
République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de 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 de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme
De Master Académique
En génie mécanique
Option : sciences des matériaux

Thème

Influence de l'effort de forgeage
sur la tenue mécanique de point
de soudure des aciers à effet TRIP

Proposé et dirigé par :

Mr Ferhoum Rabah

Réalisé par :

Mr Mazid Said



Remerciements

*Avant d'entamer mon travail, je tiens à remercier **DIEU** de m'avoir donné du courage et de la volonté.*

Au terme de ce travail, je tiens à exprimer ma grande reconnaissance et haute gratitude à mon promoteur Mr FERHOUM RABAH pour son aide, sa disponibilité et ses conseils tout le long de la réalisation de mon travail.

Je tiens à remercier également les membres de jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail en m'examinant et jugeant mon projet.

Mes remerciements vont également à mes amies (DJAFFAR, OMAR, SOFIANE, YUCEF, KHALEF, MOHAND et SARA).ainsi que tous mes collègues.

Comme je n'oublie pas d'exprimer ma reconnaissance à tous les enseignants qui ont contribué à ma formation.

Enfin, je remercie toute personne ayant contribué de loin ou de près à la réalisation de ce travail, qu'elles trouvent ici ma profonde reconnaissance.

Finalement, ma reconnaissance va par-dessus tout à mes parents, mes sœurs et mes frères qui m'ont toujours encouragés et soutenus tant financièrement que moralement durant mes études.

Chapitre I :

Partie I

Introduction

<i>I.1.Acier DUAL PHASE :</i>	6
<i>I.2.Les aciers TRIP</i>	6
<i>I.3. Les aciers Multiphase</i>	7
<i>I.4.Principe de l'effet TRIP</i>	7
<i>I.5.Structure des aciers :Austénite :</i>	8
<i>Conclusion :</i>	8

PartieII

Introduction

<i>II.1.Structures cristallographiques des différentes phases</i>	9
<i>II.2.Déformation de transformation</i>	10
<i>conclusion</i>	

Chapitre II.

Introduction

<i>III.1.Différents procédés</i>	11
<i>III.2.Principe</i>	12
<i>III.3Séquence de soudage</i>	13
<i>III.4.Notion de soudabilité</i>	16
<i>III.5.Métallurgie du soudage</i>	17

III.6. Formation du point.....	18
III.7. Transformation Métallurgie du soudage.....	19
III.8. Transformations en phases solides au chauffage.....	20
III.9. Identification des ZAT sur une coupe transversale.....	20
III.10. Phénomènes physiques intervient pendant le soudage par point.....	21
III.11. Caractéristiques des soudures par points.....	22
III.12. Courant et modulation.....	23
III.13. Tension interfaciale et mode de croissance.....	25

Conclusion

Chapitre II : Résultats et interprétations.

Partie I : Etude de l'effet TRIP.

Introduction	25
IV.1. Matériau de l'étude.....	25
IV.1.1. La composition chimique	25
IV.2. Elaboration de l'alliage étudié.....	26
IV.3. Analyse microstructurale.....	26
IV.3.1 Préparation des échantillons	26
IV.3.2. Procédure d'attaque.....	26
IV.3.3. Observation microscopiques.....	27
IV.3.3.1. Micrographie à l'état initiale.....	27
IV.3.4. Essai de dureté a l'état initial.....	27
IV.3.4.1. Essais de dureté Vickers (HV).....	27
IV.3.4.2. Résultats des essais Vickers.....	28
IV.4 Comportement en traction.....	28
IV.4.1. Géométrie des éprouvettes de traction.....	28
IV.4.2. Condition de déroulement de l'essai.....	29
IV.4.3. Analyse de la microstructure.....	31

PartieII :Etude de soudage par point.

Introduction

<i>IV.5. Description d'une machine à souder Machine typique.....</i>	<i>36</i>
<i>IV.6.Etudes mécaniques des assemblages soudés par points.</i>	<i>36</i>
<i>IV.6.1.Formation de la soudure.....</i>	<i>37</i>
<i>IV.6.2 Effort.....</i>	<i>38</i>
<i>IV.6.3.Paramètres du soudage par points.....</i>	<i>38</i>
<i>IV.7. Protocole expérimental</i>	<i>38</i>
<i>IV.7.1.Geometries des éprouvettes.....</i>	<i>39</i>
<i>IV.7.2.Conditions d'essai.....</i>	<i>41</i>
<i>IV.7.3. Résultats et interprétations.....</i>	<i>41</i>
<i>Conclusion.....</i>	<i>51</i>
<i>Conclusiongénérale.....</i>	<i>52</i>
<i>Références bibliographiques.....</i>	<i>54</i>
<i>Table de matières.</i>	<i>55</i>

Introduction générale

La diminution du poids des automobiles afin de réduire la consommation de carburant ainsi que l'amélioration de la sécurité sont des domaines importants de recherche dans l'industrie automobile. Les constructeurs exigent donc des matériaux plus résistants mais ayant toujours une excellente formabilité. L'augmentation de ces caractéristiques sur les aciers utilisés aujourd'hui entraînerait une augmentation importante des coûts de production, on atteint donc une limite à leur utilisation. L'industrie sidérurgique doit donc concevoir une nouvelle classe d'aciers à hautes résistances afin de respecter ce cahier des charges. Une de ces classes d'aciers à hautes résistances est la classe des aciers HR, qui sont des aciers multiphasés ou dual phase, ceci ont l'a particularité d'avoir une phase ductile grâce à leur structure contenant de la cémentite/ferrite mais aussi une phase dure du fait de la martensite présente.

Le soudage par résistance par points est un procédé d'assemblage très couramment utilisé dans l'industrie automobile. Il présente l'avantage d'être à la fois rapide, économique et adapté au soudage des aciers, principaux matériaux utilisés dans les structures de caisse en blanc automobiles. Un véhicule contient typiquement entre 3000 et 5000 points soudés. Les aciers à Haute Résistance (HR) sont de bons candidats pour les applications automobiles, avec un compromis intéressant entre résistance et masse volumique, un coût de fabrication raisonnable et une bonne aptitude au soudage par points. la tenue mécanique de l'assemblage final dépend non seulement des propriétés mécaniques intrinsèques des tôles, mais aussi de celles des liaisons soudées, par lesquelles transitent les efforts. Il est donc nécessaire de disposer d'outils permettant de prévoir la tenue mécanique des points soudés par résistance. Il permet de réaliser des assemblages continus ou discontinus par superposition ; mais il se distingue du soudage par points ou à la molette en ce que la localisation du courant et de l'effort sur la zone de soudage n'est pas obtenue par les électrodes, mais par la géométrie des pièces à souder elles-mêmes. Il est, de plus, un procédé de soudage global.

la soudabilité par points des aciers austénitiques a été largement étudiée depuis plusieurs décennies et a influencé les normes en vigueur dans l'industrie automobile, le comportement mécanique des points soudés en aciers THR présente un certain nombre de particularités, qui peuvent être considérées comme critiques par les constructeurs automobiles. Les points soudés se caractérisent ainsi par une tendance accrue aux modes de ruptures partiellement ou totalement à l'interface, malgré des noyaux fondus correctement développés et des tenues mécaniques importantes. De telles ruptures peuvent prêter à confusion sur les lignes d'assemblage automobile, où la "culture" associée à la soudabilité des aciers austénitiques

suggère qu'une rupture à l'interface est synonyme d'une soudure improprement réalisée. Par ailleurs, une autre caractéristique des points soudés en aciers THR est que leur tenue mécanique n'augmente pas forcément avec la résistance mécanique du Métal de Base (MB), ce qui constitue un paradoxe méritant d'être détaillé.

L'objectif de ce mémoire est d'apporter des éléments de compréhension sur le comportement des points soudés (influence des efforts de forgeage), dans le mode de sollicitation classiquement utilisés dans l'industrie : essai de traction.

Le premier chapitre possède deux axes principaux. Le premier axe présente la gamme des aciers à Très Haute Résistance (THR). Dans la seconde section, les connaissances actuelles sur La transformation martensitique sont résumées .ensuite dans le deuxième chapitre c'est une étude de procédé de soudage par résistance par point

La première partie de ce chapitre. III a porté sur l'étude du comportement et du phénomène de rupture différée dans les aciers austénitiques.

Quant à la suite de ce chapitre, elle comporte une description du procédé de soudage par point et ses différentes séquences sont décrites, ainsi que les mécanismes de formation du point de soudure.

,

Introduction :

Ce chapitre possède deux parties principaux. La première vise à décrire la gamme des aciers Très Haute Résistance. La seconde partie décrira la transformation martensitique .

Sous sollicitation mécanique, les aciers austénitiques métastables subissent une transformation structurale austénite-martensite,. Cette instabilité structurale se manifeste dans le domaine des températures Md, qui se trouve entre la température TE (température de l'équilibre thermodynamique des phases c.c., ferrite, et c.f.c., austénite) et la température MS (température du début de la transformation martensitique par refroidissement sans application de contraintes extérieures supplémentaires).ont peut distinguent plusieurs familles des aciers HR(aciers austénitiques métastables) :

1.1.Acier DUAL PHASE:

Ce sont des aciers composites, mélange de phases dures du fait de la martensite présente et de phases ductiles grâce à leur structure contenant de la cémentite/ferrite, cette combinaison permet l'obtention de meilleures caractéristiques mécaniques.

1.2.Les aciers TRIP

Les aciers TRIP sont conçus pour obtenir une résistance mécanique la plus élevée possible tout en conservant une certaine formabilité. Ils sont composés d'une matrice ferritique dans laquelle se trouvent des îlots de phase bainitique dure et d'austénite résiduelle. L'effet TRIP -Transformed Induced Plasticity - est la transformation de l'austénite en martensite sous l'effet de la déformation plastique. C'est ainsi que les aciers TRIP conservent une bonne formabilité. Ils sont utilisés eux aussi pour des pièces de structure et de renfort.

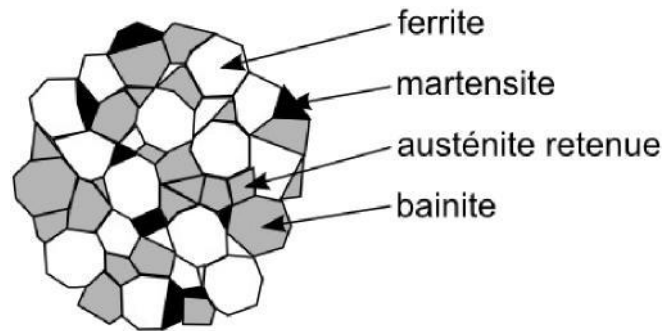
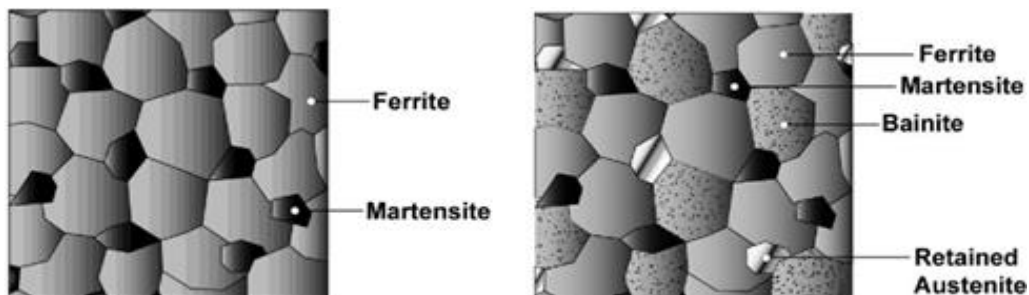


Fig1:Schéma de différents phases dans les aciers AHSS[L.T]

1.3. Les aciers Multiphase

Les aciers Multiphase sont des aciers THR laminés à chaud. Leur microstructure est soit ferritobainitique très fine, soit bainitique durcie par précipitation ou encore martensitique. Ces aciers permettent la réalisation d'éléments de structure mis en forme à froid



acier(a)

acier(b)

Fig. .2: Microstructures schématiques d'un acier(a) **DP** et d'un acier (b) **TRIP** [OL-G.B]

I.4.Principe de l'effet TRIP

La définition officielle de l'effet TRIP est : transformation martensitique induite mécaniquement.

Dans les faits, cet effet consiste à obtenir un acier austénitique à température ambiante après une trempe, et à retransformer une partie de celui grâce à une déformation pour obtenir des parties martensitiques et donc un acier du type dual phase.

- *DUCTILITE* : caractérise la capacité d'un matériau à se déformer sans rompre.
- *FRAGILE* : se dit d'un matériau facile à rompre.
- *DURETE* : caractérise la capacité d'un matériau à résister à la déformation.

I.5.Structure des aciers :Austénite :

Ce constituant n'existe pas à la température ordinaire, il n'est stable qu'à haute température, il ne peut exister à la température ambiante que par un maintien hors équilibre grâce à l'ajout d'éléments d'alliage tel que le Ni et le Mn (aciers austénitiques). L'austénite est peu dure, entre 240-300 HB.

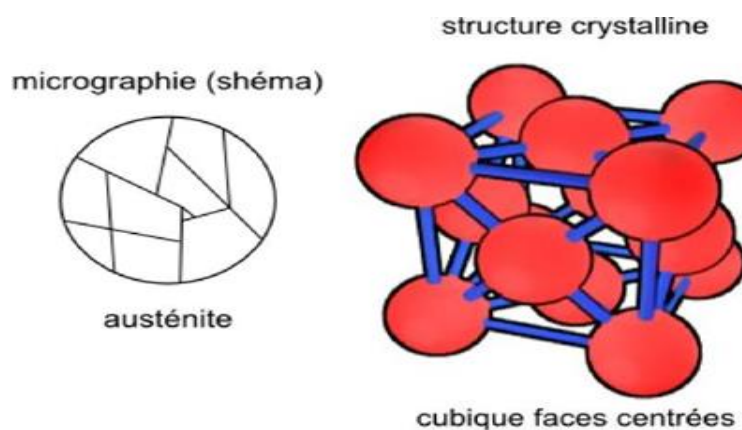


Fig :3.Structure des aciers :Austénite [L.T]

Conclusion :

Ces aciers offrent des propriétés mécaniques très intéressantes qui les rendent idéaux pour l'emboutissage des tôles minces destinées à l'industrie automobile. La transformation de l'austénite résiduelle en martensite par voie mécanique augmente la ductilité pendant la mise en forme. Par suite l'acier obtenu présente des propriétés mécaniques élevées (grâce à la martensite formée).

Introduction :

La deuxième partie de ce chapitre décrira la transformation martensitique dans les aciers austénitiques,

La transformation martensitique C'est une transformation de phase du premier ordre : les deux phases coexistent et il existe une interface entre l'austénite et la martensite. Elle se manifeste par un changement de structure cristalline qui se produit par un déplacement coordonné des atomes sur quelques distances interatomiques. C'est pourquoi la transformation martensitique est sans diffusion. L'absence de diffusion implique non seulement que la phase austénitique (phase mère) et la martensite ont la même composition chimique, mais que de plus, la martensite hérite de l'ordre et des défauts de la phase mère.

II.1.Structures cristallographiques des différentes phases :

Il existe trois types de structures cristallines de la martensite dans les aciers :

- une structure quadratique centrée (QC) caractéristique de la martensite α' ,
- une structure hexagonale compacte (HC) caractéristique de la martensite ϵ ,
- une structure quadratique à faces centrées (QFC), cette martensite n'a été observée que dans les alliages Fe-Pd et Fe-Pt

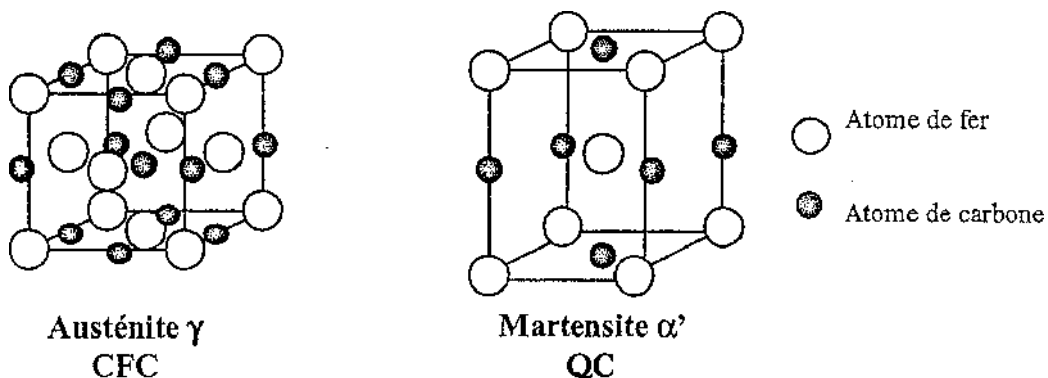


Fig ;4.: Structures cristallines de l'austénite et de la martensite α' dans les aciers[T.K-SA.Y]

II.2.Déformation de transformation

Le changement local de la structure cristallographique lors de la transformation est accompagné d'une déformation homogène du réseau cristallin avec une composante déviatorique dominante. Pour minimiser l'énergie de déformation, la martensite se forme en plaquettes suivant des plans cristallographiques particuliers appelés plans d'habitat. La déformation homogène du réseau cristallin a été décrite géométriquement par la déformation de Bain. $ET = E^B + E^{RI}$ (1)

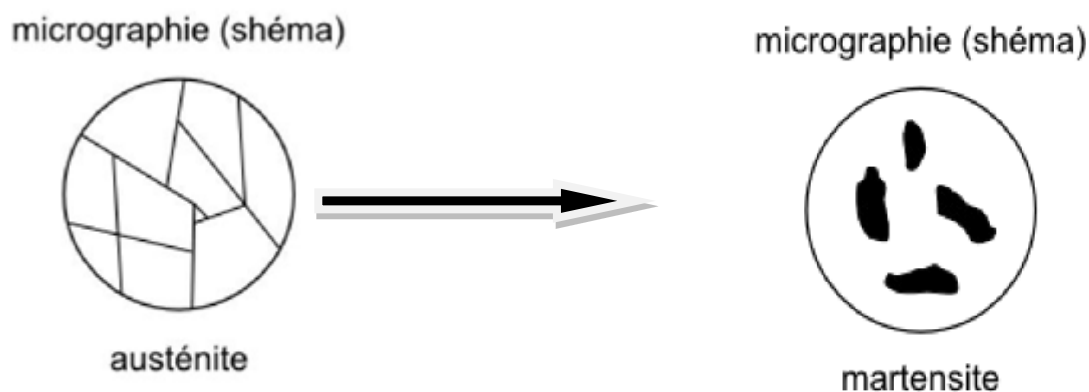


Fig.5 :shema represente la transformation austénitique à la martensite [W.B]

conclusion :

les alliages avec une teneur en nickel faible à la température ambiante et après hypertrempe, dans un état dit métastable : l'austénite n'est pas dans son état d'équilibre. Par déformation plastique (écrouissage), l'austénite métastable peut se transformer partiellement en une structure martensitique Quadratique Centrée, appelée martensite α' .

