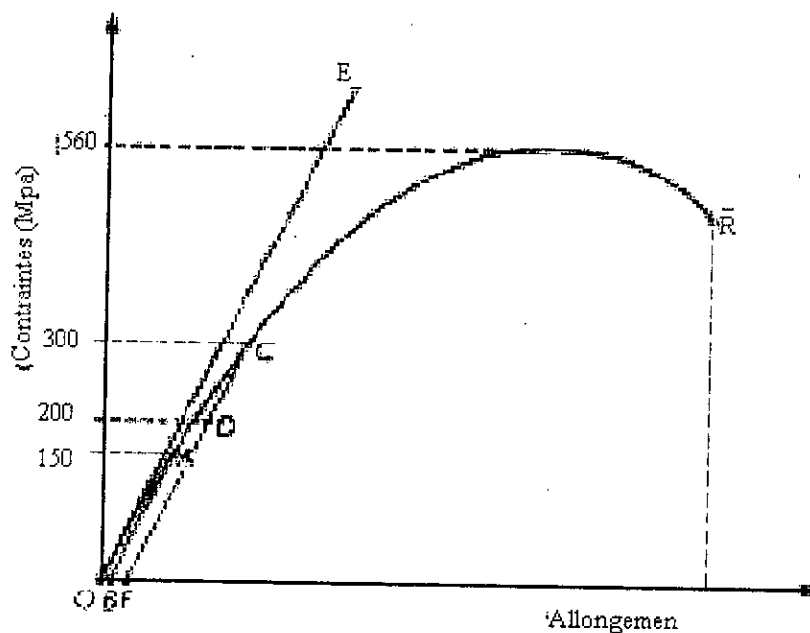


Fig. II.3 – courbe de traction pour un acier inoxydable austénitique.

D'autre part, en soumettant l'éprouvette à des successions de charge et de décharge, on constate :

- charge au niveau *A* : courbe *OA* ;
  - décharge au niveau *O* : droite *AB* ; il subsiste un allongement résiduel par fluage de valeur *OB* ;
  - charge au niveau *C* : courbe *BAC* ;
  - décharge au niveau *O* : droite *CF* ; il subsiste un nouvel allongement résiduel par fluage de valeur *BF* ;
  - charge au niveau *D* : droite *FD* ;
  - décharge au niveau *O* : droite *DF* ; il y a maintenant une véritable droite de proportionnalité *FC* et, par suite, une limite d'élasticité plus facilement mesurable.
- De ce qui précède, on peut tirer les enseignements suivants.

- Selon la précharge effectuée ou selon le degré d'écrouissage, le niveau de la limite élastique à 0,2 % est différent. Ce n'est pas une valeur fiable et il est donc préférable d'effectuer la détermination des épaisseurs en partant de la résistance à la rupture à la température de calcul.

Lorsque la température de calcul est très élevée (supérieure à 450 ou 500 °C), la vérification des épaisseurs doit être faite en partant des caractéristiques mécaniques en fluage.

- Dans la limite d'un écrouissage de 10 %, obtenu soit par l'utilisation de produits préécrouis, soit par mise sous pression hydraulique de l'appareil terminé, la résistance à la rupture n'est pas affectée et l'acier conserve toutes ses possibilités d'allongement et de déformation plastiques. On peut donc considérer une épreuve hydraulique comme une opération de stabilisation. En pratique, il n'y a que peu d'intérêt à dépasser 5 % d'écrouissage, lesquels peuvent être obtenus avec :

- 5 % de déformation par étirage ;
- 4,5 % de perte d'épaisseur par laminage ;
- 4,5 % de déformation dans une paroi cylindrique ;
- 2,5 % de déformation dans une paroi sphérique.

Quelques données numériques concernant les propriétés de l'acier inoxydable austénitiques  
304 L : [1]

Désignation de l'acier		Produit (1)	Epaisseur Max. (mm)	Limite d'élasticité min.		Résistance à la traction $R_m$ (N/mm <sup>2</sup> )	déformation à la rupture A (%)	Résistance à la corrosion intergranulaire	
				$R_{p0.2}$	$R_{p1.0}$			A l'état écroui	Après traitement de sensibilisation
symbolique	Numérique			(N/mm <sup>2</sup> )					
X2 Cr NI 18-9 (304 L)	1.4307	C	6	220	250	520 à 670	45	oui	oui
		H	12	200	240				
		P	75	200	240	500 à 650			

C ≙ bande laminée à froid.

H ≙ bande laminée à chaud.

P ≙ tôle laminée à chaud.

## 2.4 Classification des nuances d'aciers inoxydables austénitiques :

Dans cette famille, les variations de compositions chimiques sont telles que nous sommes conduits à les séparer en groupes plus faciles à étudier du point de vue de leurs qualités et de leurs applications.

Les différences de compositions se situent soit au niveau des teneurs des éléments constitutifs, soit au niveau des additions.

### 2.4.1 Groupe A. Aciers austénitiques utilisés en dehors du fluage en dessous de 400 à 500 °C

Ces aciers sont, en particulier, les nuances définies dans les normes NF A 35-573, NF A 35-574 et NF A 36-209.

Leurs principales applications sont :

- l'absence de pollution sur les produits contenus ;
- la tenue à la corrosion ;
- les basses et très basses températures.

Les fourchettes des compositions chimiques des nuances classées dans ce groupe sont données dans le tableau II.2.

composants	Teneurs (%)
Carbone :	
- acier à bas carbone .....	<0.03
- acier à moyen carbone.....	0.03 à 0.08
Chrome.....	16 à 18 ou à 20
Nickel.....	8 à 14 ou à 16
Manganèse.....	≈1.5 (2 maximum)
Silicium.....	0.5 à 0.7 (1maximum)

Les additions rencontrées sont :

- le titane ou le niobium plus tantale lorsque  $C > 0,03 \%$ , si l'on veut stabiliser l'acier en évitant la formation de carbures de chrome ;
- le molybdène, entre 2 et 4 % suivant les nuances, pour améliorer la tenue à la corrosion au contact de certains agents corrosifs (par exemple, fluides halogénés, acides réducteurs) ;
- l'azote, entre 0,12 et 0,20 %, pour améliorer les caractéristiques mécaniques.

#### **2.4.2 Groupe B. Aciers austénitiques résistant mécaniquement aux températures moyennement élevées :**

Ces aciers, employés à des températures supérieures à 400 ou 500 °C et jusqu'à 650 ou 750 °C, correspondent, en particulier, aux nuances définies par la norme NF A 35-580 et à quelques nuances de la norme NF A 36-209.

Leurs principales applications sont :

- le fonctionnement en condition de fluage, les caractéristiques mécaniques en fluage sont excellentes ;
- la bonne résistance à l'oxydation à des températures toutefois limitées à 700 ou 750 °C ;
- la bonne tenue à la corrosion pour les nuances stabilisées par une addition de titane ou de niobium plus tantale ; dans ces domaines de températures, les attaques corrosives sont surtout à craindre pendant les périodes de démarrage et d'arrêt des appareils et lorsque les températures sont inférieures à 300 ou 400°C.

Pour toutes les nuances de la norme NF A 35-580 citée plus haut, à l'exception cependant de la nuance Z 6 NCTDV 25-15 B qui constitue un cas particulier et pour laquelle il y a lieu de consulter les aciéristes, les fourchettes de composition sont données dans le tableau II.3 .

Constituants	Teneurs (%)
Carbone :	>0.03
Chrome	16 à 19
Nickel	11 à 14
Manganèse	≈1.5 (2 maximum)
silicium	0.5 à 0.7 (1maximum)

Les additions rencontrées sont :

- le titane ou niobium plus tantale, pour les mêmes raisons que dans le groupe A ;
- le molybdène pour des raisons de tenue à la corrosion comme dans le groupe A et pour améliorer le comportement aux températures élevées ;
- le bore pour améliorer les caractéristiques de fluage, mais sa teneur doit être limitée à 0,004 5 % ou 45 ppm (§ 5.1.2) pour éviter des risques de fissuration en soudage et pendant l'utilisation aux températures élevées ;
- le tungstène, ajouté dans une seule nuance, pour améliorer les caractéristiques mécaniques ; mais cette nuance n'a qu'une très médiocre résistance à la corrosion et ne doit être utilisée que pour des applications très particulières et en suivant les conseils des aciéristes.

#### **2.4.3 groupe C . aciers réfractaires pour températures élevées :**

La diversité des compositions chimiques est telle que pour les définir, nous sommes conduits à les diviser en trois sous-groupes.

Les principales applications sont à peu près communes pour ces sous-groupes qui ne représentent en fait que trois moyens permettant d'aboutir aux mêmes résultats.

Les nuances concernées présentent une bonne tenue à l'oxydation aux températures élevées pouvant aller jusqu'à 1 000 à 1100°C ; les caractéristiques de fluage sont peu élevées et le comportement en corrosion est généralement mauvais aux températures inférieures à 300 ou 400° C suivant la nuance. Dans ce groupe, se trouvent en particulier les nuances définies par la norme NF A 35-578 ; bien que cette norme ne le précise pas, dans tous les cas, la teneur en carbone doit être supérieure à 0,04 %.

#### **2.4.4 Groupe D. Aciers austénitiques résistant à des attaques corrosives sévères**

Ces nuances ont été spécialement élaborées pour résister à des attaques corrosives particulièrement sévères. Chaque nuance correspond à un ou plusieurs fluides corrosifs à des températures et des concentrations bien déterminées.

Étant donné la diversité des fluides pour lesquels ces nuances sont bien adaptées, il y a lieu de se reporter aux notices et conseils des aciéristes, aussi bien pour le choix de la nuance que pour les conditions particulières de mise en œuvre inhérentes à chacune des nuances.

# Chapitre III

ETUDE METALLURGIQUE

## 1. Effets du soudage sur le métal

La plupart des procédés de soudage entraînent le réchauffement puis le refroidissement du métal. Ces variations de température ont un impact sur la structure de la zone soudée du métal. Cette structure peut déterminer la dureté, la résistance, la résilience et la ductilité du métal. La zone la plus touchée lors du soudage est appelée « zone thermiquement affectée » (ZTA). Elle se situe entre le métal de base et le métal d'apport.

le soudage à l'arc électrique par fusion comporte quatre étapes importantes:

- 1. Le chauffage
- 2. La fusion
- 3. La solidification
- 4. Le refroidissement

La **solidification** est une étape importante du soudage, car elle détermine la structure de la zone fondue. Enfin, le **refroidissement** a lieu après la solidification complète de la zone fondue. Après la solidification, la température est encore assez élevée. Durant le refroidissement de la pièce, de nombreuses réactions chimiques se produisent autour du cordon de soudure.

Trois principaux facteurs déterminent les effets des opérations de soudage:

- la quantité de chaleur transférée à la pièce par le procédé de soudage;
- la vitesse de refroidissement du métal.
- les températures atteintes dans la zone touchée par la chaleur du soudage;

### 1.1 Transfert de chaleur

Le transfert de chaleur se produit lorsque l'arc électrique transforme l'énergie électrique en chaleur et en lumière. Une certaine quantité de chaleur est transmise au métal de base. La puissance de l'arc en watts, ou débit d'énergie, correspond au produit de l'intensité du courant (en ampères) et de la tension (en volts):

$$\text{puissance de l'arc (W)} = \text{courant (A)} \times \text{tension (V)}$$

Par exemple, un arc dans lequel circule un courant de 125 A sous une tension de 27 V produit 3375 W (3375 joules par seconde) en chaleur et en lumière.

La quantité d'énergie transférée à la pièce sous forme de chaleur dépend du coefficient de transmission thermique du procédé de soudage utilisé. Le tableau de la figure indique les coefficients de transmission thermique des principaux procédés de soudage. Ce coefficient peut être influencé par différents facteurs: technique utilisée, longueur de l'arc, etc.

**Coefficients de transmission thermique des procédés de soudage** (tableau- III.1)

Procédés de soudage	Coefficients de transmission de la chaleur dans la pièce (%)
Soudage à l'arc submergé (SAW)	90-99
Soudage à l'arc sous protection gazeuse avec électrode réfractaire de tungstène (TIG)	20-25
Soudage à l'arc avec fil fourré (FCAW)	65-85
Soudage à l'arc avec électrode enrobée (SAEE)	50-85



## 1.2 Vitesse de refroidissement

Lors du soudage, la chaleur de l'arc se transfère aux zones adjacentes à la soudure. La vitesse à laquelle se refroidit la zone de la soudure détermine sa microstructure.

**Un refroidissement très rapide peut provoquer la trempe de l'acier.**

La vitesse de refroidissement varie selon:

- la quantité d'énergie linéaire;
- l'épaisseur à souder;
- la température initiale du métal de base;
- la sévérité thermique.

Lorsque l'énergie linéaire est très élevée, le refroidissement s'effectue plus lentement. Toutefois, sur des plaques très épaisses, la vitesse de refroidissement augmente.

La vitesse de refroidissement dépend en partie du type de joint. Par exemple, un joint effectué en une seule passe de soudure n'offre qu'un seul « chemin » de refroidissement; il se refroidit donc plus lentement qu'un assemblage en T avec une soudure d'angle, qui offre trois « chemins » de refroidissement.

## 1.3 Température des zones atteintes

La zone fondue est la partie du joint dans laquelle le métal devient liquide pendant le soudage. Puisque la température du métal fondu est très élevée, la chaleur de la zone fondue se répand dans la région avoisinante et fait augmenter la température de celle-ci.

Selon la structure des grains du métal de base, on peut diviser en différentes régions la zone du métal atteinte par la chaleur du soudage.

