

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMREOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**Ministère d l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

**Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou**

**Faculté du Génie de la Construction**

**Département de Génie Mécanique**



# **Mémoire**

**En vue de l'obtention du Diplôme de MAGISTER en Génie Mécanique**

**Option : Sciences des Matériaux**

## **Thème**

**Caractérisation structurale et mécanique du joint soudé de la  
liaison bimétallique Acier Ordinaire E36/ Acier anti-usure  
NAXTRA70 utilisé par l'Unité Grue de Béjaïa dans l'assemblage  
de la pelle chargeuse et godet d'excavation**

**Présenté par**  
**Hanifa MAROUF**

**Sous la direction du professeur**  
**Abdelaziz ATI, Université de Béjaïa**

**Devant le jury suivant :**

<b>HALEM</b>	<b>Nacer</b>	<b>Professeur</b>	<b>UMMTO</b>	<b>Président</b>
<b>ATI</b>	<b>Abdelaziz</b>	<b>Professeur</b>	<b>UAMB</b>	<b>Rapporteur</b>
<b>AZEM</b>	<b>Said</b>	<b>Professeur</b>	<b>UMMTO</b>	<b>Examineur</b>
<b>OULD OUALI</b>	<b>Mohand</b>	<b>Maitre de conférences A</b>	<b>UMMTO</b>	<b>Examineur</b>

**2012**

## Remerciements

Mes remerciements vont tout d'abord à notre Dieu pour la santé et le courage qu'il m'a a donnés pour terminer ce modeste travail.

Mes plus vifs remerciements vont également à Monsieur le professeur A. Ati de l'université de Bejaïa de m'avoir gracieusement fait bénéficiaire, tout au long de ce travail, de ces précieuses connaissances, de sa longue expérience dans le domaine des sciences des matériaux et d'avoir été disponible malgré son plan chargé.

J'exprime ma sincère reconnaissance à Monsieur le professeur S. Azem de l'université de Tizi-Ouzou pour m'avoir aidé à réussir et d'accepter de lire, d'examiner et de juger ce mémoire et d'être membre du jury de soutenance.

J'adresse mes remerciements les plus sincères à Monsieur le professeur N. Halem de l'université de Tizi-Ouzou, qui malgré ses responsabilités a bien voulu s'intéresser à mon travail et pour l'honneur qu'il m'a fait de présider ce jury.

J'adresse aussi mes remerciements les plus sincères à Monsieur M. Ould ouali, maitre de conférence de l'université de Tizi-Ouzou, qui a pris le temps de consulter ce mémoire, et pour avoir consenti à en être membre du jury.

Je remercie mes très chères parents qui se sont donnés beaucoup de peine dans la vie pour la réussite de leurs enfants, que Dieu les protège.

Je remercie toute ma famille (mon frère Rachid et son épouse « Fatma » et mes frères Djilali et Djoudi, ma sœur Lynda et son époux « Salim » et ma sœur Noura, ma grand-mère et surtout mon petit neveu « *Amine* »)

Je ne saurais oublié également Monsieur A. Belamri et les techniciens du hall de technologie de l'Université de Bejaïa (Rachid Yousfi, Nacer Bouamara, Yazid Baba Ahmed, Zahir Haddadi, Bouzide Saidi et Meziane Boumertit).

Enfin, je remercie toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

# Sommaire

<b>Introduction générale et problématique</b> .....	1
<b>Chapitre I Revue bibliographique</b> .....	3
1.1 Introduction .....	3
1.2 Définition de l'acier .....	3
1.3 Classification des aciers .....	3
1.3.1 Les aciers ordinaires ou aciers au carbone .....	3
1.3.2 Les aciers de traitements thermiques .....	4
1.3.3 Les aciers à outils .....	4
1.3.4 Les aciers inoxydables .....	4
a) Aciers martensitiques.....	5
b) Aciers ferritiques .....	5
c) Aciers austénitiques .....	5
1.4 Désignation des aciers .....	5
1.5 Influence spécifique des éléments d'addition .....	7
1.5.1 Le carbone .....	8
1.5.2 Le chrome.....	8
1.5.3 Le nickel.....	8
1.5.4 Le molybdène .....	8
1.5.5 Le silicium.....	8
1.5.6 Le niobium .....	9
1.5.7 Le titane.....	9
1.5.8 Le manganèse .....	9
1.5.9 Le cuivre.....	9
1.5.10 Le soufre.....	9
1.5.11 le vanadium .....	9
1.5.12 le zirconium .....	9
1.6 Le soudage et ces caractéristiques .....	9
1.6.1 Définition de soudage .....	10
1.6.2. Procédé du soudage semi-automatique "MIG" (métal inerte gas) et "MAG" (métal active gas) .....	10
1.6.2.1 Caractéristiques du soudage semi-automatique.....	11
Métal d'apport.....	11
1.6.2.2 Protection gazeuse.....	11
1.6.2.3 Mise en œuvre.....	12
1.6.2.4 Domaines d'utilisation .....	12
1.6.2.5 Avantages et inconvénients du procédé .....	12

1.6.3 Caractéristiques de la soudure .....	12
• La zone de fusion (ZF) mélange homogène .....	13
• La zone de fusion (ZF) non mélangée .....	13
• Zone fondu partiellement (ZFP) .....	13
• Zone affectée thermiquement (ZAT) .....	13
I.6.4 Aspects métallurgiques du soudage de l'acier .....	13
1 Zone de fusion (structure basaltique).....	14
2 Zone surchauffée .....	14
3 Zone de normalisation.....	14
4 Zone à température maximale comprise entre $Ac_1$ et $Ac_3$ .....	14
5 Zone de recristallisation .....	15
6 Métal de base .....	15
I.6.5 Les défauts de soudure.....	16
I.6.5.1 Définition et différents types de défauts .....	16
I.6.5.2 Les remèdes de la fissuration .....	17
I.7 Travaux réalisés sur le soudage des pelles chargeuses et Godets d'excavation .....	18
<b>Chapitre II Matériaux et techniques expérimentales</b> .....	19
2.1 Présentation des matériaux.....	19
2.1.1 Présentation du matériau NAXTRA70 .....	19
2.1.2 Présentation de l'acier E36.....	19
2.1.3 Présentation du métal d'apport .....	19
2.2 Réalisation des maquettes de liaisons bimétalliques acier NAXTRA70/acier E36 .....	20
2.2.1 Préparation des plaquettes.....	20
2.2.2 Soudage des plaquettes .....	20
2.2.3 Prélèvement des échantillons .....	21
2.2.4 Préparation des éprouvettes.....	22
2.3 Présentation des essais mécaniques utilisés dans notre étude .....	23
2.3.1 Réalisation des essais de traction et de flexion .....	23
2.3.1.1 Essai de traction .....	23
1. Grandeurs conventionnelles .....	24
2. Grandeurs rationnelles .....	24
3. Modélisation sommaire.....	25
4. Le coefficient de consolidation ou coefficient d'érouissage « n » .....	25
2.3.1.2 Essai de flexion trois points.....	26
Principe de l'essai.....	26
2.3.1.3 Essai de résilience (essai de flexion par choc).....	27
2.4 Examens Métallographiques .....	28
2.4.1 Examens Macrographique.....	28

2.4.1.1 Introduction .....	28
2.4.2 Découpage des échantillons .....	28
2.4.2.1 Polissage .....	28
2.4.2.2 Attaque chimique .....	29
2.4.3 Microscope métallographique .....	29
2.4.3.1 Examen au microscope.....	29
2.4.4.1 Essai de dureté Vickers .....	29
2.4.4.2 Mode opératoire .....	30
2. 5 Essai d'usure.....	31
<b>Chapitre III Caractérisation des liaisons bimétalliques .....</b>	<b>34</b>
3.1 Analyse de la composition chimique .....	34
3. 1. 2 Composition chimique des matériaux utilisés .....	34
3. 2. Observations métallographiques .....	35
3. 2. 1. Microstructure de la liaison bimétallique Naxtra70/E36 .....	35
3. 3. Caractérisation mécanique des liaisons bimétalliques .....	36
3. 3. 1. Essai de traction .....	36
➤ Etude des faciès de rupture .....	37
3. 3. 2. Essai de flexion trois points.....	38
Etude des faciès de rupture .....	39
3. 3. 3. Comportement en flexion par choc (essais de résilience) .....	40
➤ Etude des faciès de rupture (microscopie électronique à balayage) .....	41
3. 3. 4. Essai de dureté .....	44
➤ Interprétations.....	44
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>50</b>

## Introduction générale et problématique

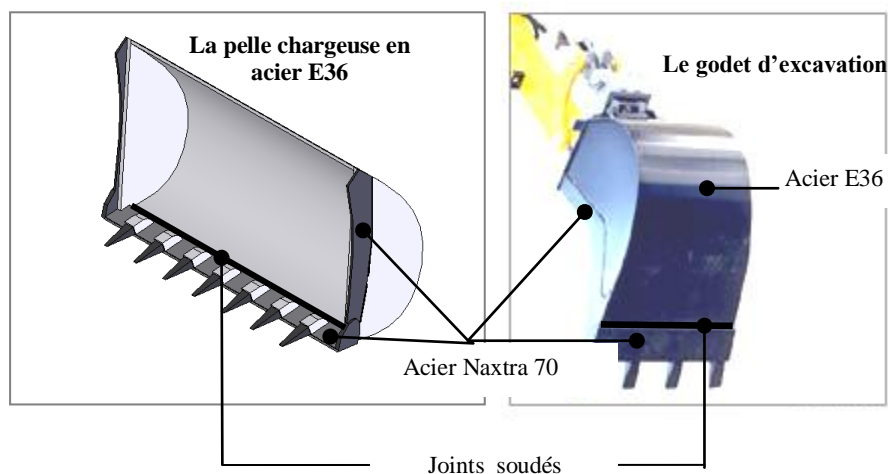
La maîtrise du comportement des structures et des assemblages est une nécessité croissante pour les différents secteurs ; aéronautique ; automobile ; marin ; transport pétrolier ; agroalimentaire... etc. la connaissance approfondie des phénomènes intervenants dans le matériau utilisé, et les facteurs influençant sont comportement permet de prévenir des anomalies, et choisir des conditions adoptées à son utilisation.

Le soudage est un domaine de construction mécanique très vaste où les spécialistes, techniciens, ingénieurs et chercheurs continuent de faire des progrès très importants en vu d'améliorer son efficacité.

L'Unité Grue de Bejaia (UGB) a pour mission la fabrication de divers types de grues ainsi que les rétro chargeurs. C'est une unité qui dépend de l'Entreprise Nationale des Matériels de Travaux Publics (ENMTP) située à Constantine et issue de la restructuration des ex-Sonacome et SN Métal en 1983. L'ENMTP est spécialisée dans la production, la commercialisation et la maintenance d'une gamme très vaste de produits de matériels de travaux publics : pelles automotrices sur pneus ou sur chenilles, grues automotrices ou chantiers, bétonnières, niveleuses, compacteurs, compresseurs, chargeurs et rétrochargeurs. Ces matériels sont en grande partie constitués d'éléments de structures assemblés par soudage.

On estime aujourd'hui que 60 à 80 % de la production mondiale des aciers est destinée à la fabrication des produits soudés. Leurs compositions chimiques et leurs caractéristiques mécaniques représentent un des éléments essentiels intervenant dans le choix du métal d'apport destiné à leurs jonctions par un procédé de soudage approprié (soudage à l'arc électrique, soudage par résistance électrique, soudage par faisceau d'électrons, soudage au plasma, soudage par laser, ...). La non conformité de la composition chimique d'un acier peut gêner, et la soudabilité, et l'obtention d'une structure nécessaire pour une optimisation de ses caractéristiques mécaniques. Pour ces raisons des travaux de recherches au niveau international sont périodiquement publiés dans ce domaine de constructions soudées

Ce travail traite de la problématique de la soudabilité de l'acier anti-usure de nuance NAXTRA70 avec l'acier ordinaire de nuance E36 pour en faire un élément de structure dénommé habituellement liaison bimétallique (LBM). Ce type de LBM est utilisé par l'Unité Grue de Bejaia pour les besoins de pelles chargeuses et godet d'excavation (figure 01). Le corps de la pelle et celui du godet d'excavation sont en acier E36 alors que les tranchants latéraux et la lame d'attaque, soumis en service aux frottements et à l'usure, sont en acier anti usure de dénomination commerciale Naxtra 70.



**Figure 01.** Pelle chargeuse et godet d'excavation du rétro chargeur. Illustration de la liaison bimétallique Acier anti usure Naxtra 70/ Acier ordinaire E36. En service cette liaison bimétallique est plus particulièrement sollicitée à la flexion répétée.

Avant l'année 2010, l'UGB utilisait pour les parties travaillant au frottement et à l'usure de la pelle chargeuse et du godet d'excavation (les tranchants latéraux et la lame d'attaque) l'acier austénitique fortement allié au manganèse (plus connu sous le nom d'acier Hadfield) de nuance Z120M12 (1.2% C et 12% Mn). Cet acier bien qu'il possède une excellente résistance à l'abrasion, présente néanmoins l'inconvénient de provoquer des fissurations à chaud lors de son soudage avec l'acier E36. Bien que trois types de métaux d'apport ont été utilisés (acier ordinaire à 0,10% de carbone et acier inoxydable à 0,2% de carbone, 12%Ni et 20%Cr sous forme de fils pleins pour le soudage semi automatique à électrode en fil plein (procédé MAG : Métal Active Gaz) et acier austénitique à 0,8% de carbone et 14% de manganèse sous forme de baguette pour le soudage à l'arc électrique), les joints soudés restent sensibles à la fissuration après soudage. A partir de l'année 2011, l'UGB a procédé au changement de l'acier austénitique Z120M12 en le substituant par l'acier anti usure Naxtra 70 avec l'utilisation du fil de soudage en acier à 0,15%C, 1%Mn, 0,5%Si, 0,15%Ni et 0,10%Cr.

Ce travail porte donc sur une caractérisation microstructurale et mécanique de la liaison bimétallique (LBM) acier Naxtra 70/acier ordinaire E36.

Ce mémoire est structuré comme suit :

- ❖ Le premier chapitre est une synthèse des données existantes sur les caractéristiques et les propriétés des aciers en générale et la métallurgie du soudage.
- ❖ Le deuxième chapitre représente les techniques expérimentales utilisées tel que : préparation des éprouvettes (soudage, usinage, contrôle...), et une synthèse des données de la littérature sur le comportement mécanique en traction, flexion et résilience.
- ❖ Le troisième chapitre est consacré à la présentation et l'interprétation des résultats des différentes investigations effectuées.
- ❖ En fin, nous clôturons ce mémoire par une conclusion générale

## Chapitre I

### Revue bibliographique

#### 1.1 Introduction

L'étude bibliographique réalisée tout au long de ce travail est exposée dans le premier chapitre de ce manuscrit. Elle a été rédigée dans la perspective de répondre à plusieurs questions inhérentes à ce travail de magister : présentation des aciers de construction mécanique, description d'une opération de soudage, conséquences thermomécaniques et métallurgiques du soudage, présentation des travaux existants.

Cette présentation s'articule en trois parties.

Les aciers sont d'une importance capitale, puisqu'on les retrouve quasiment dans tous les domaines. Ils sont à l'origine de toutes les révolutions scientifiques et industrielles. Ce progrès est essentiellement dû à la présence d'une vaste gamme de transformations qui permettent de faire varier considérablement les propriétés mécaniques des aciers, en recourant à l'addition d'éléments d'alliages et aux différents mécanismes, thermiques et chimiques. [1]

#### 1.2 Définition de l'acier [1-3]

L'acier est un alliage de fer contenant moins de 2 % de carbone. Il peut être répertorié selon cette teneur en carbone qui fixe son niveau de dureté maximale à l'état trempé. Un acier de haute teneur en carbone sera employé pour sa grande dureté alors qu'un acier de teneur plus faible est moins dur et plus malléable. Il contient généralement de petites quantités d'autres éléments que le fer et le carbone, incorporés, volontairement ou non, au cours de son élaboration. On peut également y ajouter des quantités plus importantes d'éléments d'alliage; il est considéré alors comme un acier allié.

#### 1.3 Classification des aciers

Du fait du nombre élevé d'éléments ajoutés au fer et de la gamme étendue de leur teneur, les aciers présentent un très grand nombre de nuances différentes. On peut classer les divers types d'alliages à base de fer selon leur composition chimique ou selon leur domaine d'utilisation. L'adoption de cette dernière nous permet de recenser quatre familles d'aciers :

- Les aciers au carbone d'usage général,
- Les aciers de traitements thermiques, alliés ou non,
- Les aciers à outils
- Les aciers inoxydables

##### 1.3.1 Les aciers ordinaires ou aciers au carbone

Les aciers ordinaires sont des aciers standards d'usage général qui sont parfois improprement appelés aciers au carbone. Ils sont utilisés tels quels, sans traitement ultérieur, constituent environ 80 % de la production des aciers (tableau 1.01). Outre le carbone, ces aciers contiennent des éléments d'addition et des impuretés dont la présence découle de leur mode

d'élaboration : manganèse (1.2 %), silicium (0.6 %), soufre (0.06 %), phosphore (0.06 %). Ces pourcentages présentent les teneurs limites de ces éléments dans ces aciers.

**Tableau 1.01** : Aciers ordinaires ou aciers au carbone non alliés

Nuance	Pourcentage de carbone (C)	Résistance $R_m$ (MPa) état recuit	Emplois
extra-doux	$C < 0,15$	330-420	tôles pour carrosserie, feuillards, quincaillerie, pièces de forge
doux	$0,15 < C < 0,20$	370-460	charpente métallique, profilés, construction mécanique courante, boulons, fils ordinaires
demi-doux	$0,20 < C < 0,30$	480-550	pièces de machines pour applications mécaniques, pièces ou bâtis moulés, pièces forgées
demi-dur	$0,30 < C < 0,40$	550-650	petit outillage, éléments de machines agricoles, organes de transmission
dur	$0,40 < C < 0,60$	650-750	pièces d'outillage, d'armement, glissières, rails et bandages, ressorts, coutellerie, pièces moulées et traitées
extra-dur	$0,60 < C$	$>750$	outils d'usinage et découpe, câbles, ressorts

Bien qu'on puisse les obtenir avec des propriétés mécaniques variées, les aciers ordinaires ne répondent pas à toutes les exigences d'utilisation. Les principales propriétés des aciers au carbone susceptibles d'être améliorées sont les suivantes :

- la résistance mécanique à l'état normalisé ou à l'état recuit,
- la trempabilité,
- la soudabilité
- la tenue à chaud,
- la résistance à l'usure et à la corrosion.

### 1.3.2 Les aciers de traitements thermiques

On définit les aciers de traitements thermiques par rapport à leur composition chimique, car elle permet de déterminer les traitements qu'on peut leur appliquer en fonction des propriétés désirées. Les aciers de traitements thermiques sont soit des aciers au carbone sans autres éléments d'additions que des éléments standard Mn et Si, soit des aciers alliés contenant en proportions variables d'un ou plusieurs éléments d'addition (Cr, Ni, V, etc.).

### 1.3.3 Les aciers à outils [4]

Les aciers à outils ont une importance technologique primordiale, aucune étape de la fabrication et quel que soit le procédé employé ne peut se passer d'outil. La production mondiale de ce genre d'acier ne représente qu'un faible pourcentage  $\sim 0.1$  %, mais compte par exemple en Amérique plus de 75 nuances. Chacune de ces nuances est destinée à une fonction bien spécifique.

### 1.3.4 Les aciers inoxydables [4]

Aujourd'hui, nous vivons un extraordinaire développement des aciers inoxydables, cela est dû en grande partie à la disponibilité des éléments métalliques entrant dans leur composition, c'est-

à-dire le chrome, le nickel, le molybdène et le manganèse, ce dernier pouvant être utilisé comme substitut au nickel. Un métal est dit inoxydable s'il résiste bien à l'action de l'atmosphère à divers degrés d'humidité et de salinité, à des attaques chimiques (acides, bases, sels, tout autre agent de corrosion). Dans de nombreuses applications devenues de plus en plus sévères en terme de corrosion, on a dû substituer des aciers spéciaux et alliés à l'acier ordinaire. Les aciers réfractaires sont destinés à travailler à chaud (températures supérieures à 550°C), dans des milieux agressifs tels que les milieux oxydants de toute nature (présence d'oxygène, soufre...), réducteurs (hydrogène), les métaux et sels fondus etc. La température de fonctionnement élevée nécessite, de plus, une bonne tenue mécanique à chaud, en particulier une bonne résistance au fluage. La plupart de ces aciers réfractaires sont des aciers inoxydables dont les propriétés sont améliorées par des additions de molybdène, titane, niobium, etc. Les aciers inoxydables comprennent un ensemble de familles d'alliages métalliques qui contiennent tous du fer et du chrome : c'est essentiellement le chrome qui confère aux aciers une bonne résistance à la corrosion par formation en extrême surface d'une très fine couche d'oxyde de chrome non poreuse. Suivant leur teneur en chrome dont le seuil minimal est de 13% et les traitements métallurgiques qu'ils ont subis, ils présentent un large éventail de propriétés. Entre autres, on distingue :

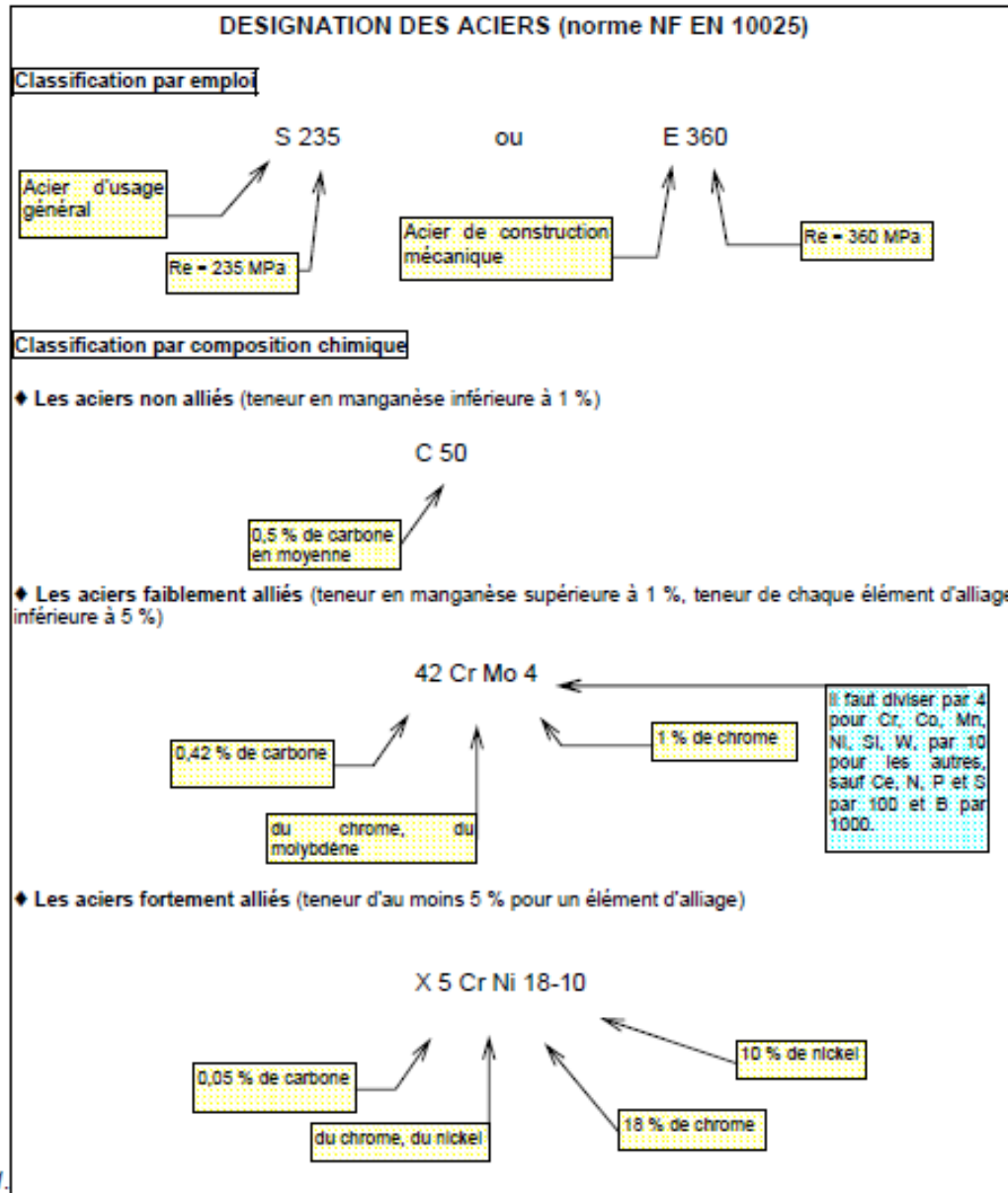
**a) Aciers martensitiques** ; Leur teneur en chrome ne dépasse pas 17% et leur teneur en carbone, qui est fonction de la teneur en chrome peut atteindre 1.1%.

**b) Aciers ferritiques** : Leur teneur en carbone est faible (inférieure à 0.08 %). Un acier qui contient plus de 12 % de chrome demeure ferritique à toutes les températures ; il ne peut plus prendre la trempe martensitique. Ils peuvent contenir entre 12 et 30 % de chrome. Ils sont aux chauffages sensibles au grossissement des grains, ce qui entraîne une dégradation de leur ductilité et de leur ténacité.