La stabilité de l'austénite est directement liée à la composition chimique de l'acier

Introduction

Dans le second chapitre nous présenterons le procédé de soudage par résistance par point, les différentes séquences possibles de cycles sont décrites, ainsi que les mécanismes de formation de point et le différent paramètre qui influent sur la tenue mécanique des points de soudure

L'invention du soudage par résistance est due à l'Américain Thomson en 1877.

Ce procédé met en œuvre l'effet Joule d'un courant de forte intensité traversant les pièces à assembler, mises au contact l'une de l'autre et sur lesquelles il est naturellement ou convenablement concentré.

Les avantages de ce procédé sont nombreux : il est facile à mettre en œuvre et à automatiser, et permet de réaliser rapidement des assemblages d'une qualité contrôlée pour un coût minimum. Aujourd'hui, une structure de caisse en blanc compte entre 3000 et 5000 points de soudure.

III.1. Différents procédés

Les procédés de soudage par résistance sont les suivants :

- le soudage **par points** donnant lieu à une soudure par recouvrement discontinue
- le soudage **à la molette** donnant lieu à une soudure par recouvrement continue et étanche
- le soudage **par bossages** ou protubérances
- le soudage **en bout** qui relève également du soudage par forgeage à chaud, dans lequel la chaleur est obtenue par effet Joule (par différence avec d'autres moyens de chauffage, tels l'induction, la friction, l'arc tournant, etc.).

la puissance électrique fournie est suffisante pour compenser les pertes thermiques diverses, la chaleur produite conduit à la **fusion des matériaux métalliques** usuels.

Le soudage par résistance consiste à faire en sorte que cette fusion se développe dans le plan de joint des deux pièces mises en contact.

Les différentes formes du soudage par résistance incluent (à quelques variantes près) une phase de **forgeage** dont l'importance métallurgique est fondamentale.

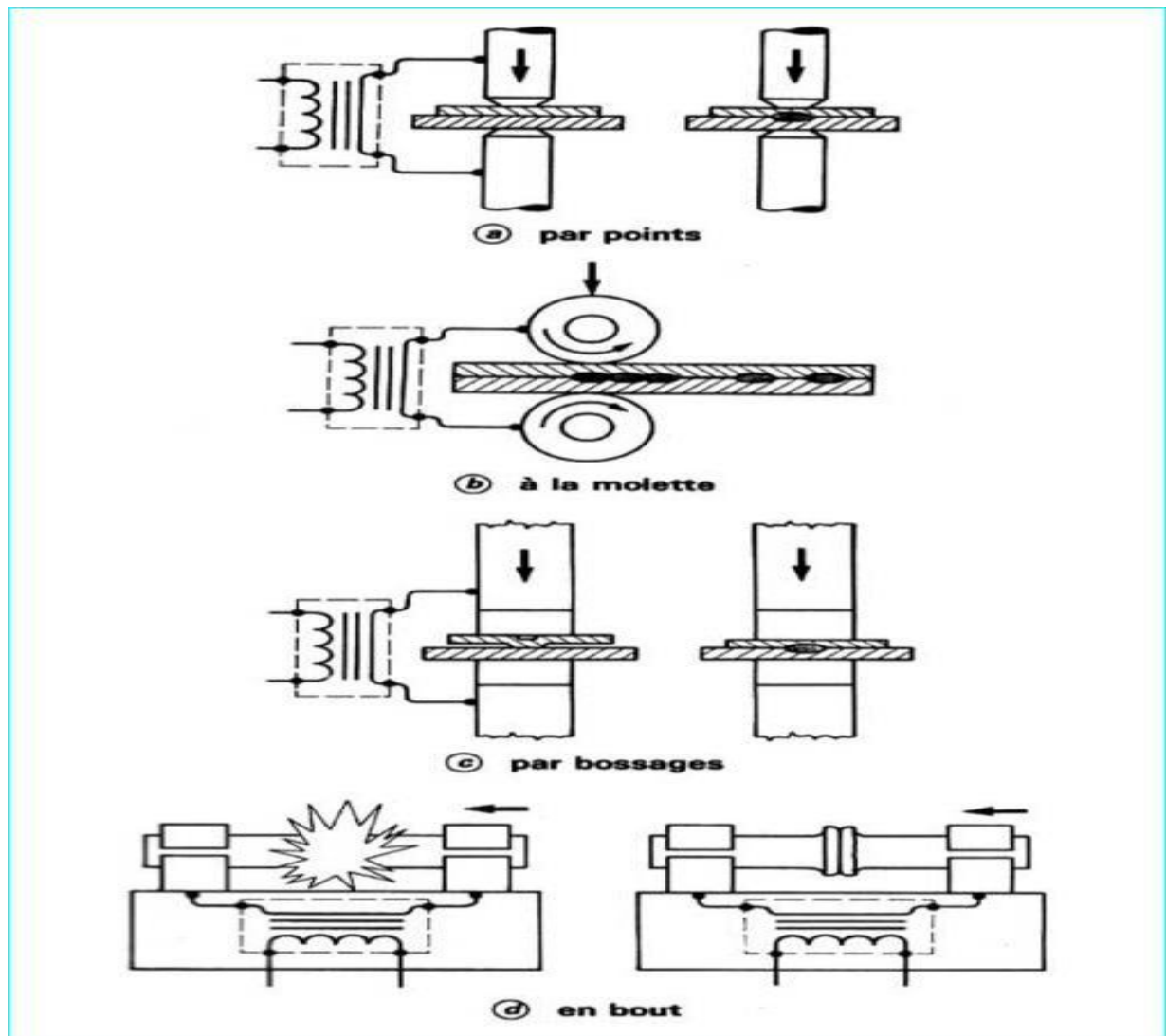


Fig.6 .différents procédure de soudage par points [.ROS]

III.2.Principe

Le soudage par résistance est un assemblage par fusion autogène sous pression de deux pièces métalliques. Ici, le chauffage s'effectue par l'effet joule provoqué par un courant électrique qui traverse les deux pièces à assembler, et l'interpénétration métallique est obtenue par l'application

simultanée d'un effort de forgeage .L'application de l'effort s'effectue par les électrodes. Ces dernières véhiculent le courant électrique, générateur d'effet Joule, et permettent également le refroidissement .

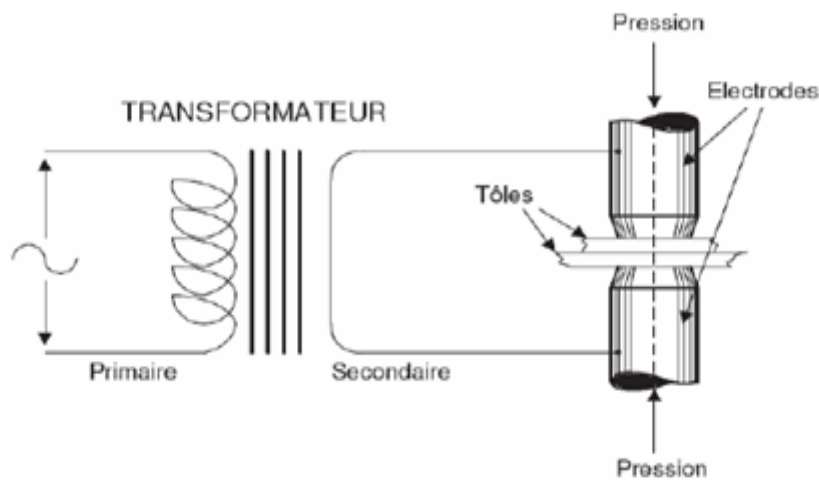


Fig.7.principe de soudage par point. [.ROS]

III.3 Séquence de soudage

La séquence de soudage se décompose en 3 phases principales : l'accostage, le soudage et le forgeage.

La phase d'accostage

Le rôle de la phase d'accostage est essentiellement mécanique. Elle vise à mettre en contact les pièces à souder et à atteindre la valeur de consigne de l'effort.

La phase de soudage

La seconde phase de la séquence de soudage, c'est-à-dire la phase de soudage proprement dite, permet de développer un effet Joule par l'établissement d'un courant électrique dans le circuit. Selon Drouart [DROU] . L'effet Joule est influencé par deux facteurs principaux : l'intensité et le temps. Les élévations de température sont localisées au niveau des résistances prépondérantes du circuit et notamment au niveau du contact tôle-tôle.

L'effort de soudage L'effort de soudage est directement lié à la résistance de contact. La résistance de contact décroît, en effet, avec l'augmentation de l'effort appliqué. Selon Drouart .
[DROU]

Elle est inversement proportionnelle à l'effort. Il est donc souvent préconisé d'utiliser un effort de soudage peu important. D'autres constatent qu'un effort plus important permet de limiter les dispersions du procédé par un meilleur contrôle de la variabilité de la résistance de contact.

- ***Le courant électrique de soudage***

Les formes du cycle de courant électrique appliqué pendant la phase de soudage sont variables. Le courant peut être appliqué en une seule séquence, qui correspond à un seul train d'ondes, que nous appelons " continu " Il est important de noter que le terme " continu " s'applique à la forme de la séquence d'application du courant et non à la nature du courant électrique. Ce dernier est de nature alternative et possède généralement comme fréquence celle du réseau de distribution général (50 Hz).

Il est aussi possible d'appliquer des séquences multiples. Dans ce cas, il s'agit du soudage par pulsations, qui consiste en la répétition d'une séquence composée d'un temps de passage de courant appelé " temps chaud " et d'un temps d'interruption du passage de courant appelé " temps froid "

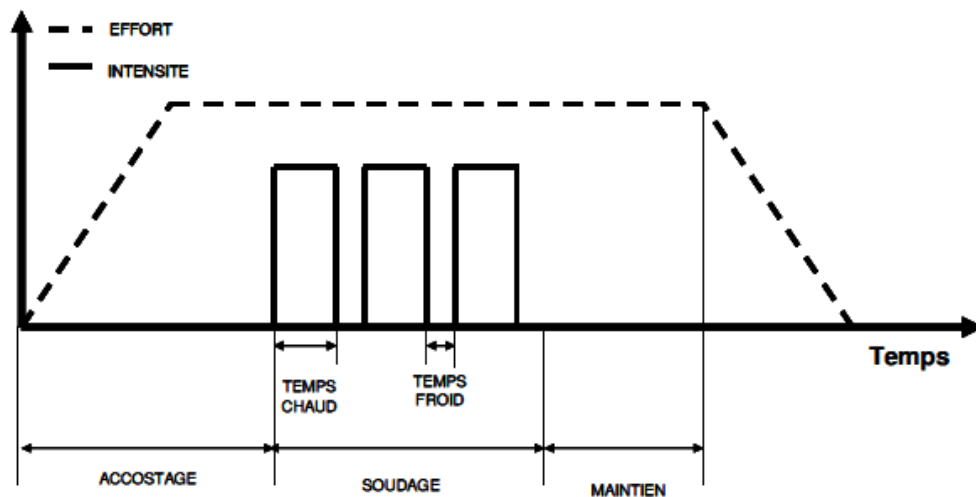


Fig..8.: Schéma de la séquence de soudage par pulsations [DROU]

Enfin, au lieu de délivrer une intensité efficace constante pendant la phase de soudage, il est possible de réaliser des pentes ou rampes appelées " slope " en début et en fin de séquence de passage du courant, notée " up slope " et " down slope "

(Ainsi, en début de la phase de soudage, l'intensité peut suivre un " contrôle de pente positif " (up slope) qui fait partie de la phase de soudage. Il s'agit d'une mise en puissance progressive du transformateur de soudage. Cette étape peut être assimilée à une sorte de préchauffage. Le "down slope " (pente négative) est une extinction progressive de la puissance. C'est l'opération inverse du " up slope ".

Certains auteurs comme Zhang et Senkara [Z.S] préconisent le " down slope " pour repousser l'apparition du phénomène d'expulsion. L'expulsion ou le crachement correspond à la projection d'acier en fusion. Ils partent du principe que la formation du noyau et l'apparition de l'expulsion ne dépendent pas seulement de la quantité d'énergie délivrée au point soudé mais aussi de la manière dont cette énergie est délivrée.

Certains constructeurs japonais appliquent un cycle continu à deux niveaux, haut et bas, mais ne donnent pas les raisons de leur application. Nègre[NEG] préconise le même type de cycle pour contrôler le refroidissement du point en dessous de la vitesse critique de trempe.

La phase de forgeage

La phase de forgeage correspond à un temps de maintien de l'effort de pression des électrodes sur les tôles. Durant cette phase, le courant électrique n'est plus appliqué. L'effort exercé par les électrodes est maintenu et le refroidissement de la soudure s'effectue par les électrodes. Dès que l'effet joule est interrompu, un refroidissement accéléré est initié qui entraîne une contraction du matériau soudé. L'application de l'effort lors du refroidissement est destinée à permettre une bonne solidification et la formation d'un noyau homogène en résorbant les retassures. Ce n'est que dans ce cas qu'une bonne tenue mécanique est constatée. Dans la plupart des séquences de soudage, l'effort est maintenu constant : il s'agit de maintien. Si l'effort est rendu plus important, on parle de forgeage. Drouart [DROU] préconise le forgeage pour des tôles d'épaisseurs supérieures à 1,5 mm qui possèdent des coefficients de dilatation thermique importants.

III.4. Notion de soudabilité

La soudabilité est, par définition, l'aptitude d'un substrat à vérifier des critères de soudabilité. La soudabilité dépend donc des critères que l'on considère. La latitude de soudage est la plage d'intensité électrique pour laquelle les critères de soudabilité sont respectés, elle est donc délimitée par deux bornes.

Dans le cas de la norme ISO 18278-2 :2004 [ISO], pour un assemblage homogène, la limite basse du domaine de soudabilité est la valeur d'intensité efficace à 0,1 kA près, pour laquelle un diamètre moyen de bouton sur trois éprouvettes est obtenu. La limite haute d'acceptation du critère est la valeur d'intensité efficace à 0,1 kA près, avant l'apparition du phénomène d'expulsion ou de crachement. En fonction de l'épaisseur du substrat, de l'épaisseur du revêtement et de la tenue mécanique du métal de base, la norme définit les réglages à appliquer, à savoir le temps de soudage, le temps de maintien, le type d'électrode, l'effort appliqué par les électrodes et le débit minimum de refroidissement des électrodes.

Il est important de noter que la valeur de [1. 3.5](mm) en épaisseur marque une véritable frontière. Pour une épaisseur inférieure à cette valeur, le cycle de soudage est composé d'un seul train d'ondes. Pour une valeur supérieure, le soudage s'effectue par pulsations.

Pour cette norme, aucune tenue mécanique n'est requise que ce soit en sollicitation de traction en croix ou en traction-cisaillement, même si celles-ci doivent figurer sur le procès-verbal. Son principal critère est d'obtenir la formation du point.

L'existence de cette norme n'empêche pas les constructeurs automobiles d'avoir leurs propres usages et critères. Certains cahiers des charges de constructeurs, par exemple, requièrent un diamètre moyen de bouton ainsi qu'un effort à la rupture minimum pour une sollicitation de traction en croix; dans le cas de la sollicitation de traction-cisaillement, un effort à la rupture minimum est requis. Par exemple, il n'existe aucune normalisation JIS[JIS] (Japonaise Industriel Standard) associée à la soudabilité.

III.5.Métallurgie du soudage

Les transformations métallurgiques subies par l'acier lors de l'opération de soudage par résistance sont très importantes et complexes, compte tenu de la rapidité des cycles thermomécaniques appliqués. En effet, un point de soudure est réalisé en quelques dixièmes de seconde et les vitesses de chauffage et de refroidissement sont de l'ordre de 1000 °C/s.

La rapidité des cycles thermiques de soudage ne permet pas de raisonner à partir du diagramme d'équilibre pour prévoir la nature des différentes phases. Une hystérésis A_c-A , est mise en évidence selon que la transformation se fait au chauffage ou au refroidissement. Son amplitude augmente avec les cinétiques de chauffage et de refroidissement. Aussi, lors du soudage, les températures des transformations sont décalées par rapport à celles du diagramme d'équilibre. Néanmoins afin de faciliter la définition des différentes zones microstructurales et leur interprétation, le raisonnement se fait à partir du diagramme d'équilibre.

