

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Abou Bekr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER**

En : **Génie Mécanique**

Spécialité : **Assemblages Soudés et Matériaux**

Par : **BOULENFAD Zohra Nehal**

Thème

L'impact de préchauffage en soudage sur le comportement mécanique d'un acier

Soutenu publiquement, le 11/06/2024, devant le jury composé de :

Président	:	Mr KARA ALI Djamel	MCA	Université de Tlemcen
Examineur	:	Mr SEBAA Fethi	Pr	Université de Tlemcen
Encadreur	:	Mr HADJOUI Abdelhamid	Pr	Université de Tlemcen
Co-encadreur	:	Mr HADJOUI Féthi	MCA	Université de Tlemcen

Année Universitaire 2023/2024

DÉDICACE

Avec tous mes sentiments de respects .Avec l'expérience de ma reconnaissance. Je dédie ma remise de diplôme et ma joie

À mon paradis à la prunelle de mes yeux à la source de ma vie et mon bonheur, ma lune et le fil d'espoir qui allumer mon chemin. Ma moitié

Maman

A celui qui m'a fait une forte femme, ma source de vie, d'amour et d'affection .A mon support qui était toujours à mes côtés pour me soutenir et m'encourager, à mon prince

Papa

Et ma grande mère qui m'a toujours soutenu .A mon frère et mes sœurs ceux qui ont partagé avec moi tous les moments d'émotion lors de la réalisation de ce travail.

A mon encadrant « Mr HADJOUI FETHI » pour sa patience, sa diligence et sa réactivité lors de la préparation de ce mémoire .A tous mes ami(e)s qui m'ont toujours encouragé.

A tous qui m'aiment.

BOULENFAD Zohra Nehal

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui m'a donné la force et la patience d'accomplir ce mémoire.

*Ce travail ne serait pas riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide de **Mr HADJOUI FETHI**, je le remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa rigueur et sa disponibilité durant ma préparation de ce mémoire.*

*Je tiens à remercier les membres du jury Mrs **SEBAA Fethi** et **KARA Ali Djamal** d'avoir accepté d'évaluer mon travail.*

Mes remerciements s'adressent également à tous mes enseignants du département de Génie mécanique qui ont su avoir beaucoup de patience durant tout le long de mon parcours de Master ainsi que pour leur générosité malgré leurs charges académiques et professionnelles.

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements envers mes parents qui ont toujours m'encourager et supporter.

Au terme de ce travail j'aimerais bien rendre hommage à tous ceux qui de loin ou de près m'ont apporté leurs encouragements.

RÉSUMÉ

L'influence de préchauffage sur le comportement mécanique d'un acier est un thème qui plonge dans une exploration approfondie des effets thermiques préliminaires sur les propriétés mécaniques des aciers. Ce travail décortique comment le processus de chauffage préalable impactent la structure cristalline et la résistance de l'acier face à diverses contraintes mécaniques. En démêlant ces relation complexes, elle vise à éclairer les pratiques d'ingénierie pour optimise la performance et la fiabilité des structures métallique dans un large éventail de conditions d'utilisation.

Mots clés : Préchauffage, comportement mécanique, acier, propriétés mécaniques, structure, contraintes.

ABSTRACT

The influence of preheating on the mechanical behavior of steel is a subject that plunges into a thorough exploration of the preliminary thermal effects on the mechanical properties of steels. This work analyses how the prior heating process impacts the crystal structure and the resistance of steel to various mechanical stresses. By removing these complex relationships, it aims to inform engineering practices to optimize the performance and reliability of metal structures under a wide range of operating conditions.

Keywords: Preheating, mechanical behavior, steel, mechanical properties, structure, stresses.

ملخص

تأثير التسخين المسبق على السلوك الميكانيكي للصلب هو موضوع يخوض فيه استكشاف شامل للتأثيرات الحرارية الأولية على الخصائص الميكانيكية للصلب. يحلل هذا العمل كيفية تأثير عملية التسخين السابقة على الهيكل البلوري ومقاومة الفولاذ للضغوط الميكانيكية المختلفة. من خلال كشف هذه العلاقات المعقدة، يهدف إلى توجيه الممارسات الهندسية لتحسين أداء وموثوقية الهياكل المعدنية في ظل مجموعة واسعة من ظروف التشغيل.

الكلمات المفتاحية: التسخين المسبق، السلوك الميكانيكي، الصلب، الخصائص الميكانيكية، البنية، القيود.