**c) Aciers austénitiques** : Malgré les progrès incontestables réalisés, en matière de ductilité et de ténacité, par les aciers inoxydables ferritiques, les aciers inoxydables austénitiques du type Fe-Cr-Ni représentent encore 80 % du marché mondial. Comme le nickel est un élément gammagène, il a tendance à stabiliser l'austénite. Selon leurs teneurs en chrome, en nickel et en carbone, certains aciers peuvent conserver une structure austénitique (C.F.C). L'addition de nickel élément gammagène, en quantité suffisante permet à l'acier de conserver sa structure austénitique à la température ambiante. Dans de nombreux milieux, leur résistance à la corrosion est remarquable, ainsi d'ailleurs que les propriétés mécaniques et leur formabilité. De par leur structure (C.F.C), ils ne présentent aucune transition ductile-fragile; on peut donc les utiliser à très basse température (transport et stockage de gaz liquéfiés, par exemple). Finalement, leur résistance à la corrosion et à l'oxydation permet leur emploi à haute température (jusqu'à 900 ou 1000°C, selon les nuances). A ces propriétés, il faut ajouter une excellente soudabilité opératoire et métallurgique, ce qui facilite la mise en œuvre. La nuance de base X5CrNi18-10 contient 18 % de chrome, 9,5 % de nickel et 0,05 % de carbone. Grâce à ses remarquables propriétés d'emploi, elle couvre environ 80 % des applications des nuances austénitiques. Les aciers inoxydables austénitiques ne peuvent subir aucun durcissement par traitement thermique. On peut toutefois les durcir par écrouissage. Comme les aciers ferritiques (C.C), ils sont sensibles au grossissement des grains au chauffage. Restant ductiles, la croissance des grains n'entraîne aucune fragilisation.

Outre ces trois familles inoxydables, il existe également des aciers qui contiennent, en proportion variable de l'austénite et de la ferrite ce sont des aciers inoxydables **austénoferritiques**.

1.4 Désignation des aciers



Le tableau 1.02 présente un exemple de quatre nuances d'aciers selon la désignation normalisée avec les principales valeurs maximales relatives à la composition chimiques à la coulée, et dans le cas de tôles d'épaisseur inférieure à 30mm, la valeur minimale de la limite d'élasticité  $R_e$  et les valeurs limites de la résistance à la traction  $R$  exprimées en MPa ainsi que la valeur minimale de l'allongement à rupture  $A$  (en %).

**Tableau 1.02 :** Composition chimique et caractéristiques mécaniques en traction de quatre nuances d'aciers de constructions d'usage général [2].

Nuance	C%	P%	S%	$R_e$ min (MPa)	$R$ (MPa)	$A$ min (%)
E24	0.18	0.060	0.050	235	363-441	24
E26	0.20	0.060	0.050	255	412-490	21
E30	0.24	0.050	0.050	274	461-559	21
E36	0.24	0.050	0.050	353	510-608	20

### 1.5 Influence spécifique des éléments d'addition

Les principaux éléments d'addition du fer sont : le carbone, le chrome, le nickel, le tungstène, le molybdène, le vanadium, le manganèse, l'aluminium, le silicium, le titane, le niobium, l'azote... ; ils ont une influence significative sur les caractéristiques. L'action des éléments d'addition dépend essentiellement des deux facteurs décrits ci-dessous :

- Modification du domaine de stabilité de l'austénite. Certains éléments, comme le carbone, le nickel et le manganèse élargissent le domaine de stabilité de l'austénite et abaissent les températures de transformations. Avec des teneurs en nickel ou en manganèse suffisamment élevées, l'acier présente, même à la température ambiante, une structure austénitique (additions de plus de 20% de nickel ou de plus de 10 % de manganèse) Ces éléments sont dits gammagènes. D'autres éléments, par contre dits alphagènes rétrécissent le domaine de stabilité de l'austénite et élèvent les températures de transformations on retrouve là, entre autres, Cr, Mo, Ti, W, V, Nb et Si.
- La tendance des éléments d'addition à se substituer en partie aux atomes de fer de la cémentite  $Fe_3C$  (cas du manganèse) ou à former des carbures spécifiques (MC..). Citons dans l'ordre croissant d'affinité pour le carbone : Cr, W, Mo, V, Ti, et Nb. Par contre Si et Ni ne forment pas de carbures et se retrouvent en solution dans la ferrite. La présence des carbures autres que la cémentite est souvent souhaitable dans les aciers, car ils augmentent la résistance à l'usure et la tenue à chaud. Toutefois, à cause de la stabilité de ces carbures à haute température, il est souvent difficile de les mettre entièrement en solution dans

l'austénite sans provoquer un grossissement des grains, qui est toujours préjudiciable aux propriétés des pièces trempées.

### 1.5.1 Le carbone

Élément fortement gammagène (diagramme de Schaeffler), il contribue à stabiliser l'austénite lors de déformations à froid. Par contre, il peut provoquer la formation de carbures de chrome  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  intergranulaires qui diminuent la résistance à la corrosion intergranulaire.

### 1.5.2 Le chrome

Cet élément d'addition alphagène est particulièrement important. Il augmente la trempabilité de l'acier. Par la formation de carbures de types  $\text{M}_7\text{C}_3$  (1400- 1500 HV), il améliore la résistance à l'abrasion, diminue le grossissement du grain lors de l'austénisation, retarde l'adoucissement lors du revenu et contribue à la réduction de l'oxydation à haute température, augmente la résistance à la corrosion (sauf en milieu sulfurique). Suite à son rôle alphagène pour des teneurs supérieures à 7 %, il renforce la résistance à la fissuration à chaud lors de solidifications rapides (telles que celles rencontrées dans des opérations de soudage).

### 1.5.3 Le nickel

Grâce à son rôle gammagène, il stabilise l'austénite aussi bien à la température ambiante qu'aux températures très basses. Son principal intérêt est d'améliorer la trempabilité et la ténacité. Cependant, il augmente la teneur en austénite résiduelle après trempe ce qui entraîne des difficultés lors du revenu. Il favorise ainsi la mise en œuvre par déformation plastique.

### 1.5.4 Le molybdène

Cet élément donne naissance à des carbures de haute dureté ( $\text{M}_6\text{C}$  –1500HV,  $\text{M}_2\text{C}$  – 2000 HV) qui augmentent la résistance à l'usure à chaud. De plus cet élément ralentit la cinétique d'adoucissement au revenu. Il améliore la ductilité, la mise en solution des carbures diminue la teneur en austénite résiduelle après trempe. Enfin, le **molybdène**, élément alphagène, est fréquemment utilisé à des teneurs de 2 à 5 % pour améliorer la résistance à la corrosion dans presque tous les milieux, à l'exception des solutions nitriques bouillantes. Cependant, lorsque ce type d'alliage est soumis à des températures comprises entre 500 et 1000°C pendant des durées allant de 1 à 1000 heures, on observe la formation de composés intermétalliques dont la présence altère à la fois la résistance à la corrosion et les caractéristiques mécaniques. C'est le cas de l'alliage X2CrNiMo17-13-5. La composition chimique des précipités est fortement dépendante de celle de la matrice et n'est pas forcément stœchiométrique. Pour les nuances non stabilisées dont la teneur en carbone est de l'ordre de 0,05 %, il existe un risque de précipitation de carbures de type  $\text{M}_{23}\text{C}_6$  ( $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ) aux joints des grains après des maintiens de longue durée entre 500 et 800°C. Cette précipitation diminue nettement la résistance à la corrosion intergranulaire. Les aciers inoxydables de cette famille contiennent généralement entre 0,02 et 0,10 % de carbone, 17 à 20 % de chrome, 7 à 25 % de nickel et 2 à 5 % de molybdène.

### 1.5.5 Le silicium

Le silicium, autre élément alphagène, améliore les propriétés d'emploi à haute température mais diminue la résistance à la fissuration lors du soudage. Avec une teneur voisine de 0.3 % en masse, il est utilisé comme désoxydant dans l'acier liquide au stade final de l'élaboration. Des teneurs d'environ 1 % entraînent une augmentation de la limite élastique, de la résistance à

l'oxydation au-delà de 1000°C et de la trempabilité par effet de synergie avec d'autres éléments d'alliages comme le molybdène. Il permet aussi de diminuer la stabilité des carbures  $M_2C$ , ce qui abaisse la fragilité du métal. Comparativement au chrome et à l'aluminium, l'addition de silicium influe d'une manière plus importante sur la résistance à l'oxydation entre 500 et 700°C. L'effet du silicium dans les alliages Fe-Al-Si, est d'établir une couche d'oxyde riche en silicium au dessus de la couche d'oxyde d'aluminium. L'oxyde formé est plus protecteur que l'oxyde d'aluminium et renforce l'effet protecteur de la couche d'alumine.

### **1.5.6 Le niobium**

A un point de fusion beaucoup plus élevé que le titane et présente des propriétés semblables. Il est utilisé dans les métaux d'apport pour soudage à l'arc électrique en lieu et place du titane qui serait volatilisé pendant le transfert dans l'arc électrique.

### **1.5.7 Le titane**

Titane est employé essentiellement en raison de leur très grande affinité pour le carbone. Il évite l'altération des structures métallurgiques lors du travail à chaud, en particulier lors des travaux de soudure où il prend la place du chrome pour former un carbure de titane (TiC) évitant de ce fait la perte du caractère d'inoxidabilité dans les zones affectées par la chaleur (ZAC) du fait de la captation du chrome.

### **1.5.8 Le manganèse**

Le manganèse intervient également dans tous les aciers comme désoxydant ; il augmente la trempabilité, permet d'obtenir des aciers à structure austénitique stable. Mais il participe à la formation de carbures et se trouve dans la cémentite, où il remplace une partie du fer.

### **1.5.9 Le cuivre**

Le cuivre, en petites proportions, améliore la résistance de l'acier à l'oxydation par l'air.

### **1.5.10 Le soufre**

Le soufre il diminue la résistance à la corrosion.

### **1.5.11 le vanadium**

Il affine le grain primaire donc la structure de coulée; puissant générateur de carbures, d'où accroissement de la résistance à l'usure, de la tenue en coupe et à la chaleur; de ce fait, utilisation privilégiée comme composant additionnel d'alliage dans les aciers rapides, de travail à chaud et résistant au fluage à température élevée. Amélioration substantielle de la résistance au revenu, réduction de la sensibilité à la surchauffe. V affinant le grain et inhibant la trempe à l'air suite à la formation de carbures, il favorise l'aptitude au soudage des aciers de traitement. Suite à la constitution de carbures, accroissement de la résistance à l'hydrogène sous pression V rétrécit la zone  $\gamma$  et décale le point Curie en direction de températures plus élevées.

### **1.5.12 le zirconium**

Générateur de carbures; utilisation métallurgique en tant qu'élément additionnel de désoxydation, dénitration et désulfuration car laissant peu d'impuretés. Les additions de Zr dans des aciers de décolletage sulfureux et entièrement calmés exercent une influence favorable sur la formation de sulfures et évitent ainsi une cassure au rouge. Il accroît la longévité des matériaux de confection des conducteurs chauffants et provoque une striction de la zone  $\gamma$ .

## **1.6 Le soudage et ces caractéristiques [5-7]**

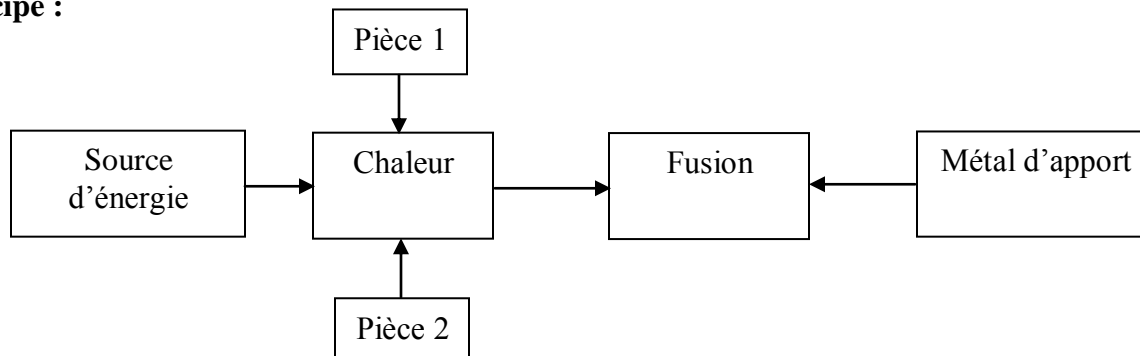
Le soudage aujourd'hui est utilisé dans les domaines de la fabrication et des assemblages métalliques à partir de la microélectronique jusqu'à la fabrication de grands engins. On estime que 60 à 80% de la production mondiale de l'acier est destinée à la fabrication des produits soudés. On

peut souder aujourd'hui les éléments d'épaisseur de 0.01mm jusqu'à 1000mm et plus, on soude presque tous les métaux et alliages utilisés pour la remise en état des pièces et assemblages usés ou endommagés.

### 1.6.1 Définition de soudage [8]

Le soudage est l'opération qui consiste à réunir deux ou plusieurs parties consécutives d'un assemblage métallique, de manière à assurer la continuité entre parties consécutives d'un assemblage métallique, de manière à assembler la continuité entre les parties à assembler.

**Principe :**



La soudure est caractérisée par l'effacement des contours primitifs des bords à assembler, ces derniers étant portés à la température de fusion et nécessitant le plus souvent l'introduction dans le joint, d'un complément de métal nommé « métal d'apport » déposé en une ou plusieurs passes. Si ce métal d'apport est différent de celui de base avec point de fusion plus bas c'est la « Soudure hétérogène », si il n'y a pas d'apport de métal ou apport de métal identique avec même point de fusion c'est « la soudure autogène ».

Une soudure idéale est celle qui assure une continuité parfaite au point de vue des propriétés mécaniques, métallurgiques, et physique entre les pièces assemblés, de telle sorte qu'on ne puisse pas distinguer le joint du métal qui l'entoure.

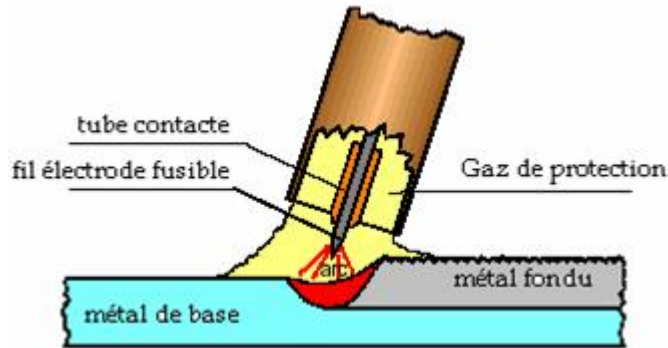
### 1. 6.2. Procédé du soudage semi-automatique "MIG" (métal inerte gas) et "MAG" (métal active gas) [8,9]

La figure I. 01 illustre le principe de soudage semi-automatique sous protection gazeuse. La chaleur nécessaire à la fusion des pièces à souder est fournie par un arc électrique libre qui jaillit entre le fil-électrode et les pièces. La protection de l'arc et du bain de fusion est assurée par un gaz inerte Argon qui donne le nom du procédé **MIG** (**M**étal **I**nerte **G**az) ou par un gaz actif qui peut être du CO<sub>2</sub> ou un mélange argon/CO<sub>2</sub>.

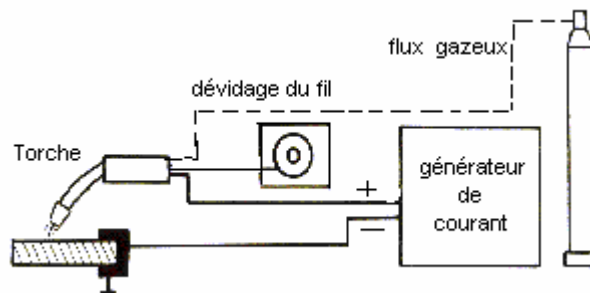
En fonction des conditions d'alimentation de l'arc, le transfert du métal se fait soit par pulvérisation, soit sous forme de grosses gouttes obtenues par courts-circuits progressifs entre l'extrémité du fil d'apport électrode et le bain de fusion (figure I. 2). Selon le mode de transfert, la composition chimique du métal déposé par rapport à celle du métal d'apport évolue plus au moins par volatilisation ou réaction diverses; il est nécessaire d'enrichir les apports pour compenser les pertes. Du point de vue cycle thermique, le procédé MIG est comparable au soudage à l'arc avec électrode enrobée. Il se prête à l'automatisation complète

- **Le soudage MAG (Métal Active Gaz)**

Un arc électrique éclate entre un métal d'apport constitué par un fil-électrode nu ou fourré qui se dévide mécaniquement et la pièce à souder, l'arc et le bain de fusion étant environnés d'une atmosphère protectrice chimiquement active qui peut être du au  $\text{CO}_2$  ou un mélange argon/ $\text{CO}_2$ .



**Figure 1.01** : Schéma de principe du soudage MIG, MAG.



**Figure 1.02** : Schéma d'installation du dispositif de soudage.

### 1.6.2.1 Caractéristiques du soudage semi-automatique Métal d'apport

Il se présente sous forme d'un fil électrode plein ou fourré dont le diamètre varie entre 0.5 et 3.2 mm, enroulé sur une bobine isolante. Le fil fourré est une électrode continue de section tubulaire, dont l'intérieur est rempli de composants analogue à ceux d'un enrobage. Les fils d'aciers sont protégés de l'oxydation par un cuivrage électrolytique ayant pour rôle de faciliter l'arrivée du courant à son passage dans la torche. Il est évident que le choix du métal d'apport dépend de la nature du métal de base à souder, sa qualité est un facteur déterminant sur la vie du joint soudé [10,11]

### 1.6.2.2 Protection gazeuse

Le gaz mis en œuvre est de l'Argon pur ou mélangé avec l'hélium. Il peut être additionné d'une faible quantité d'oxygène pour fluidifier l'acier et faciliter son transfert dans l'arc, le tableau montre les différents gaz de protection et leurs applications.

**Tableau 1.03 : Les différents gaz de protection [12]**

Procédé	Gaz	Application
Métal inerte Gaz M.I.G	Ar	Tous métaux
	He	Métaux légers
	Ar + He Ar + 1 – 2% O <sub>2</sub>	Métaux légers et Alliage de Nickel

Remarquons que la nature du gaz influe sur plusieurs caractéristiques :

- Potentiel d'ionisation (tension d'arc, énergie).
- Pression de l'arc.
- Echange thermique : capacité calorifique, conduction, convection, masse volumique.

### 1.6.2.3 Mise en œuvre

L'électrode est consommée à vitesse constante. Cette vitesse est choisie de manière à pouvoir souder avec l'intensité voulue. La longueur de l'arc varie avec la tension du courant. La source du courant est à caractéristique plate, la vitesse d'avance du fil est constante :

Si l'arc raccourci, la tension de l'arc diminue, l'intensité de courant augmente et la vitesse de fusion s'accroît. Le refroidissement de la torche de soudage se fait par les gaz de protection pour les faibles intensités.

### 1.6.2.4 Domaines d'utilisation

Le soudage MIG convient pour l'assemblage des métaux ferreux et non ferreux. Il permet de souder tous les types de joints en toutes positions et de mettre en œuvre des épaisseurs de 0,5 mm et plus pour le soudage à faible intensité, 6 mm et plus pour le soudage à haute intensité. Le soudage sous protection gazeuse avec fil plein est utilisé en tôlerie, en construction navale, pour le soudage des aciers métalliques et du matériel métallurgique, ainsi que pour la construction des ponts, des engins de levage, des pipelines et des réservoirs de stockage. Avec fil fourré, on l'utilise en charpentes, en construction navale, ainsi que pour la construction des ponts, des presses lourdes, des wagons et des châssis de camion [12]

### 1.6.2.5 Avantages et inconvénients du procédé

Un des principaux avantages du procédé est d'être semi-automatique ou automatique qui ne réclame pratiquement aucune opération de finition. Il permet le soudage de l'acier de l'aluminium en toutes positions et présente une productivité nettement supérieure à celle du soudage manuel à l'arc. Par contre, il demande une main d'œuvre qualifiée ; sous certains régimes, le risque de collage est réel et pas toujours décelable, d'où la difficulté dans le choix des paramètres de soudage [14]. D'autre part, le soudage doit se faire dans une atmosphère calme à l'abri du vent et des courants d'air violents, ce qui pose des problèmes sur les chantiers.

### 1.6.3 Caractéristiques de la soudure [5-7,10-11,13]

Le soudage est le procédé qui permet de reconstituer la continuité métallique entre les surfaces des éléments à assembler. Pour activer les surfaces, la fusion est une méthode très efficace qui permet également le nettoyage des surfaces afin d'assurer l'installation de la liaison métallique. On obtient ainsi, après solidification, un joint homogène de même composition que le métal de base, ou un joint hétérogène dans le cas des métaux différents. Quel que soit le procédé de soudage par fusion, la structure d'une soudure typique d'un alliage est composée de 04 zones principales.

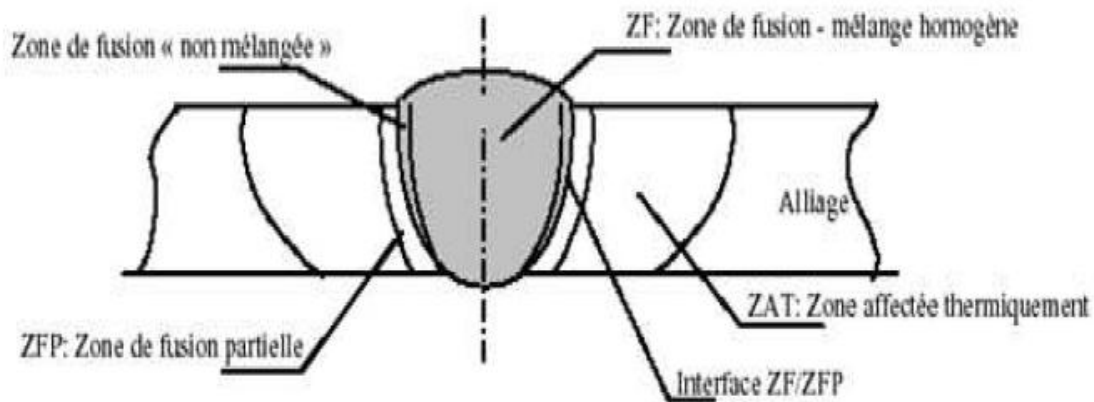


Figure 1.03 : Différentes zones constituant un joint de soudure [14]

- **La zone de fusion (ZF) mélange homogène** : est la région chauffée au dessus de la température du liquidus. La structure du métal de base initial est changée par les processus de fusion et solidification, et la composition peut également varier par évaporation de certains éléments de l'alliage. Un mélange complet des éléments est obtenu par les mouvements de convection forcés.
- **La zone de fusion (ZF) non mélangée** : dans cette zone les forces de convection étant inférieures aux forces de friction des fluides, la composition chimique est identique à celle du métal de base. Même si cette zone est présente dans toutes les soudures, elle n'est facilement visible que dans les soudures utilisant un métal d'apport de composition chimique différente du métal de base.
- **Zone fondu partiellement (ZFP)**: le cycle thermique de soudage s'opère dans cette zone à des températures comprises entre le liquidus et le solidus de l'alliage. Dans certains alliages contenant des inclusions et des impuretés à bas points de fusion, ou des ségrégations d'éléments d'alliages aux joints de grains, la liquation de ces régions microscopiques peut se produire et s'étendre de l'interface de soudure à l'intérieure de la zone de fusion partielle.
- **Zone affectée thermiquement (ZAT)** : est la zone où la température est comprise entre le solidus et une température plus basse mais suffisamment élevée pour permettre des réactions ou des transformations à l'état solide et pour modifier la structure du métal de base.

#### I.6.4 Aspects métallurgiques du soudage de l'acier

Les caractéristiques d'un acier sont fonction de sa nature et de sa composition chimique, la structure étant elle-même liée à la composition chimique et au traitement thermique que subit l'acier.

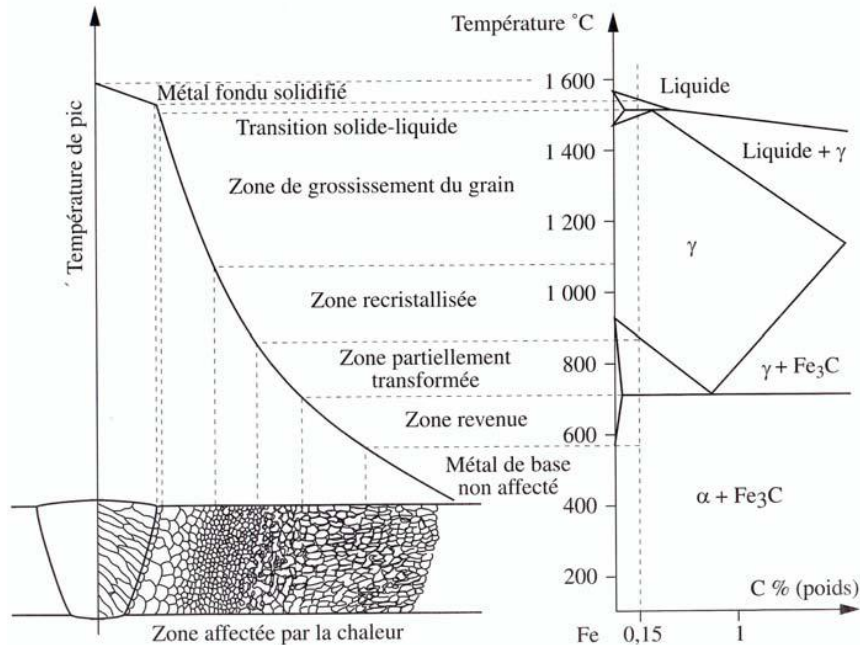
Les principes généraux de la métallurgie (composition chimique, transformation d'état de structure, modifications chimiques), s'appliquent aux caractéristiques mécaniques et chimiques, de la zone fondue des soudures.