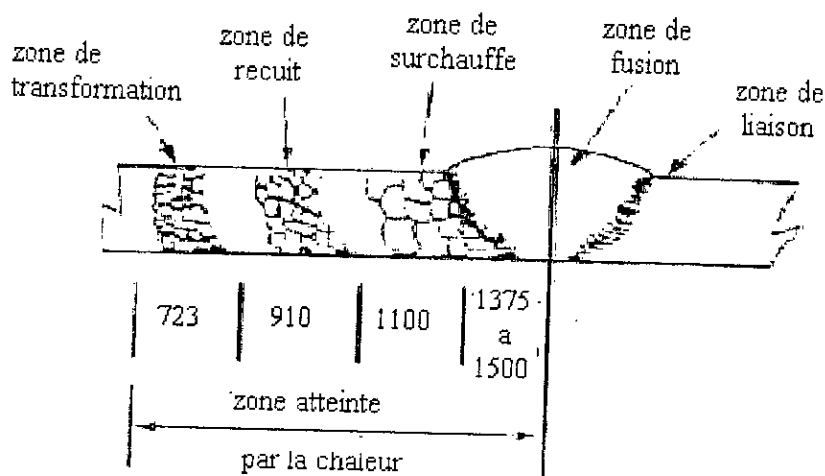


Fig. III.1- Différentes zones atteintes par la chaleur

**1.3.1 La zone de fusion** est la partie du joint de soudure dans laquelle le métal est venu en fusion et s'est solidifié après le soudage. Comme son nom l'indique, la zone de liaison est la région dans laquelle le métal de base et le métal d'apport se sont mélangés pendant la fusion.

**1.3.2 La zone de surchauffe** est la zone adjacente à la zone de fusion. Dans cette région, les grains de la structure subissent un grossissement exagéré sous l'effet de la température élevée (au-dessus d'environ 1100 °C).

**1.3.3 La zone de transformation** Dans la zone de transformation, l'acier peut se durcir sous l'effet d'un refroidissement rapide.

#### 1.4 Influence de la température sur les grains

Lors du soudage d'un cordon, la température maximale se situe au sommet du cycle thermique figure III.2. Plus on s'éloigne du centre de la soudure, plus la température diminue. La variation de température dépend du procédé de soudage et de l'épaisseur de la pièce. Le cycle thermique permet de prévoir l'étendue de la zone atteinte.

Les températures engendrées par le soudage influencent la grosseur des grains dans les différentes zones. Sur la figure Fig. III.3, on peut observer l'effet de la température sur la grosseur des grains d'une plaque d'acier au carbone à partir de la zone de fusion jusqu'à la zone non atteinte par la chaleur du soudage.

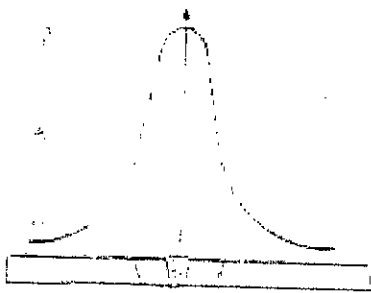


Fig. III.2 - Cycle thermique

Le cycle thermique présente la variation de température lors de l'exécution d'une soudure. Il permet de prévoir l'état de la structure selon la température qu'elle atteint.

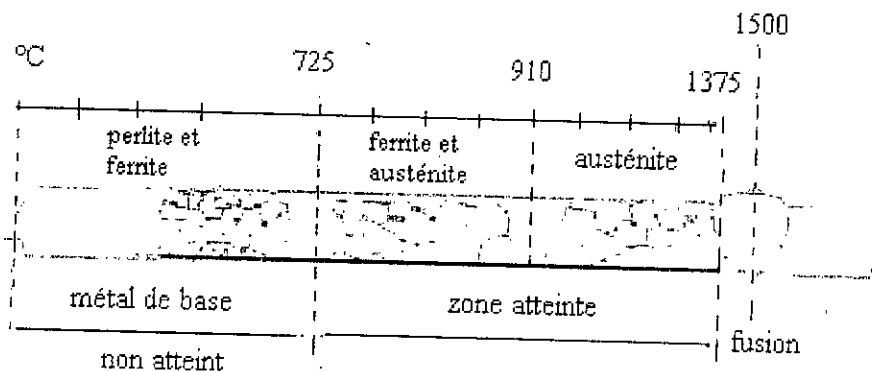


Fig. III.3 effet de la température sur le grossissement des grains.

près du joint de soudure, les grains sont gros; ce sont les grains caractéristiques de l'austénite. À mesure que la température diminue (en s'éloignant du joint de soudure), les grains rapetissent et se retrouvent sous forme de ferrite et d'austénite. Enfin, au-dessous de 723 °C, la structure de l'acier ne subit plus de transformation et ses grains sont sous forme de perlite et de ferrite.

D'une manière générale, les grains du métal rapetissent à mesure que la température diminue, puis leurs dimensions se stabilisent lorsque l'effet de la chaleur ne se fait plus sentir. Ces changements de structure sont influencés par:

- **le procédé de soudage.** Par exemple, le soudage oxyacétylénique produit une plus grande zone thermiquement atteinte que le soudage à l'arc électrique; puisque le métal demeure plus longtemps à l'état liquide, la chaleur a le temps de se diffuser plus lentement. En raison, du refroidissement rapide, le soudage à l'arc électrique risque davantage de provoquer la trempe de l'acier;
- **la méthode de soudage.** La méthode de soudage peut contribuer à diminuer le durcissement du métal soudé. Par exemple, en utilisant plusieurs petites passes de soudure, on peut ralentir la vitesse de refroidissement globale du métal et prévenir la trempe de l'acier. Dans ce cas, chaque passe a pour effet de maintenir la chaleur de la précédente, ralentissant ainsi le refroidissement. Ces passes successives modifient la zone de surchauffe. Elles permettent de rendre la structure plus homogène;
- **les propriétés physiques du métal.** Chaque métal possède des caractéristiques, qui influencent les effets du soudage sur sa structure.
- **l'épaisseur à souder.** L'étendue de la zone thermiquement atteinte dépend de l'épaisseur des plaques à souder. Plus les plaques sont minces, plus la zone thermiquement atteinte est grande. En outre, l'épaisseur des plaques détermine également la vitesse de refroidissement: plus les plaques sont épaisses, plus la vitesse de refroidissement est rapide.

### Résumé

Plus un acier contient de carbone, plus grande est sa dureté.

Plus la vitesse de refroidissement est élevée, plus le changement de structure de l'acier s'effectue rapidement, entraînant une plus grande dureté et des grains plus fins.

Trois facteurs déterminent les effets du procédé de soudage utilisé:

- la quantité de chaleur transférée à la pièce par le procédé de soudage;
- les températures atteintes dans la zone touchée par la chaleur du soudage;
- la vitesse de refroidissement du métal.

L'énergie linéaire dépend de la puissance de l'arc et de la vitesse d'avance. Plus l'énergie linéaire est élevée, plus le bain de fusion est gros, plus la zone thermiquement atteinte est grande et plus basse est la vitesse de refroidissement.

La vitesse de refroidissement dépend de:

- la quantité d'énergie linéaire;
- l'épaisseur à souder;
- la température initiale du métal de base;

## 2 Soudabilité des métaux ferreux

Chaque métal possède une soudabilité spécifique qui détermine la procédure de soudage à utiliser. Cette procédure doit tenir compte des principaux risques de défauts de soudage, du procédé de soudage ainsi que du métal d'apport utilisés.

### 2.1 Soudabilité de l'acier

L'acier est le matériau le plus utilisé en soudage. En général, on le considère assez facile à souder. Cependant, le soudage de l'acier est susceptible de causer les défauts suivants:

- soufflures;
- rigidité de l'assemblage;
- Inclusions.

## 2.2 Les principaux facteurs qui influencent la soudabilité des aciers sont:

- la trempabilité;
- le carbone équivalent;
- le préchauffage;
- les phénomènes de fissuration.

### 2.2.1 Trempabilité

La trempabilité est le principal facteur influençant la soudabilité des aciers. la trempabilité est la propriété qu'a l'acier de durcir par transformation martensitique lors d'un refroidissement rapide. Plus le refroidissement est rapide, plus la dureté augmente. La trempée contribue à accroître la fragilité de la pièce, augmentant par là fait même les risques de fissures.

### 2.2.2 Carbone équivalent

Le carbone équivalent est le rapport entre le carbone et les autres éléments d'alliage qui déterminent la soudabilité de l'acier. Le carbone constitue l'élément qui augmente le plus la trempabilité de l'acier; les autres éléments présents dans l'acier l'augmentent aussi mais de façon moindre. On détermine l'effet du carbone et des éléments d'alliage sur la trempabilité de l'acier en appliquant la formule suivante:

$$\text{Carbone équivalent} = \%C + \frac{\text{Mn} + \text{Si} + \text{Cr}}{6} + \frac{\text{Mo} + \text{V}}{5} + \frac{\text{Ni} + \text{Cu}}{15}$$

dans laquelle

- C = carbone
- Mn = manganèse
- Si = silicium
- Mo = molybdène
- V = vanadium
- Ni = nickel
- Cu = cuivre

Plus la valeur du carbone équivalent est élevée, plus l'acier est trempable; les risques de fissuration à froid dans la zone atteinte sont d'autant plus élevés. Le tableau indique le rapport entre le carbone équivalent de l'acier et sa soudabilité.

**Influence du carbone équivalent sur la soudabilité de l'acier** (tableau III.2)

Carbone équivalent	Indice de soudabilité	Types d'électrodes	Préchauffage
< 0,40	Excellent	Tous les types	Aucun
0,40-0,50	Bon	Basiques Autres	Aucun De 100 à 300 °C
0,50-0,60	Moyen	Basiques Autres	De 100 à 300 °C De 200 à 400 °C
0,60-0,70	Médiocre	Basiques	De 300 à 400 °C
> 0,70	Mauvais	Non soudable	

### 2.2.3 Le Préchauffage

Le préchauffage a pour effet de diminuer la vitesse de refroidissement. En effet, plus la température initiale des pièces est élevée, plus le refroidissement est lent. Le préchauffage sert aussi à éliminer l'humidité de la surface des pièces, diminuant ainsi les risques d'absorption d'hydrogène par le bain de fusion.

### 2.2.4 Fissuration

Les fissures se produisent lors de la solidification du métal. En soudage, on distingue deux phénomènes de fissuration: la fissuration à chaud et la fissuration à froid.

La **fissuration à chaud** se produit lors de la solidification du métal d'apport, lorsque des variations de la vitesse de refroidissement causent des fissures à la jonction des grains du métal d'apport et du bain de fusion. Des impuretés dans le métal de base comme le (soufre) favorisent l'apparition de ce type de fissures.

les risques de fissuration à chaud peuvent être réduits en utilisant une bonne technique et en réglant les paramètres de soudage. On peut également privilégier les aciers à faible teneur en carbone ayant un bon degré de pureté, par exemple les aciers au manganèse, et s'assurer que les surfaces à souder sont exemptes de contaminant. Les procédés de soudage utilisant une haute tension électrique et une vitesse d'avance rapide risquent davantage de causer la fissuration à chaud.

La **fissuration à froid** se produit dans le cordon de soudure. Elle est causée par l'hydrogène coincé dans la soudure. Ces fissures surviennent à la température ambiante et peuvent apparaître plusieurs minutes ou plusieurs heures après le soudage. On trouve fréquemment ce type de fissuration dans les pièces d'acier à forte teneur en carbone et les pièces d'acier faiblement allié.

### 2.3 Soudabilité des aciers inoxydables

D'une manière générale, on recommande de suivre les consignes suivantes lors du soudage des aciers inoxydables:

- Appliquer les mêmes techniques de soudage que celles utilisées pour l'acier doux.
- Utiliser la polarité inversée (électrode branchée à la borne positive et la pièce, à la borne négative).
- Choisir le type d'électrode en fonction de l'alliage à souder.
- Souder l'acier inoxydable avec une intensité de 15 à 20 fois inférieure à celle indiquée pour l'acier au carbone, car son point de fusion est plus bas.
- Souder avec un léger mouvement oscillatoire.
- Lorsque l'épaisseur du métal excède 6,4 mm, exécuter la soudure en deux passes.
- Pour diminuer les déformations, utiliser l'une des méthodes préventives suivantes:
  - assemblage précis;
  - gabarit;
  - serres;
  - barre de refroidissement (il est possible d'accélérer le refroidissement et de dissiper l'excès de chaleur en disposant des barres en aluminium ou en cuivre sur la surface de chaque côté du joint);
  - disposition des passes;
  - nombre de passes;
  - grosseur des passes;
  - soudage à rebours (pas de pèlerin);
  - fixation ferme des tôles minces pour les empêcher de gondoler.

#### 2.3.1 Principales propriétés physiques

Comparativement aux aciers au carbone, les principales propriétés physiques qui influencent la soudabilité des aciers inoxydables sont:

- un point de fusion plus bas;
- une conductibilité thermique plus faible;
- une résistance électrique plus élevée.

Puisque la température de fusion et la conductibilité thermique des aciers inoxydables sont plus faibles, il faut moins d'énergie pour les souder que pour souder les aciers au carbone.

#### 2.3.2 Soudabilité des aciers inoxydables austénitiques

Les aciers austénitiques contiennent entre 14 et 30 % de chrome et de 6 à 36 % de nickel. Ces aciers inoxydables sont ductiles, résistants aux chocs. Ils ne se trempent pas, mais peuvent acquérir une certaine dureté par usinage à froid. La teneur en nickel permet de conserver la structure austénitique de l'acier. De plus, le nickel accroît la résistance à la corrosion.

Les principales caractéristiques influençant la soudabilité des aciers austénitiques sont les suivantes:

- coefficient de dilatation d'environ une à une fois et demie supérieur à celui de l'acier au carbone;
- conductibilité thermique deux fois plus faible que celle de l'acier doux (intensité de courant plus basse);
- résistance électrique environ six fois plus élevée que celle de l'acier doux;
- point de fusion inférieur à celui de l'acier doux;
- tendance à subir des précipitations de carbures de chrome lors de leur refroidissement (aciers des types 301 à 304, 308 à 310, 316 à 318, 321, 330 et 347).