LISTE DES FIGURES

Figure I.1: Fabrication de l'acier à l'aide d'un convertisseur.	5
Figure I.2: Schéma d'un convertisseur à oxygène.	5
Figure I.3: Mécanisme d'un four électrique.	6
Figure I.4: Passage de courant électrique dans un four électrique.	7
Figure I.5: Opérations sidérurgiques pour l'obtention de l'acier.....	7
Figure I.6: Diagramme d'équilibre alliage fer – carbone.	8
Figure I.7: Courbe de traction.	14
Figure I.8: Essai de flexion sur une poutre.	15
Figure I.9: Essai de cisaillement.	17
Figure I.10: Essai de Torsion.....	17
Figure I.11: Essai de dureté Brinell.	18
Figure I.12: Essai de résilience (CHARPY).	19
Figure I.13: Une courbe d'essai de fluage.	20
Figure II.1: Influence du Mn sur la soudabilité.	29
Figure II.2: Cycle thermique de soudage.	32
Figure II.3: Différentes zones d'une pièce à souder.	33
Figure II.4: Différentes régions de la ZAT et microstructures au voisinage de la zone fondue.	34
Figure II.5: Les changements microstructuraux de la ZAT lors de chauffage.	35
Figure II.6: Variation de la soudabilité en fonction du carbone.	38
Figure II.7: Préchauffage et le pourcentage de carbone.	39
Figure II.8: Diagramme de Séférian.	41
Figure II.9 : Préchauffage par induction.	46
Figure II.10: Machine d'alimentation de la couverture chauffante.	48
Figure II.11: Application de la couverture chauffante.	48
Figure II.12: Équipement de la flamme oxy-combustion.	49
Figure II.13: Équipement de préchauffage oxy-acétylénique.	49
Figure II.14: Équipement de post chauffage.	52
Figure II.15: Température de post-chauffage.	53
Figure II.16 : Intérieure du tube pendant le post-chauffage.	53
Figure II.17: Fissuration à chaud longitudinale.	55
Figure II.18: Types de fissure.	57
Figure II.19: Aspect des fissures à froid.	58
Figure II.20: Vitesse de refroidissement.	59
Figure III.1: Dimensions des éprouvettes.....	64
Figure III.2 : Scie mécanique OLMO SMA3.....	65
Figure III.3: Poste de soudure par électrode enrobé SAM PRO PS 250S.....	65
Figure III.4: Four électrique.	66

Figure III.5: Machine de traction.....	68
Figure III.6: Essai de traction sur des éprouvettes sans soudures.	70
Figure III.7: Essai de traction sur des éprouvettes soudées avec EE sans préchauffage.....	71
Figure III.8: Essai de traction sur des éprouvettes soudées avec préchauffage de 150 °C.....	72
Figure III.9: Essai de traction sur des éprouvettes soudée avec préchauffage de 200°C.	73

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I

Tableau I. 1 : Propriétés non mécaniques des matériaux..... 26

CHAPITRE II

Tableau II. 1 : Indices de Sévérité Thermique.[19]..... 42
Tableau II. 2: Indice de soudabilité.[19] 43
Tableau II. 3: Température de préchauffage.[19]..... 43

CHAPITRE III

Tableau III. 1: Compositions chimiques de l'acier X42 de notre étude..... 63
Tableau III. 2: Propriétés mécaniques de l'acier X42..... 63
Tableau III. 3: Photo des éprouvettes de 1mm..... 66
Tableau III. 4: Photo des éprouvettes de 2,5 mm..... 67
Tableau III. 5: Photo des éprouvettes de 3mm..... 67
Tableau III. 6: Photo des éprouvettes de 1mm après la traction. 68
Tableau III. 7: Photo des éprouvettes de 2,5mm après la traction. 69
Tableau III. 8: Photo des éprouvettes de 3mm après la traction. 69
Tableau III. 9: Résultats de l'essai de traction. 70

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
CHAPITRE I : COMPORTEMENT MECANIQUE D'UN ACIER.....	3
I.1 INTRODUCTION.....	4
I.2 DÉFINITION DE L'ACIER.....	4
I.3 ÉLABORATION DE L'ACIER.....	4
I.4 CATÉGORIES DES ACIERS [4]	8
I.5 CLASSIFICATION DES ACIERS	9
I.6 SYSTÈME DE CLASSEMENT	12
I.7 SOLLICITATIONS MÉCANIQUES DES SOLIDES	13
I.8 ESSAIS MÉCANIQUES.....	13
I.9 PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DES MATÉRIAUX	21
I.10 INFLUENCE DES ÉLÉMENTS D'ADDITION ET DES IMPURETÉS SUR LE COMPORTEMENT MÉCANIQUE	23
I.11 PROPRIÉTÉS NON MÉCANIQUES DES MATÉRIAUX	25
I.12 CONCLUSION :	26
CHAPITRE II CONCEPT DU PRECHAUFFAGE.....	27
II.1 INTRODUCTION	28
II.2 SOUDABILITÉ DES MATÉRIAUX	28
II.3 LES PROPRIETES PHYSIQUES QUI INFLUENT SUR LA SOUDABILITE DES ACIERS INOXYDABLES :	30
II.4 CARBONE EQUIVALENT DE L'ACIER	31
II.5 CYCLE THERMIQUE DE SOUDAGE.....	32
II.6 ZONE AFFECTÉE THERMIQUEMENT	33
II.7 PRÉCHAUFFAGE.....	36
II.8 RELATION ENTRE LE COEFFICIENT DE SOUDABILITÉ ET LE PRÉCHAUFFAGE.....	38
II.9 DÉTERMINATION DU TEMPERATURE DE PRÉCHAUFFAGE	39
II.10 TECHNIQUES DE PRÉCHAUFFAGE.....	45
II.11 ROLE DE PRÉCHAUFFAGE :	50
II.12 AVANTAGES DE PRÉCHAUFFAGE	51
II.13 MÉCANISME DE CRIQUAGE :	51
II.14 POST-CHAUFFAGE	52
II.15 TRAITEMENT THERMIQUE APRÈS SOUDAGE	54
II.16 FISSURATION A CHAUD.....	55
II.17 INTRODUCTION SUR LA FISSURATION A FROID	56
II.18 FACTEURS AFFECTENT LE NIVEAU DE CONTRAINTE DE L'ACIER	61
CHAPITRE III PARTIE EXPERIMENTALE.....	62
III.1 INTRODUCTION	63
III.2 PRESENTATION DE MATERIAU ETUDIE :	63