L'examen métallographique de la soudure fait apparaître une grande diversité de structures. On observe pour chaque joint soudé divers aspects qui rendent compte de la variation du cycle thermique subi en chaque point examiné. La température et le temps de chauffage ainsi que les vitesses de refroidissement produisent des modifications qui affectent la dimension des grains et les phases en présence.

Parce que le bain de fusion a un volume relativement restreint, son refroidissement est rapide et les cristaux qui se solidifient sont orientés dans la direction du gradient de température. Leur dimension

dépend de la température et de la cinétique de refroidissement. Voir figure 1.04. qui donne une représentation schématique d'un joint soudé perpendiculairement à la ligne de fusion. [5,15].

On distingue plusieurs zones : figure 1.04 [14].



**Figure 1.04 :** Transformation de l'acier dans la zone réchauffée.

### 1 Zone de fusion (structure basaltique)

Qui pour une soudure multi passes est constituée par une alternance de zones thermiquement régénérées et de zones brutes de solidification à grains orientés.

### 2 Zone surchauffée

A granulation grossière où la température maximale atteinte est très élevée (entre 1200 et 1500). Le refroidissement rapide de l'austénite surchauffée, dont le grain atteint des dimensions importantes, donne la structure de Widmannstaetten, structure très fragile. Dans ce cas, la ferrite ou la cémentite pro-eutectoïde précipite isolément au cours de leur migration en direction des joints des grains d'austénite. Leur précipitation s'effectue alors le long des plans de clivage du cristal d'austénite où elle se trouve facilitée. Le constituant pro eutectoïde précipite le long de ces plans sous forme de plages de grandes dimensions. La section de celle-ci par le plan duquel s'effectue l'observation du métal au microscope donne lieu à l'apparition d'aiguilles plus ou moins

Allongées, orientées dans des directions déterminées figure 1.06 Les structures de Widmannstaetten doivent être effacées par un traitement de normalisation, car sinon elles sont la source de la plupart des problèmes soulevés par le soudage des aciers.

### 3 Zone de normalisation

Où la granulation est plus fine que dans le métal de base. La température atteinte est légèrement supérieure à  $A_{c3}$ .

#### 4 Zone à température maximale comprise entre $Ac_1$ et $Ac_3$

C'est une zone de transformations incomplètes. L'austénite résiduelle se transforme en perlite fine, et les grains de ferrite pro-eutectoïde ne se modifient pas. La granulation dans cette zone n'est pas très homogène.

L'austénitisation partielle du métal conduit pour cet acier à une structure à grains très fins.

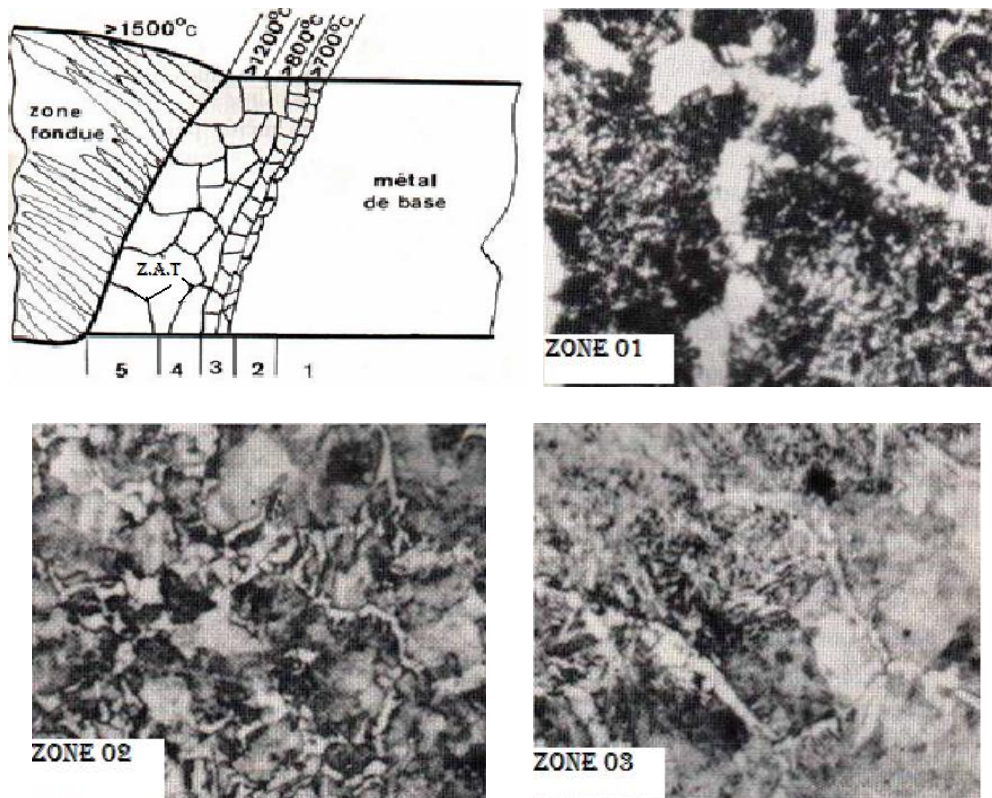
#### 5 Zone de recristallisation

Où la température maximale atteinte est comprise entre 500 et  $Ac_1$ .

Certaines modifications métallurgiques peuvent déjà avoir lieu dans cette zone : précipitations et coalescence en présence d'éléments dispersifs, sur revenu dans certains aciers trempés-revenus, légère globularisation de la perlite dans les aciers normalisés.

#### 6 Métal de base

Où la température maximale atteinte resta inférieure à environs  $500^\circ\text{C}$ , dans laquelle on ne détectera pas de modifications structurales visibles.



**Figure 1.05 :** Transformations structurales dans la ZAT : représentation schématique et micrographies. Dans la Zone 01 :  $\theta < 600^\circ$  et dans la Zone 03 :  $Ac_3 > \theta > Ac_1$  et dans la (zone de liaison) Zone 02 :  $\theta > 1200^\circ$  structure à gros grains [16,19].



Figure 1.06 : Structure de Weidmannstatten [16,19].

## I.6.5 Les défauts de soudure

### I.6.5.1 Définition et différents types de défauts

Une définition possible de ce qu'on entend par défaut pourrait être «Accident géométrique autre que ceux inhérents aux cordons de soudure proprement dits ».

On rencontre donc, entrant dans cette définition, toutes les entailles inhabituelles présentées par le cordon de soudure et son voisinage immédiat. On citera, en se référant par exemple à la classification suivante :

- les fissures.
- les cavités.
- les inclusions solides.
- les manques de fusion et de pénétration.
- les défauts de forme.
- les autres défauts.

Donnons rapidement quelques précisions.

Les fissures sont des ruptures qui sont provoqués en générale au cours de refroidissement, par des contraintes exercées sur les structures au cours de solidification ou de refroidissement, éventuellement fragilisées, notamment par la présence d'hydrogène. [20]

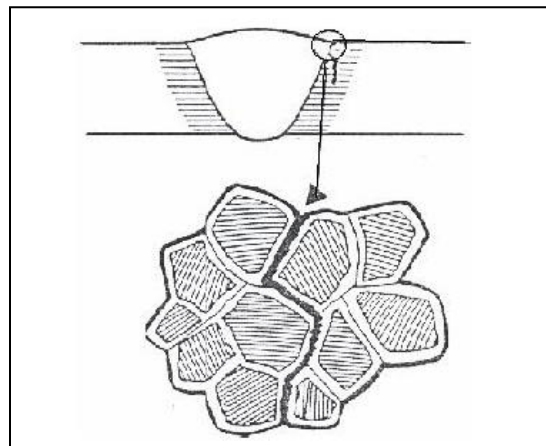
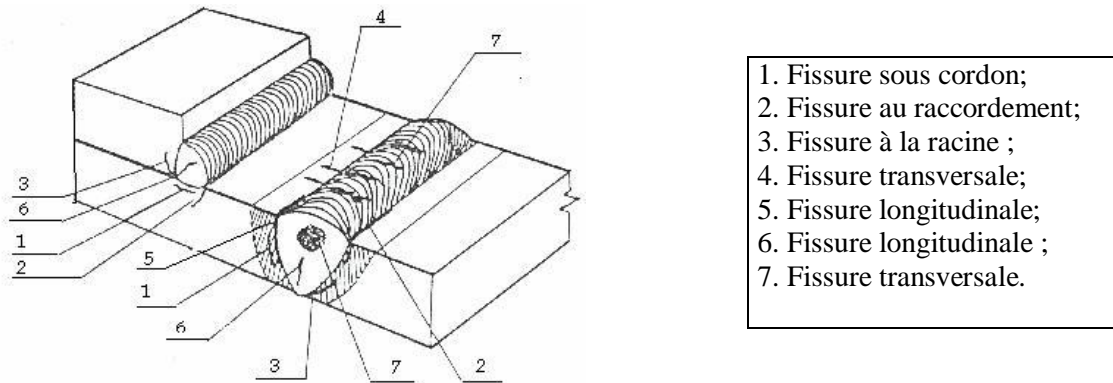


Figure 1.07 : Fissuration du joint de liaison.



**Figure 1.08 :** Fissuration à froid [20].

L'orientation de la localisation des fissures dépend de leur origine. Elles entrent toute fois, d'une manière systématique dans la famille des défauts plans c'est-à-dire des défauts dont l'une des dimensions est très petite devant les deux autres et dont le pourtour constitue, par conséquent, une entaille particulièrement aigue.

Les cavités, appartiennent à la famille des défauts volumiques et peuvent résulter de mécanismes différents. On distinguera :

- Les retassures : suite à un retrait du métal lors de son refroidissement, l'espace vide formé apparaît visuellement à la surface du cordon, ainsi qu'à l'intérieur du cordon.
- Les soufflures formées par des gaz emprisonnés lors de la solidification, qui se présente sous la forme des bulles.
- Les inclusions solides constituées de particules de laitier ou d'oxydes.

Les manques de fusion ou collages résultent d'une absence de liaison entre le métal fondu et le métal de base tandis que les manques de pénétration représentent l'absence de fusion des bords à souder lors de la première passe. Ces défauts sont également des défauts plans.

Les défauts de forme sont particulièrement nombreux et on citera, sans y insister :

- Les surépaisseurs excessives et les effondrements
- Les défauts d'alignement
- Les caniveaux.

Enfin, on rencontre d'autres défauts tels que les coups de meule, les morsures d'arc les coups de burin,...etc. dont l'acuité est variable [21, 22,23].

### I.6.5.2 Les remèdes de la fissuration

Plusieurs solutions peuvent être envisagées pour atténuer et dans beaucoup de cas pour supprimer la fissuration des soudures :

- ✚ Energie de soudage assez élevée afin de ralentir le refroidissement.
- ✚ Le contrôle de la température entre passes toujours dans l'objectif de limiter le refroidissement dans le temps. Il est nécessaire de limiter les contraintes internes et externes en limitant des bridages abusifs et en choisissant judicieusement les séquences de soudage.
- ✚ Élimination de toutes les sources d'hydrogène : calamine, rouille, graisse, peinture, humidité sur les pièces et surtout présence d'humidité dans les enrobages (emploi des électrodes à basses teneur en hydrogène comme certains électrode basique).

### **I.7 Travaux réalisés sur le soudage des pelles chargeuses et Godets d'excavation**

Nous avons recensé trois mémoires de Magister qui ont traité la caractérisation du joint soudé concernant l'assemblage des éléments de pelles chargeuses et de godets d'excavation [24, 25, 26].

Dans [24], il s'agit de la caractérisation d'une liaison bimétallique acier Z120M12/Acier E36 avec deux types de métaux d'apport. Le premier métal d'apport, sous forme de baguette, concerne un acier austénitique à 0,8% de carbone et 14% de manganèse. Le second métal d'apport sous forme de fil plein du diamètre 1,5mm, est un acier inoxydable austénitique à 0,2% de carbone, 20% de chrome et 12% de nickel. Cette étude a permis :

- D'identifier la nature des deux métaux d'apport utilisés pour la réalisation des joints soudés de la LBM Acier austénitique Z120M12/ Acier ordinaire E36
- De préciser la non-conformité des nuances des deux métaux de base
- D'identifier la sensibilité à la fissuration à chaud du métal d'apport en acier inoxydable au chrome nickel et la sensibilité à froid du métal de base en acier E36 en confirmant avec le diagramme de Schaeffler.
- De confirmer la meilleure tenue mécanique en traction, flexion trois points et aux chocs de la LBM réalisée avec le joint soudé en acier inoxydable au chrome nickel avec le courant de soudage de 36V.

Dans [25], il s'agit d'une analyse des conséquences thermiques au refroidissement à l'état solide dans un cordon de soudure, effectué par le procédé du soudage MIG avec un métal d'apport sous forme de fil plein ( $\varnothing 1,2\text{mm}$ ) en acier ordinaire à 0,16% de carbone, 1,65% de manganèse et 1,09% de silicium. Le métal de base utilisé concerne l'acier ordinaire E36 utilisé dans la construction de la pelle chargeuse. L'assemblage soudé de cet acier est le siège des contraintes résiduelles élevées, localisées au voisinage des fissures du cordon de soudure. Leurs présences jouent un rôle majeur vis-à-vis de certains modes d'endommagement telle que la corrosion sous contraintes, la fatigue, la rupture brutale et l'augmentation de la température de transition ductile/fragile. Pour diminuer le taux de ces contraintes qui sont la cause principale de la rupture fragile de ces cordons de soudure en vue d'assurer la sécurité des assemblages réalisés, l'influence des traitements thermiques à différents stades de la fabrication a été mise en évidence. En effet, un traitement de recuit de détente a été optimisé (température=550°C, temps de maintien : 60mn). Ce recuit a permis de diminuer la température de transition ductile/fragile tout en améliorant les propriétés mécaniques du cordon de soudure (comportement en flexion, résilience et dureté).

Pour ce qui de la référence [26], les travaux concernent le soudage multi passes de l'acier E36 en vue d'examiner l'influence des phénomènes thermiques brusques sur les structures métallurgiques et les caractéristiques mécaniques du cordon de soudure. L'utilisation des moyens destructifs et des critères de rupture comme l'intégrale J ainsi que les moyens non destructifs à savoir les ultrasons ont été utilisés pour la prospection des fissures. Le fil utilisé est le même que celui de la référence [25]. Le comportement à la rupture du joint soudé présente une ductilité à la température ambiante et une tendance à la fragilité à  $-20^{\circ}\text{C}$ . L'observation de faciès de rupture met en évidence le caractère ductile de la cassure où l'on constate des ruptures franches avec des traces d'arrachements métalliques. La propagation des fissures se fait par coalescence et croissance des cavités qui naissent au voisinage de la fissure principale.

Pour rappel, notre travail est consacré à l'utilisation du nouveau métal de base qui est l'acier anti usure Naxtra70 en vue de l'assembler à l'acier E36. Ce nouveau métal de base remplace l'acier austénitique Z120M12 fortement allié au manganèse qui présente l'inconvénient de développer une fissuration à chaud comme il a été mis en évidence dans [24].

## Chapitre II

### Matériaux et techniques expérimentales

#### 2.1 Présentation des matériaux

##### 2.1.1 Présentation du matériau NAXTRA70

Selon la fiche technique du fournisseur, il s'agit d'un acier anti-usure à grains fins et à haute résistance. NAXTRA70 est une dénomination commerciale d'origine d'Allemagne et classé selon le symbole S690QL1 ; ESItE 690 de la norme DIN EN 10137-2 (cf. annexe 2).

Ses caractéristiques mécaniques (résistance à la traction  $\sigma_m$ , limite d'élasticité  $\sigma_e$ , l'allongement à rupture A, dureté Brinell HB et résilience à 0°C) sont consignés dans le tableau 2.01.

**Tableau 2.01** : caractéristiques mécaniques de l'acier anti usure Naxtra70

Caractéristiques	$\sigma_m$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_e$ (N/mm <sup>2</sup> )	A (%) min	HB <sub>30</sub>	Kv min (J) $\pm 0^\circ\text{C}$
Valeur	790-940	690	16	240-285	27

##### 2.1.2 Présentation de l'acier E36

C'est un acier ordinaire normalisé (norme NFA 36-201) largement employé dans la construction mécanique tels que engins, éléments de grues, récipients et appareils, charpentes de machines et leur éléments, axes, pignons, doigts de chenilles...etc.

Ses caractéristiques mécaniques (résistance à la traction  $\sigma_m$ , limite d'élasticité  $\sigma_e$ , l'allongement à rupture A, dureté Brinell HB et résilience à 0°C) sont consignés dans le tableau 2.02.

**Tableau 2.02** : caractéristiques mécaniques de l'acier E36

Caractéristiques	$\sigma_m$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_e$ (N/mm <sup>2</sup> )	A (%) min	HB <sub>30</sub>	Kv min (J) $\pm 0^\circ\text{C}$
Valeur	520 - 752	360	16	155 - 185	27

##### 2.1.3 Présentation du métal d'apport

Le métal d'apport utilisé par l'UGB pour l'assemblage par soudage bout à bout par le procédé semi-automatique sous protection **de gaz actif (CO<sub>2</sub>)** des deux aciers Naxtra70 et E36 dans notre étude est un fil plein de dénomination commerciale SG2. Sa composition selon la fiche technique du fournisseur est présentée tableau 2.03.

**Tableau 2.03** : composition chimique du métal d'apport

C%	Si	Mn
0,08-0,12%	0,4-0,6%	1,0-1,3%

C'est un fil de soudage de diamètre 1,20mm en acier peu allié, destiné au soudage sous protection gazeuse. Il est commercialisé sous forme de bobine avec un poids : 15 Kg (figure 2.01)



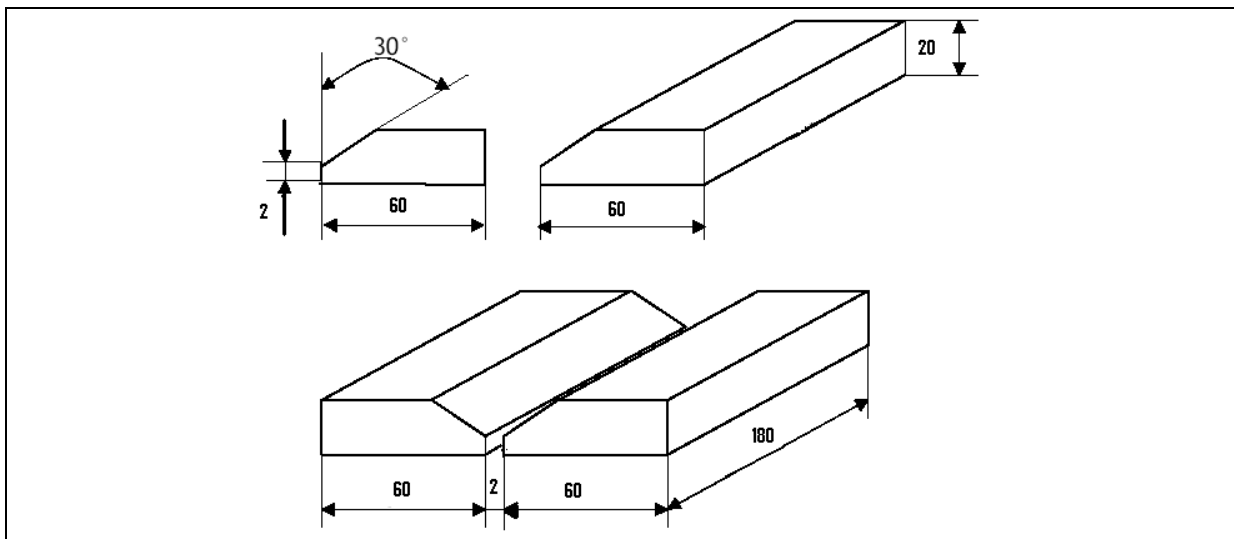
**Figure 2.01** : bobine du fil de soudage type SG2 de poids 15Kg

## 2.2 Réalisation des maquettes de liaisons bimétalliques acier NAXTRA70/acier E36

### 2.2.1 Préparation des plaquettes

Les deux aciers NAXTRA70 et E36 sont importés par l'unité grue de Bejaia (UGB) sous forme de tôles fortes d'épaisseur 20mm pour le besoin de conception de pelles et godet d'excavation de rétro chargeurs. Pour chaque type de tôles, nous avons prélevé deux plaquettes de 180mm de longueur et 60mm de largeur.

Pour l'exécution de l'assemblage des plaquettes des deux métaux de base (soudures bout à bout), nous avons réalisé par fraisage sur un coté de chaque plaquette un chanfrein à 30° d'inclinaison pour obtenir un « V » de 60° (figure 2.02). Le soudage bout à bout des deux plaquettes chanfreinées à 30° a été opéré en laissant un jeu de 2 mm à partir de la base des chanfreins des deux plaquettes.



**Figure 2.02 :** Schéma de principe pour l'assemblage bout à bout des deux métaux de base acier NAXTRA70 et acier E36 sous forme de tôles fortes de 20mm d'épaisseur.

### 2.2.2 Soudage des plaquettes

Le soudage utilisé dans ce travail est du type soudage à l'arc sous protection de gaz actif (CO<sub>2</sub>) avec fil électrode fusible de diamètre 1,2mm (métal d'apport).

Compte tenu de l'épaisseur des plaquettes (20mm), la réalisation du joint soudé a nécessité quatre passes avec l'utilisation des paramètres consignés dans le tableau 2.04 et qui sont ceux de la fiche techniques de l'entreprise.

**Tableau 2.04 :** paramètres de soudage pour la réalisation de la liaison bimétallique acier NAXTRA70/Acier E36

Les passes	Courant de soudage U (Volt)	Vitesse de défilement du fil (métal d'apport)
1 <sup>er</sup> passe (passe de Pénétration)	Tension U = 21.1Volts	V = 3.5 m/mn
2 <sup>eme</sup> passe	Tension U = 27 Volts	V = 5 m/mn
3 <sup>eme</sup> passe	Tension U = 28 Volts	V = 5.3 m/mn
4 <sup>eme</sup> passe	Tension U = 32.5 Volts	V = 6.5 m/mn

Après le réglage du poste de soudage sur les paramètres calculés et l'exécution de l'opération de soudage on obtient deux tôles assemblé comme le montre la figure 2.03 illustre la maquette de la liaison bimétallique acier NAXTRA70/Acier E36 assemblée par le métal d'apport en acier ordinaire de dénomination SG2 (cf. §2.1.3)



**Figure 2.03 :** La forme de la plaquette de la liaison bimétallique NAXTRA70/ E36 (après soudage)

### 2.2.3 Prélèvement des échantillons

Les deux maquettes élaborées sont par la suite fraisée (surfacées) jusqu'à une épaisseur de 16 mm tout en veillant à assurer le parallélisme des faces.

Les conditions optimisées de fraisage sous lubrification pour ce surfacage sont :

- Vitesse de rotation de la broche  $N = 250$  tr/mn pour l'ébauche et 355 tr/mn pour la finition ;
- Avance de la table de la machine  $A = 36$  mm/mn pour l'ébauche et 31.5 mm/mn pour la finition ;
- Profondeur de pénétration de l'outil dans la pièce  $P = 0.5$  mm pour l'ébauche et 0.3 mm pour la finition.

La figure 2.03 illustre la forme de la maquette après fraisage jusqu'à une épaisseur de 16mm.

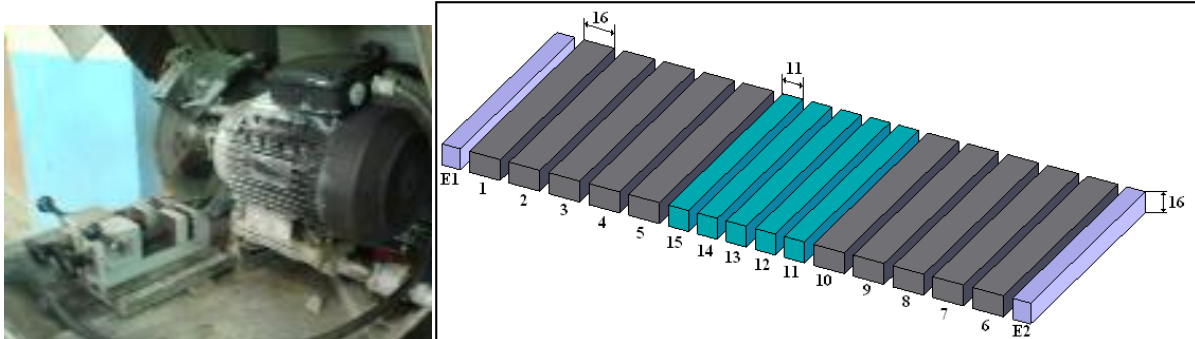


**Figure 2.04 :** La forme de la plaquette de la liaison bimétallique NAXTRA70/ E36 (après fraisage)

Ces maquettes sont ensuite découpées en éprouvettes parallélépipédiques comme indiqué sur la figure 2.04 à l'aide d'une tronçonneuse sous lubrification.

Les bords E1 et E2 sont des chutes non utilisées à cause de non uniformité du cordon de soudure.

Les échantillons (1, 2, 3, 8, 9, 10) sont destinés à la réalisation des éprouvettes de flexion trois points, les échantillons (4, 5, 6, 7) pour les essais de traction et les échantillons (11, 12, 13, 14, 15) pour les essais de résilience.



**Figure 2.05 :** Scie tronçonneuse, plan de découpe, dénomination et dimensions des échantillons prélevés sur la maquette de la liaison bimétallique NAXTRA70/E36.