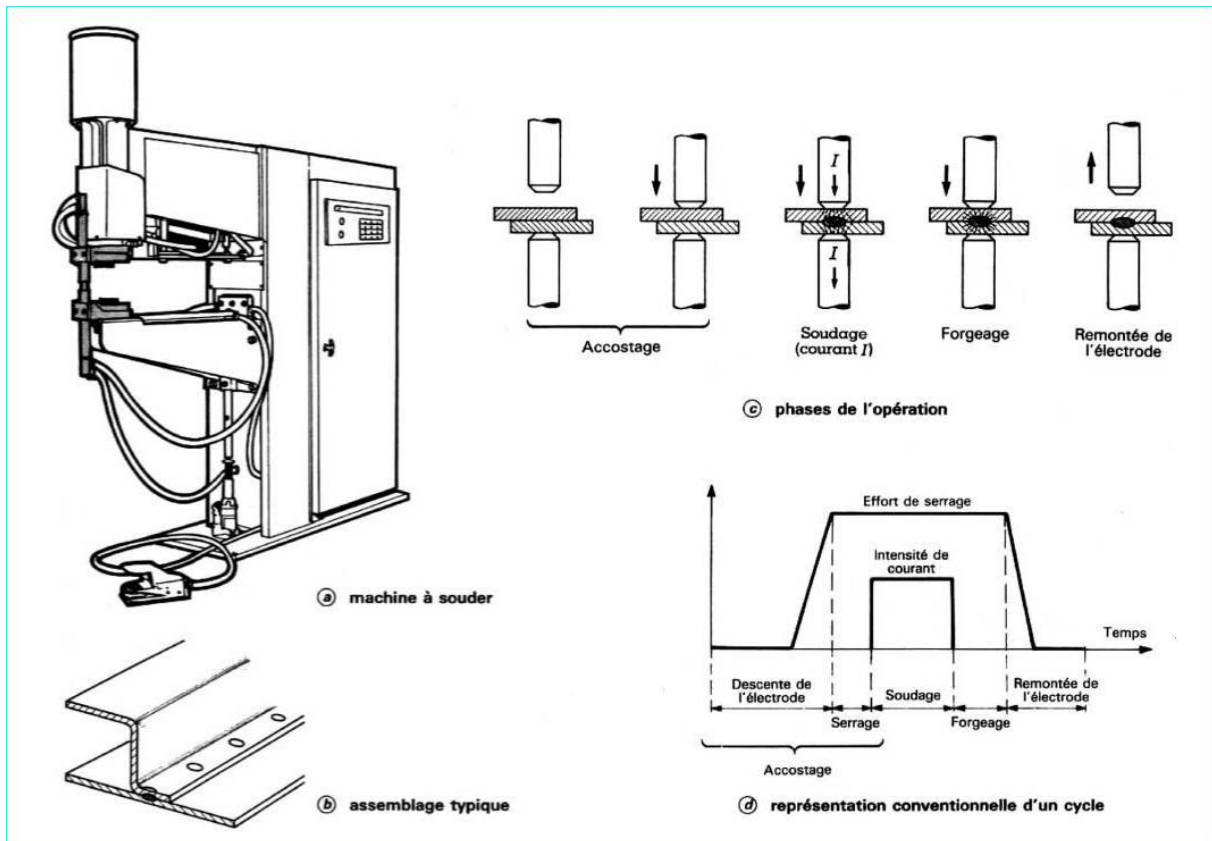


Fig .9.schéma de métallurgie de soudage .[BLON]

➤ Paramètres du soudage par points

Les paramètres du soudage par points sont essentiellement :

- le diamètre des électrodes ;
- l'effort de serrage et de forgeage ;
- l'intensité du courant ;
- la durée de passage du courant et celle du forgeage.

➤ Électrodes

Les électrodes sont des pièces en cuivre ou alliage de cuivre qui sont emmanchées dans des porte-électrodes fixés à l'extrémité des bras de la machine à souder et qui viennent en contact avec les pièces. Elles ont un rôle électrique, mécanique et thermique. Elles sont définies par leur diamètre et leur forme en fonction des épaisseurs à souder.

Le diamètre des électrodes détermine la dimension transversale du *lingot*. On admet que la zone fondue a un diamètre transversal d compris entre D et $1,2 D$, D étant le diamètre des électrodes.

Une règle tirée de l'expérience et formant recommandation, établit la relation entre le diamètre d'électrode D et les épaisseurs à souder e (en millimètres) :

Dans certaines applications, comme le soudage d'alliages légers, il est préférable d'employer des électrodes à extrémités sphériques ou en dôme. Le rayon r dépend là aussi des épaisseurs à souder selon l'expression :

$$r = Ae + B \dots\dots\dots (2)$$

avec $A = 20$ et $B = 50$ mm pour l'acier doux et l'acier inoxydable, $A = 70$ et $B = 40$ mm pour les alliages légers,

Les électrodes sont des pièces d'usure et considérées, avec l'énergie électrique et l'air comprimé, comme éléments consommables. Les électrodes s'usent par leur diamètre actif qui s'accroît en affectant les dimensions du lingot et ses caractéristiques. La tenue des électrodes conditionne donc la fiabilité du procédé. Elle doit être surveillée et optimisée. Les durées de vie, en nombre de points, vont de quelques centaines à plusieurs milliers, pour une qualité de soudure conforme à des critères courants.

$$D = 5\sqrt{e} \dots\dots\dots (3)$$

➤ **Effort :**

L'action de l'effort s'exerce durant tout le cycle de soudage, c'est-à-dire avant, pendant et après le passage du courant.

Avant le passage du courant, il établit l'**accostage** des électrodes sur les pièces et des pièces entre elles.

III.6. Formation du point

- **Contrôle du procédé**

Les grandeurs physiques mesurées lors du soudage par point sont : le débit d'eau des électrodes, leur déplacement, l'effort appliqué par ces électrodes, la tension et l'intensité de soudage. Ces deux dernières grandeurs permettent d'avoir accès à l'évolution de la résistance dynamique. La

résistance dynamique est le moyen de contrôle le plus courant du procédé de soudage par résistance par point car elle représente l'évolution de la résistance globale du circuit électrique.

La résistance dynamique est calculée comme le rapport de la tension sur l'intensité. Cependant, le signal de tension est composé de deux contributions, l'une résistive et l'autre inductive. Aussi, la résistance dynamique est calculée par demi-période de passage du courant. La partie inductive du signal est nulle lorsque le signal d'intensité atteint ses maxima.

De nombreux travaux décrivent l'évolution de la résistance dynamique avec le développement du point pour des tôles revêtues ou non. Dans toutes ces approches, l'augmentation du temps de soudage implique une augmentation de la température et un meilleur développement de la zone fondue.

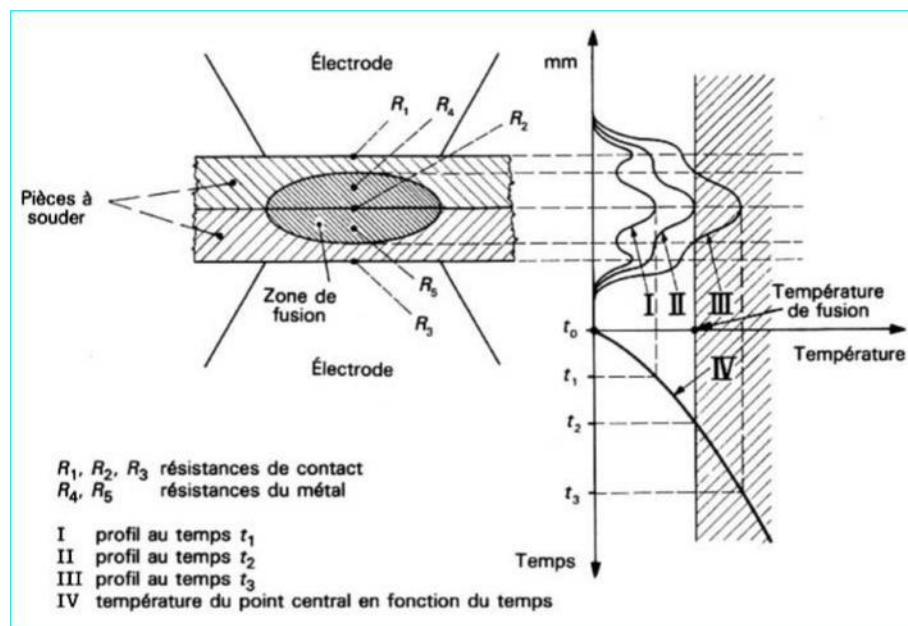


Fig.10: schéma représentatif les procédures de soudage par point selon.[BLON]

Dans le cas d'une tôle sans revêtement, l'évolution de la résistance dynamique est divisée en 5 étapes :

1. la décroissance rapide due à l'effacement des aspérités de surface,

2. la fin de l'affaissement de la résistance : les aspérités des résistances de contact sont totalement effacées et le métal s'échauffe. La résistance ohmique du métal croît avec la température et la résistance globale augmente lorsque ce phénomène l'emporte.

l'augmentation de la résistance à cause d'une augmentation de la température

l'échauffement entraîne la fusion à l'interface, la zone fondue croît rapidement, le taux d'accroissement est une combinaison de l'augmentation de la résistivité et la chute de la résistance de contact électrode/tôle par l'augmentation de la surface de contact

5. la décroissance de la résistance comme conséquence de l'indentation.

Seuls William et Parker constatent qu'il est souvent difficile de faire un lien entre l'évolution de la résistance dynamique et le diamètre du point. Ils soulignent que l'estimation des caractéristiques de la résistance dynamique est sérieusement limitée par les moyens de mesure utilisés jusqu'alors.

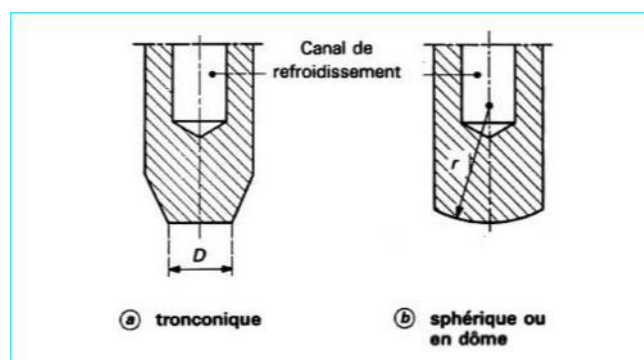


Fig.11. . la forme des electrodes [CHO-GO] [DAN]

III.7.Transformation Métallurgie du soudage

Les transformations métallurgiques subies par l'acier lors de l'opération de soudage par résistance sont très importantes et complexes, compte tenu de la rapidité des cycles thermomécaniques appliqués. En effet, un point de soudure est réalisé en quelques dixièmes de seconde et les vitesses de chauffage et de refroidissement sont de l'ordre de 1000 °C/s.

La rapidité des cycles thermiques de soudage ne permet pas de raisonner à partir du diagramme d'équilibre pour prévoir la nature des différentes phases

Une hystérésis A_c-A , est mise en évidence selon que la transformation se fait au chauffage ou au refroidissement. Son amplitude augmente avec les cinétiques de chauffage et de refroidissement. Aussi, lors du soudage, les températures des transformations sont décalées par rapport à celles du diagramme d'équilibre. Néanmoins afin de faciliter la définition des différentes zones microstructurales et leur interprétation, le raisonnement se fait à partir du diagramme d'équilibre.

III.8. Transformations en phases solides au chauffage

En partant du métal de base vers la zone fondue, au chauffage, différentes zones peuvent être distinguées :

Une Zone Affectée Thermiquement Sub-Critique, notée SCZAT, où aucun changement de phase n'est observé avec une température de pic en dessous de A_{ct} . Selon certaines modifications (précipitation, revenu) peuvent être décelées selon l'état initial du métal de base.

Une zone de transformation partielle ou ZAT Inter-Critique -ICZAT- dont les températures de pic sont comprises entre A_{GI} et A_{c3} . Dans ce domaine coexistent la ferrite α et l'austénite. Cette zone est le début de la Zone Affectée Thermiquement (ZAT).

A partir de la température $A_{c\epsilon}$, la transformation austénitique est totale. Cette nouvelle structure remplace la structure antérieure. Cette zone austénitique est divisée en deux parties. Pour des températures proches de A_{c3} , une zone à grains austénitiques fins est notée, il s'agit de la ZAT à Grain Fin (GFZAT), par opposition à la zone où un grossissement des grains austénitiques est observé pour des températures de pic proches de la température de liquidus.

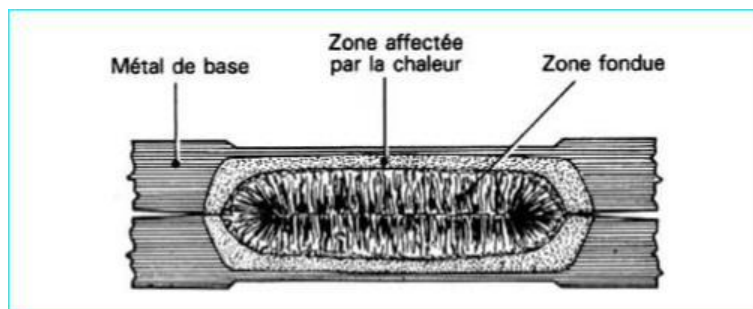


Fig12.. :Soudage par points : coupe d'un point de soudure [E.H-LAM]

III.9. Identification des ZAT sur une coupe transversale

Les différentes grandeurs géométriques du point soudé identifiables sur une coupe transversale sont définies par la figure. Les numéros 1, 2, 3 et 4 correspondent respectivement au métal de base, à la zone fondue, à la zone affectée thermiquement et à l'indentation des électrodes. On note que les différentes parties de la ZAT ne sont pas différenciées. La limite extérieure de ZAT est donc la ZAT intercritique (ICZAT).

III.10. Phénomènes physiques intervenant pendant le soudage par point

On a observé que, pendant la formation d'un point de soudure par résistance :

- la **résistance électrique** mesurée aux électrodes suivait une courbe en corrélation directe avec l'évolution de la dimension du lingot ;
- l'**expansion en volume**, due à la transformation de phase solide → liquide, induisait un déplacement mesurable de l'électrode supérieure, également en corrélation avec la dimension du lingot.

Ces phénomènes sont signalés ici, car ils sont la base de systèmes automatiques de contrôle non destructif de la qualité des soudures par points, en cours d'opération (in process en anglais).

III.11. Caractéristiques des soudures par points

Elles sont de natures :

■ **dimensionnelle :**

— diamètre du lingot mesuré sur une coupe macrographique ou après une opération de déboutonnage. Il est en relation avec la nature des matériaux et les épaisseurs pénétration, mesurée sur une coupe. Elle est de l'ordre de 60 à 80 % de l'épaisseur de la tôle. Elle conditionne, avec le diamètre, les propriétés mécaniques du lingot ;

— empreinte, mesurée directement ou sur une coupe. Elle ne doit pas dépasser 10 % de l'épaisseur de la tôle ;

— séparation des tôles : elle doit être négligeable, car elle découle de valeurs paramétriques trop élevées et dégrade la tenue mécanique ;

— l'écartement des points, leur position par rapport à la lisière de l'une des tôles, etc. sont également des critères intervenant dans la tenue globale de l'assemblage

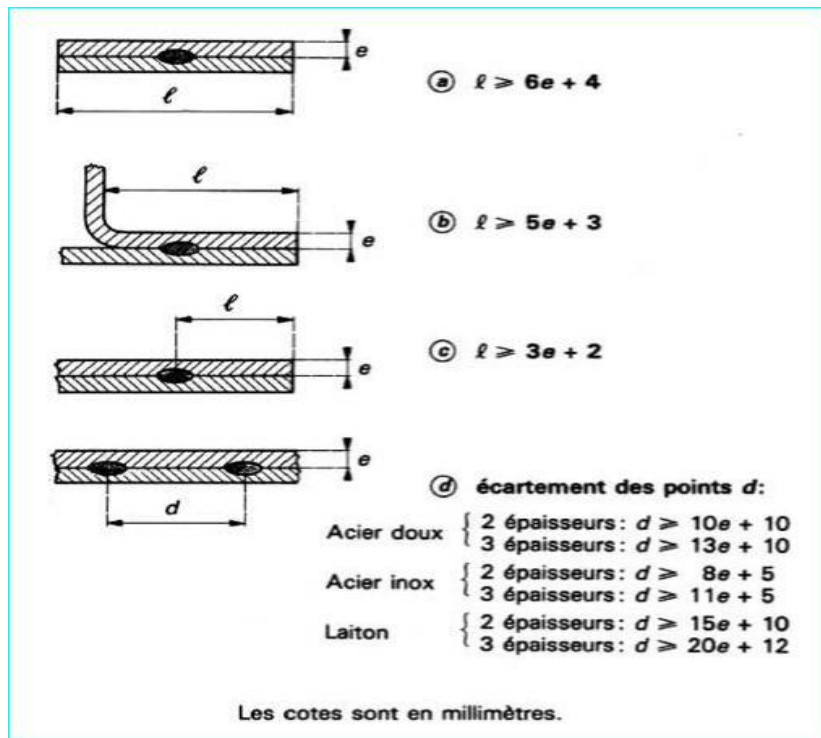


Fig13.. :Soudage par points : position des points[CHO-GO] [DAN]

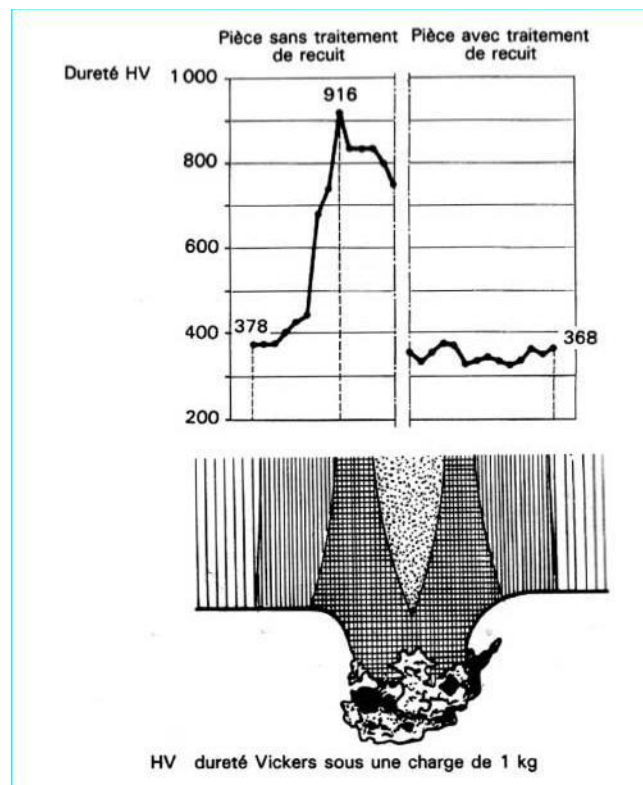


Fig.14.Soudage en bout : dureté d'une soudure[CHO-GO] [DAN]

▪ **Vitesse**

Elle intervient comme facteur de productivité, mais elle est limitée par des considérations de qualité. En effet, par disparition du forgeage, les caractéristiques mécaniques des soudures diminuent lorsque la vitesse augmente

La vitesse est liée à la variable temps de soudure et, également grâce à la modulation, au forgeage. C'est la raison pour laquelle, dans les cas extrêmes, on arrête les molettes en synchronisme avec le passage du courant. On réalise alors des soudures par points chevauchants, sur lesquels on applique un véritable cycle de forgeage indépendant de l'effort de soudage. Cette façon de procéder est appelée soudage en roll-spot

III.12.Courant et modulation

Tout comme l'effort, le courant est fonction des matériaux à souder, de leurs épaisseurs et de la vitesse de soudage, donc du diamètre des molettes.