TABLE DES MATIERES

III.3	PREPARATION DES EPROUVETTES :	64
III.4	PRECHAUFFAGE :	66
III.5	ESSAI DE TRACTION :	68
III.6	INTERPRETATION DES RESULTATS.....	70
III.7	CONCLUSION :	74
CONCLUSION GÉNÉRALE		75
IV RÉFÉRENCES.....		77

*INTRODUCTION
GÉNÉRALE*

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Aujourd'hui (60 à 80%) de la production mondiale de l'acier est destiné à la fabrication des produits mécanique, dont (10 à 20 %) pour les assemblages soudés.

A noter que le soudage est particulièrement utilisé dans les domaines de la fabrication des assemblages métalliques à partir de la microélectronique jusqu'à la fabrication des grandes pièces.

Actuellement nous avons la possibilité de souder des pièces d'épaisseur de 0.01mm jusqu'à 1000 mm et même plus. On peut souder pratiquement tous les métaux et alliages utilisés dans les techniques modernes.

Le soudage est une opération qui consiste à assurer la liaison permanente de deux ou plusieurs parties constitutives de nature identique ou différente, soit par chauffage, soit par pression, soit par l'action simultanée des deux. Le soudage peut être effectué avec ou sans métal d'apport. Dans cette technique on trouve différentes méthodes qui s'appliquent suivants les épaisseurs des joints et leur préparation telle que bord à bord, bords relevés, sur chanfrein en V, sur chanfrein en X etc. [26]

Lors du soudage on peut rencontrer plusieurs défauts tel que la fissuration, qui influe de façon très négative sur le cordon de soudure et même sur les pièces assemblés. Pour remédier à ce défaut nous utilisons le préchauffage.

Le préchauffage est un phénomène qui consiste à chauffer le métal de base, soit dans sa totalité, soit uniquement dans la région entourant le joint, à une température spécifique souhaitée, appelée température de préchauffage.

Le chauffage peut être poursuivi pendant le processus de soudage, cette opération est appelée post-chauffage, qui consiste à maintenir la température désirée sans prolongation de la source de chaleur externe. La température entre passes, définie comme la température du métal de base entre la première et la dernière passe de soudage, ne peut pas descendre en dessous de la température de préchauffage.

A travers notre étude, nous allons faire une recherche bibliographique sur le préchauffage, et ses avantages et nous allons présenter quelques exemples dans lesquelles nous allons mettre en évidence l'effet du préchauffage sur le comportement mécanique du matériau des assemblages soudés.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Pour cela nous avons organisé notre travail comme suite :

- Une introduction générale
- Chapitre I dans lequel nous avons parlé du comportement mécanique des aciers.
- En chapitre II nous avons présenté le phénomène de préchauffage.
- Chapitre III est un travail expérimental qui montre l'impact de préchauffage sur le comportement mécanique en variant la température de préchauffage et les épaisseurs des éprouvettes.

Et nous finissons par une conclusion générale.

CHAPITRE I :
Comportement
mécanique d'un acier

I.1 INTRODUCTION

En **1967**, le monde ne produisait que **500** millions de tonnes d'acier. En **2016**, ce chiffre est passé à plus de **1 600** millions. Pour donner une idée de la façon dont ce matériau peut être utilisée, selon la World Steel Association. [2]

Avec plus de **3 500** types d'acier différents, les possibilités d'utilisation sont pratiquement infinies. De la production à la fabrication, chaque type a sa place et ses caractéristiques parfaites pour satisfaire pratiquement à tous les besoins. [2]

Pour présenter ce chapitre nous avons opté aux différents points suivants :

I.2 DÉFINITION DE L'ACIER

Un acier est un alliage métallique constitué principalement de fer et de carbone, dont la teneur en carbone est généralement inférieure à **2%** et qui contient d'autres éléments métalliques ou non.

I.3 ÉLABORATION DE L'ACIER

Dans un haut fourneau à **1 200 °C**, production de fonte à partir du minerai de fer naturel trouvé dans le sol en présence du coke utilisé comme réducteur.