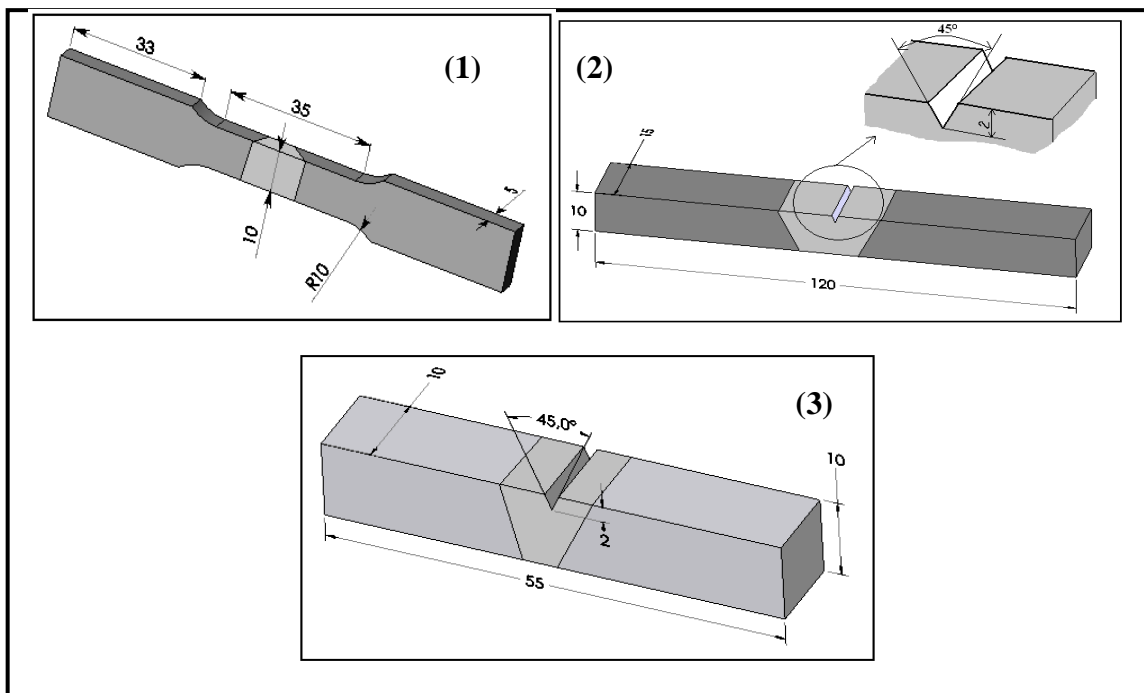
### 2.2.4 Préparation des éprouvettes

Chaque échantillon parallélépipédique d'épaisseur 16 mm a été repris au fraisage pour réaliser les éprouvettes finales destinées aux trois types d'essais programmés (traction, flexion et résilience). Les éprouvettes sont réalisées aux dimensions normalisées (figure 2.06).

Les paramètres de fraisage optimisés sont comme suit :

- N = 250 tr/mn pour l'ébauche et 355 tr/mn pour la finition ;
- A = 36 mm/mn pour l'ébauche et 31.5 mm/mn pour la finition ;
- P = 0.5 mm pour l'ébauche et 0.3 mm pour la finition

La figure 2.05 illustre les trois types d'éprouvettes aux dimensions normalisées pour les essais respectifs de traction, flexion trois points et résilience.



**Figure 2.06 :** Forme géométrique des trois types d'éprouvettes réalisés aux dimensions normalisées. (1) éprouvettes de traction, (2) éprouvette de flexion trois points, (3) éprouvette de résilience [Norme]

## 2.3 Présentation des essais mécaniques utilisés dans notre étude

### 2.3.1 Réalisation des essais de traction et de flexion

Les essais de traction et de flexion sont réalisés à l'Université de Tizi-Ouzou sur une machine universelle de type Ibertest de capacité 100KN (capteur de force) (cf. figure 2.07). La gamme vitesse de déplacement de la traverse mobile varie de 0.5 à 500 mm/mn. Celle utilisée pour nos essais est de 10mm/mn.

Les résultats sont recueillies par des capteurs et grâce à un logiciel, les données sont traitées puis affichées sur un écran d'ordinateur (figure 2.07b).

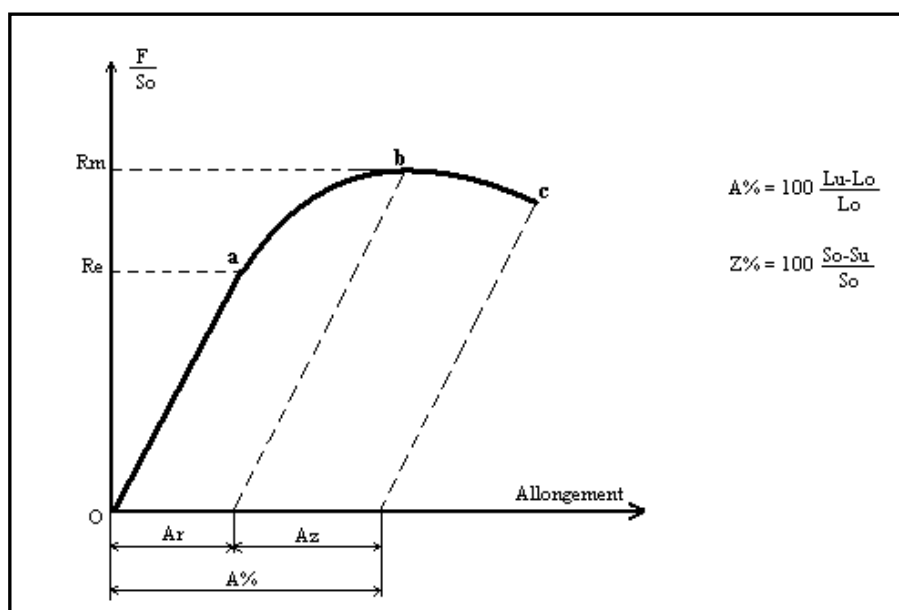


**Figure 2.07 :** (a) Machine universelle marque IBERTEST (a) pilotée par ordinateur (b)

#### 2.3.1.1 Essai de traction

L'essai de traction consiste à exercer une déformation croissante sur un barreau prismatique ou cylindrique et à mesurer l'évolution de la force nécessaire pour le déformer jusqu'à sa rupture.

L'examen du diagramme effort-déformation (ou courbe de traction, figure 2.08) fait apparaître un domaine élastique 'Oa' dans lequel les déformations sont réversibles et proportionnelles à la charge appliquée et un domaine plastique 'ac' dans lequel les déformations sont permanentes. De 'a' à 'b', les déformations sont homogènes, tandis que de 'b' à 'c', elles ne sont plus homogènes (elles sont localisées) par suite de la striction qui précède la rupture.



**Figure 2.08 :** Courbe conventionnelle de traction

### 1. Grandeurs conventionnelles

- L'allongement pour-cent 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  $L_0$ .

$$A = 100 \frac{L_u - L_0}{L_0} \quad (01)$$

- La striction est la réduction localisée des dimensions transversales de l'éprouvette se produisant 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 ultime de section transversale  $S_0 - S_u$  produite par l'essai à la section initiale  $S_0$ .

$$Z = 100 \frac{S_0 - S_u}{S_0} \quad (02)$$

- La résistance à la traction  $R_m$  est la charge unitaire qui correspond à la charge maximale supportée par l'éprouvette.

$$R_m = F_m / S_0 \quad (03)$$

- La charge unitaire à la limite apparente d'élasticité s'appelle aussi, par abréviation, limite apparente d'élasticité  $R_e$  (ou parfois limite d'écoulement). 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 alors que celle-ci diminue.

$$R_e = F_e / S_0 \quad (04)$$

### 2. Grandeurs rationnelles

Les grandeurs et caractéristique définis précédemment sont celle tirées d'une courbe de traction conventionnelle, elle sont liées à l'état initial de l'éprouvette, si l'on rapporte ces grandeurs à l'état instantané de cette dernière (section  $S$  et longueur  $L$ ) on aura :

$$\sigma_e = \frac{F_e}{S} \quad (05)$$

Avec l'hypothèse de la conservation de volume après déformation plastique :

$$S \cdot L = S_0 \cdot L_0 \quad \Rightarrow \quad S = S_0 \cdot L_0 / L$$

Ce qui donne

$$\sigma_e = \frac{F_e \cdot L}{S_0 \cdot L_0}$$

$$\Rightarrow \sigma_e = R_e \cdot \frac{L}{L_0}$$

$$\Rightarrow \sigma_e = R_e \cdot \frac{L_0 + \Delta L}{L_0}$$

$$\text{Avec : } e = \frac{\Delta L}{L_0}$$

$$\Rightarrow \sigma_e = R_e \cdot (1 + e) \quad (06)$$

Ainsi, la limite d'élasticité rationnelle  $\sigma_e$  est supérieure de  $(1+e)$  fois  $R_e$  (limite d'élasticité conventionnelle).

Par un raisonnement analogue en remplaçant  $F_e$  par  $F_m$ , on déduit  $\sigma_m$  représentant la résistance rationnelle (vraie) à la traction :

$$\sigma_m = R_m \cdot (1+e) \quad (08)$$

On définit aussi la déformation vraie de l'éprouvette  $\varepsilon$ , qui caractérise la somme des déformations relatives de l'éprouvette à tout instant et qui s'exprime par  $\varepsilon = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = Ln \frac{L}{L_0}$

$$\text{Ce qui donne} \quad \varepsilon = Ln (1+e) \quad (09)$$

### 3. Modélisation sommaire

Ces modélisations sont les premières qui sont habituellement utilisées pour décrire analytiquement le comportement d'une éprouvette métallique soumise à la traction.

- **Comportement élastique**

Dans le domaine élastique, la déformation longitudinale est proportionnelle à la contrainte. Ce comportement est traduit par la relation unidimensionnelle.

$$\sigma = E \varepsilon \quad (10)$$

E étant le module de Young (exprimé en Mpa).

- **Comportement plastique**

Les mécaniciens ont souvent cherché une représentation analytique du domaine plastique des courbes obtenues en traction. Pour notre cas nous avons opté pour la relation d'Hollomon des aciers doux.

#### 4. Le coefficient de consolidation ou coefficient d'écrouissage « n »

On a présenté, dans le paragraphe précédent  $\varepsilon$ , la déformation vraie,

$$\varepsilon = Ln (1+e) \text{ autrement écrit sous la forme } \varepsilon = \ln \frac{L}{L_0}$$

Dans l'hypothèse de la constance du volume de la partie calibrée de l'éprouvette ( $S_0 L_0 = S L$ ), on en déduit :

$$\varepsilon = \ln \frac{L}{L_0} = \ln \frac{S_0}{S} \rightarrow e^{-\varepsilon} = \frac{S_0}{S} \rightarrow S = S_0 \cdot e^{-\varepsilon}$$

On aura donc  $S = S_0 \cdot e^{-\varepsilon}$

La valeur de la force appliquée est alors :  $F = S_0 \cdot e^{-\varepsilon} \sigma$  (car  $\sigma = F/S$ )  $= F/S_0 \cdot e^{-\varepsilon}$

Le maximum de l'effort est atteint pour  $dF = 0$ , soit

$$dF = \frac{\partial F}{\partial \sigma} d\sigma + \frac{\partial F}{\partial \varepsilon} d\varepsilon = S_0 e^{-\varepsilon} d\sigma - S_0 \sigma e^{-\varepsilon} d\varepsilon = 0 \rightarrow (d\sigma - \sigma d\varepsilon) = 0$$

Ceci amène à retrouver la relation :

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \sigma \quad (11)$$

Le domaine plastique dans une courbe de traction pour les aciers doux obéit à la loi de Hollomon :

$$\sigma = K \varepsilon^n \quad (12)$$

Avec K et n des constantes propres au matériau

$$\text{Au maximum de la charge, avant la striction, on aura : } d\sigma/d\varepsilon = n K (\varepsilon_s)^{n-1} \quad (13)$$

$\varepsilon_s$  représente l'allongement plastique maximale et homogène juste avant striction ; les relations (11) et (13) donnent :

$$\sigma = nK\varepsilon_s^{n-1} \quad (14)$$

Ainsi, pour les aciers qui vérifient la loi de Hollomon nous pouvons conclure que :

$$nK\varepsilon_s^{n-1} = K\varepsilon^n \quad (15)$$

Soit, à la charge maximale  $\varepsilon_s = n$  (16)

Comme  $\varepsilon_s$  représente l'allongement plastique maximal et homogène avant la striction (début de rupture de l'éprouvette), le coefficient  $n$  définit l'aptitude d'un matériau à se déformer en expansion. Autrement dit, il caractérise la ductilité du matériau et l'aptitude à répartir la déformation plastique sur tout le volume de l'éprouvette.

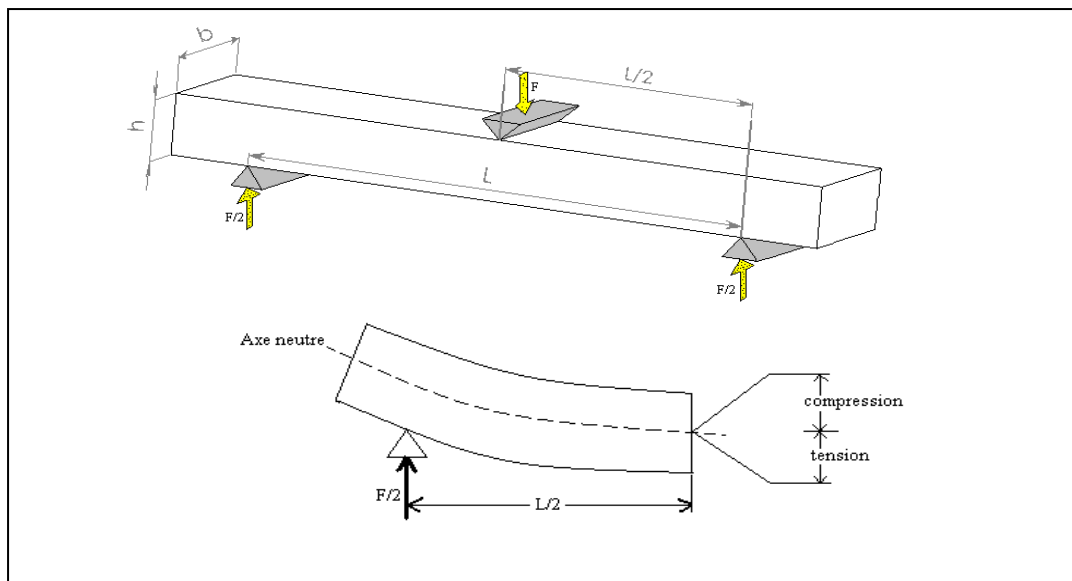
### 2.3.1.2 Essai de flexion trois points

C'est un essai très utilisé dans la caractérisation mécanique des matériaux soudés, permettant de déterminer l'aptitude au pliage d'un métal et sa tendance à la fissuration.

#### 1. Principe de l'essai

L'éprouvette d'essai de forme plate est placée sur deux appuis puis chargée progressivement en son milieu jusqu'au fléchissement (figure 2.09).

Les contraintes varient d'une façon continue de part et d'autre de la fibre neutre. Les fibres du côté concave de l'éprouvette sont comprimées, tandis que celles du côté convexe, sont tendues.



**Figure 2.09 :** Représentation schématique de l'essai de flexion trois points et état des contraintes de part et d'autre de la fibre neutre lors du chargement de l'éprouvette.

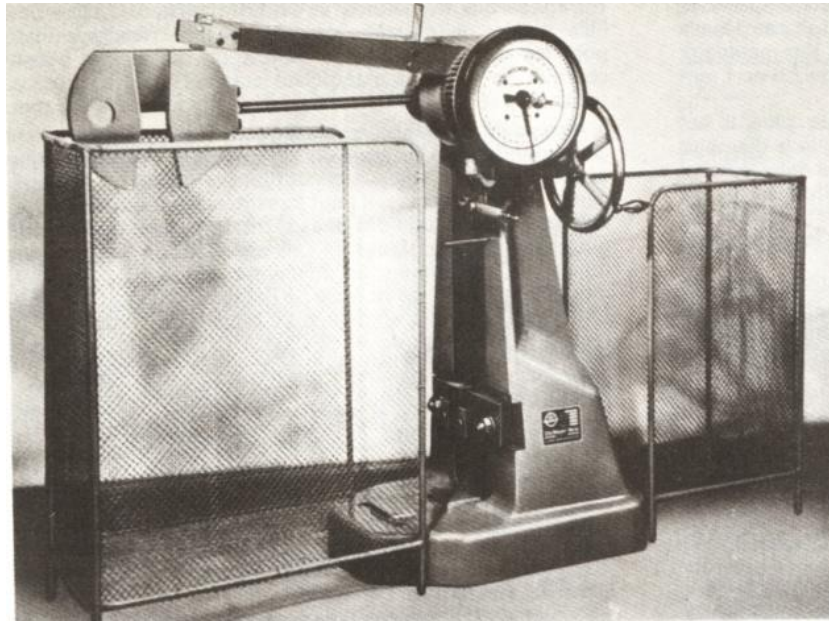
La valeur de la contrainte sur les faces extérieures d'une éprouvette à section rectangulaire est donnée, en valeur absolue, par la formule :

$$|\sigma| = \frac{3}{2} \left( \frac{FL}{bh^2} \right)$$

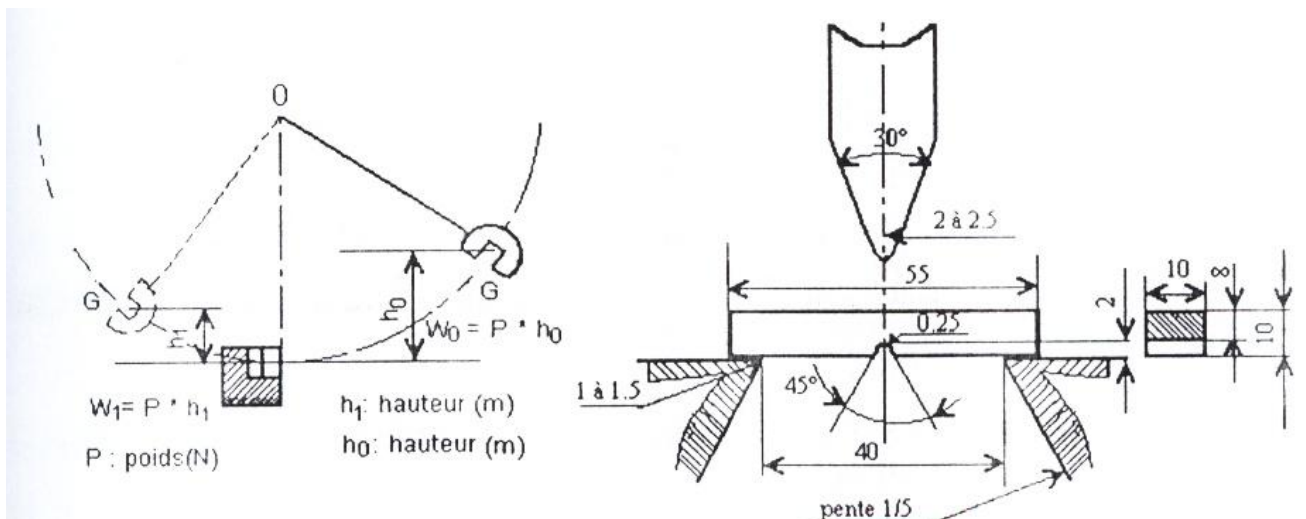
Où  $b$  est la largeur de l'éprouvette,  $h$  sa hauteur,  $F$  la charge appliquée en son centre. La distance entre les appuis (entraxe) est définie par  $L$ .

### 2.3.1.3 Essai de résilience (essai de flexion par choc)

La machine d'essai utilisée de capacité 300J (figure 2.09a) est celle de l'Unité Grue de Béjaïa (UGB). L'énergie de rupture en joule, de l'éprouvette testée est lue directement sur le cadran de la machine. C'est un mouton pendule équipé d'un marteau oscillant dans un plan vertical autour d'un axe O (figure 2.09b). La masse comporte un couteau destiné à rompre l'éprouvette. L'appareil est équipé d'un système qui permet de mesurer l'énergie absorbée par la rupture de l'éprouvette. Dans ce système, la masse est abandonnée à elle-même à partir d'une hauteur déterminée par construction. L'éprouvette se trouve au point bas. La masse entraîne une aiguille qui se déplace devant un cercle gradué. La mesure de l'angle de remontée, avec et sans rupture de barreau, permet le calcul du travail absorbé par cette rupture. L'éprouvette est constituée d'un barreau de section 10 mm x 10 mm, de longueur 55 mm, entaillé en son milieu par une entaille en V (figure 2.10b).



(a) Mouton pendule Charpy de capacité 300J



(b) Schéma du principe de l'essai de résilience

Figure 2.10 : Mouton pendule d'essai de résilience (flexion par choc) et schéma de principe

- Le couteau est écarté de la verticale à une hauteur correspondant à une énergie de départ

$$W_0 = m \cdot g \cdot h = 300 \text{ Joules.}$$

- On libère le pendule et dans sa chute, le couteau brise l'éprouvette.

- On mesure la hauteur à laquelle remonte le pendule pour calculer l'énergie non absorbée

$$W_1 = m \cdot g \cdot h'$$

- On calcul la différence  $W_0 - W_1 = m \cdot g \cdot (h - h') = W$

Avec m : masse du pendule ;

g : apesanteur terrestre ;

h : hauteur initiale du pendule ;

h' : hauteur après rupture de l'éprouvette.

La résilience s'exprime en joules ou en joules par centimètre carré (Cm<sup>2</sup>) si en rapporte à la section sous entaille de l'éprouvette, ce qui permet de définir la résilience (ou ténacité) du matériau par :

$$KCV = \frac{\text{Énergie absorbée par la rupture}}{\text{surface sous entaille en cm}^2} = \frac{W_0 - W_1}{S} \quad [\text{Joule / Cm}^2]$$

## 2.4 Examens Métallographiques

L'examen métallographique a pour but la mise en évidence de la microstructure de l'échantillon. L'analyse micrographique se fait sur des surfaces polies attaquées chimiquement. L'obtention de ces surfaces nécessite une suite d'opérations allant du prélèvement des échantillons à l'attaque chimique. Dans ce qui, nous donnons le détail de chaque opération.

### 2.4.1 Examens Macrographique

#### 2.4.1.1 Introduction

L'attaque chimique d'un échantillon pour relever la structure macrographique fait apparaître entre les zones constitutives de la soudure qui se manifestent par des intensités d'attaque ou de coloration différentes les unes des autres. Ces différences traduisent les variations de constitution et de structure engendrées par l'opération de soudage.

De plus l'examen macrographique fournit des informations sur les anomalies (défauts) géométriques, compte tenu des renseignements qu'il fournit l'examen macrographique des soudures sont utilisé pour diverses raisons.

#### 2.4.2 Découpage des échantillons

De chaque plaquette soudée nous avons prélevé une éprouvette.

##### 2.4.2.1 Polissage

Après le découpage, nous passons les éprouvettes sur une surfaceuse à disque abrasif (polisseuse). C'est une opération mécanique qui permet d'avoir des états de surface semblable à celui d'un miroir. Ce polissage s'effectue en plusieurs étapes avec des disques en papiers abrasifs de différentes granulométrie des grains abrasif en carbure de silicium (du plus gros au plus fin : 180, 400, 600, 800, 1000, 1200 et 4000) qui tournent avec une vitesse de 150 tr/mn, cette opération se fait sous aspersion d'eau pour éviter l'échauffement de l'échantillon.

Le polissage fin est terminé de finition à la pâte diamantée répartie sur un feutre fin imbibé d'éthanol. Après chaque polissage les échantillons sont nettoyés à l'éthanol.

### 2.4.2.2 Attaque chimique

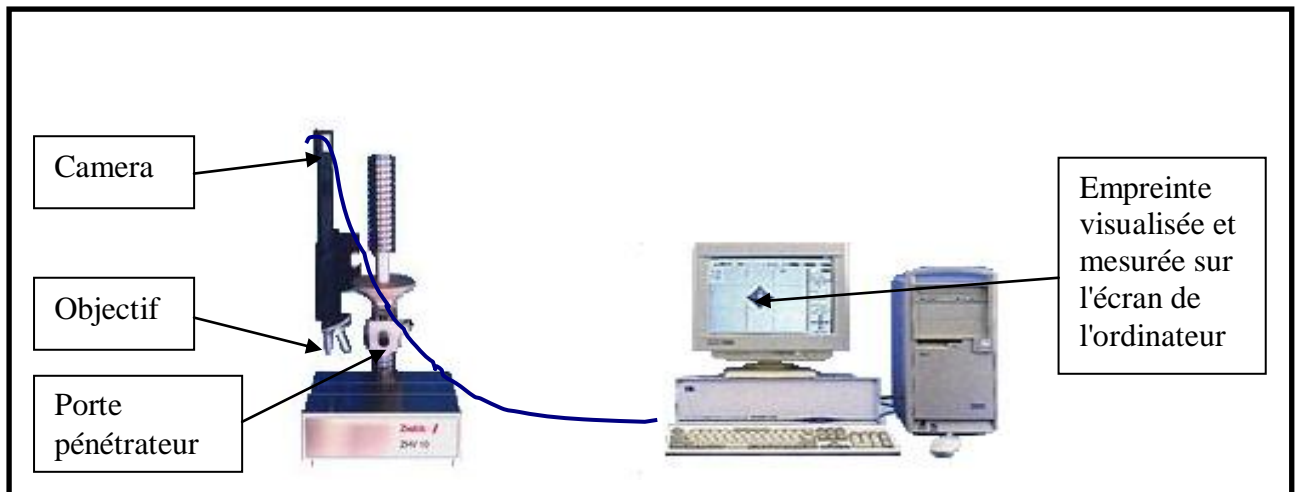
Les examens métallographiques nécessitent au préalable une attaque chimique appropriée à chaque nuance pour mettre en évidence les structures. Cette opération donne une différence de couleur entre les différentes phases, car elle est directement liée à la différence de vitesse de réaction des constituants.