### 2.3.3 Procédés de soudage utilisés pour souder les aciers inoxydables

Plusieurs procédés de soudage permettent de souder les aciers inoxydables:

- soudage à l'arc électrique avec électrode enrobée (SAEE);
- soudage à l'arc sous protection gazeuse (GMAW);
- soudage sous protection gazeuse avec électrode réfractaire (TIG);
- soudage à l'arc submergé (SAW);
- soudage par résistance (RSW);
- brasage;
- soudage à l'arc électrique avec fil fourré (FCAW).

#### Cas du SAEE

On utilise couramment le procédé SAEE pour souder l'acier inoxydable. Le choix de l'électrode est basé sur la composition de l'alliage à souder. Généralement, la composition de l'électrode doit correspondre à celle du métal de base. Le tableau de la figure 2.41 détaille la composition chimique des dépôts laissés par certaines électrodes.

(tableau. III.3) Analyse chimique du dépôt des électrodes

Électrode	C %	Cr %	Ni %	Mo %	Mn %	Si %
E308	0.08	19.5	10.5	-	2.5	0.9
E308L	0.04	19.5	10.5	-	2.5	0.9
E309	0.015	23.5	13.5	-	2.5	0.9
E316	0.08	18.5	12.5	2.5	2.5	0.9
E316L	0.04	18.5	12.5	2.5	2.5	0.9

Lors du soudage de l'acier à l'arc électrique avec électrode enrobée, il est recommandé de suivre les recommandations suivantes:

- Maintenir un arc court en évitant de toucher le bain de fusion.
- Enlever le laitier entre les passes.
- Éliminer l'humidité et les impuretés: utiliser une brosse en acier inoxydable pour éviter toute contamination.
- Employer une intensité inférieure à celle utilisée pour le soudage des aciers au carbone.

# Chapitre IV

Comportement Mécanique  
des Matériaux



## Introduction :

Les propriétés mécaniques des aciers sont mesurés à l'aide de divers essais (traction, rupture, par choc, mécanique de la rupture, fatigue..) qui permettent de connaître les niveaux atteints par les caractéristiques de :

- Résistance statique ;
- Ductilité ;
- Résistance au chocs ;
- Ténacité ;
- Endurance ;

Dans le cas de notre projet nous allons nous intéresser aux propriétés découlant de l'essai de traction , et cela du point de vue caractéristiques mécaniques.

### 1. Essai de traction :

les essais classiques de caractérisation se font essentiellement en traction ou en traction-compression simples à température constante. C'est donc sur eux qu'est fondée la classification et la détermination des comportements des solides.

Il permet de déterminer les caractéristiques fondamentales des matériaux : limite d'élasticité, charge de rupture, allongement de rupture notamment.

Il consiste à soumettre une éprouvette à une sollicitation axiale (force ou déplacement) qui engendre un état de contrainte ou de déformation uniforme dans tout le volume utile.

L'état uni axial est défini par un état unidimensionnel en contrainte mais bidimensionnel en déformation .

$$\underline{\underline{\sigma}} = \begin{bmatrix} \sigma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{IV.1})$$

et

$$\underline{\underline{\varepsilon}} = \begin{bmatrix} \varepsilon & 0 & 0 \\ 0 & -\nu\varepsilon & 0 \\ 0 & 0 & -\nu\varepsilon \end{bmatrix} \quad (\text{IV.2})$$

où  $\nu$  est le coefficient de Poisson

## 1.1 Choix et préparation des éprouvettes :

les formes et les dimensions de l'éprouvette sont précisés par la norme **NF A 03- 151**

la section utile de l'éprouvette peut être circulaire carrée ,rectangulaire ,etc. .

la norme EN 10002-1 spécifie la méthode d'essai de traction des matériaux métalliques et définit les propriétés mécaniques qu'elle permet de déterminer, à la température ambiante.

NB : pour les assemblages soudés une norme spéciale pour la forme et les dimensions des éprouvettes est utilisée c'est la norme NF A 89-200. Et c'est cette norme que nous avons utilisée.

## 1.2 Diagramme de traction :

### 1.2.1 Grandeurs mesurées :

l'essai de traction fournit un diagramme donnant la force appliquée à l'éprouvette en fonction de sa déformation (figure. IV.1) et cela d'habitude pour une traverse constante .

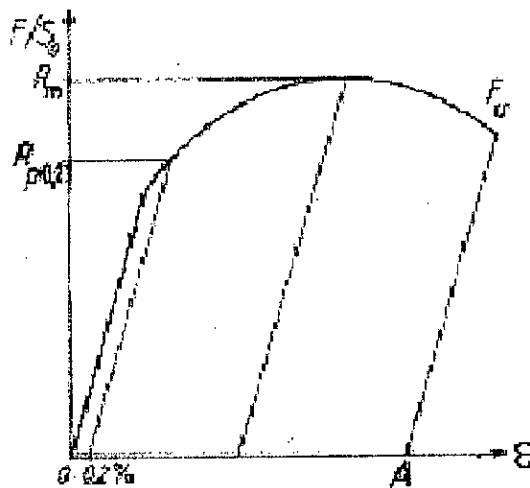


Fig .IV.1 – courbe de traction.

dans le cas général on observe :

- une partie rectiligne correspondant au domaine d'élasticité ;
- le domaine de déformation plastique uniforme ;
- un maximum correspondant à la charge maximale supportée par l'éprouvette ,appelée charge de rupture ;
- le domaine de striction dans lequel les déformations se localisent dans une zone limitée dont la section diminue rapidement ;
- et finalement la rupture de l'éprouvette .

la norme EN 10002-1 fournit les définitions des caractéristiques mécaniques que permet de déterminer l'essai de traction ..

- l'allongement rémanent après rupture est la variation de la longueur entre repères  $L_u-L_0$  mesurée après rupture de l'éprouvette en rapprochant soigneusement les deux fragments ( $L_u$  est la longueur entre repères après rupture de l'éprouvette).

$$\Delta L_u = L_u - L_0 \quad (IV.3)$$

- déformation après rupture  $A$  est l'allongement rémanent de la longueur entre repères après rupture  $L_u-L_0$ , exprimé en pourcentage de la longueur initiale entre repères  $L_0$ :

$$A = 100 \frac{L_u - L_0}{L_0} \quad (IV.4)$$

- La striction est la réduction localisée des dimensions transversales de l'éprouvette qui se produit au cours de l'essai. la section après rupture  $S_u$  est l'aire de la section minimale après reconstitution de l'éprouvette. le coefficient de striction  $Z$  est le rapport de la variation de section transversale  $S_0 - S_u$  à la section initiale  $S_0$ :

$$Z = 100 \frac{S_0 - S_u}{S_0} \quad (IV.5)$$

- La résistance à la traction  $R_m$  est la charge unitaire qui correspond à la charge maximale que peut supporter l'éprouvette :

$$R_m = F_m / S_0 \quad (IV.6)$$

- La charge unitaire à la limite apparente d'élasticité, s'appelle aussi limite apparente d'élasticité  $R_e$ . elle correspond à la charge  $F_e$  pour laquelle, pour la première fois, l'allongement de l'éprouvette continue à augmenter sans que la charge augmente, ou diminue :

$$R_e = F_e / S_0 \quad (IV.7)$$

- La limite supérieure d'écoulement  $R_{eH}$  est la valeur de la charge unitaire au moment où l'on observe effectivement une chute de l'effort (succédant immédiatement au domaine d'élasticité) (figure IV.2).
- La limite inférieure d'écoulement  $R_{eL}$  est la plus faible valeur de la charge unitaire pendant l'écoulement plastique (figure IV.2).

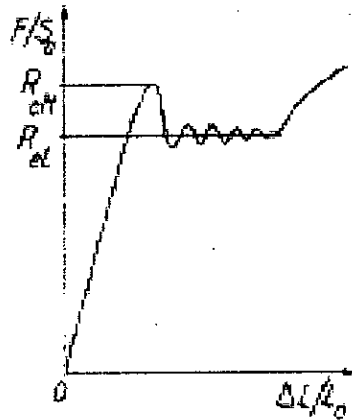


figure. IV.2 – limites supérieures et inférieures d'écoulement.

- La charge unitaire à limite de déformation rémanent ( $R_r$ ) : est celle à laquelle, correspond après suppression de la charge, une déformation rémanente prescrite, souvent 0.2 % (figure IV.3) ; on écrit alors  $Rr_{0.2}$  .

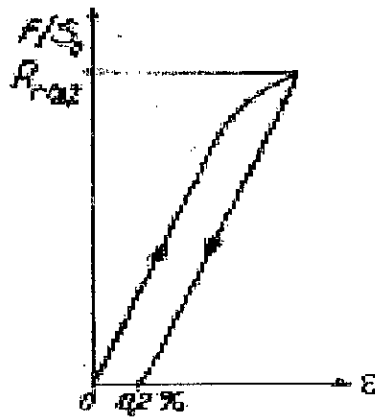


Fig. IV.3- charge unitaire à la limite de déformation rémanente.

- la limite conventionnelle d'élasticité ( $R_p$ ) : est la charge à la quelle correspond un allongement non proportionnel égal à un pourcentage prescrit de la longueur initiale entre repères  $L_0$  . Le symbole utilisé est suivi d'un indice désignant le pourcentage prescrit souvent 0.2% (figureIV.1) ; on écrit alors  $Rp_{0.2}$  .

## 1.2.2 Allongement rationnel : [4]

### Diagramme rationnel

#### Définition :

Le diagramme rationnel est une représentation de la courbe de traction avec en ordonnée la contrainte vraie , et en abscisse la déformation rationnelle .

**Contrainte vraie  $\sigma$**  : tient compte de la variation de la section au cours de l'essai , et est égale à la charge rapportée à la section instantanée .

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (\text{IV.8})$$

En admettant que le volume de la partie calibrée de l'éprouvette reste constant , on a :

$$S_0 L_0 = S L = S(L_0 + \Delta L) ; \quad (\text{IV.9})$$

$$S = \frac{S_0}{1 + \frac{\Delta L}{L_0}} \quad (\text{IV.10})$$

$$\text{d'où } \sigma = \frac{F}{S_0} (1+e) \quad (\text{IV.11})$$

**Déformation rationnelle  $\varepsilon$**  : l'allongement instantané est égal à  $\Delta L / L$  , et au même instant l'allongement depuis le début de l'essai est en considérant des allongements infiniment petits  $dL$  :

$$\varepsilon = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \ln \frac{L}{L_0} = \ln \left( \frac{L_0 + \Delta L}{L_0} \right) \quad (\text{IV.12})$$

$$\Rightarrow \varepsilon = \ln \frac{1}{L_0} = \ln (1+e) \quad (\text{IV.13})$$

$$d\varepsilon = \frac{dL}{L} = \frac{de}{1+e} \quad (\text{IV.14})$$

L'avantage de cette définition est la **propriété d'additivité** , utile pour le calcul de la plasticité.

La différence entre  $e$  et  $\varepsilon$  devient importante au-delà de 20 % de déformation comme le montre le tableau suivant :

e	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
$\varepsilon$	0.095	0.182	0.262	0.336	0.405

La courbe  $(\sigma, \epsilon)$  est le diagramme rationnel de traction. *il se déduit du diagramme conventionnel* (fig. IV.1).

On constate qu'il n'y a pas de différence avec le tracé conventionnel pour la partie élastique car les déformations élastiques sont très faibles. Dans le domaine de déformation plastique homogène, la courbe prend une allure parabolique.

Dans la zone de striction, il faut tenir compte de l'effet de concentration de contrainte (variation rapide de la striction).

On peut aussi tirer des relations entre la déformation rationnelle et le coefficient de striction  $Z$  :

$$\frac{L}{L_0} = 1 + A = \frac{S_0}{S} = \frac{1}{1 - Z} \quad (\text{IV.17})$$

il existe aussi ce que l'on appelle la déformation répartie  $A_R$  qui est celle que l'on mesure au maximum de la charge au moment où se déclenche la striction. Cette déformation répartie est aussi reliée à la variation de section  $Z_R$  du fût de l'éprouvette qui n'a pas subi la striction :

$$1 + A_R = \frac{1}{1 - Z_R} \quad (\text{IV.18})$$

# partie II : procédures expérimentales.

# chapitre V

SOUDEGE DU TUBE  
REALISATION DES ESSAIS



## 1. Soudage du tube

### 1.1 Choix du métal d'apport :

Nous appelons produit d'apport l'ensemble du couple fil plus enrobage ou du couple fil plus flux solide. Ce choix doit viser à obtenir un métal déposé (combinaison apport plus flux plus métal de base) dont la composition chimique et le comportement seront le plus voisins possible de ceux des métaux de base.

Pour assembler entre eux des aciers austénitiques de la même nuance, les produits d'apport doivent être de la même nuance.

Les fils d'apport ou les couples fil/ flux ont une teneur en chrome supérieure de 1 à 2 % à celle de l'acier à assembler, cette différence compense les pertes à la fusion.

L'électrode utilisée pour souder l'acier 304L comme a été donné au chapitre 1 de la première partie est : le 308L ou le 347 et sans préchauffage

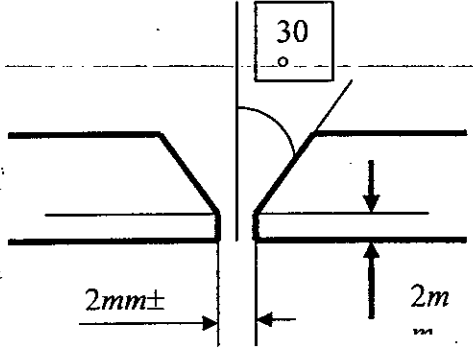
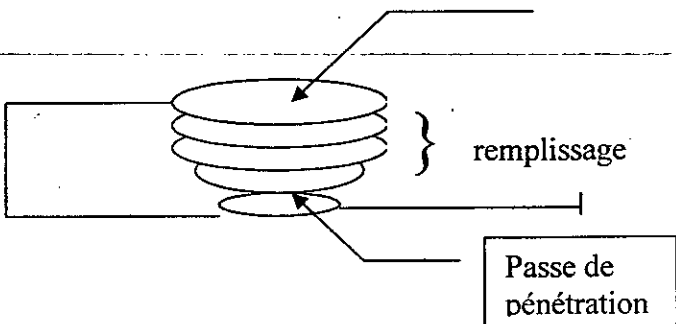
### 1.2 Choix du procédé de soudage :

pour souder les tubes les procédés de soudage utilisés sont en général les procédés de soudage à l'arc .