La modulation permet d'appliquer au soudage à la molette les avantages du soudage en temps court, rencontrés en soudage par points. L'intensité est réglée, toutes choses égales par ailleurs, au-dessous de la limite où apparaissent des expulsions (crachements).

III.13.Tensioninterfaciale et mode de croissance

La tension interraciale liquide/solide est une des grandeurs physico-chimiques qui régit les conditions d'équilibre thermodynamique local entre liquide et solide à travers une interface de forme quelconque. Dans le cas d'un corps pur, la relation de Gibbs-Thomson relie la température d'équilibre local à la courbure locale dans le cas d'une tension inter faciale isotrope.

Conclusion :

Une analyse mécanique simple du point soudé soumis à un chargement donné permet

d'obtenir des relations entre les paramètres géométriques principaux (diamètre du point, épaisseur de tôle, dimensions de l'éprouvette) et la force à la rupture du point, en faisant intervenir les propriétés mécaniques du matériau.

Néanmoins ces paramètres jouent un rôle considérable sur la tenue mécanique des points soudures qui influent directement ou indirectement sur les joints de soudures.

Introduction :

Ce chapitre est consacré à la caractérisation du comportement mécanique et microstructurale de l'acier à effet TRIP 304L.

Avant de présenter les résultats, nous commencerons par une étude générale des propriétés mécaniques et microstructurales de notre acier, suivie d'une description des éprouvettes et du dispositif expérimental ayant permis de réaliser le soudage par point. Enfin, le déroulement des essais en mettant l'accent sur les conditions et les procédures utilisées lors de cette étude sera présenté.

IV.1. Matériau de l'étude

IV.1.1. Composition chimique

Le matériau utilisé pour cette étude est un acier austénitique instable de la famille 304L sous forme de tôles minces d'épaisseur de 3mm. Sa dénomination est 304L, ce qui correspond à la désignation européenne selon AFNOR **X2CrNi18-9**. Le (L) signifie que l'acier à une faible teneur en carbone. La composition chimique de l'acier est donnée dans le tableau II.1 selon la fiche technique.

Tableau II-1 Composition chimique de l'acier inox 304L (100% austénitique)

Désignation	C	Cr	Ni	Si	Mn	P	N	S
Eléments %	≤ 0.03	18 - 20	8 - 12	0.45	1.31	0.025	0.056	0.005

Nous avons réalisés la composition chimique de la tôle au sein de la Société Nationale des Véhicules Industriels SNVI à l'aide d'un spectromètre JOBIN YVON 123F.

Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau II-2.

Tableau II-2 Composition chimique selon SNVI

symbole	désignation	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N
Eléments %	304L	0.026	0.52	1.49	0.027	0.002	17.23	9.45	0.064

Le caractère inoxydable de cet acier est dû à la teneur en chrome supérieure à 12% qui permet la formation en surface d'une couche d'oxyde protectrice. Le nickel et le manganèse sont des éléments gammagènes qui stabilisent la phase austénitique même à température ambiante. Le pourcentage en carbone dans cet acier est faible, notamment pour améliorer la

soudabilité, mais aussi dans le but d'éviter la formation de carbures de chrome, cause de la corrosion intergranulaire.

En comparant la composition chimique de la tôle donnée par la norme AFNOR X2CrNi 18-9 et celle obtenue par l'analyse, nous avons constaté que presque tous les éléments analysés (C, Cr et Ni) ont des teneurs très proches de celles données par la norme tel que le carbone C = 0.026, le nickel Ni = 9.45 sauf que pour le chrome Cr = 17.23 qui est proche de la fourchette donnée par la norme.

IV. 2. Elaboration de l'alliage étudié

L'alliage AISI304L étudié est destiné au marché de l'automobile pour la réalisation de pièces mécaniques, de ressorts, mais aussi des pièces embouties. L'acier de l'étude a été produit directement sous la forme de tôles minces. Ces tôles sont mises en forme par laminage à partir de lingots. Ces lingots subissent plusieurs laminages à chaud (à 1200°C et 1000°C) jusqu'à une épaisseur de 3 mm. La largeur maximale des tôles alors obtenue est de 1320 mm. Après découpe à la cisaille, les tôles subissent un traitement thermique d'hypertrempe dont le but est d'obtenir à la température ambiante une structure austénitique homogène. Pour ce faire, on chauffe l'alliage entre 1 000 et 1 150°C, suivant la nuance. Le maintien à cette température est de l'ordre de 1 à 3 minutes par millimètre d'épaisseur. Il est suivi d'un refroidissement très rapide dans l'air ou dans l'eau. Les tôles sont enfin décalaminées à l'acide chlorhydrique dilué.

IV.3. Analyse microstructurale

IV.3.1 Préparation des échantillons

Les échantillons pour l'étude microstructurale ont été découpés sur la tôle sous forme de rectangle. Les échantillons une fois découpés, puis enrobés. Un polissage mécanique est alors réalisé, Les différents disques de polissage utilisés sont :

- Disques SiC 180/600/800/1000/1200, lubrification à l'eau,
- Disque à feutre, lubrifiant alumine.

IV.3.2. Procédure d'attaque

Après polissage, les échantillons sont attaqués chimiquement pour révéler la morphologie des différentes phases présentes ainsi que les joints de grains austénitiques. Cette attaque est une attaque électrolytique. Elle est réalisée avec une solution d'acide oxalique, sa

composition chimique est de 10g de $C_2H_4O_4$ et 100ml H_2O . Les paramètres de l'attaque sont les suivants : 10 Volts et 40 secondes de temps d'attaque.

IV.3.3. Observation microscopiques

Après préparation des échantillons, polissage mécanique et attaque électrolytique, nous avons réalisé des observations microscopiques. Nous avons effectués ces dernières à l'aide d'un microscope optique équipé d'une camera relié à un ordinateur.

IV.3.2.1. Micrographie à l'état initiale

A l'état initial, le matériau est un polycristal monophasé constitué de grains entièrement austénitiques pour la nuance Inox X12CrNi18-9 obtenue après polissage et attaque chimique (attaque électrolytique) est présentée sur la figure II.1.

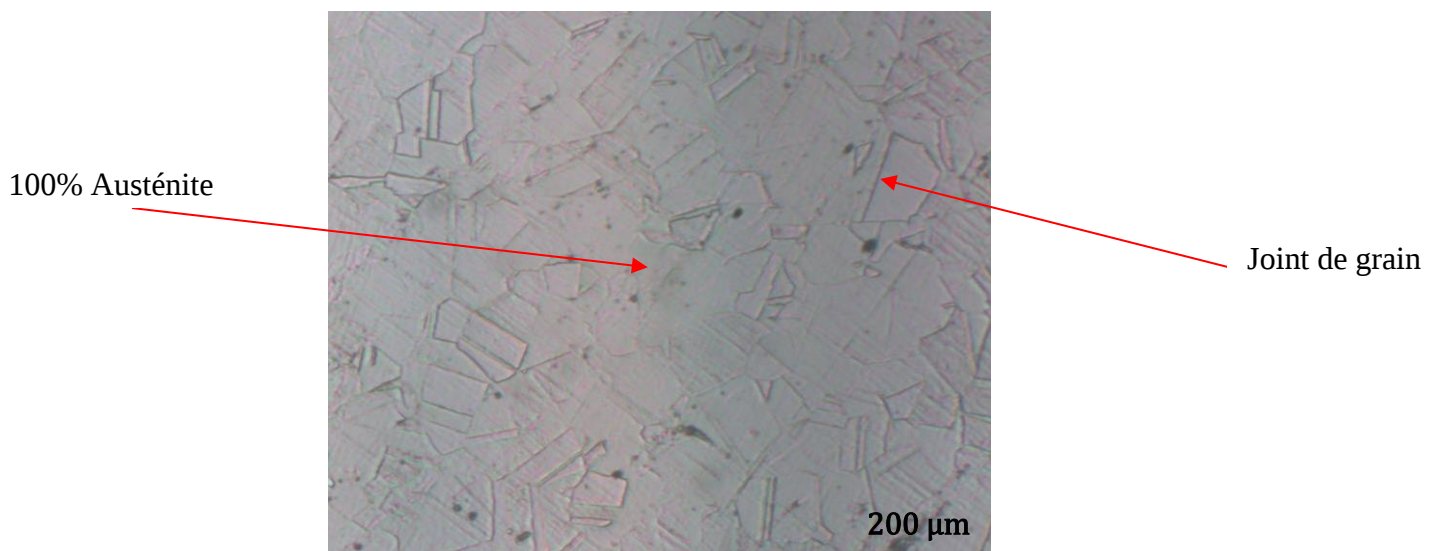


Fig. II.1 : Micrographie optique de l'acier Inox X2CrNi18-9 à l'état initiale

IV.3.4. Essai de dureté à l'état initial

Après observations microscopiques de l'acier 304L, nous avons réalisés des essais de dureté sur ce dernier.

IV.3.4.1. Essais de dureté Vickers (HV)

L'essai consiste à faire pénétrer en appliquant une force (**F**) sur un pénétrateur ayant une forme de pyramide, en diamant de base carrée avec un angle au sommet de 136°.

IV.3.4.2. Résultats des essais Vickers

Nous avons réalisés des essais de dureté Vickers (HV) sur la tôle à l'état initial. Les résultats obtenus sont rassemblés dans le tableau II-3 ci-après.

Tableau II-3 Dureté Vickers du l'acier Inox X2CrNi 18-9 à l'état initial

Nbre	1	2	3	4	5	6	7	8	Moy
1^{er} essai	190.78	183.90	187.30	183.90	187.30	190.78	187.30	183.90	186.89
2^{ème} essai	183.90	190.78	187.30	190.78	190.78	183.90	183.90	183.90	186.90
3^{ème} essai	183.90	183.90	183.90	187.30	183.90	183.90	183.90	183.90	184.33
Dureté moyenne sur la tôle (Hv)									186.04

On remarque que les duretés obtenues à l'état initial sur différentes zones de la tôle, qu'elles sont homogènes sur toute la surface de la tôle, et la moyenne de se dernier est de 186,04 HV.

IV.4 Comportement en traction

Nous allons maintenant effectuer la caractérisation mécanique du notre matériau à l'état vierge.

IV.4.1. Géométrie des éprouvettes de traction

Les éprouvettes de traction adoptent deux géométries : cylindrique ou plate. La section doit être constante sur une longueur suffisante pour obtenir un état de contrainte homogène pendant l'essai.

Pour la nuance 304L de l'acier, toutes les éprouvettes de traction ont été prélevées en pleine tôle dans le sens de laminage, 45° et 90°. Usinées à l'aide d'une fraiseuse à commande numérique. La figure II.2 montre le plan des éprouvettes utilisées pour les essais de traction.

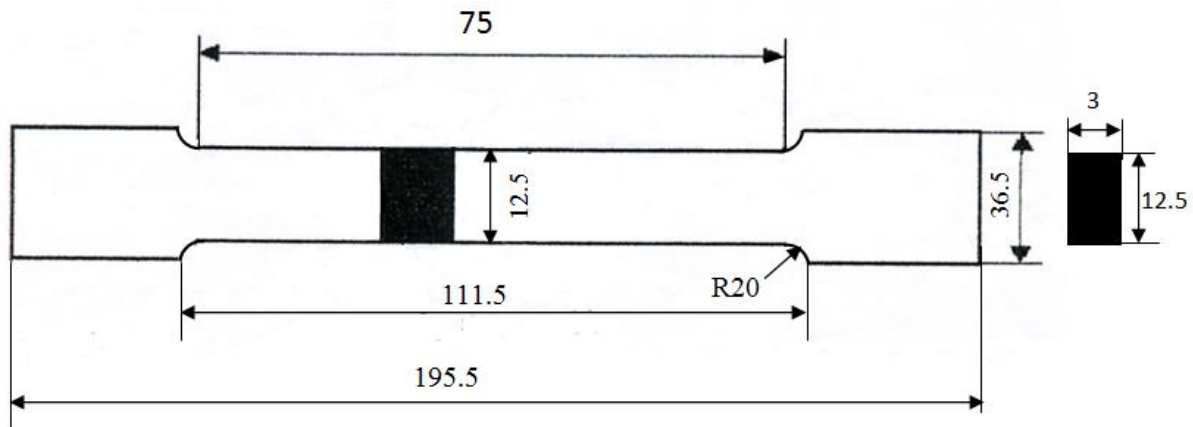


Fig. II.2 : dimensions de l'éprouvette de traction en (mm)

IV.4.2. Condition de déroulement de l'essai

Cet essai est réalisé au sein de laboratoire de département de génie civil dans des conditions ambiantes et isothermes, sur des éprouvettes plates réalisées à l'entreprise national des industries de l'électroménager.

Les essais ont été effectués à une vitesse de 10mm/mn et une vitesse de chargement constante égale à 100 N.S^{-1} qui est largement inférieure à la charge maximale que peut exercer la machine (250 KN). Les modules de commande permettent de contrôler la vitesse de chargement et la maintenir constante et d'enregistrer l'allongement absolu que subi l'éprouvette ainsi que la force de réaction de celle-ci au cours de l'essai.

Après avoir mis en place l'éprouvette et choisis la vitesse de déplacement, on lance l'essai. On suit l'allongement de l'éprouvette alors, on remarque trois stades distincts de déformation :

En premier lieu un allongement restreints, suivi d'une diminution homogène de la section sur toute la longueur de l'éprouvette qui devient de plus en plus opaque, et enfin apparition de la striction jusqu'à rupture donc l'essai est terminé et les résultats sont directement obtenus par chaîne d'acquisition et enregistrés sur le microordinateur.

Une fois que la courbe brute de traction qui donne la variation de charge (**F**) appliquée à l'éprouvette en fonction de l'allongement (ΔL) subi par celle-ci est obtenue, il est nécessaire de modifier cette courbe afin de la rendre indépendante des dimensions initiales de l'éprouvette et uniquement caractéristique du matériau étudié. Pour se faire on divise la charge (**F**) sur la section initial (**S**₀) de l'éprouvette afin d'obtenir la contrainte nominal (**σ**).

L'axe des ordonnées est donc maintenant gradué en unité de contrainte, de façon semblable en divise l'allongement (ΔL) qui est la différence entre la longueur instantané (L) et la longueur initial entre repère (L_0) de l'éprouvette par cette longueur initial (L_0) et on obtient ainsi la déformation généralement exprimée en pourcentage et l'axe des abscisse devient ainsi l'axe des déformation (ϵ), cette courbe relative est appelé courbe nominal de traction du matériau ou simplement courbe de traction .

Pour chaque vitesse de déformation, une série de trois essais de traction sur éprouvette a été réalisée. Toutes les conditions expérimentales étaient identique pour l'ensemble des ces essais.

La figure II.3 présente le courbe de traction de l'acier X2CrNi18-9 dans la Direction de Laminage, à température ambiante et pour la vitesse de déformation 10mm/min

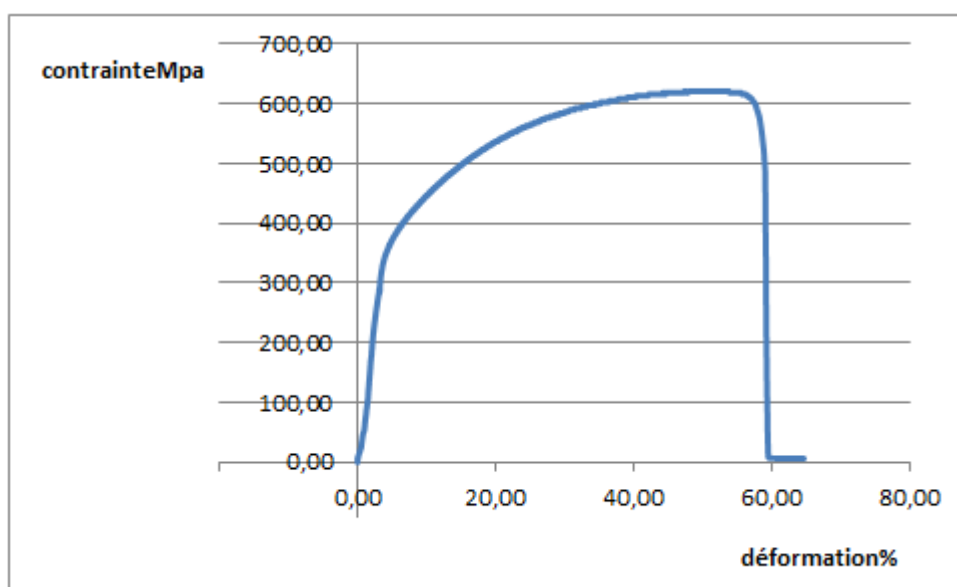


Fig. II .3.Courbe de traction de l'acier Inox 304Là V=10 mm/min

Tableau.II.4.Caractéristiques mécanique de L'acier 304L à la vitesse de déformation V=10mm/min

Température (°C)	Caractéristiques			
	$R_{0,2\%}(MPa)$	$R_m(MPa)$	$E(MPa)$	$A(\%)$
Ambiante	369.1	629.5	161160.4	60

La figure II.4 présente la courbe de traction de l'acier 304L dans la Direction de 45°, à température ambiante et pour la vitesse de déformation 10mm/min.