Le réactif chimique utilisé pour notre acier (acier faiblement allié) est le Nital 4 %

(4 ml d'acide nitrique et 100 ml d'éthanol) une fois étalée sur la surface de l'échantillon, un temps de maintien de 2 à 5 seconds est respecté; cette opération doit être suivie d'un rinçage à l'eau distillée.

### 2.4.3 Microscope métallographique

L'ensemble des observations métallographiques ont été réalisés au microduromètre (Zwick HV 10 et Zwick-M et ZHV2-M). Pour le microduromètre Zwick HV 10 est équipé d'une caméra CCD, l'ensemble est relié à un ordinateur qui permet le traitement des images.



**Figure 2.11** : Dispositif du microduromètre Zwick HV10 piloté par ordinateur (Laboratoire de technologie des matériaux et génie des procédés, université de Bejaia).

#### 2.4.3.1 Examen au microscope

La métallographie microscopique a pour but de mettre en évidence les constituants de la microstructure. La microscopie est faite à l'aide d'un microscope optique utilisant une source lumineuse qui envoie la lumière sur l'échantillon à travers un dispositif optique. Les rayonnements réfléchis par l'échantillon sont repris par la lentille objective qui donne une première image intermédiaire qui grâce à un miroir semi-réfléchissant, elle est renvoyée vers l'œil du manipulateur à travers une lentille oculaire. L'appareil permet également d'obtenir des photos sur un microordinateur à travers une caméra solidaire.

#### 2.4.4.1 Essai de dureté Vickers

Les essais de dureté ont été réalisés sur une machine de dureté universelle Diastor de l'UGB (figure 2.12). Nous avons choisi l'essai Vickers, qui est effectué avec un pénétrateur en diamant de forme pyramide à base carrée. L'angle entre deux faces opposées de cette pyramide est de  $136^\circ$ . La valeur de la dureté Vickers HV est le rapport de la charge  $F$  qui est égale à 30 Kgf à la surface  $S$  de l'empreinte comme le montre la relation (1)

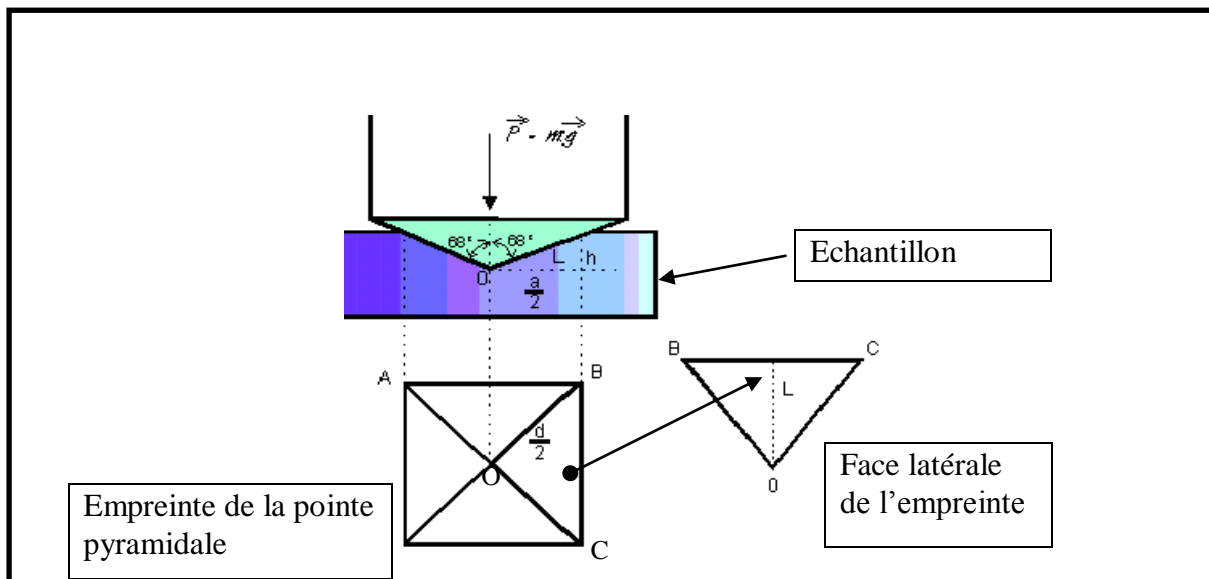
$$HV = F / [d^2 / 2 \sin (136^\circ / 2)] \dots \dots \dots (1)$$

$$HV = 1.8544 \times 0.102 F / d^2$$

Avec d: Diagonal de l'empreinte et F: Charge appliqué



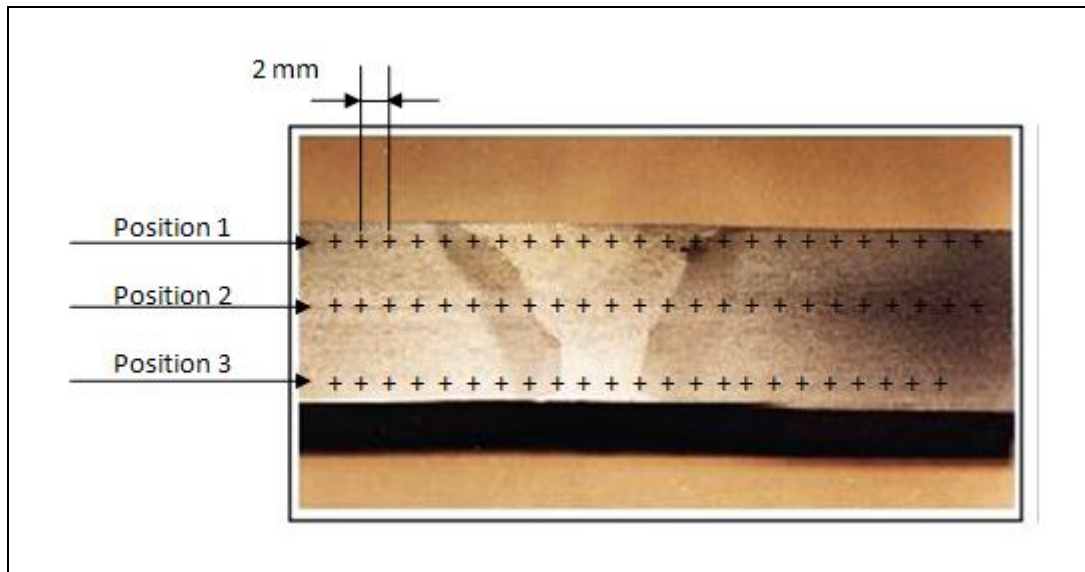
**Figure 2.12 :** Machine de dureté universelle Brinell, Vickers et Rockwell de l'UGB



**Figure 2.13 :** Principe de l'essai de dureté Vickers

#### 2.4.4.2 Mode opératoire

Pour conclure à des résultats satisfaisants, on prend trois positions sur une éprouvette (figure 2. 14), la première sur la passe de finition, la deuxième entre la passe de finition et la racine et la troisième position sur la racine, avec un pas de 02 mm. Ce qui nous permis de voir l'influence de la température de soudage sur la dureté du cordon.

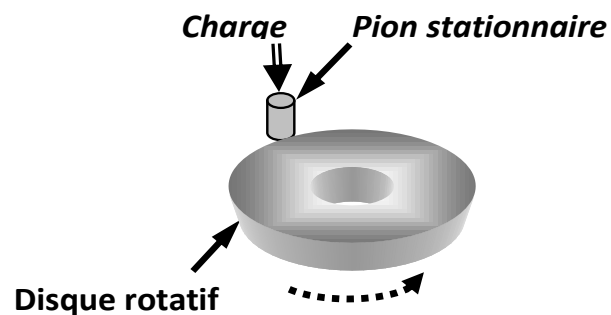


**Figure 2.14 :** Localisation des Positions des empreintes de dureté Vickers

Les faciès de rupture des éprouvettes rompues en traction, flexion et résilience ont été réalisés au microscope électronique à balayage (MEB) Philips de type XL30 de l'Université de Tizi Ouzou.

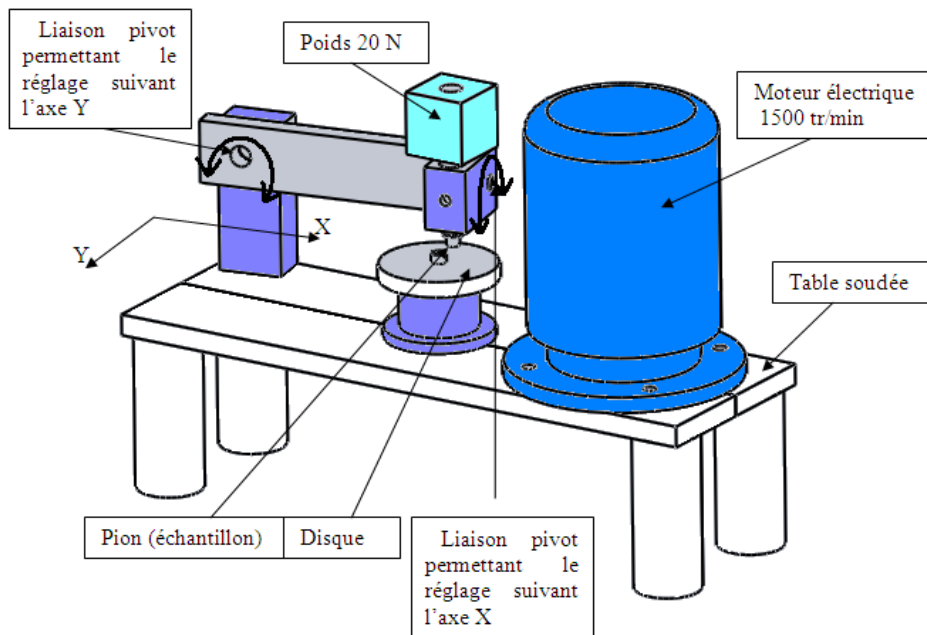
### 2. 5 Essai d'usure

Le test d'usure des deux métaux de base et du joint soudé (métal d'apport) réalisé dans notre étude est celui du type configuration pion fixe (stationnaire)-disque rotatif (figure 2.15) conférant un contact surfacique pion-disque.



**Figure 2.15 :** Configuration pion sur disque permettant le test d'usure en contact surfacique

Le dispositif utilisé est celui conçu par Abdelatif Belamri dans le cadre de sa thèse de Doctorat (Département de Génie Mécanique, Université de Béjaïa). Son schéma de principe est présenté figure 2.16.



**Figure 2.16 :** Schéma du dispositif d'essais d'usure avec la configuration pion stationnaire-disque rotatif

En réglant le mécanisme au niveau des liaisons pivots suivant X et suivant Y nous pouvons assurer un contact plan sur plan de la surface de l'échantillon et celle du disque tournant entraîné par le moteur via une liaison engrenage de rapport 4,16.

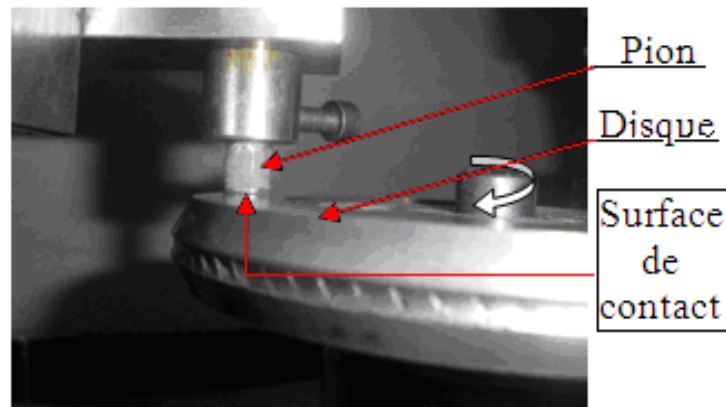
Le moteur électrique tournant à 1500 tr/min nous donne une rotation du disque de 360 tr/min. Avec un diamètre du disque de 98 mm, nous obtenons une vitesse de glissement de 110 m/min, ce qui fait que pour une distance de glissement de 5 Km le temps d'essai sera de 45 minutes.

La figure 2.17 illustre le dispositif du test d'usure avec la configuration pion stationnaire-disque rotatif



**Figure 2.17 :** Dispositif d'essais d'usure avec la configuration pion stationnaire-disque rotatif

La figure 2.18 met en évidence la position de la surface du pion sur la surface du disque rotatif. Le disque rotatif est en acier rapide présentant une dureté de 900HV0, 5.



**Figure 2.18 :** Détail sur la position du pion par rapport à la surface du disque rotatif mettant en évidence un bon contact surfacique du revêtement avec la surface du pion.

Le comportement à l'usure sous une charge de 20N est évalué en termes de perte de masse relative en % selon la relation suivante :

$$(\Delta m/m_0) \times 100 = [(m_0 - m) / m_0] \times 100 \quad [\%]$$

Avec  $m_0$  : masse initiale et  $m$  : masse finale en mg

Les mesures de  $m_0$  et  $m$  sont assurées au moyen d'une balance analytique d'une précision de 0,1mg.

### Chapitre III Caractérisation des liaisons bimétalliques

#### 3.1 Analyse de la composition chimique

##### 3.1.2 Composition chimique des matériaux utilisés

La liaison bimétallique (LBM) Naxtra70 / E36 est réalisée par soudage à l'arc sous protection gazeuse CO<sub>2</sub> avec électrode en fil plein d'acier de type SG2. Trois échantillons ont été prélevés d'une plaquette de la LBM : le métal de base Naxtra70 et le métal de base E36 prélevés loin du joint soudé et le métal déposé (joint soudé). Ces trois échantillons ont été analysés au spectromètre de masse (fluorescence des rayons X) du centre de recherches et de développement de Boumerdes (CRD). L'analyse du carbone est obtenue à l'analyseur de carbone. Cette analyse est impérative pour notre étude pour comparer les compositions chimiques de ces trois aciers à celles des fiches techniques du fournisseur.

Le tableau 3.01 rassemble la composition chimique obtenue des trois matériaux de base ainsi que leur composition chimique selon la fiche technique.

**Tableau 3.01** : Composition chimique des matériaux utilisés (Naxtra 70, E36 et métal d'apport)

Eléments	C (%)	Ni (%)	Cr (%)	Mn (%)	Mo (%)	Si (%)	Cu (%)	B (%)	V (%)	Al (%)	S (%)	P (%)	Fe (%)
Résultat d'analyse NAXTRA70	0.18	0.81	<b>0.95</b>	<b>1.01</b>	0.46	0.20	-	-	-	-	0.003	-	Bal.
Composition chimique Selon la fiche technique du fournisseur	0,20	2	1,50	1,70	0,70	0,80	0.50	0.005	0,12	-	0,010	0,020	Bal.
Résultat d'analyse E36	<b>0.103</b>	<b>0.045</b>	<b>0.200</b>	<b>1.297</b>	-	<b>0.338</b>	<b>0.038</b>	-	<b>0.010</b>	<b>0.027</b>	<b>0.006</b>	<b>0.011</b>	Bal.
Composition chimique Selon la norme AFNOR	0.17	0.027	0.027	1.365	-	0.365	0.013	-	≤0.02	0.029	0,010	0.028	Bal.
Résultat d'analyse du métal d'apport déposé (joint soudé)	0.164	0.164	0.11	<b>1.10</b>	0.05	<b>0.50</b>	-	-	-	-	0.003	-	Bal.
Composition du métal d'apport selon la Fiche technique du fournisseur	0.08-0.12			1.0-1.3		0.4-0.6							Bal.

Il ressort de ces résultats que l'acier Naxtra70 est un acier faiblement allié au Ni, Cr, Mn alors que l'acier E36 et le métal d'apport pour former le joint soudé sont des aciers ordinaires. Leur teneur en carbone fait qu'il se classe dans la classe des aciers mi-durs (pour Naxtra70 et métal d'apport) et acier doux pour l'acier E36. Leur microstructure à l'état d'équilibre est du type ferrite perlitique.

Au vu de la composition chimique selon la fiche technique comparativement aux résultats d'analyse, ces trois nuances d'aciers sont non conformes. Pour l'acier Naxtra70, la teneur des éléments principaux (Ni, Cr, Mn et Si) sont nettement inférieure à la teneur requise et sans la

présence des éléments Cu, B et V. Pour l'acier E36, il est moins chargé en carbone mais nettement plus chargé en Ni, Cr et Cu. Le métal d'apport est aussi à considérer comme non conforme avec la présence des éléments Ni et Cr et une teneur assez élevée en carbone (0,16% au lieu de 0,12% max).

On note aussi que le pourcentage du Manganèse est plus important dans les trois matériaux (>1%) par rapport au Soufre. Cette présence notable de Mn permet l'élimination partielle du Soufre (Mn est un désulfurant) car la présence de ce dernier au niveau des joints des grains affaiblit la cohésion du métal [25].

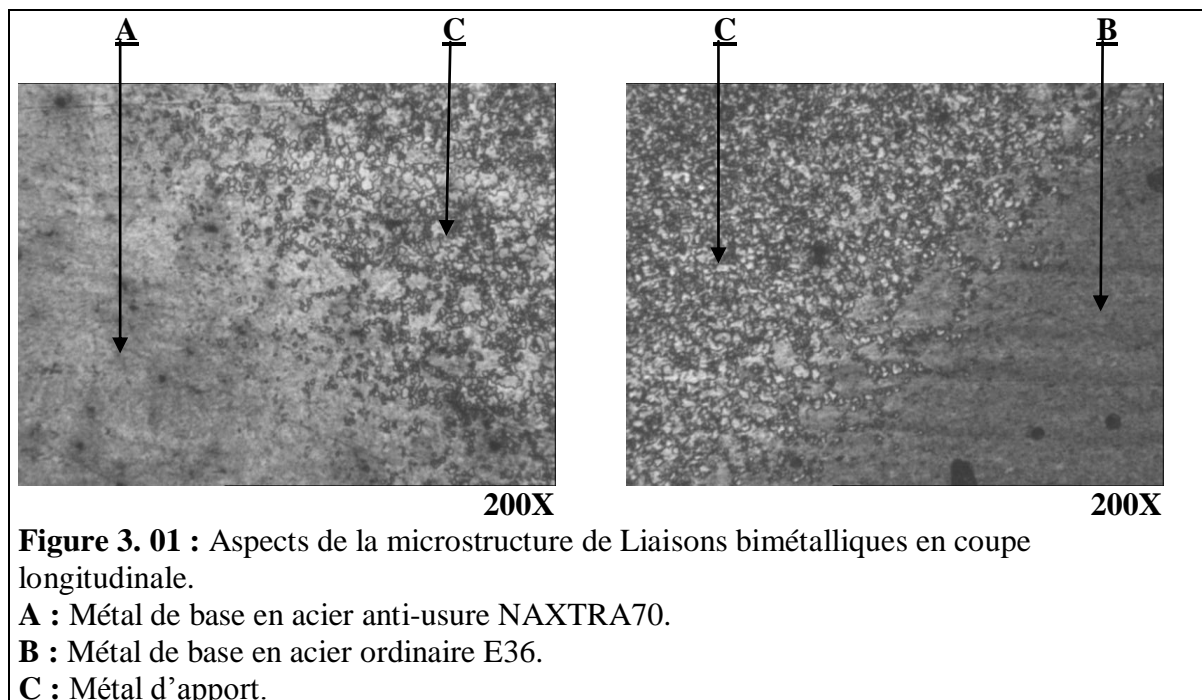
### 3. 2. Observations métallographiques

#### 3. 2. 1. Microstructure de la liaison bimétallique Naxtra70/E36

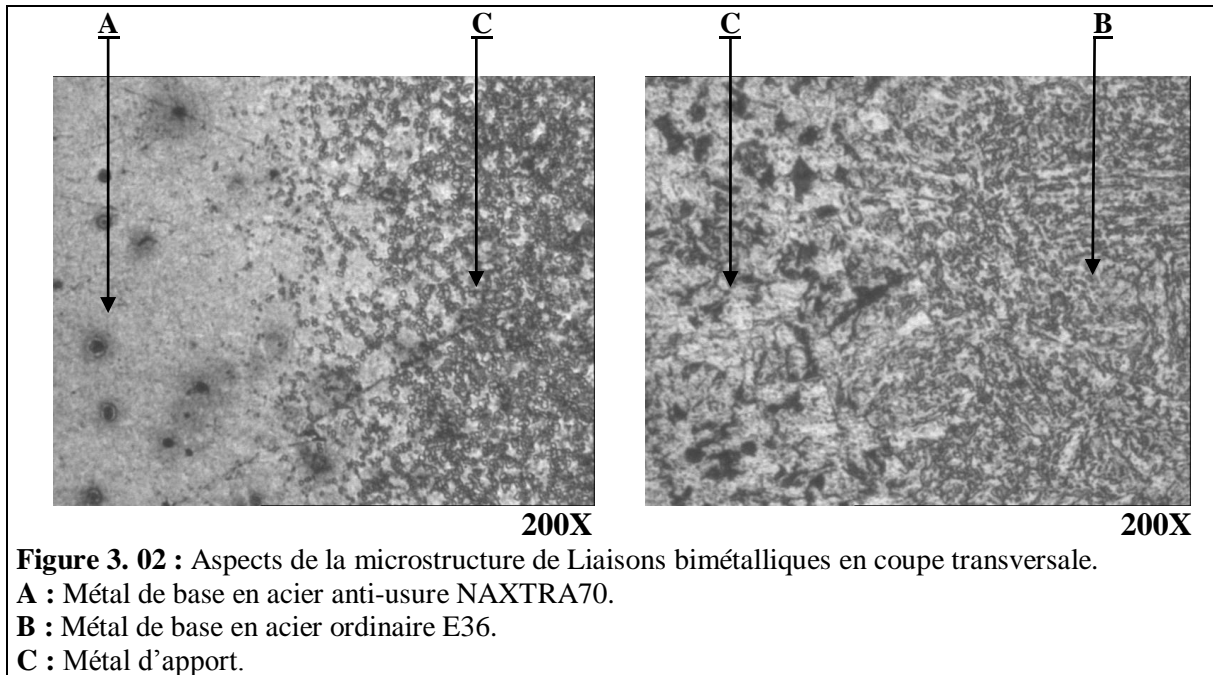
Les figures 3. 01 présente l'aspect de la microstructure en coupe longitudinale des deux interfaces acier Naxtra70/acier E36.

En mettant en comparaison les deux figures, on voit bien la différence de la zone de dilution au niveau des deux types d'interfaces. Les zones de dilution des cotés des interfaces Naxtra70/Métal d'Apport (MA) et MA/E36 développent des morphologies hétérogènes tout le long de l'interface Naxtra70/MA (figure 3. 01). Ceci n'est pas le cas pour l'interface MA/E36 où la zone de dilution après refroidissement présente une frontière homogène (Figure 3. 01). Il semblerait de ce fait que l'interface MA/E36 est moins sensible au courant que l'interface Naxtra70/MA, où la zone de dilution développe une morphologie hétérogène qui semble être liée à la variation du courant lors des trois passes.

Cette hétérogénéité pourrait donner lieu à des zones ne remplissant pas les conditions requises pour les propriétés mécaniques optimales du joint soudé de la liaison bimétallique.



La figure 3. 02 présente l'aspect de la microstructure en coupe transversale des interfaces NAXTRA70/MA et MA/E36 après l'attaque chimique au nital. La morphologie est hétérogène le long de l'interface NAXTRA70/MA, on remarque qu'il existe des formes dendritique ou cellulaire pour l'interface MA/E36.