A partir de cette fonte, nous pouvons obtenir l'acier par deux méthodes différentes:

I.3.1 Par un convertisseur à oxygène :

La conversion de la fonte en acier s'effectue dans une cornue géante, le convertisseur. La fonte liquide est versée dans le convertisseur, sur une charge de chaux et de ferrailles. On insuffle de l'oxygène, pour éliminer le carbone sous forme de CO_2 , et il brûle presque totalement les éléments indésirables (silicium, phosphore, ...). Les oxydes ainsi formés sont fixés par la chaux et forment un laitier qui est évacué pour être valorisé. Reste le fer presque pur. Cette combustion provoque une élévation de la température du bain qui passe de **1250 °C** (fonte liquide) à plus de **1600 °C** (acier liquide). [16]

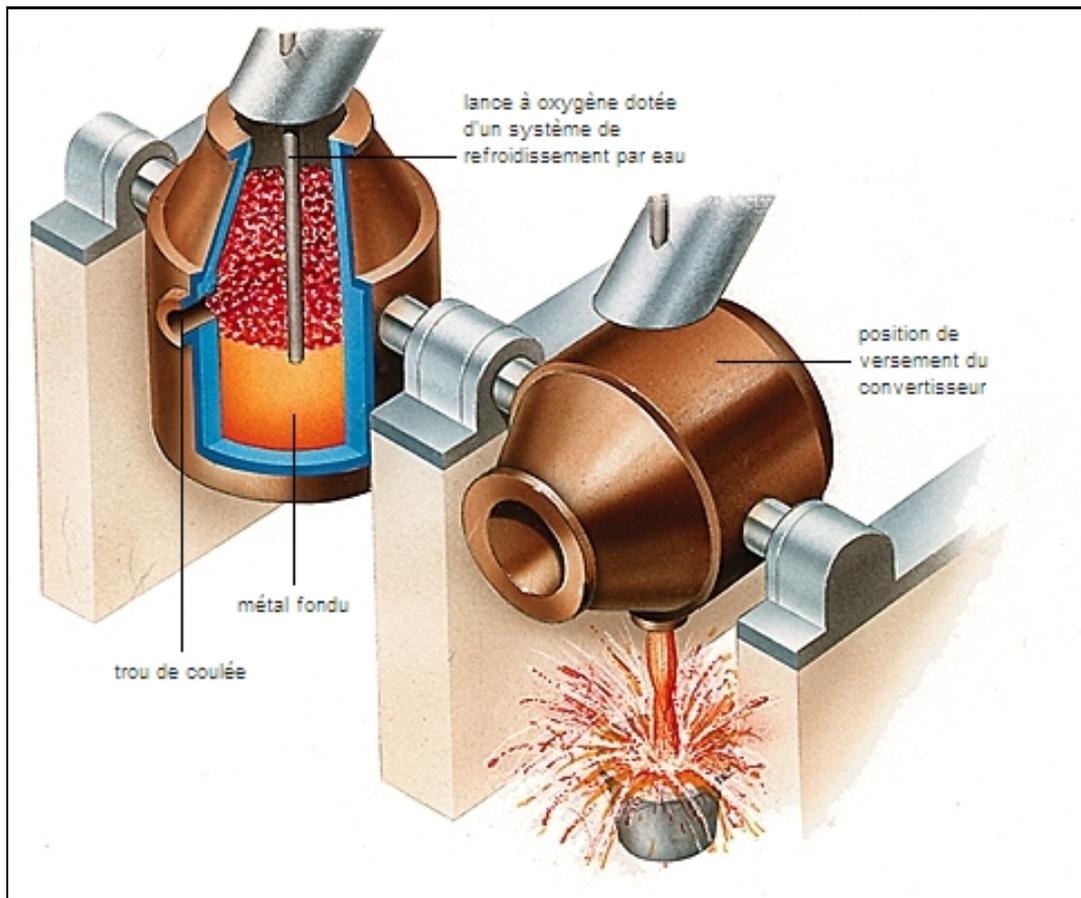


Figure I.1: Fabrication de l'acier à l'aide d'un convertisseur. [16]