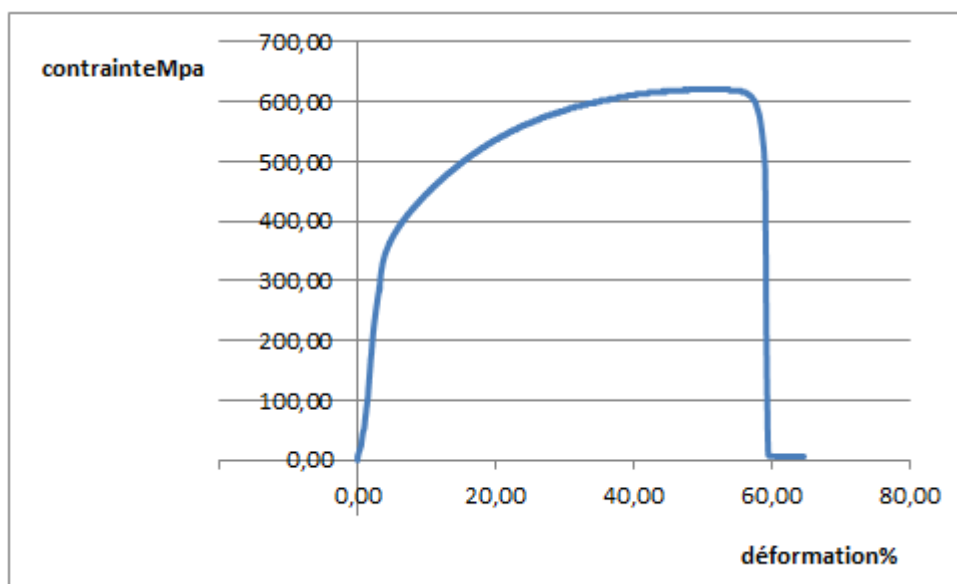


Fig. II.4.Courbe de traction de l'acier Inox 304L à V=10 mm/min

Tableau II.5.Caractéristiques mécanique de L'acier 304L à la vitesse de déformation V=10mm/min

Température (°C)	Caractéristiques			
	$R_{0.2}(MPa)$	$R_m(MPa)$	$E(MPa)$	$A(\%)$
Ambiante	369.1	629.5	161160.4	59

La figure II.5 présente la courbe de traction de l'acier 304L dans la Direction de 90°, à température ambiante et pour la vitesse de déformation 10mm/min.

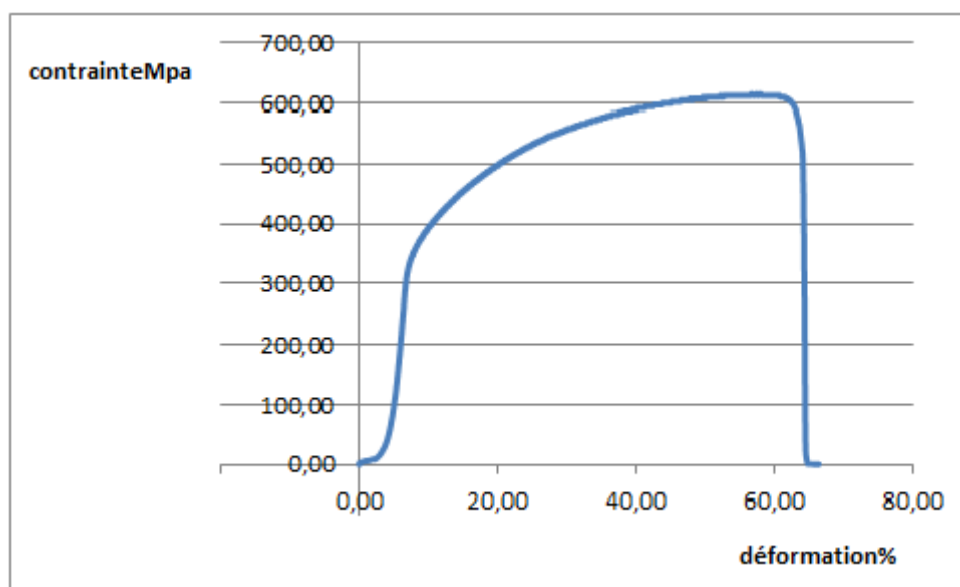


Fig. II.5 Courbe de traction de l'acier Inox 304L à $V=10$ mm/min

Tableau II.6. Caractéristiques mécaniques de l'acier 304L à la vitesse de déformation $V=10$ mm/min

Température (°C)	Caractéristiques			
	$R_{0.2\%}(MPa)$	$R_m(MPa)$	$E(MPa)$	$A(\%)$
Ambiante	372.3	638.8	181111	68

La figure II.7 représente la superposition des différentes courbes de traction, on constate que les caractéristiques intrinsèques de notre acier est différentes selon le sens de découpage de la tôle.

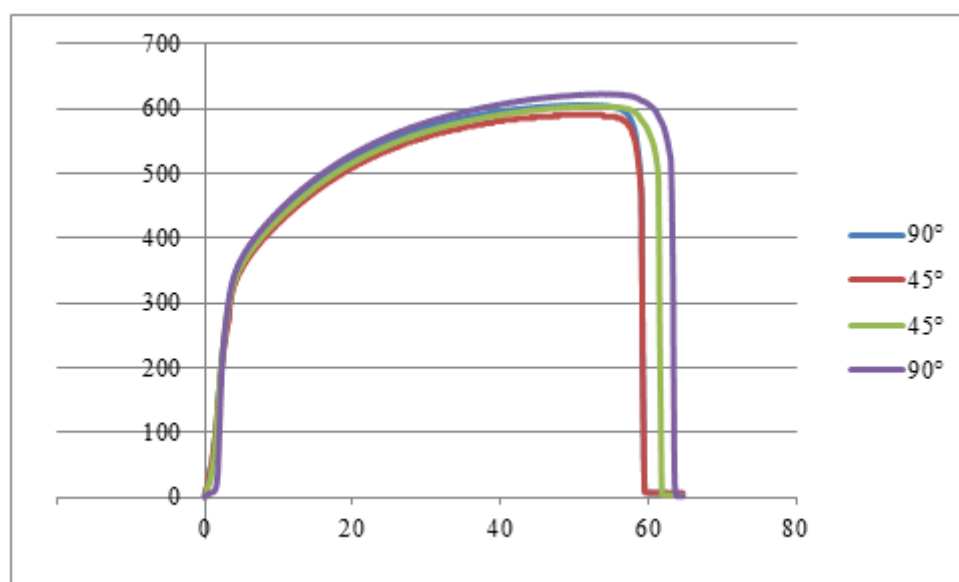


Fig. II.7. superposition des courbes de traction à différentes directions (90° , 45°) à vitesse = 10 mm/min

IV.4.3. Analyse de la microstructure

La microstructure de l'acier a été observée à l'état initial et après l'essai de traction. Après polissage et attaque chimique, les figures II.8, II.9 et II.10 présentent les différentes microstructures obtenues.

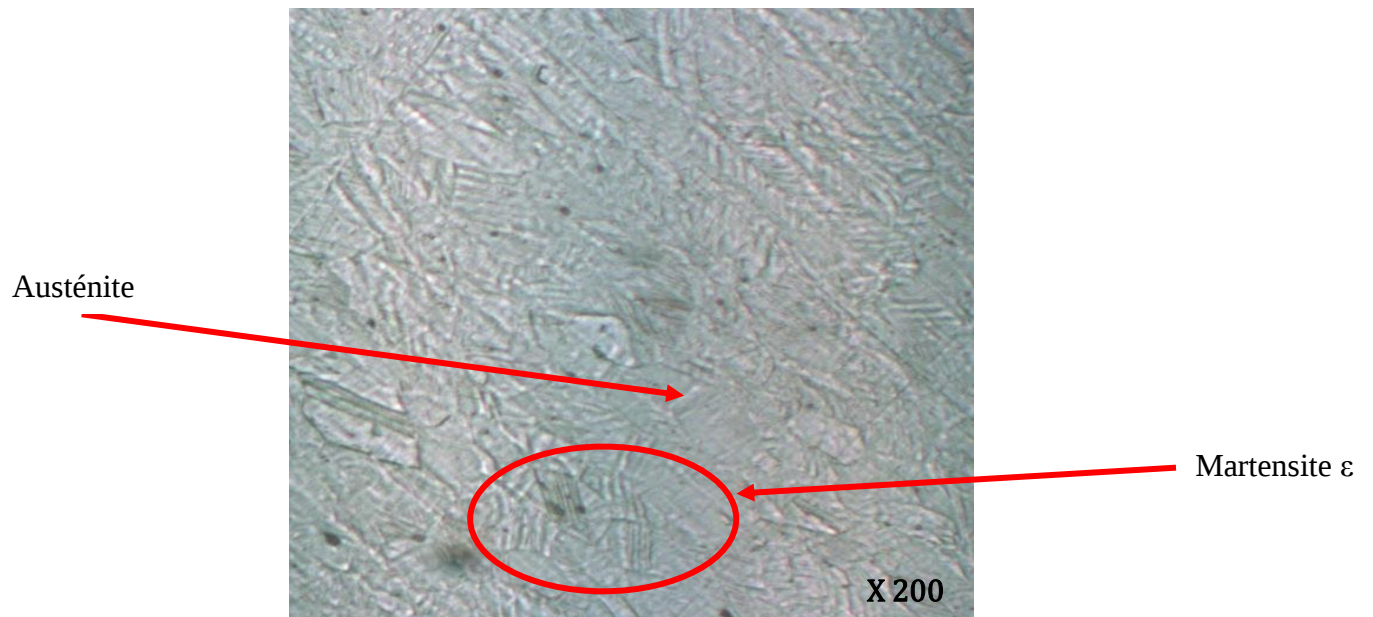


Fig. II.8 : Microstructure de l'acier Inox X2CrNi18-9 à la vitesse de 10mm/min

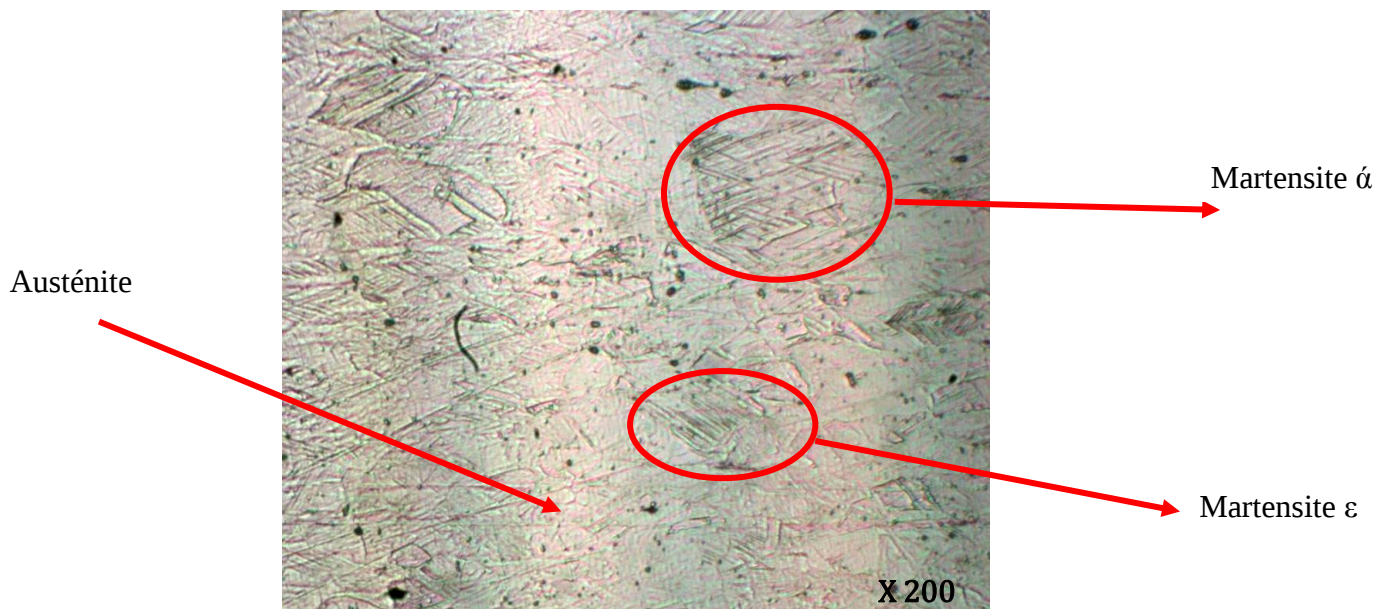


Fig.II.9 : Microstructure de l'acier Inox X2CrNi18-9 à la vitesse de 15mm/min

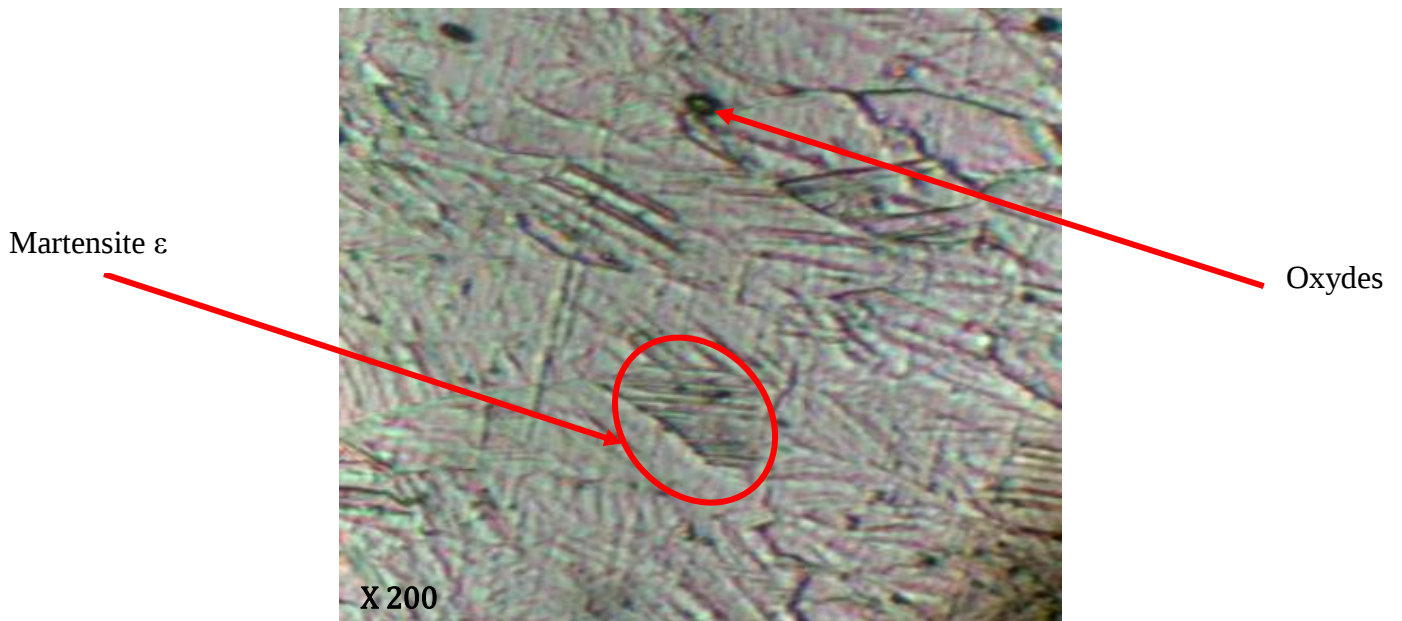


Fig.II.10 : Microstructure de l'acier Inox X2CrNi18-9 à la vitesse de 20mm/min

L'observation en microscopie optique montre deux principales morphologies de martensite (α) sous forme de plaquettes ou sous forme de lattes figure II.8. La martensite en plaquette appelée aussi la martensite lenticulaire. Ce type de morphologie est dû à l'accommodation des contraintes développées lors de la transformation de phase, ou lors de la déformation plastique. La croissance des plaquettes se développe dans le grain d'austénite suivant des directions définies, qui sont parallèles aux plans d'accolement et limitées par les joints de grains.

La morphologie de la martensite (ϵ) est différente de celle de la martensite lenticulaire figures II.9 et II.10, elle adopte la forme de bandes parallèles. Et sa formation est en relation directe avec la formation de défauts d'empilement au sein du réseau cubique à faces centrées de l'austénite.

L'essai s'effectue sous l'air, alors, on a observé le phénomène d'oxydation même si c'est un acier inoxydable, par l'augmentation de la température dans le matériau au cours de l'essai due à l'énergie interne des liaisons interatomiques.

Introduction.

Le soudage par points est un procédé d'assemblage discontinu, par recouvrement. Il s'applique à des assemblages en tôles d'aciers doux, allié, inoxydable, d'aluminium, etc. Épaisseurs généralement comprises entre 0,5 et 10 mm.

La figure II.11. représente la machine la plus conventionnelle pour le soudage par point. la machine de type fixe typique .



Fig.II.11: machine fixe typique de soudage par points au niveau de département 2A L'ENEL

IV.5. Description d'une machine à souder Machine typique.

La figure représente une machine à souder par points fixe typique. On y distingue les éléments suivants :

- un bâti en C (ou col de cygne) qui supporte le bras supérieur et le bras inférieur.
- une tête d'effort (ou de pression) fixée à l'extrémité du bras supérieur et généralement constituée par un cylindre pneumatique actionné par une valve. dont le rôle est de commander le déplacement de l'électrode supérieure et de lui appliquer l'effort.
- un bras inférieur supportant l'électrode inférieure ;
- des conducteurs en cuivre refroidis par eau, amenant le courant aux électrodes ;
- un transformateur, dit de puissance, abaisseur de tension, et un contacteur primaire ;
- un coffret qui fournit les temps du cycle de soudage, ou séquence, coordonnant la descente de l'électrode supérieure et la fermeture du contacteur. Dans les installations modernes, il permet de fixer les valeurs, dites paramétriques, de l'intensité et de l'effort.

Aujourd'hui, les contacteurs utilisés dans la construction des machines à souder par résistance sont des thyristors et le réglage du courant s'effectue par déphasage, grâce à un circuit électronique inclus dans le coffret.

Les deux dernières dispositions sont fréquentes lorsque les pièces sont encombrantes. La pince devient alors un outil que l'on déplace.

IV.6. Etudes mécaniques des assemblages soudés par points.

IV.6.1. Formation de la soudure

Dès le serrage des électrodes, nécessaire à l'accostage des tôles, le contacteur primaire se ferme et le courant s'établit dans le circuit secondaire. Il traverse les pièces à souder et rencontre, entre les électrodes, électriques, les unes localisées aux interfaces (R1, R2, R3) et les autres réparties dans la matière (R4, R5).