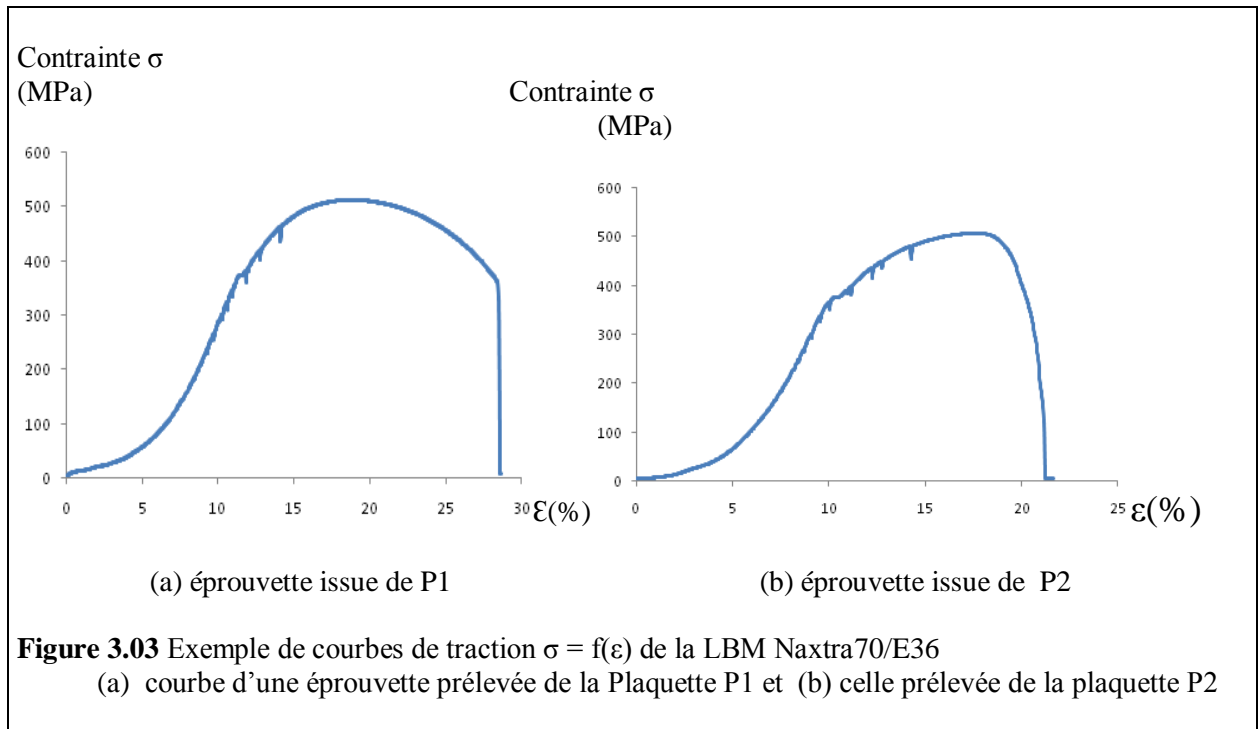
### 3. 3. Caractérisation mécanique des liaisons bimétalliques

#### 3. 3. 1. Essai de traction

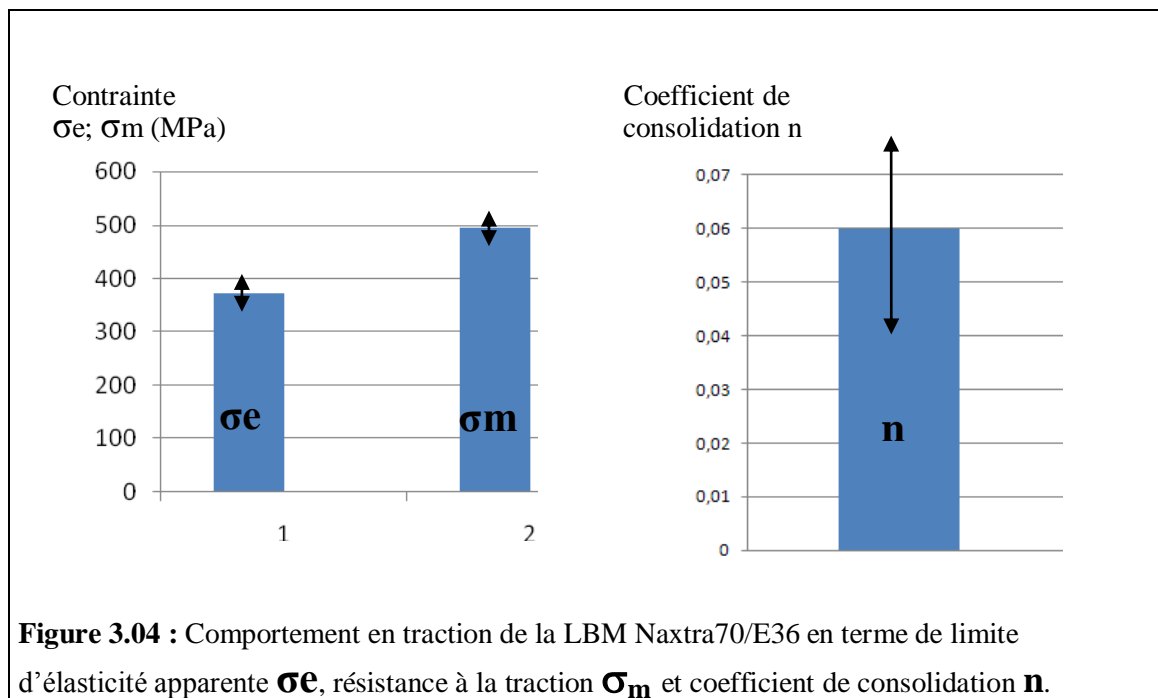
Les résultats dépouillés sur l'ensemble des courbes de traction obtenues concernent trois caractéristiques rationnelles. Il s'agit de la limite d'élasticité apparente  $\sigma_e$ , la résistance à la traction  $\sigma_m$  et le coefficient de consolidation  $n$ . Les résultats sont présentés sous forme d'histogrammes indiquant la valeur moyenne des éprouvettes testées et prélevées des deux plaquettes élaborées.

Il y a lieu de signaler que la rupture pour les trois types d'essais a lieu au niveau du métal d'apport (joint soudé). La vérification est faite par observation à la loupe binoculaire au grossissement 100.

La figure 3.03 illustre l'aspect typique des courbes de traction de la LBM Naxtra70/E36. Les deux courbes issues de la traction de deux éprouvettes, l'une prélevée de la plaquette P1 et l'autre prélevée de la plaquette P2 reflète la reproductibilité de l'essai de traction et met en évidence le comportement en traction d'un acier doux avec la présence d'un petit palier d'écoulement vers une contrainte de l'ordre de 380 MPa.



La figure 3.04 rassemble les caractéristiques rationnelles en traction de la LBM Naxtra70/E36 soudé avec un métal d'apport en acier ordinaire à 0,16% de carbone. Les valeurs moyennes représentent six essais de traction (trois éprouvettes de traction par plaquette). La dispersion des résultats est très faible pour la limite d'élasticité apparente et la résistance à la traction alors que pour le coefficient de consolidation représentant la ductilité, il est de  $\pm 0,02$ .

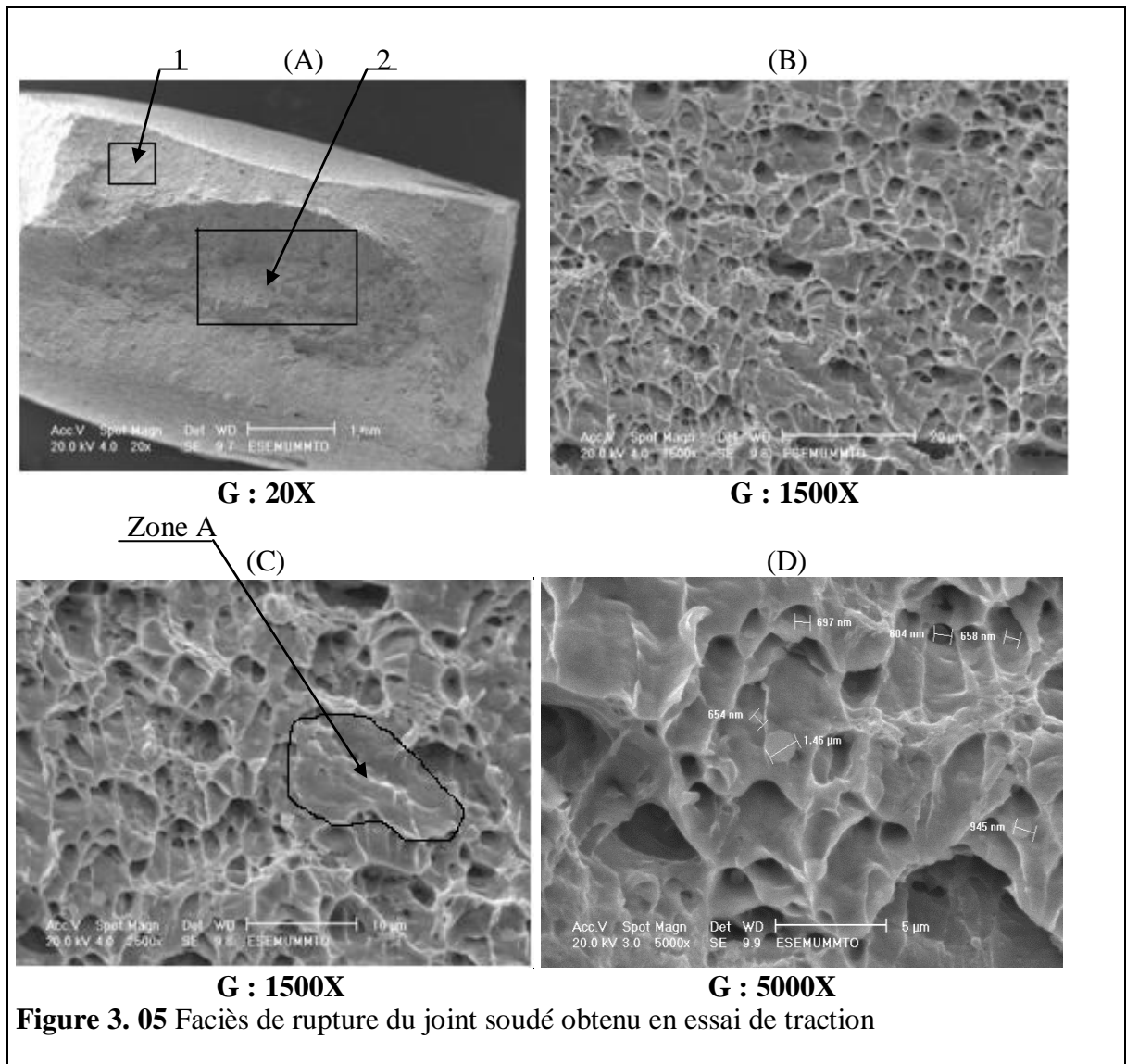


Il est remarquable de constater que cet ordre de grandeur de ces trois caractéristiques mécaniques en traction est le même lorsque le joint soudé est réalisé en acier austénitique présentant une teneur en carbone de 0,8% avec 14%Mn [24]. En effet pour une liaison bimétallique acier

austénitique anti usure Z120M12/acier E36 réalisé avec un métal d'apport en acier austénitique (à, 8%C et 14%Mn), [24] a obtenu les caractéristiques suivantes :  $\sigma_e = 340\text{MPa}$  ; la résistance à la traction  $\sigma_m = 530\text{MPa}$  et  $n=0,08$ . La rupture pour l'ensemble des six essais de traction a eu lieu dans le joint soudé. Au regard de ces résultats, il semblerait que le métal d'apport en acier ordinaire utilisé dans notre travail semble intéressant du fait qu'il présente la même résistance en traction que le joint soudé en acier austénitique fortement chargé en carbone et manganèse sauf que ce dernier est un peu plus ductile que notre métal d'apport ( $n=0,08$  contre  $n=0,06$ ).

➤ **Etude des faciès de rupture:**

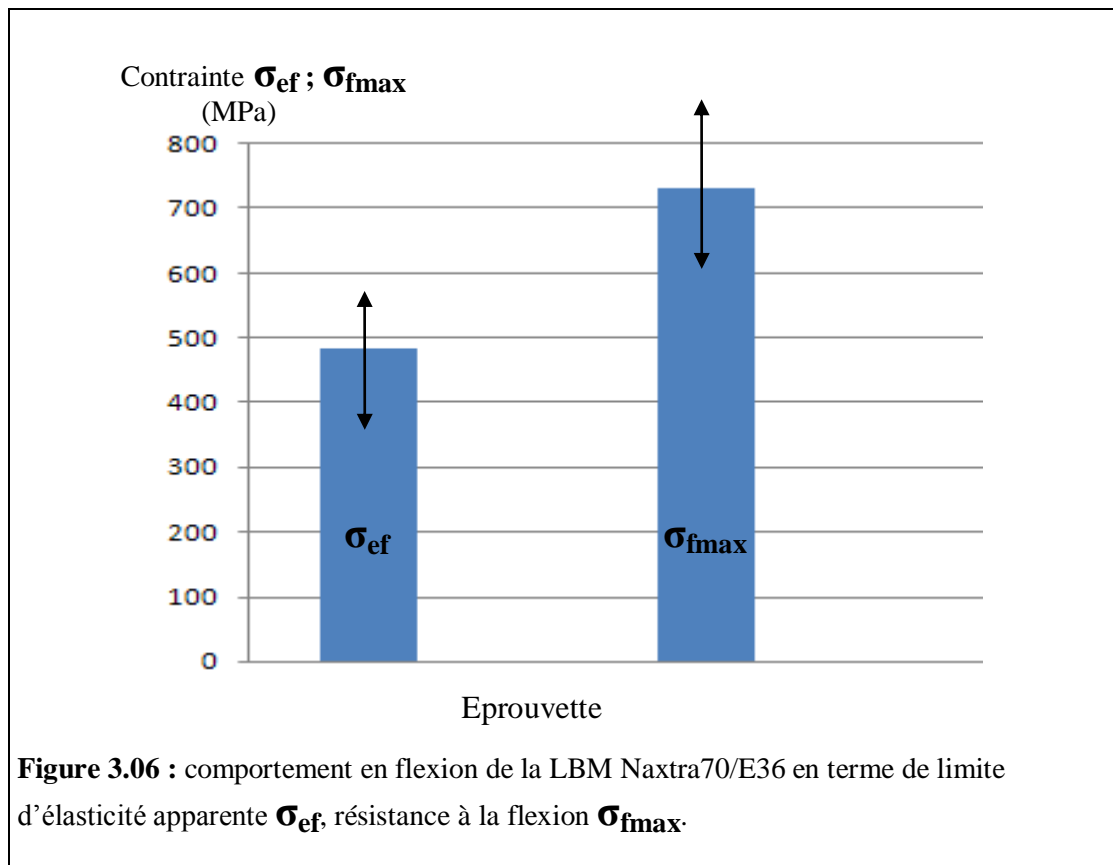
La figure 3. 05 illustre le caractère mixte de la rupture du joint soudé cas (A), pour la zone (1) c'est la zone fragile par contre la zone (2) c'est la zone ductile. On peut dire que la rupture est effectuée au niveau des particules a différente dimension à l'intérieur de chaque cupule cas (D), ces particules sont fragiles par rapport à la matrice qui présente une rupture ductile avec des cupules cas (B). Dans le cas (C) on retrouve parfois des zones très larges sans cupules.



### 3. 3. 2. Essai de flexion trois points

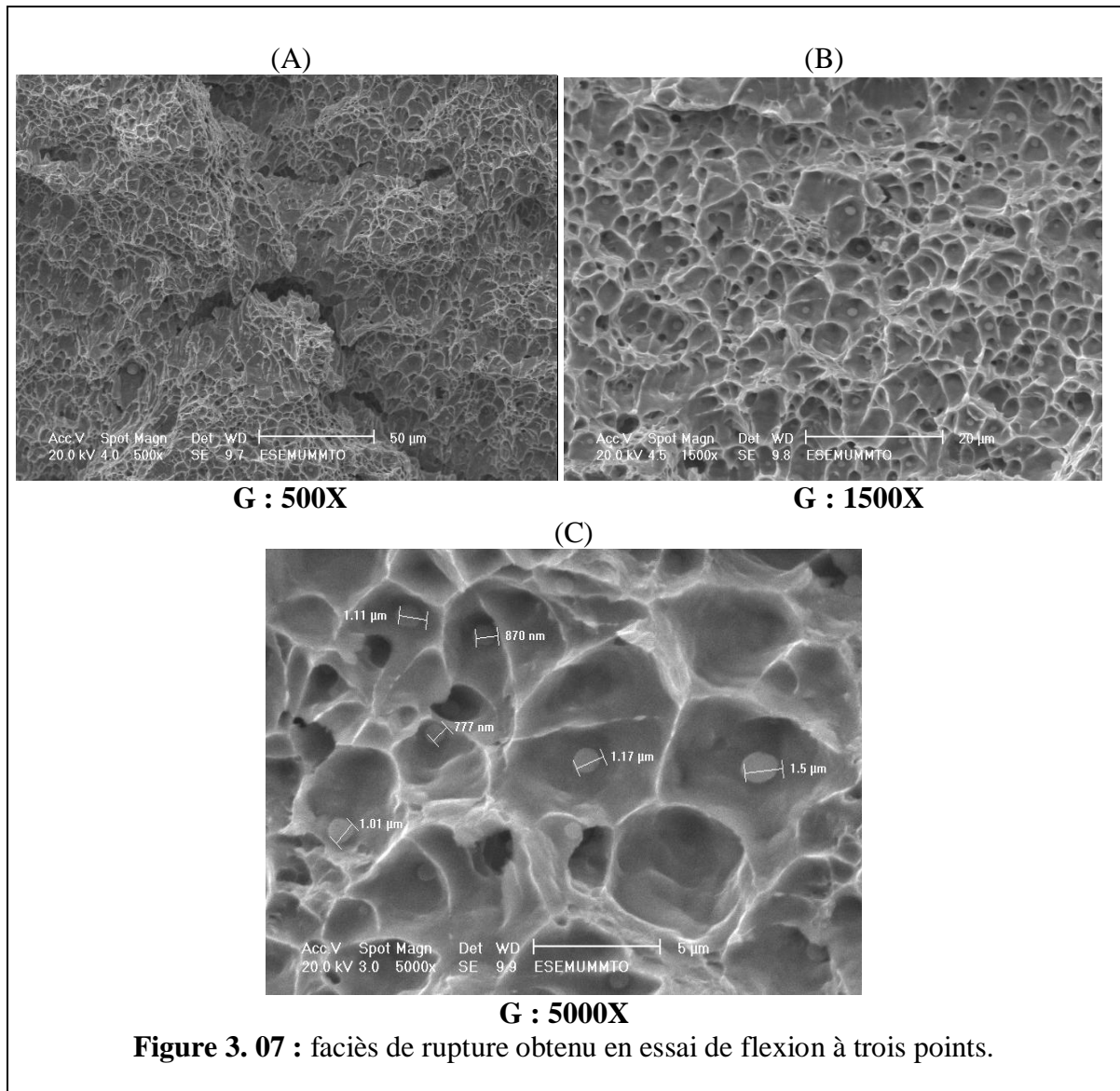
La figure 3.06 rassemble les valeurs moyennes de la limite d'élasticité et de résistance à la flexion trois point obtenues sur six éprouvettes issues des deux plaquettes P1 et P2 (trois éprouvettes par plaquettes). (480 et 720 MPa) (860 1080MPa).

Le comportement dans ce cas de flexion trois point est cette fois ci tout à fait différent de celui du joint soudé en acier austénitique. Les valeurs moyennes sont deux fois supérieures pour l'acier austénitique (860MPa contre 480MPa pour  $\sigma_{ef}$  et 1080 MPa contre 720 MPa pour  $\sigma_{fm}$ .



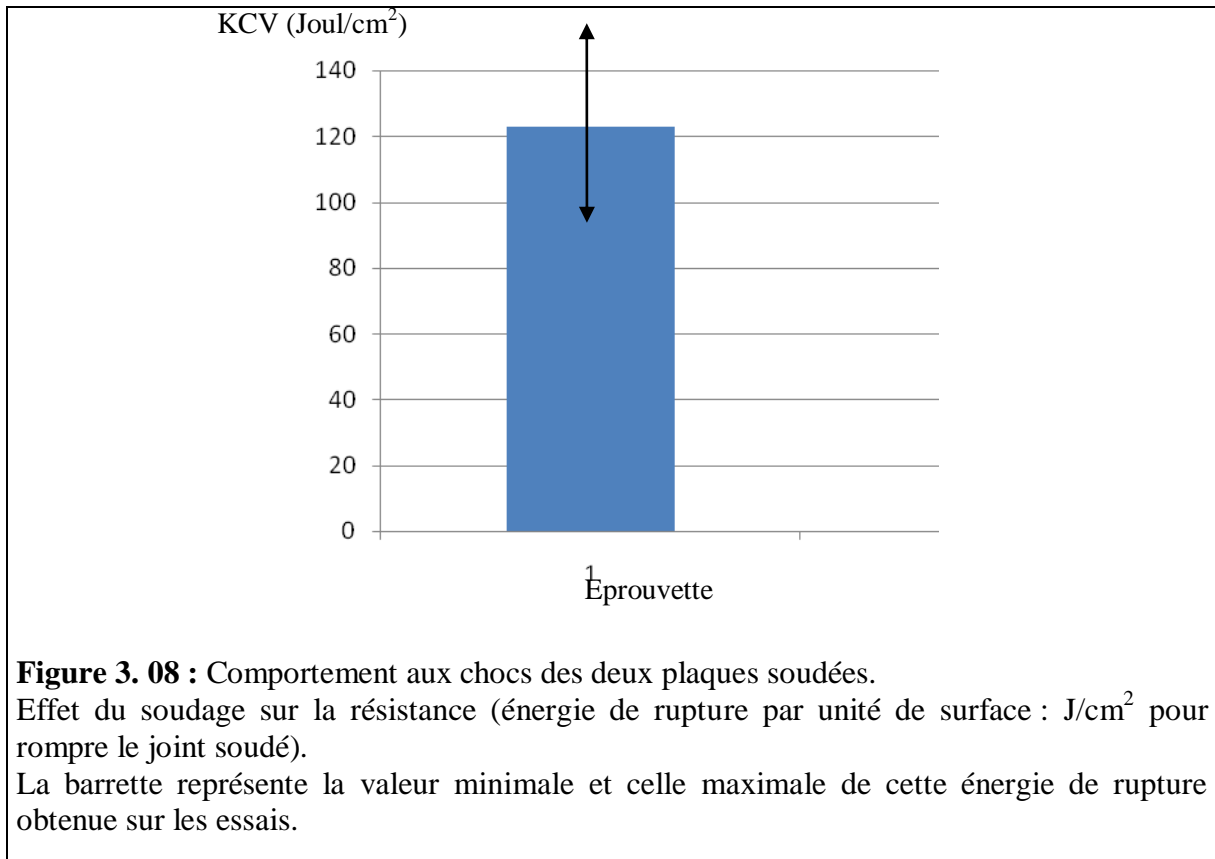
#### ➤ Etude des faciès de rupture

Toutes les éprouvettes rompues par flexion à trois points, présentent des faciès de rupture à cupules dénotant un mode de rupture type ductile du joint soudé (figure 3.07). Il est remarquable de constater comme pour la rupture en traction de la présence des petits globules d'un micromètre de diamètre en moyenne. Il pourrait s'agir de particules de cémentites Fe<sub>3</sub>C constituant durcissant des aciers.



### 3. 3. 3. Comportement en flexion par choc (essais de résilience)

La figure 3.08 présente la valeur moyenne de six essais de résilience de la LBM Naxtar70/E36 avec un joint soudé en acier ordinaire à 0,16%C. La résilience de ce joint soudé est de l'ordre de  $120\text{J}/\text{cm}^2$  qui est une valeur appréciable si l'on compare ce résultat à celui obtenu sur le joint soudé en acier austénitique de nature très ductile qui est de l'ordre de  $155\text{J}/\text{cm}^2$ . [24].



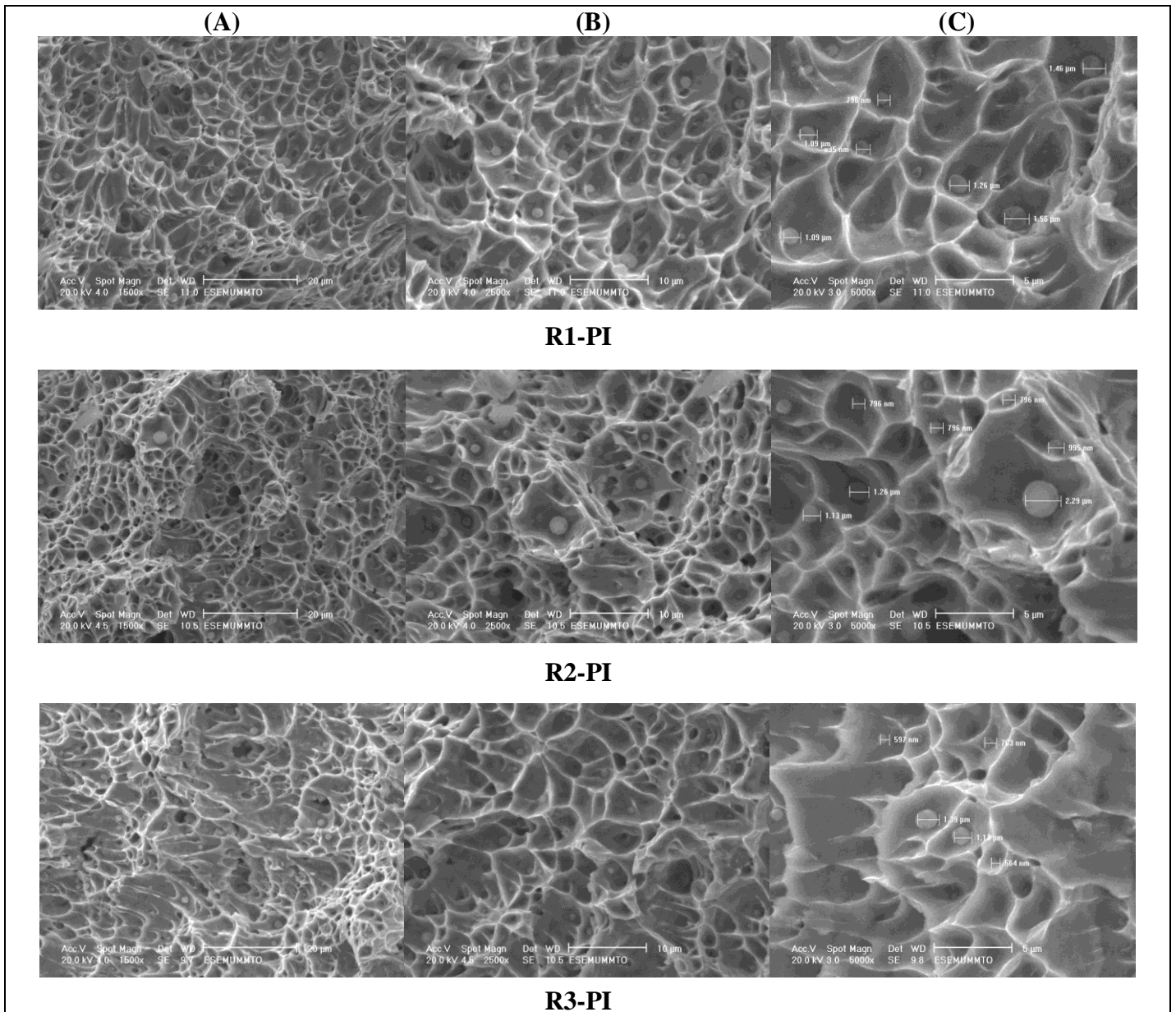
**Figure 3. 08 :** Comportement aux chocs des deux plaques soudées.