Le tube a été soudé en 06 passes utilisant le procédé à l'arc à l'électrode enrobée (SAEE).

En augmentant de diamètre de l'électrode plus on se rapproche du diamètre extérieur vue que l'espace à remplir augmente.

### 1.3 L'élaboration de la fiche technique du soudage :

Centre de recherche " CSC "		ATELIER : soudo-mécanique.			
Date : 01 / 08 /2002		Règle / code : NF EN 288-3			
Nuance : 304 L		Epaisseur pièce : De /			
Procédé de soudage : ARC AVEC ELECTRODE « SMAW ».					
Schéma de préparation :			disposition des passes :		
					
Soudure ;préparation des bords		Oxycoupage /meulage			
Nombre de passes		6			
Procédé de soudage		ARC			
Méthode d'exécution (manuel/auto)		MANUEL			
Position de soudage		PLAT			
Produit d'apport :fil ou électrode		ELECTRODE			
Type d'enrobage		RUTILE – ACIDE			
Désignation		SMAW			
Spécification		ACIER INOX			
Classification		E 308L-16 ;E308L-17			
Nom du fabricant		ESAB			
Chanfrein en		V à 60°±5°			
Dimension de l'éprouvette		110.60.10			
Composition chimique	C%	Si%	Mn%	Cr%	Ni%
Métal d'apport	≤0.03	0.8	0.8	19.5	10

• **CARECTERISTIQUES DE SOUDAGE :**

N° passes	procédure	Métal d'apport Type (AXS)	Diamètre de baguette	N° de baguette	Type de courant	Intensité (A)	Tension de soudage
01-03	SMAW	A5.4	2.5	3.5	Continu(+)	80-130	30
04-06	SMAW	A5.4	3.25	3	Continu(+)	100-120	32

• **LES CONTROLES DE SOUDAGE :**

Ecrouissage de la soudure : <b>NON</b>			
Redressage de la pièce : <b>NON</b>			
Bridage de l'assemblage de la soudure : <b>NON</b>			
Température mini de préchauffage (C°) : <b>NEANT</b>			
Température de postchauffage (C°) : <b>NEANT</b>			
Température max. entre les passes : <b>150° - 200C°</b> .			
Traitement thermique après soudage : <b>NON</b>			
CONTROLE REALISE	VISUEL	RADIOGRAPHIE	ULTRASONS
2 FACES	100%	100%	100%

**1.4 préparatifs avants soudage:**

la procédure de soudage nécessite des préparatifs en vue de réaliser une soudure saine et de qualité .A cet effet les opérations suivantes ont été respectées :

1. nettoyage des bords à souder : on a procédé à l'enlèvement de l'humidité ainsi que les huiles et graisses provenant de l'opération d'usinage à l'aide d'un solvant approprié .ces dernières sont susceptibles d'entraîner une carburation du métal fondu et des zones voisines.
2. pointage des tubes à souder : la fixation des bords des tubes à souder a été faite par la réalisation de points de soudures distants et répartis tout le long des périmètres des tubes.
3. réalisation de la protection à l'envers : il est bien évident que s'il y'à risque d'oxydation du bain de fusion par l'air du côté de soudage, il y'a aussi risque d'oxydation à l'envers du cordon de soudure .pour cela ,on a couvert les extrémités du tube à l'aide d'un papier réfractaire, et on a laissé une fente d'un petit diamètre pour permettre l'accès du gaz protecteur à l'intérieur pendant l'opération de soudage.

## 2. Réalisation des éprouvettes :

### 2.1 Coupage du tube :

le tube a été coupé en 10 morceaux avec une scie mécanique et avec lubrification pour éviter le chauffage donc le changement des caractéristiques du joint de soudure .

les échantillons prélevés ont 40 mm de largeur .

#### remarque :

les éprouvettes sont prélevées transversalement au joint soudé de telle façon qu'après usinage, l'axe de la soudure demeure à mi-longueur de la partie calibrée de l'éprouvette.

### 2.2 L'usinage des éprouvettes :

les éprouvettes ont été usinées au département mécanique de l' ENP à l'aide d'une fraiseuse .

l'outil utilisé est un porte pastille en carbures vu la dureté de notre acier inoxydable .

les éprouvettes ont été usinées selon la norme NF A 89-200. Cette norme est applicable à tous les assemblages (plans ou tubulaires) soudés bout à bout par fusion.

la forme et les dimensions des éprouvettes sont illustrés ,dans le schéma qui suit :

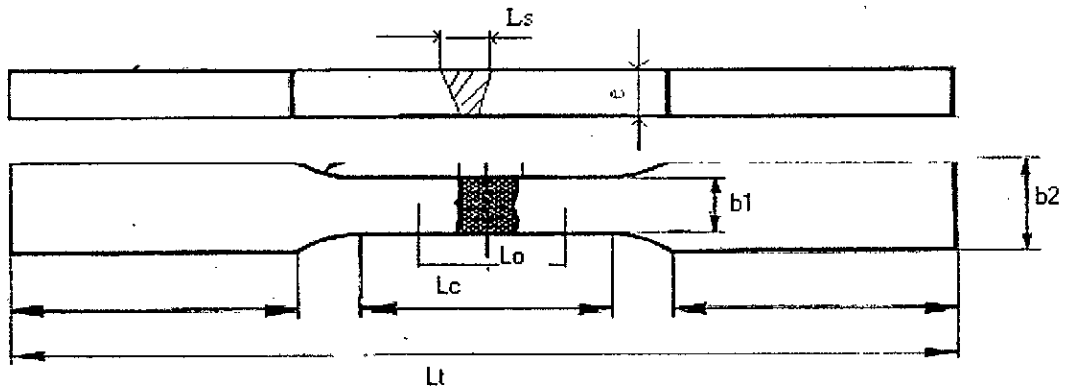


Fig. V.1- dimensions de l'éprouvette

$e$  : épaisseur.

$R > 25$ .

$$L_o = 5.65 \sqrt{S_o}$$

$$L_c \geq L_s + 60$$

avec :  $S_o$  : section transversale.

$L_s$  : largeur de la soudure.

$L_t$  : selon le type de machine de traction.

$b_1$  : pour  $D \geq 51$  mm

$$b_1 = e + D/20$$

### 3. Les essais de traction :

comme nous l'avons précisé auparavant l'essai envisagé est l'essai de traction .

son but est de caractériser le comportement de notre ensemble mais surtout voir aussi l'influence des paramètres d'essai , sur le comportement de notre assemblage soudé.

---

les paramètres dont on veut faire connaître l'influence sont :

la précharge ;  
la vitesse de déplacement ;  
le cyclage.

La machine dont dispose le (C S C), nous permet de contrôler ces paramètres .

c'est une machine servohydraulique de marque **INSTRON** muni d'un logiciel (MERLIN), qui permet de la commander ,ainsi que la gestion de l'interface.

#### MERLIN :

Le merlin c'est le logiciel qui accompagne la machine de traction, et c'est à l'aide de lui qu'on peut fixer les différents paramètres, ainsi de suivre son évolution durant son déroulement.

Le MERLIN nous donne la possibilité de choisir la méthode à utiliser pour calculer les différents résultats tels que :la limite élastique et le module de Young ainsi que tout les autres résultats .

Les résultats de l'essai sont donnés automatiquement dans un tableau ainsi que la courbe de traction.

Les essais ont été répartis comme suit :

Le 1<sup>er</sup> essai : sans précharge : jusqu'à rupture —————> avec contrôle de déplacement .

Le 2<sup>ème</sup> essai : avec précharge : jusqu'à rupture —————> avec contrôle de déplacement .

Le 3<sup>ème</sup> essai : 2 éprouvettes : essais avec contrôle de déplacement : on prendra deux vitesses.

Le 4<sup>ème</sup> essai : 2 éprouvettes :essais avec cyclage ,on fait varier le nombre de cycles ;la vitesse de charge sera prise la même que pour les essais précédents.

---

### 3.1 Description de la machine :

la machine comporte un dispositif permettant d'appliquer un effort sur l'éprouvette, et des systèmes de mesure pour déterminer d'une part la charge et d'autre part l'allongement. Quel que soit le dispositif de chargement, il doit assurer un effort de traction pure, donc un alignement rigoureux des axes d'amarrage de l'éprouvette.

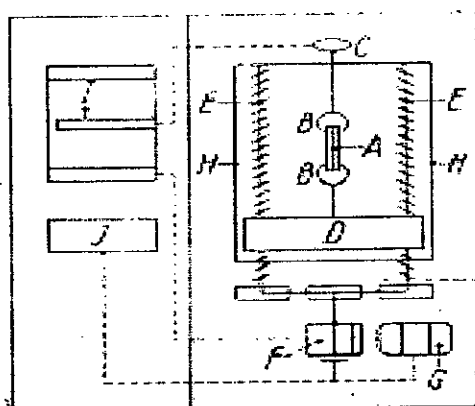
l'effort peut être fourni par un vérin hydraulique ou par un moteur électrique agissant sur une vis attaquant une traverse mobile.

1<sup>er</sup> cas est utilisé lorsqu'on veut contrôler la charge et le 2<sup>ème</sup> dans le cas où l'on veut contrôler le déplacement.

#### 1<sup>er</sup> Partie commandant le déplacement :

Un système de boîte de vitesses permet de choisir la vitesse de déplacement de la traverse dans une gamme élevée (0,1 mm/min à 150 mm/min par exemple).

La mesure de la charge se fait à l'aide de cellules placées généralement à la partie supérieure du bâti. Il s'agit d'anneaux ou de cylindres dynamométriques équipés de jauges de contraintes ou de capteurs de déplacement à induction.



A : éprouvette.

F : boîte de vitesse.

G : moteur.

B : têtes d'amarrage.

H : colonnes.

C : cellule de charge.

I : enregistreur.

D : traverse

E : Vis

J : commande

Fig. V.2 – système commandant le déplacement

#### 2<sup>ème</sup> partie commandant la charge appliquée.

Il utilise un vérin hydraulique pour transmettre l'effort, le débit est piloté par une vanne asservie. Le signal de commande de cette vanne provient de la différence entre le signal délivré par l'appareil qui mesure la grandeur à contrôler et le signal imposé.

### 3.2 Description des essais :

#### I) Essai N° 1 : essai sans précharge :

cet essai est réalisé sur l'éprouvette N°1 :

La vitesse de déplacement comme indiquée par la norme doit être inférieure à ( 15 % de  $L_0$  ) mm/mn .

comme le  $L_0$  de notre éprouvette (éprouvette N° 1) est de 60 mm, la vitesse sera inférieure à (9 mm/mn).

On a prit 8 mm/mn .

Eprouvette n° 1	Longueur entre repères ( $L_0$ )	60.00 mm
	Largeur : b	15.5 mm
	Epaisseur : e	7.00 mm
	Longueur calibrée : $L_c$	80mm
	Section initiale : $S_0$	108.5 mm <sup>2</sup>
Vitesse de l'essai (contrôle déplacement)	8 mm/mn	

Tableau V.1 données de l'essai N°1 sans précharge.

## II) Essai N° 2 : essai avec précharge :

Lors de ces essais on a pris 03 différentes précharges

Précharge1 → 0.5 KN.

Précharge2 → 3.5 KN.

Précharge3 → 7.5 KN

Ces essais seront réalisés jusqu'à rupture et avec contrôle de déplacement .  
la vitesse de déplacement est prise la même que précédemment c à d 8mm/mn .

### a) 1<sup>ère</sup> précharge

Eprouvette n° 2	Longueur entre repères $L_0$	60.00 mm
	Largeur : b	16.00 mm
	Epaisseur : e	7.00 mm
	Longueur calibrée : Lc	80 mm
	Section initiale : $S_0$	112.00 mm <sup>2</sup>
Vitesse de l'essai (contrôle déplacement)	8 mm/mn	
Valeur de la précharge	500 N	

Tableau V.2 données du 1<sup>er</sup> essai avec précharge

### b) 2<sup>ème</sup> précharge :

Eprouvette n° 3	Longueur entre repères $L_0$	60.00 mm
	Largeur : b	16.50 mm
	Epaisseur : e	7.00 mm
	Longueur calibrée : Lc	80 mm
	Section initiale : $S_0$	115.50 mm <sup>2</sup>
Vitesse de l'essai (contrôle déplacement)	8 mm/mn	
Valeur de la précharge	3.5 KN	
Temps de maintien de la précharge	02 minutes	

Tableau V.3 données du 2<sup>ème</sup> essai avec précharge

### b) 3<sup>ème</sup> précharge :

Eprouvette n° 4	Longueur entre repères $L_0$	60.00 mm
	Largeur : b	16.50 mm
	Epaisseur : e	7.00 mm
	Longueur calibrée : Lc	80 mm
	Section initiale : $S_0$	115.50 mm <sup>2</sup>
Vitesse de l'essai (contrôle déplacement)	8 mm/mn	
Valeur de la précharge	7.5 KN	
Temps de maintien de la précharge	02 minutes	

Tableau V.4 données du 3<sup>ème</sup> essai avec précharge



### III) Essai N° 3 : essais avec contrôle de déplacement :

02 essais à vitesses différentes

en ce qui concerne la vitesse de déplacement la norme ne précise pas la valeur exacte mais elle est prise inférieure à (15% de la valeur initiale entre repères /mn),  $(0.15 L_0/\text{mn})$ .

on a pris trois vitesses : la première ( $\epsilon_1 = 5\text{mm/mn}$ ) inférieure à la valeur Max préconisé par la

norme c à d pour notre cas ( $9\text{mm/mn}$ ). La deuxième ( $\epsilon_2 = 12\text{ mm/mn}$ ).