Les premières résultent des phénomènes de contact. Ceux-ci, limités au début aux aspérités, se multiplient sous l'effort de serrage et les résistances évoluent.

Les seconds sont dues à la résistivité des matériaux. Par effet Joule, la température s'élève dans la zone de soudage, en premier lieu aux interfaces, où la résistance d'abord prépondérante diminue, puis dans la matière elle-même où la résistivité augmente avec la température. Au bout d'un certain temps, la fusion est atteinte au point central et progresse dans le plan de joint sous la forme d'un lingot formé en vase clos, qui atteint un diamètre comparable à celui des électrodes ; Le courant est alors interrompu. Le métal en fusion se refroidit, formant la liaison des deux tôles, les électrodes restant serrées avec effet de forgeage jusqu'au refroidissement quasi complet.



Fig .II.12. Soudage par points : formation d'un point de soudure.

IV.6.2 Effort.

L'action de l'effort s'exerce durant tout le cycle de soudage, c'est-à-dire avant, pendant et après le passage du courant.

Avant le passage du courant, il établit l'accostage entre électrode/pièce et pièce/pièce.

- **l'accostage:** les électrodes se rapprochent et viennent se serrer sur les pièces à souder à l'endroit prévu et sous un effort donné.
- le **soudage** : le courant passe, déclenché par la fermeture du contacteur du circuit de puissance .
- le **forgeage**, ou maintien d'effort à la fin duquel les électrodes s'écartent et reviennent au repos.

Ces différentes phases, dont la durée totale reste de l'ordre de quelques secondes selon les épaisseurs, sont rigoureusement temporisées et se déroulent automatiquement.

- **Au coup par coup**, la machine ne réalise qu'un cycle et il faut appuyer de nouveau sur la pédale pour en réaliser un autre.
- **À la volée**, la machine fonctionne d'une manière répétitive, chaque cycle étant séparé du précédent par un intervalle de temps ou temps mort qui permet à l'opérateur de déplacer la pièce à souder. Sa durée détermine ainsi la cadence de travail.

L'ensemble de ces phases est appelé **cycle de soudage**.

IV.6.3.Paramètres du soudage par points.

Les paramètres du soudage par points sont essentiellement :

- le diamètre des électrodes
- l'effort de serrage et de forgeage
- l'intensité du courant

- la durée de passage du courant et celle du forgeage.



FigII.13. Tableau de réglage (intensité et effort)

IV.7. Protocole Expérimental.

Différentes séquences de chargement sont appliquées, principalement en traction la rupture. Toutes les campagnes d'essais ont été menées à une température contrôlée de 23°C Il s'agit notamment d'essais classiques de traction et traction- cisaillement.

Nous avons effectués plusieurs essais avec différents paramètres (effort, intensité), afin de bien analyser l'influence de ces derniers sur le comportement de point de soudure.

le tableau II.8 définit les différents paramètres utilisés lors de soudage.

	Effort(bar)	Temps de soudage(s)
Essai 1	2	1.21
	1.5	1.35
	1	1.7
	0.5	2.5
Essai 2	2	1.12
	1.5	1.35
	1	1.70
	0.5	2.30
Essai 3	2	1.18
	1.5	1.34
	1	1.80
	0.5	2.23

Tableau II.7 : paramètres utilisés lors du soudage par point.

IV.7.1. Geometries des éprouvettes

L'analyse de la tenue des assemblages soudés par point est souvent basée sur des données d'essais effectués sur des éprouvettes mono point. De nombreux formats d'éprouvettes sont utilisés, normalisés ou non. La géométrie de l'éprouvette choisie dépend du type de chargement que l'on veut reproduire sur l'éprouvette. Dans nos essais on a deux types d'éprouvettes (éprouvettes plates et éprouvette pour le pelage).

Dans ce cas de l'éprouvette plate (figure II-14-a), le point est sollicité essentiellement en cisaillement, mais cette sollicitation n'est pas pure.

La sollicitation de traction est obtenue par les éprouvettes de traction en pelage (figure II-14-b)

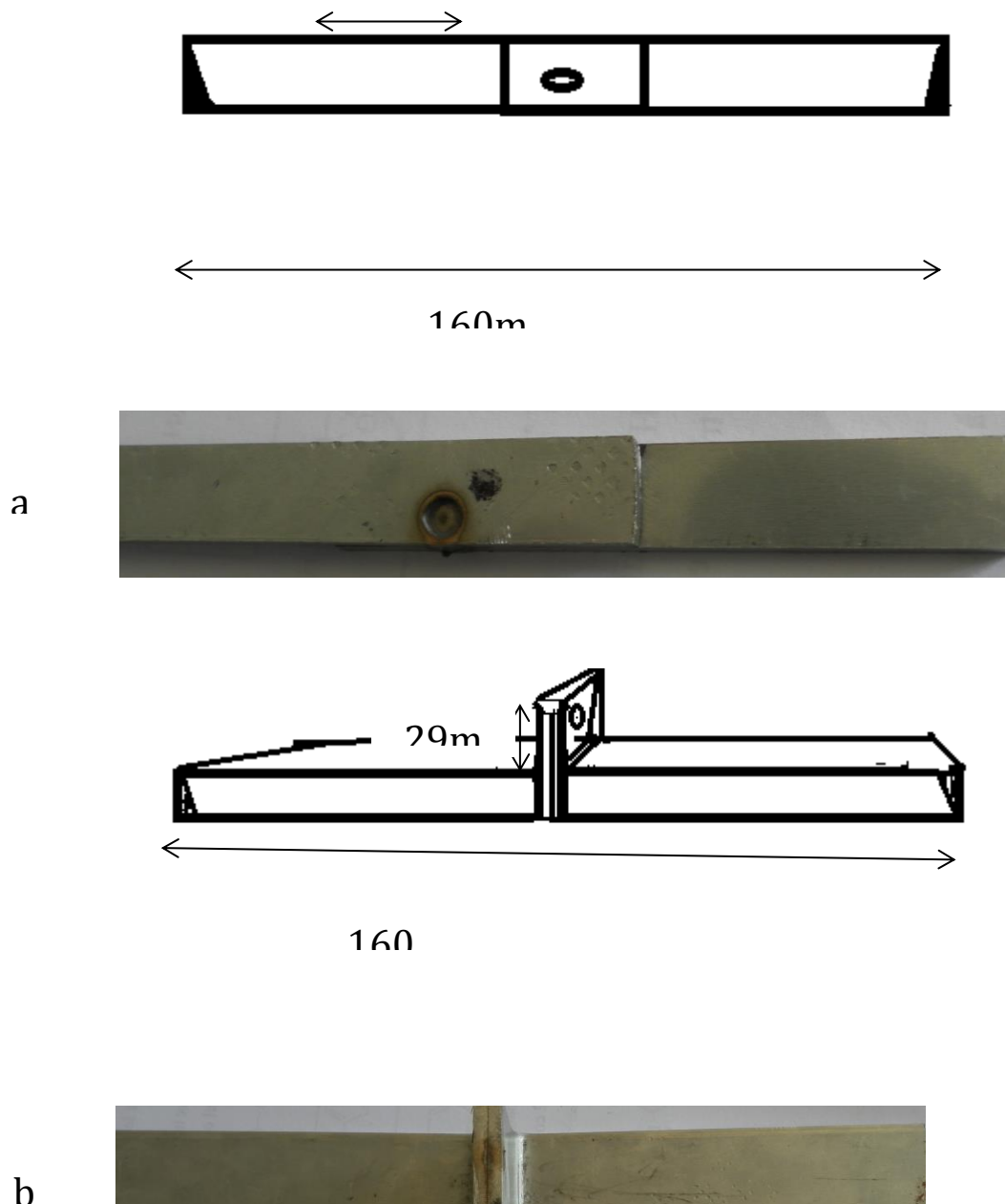


Fig.II.14: Schéma des éprouvettes de traction de pelage (ISO 18278-2 (a):éprouvette traction-cisaillement, (b): éprouvette de pelage

IV.7.2 Conditions d'essais.

Dimension des éprouvettes	Valeurs
La longueur entre repère L_0	60mm
La largeur (b)	20mm
L'épaisseur (e)	3 mm
La section initiale (S_0)	60mm^2

Tableau II .8. Dimension des éprouvettes de traction

IV.7.3. Résultats et interprétations

Une campagne d'essai a été réalisée afin de caractériser le comportement mécanique de notre point de soudure en traction et en cisaillement. Les figures II.15, 16,17 et 18 nous montrent le comportement de notre point de soudure en cisaillement. Une augmentation importante de la limite au seuil d'écoulement, module de Young ainsi que la contrainte à la rupture. La limite au seuil d'écoulement a atteint sa valeur maximale de 204,8 MPA, ensuite elle a diminuée jusqu'à 103.3, 2MPa pour se stabiliser autour de cette valeur.

Dans le cas, des essais de pelage figure II.24, 25 et 26, nous constatons aussi une augmentation de la tenue mécanique en fonction de l'effort de forgeage. Une différence

importante de point de vue résistance à la rupture en traction et en cisaillement, ceci est due probablement l'état de contrainte en fond d'entaille.

Dans une étude menée sur divers aciers une augmentation générale de la tenue mécanique du point avec la vitesse de chargement, sans changement du mode de rupture et quel que soit l'essai. L'effort à la rupture en traction cisaillement peut être jusqu'à dix fois plus élevé que celui atteint en pelage et présente une corrélation avec l'augmentation de la résistance mécanique du métal de base, alors que les tenues en traction en croix et en pelage y sont moins sensibles. Ces observations restent cohérentes avec les mécanismes de rupture avancés plus haut, dans la mesure où le déboutonnage se fait par striction dans le Métal de Base en traction cisaillement et où il est plutôt influencé par l'état de contrainte en fond d'entaille et les propriétés mécaniques de la ZAT en traction en croix ou pelage.

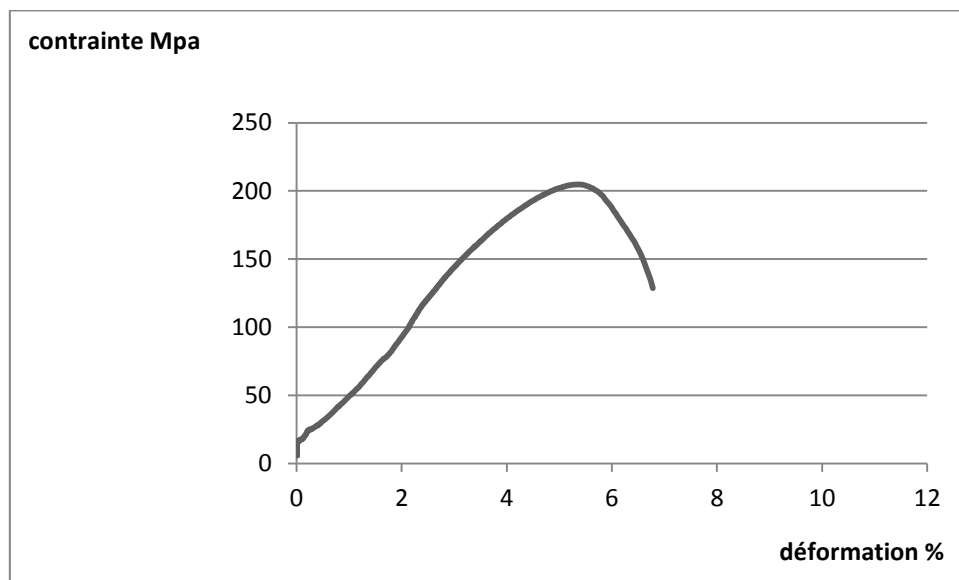


Fig. II.15. Contrainte – déformation pour un effort de forgeage de 2bar

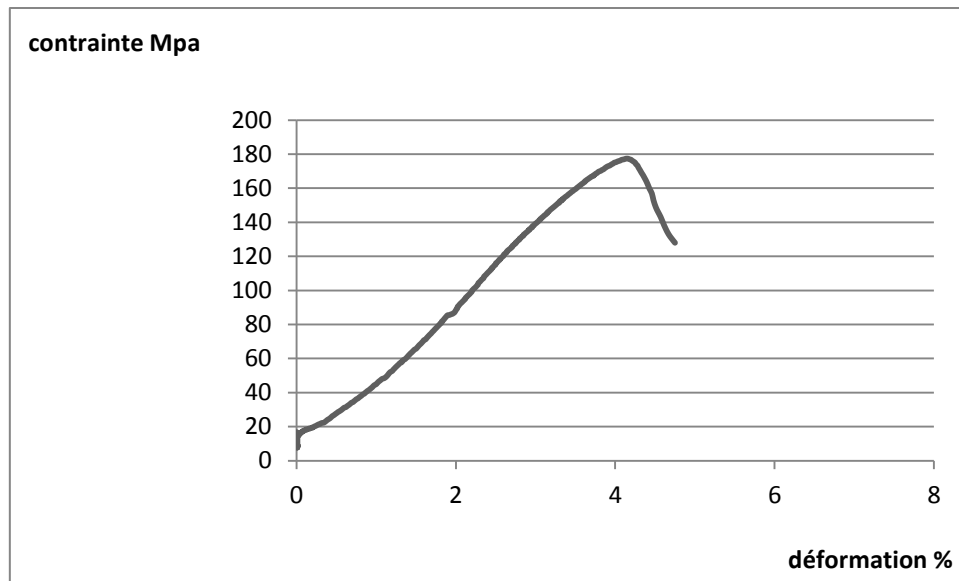


Fig.II.16 contrainte – déformation pour un effort de forgeage de 1.5 bar

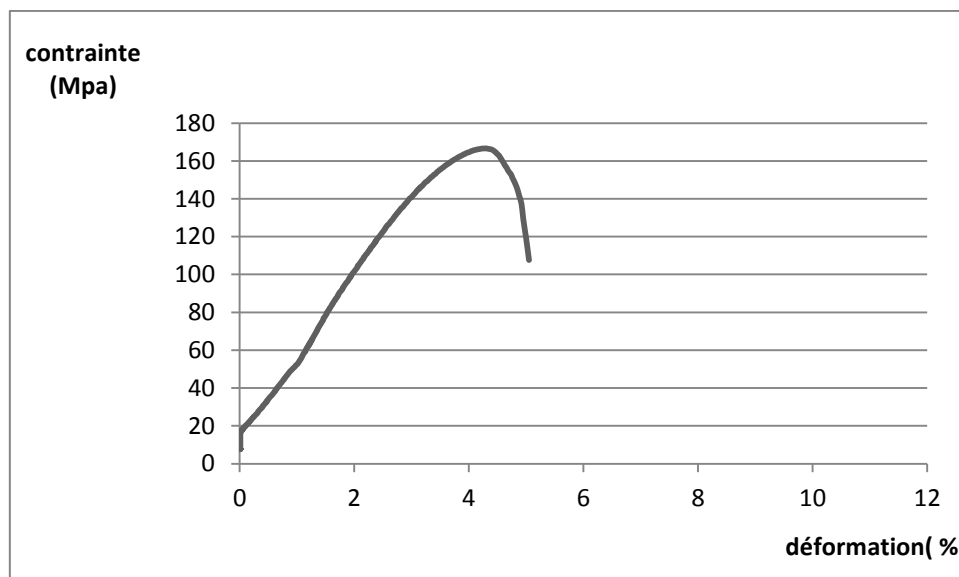


Fig. II.17. Contrainte – déformation pour un effort de forgeage de 1bar.

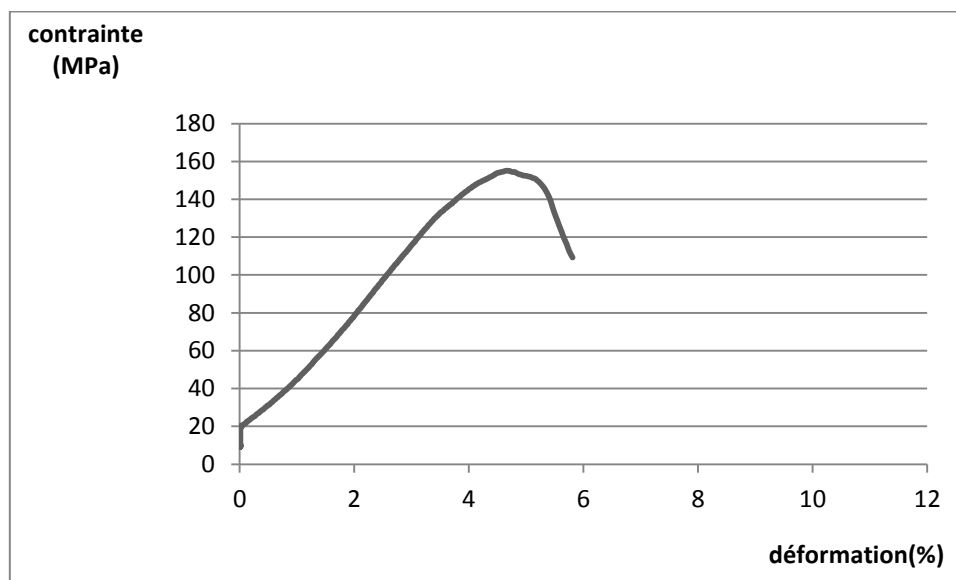


Fig II.18. Contrainte – déformation pour un effort de forgeage de 0.5bar.

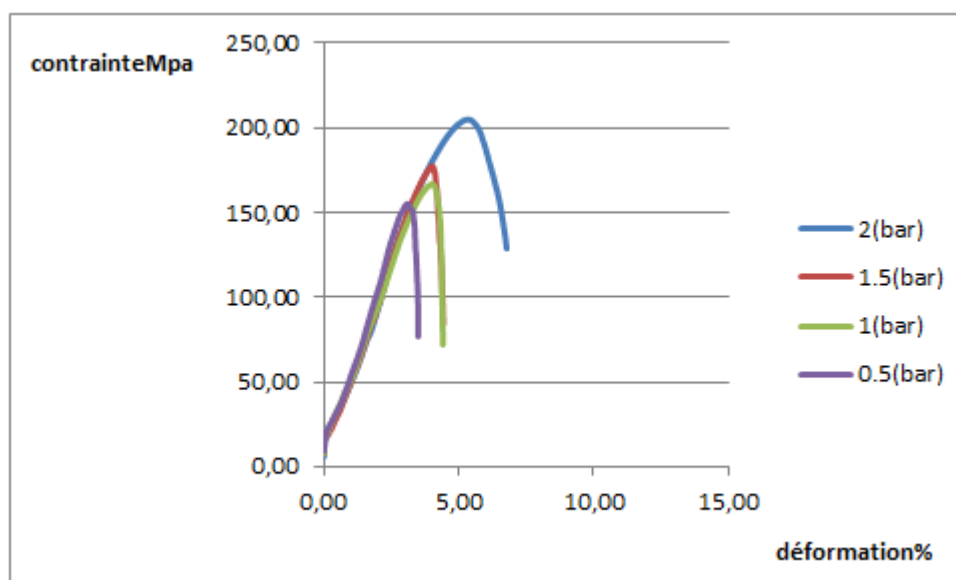


Fig. II.19. Caractéristiques mécanique de X2CrNi18-9 à different efforts de forgeage.