Effet du soudage sur la résistance (énergie de rupture par unité de surface : J/cm<sup>2</sup> pour rompre le joint soudé).

La barrette représente la valeur minimale et celle maximale de cette énergie de rupture obtenue sur les essais.

➤ **Etude des faciès de rupture (microscopie électronique à balayage) :**

La figure 3. 09 représente le faciès de rupture de l'éprouvette R1-PI. C'est une rupture ductile avec des cupules renfermant des gros et fins particules (B) et (C). Cependant l'examen du faciès de rupture de ce joint soudé bien qu'il soit à caractère ductile présente par endroit des traces de fissures plus ou moins large cas (A).



**Figure 3.09 :** faciès de rupture obtenu en essai de résilience **R-PI**.

**Colonne A :** Grossissement de 1500x.

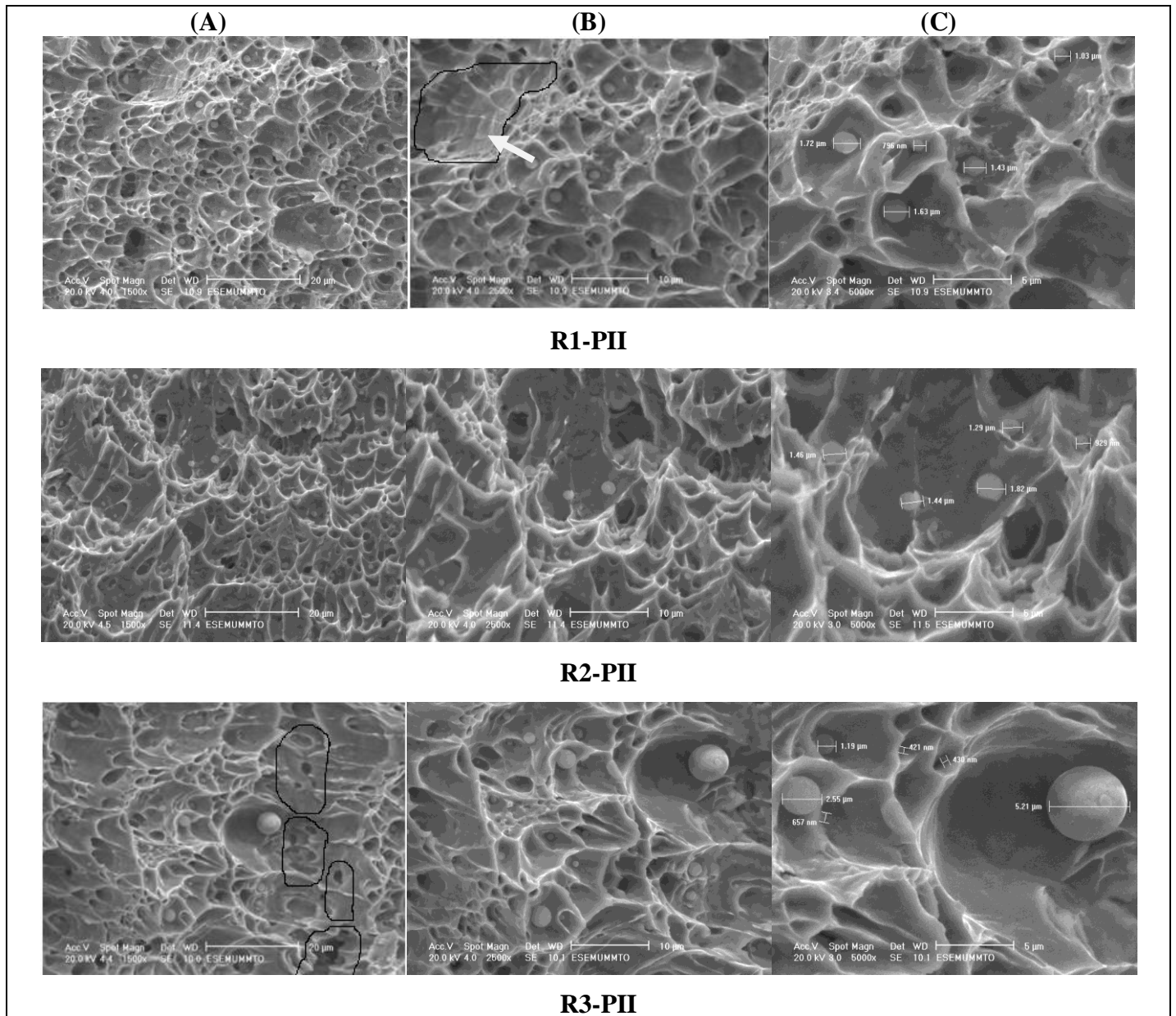
**Colonne B :** Grossissement de 2500x.

**Colonne C :** Grossissement de 5000x.

L'examen du faciès de rupture de joint soudé de l'éprouvette R2-PI, représente une rupture ductile. Pour le cas (A) représente des fissures principales et secondaires ; il existe aussi des cupules renfermant des grosses et fins particules cas (B) et (C).

La rupture de l'éprouvette R3-PI représente une rupture ductile, il existe des endroits des traces de fissures moins large cas (A) et (B) et des cupules renfermant des gros et fins particules (C). On a remarqué aussi un allongement des cupules (C). Cet allongement est dû à la déformation plastique.

La rupture de l'éprouvette R1-P11 est ductile elle représente des cupules et à l'intérieur des cupules il existe des particules de déférente diamètre cas (A) et (C). Pour le cas (B) il y'a une zone représente des stries de fatigue (indiquée par une petite flèche) dans la figure 3.10



**Figure 3. 10 :** faciès de rupture obtenu en essai de résilience **R-P11**.

**Colonne A :** Grossissement de 1500x.

**Colonne B :** Grossissement de 2500x.

**Colonne C :** Grossissement de 5000x.

D'après les observations qu'on a fait sur le faciès de rupture de l'éprouvette R2-P11. On peut dire aussi c'est une rupture ductile avec cupules renfermant des gros et fins particules. D'après la forme de la figure on peut distinguer que la fusion du métal d'apport est partielle (la Température de fusion du métal de base est insuffisante).

Le mode de rupture en essai de résilience pour le joint soudé est de type ductile figure 3. 10 de l'éprouvette R3-PII comme pour les autres éprouvettes. Il existe des cupules renfermant des gros et fins particules cas (B) et (C) ; on voit dans cette figure l'arrachement d'inclusion à l'intérieur d'une cupule.

Cependant, l'examen du faciès de rupture de ce joint soudé bien qu'il soit à caractère ductile présente par endroit des traces de fissures, c'est la déchirure inter granulaire (indiquées par de petites flèches dans la micrographie (A)).

### 3. 3. 4. Essai de dreté

Pour estimer l'écart des valeurs de dreté tout le long de liaison bimétallique réalisées par soudage au semi automatique avec fil plein de type (SG2), nous avons effectués une filiation de dreté Vickers (HV) avec un ensemble de onze points de dreté par ligne sur la plaque PII.

La charge utilisée est de 30 Kg avec une durée du temps 20 secondes.

**Tableau 3. 02** : Les résultats de dreté sont relevés

Distance [mm]	Position 01		Position 02		Position 03	
	La diagonale en ( $\mu\text{m}$ )	HV30	La diagonale en ( $\mu\text{m}$ )	HV30	La diagonale en ( $\mu\text{m}$ )	HV30
00	0.43	301	0.42	315	0.42	315
02	0.41	331	0.40	348	0.43	301
04	0.42	315	0.42	315	0.42	315
06	0.41	331	0.41	331	0.41	331
08	0.42	315	0.46	263	0.43	301
10	0.46	263	0.45	275	0.42	315
<b>12</b>	<b>0.55</b>	<b>183</b>	<b>0.58</b>	<b>165</b>	<b>0.54</b>	<b>191</b>
<b>14</b>	<b>0.56</b>	<b>177</b>	<b>0.57</b>	<b>171</b>	<b>0.55</b>	<b>184</b>
<b>16</b>	<b>0.57</b>	<b>171</b>	<b>0.59</b>	<b>160</b>	<b>0.55</b>	<b>184</b>
<b>18</b>	<b>0.58</b>	<b>165</b>	<b>0.59</b>	<b>160</b>	<b>0.58</b>	<b>165</b>
<b>20</b>	<b>0.59</b>	<b>160</b>	<b>0.58</b>	<b>165</b>	<b>0.54</b>	<b>191</b>
<b>22</b>	<b>0.58</b>	<b>165</b>	<b>0.66</b>	<b>128</b>	<b>0.58</b>	<b>165</b>
24	0.56	177	0.55	183	0.59	160
26	0.59	160	0.57	171	0.59	160
28	0.59	160	0.60	155	0.60	155
30	0.60	155	0.59	160	0.59	160
32	0.60	155	0.61	150	0.58	165
34	0.55	183	0.60	155	0.57	171

#### ➤ Interprétations :

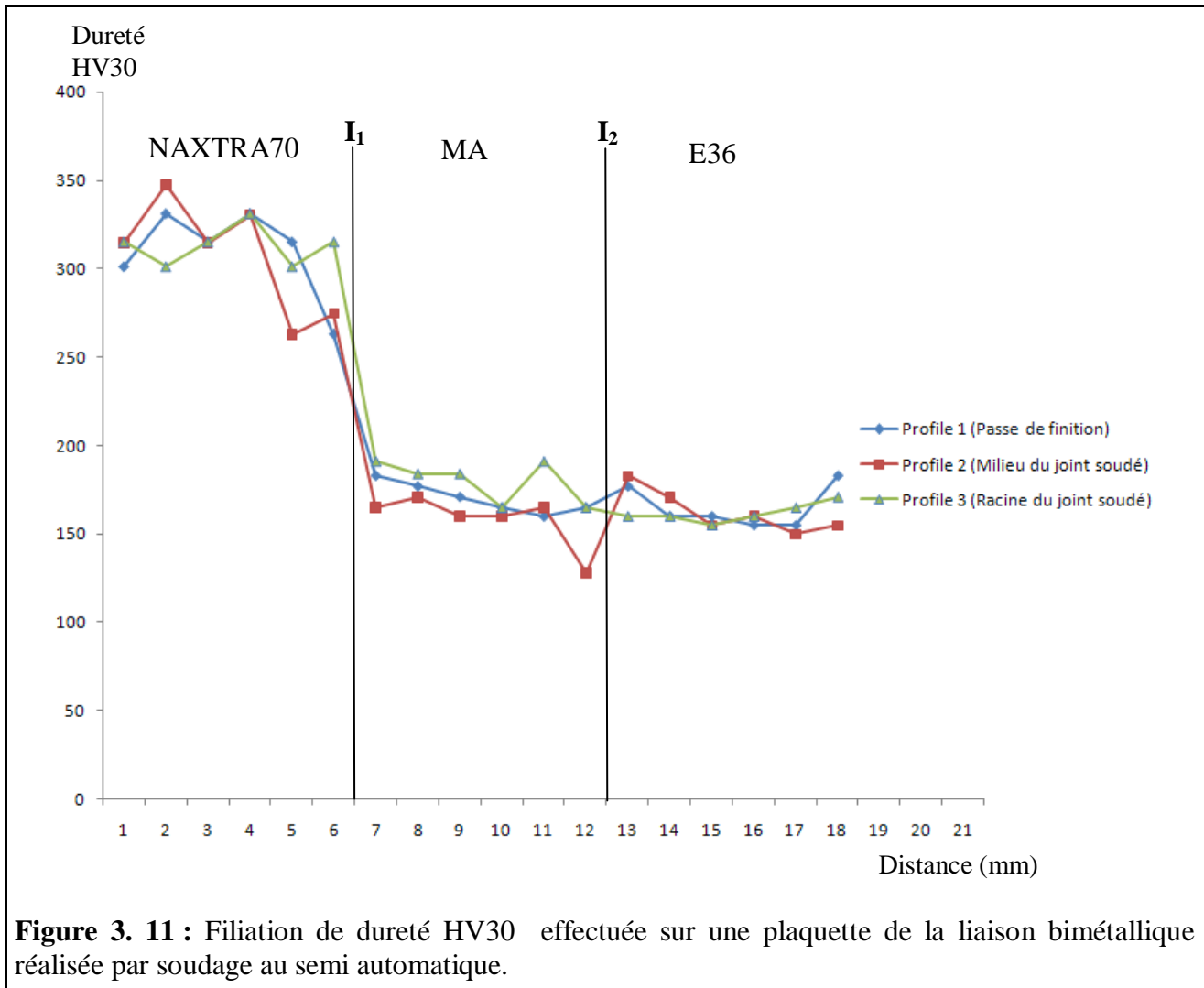
L'analyse du graphe des dretés met en évidence l'influence du phénomène thermique du soudage sur le joint et son voisinage, nous constatons que la différence entre les dretés respectivement des deux métaux de base et de celle du métal d'apport (joint soudé) est plus importante. C'est à cause de la différence en pourcentage de carbone [26].

Une augmentation de dreté sur une bande correspondant au MB, un pic de 287 HV<sub>30</sub> Pour l'interface MA/acier NAXTRA70 et un pic de 331HV<sub>30</sub> pour le métal de base (NAXTRA70).

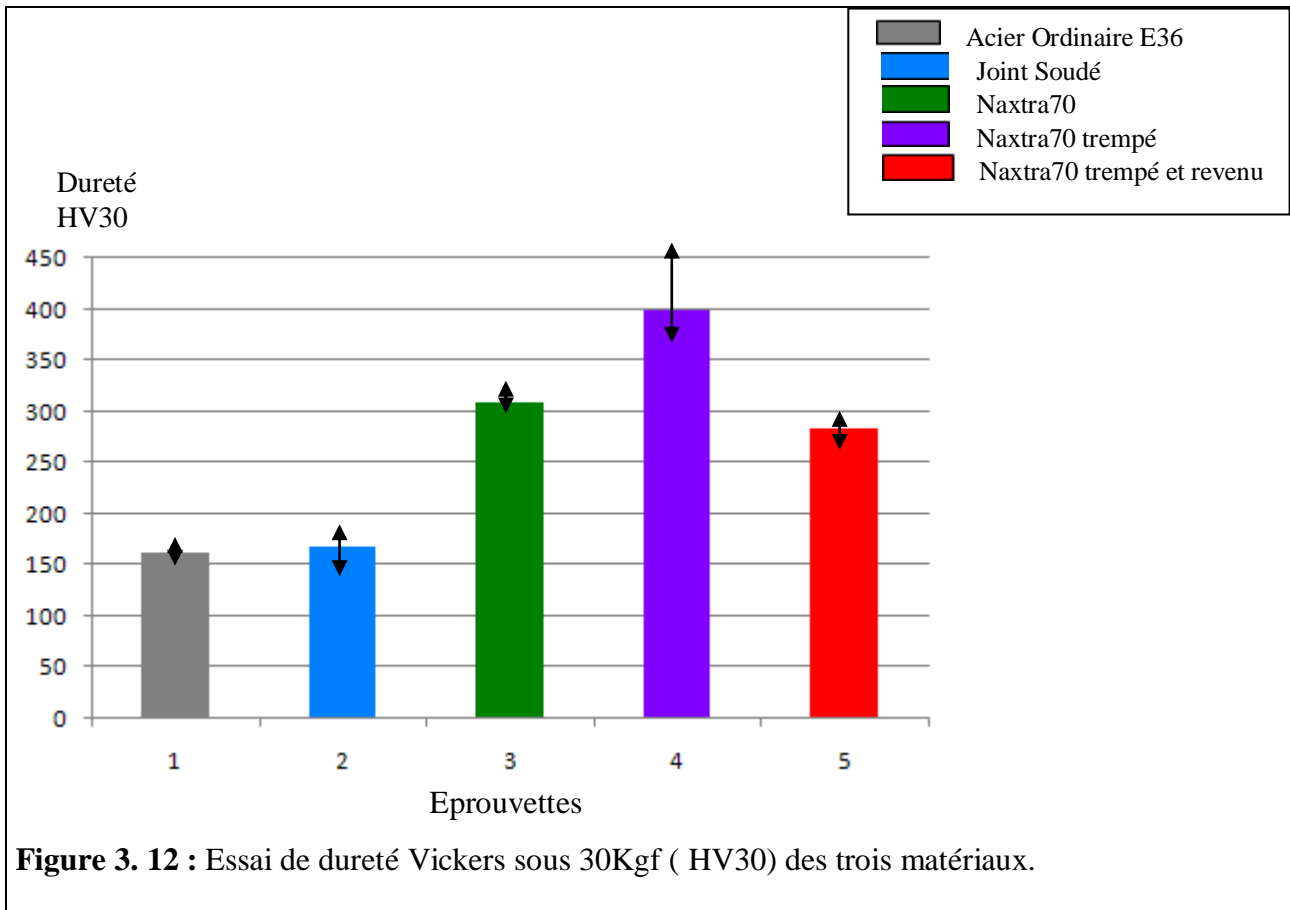
L'accroissement de dreté au niveau de (NAXTRA70) peut être rendu aux changements structuraux (trempe structurale).

Il faut aussi garder à l'esprit que l'effet des chauffages et refroidissements répétitifs lors de l'exécution des passes de soudage font subir au métal en dehors du joint des traitements thermiques qui peuvent engendrer des modifications structurales à chaque fois que la température atteint la température de recristallisation entraînant une transformation austénite/ferrite. Ce qui limite la zone décarburée ou recristallisée.

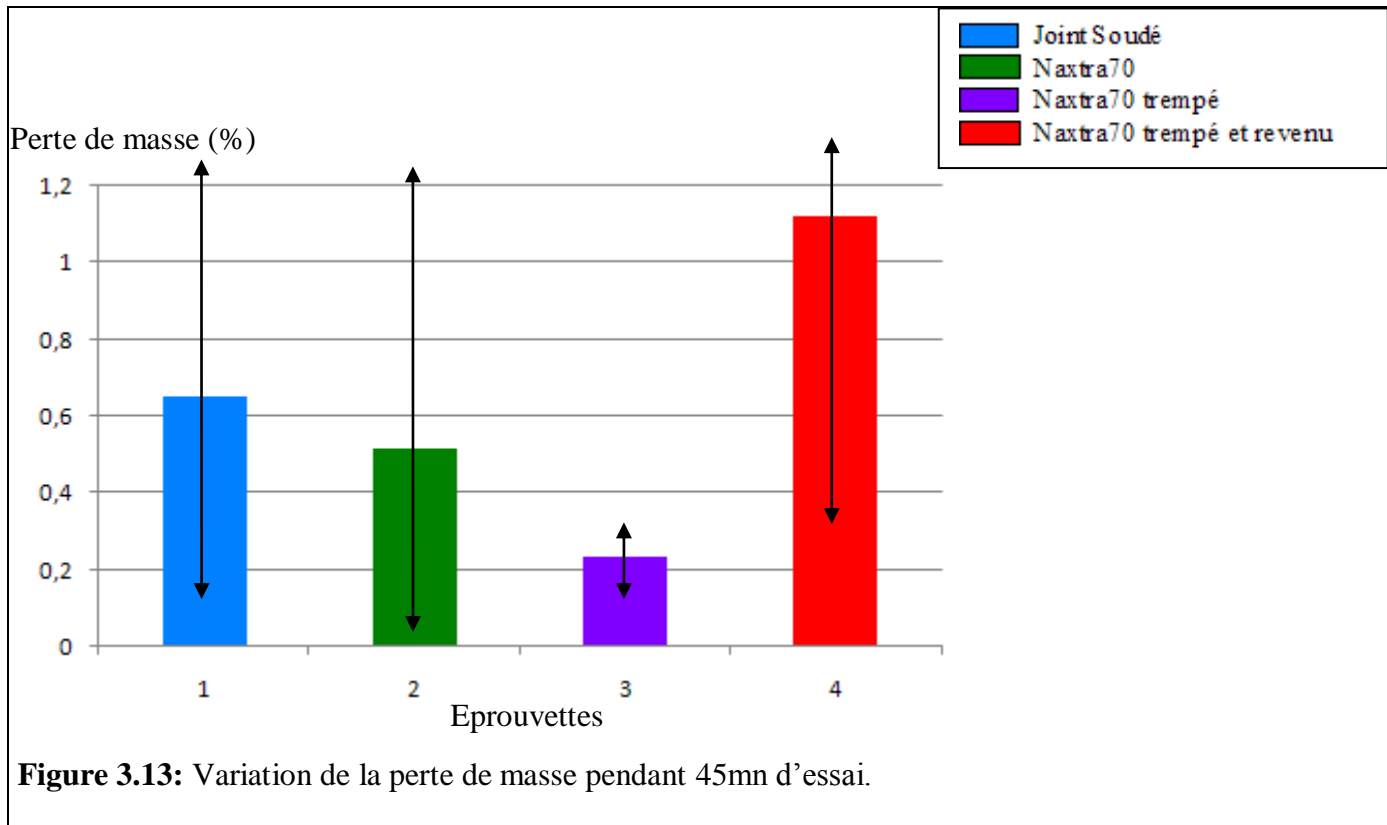
Les deux zones du métal de base représentent des duretés supérieures à celle du métal d'apport (joint soudé), c'est des zones de normalisation



La figure 3.12 illustre les valeurs moyennes de la dureté Vickers sous 30Kgf des deux métaux de base Naxtra70, E36 et du métal déposé en acier ordinaire à 0,16%C. Pour l'acier Naxtra70 qui est considéré comme un acier anti usure, nous pensons qu'il ne peut être utilisé à l'état brut de livraison bien qu'il soit déjà nettement plus dur que l'acier E36 et le métal déposé (310HV30 contre 160HV30). Dans un état trempé (trempé eau), la dureté augmente de 90 unités HV alors qu'après un revenu à 560°C depuis l'état trempé, l'acier s'adoucit légèrement par rapport au brut de livraison (280HV30 contre 310HV30).



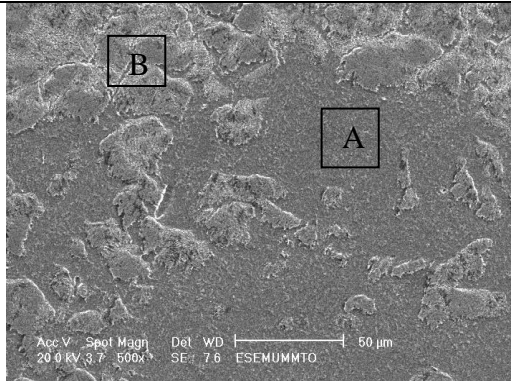
Compte tenu que l'acier anti usure Naxtra70 est utilisé dans les parties de la pelle chargeuse et godet d'excavation qui sont soumises aux frottements, il est recommandé d'utiliser cet acier à l'état trempé. Ceci est bien mis en évidence dans la figure 3.13 qui illustre le comportement à l'usure abrasif en termes de perte de masse en % des trois matériaux sur une distance de glissement de 5 Km avec une vitesse de glissement de 110 m/min et sous une charge de 20N ( $\approx 2\text{Kgf}$ ).



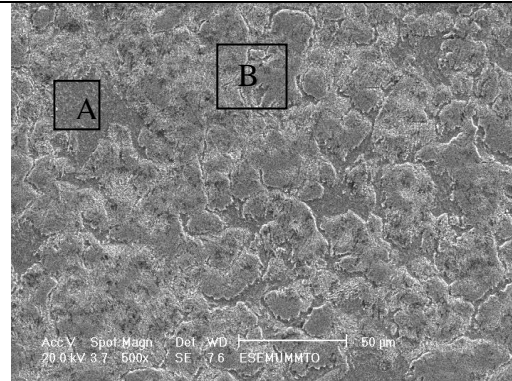
L'acier anti usure Naxtra70 à l'état trempé présente meilleure une résistance à l'usure (en moyenne deux fois plus résistant) que quand il est à l'état brut de livraison. Par ailleurs, il est remarquable de constater que l'état brut de livraison de cet acier

D'après les résultats de la figure 3.13, on remarque que la perte de masse est fortement hétérogène au vu de la forte dispersion des résultats obtenue sur les essais d'usure. Otons également la forte dispersion obtenue également sur le joint soudé. Cette dispersion peut s'expliquer par la microstructure fortement hétérogène du joint soudé qui représente la zone de fusion de la liaison bimétallique. La résistance à l'usure du joint soudé est pratiquement trois fois plus faible que celle de l'Naxtra 70 à l'état trempé

Perte de masse pour l'acier NAXTRA70 revenu est plus intense (de l'ordre de 1.1195%) et cela à cause de sa faible résistance à l'usure (Voire la microstructure). Si on compare la perte de masse de même matériau mais il est brute qui est de l'ordre de 0.5169% à celle du NAXTRA70 trempé qui est de l'ordre de 0.2351%, on peut dire que le dernier résiste mieux à l'usure. Le joint soudé aussi de l'ordre de 0.6534% il ne résiste pas à l'usure et cela à cause de sa microstructure, on remarque que sa microstructure est ferrito-perlitique.