Lors de la comparaison il sera ajouté l'essai réalisé sans précharge.

#### a) vitesse 1

Eprouvette n° 5	Longueur entre repères $L_0$	60.00 mm
	Largeur : b	15.5 mm
	Epaisseur : e	7.00 mm
	Longueur calibrée : $L_c$	80mm
	Section initiale : $S_0$	$108.5\text{ mm}^2$
Vitesse de l'essai (contrôle déplacement)	5 mm/mn	

Tableau V.5 données de l'essai à  $V=5\text{mm/mn}$

#### b) vitesse 2

Eprouvette n° 6	Longueur entre repères $L_0$	60.00 mm
	Largeur : b	15.5 mm
	Epaisseur : e	7.00 mm
	Longueur calibrée : $L_c$	80 mm
	Section initiale : $S_0$	$108.5\text{ mm}^2$
Vitesse de l'essai (contrôle déplacement)	12 mm/mn	

Tableau V.6 données de l'essai à  $V=12\text{mm/mn}$

#### IV) Essai<sup>o</sup>4 (avec cyclage) :

l'essai avec cyclage est un essai où l'éprouvette est soumise à une succession de charge et décharges.

Les vitesses de charges et décharges sont prises les mêmes. (  $\dot{\epsilon} = 8 \text{ mm/mn}$  ).

Le premier cycle est réalisé suivant un pas de 5000N.

Le deuxième : suivant un pas de 10000N.

Les cycles sont représentés par les schémas suivants : (charges en fonction du temps)

a) cycle 1 par pas de 5000N

Eprouvette n° 7	Longueur entre repères $L_0$	60.00 mm
	Largeur : b	15.5 mm
	Epaisseur : e	7.00 mm
	Longueur calibrée : $L_c$	80 mm
	Section initiale : $S_0$	108.5 mm <sup>2</sup>
Vitesse de l'essai (contrôle déplacement)	5 mm/mn	

Tableau V.7 données du 1<sup>er</sup> essai avec cyclage.

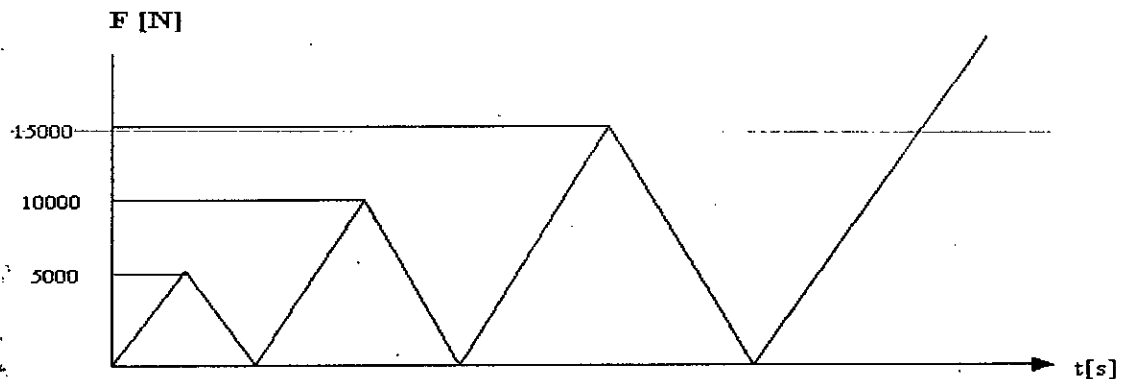


Fig. V.3- cycle de chargement par pas de 5 KN.

b) cycle 2 par pas de 10000 N

Eprouvette n° 8	Longueur entre repères $L_0$	60.00 mm
	Largeur : b	15.5 mm
	Epaisseur : e	7.00 mm
	Longueur calibrée : $L_c$	
	Section initiale : $S_0$	$108.5 \text{ mm}^2$
Vitesse de l'essai (contrôle déplacement)	5 mm/mn	

Tableau V.8 données de l'essai du 2<sup>ème</sup> essai avec cyclage.

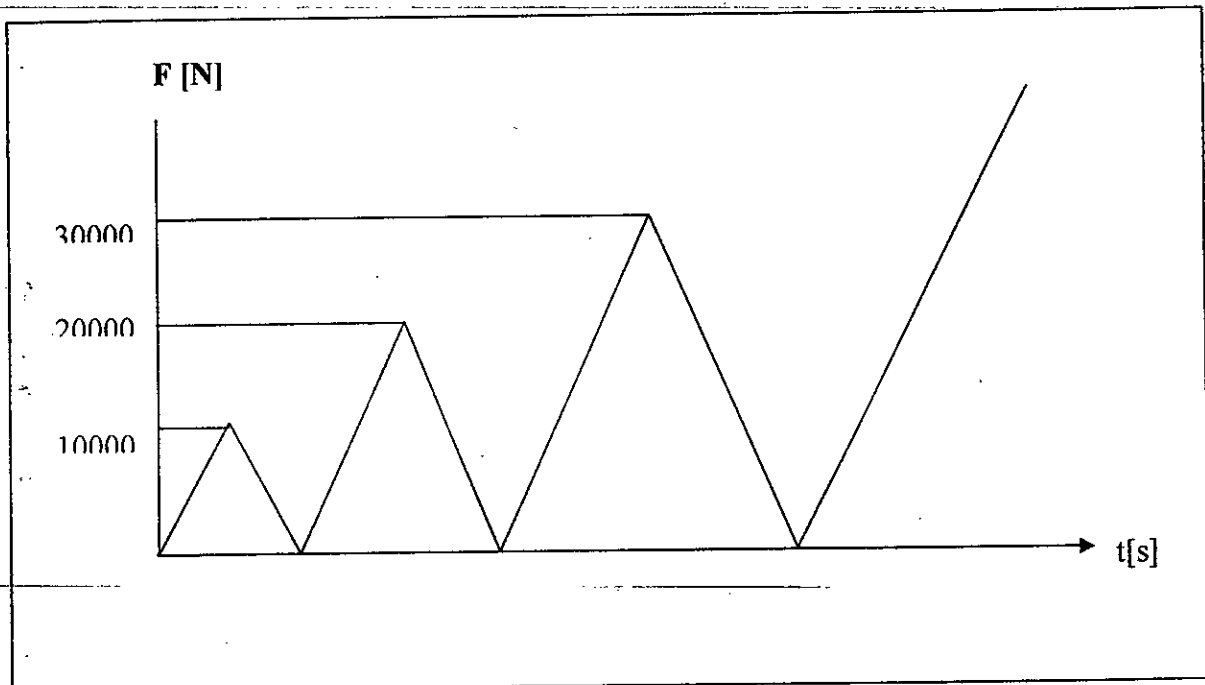


Fig. V.4- cycle de chargement par pas de 10 KN.

---

---

# PARTIE III : résultats et interprétation

---

---

---

# Chapitre VI

---

RESULTATS EXPERIMENTAUX  
DES ESSAIS DE TRACTION

## Introduction :

Les résultats que nous avons pu obtenir des essais précédents appliqués à un assemblage soudé s'interprètent de la même manière que pour un matériau homogène .  
Sauf que dans ce cas l'endroit de la rupture est la première des choses à observer .

### 1. Allure des courbes obtenues :

les courbes obtenues présentent toutes la même allure c à d elles possèdent toutes trois (03) zones :

une partie presque linéaire qui correspond au domaine élastique , suivi d'un autre domaine plastique qui a l'allure d'une parabole .  
durant la déformation élastique initiale et pour les faibles taux de déformations plastiques l'allongement de l'éprouvette s'accompagne d'une contraction homogène sur toute la longueur de l'échantillon .

à partir d'un taux de déformation critique correspondant au maximum observé dans la courbe (contrainte – déformation), la contraction de la section cesse d'être homogène . On observe que celle-ci devient plus importante de façon aléatoire ,en un endroit précis de l'éprouvette . A cet emplacement , la section locale de l'éprouvette diminue de manière inhomogène qui est le phénomène de striction .

la résistance de l'éprouvette qui est proportionnel à sa section diminue également .  
la striction apparaît donc lorsque la contrainte nominale dépasse la valeur maximale  $(R_m)$  de la courbe de traction .cette valeur correspond donc à la charge maximum supportée par l'éprouvette déformée de manière homogène.

### 2. Etude des paramètres :

les résultats des essais sont donnés ci-contre sous formes de tableaux.

Le logiciel de la machine (MERLIN) nous donne :

- la limite élastique  $R_e$  .
- Le module de Young  $E$  .
- La charge Max que peut supporter l'éprouvette  $R_m$
- Et l'allongement à la rupture.

2.1 Essai N° 1 : (essai sans précharge)

**RAPPORT D'ESSAI N° 1**

Essai sans précharge

Vitesse de déplacement : 8 mm/mn

Eprouvette : N°1

- Position de la rupture : métal de base
- Grandeurs mesurées et calculées :

Position de la rupture	Fe [KN]	Fm [KN]	Re [N/mm <sup>2</sup> ]	Rm [N/mm <sup>2</sup> ]	Module de Young E (Mpa)
Métal de base	21.213	61.23	195.512	564.33	7078.27

S <sub>0</sub> [mm <sup>2</sup> ]	Su [mm <sup>2</sup> ]	Z [mm <sup>2</sup> ]	L <sub>U</sub> [mm]	A (%)
108.5	26.22	79.90	79.8	33.00

Avec :

L<sub>U</sub> : est la longueur entre repères après rupture

S<sub>U</sub> : section transversale après rupture.

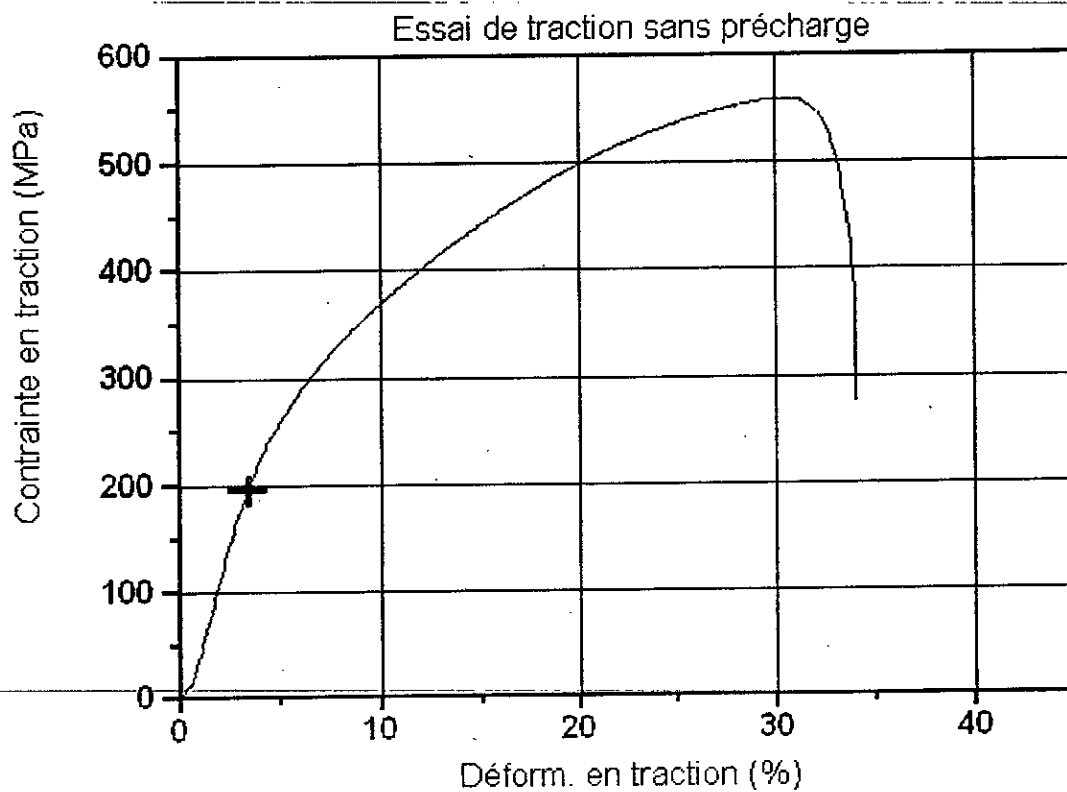


Fig. VI.1- courbe contrainte-déformation (essai sans précharge)

2.2 Essai N° 2 : (essai avec précharge)

2.2.1 Résultats :

a) précharge 1

**RAPPORT D'ESSAI N° 2**

Essai avec précharge

Valeur de la précharge : 0.5 N

Vitesse de déplacement : 8 mm/mn

Eprouvette : N°2

- Position de la rupture : métal de base
- Grandeurs mesurées et calculées :

Position de la rupture	Fe [KN]	Fm [KN]	Re [N/mm <sup>2</sup> ]	Rm [N/mm <sup>2</sup> ]	Module de Young E (Mpa)
Métal de base	22.85	68.3	204.01	609.82	8475

S <sub>0</sub> [mm <sup>2</sup> ]	S <sub>u</sub> [mm <sup>2</sup> ]	Z [mm <sup>2</sup> ]	L <sub>U</sub> [mm]	A (%)
112.0			80.2	33.66

Lu : est la longueur entre repères après rupture  
 Su : section transversale après rupture.