Température (°C)	effort	Caractéristiques			
		$R_{0.2\%}(MPa)$	$R_m(MPa)$	$E(Mpa)$	$A(\%)$
Ambiante	0.5	102.4	103.3	66061	3.5.
	1	161.5	166.6	116678	5
	1.5	170.8	177.4	112439	5
	2	195.6	204.8	118622	6

Tableau. II.9: Caractéristiques mécaniques de X2CrNi18-9 à different efforts de forgeage.

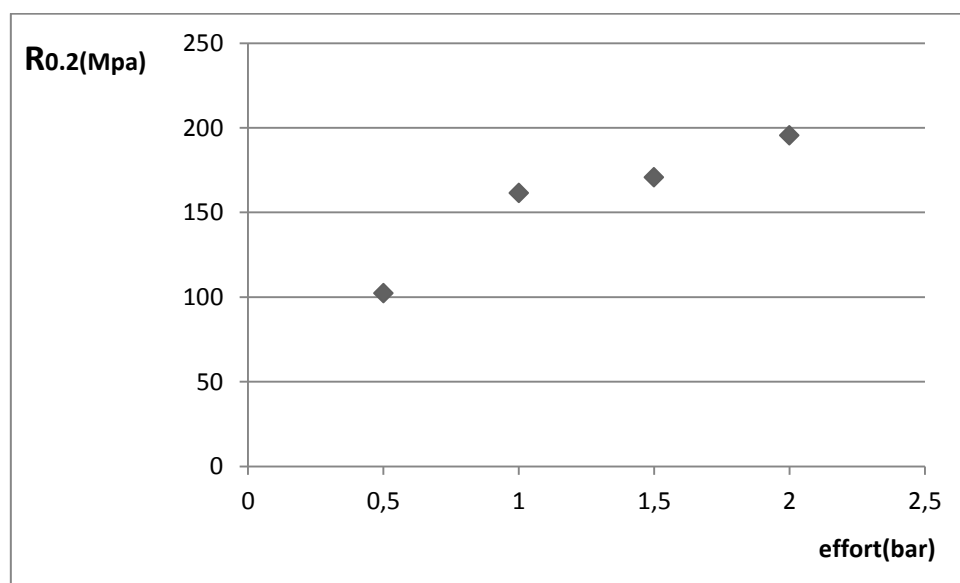


Fig.II.20: Evolution de la limite élastique en fonction de l'effort de forgeage.

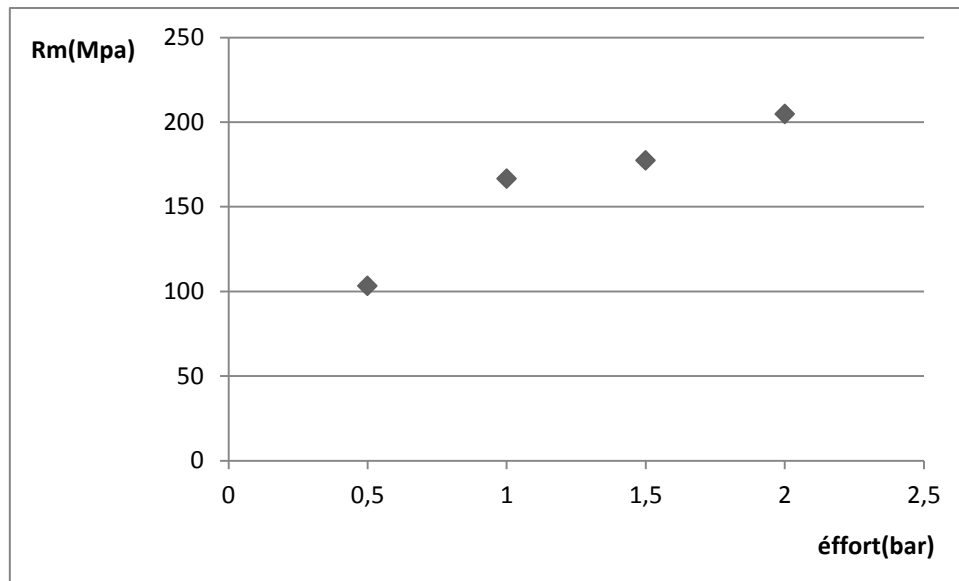


Fig. II.21: Evolution de la résistance maximale en fonction de l'effort de forgeage

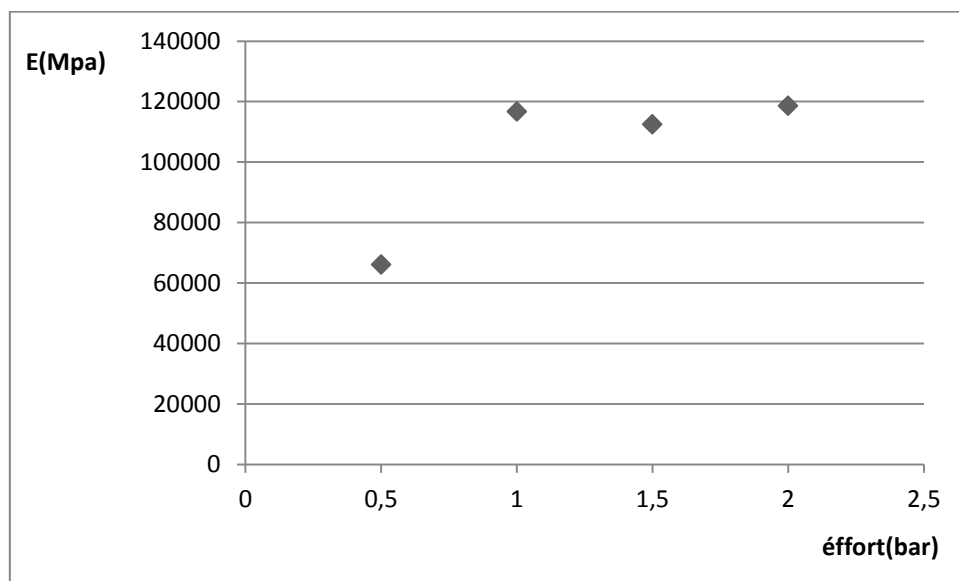


Fig. II.22. Evolution du module de Young en fonction de l'effort de forgeage.

Pour un effort 1.5 il y a une diminution de la valeur de module de Young dans ce cas la valeur maximale de l'effort entre (1 et 1.5)

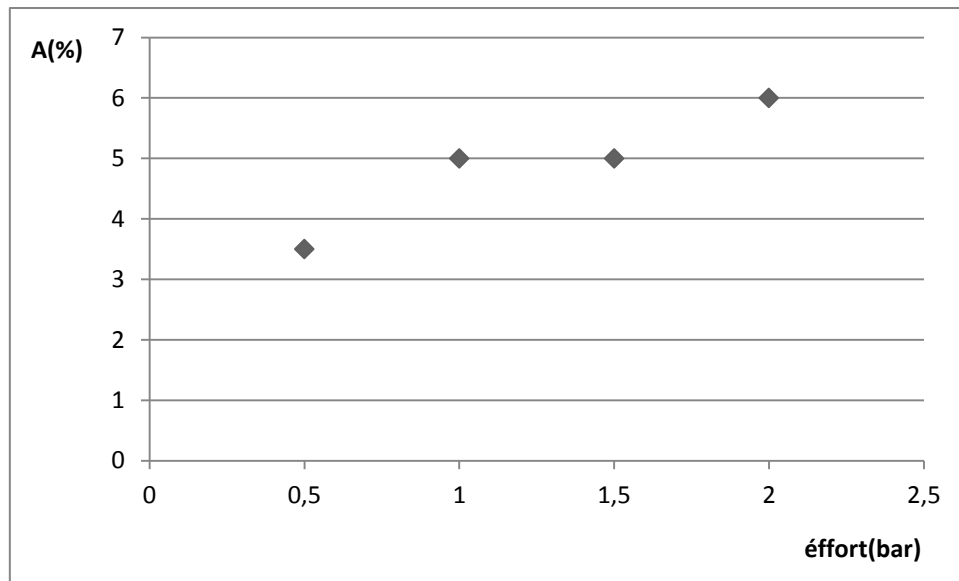


Fig. II.23: Evolution du l'allongement en fonction de l'effort de forgeage.

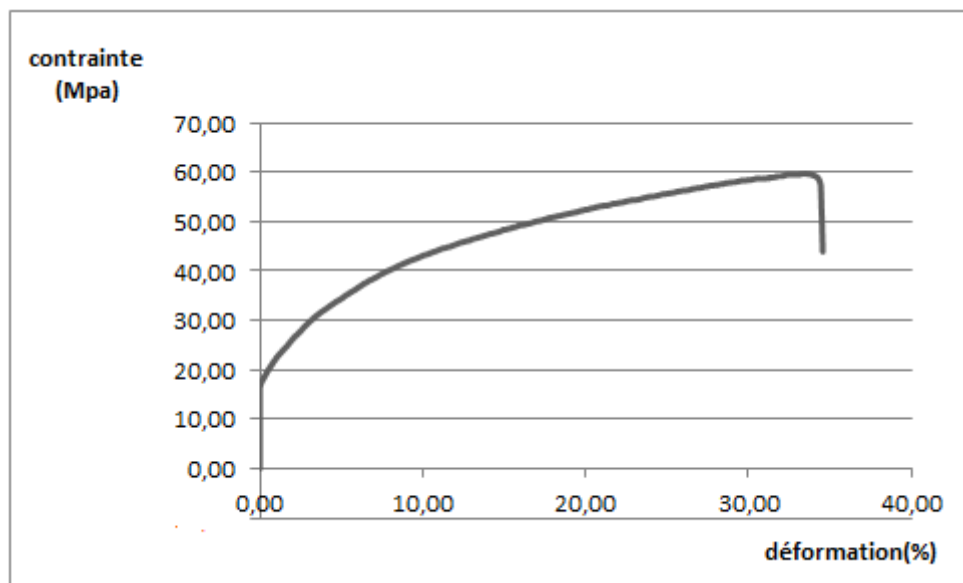


Fig. II.24. Contrainte – déformation pour un effort de forgeage de 2 bar.

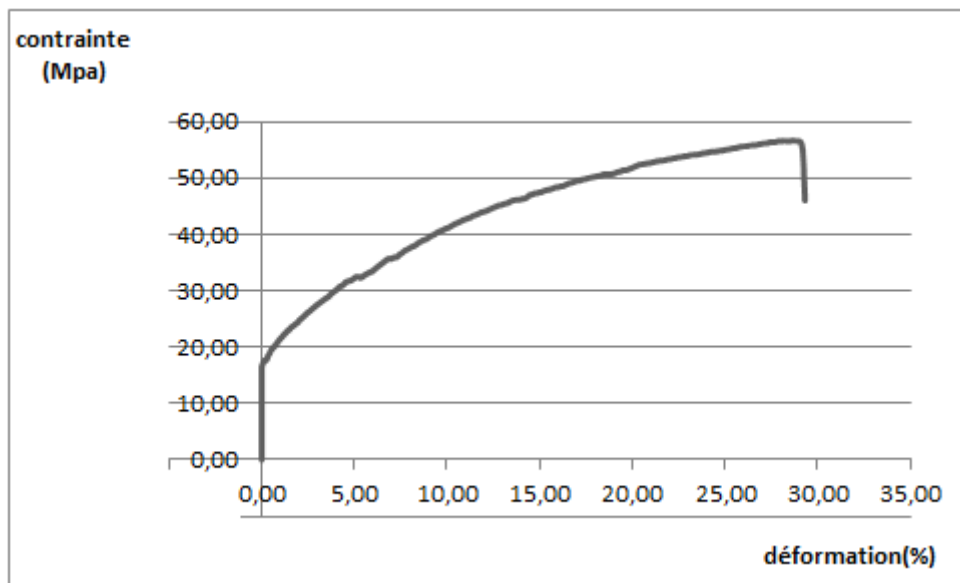


Fig. II.25. Contrainte – déformation pour un effort de forgeage de 1.5 bar.

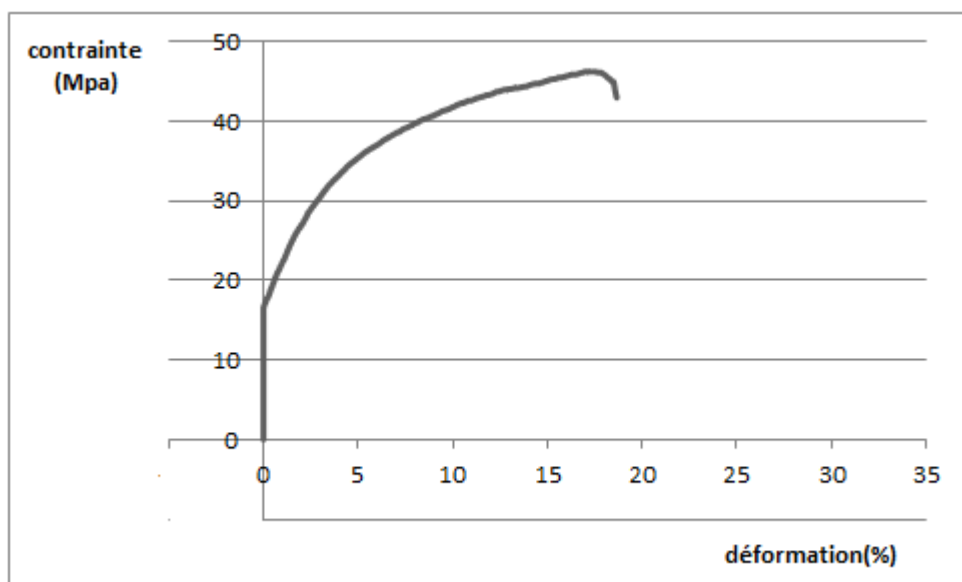


Fig. II.26. contrainte – déformation pour un effort de forgeage de 1 bar.

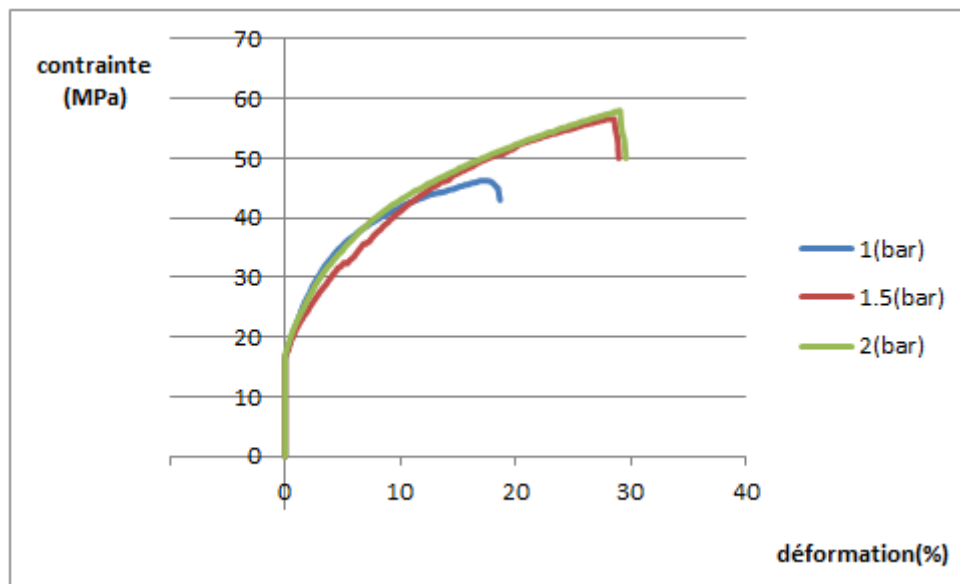


Fig. II.27. Caractéristiques mécaniques de X2CrNi18-9 à différents efforts de forgeage pour l'essai de pelage

Temperature (°C)	effort	Caractéristiques			
		$R_{0.2\%}$ (MPa)	R_m (MPa)	E (Mpa)	A (%)
Ambiante	1	23.8	37	6632.7	6.67
	1.5	25	45.3	8808	9.31
	2	27.5	48.8	9951.1	11.3

Tableau II .10 . Caractéristiques mécaniques de X2CrNi18-9 à différents efforts de soudage (pelage).

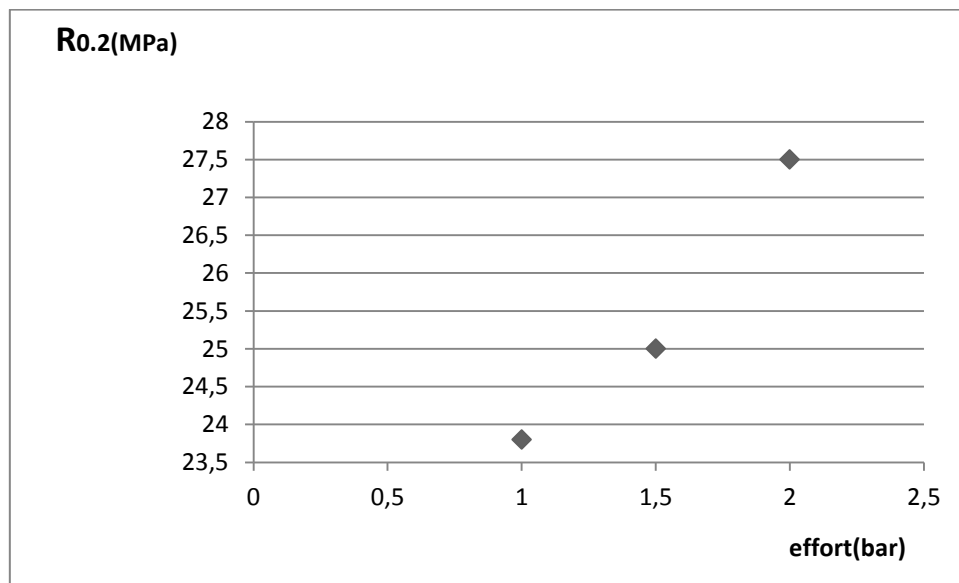


Fig. II.28. Evolution de la limite élastique en fonction de l'effort de forgeage.