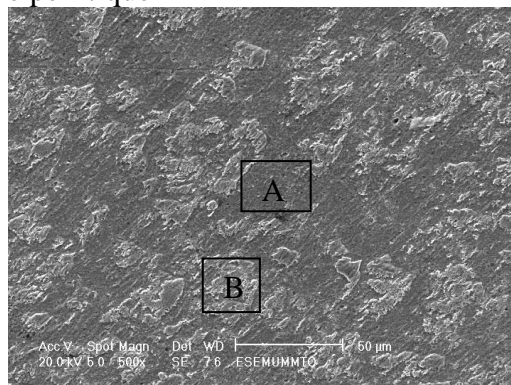


E36 X500 (04)

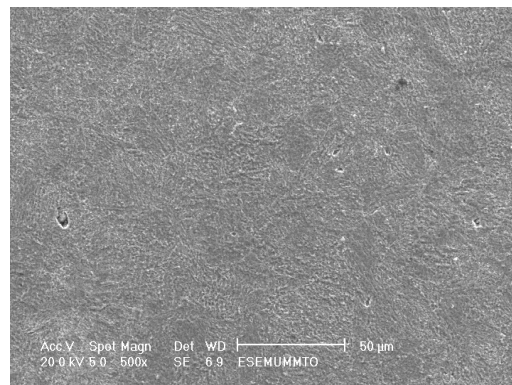


E36 X500 (03)

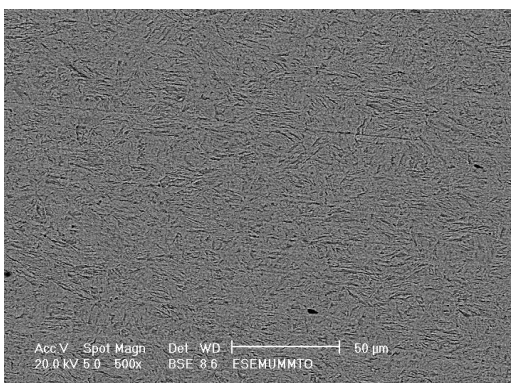
A : La zone ferritique  
B : La zone perlitique



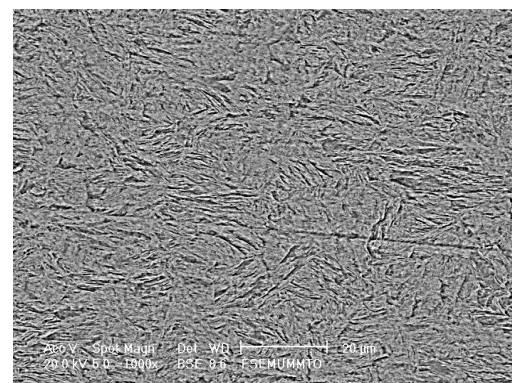
Joint soudé X500



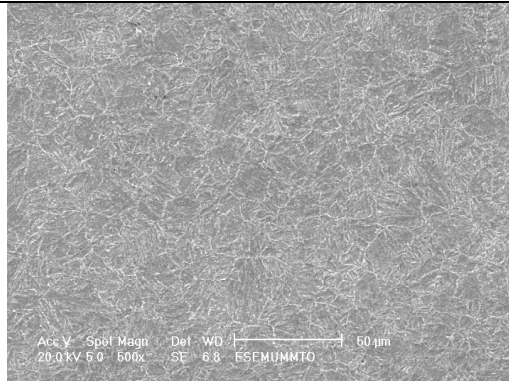
NAXTRA70 X500



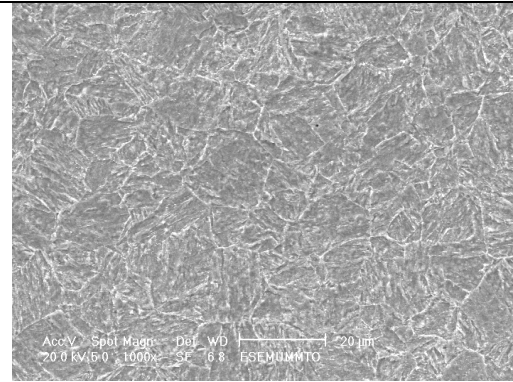
NAXTRA70 Treated X500



NAXTRA70 Treated (05) X1000



NAXTRA70 Revenu X500



NAXTRA70 Revenu (01) X1000

**Figure 3. 14 :** Aspects de la microstructure des matériaux utilisés.

## Conclusion générale

Ce travail porte sur la caractérisation microstructurale du joint soudé de la liaison bimétallique Naxtra70/E36 réalisé par soudage au semi automatique sous protection gazeuse de CO<sub>2</sub> avec un nouveau métal d'apport sous forme de fil réceptionné par l'Entreprise Nationale des Matériels de Travaux Publics (ENMTP). Ce fil de diamètre 1,2mm de dénomination commerciale SG2 est un acier ordinaire selon la fiche technique. Le choix de ce nouveau métal d'apport fait suite à la substitution du métal de base acier anti usure austénitique Z120M12 (acier hadfield) par un nouveau acier anti usure Naxtra70.

Les résultats essentiels de ce travail de caractérisation se résument comme suit :

- Le métal d'apport est un acier ordinaire de construction mécanique légèrement chargé en carbone et proche de l'acier E36 utilisé pour la fabrication de la pelle chargeuse.
- Le nouvel acier choisi Naxtra70 dénommé acier anti usure est en fait un acier faiblement allié au Ni, Cr et Mn et ne peut jouer son rôle d'anti usure s'il est utilisé à l'état brut de livraison du fait que sa dureté et sa tenue à l'usure abrasive n'est pas appréciable et les valeurs obtenues présentent une forte dispersion. A l'état trempé à l'eau, cet acier voit sa tenue à l'usure et sa dureté nettement améliorées.
- Le comportement à la traction et à la résilience du joint soudé en acier ordinaire du type SG2 est pratiquement le même qu'un joint soudé réalisé avec un acier austénitique fortement chargé en carbone et en manganèse (0,8%C et 14%Mn).
- Ses caractéristiques en flexion trois points (limite d'élasticité et résistance à la flexion) bien qu'inférieures de 50% en moyenne par rapport à celle obtenues sur le joint soudé en acier austénitiques restent quand même appréciable. Ceci présente un autre avantage par rapport au coût de cet acier ordinaire par rapport à l'acier austénitique.
- Le mode de rupture de ce joint soudé est un mode purement ductile.
- Ce métal d'apport de type SG2 présente une bonne soudabilité sans apparition de fissuration après soudage comme rencontré dans les anciennes liaisons bimétalliques Acier anti usure Z120M12/E36.

## Références bibliographiques

- [1] G. Beranger, G. Henry, G. Sanz. "livre de l'acier", Ed. SOLLAC, 1996.
- [2] C. CHAUSSIN et G. Hilly « Métallurgie, alliages métalliques » Tome 1, édition DUNOD, Montréal, 1976.
- [3] A. Roos, B. Milet. "Précis de métallurgie Appliquée", Edition Technique et Documentation- Lavoisier (1982).
- [4] J. Paul bailon, J. Marie dorlot. " Des matériaux", 3<sup>eme</sup> édition 2000-2001.
- [5] S. Benissaad. "Le soudage", Edition Office des Publications Universitaires Alger, 1991.
- [6] R. Castro, J. J. De Cadenet. " Métallurgie du soudage des aciers inoxydable et résistant à chaud", Edition DUNOD Paris, 1968.
- [7] J. Delair. "Electrode pour soudage à l'arc, caractéristiques, maniabilité, prix du métal déposé, comparaison des procédés de soudage", Matériaux et Techniques n°5-6, pp. 39-44, 1997.
- [8] S. Benissaad "Le soudage", édition OPU.
- [9] R. Dietrich, G. Facy, E. Hugonnaud, M. Pompidou, J. P. Trotinon. "Précis de construction mécanique" AFNOR/NATHAN.
- [10] J. Delair. "Rechargement utilisés dans les assemblages soudés". Applications industrielles, Matériaux et Techniques, n°3-4, pp. 49-56, 1998.
- [11] L. Devillers, D. Kaplan, A. Ribes, P. V. Riboud, Métallurgie et propriétés mécanique du métal fondu en soudage multipasse sous Fux d'acier au C- Mn micro-allié, Mémoires et Etudes Scientifiques Revue de Métallurgie, n°1, pp. 43-62, 1986.
- [12] USINOR. " Approche sur la soudabilité métallurgique des aciers", RAPPORT USINOR-JPJ-09/85-438VL.
- [13] Pierre-jean CUNAT. "Aciers inoxydables", critères de choix de la structure, les Techniques d'Ingénieur, traité matériaux métalliques M4540, 2001.
- [14] H. Granjon. "Bases métallurgique du soudage", 2<sup>eme</sup> édition Publication du soudage et de ses applications, 1995, 251p.
- [15] J. Barralis et G. Maeder. "Précis métallurgie, élaboration, structures. Propriétés, Normalization". Edition NATHAN. 1997.

- [16] -R. Varisellaz. "Soudage: Eléments de conception de réalisation", Dunod 1987.
- [17] R. Meslier. "La soudure autogène au chalumeau et à l'arc", Eyrolles 1987.
- [18] Y. Zablonki. "Technologie des métaux", Edition Mir Moscou 1985.
- [19] Ferdenard Cyrille. "Mise en œuvre et caractérisation d'assemblages soudés par procédés tig et laser de tole d'alliages de titane réfractaires". Toulouse 2005.
- [20] Bernard Barthélémy. "Notions pratiques de mécanique de la rupture", Eyrolles 1980.
- [21] "Techniques de l'ingénieur". Traité matériaux métalliques M100-2.
- [22] R. Varisellaz. "Soudage :elements de conception de réalisation". Dunod 1987.
- [23] S. Laroze, "Résistance des matériaux et structures", Tome 3.Eyrolles, Masson 1982.
- [24] A. Belamri. "Caractérisation microstructurale et mécanique de deux types de joints soudés. Cas de l'élaboration de la liaison bimétallique acier Z120M12/Acier E36 utilisée par l'Unité Grue de Béjaïa pour les pelles de rétro chargeurs et godets d'excavation", mémoire de Magister en Génie Mécanique, Université de Béjaïa, novembre 2007.
- [25] A. Moussai. "Influence des traitements thermiques sur la rupture fragile des cordons de soudure", mémoire de Magister en Génie Mécanique, Université de M'Sila, Juillet 2004.
- [26] H. Makri. "Etude des méthodes d'inspection et de détermination de la forme et la taille des fissures application aux cordons de soudure", mémoire de Magister en Génie Mécanique, Université de M'Sila, Juillet 2004.

# Annexe 1

Ensemble des résultats des essais mécaniques (Traction, Flexion Résilience)

## ❖ Résultats du comportement en traction des éprouvettes

	Epaisseur (mm)	Largeur (mm)	Longueur $L_t$ (mm)	Longueur $L_0$ (mm)	$\sigma_e$ (MPa)	$\sigma_{max}$ (MPa)	n
<b>T1-PI</b>	5.15	9.15	118.30	38.22	379	479	0.01
<b>T2-PI</b>	5.10	8.50	118.45	33.58	358	499	0.06
<b>T3-PI</b>	4.98	8.30	117.95	36.72	373	513	0.05
<b>T2-P II</b>	4.99	8.30	116.91	40.60	369	477	0.03
<b>T3-P II</b>	4.95	8.12	116.85	37.16	377	507	0.01

## ❖ Résultats du comportement en flexion des éprouvettes

	F1-PI	F2-PI	F3-PI	F1-P II	F2-P II	F3-P II
<b>L (mm)</b>	118	118	118	116	117	117
<b>b (mm)</b>	12.02	11.92	11.93	12.00	11.98	11.95
<b>h (mm)</b>	9.97	10.04	10.02	9.86	9.82	9.75
<b><math>\sigma_{ef}</math> (MPa)</b>	577	479	365	515	482	483
<b><math>\sigma_{f max}</math>(MPa)</b>	837	701	600	800	735	715

## ❖ Résultats du comportement en résilience des éprouvettes

Plaquette	Eprouvette	Section sous entaille (cm <sup>2</sup> )	KCV (Joule/ cm <sup>2</sup> )
<b>Plaquette I</b>	R1-PI	0.794	170
	R2-PI	0.794	100
	R3-PI	0.794	93
<b>Plaquette II</b>	R1-P II	0.794	126
	R2-P II	0.794	119
	R3-P II	0.794	130

## Annexe 2

### Fiche technique – S690 – Q – QL – QL1 –

#### GÉNÉRALITÉS

Tôles en acier de construction à grains fins, soudable, dont les caractéristiques mécaniques sont obtenues par un traitement de trempe à l'eau et de revenu.

#### QUALITÉS

<b>S 690 Q</b>	Avec des valeurs de résilience jusqu'à la température de -20°C
<b>S 690 QL</b>	Avec des valeurs de résilience jusqu'à la température de -40°C
<b>S 690 QL 1</b>	Avec des valeurs de résilience jusqu'à la température de -60°C

➤ Qualité conforme à la norme **EN 10137**.

#### APPLICATIONS

Tous ensembles mécano-soudés où on recherche à la fois, allègement, haute élasticité et très bonne formabilité (exemple : Châssis de véhicules et engins, flèches de grues, bennes, bâtis de machine).

#### COMPOSITION CHIMIQUE

C%	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	B
0,20	0,80	1,7	0,020	0,010	1,50	2	0,70	0,12	0,005

#### CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES (qualité QL)

Épaisseur (mm)	Re N/mm <sup>2</sup>	Rm N/mm <sup>2</sup>	A% Mini	Résilience en J (mini)					
				Long. 0°	- 20°	- 40°	Travers 0°	- 20°	- 40°
> 3-50	690	790-940	14	50	40	30	35	30	27
>50-100	650	760-930	14	50	40	30	35	30	27
>100-150	630	710-900	14	50	40	30	35	30	27

# Fiche technique – HARDOX 400 –

## GÉNÉRALITÉS

Est un acier résistant à l'abrasion d'une dureté d'environ 400 HB destiné à des applications où la résistance à l'usure doit s'associer à de bonnes propriétés de résilience et/ou de pliage à froid. HARDOX 400 offre en outre une excellente aptitude au soudage.

## ETAT DE LIVRAISON

Trempé ou trempé et revenu

➤ Qualité conforme à la norme **EN 10 029**.

## APPLICATIONS

Broyeurs, cribles, alimentateurs, poches de pesage, skips, goulottes, lames d'usure, bandes transporteuses, godets, couteaux, pignons dentés, tombereaux, chargeuses, camions-bennes, camions, engins de terrassement, bulldozers, excavatrices, conduits anti-abrasion, vis sans fin, presses, etc.

## COMPOSITION CHIMIQUE (Epaisseur 20-32)

C%	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	B
0.18	0.70	1.60	0.025	0,010	1.00	0.25	0.25	/	0.004

## CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES

Caractéristiques	$\sigma_m$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_e$ (N/mm <sup>2</sup> )	A (%) min	HBW	Kv min (J) - 40°C
Valeur	1250	1000	10	370 - 430	45

# Fiche technique – WELDOX900 –

## GÉNÉRALITÉS

Est un acier de construction générale avec une limite d'élasticité de minimum 900 MPa. WELDOX 900 remplit toutes les exigences de nuance et de qualité des aciers correspondant à la norme EN 10025.

## ETAT DE LIVRAISON

Trempé et revenu selon norme EN 10025-6

## QUALITÉS

<b>WELDOX 900 D</b>	avec résilience garantie à $-20^{\circ}\text{C}$ ( $-4^{\circ}\text{F}$ ). Correspondant au S 890 Q
<b>WELDOX 900 E</b>	avec résilience garantie à $-40^{\circ}\text{C}$ ( $-40^{\circ}\text{F}$ ). Correspondant au S 890 QL
<b>WELDOX 900 F</b>	avec résilience garantie à $-60^{\circ}\text{C}$ ( $-76^{\circ}\text{F}$ ). Correspondant au S 890 QL 1

➤ Qualité conforme à la norme **EN 10025**.

## APPLICATIONS

Equipements de levage nécessitant un poids réduit.

## COMPOSITION CHIMIQUE

C%	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	B	Cu	Al
0,20	0,50	1,60	0,020	0,010	0.70	0.10	0,70	0.06	0,005	0.10	0.018

## CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES

Épaisseur (mm)	Re N/mm <sup>2</sup>	Rm N/mm <sup>2</sup>	A% Mini
4.0-50.0	900	940-1000	12
50.1-80.0	830	880-1000	12

➤ **RESILIENCE**

Désignation	Kv min (J) 0°C	Kv min (J) -20°C	Kv min (J) -40°C	Kv min (J) -60°C
<b>WELDOX 900 D</b>	30	27	-	-
<b>WELDOX 900 E</b>	35	30	27	-
<b>WELDOX 900 F</b>	40	35	30	27

# Fiche technique – WELDOX700 –

## GÉNÉRALITÉS

Est un acier de construction générale avec une limite d'élasticité de minimum 700 MPa. WELDOX 700 remplit toutes les exigences de nuance et de qualité des aciers correspondant à la norme EN 10025.

## ETAT DE LIVRAISON

Trempé et revenu selon norme EN 10025-6.

## QUALITÉS

<b>WELDOX 700 D</b>	avec résilience garantie à $-20^{\circ}\text{C}$ ( $-4^{\circ}\text{F}$ ). Correspondant au S 690 Q
<b>WELDOX 700 E</b>	avec résilience garantie à $-40^{\circ}\text{C}$ ( $-40^{\circ}\text{F}$ ). Correspondant au S 690 QL
<b>WELDOX 700 F</b>	avec résilience garantie à $-60^{\circ}\text{C}$ ( $-76^{\circ}\text{F}$ ). Correspondant au S 690 QL 1

➤ Qualité conforme à la norme **EN 10025**.

## APPLICATIONS

Equipements de levage nécessitant un poids réduit.

## COMPOSITION CHIMIQUE

C%	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	B	Cu	Al
0,20	0,60	1,60	0,020	0,010	0.70	2.0	0,70	0.09	0,005	0.30	0.015

## CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES

Épaisseur (mm)	Re N/mm <sup>2</sup>	Rm N/mm <sup>2</sup>	A% Mini
4.0-50.0	700	780-930	14
50.1-100.0	650	780-930	14
100.1-130.0	630	710-900	14

➤ **RESILIENCE**

Désignation	Kv min (J) $0^{\circ}\text{C}$	Kv min (J) $-20^{\circ}\text{C}$	Kv min (J) $-40^{\circ}\text{C}$	Kv min (J) $-60^{\circ}\text{C}$
<b>WELDOX 700 D</b>	30	27	-	-
<b>WELDOX 700 E</b>	35	30	27	-
<b>WELDOX 700 F</b>	40	35	30	27

# Fiche technique – ACIER RAEX 400 –

## GÉNÉRALITÉS

Est un acier à très haute dureté résistant aux usures par abrasion et impacts. Issu de laminoirs récents et modernes permettant une trempe à l'eau rapide et maîtrisée.

## APPLICATIONS

Broyeurs, cribles, alimentateurs, poches de pesage, skips, goulottes, trémies, lames d'usure, transporteurs, godets, couteaux, pignons dentés, tombereaux, chargeuses, camions-bennes, camions, engins de terrassement, excavatrices, tuyaux de manutention, transporteurs à vis, presses, etc...

## COMPOSITION CHIMIQUE

<b>C%</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>	<b>Mo</b>	<b>V</b>	<b>B</b>	<b>Cu</b>	<b>Al</b>
0.23	0.70	1.70	0.030	0.015	1,50	0,70	0.50	-	0.004	-	0,060

## CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES

<b>Re</b>	<b>Rm</b>	<b>A%</b>	<b>HB</b>
<b>N/mm<sup>2</sup></b>	<b>N/mm<sup>2</sup></b>	<b>Mini</b>	
1000	1250	10	380 - 420

## Annexe 3

# FICHE TECHNIQUE POUR LE FIL DU SOUDAGE FERRART SG2

- **DESCRIPTION ET CHAMPS D'APPLICATION**

Fil pour la soudure par le procédé semi-automatique, sous atmosphère de CO<sub>2</sub>, essentiellement indiqué pour la soudure d'aciers au carbone et de faible alliage.

Bonne soudure avec les matériaux de base suivants:

Aciers de constructions	A37 – A52 (AFNOR)
Aciers pour la construction navale	A – B – C – D - E
Aciers pour chaudières	A42C1 – A52P2
Aciers pour tuyaux	AP 1X52, X60
Aciers de grande limite élastique	LE entre 360 et 450N/mm <sup>2</sup>
Aciers spéciaux	CORTEN - PATINAX

- **NORMES**

DIN 8559: SG2

AWS/ASME-SFA 5.18:E70-S6

- **COMPOSITION CHIMIQUE**

C%	Si	Mn
0,08-0,12%	0,4-0,6%	1,0-1,3%

- **CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES**

	Sob CO <sub>2</sub>	Sob Mistura Gasosa
Limite élastique [N/mm <sup>2</sup> ]	430 - 550	430 - 500
Résistance à la traction [N/mm <sup>2</sup> ]	540 - 610	570 - 640
Prolongement (l = 5×d) [%]	23 - 27	25 - 30
Résistance à l'impacte (KV) [J]: -20°C	50 - 100	75 - 120
Résistance à l'impacte (KV) [J]: -40°C		60 - 80

- **FOURNITURE SOUS LA FORME**

MAG – Fil – ø: 0,6mm, 0,8mm; 1,0mm; 1,2mm; 1,6mm

# FICHE TECHNIQUE POUR LE FIL DU SOUDAGE FERRART SG3

- **DESCRIPTION ET CHAMPS D'APPLICATION**

Fil pour soudage d'aciers à granulation fine utilisés pour le soudage des chaudières, réservoirs, charpente métalliques... etc.

- **NORMES**

AWS A5.18

- **COMPOSITION CHIMIQUE**

C%	Mn%	Si%	P%	Cr%	Mo%	V%	Al%	Ti%	Cu%	S%
0.13 max	1.9 max	1.2 max	0.025 max	-	-	-	-	-	0.3 max	0.025 max

- **CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES**

Re (N/mm <sup>2</sup> )	Rm (N/mm <sup>2</sup> )	A (%) max	HB30	Kv (J) min
520	620	26	-	>70

- **FOURNITURE SOUS LA FORME**

MAG – Fil – ø: 0,6mm, 0,8mm; 1,0mm; 1,2mm; 1,6mm

# FICHE TECHNIQUE POUR LE FIL DU SOUDAGE FERRART SG3

- **DESCRIPTION ET CHAMPS D'APPLICATION**

Fil pour soudage d'aciers à granulation fine utilisés pour le soudage des chaudières, réservoirs, charpente métalliques... etc.

- **COMPOSITION CHIMIQUE**

C%	Mn%	Si%	P%	Cr%	Mo%	V%	Al%	Ti%	Cu%	S%
0.16	1.65	1.09	0.08	-	-	-	-	0.12- 0.2	-	0.03

- **CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES**

Re (N/mm <sup>2</sup> )	Rm (N/mm <sup>2</sup> )	A (%) max	HB30	Kv (J) min
470	590	30	-	-

- **FOURNITURE SOUS LA FORME**

MIG – Fil –  $\phi$ : 0,6mm, 0,8mm; 1,0mm; 1,2mm; 1,6mm

# FICHE TECHNIQUE POUR LE FIL DU SOUDAGE ER 70 S-3

- **DESCRIPTION ET CHAMPS D'APPLICATION**

Baguette TIG pour la soudure d'aciers au carbone et de faible alliage. Spécialement utilisée dans la soudure de tôles fines, tuyaux, tout comme pour des passes de fond dans les tôles épaisses.

Dû à son faible teneur en silice, elle est spécialement applicable en composantes qui doivent être galvanisées après la soudure.

- **NORMES**

DIN 8559: SG1 / MSG1

AWS/ASME-SFA 5.18:E70-S3

- **GAZ DE PROTECTION**

TIG: Argon, Hélium ou mélanges de Argon / Hélium

- **COMPOSITION CHIMIQUE**

C%	Si	Mg
0,1%	0,6%	1,2%

- **CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES**

Limite élastique [N/mm <sup>2</sup> ]	= 450
Résistance à la traction [N/mm <sup>2</sup> ]	500 - 650
Prolongement (l = 5×d) [%]	= 23
Résilience (ISO-V) [J]	= 80

- **FOURNITURE SOUS LA FORME**

**TIG:** Baguettes cuivrées avec 1000mm de long

Ø 1,8mm / 2,0mm / 2,4mm / 3,0mm

# Fils pour soudage MIG/MAG ER50-6, A18, ER70S-6, YGW12, G4Sil, SG3, G3Sil, SG2

- DESCRIPTION ET CHAMPS D'APPLICATION**

Les fils ER70S-6 sont des fils de soudage en acier peu allié, destinés au soudage sous protection gazeuse. Ils se distinguent par leur con jonction forte avec une couche cuivrée, leur anticorrosion forte, leur entraînement stable, leurs projections faibles, leurs belles soudures. Leurs soudures peuvent résister aux impacts forts issus des basses températures.

Article important pour les techniques de soudage, convient à l'acier naval (A, B, D, E, A36, E36, D36) et à d'autres aciers de même force. Sert à souder les structures importantes, par exemple, les conteneurs, les véhicules, les machineries de construction (soudage automatique ou semi-automatique à gaz protecteur)

- NORMES**

GB/T: ER50-6  
 BS: A18  
 AWS: ER70S-6  
 JIS: YGW  
 DIN: SG3 SG2  
 EN: G4Sil G3Sil

- FICHE TECHNIQUE**

Emballage	Taille		Bobine de fils				Poids net	
		0.8~1.6 (mm)		D100mm, D200mm, D270mm, D300mm, K300mm				1kg, 5kg, 15kg, 18kg, 20kg
Matières des fils (%)	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu
	0.06~0.14	1.60~1.90	0.80~1.20	≤0.025	≤0.025	-	-	≤0.50
Facultés mécaniques du métal	Re (N/mm <sup>2</sup> )		Rm (N/mm <sup>2</sup> )		HB30		Kv (J)	
	≥420		≥500		-		≥27 (-29)	