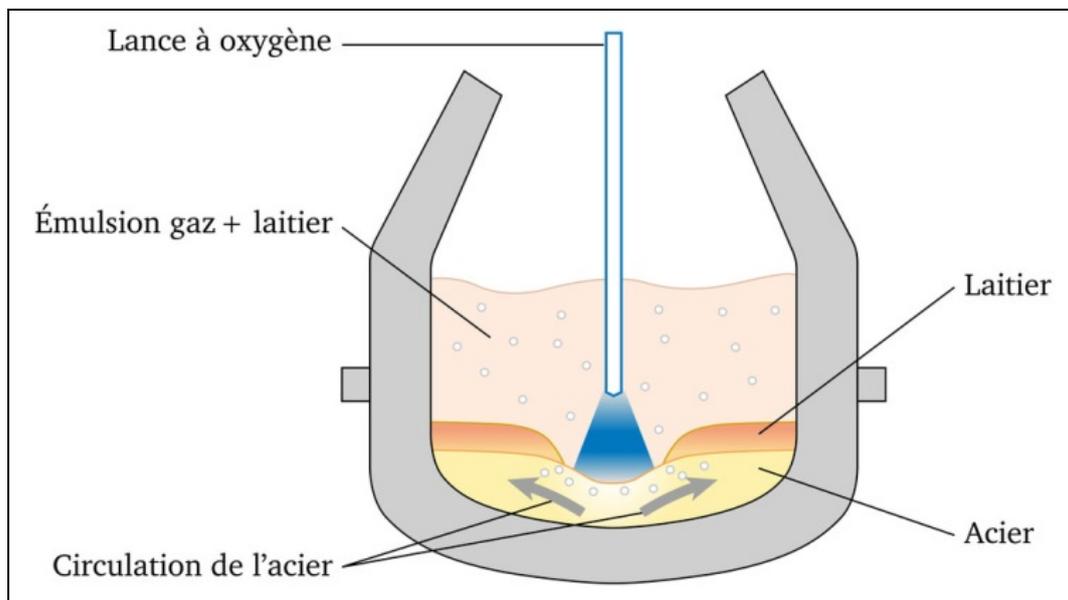


Figure I.2: Schéma d'un convertisseur à oxygène. [16]

I.3.2 Par un four électrique :

Il consiste à faire éclater un arc électrique entre une électrode en graphite qui amène le courant électrique et la charge métallique à fondre qui sert de masse. La chaleur dégagée par cet arc est directement utilisée pour la fusion

A l'origine, ce procédé était bien adapté aux petits tonnages et a d'abord servi à la production des aciers alliés et inoxydables. [16]

Après mise en nuance, l'acier liquide est solidifié par moulage en coulée en lingots, ou en coulée continue. Ce dernier procédé, le plus usité actuellement, permet l'obtention directe des demi-produits (brames, blooms), ébauches des formes finales attendues, sans nécessité d'un passage au laminoir dégrossisseur.

Ensuite, d'autres étapes de laminage à chaud, puis à froid, transforment les demi-produits en produits finis. L'acier est alors exploitable et disponible à la géométrie souhaitée et sous une épaisseur très fine.

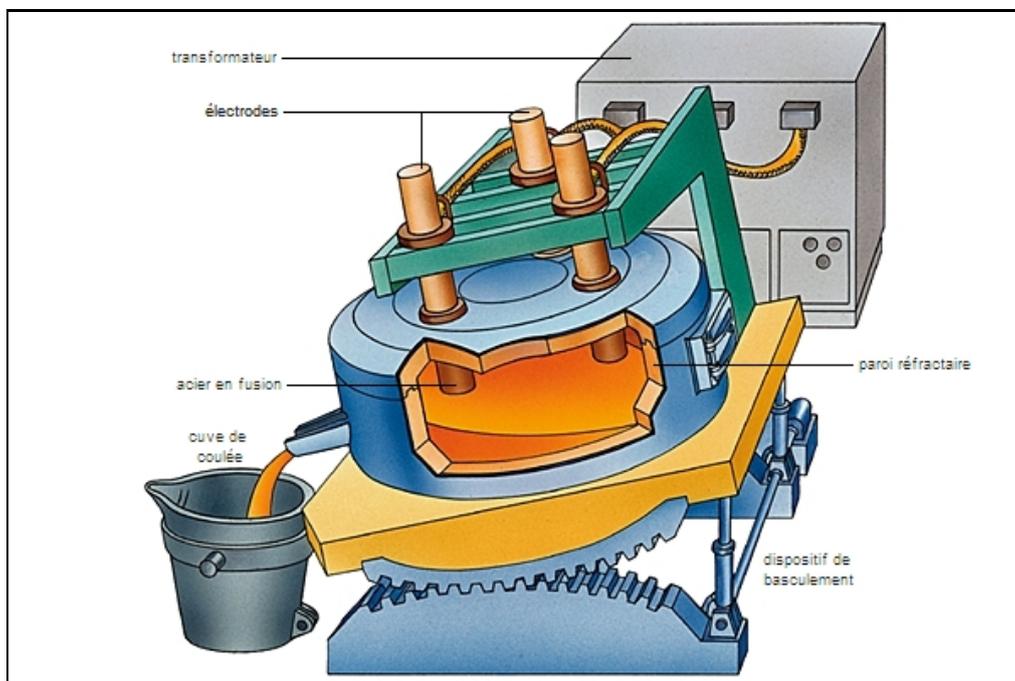


Figure I.3: Mécanisme d'un four électrique. [16]