Essai de traction avec précharge

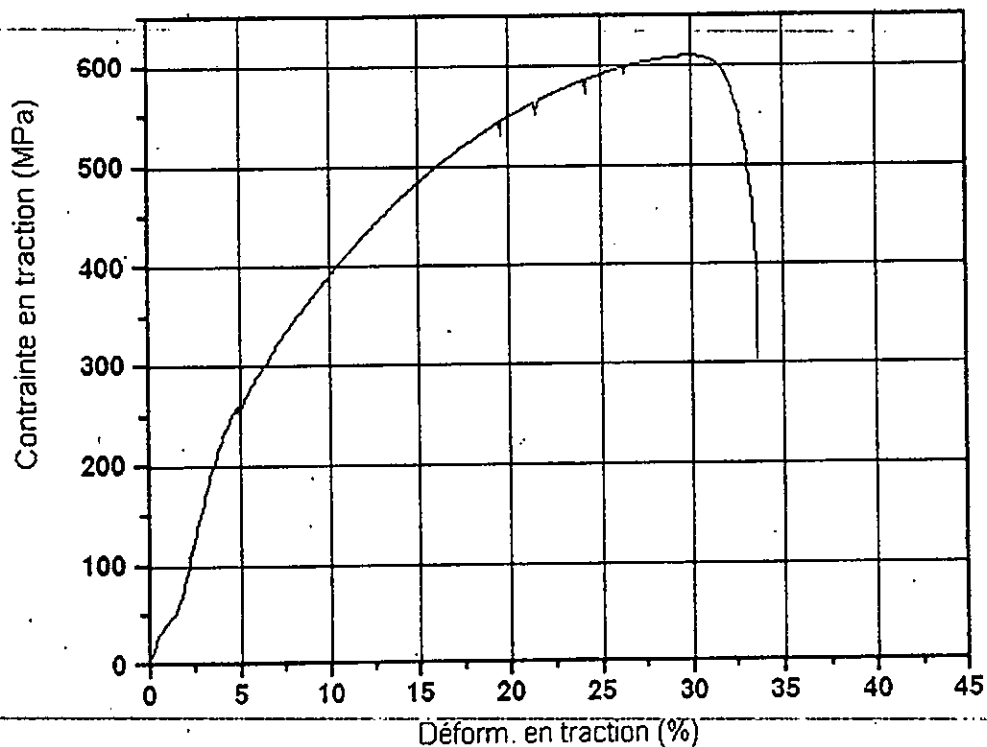


Fig. VI.2 – courbe contraintes-déformations de l'essai avec (précharge=0.5KN)



b) précharge 2

**RAPPORT D'ESSAI N° 2**  
 Essai avec précharge  
 Valeur de la précharge : 3.5 KN  
 Vitesse de déplacement : 8 mm/mn  
 Eprouvette : N°3

- **Position de la rupture : métal de base**
- **Grandeurs mesurées et calculées :**

Position de la rupture	Fe [KN]	Fm [KN]	Re [N/mm <sup>2</sup> ]	Rm [N/mm <sup>2</sup> ]	Module de Young E (Mpa)
Métal de base		63.33	224.54	548.3	8330.920

S <sub>0</sub> [mm <sup>2</sup> ]	Su [mm <sup>2</sup> ]	Z [%]	L <sub>U</sub> [mm]	A (%)
115.5			81.4	35.6

Avec :  
 Lu : est la longueur entre repères après rupture  
 Su : section transversale après rupture.

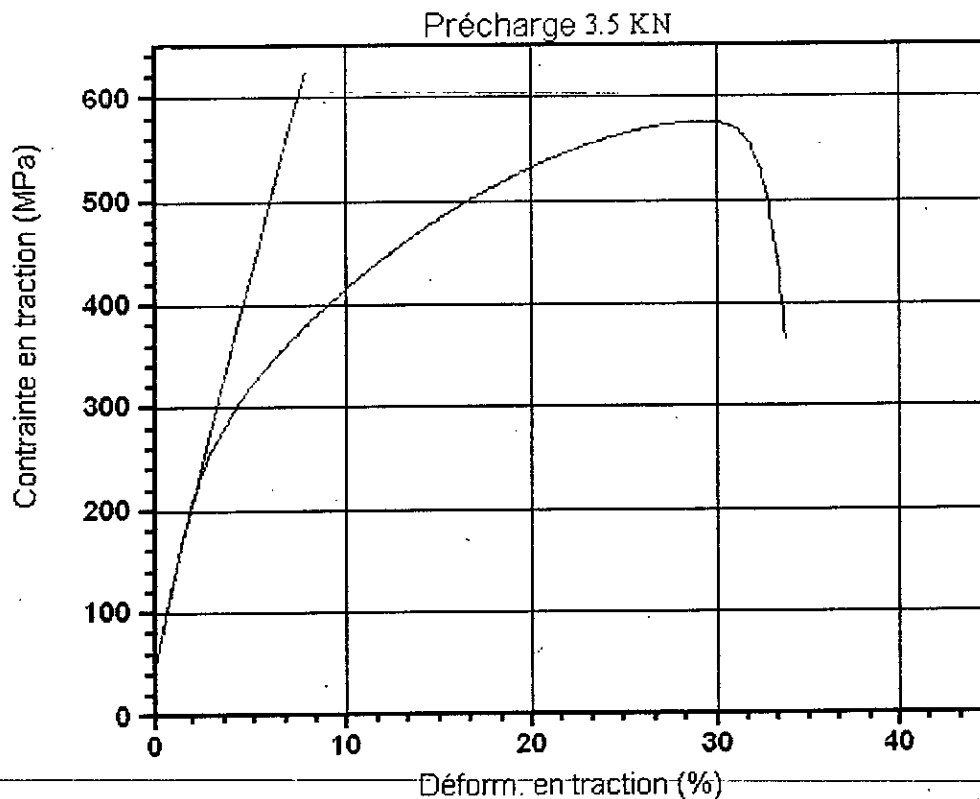


Fig. VI.3 – courbe contraintes-déformations de l'essai avec ( précharge=3.5KN)

c) précharge 3 :

**RAPPORT D'ESSAI N° 2**

Essai avec précharge

Valeur de la précharge : 7.5 KN

Vitesse de déplacement : 8 mm/mn

Eprouvette : N°4

- **Position de la rupture** : métal de base
- **Grandeurs mesurées et calculées** :

Position de la rupture	Fe [KN]	Fm [KN]	Re [N/mm <sup>2</sup> ]	Rm [N/mm <sup>2</sup> ]	Module de Young E (Mpa)
Métal de base		64.94	244.1	576.211	6803.12

S <sub>0</sub> [mm <sup>2</sup> ]	Su [mm <sup>2</sup> ]	Z [%]	L <sub>U</sub> [mm]	A (%)
112.7			83.20	38.70

Avec :

Lu : est la longueur entre repères après rupture

Su : section transversale après rupture.

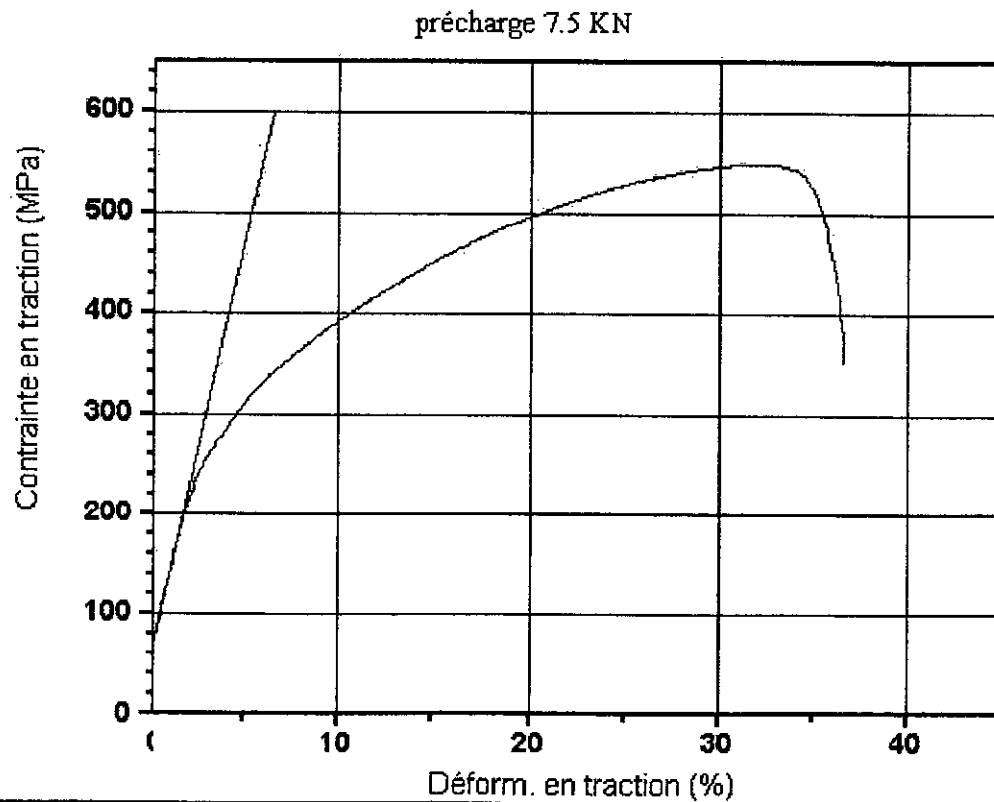


Fig. VI.4 – courbe contraintes-déformations de l'essai avec( précharge=7.5KN)

Avant de passer à l'analyse de l'évolution des propriétés en fonction du paramètre précharge il faut noter que le module de Young obtenu est loin d'être une valeur juste car sa valeur pour les aciers inoxydables austénitiques qui est notre métal de base est comprise entre 195 et 200 Gpa.[9]

Il ne sera pas inclus dans l'étude de l'évolution des paramètres en fonction de la précharge. Le paramètre E.

On ne s'intéressera qu'à la limite élastique et la déformation à la rupture.

### 2.2.2 Analyse de l'évolution des propriétés en fonction du paramètre précharge.

#### 1. sur la limite élastique :

On doit tracer la courbe  $Re = f(p)$  {  $v =$  vitesse de déplacement }.

On a pour :  $P = 0.5 \text{ KN}$   $\longrightarrow$   $Re = 204.01 \text{ MPa}$  .  
 $P = 3.5 \text{ KN}$   $\longrightarrow$   $Re = 224.54 \text{ Mpa}$  .  
 $P = 7.5 \text{ KN}$   $\longrightarrow$   $Re = 244.1 \text{ Mpa}$  .

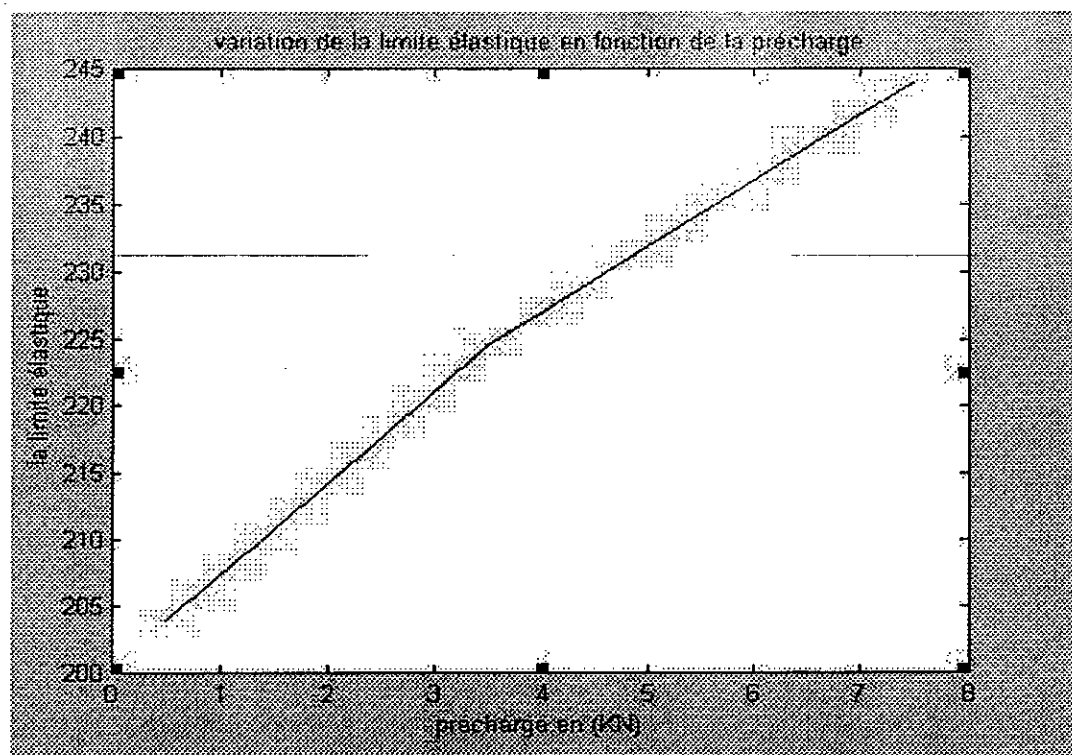


Fig. VI.5 – variation de la limite élastique en fonction de la précharge

### 1. sur la déformation à la rupture :

On doit tracer la courbe  $A(\%) = f(p)$  {  $v =$  vitesse de déplacement }.