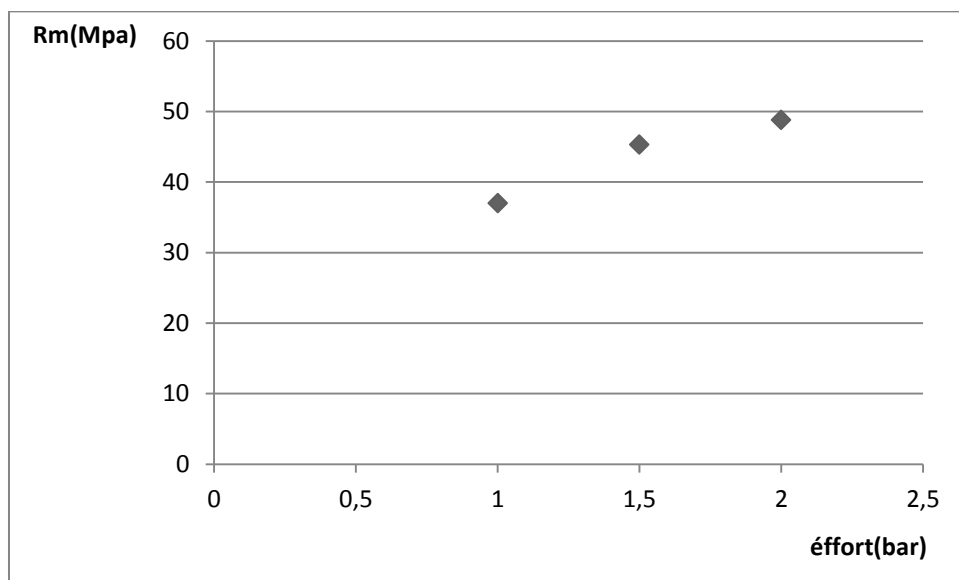


Fig. II.29. Evolution de la résistance maximale en fonction de l'effort de forgeage.

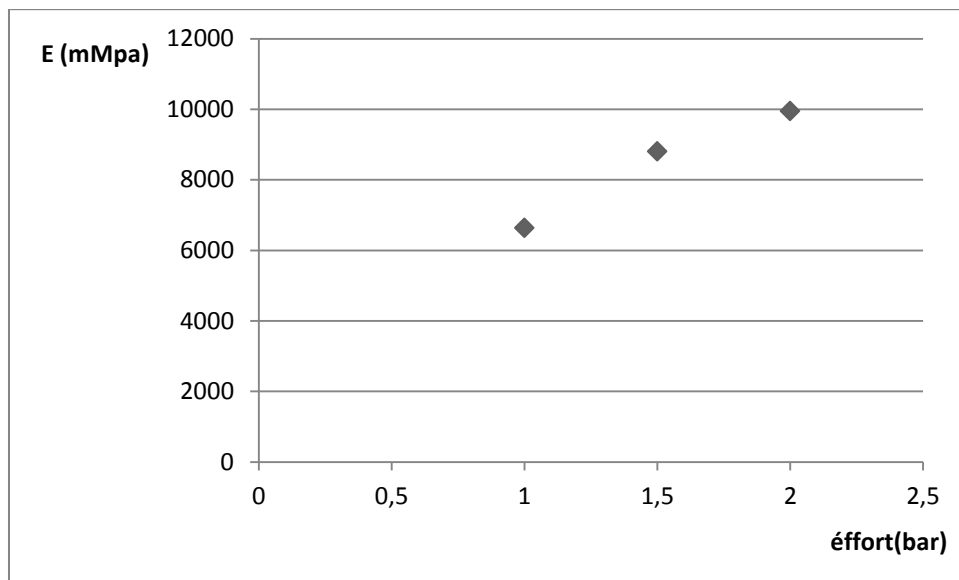


Fig. II.30. Evolution du module de Young de en fonction de l'effort de forgeage.

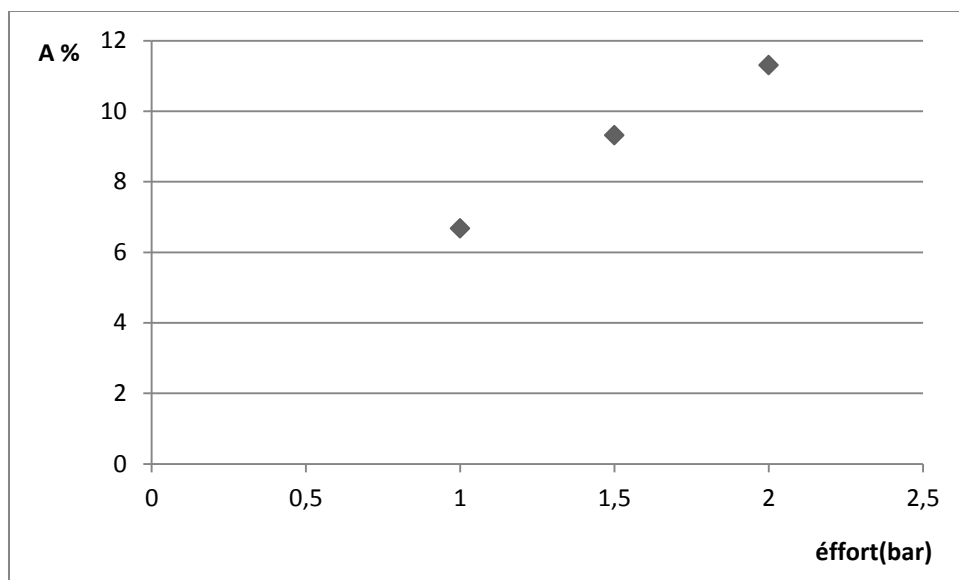


Fig. II.31: Evolution de l'allongement en fonction de l'effort de forgeage.

Conclusion:

Une augmentation générale de la tenue mécanique du point avec l'effort de forgeage, quel que soit l'essai. L'effort à la rupture en traction cisaillement peut être jusqu'à dix fois plus élevé que celui atteint en pelage et présente une corrélation avec l'augmentation de la résistance mécanique du métal de base, alors que les tenues en traction en croix et en pelage le sont moins sensibles. Pour une bonne qualité de soudage il faut un effort de 2 bar et intensité de courant 6.7 kA.

Conclusion générale:

L'objectif de ce mémoire était de comprendre l'influence des paramètres de soudage par point sur les mécanismes d'endommagement de l'assemblage soudé. Afin de remplir cet objectif, des compétences et des connaissances dans le domaine du soudage sont indispensables.

Différentes approches ont été abordées dans ce travail, afin d'estimer la tenue mécanique des points soudés en acier inoxydable 304L (X2CrNi 18-9).

L'étude bibliographique faite au premier chapitre et dans le deuxième chapitre nous a permis de mieux connaître les aciers à effet TRIP utilisés dans le domaine automobile. Ainsi permettant d'identifier les différentes propriétés mécaniques de chaque acier. Ces propriétés résultent d'une combinaison de différentes phases.

La deuxième partie de ce chapitre a porté sur l'étude du comportement et du phénomène de rupture différée dans les aciers austénitiques.

Quant dans le chapitreII, elle comporte une description du procédé de soudage par point et ses différentes séquences sont décrites, ainsi que les mécanismes de formation du point de soudure.

Dans le but de caractériser le comportement mécanique, physico-chimique et morphologique de l'acier Inoxydable 304L (X2CrNi 18-9) étudié dans la première partie, nous avons réalisé des essais dans la première partie de chapitreIII. Dont l'essai de traction, où on s'est intéressé à l'influence de l'effort de forgeage sur la tenue mécanique des points de soudure. La caractérisation du point de vue mécanique, physico-chimique et morphologique a été réalisée en utilisant différentes technique. Essai de traction pour la détermination des propriétés mécaniques.

Néanmoins, la confrontation de la simulation d'un essai de traction sur l'acier304L(X2CrNi 18-9), a conforté la nécessité d'une prise en compte de la sensibilité positive de la contrainte à la vitesse et à la direction de la déformation. Les résultats sillustrent le fait que la description des mécanismes physiques par la loi de comportement est pertinente, en

particulier elle décrit correctement le mécanisme de striction diffuse apparaissant après allongement uniforme.

L'obtention de la morphologie de notre matériau d'étude à l'aide de la microscopie optique et électronique à balayage (MEB) caractérisant ainsi la transformation de l'austénite ϵ en martensite α' dans l'acier 304L(X2CrNi 18-9).

Une perspective objective dans la deuxième partie consiste à l'établissement de cartes de performance des points soudés, on représentant les domaines d'apparition des différents modes d'essai de soudage (traction-cisaillement, pelage) qui sont effectués et la tenue mécanique associée en fonction des évolutions géométriques (diamètre de soudure,) les différents paramètres (effort, intensité et la distance entre les points de soudure) sont éventuellement métallurgiques (suivant l'influence de l'épaisseur des points soudés).

Néanmoins dans notre étude menée sur diverses éprouvettes, une augmentation générale de la tenue mécanique du point avec l'effort de forgeage, quel que soit l'essai. L'effort à la rupture en traction cisaillement peut être jusqu'à dix fois plus élevé que celui atteint en pelage et présente une corrélation avec l'augmentation de la résistance mécanique du métal de base, alors que les tenues en traction en croix et en pelage le sont moins sensibles.

Références bibliographie :

- [L.T]L. TALEB, N. CAVALLO et F. WAECKEL. Experimental analysis of transformation plasticity. International Journal of Plasticity, Vol.17, 2001.
- [.ROS]ROSSILLON.F. Influence des conditions de soudage sur le comportement en fatigue d'un acier THR Dual Phase soudé par point, thèse de doctorat EDSPIC : N°385.
- [T.K-SA.Y]Tanaka. K., Sato, Y. « A mechanical view of transformation-induced plasticity » Ing. Archiv, Vol 55, (1985).
- [OL-G.B]Olson. G.B, M. Cohen, « Stress-Assisted Isothermal Martensitic Transformation : Application to TRIP steels », Metallurgical Transaction, 13A, (1982), pp. 1907.
- [RG.P]Stringfellow R.G, Park. D.M., Olson. G.B., « A constitutive model for Transformation plasticity accompanying strain-induced martensitic transformations in metastable austenitic steels » Acta Metallurgica and Materialia, Vol 40, (1992).
- [MO.Z-N.YEN]MOUMNI, Z., ZAKI, W., et N. YEN, Q.S. 2008. Theoretical and numerical modeling of solid-solid phase change : Application to the description of the thermomechanical behavior of Shape memory alloys. International Journal of Plasticity.
- [W.B]W. Bleck et al. Control of microstructure in TRIP steels by niobium, Materials Sciences Forum Vols. (2003)
- [.BLON] BLONDEAU. R. Procédés et applications industrielles du soudage. Hermès Science Publications, Paris, 2001
- [DROU] DROUART. C., Soudage par résistance, Publications du Soudage et de ses Applications, 1993.
- [Z.S] Zhang et Senkara ;résistance welding fundamental and application CRC press :DEC 2005
- [NEG] Nègre.L : Etude et modélisation de la formation d'un cordon de soudure.thèse.chap III.52-90 :1990
- [ISO]ISO 18278-2 :2004 .
- [JIS] JIS (Japonaise Industriel Standard).
- [DAN]DANCETTES.Comportement mécanique des soudures par points Thèse
- [CHO-GO] Cho et Gould le comportement thermique de l'assemblage et la formation du noyau.1997
- [E.H-LAM] E. H. J. LAMOUROUX. Modélisation détaillée des soudures par point et Laser pour simuler la rupture des assemblages automobiles. Thèse de doctorat, Valenciennes : Univ. Valenciennes Et Du Hainaut-Cambrésis.

Table de matières

Figure

Fig1:Shéma de différents phases dans les aciers AHSS

*Fig. .2: Microstructures schématiques d'un acier(a) **DP** et d'un acier (b) **TRIP***

Fig :.3.Structure des aciers :Austénite

Fig ;4.: Structures cristallines de l'austénite et de la martensite α' dans les aciers

Fig.5 .:shéma represente la transformation austénitique à la martensite

Fig.6 .différents procédure de soudage par points

Fig.7.principe de soudage par point

Fig..8.: Schéma de la séquence de soudage par pulsations

Fig .9.schéma de métallurgie de soudage

Fig.10: schéma représentatif les procédures de soudage par point selon./

Fig.11. . la forme des electrodes

Fig12.. :Soudage par points : coupe d'un point de soudure

Fig13.. :Soudage par points : position des points

Fig.14.Soudage en bout : dureté d'une soudure

Fig. II.1 : Micrographie optique de l'acier Inox X2CrNi18-9 à l'état initiale.

Fig. II.2 : dimensions de l'éprouvette de traction en (mm).

Fig. II .3.Courbe de traction de l'acier Inox 304Là $V=10$ mm/min.

Fig. II.4.Courbe de traction de l'acier Inox 304Là $V=10$ mm/min.

Fig. II.5 Courbe de traction de l'acier Inox 304Là $V=10$ mm/min.

Fig. II.7.superposition des courbes de traction à différentes directions (90° . 45°) à vitesse $=10$ mm/min.

Fig. II.8 : Microstructure de l'acier Inox X2CrNi18-9 à la vitesse de 10mm/min.

Fig. II.9 : Microstructure de l'acier Inox X2CrNi18-9 à la vitesse de 15mm/min.

Fig. II.10 : Microstructure de l'acier Inox X2CrNi18-9 à la vitesse de 20mm/min.

Fig.II.11 : machine fixe typique de soudage par points au niveau de département 2A L'ENEL.

Fig .II.12 : Soudage par points : formation d'un point de soudure.

FigII.13 : Tableau de réglage (intensité et effort).

Fig.II.14 : Schéma des éprouvettes de traction de pelage (ISO 18278-2 (a):éprouvette traction-cisaillement, (b): éprouvette de pelage.

Fig. II.15 : Contrainte – déformation pour un effort de forgeage de 2bar.

Fig.II.16 : contrainte – déformation pour un effort de forgeage de 1.5 bar.

Fig. II.17 : Contrainte – déformation pour un effort de forgeage de 1bar.

Fig II.18 : Contrainte – déformation pour un effort de forgeage de 0.5bar.

Fig. II.19 : Caractéristiques mécanique de X2CrNi18-9 à différents efforts de forgeage.

Fig.II.20 : Évolution de la limite élastique en fonction de l'effort de forgeage.

Fig. II.21 : Évolution de la résistance maximale en fonction de l'effort de forgeage.

Fig. II.22 : Évolution du module de Young de l'effort de forgeage.

Fig. II.23 : Évolution du l'allongement de l'effort de forgeage.

Fig. II.24 : Contrainte – déformation pour un effort de forgeage de 2 bar.

Fig. II.25 : Contrainte – déformation pour un effort de forgeage de 1.5 bar.

Fig. II.26 : Contrainte – déformation pour un effort de forgeage de 1 bar.

Fig. II.27 : Caractéristiques mécanique de X2CrNi18-9 à différents efforts de forgeage pour l'essai de pelage

Fig. II.28 : Évolution de la limite élastique en fonction de l'effort de forgeage.

Fig. II.29 : Évolution de la résistance maximale en fonction de l'effort de forgeage.

Fig. II.30 : Évolution du module de Young de en fonction de l'effort de forgeage.

Fig. II.31 : Évolution de l'allongement en fonction de l'effort de forgeage.

Tableaux

Tableau II-1 : Composition chimique de l'acier inox 304L (100% austénitique).

Tableau II-2 : Composition chimique selon SNVI.

Tableau II-3 : Dureté Vickers du l'acier Inox X2CrNi 18-9 à l'état initial.

*Tableau.II.4 : Caractéristiques mécanique de L'acier 304L à la vitesse de déformation
V=10mm/min.*

*Tableau II.5 : Caractéristiques mécanique de L'acier 304L à la vitesse de déformation
V=10mm/min.*

*Tableau II.6 : Caractéristiques mécanique de L'acier 304L à la vitesse de déformation
V=10mm/min.*

Tableau II.7 : définie les différents paramètres utilisés lors de soudage.

Tableau II .8 : Dimension des éprouvettes de traction.

Tableau. II.9 : Caractéristiques mécaniques de X2CrNi18-9 à diffèrent efforts de forgeage.

*Tableau II .10 : Caractéristiques mécanique de X2CrNi18-9 à diffèrent efforts de soudage
(pelage).*

Les équations

$$ET = E^B + E^{RI} \dots\dots\dots(1)$$

$$r = Ae + B \dots\dots\dots(2)$$

$$D = 5\sqrt{e} \dots\dots\dots(3)$$

Liste des symboles :

HR : Haute Résistance.

THR : Très Haute Résistance.

LF : Interstitiel Free.

HLE : haute limite d'élasticité.

DP : Dual Phase.

TRIP : TRansformedInducedPlasticity.

TRIP : TransformedInducedPlasticity.

CFC : cubique face centré.

CC : cubique centré.

α' : Martensite.

γ : Austénite.

ZAT : Zone Affectée Thermiquement

SCZAT : Zone Affectée Thermiquement Sub-Critique.

ICZAT : Zone Affectée Thermiquement Inter-Critique.

GFZAT : Zone Affectée Thermiquement Grain Fin.

GFZAT : Zone Affectée Thermiquement Gros Grains.

TRC : Transformation en Refroidissement Continu.

ϵ : déformation

Les unités

Intensité : (KA)

Température : (°C)

Distance : (mm)

Contrainte : (MPa)

Déformation : (%)

Effort : (bar)