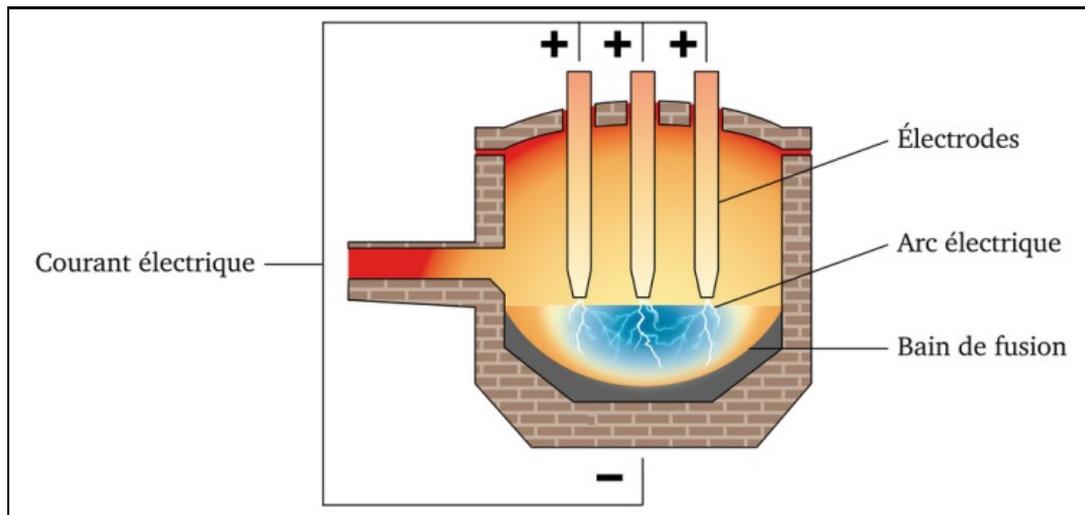


Figure I.4: Passage de courant électrique dans un four électrique. [16]

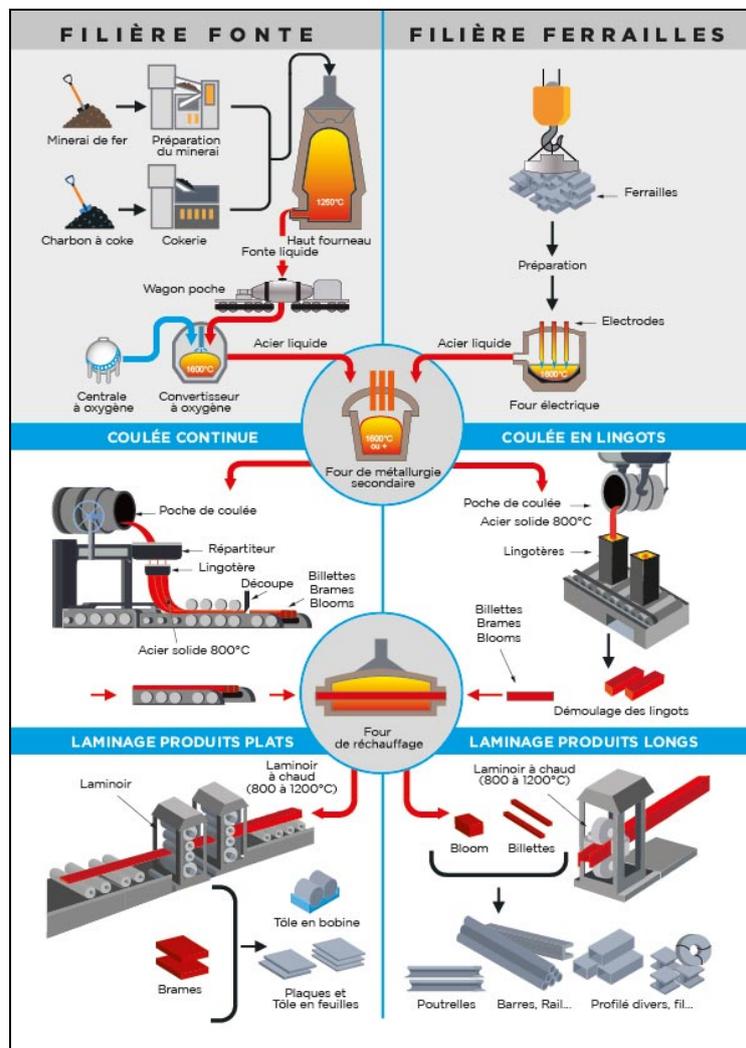


Figure I.5: Opérations sidérurgiques pour l'obtention de l'acier.[16]

I.4 CATÉGORIES DES ACIERS [4]

D'après le diagramme d'équilibre alliage fer-carbone nous pouvons citer trois catégories des aciers :

I.4.1 Les aciers hypo-eutectoides :

Sont des aciers dont le pourcentage de carbone est compris entre **0** et **0,85%** de carbone.

I.4.2 Les aciers eutectoides :

Sont des aciers dont le pourcentage de carbone est égal à **0,85%** de carbone.

I.4.3 Les aciers hyper-eutectoides :

Sont des aciers dont le pourcentage de carbone est compris entre **0,85** et **1,7%** de carbone (ou de 2,1% selon d'autres auteurs).