On a pour :  $P = 0.5 \text{ KN}$   $\longrightarrow$   $A = 33.59 \%$   
 $P = 3.5 \text{ KN}$   $\longrightarrow$   $A = 36.04 \%$   
 $P = 7.5 \text{ KN}$   $\longrightarrow$   $A = 38.70 \%$

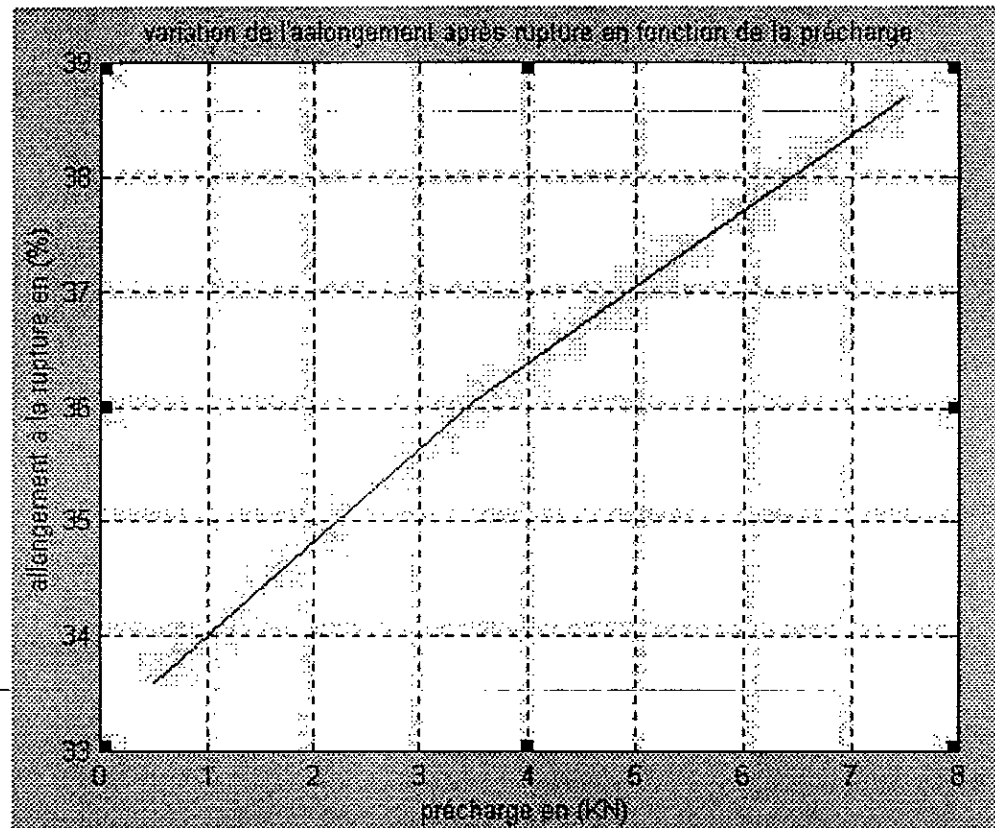


Fig. VI.6 – variation de la l'allongement à rupture en fonction de la précharge

#### Observations :

C'est lors de la précharge la plus élevée que la déformation après rupture a été la plus élevée. Bien que c'est lors de cet essai qu'une grande partie de la déformation n'a pas été comptabilisé.

Aussi la plus grande valeur de la limite élastique correspond à la précharge la plus élevée.

#### Explications :

Durant la déformation qui est restée maintenu pendant un temps de deux minutes, une quantité de chaleur est absorbé par le matériau. Cette précharge ainsi que cette chaleur contribueront à éliminer un pourcentage de contraintes internes ainsi que l'orientation des chaînes des déformations dans un seul sens. Ce qui a retardé le glissement des dislocations l'une par rapport aux autres.

## 2.3 Essai N° 3 : (essai avec variation de la vitesse de déplacement)

### 2.3.1 Résultats

a) vitesse 1

<b>Vitesse 1 : 5 mm/mn.</b>		<b>(Éprouvette n° 5)</b>			
➤ <b>Position de la rupture :</b> métal de base					
➤ <b>Grandeurs mesurées et calculées :</b>					
Position de la rupture	Fe [KN]	Fm [KN]	Re [N/mm <sup>2</sup> ]	Rm [N/mm <sup>2</sup> ]	Module de Young E (Mpa)
Métal de base	21.33	66.83	184.66	578.60	13343.957
S <sub>0</sub> [mm <sup>2</sup> ]	Su [mm <sup>2</sup> ]	Z [%]	Lu [mm]	A (%)	
115.5	27.54	76.15	81.5	30.10	

Avec :

Lu : est la longueur entre repères après rupture  
Su : section transversale après rupture

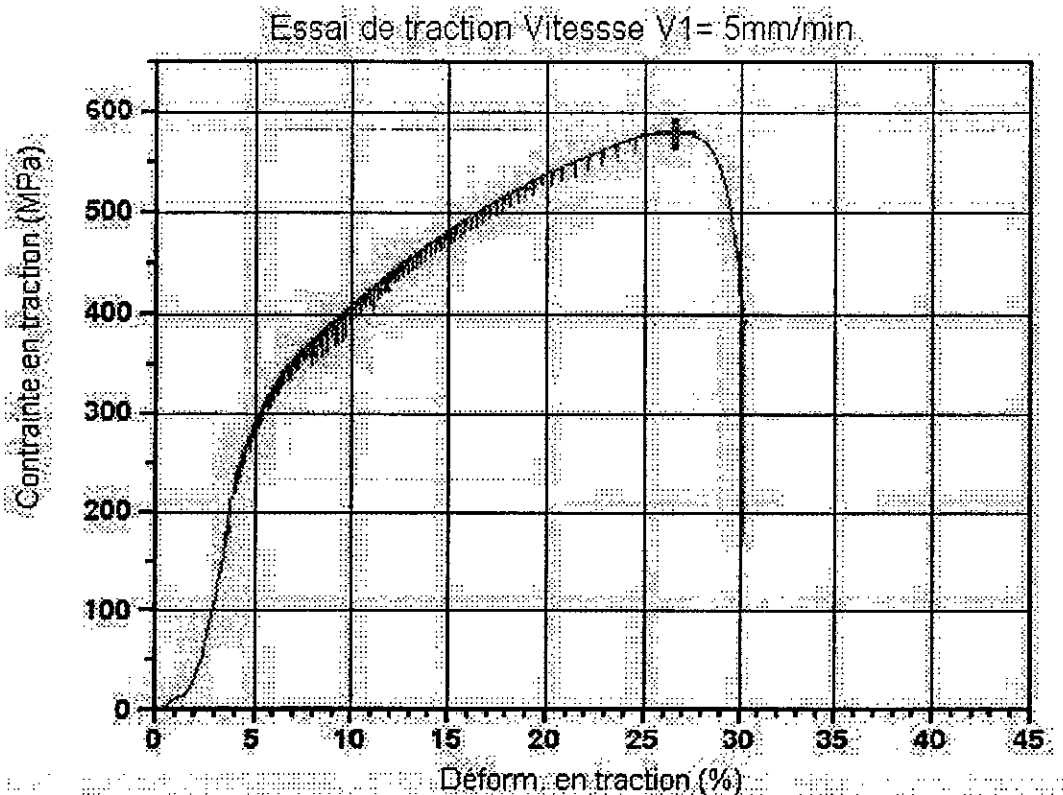


Fig. VI.7 – courbe contraintes-déformations de l'essai réalisé à V1=5mm/mn

b) vitesse 2

**Vitesse 2 : 12 mm/mn.**

**(Éprouvette n°6)**

- **Position de la rupture : métal de base**
- **Grandeurs mesurées et calculées :**

Position de la rupture	Fe [KN]	Fm [KN]	Re [N/mm <sup>2</sup> ]	Rm [N/mm <sup>2</sup> ]	Module de Young E (Mpa)
Métal de base	26.023	64.19	235.29	580.35	8454.513

S <sub>0</sub> [mm <sup>2</sup> ]	Su [mm <sup>2</sup> ]	Z [mm <sup>2</sup> ]	L <sub>U</sub> [mm]	A (%)
110.6	31.93	71.11	85.9	43.16

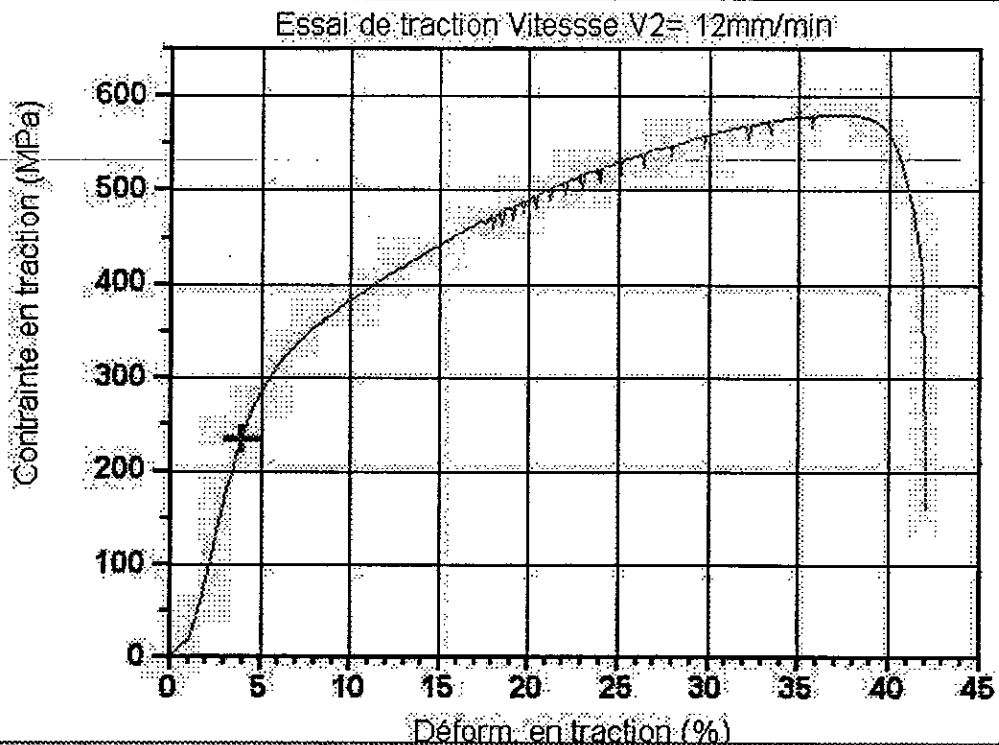


Fig. VI.8 – courbe contraintes-déformations de l'essai réalisé à la vitesse V2=12mm/mn

### Remarque :

Comme les essais précédents les valeurs du Module de Young obtenues sont très loin par rapport à celles correspondantes aux aciers inoxydables austénitiques qui sont des aciers très durs.

Donc comme pour le paramètre précharge il ne sera étudié ici que l'évolution de la limite élastique.

### 2.3.2 Analyse de l'évolution des propriétés en fonction du paramètre déplacement.

#### 1. sur la limite élastique :

On doit tracer la courbe  $Re = f(v)$  {  $v$  = vitesse de déplacement }.

On a pour :  $V = 5 \text{ mm/mn}$   $\longrightarrow$   $Re = 184.6 \text{ MPa}$ .

$V = 8 \text{ mm/mn}$   $\longrightarrow$   $Re = 195.51 \text{ Mpa}$ .

$V = 12 \text{ mm/mn}$   $\longrightarrow$   $Re = 235.29 \text{ Mpa}$ .

Cette variation est illustrée sur la figure .1

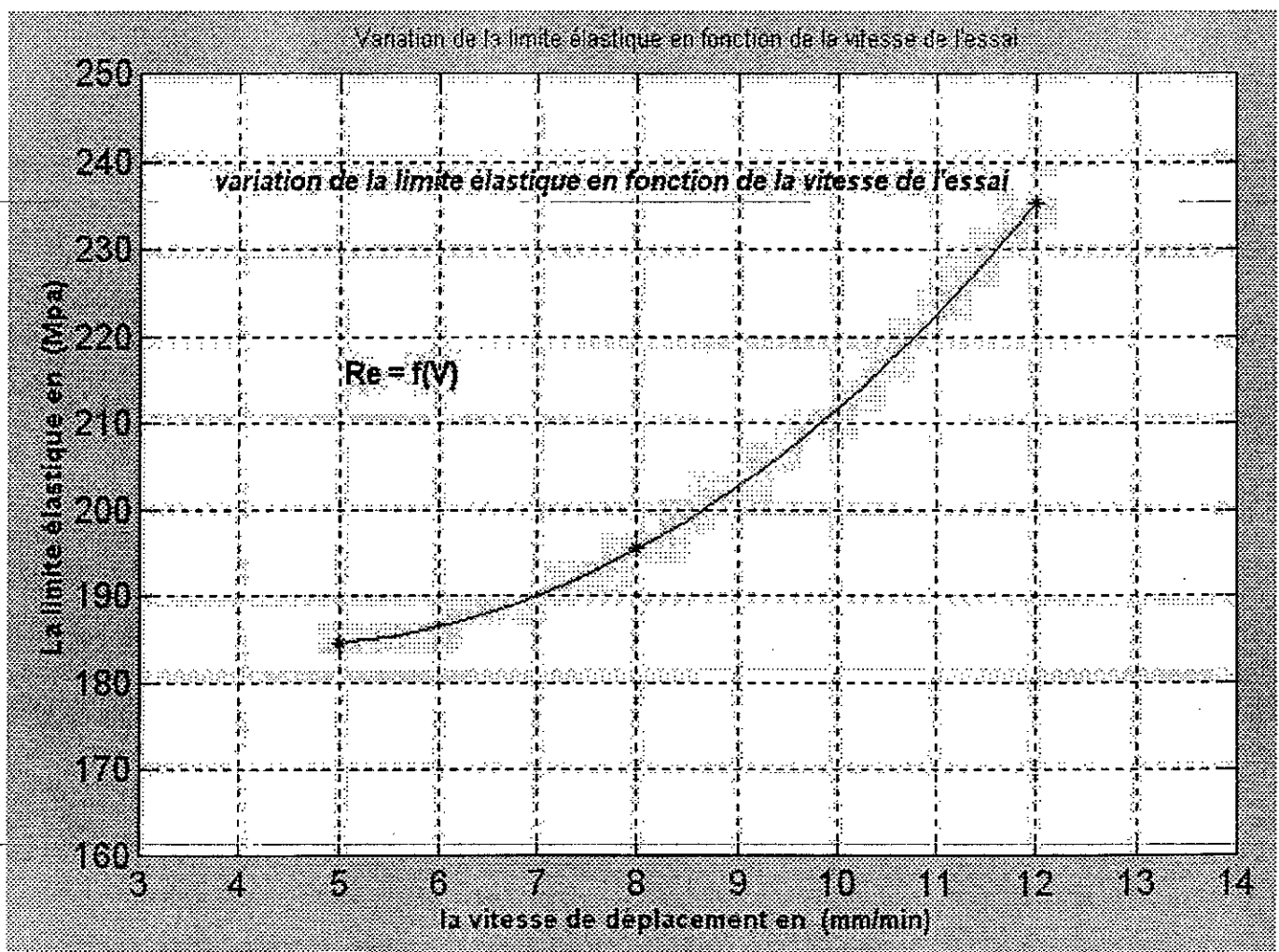


Fig. VI.9 – évolution de la limite élastique en fonction de la vitesse de l'essai.