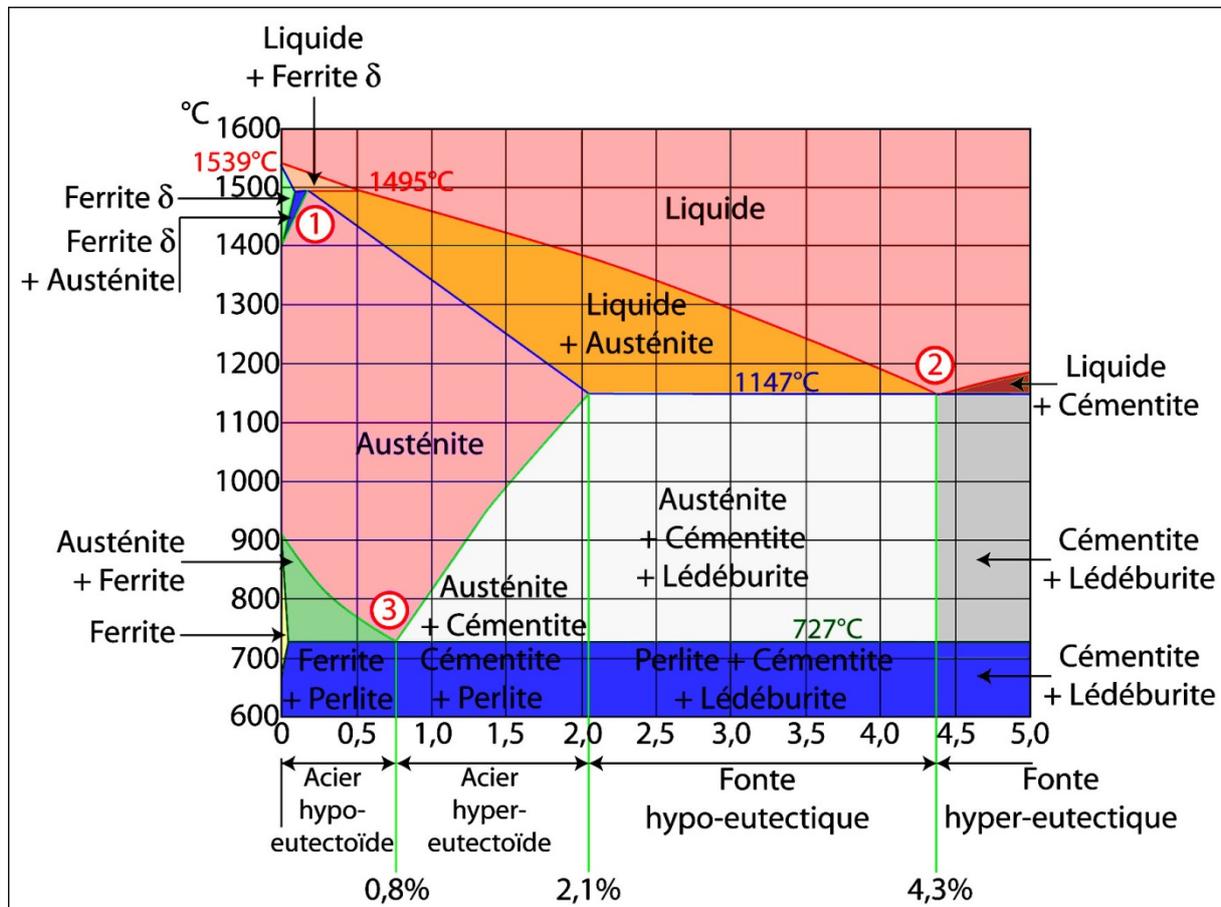


Figure I.6: Diagramme d'équilibre alliage fer – carbone. [2]

I.5 CLASSIFICATION DES ACIERS

L'acier est un matériau formidable et disponible en différentes qualités distinctes .Il peut être classé selon sa composition chimique, ses éléments d'alliages et ses traitements : [4]

I.5.1 Acier au carbone

L'acier au carbone a un aspect mat et est connu pour être sensible à la corrosion. Dans l'ensemble, on en distingue trois sous-types : acier à faible, moyenne et forte teneur en carbone, avec une faible teneur d'environ **0,30 %** en carbone, moyenne **0,60 %** et élevée **1,5 %**. Le nom lui-même dérive du fait que les aciers contiennent une très petite quantité d'autres éléments d'alliage. Ils sont exceptionnellement résistants, c'est pourquoi ils sont souvent utilisés pour fabriquer des produits tels que des couteaux, des fils haute tension, des pièces de voiture et d'autres articles similaires. [4]

Les aciers au carbone représentent environ 90 % de toute la production d'acier.

I.5.2 Acier allié

Les aciers alliés sont un mélange de différents métaux, tels que le nickel, le cuivre et l'aluminium. Ceux-ci ont tendance à être moins chers, plus résistants à la corrosion et sont préférés pour certaines pièces automobiles, pipelines, coques de navires et projets mécaniques. Les caractéristiques mécaniques des aciers alliés dépendent donc de la concentration des éléments qu'ils contiennent. [4]

I.5.3 Aciers fortement alliés :

Dans lesquels la teneur d'au moins un élément d'alliage dépasse **5%** (Cr, Ni, Mn).

X 6 Cr Ni 18-9 Acier fortement allié avec **0.06%** de carbone, **18%** de chrome, **9%** de nickel).

I.5.4 Aciers faiblement alliés :

Dans lesquels la teneur de chaque élément d'alliage est inférieur à **5%** (Mn, Ni, Cr, Mo voire V, Cu ou Nb).

25 Cr Mo 4-25 Acier faiblement allié avec **0.25%** de carbone et **1%** de chrome ($4/4=1$) et de **2.5%** de molybdène ($25/10=2.5$).