3. sur la déformation à la rupture :

On a pour :  $V=5\text{mm/mn}$   $\longrightarrow$   $A\% = 30.10\%$ .

$V=8\text{mm/mn}$   $\longrightarrow$   $A\% = 33.00\%$ .

$V=12\text{mm/mn}$   $\longrightarrow$   $A\% = 43.16\%$ .

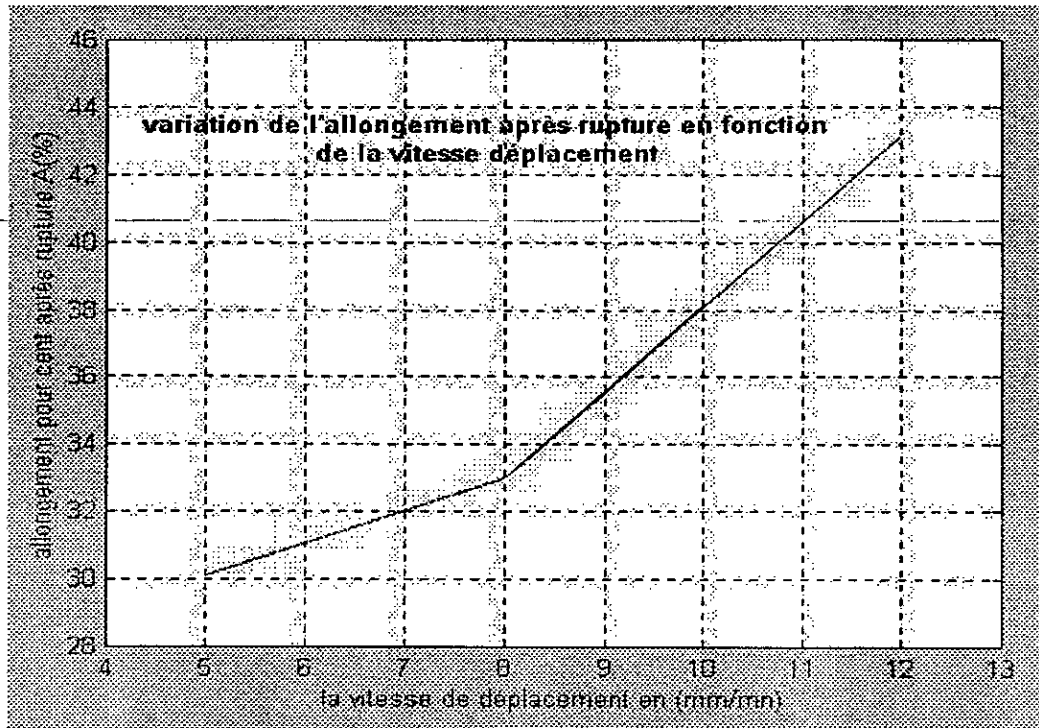


Fig. VI.11 – variation de l'allongement à la rupture en fonction de la vitesse de l'essai.

### Observations

La limite élastique et la déformation à la rupture ont augmenté en fonction de la vitesse.

### Commentaires :

Ces résultats nous montrent que plus on réalise l'essai plus vite la limite élastique augmente et sa ductilité aussi.

Lorsque la durée de l'essai augmente (vitesse petite), l'énergie nécessaire pour produire la rupture diminue de plus en plus.

Aux grandes vitesses de l'application de la charge la limite élastique de l'acier augmente. Ce phénomène est important dans les essais aux chocs des métaux [11] ; il explique pour quelle raison la rupture dans les essais dynamiques exige un travail plus important que dans les essais statiques.



## 2.4 Essai N° 4 : (essai avec cyclage)

### 2.4.1 Résultats

a) cycle 1 : éprouvette N° 7

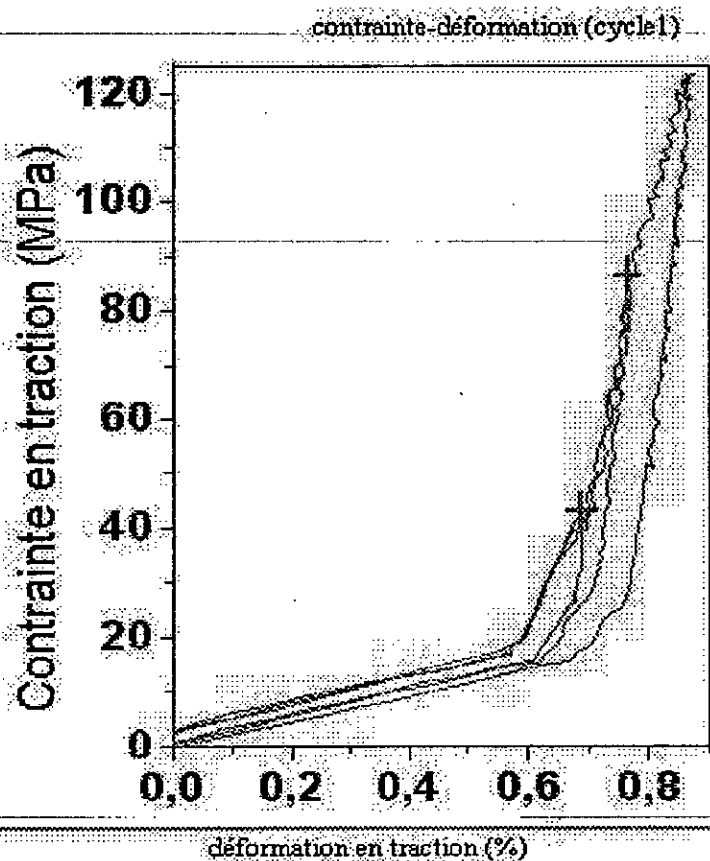


Fig. VI.12 – courbe contraintes -déformations du cyclage réalisé dans le domaine élastique.

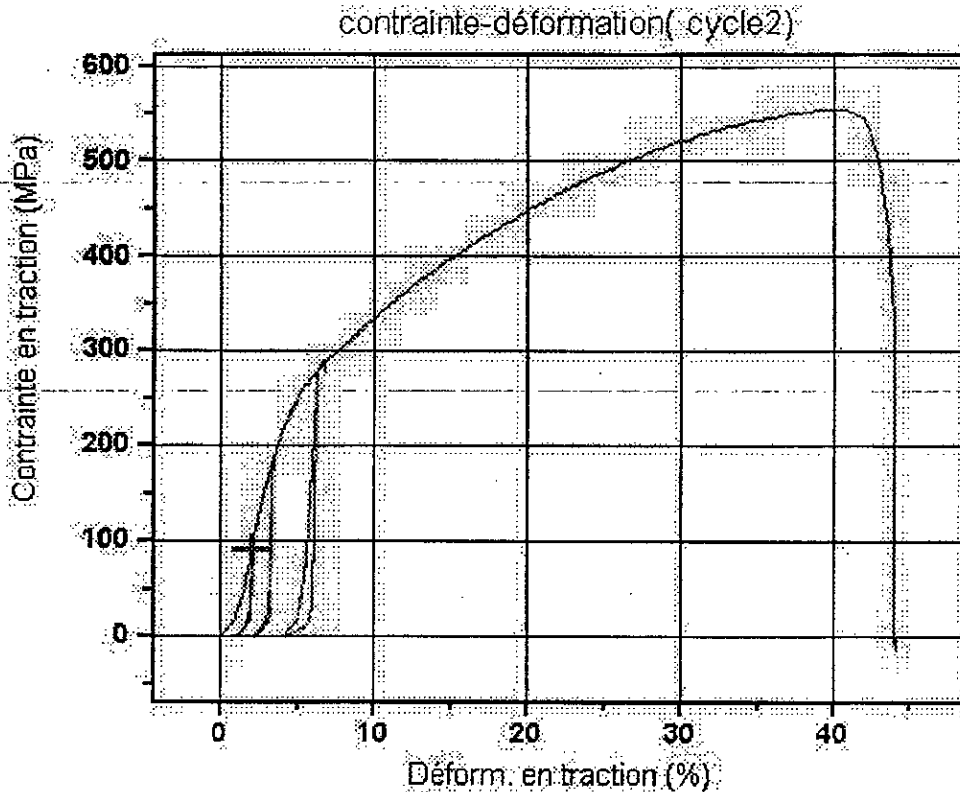


Fig. VI.13 – courbe contraintes-déformations du 2<sup>ème</sup> essai avec cyclage.

Re 1=175.3 Mpa (limite élastique lors du 2<sup>ème</sup> chargement).  
Re2 =242.67 Mpa (limite élastique lors du 3<sup>ème</sup> chargement).

**Remarque :**

Le module de Young mesuré dans la zone de proportionnalité est très proche de celui des aciers de la même famille (inoxydables austénitiques) dont la valeur est comprise entre 195 -200 Gpa [9]  
Sa valeur est : **198.94 Gpa**

**2.4.2 Analyse de l'évolution des propriétés en fonction du cyclage**

**Commentaire**

- ❖ le premier essai avec cyclage réalisé dans le domaine élastique :

On observe que la courbe de décharge n'est pas équivalente à la courbe de mise en charge. Mais l'éprouvette retrouve ses dimensions initiales ⇒ (pas de déformations permanentes).

### Explication :

Notre assemblage n'a pas un comportement élastique idéal et une partie de l'énergie formée est dissipée au sein de l'éprouvette par des mécanismes de friction (frottement) interne (mouvements de dislocations dans les métaux). [8]

Dans ce cas il existe une différence entre l'énergie fournie au système et l'énergie restituée, et la courbe de décharge n'est plus équivalente à la courbe de mise en charge, bien que l'éprouvette retrouve sa longueur initiale.

Lors du cycle de déformation, il y'a eu formation d'une boucle d'hystérésis [8].

Ce comportement est du à un effet anélastique. En réalité il s'agit d'une forme du comportement viscoélastique. Parfois c'est un effet bénéfique : pour amortir des vibrations ou du bruit par exemple.

- ❖ deuxième essai avec cyclage (charges et décharges dans le domaine de déformation Plastique on constate que la limite d'élasticité augmente en fonction des déformations Successives. Cette situation est illustrée à la figure VI.13 dans le cas des deux Mises en charge successives

La limite d'élasticité 175.3 Mpa.

Après le premier cycle de mise en charge on mesure une limite d'élasticité de 175.3 Mpa.

Après le deuxième cycle de mise en charge la limite élastique dépasse 242.67.

Un durcissement s'est donc produit pendant la déformation plastique (écrouissage) du au deuxième cycle.

### Explication :

Le phénomène de durcissement observé est appelé *consolidation*.

Le terme de durcissement est pris dans le sens très large de résistance.

Ce durcissement se marque par une augmentation de la dureté et de la limite élastique. Il est dû au blocage du mouvement des dislocations, en raison de l'augmentation de leur densité au cours de la déformation plastique.

### 3. Conclusion générale :

Cette étude nous a permis, au moyen des essais de traction effectués, de voir que lors des essais de tractions le comportement de notre assemblage varie en fonction des paramètres.

Et plus la vitesse est élevée meilleurs sont les propriétés mécaniques du matériau.

Un essai de traction n'est significatif que si les conditions thermiques et la vitesse de sollicitation sont précisées ou autrement dit les résultats obtenus ne peuvent être retenus que si les conditions d'expériences sont précisées.

et que le comportement des matériaux est loin d'être un comportement indépendant du temps.

Ainsi que lors d'un essai de traction effectué sur une éprouvette soudée la, rupture ne se produira pas dans le cordon tant que le procédé de soudage et le métal d'apport sont bien choisis.

Le procédé utilisé pour souder notre tube est un excellent procédé qui donne de meilleures qualités de la soudure.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] : Techniques de l'ingénieur .données numériques sur les aciers inoxydables M 323 .
- [2] : Techniques de l'ingénieur .Soudage et Soudabilité Métallurgique des métaux. M715
- [3] : Techniques de l'ingénieur. Soudage à l'Arc. B 7 730
- [4] : Essais Mécaniques des Métaux . M120
- [5] : J.BARRALIS et G.MAEDER Métallurgie tome II alliages ferreux .Ensam – Paris 83 .
- [6] : F. DELATTRE .Le soudage des aciers inoxydables Paris 65 .
- [7] : H . GRANJON .Bases Métallurgiques du soudage .2<sup>ème</sup> édition . Publication du soudage et de ses applications.1995, 251p .
- [8] : Jean P.Mercier Gérald Zambelli Wilfried Kurz .INTRODUCTION À LA SCIENCE DES MATERIAUX .TRAITE DES MATERIAUX 3<sup>ème</sup> édition PRESSES POLYTECHNIQUES ET UNIVERSITAIRES ROMANDES .
- [9] : Michel F. Ashby , David R.H. Jones . Matériaux 1.propriétés et applications. DUNOD Paris 1988.
- [10] : conseils pour le soudage des aciers inoxydables. Collection ATS OTUA .1983.
- [11] : S.P.TIMOSHENKO . résistance des matériaux tome 2 , DUNOD technique

### REFERENCE GENERALES :

**Sites internet :**

[WWW.soudage.org](http://WWW.soudage.org)

**-Document numérique . (Métallurgie du soudage) Bureau canadien du soudage.**

**-Document numérique .**