I.5.5 Acier non allié

Pour lequel les teneurs en éléments d'alliage, à l'exception du carbone, sont inférieures à **1,65 %** pour le manganèse, à **0,50 %** pour le silicium, et à des valeurs plus faibles, toutes inférieures à **0,40 %** pour les autres éléments (**Norme NF EN 10020**). [4]

Les aciers non allié dits de construction ainsi que les aciers pour les chaudières et appareils à pression (exemples : **S355**). [17]

Ces aciers trouvent leurs principales applications industrielles dans la gamme de température allant d'environ **-50 à 350 °C**. [17]

I.5.6 Acier pour outils

L'acier pour outils est connu pour être dur et résistant à la chaleur et aux rayures. Son nom vient du fait qu'ils sont très couramment utilisés pour fabriquer des outils métalliques, tels que des marteaux. Pour ceux-ci, ils sont composés d'éléments comme le cobalt, le molybdène et le tungstène, et c'est la raison pour laquelle l'acier pour outils présente des caractéristiques de durée dans le temps et de résistance à la chaleur très élevées.

I.5.7 Acier inoxydable

Enfin et surtout, les aciers inoxydables sont probablement le type le plus connu sur le marché. Ces aciers sont polis et contiennent généralement environ **10-20 %** de chrome et moins de **1,2 %** de carbone, qui est leur principal élément d'alliage. Cette combinaison permet à l'acier d'être résistant à la corrosion et facilement moulable en différentes formes. Grâce à leur manipulation facile, leur flexibilité et leur qualité, les aciers inoxydables peuvent être utilisés dans les équipements chirurgicaux, domestiques, l'argenterie et même comme revêtement externe pour les bâtiments commerciaux industriels.[5] Ils existe cinq famille d'acier inoxydable :

- **Austénitique:** il a une teneur en nickel de plus de **7%**, entre **16** et **28%** de chrome, et une très faible teneur en carbone, ce qui les rend très résistants à la corrosion, ils ont une bonne malléabilité et soudabilité et excellentes propriétés mécaniques.

- **Ferritique:** ces aciers sont essentiellement des alliages de chrome dans une fourchette de **10,5% à 30%**, mais à très faible teneur en carbone (**0,08%** par rapport aux martensitiques), ce qui les rend économiques et avec des propriétés de résistance à la corrosion et de dureté raisonnablement bonnes. De plus, contrairement aux austénitiques, ils sont magnétiques. Certains degrés peuvent contenir du molybdène, du silicium, de l'aluminium, du titane et du niobium qui leur confèrent des caractéristiques différentes.
- **Martensitique:** il a une teneur en carbone élevée ou faible (jusqu'à **1,2%**), **12%** de chrome et est construit autour du fer type **410**. Sa microstructure de martensite tétragonale centrée sur le corps, le rend durcissable par traitement thermique (par refroidissement), apporte dureté et résistance. Il est principalement utilisé pour les outils médicaux (scalpels, rasoirs et pinces internes). La martensite non trempée est de faible dureté et donc cassant.
- **Duplex:** il a une teneur élevée en chrome (**19–32%**) et en molybdène (jusqu'à **5%**) et une teneur en nickel inférieure à celle des aciers inoxydables austénitiques, ce qui le rend deux fois plus résistant. Sa microstructure mixte offre une résistance améliorée à la fissuration par corrosion sous contrainte de chlorure par rapport aux aciers inoxydables austénitiques types **304** et **316**. Cela le rend plus cher.
- **Durci par précipitation:** ils ont du chrome et du nickel, qui offrent une combinaison optimale des propriétés des aciers inoxydables martensitiques et austénitiques. Avec les premiers, ils partagent leur capacité à obtenir une résistance élevée grâce au traitement thermique, et les seconds ont une grande résistance à la corrosion. Ceci est réalisé après l'addition d'un ou plusieurs des éléments de cuivre, aluminium, titane, niobium et molybdène à une matrice martensitique ou austénitique soumise à un processus de traitement thermique qui conduit à son durcissement. [4]

Remarque : L'acier inoxydable austénitique et le ferritique sont les plus utilisés (ils représentent **95%** des applications d'acier inoxydable).

Une classification selon les principales classes de qualité définies par les principales caractéristiques d'applications peut également être retenue :

- Aciers de qualité alliés avec des exigences de propriétés spécifiées de ténacité, de grosseur de grain et/ou de formabilité.

- Aciers spéciaux non alliés présentant une plus grande pureté vis-à-vis des inclusions non métalliques et répondant à des exigences sévères (élasticité ou trempabilité élevées, aptitude au formage à froid, à la soudabilité).

Réputé pour ses propriétés élastiques, ductiles et résistantes à la rupture, l'acier est grandement utilisé comme matériau de construction, assez coûteux mais performant et de mise en œuvre aisée. Nuance, qualité, facteurs d'influence mécanique (écrouissage, traitements thermiques...), sont alors autant de critères de choix décisifs. La résistance élevée de l'acier de construction rend possible les ossatures élancées et aérées, pour un encombrement faible et des charges réduites. [1]

I.6 SYSTÈME DE CLASSEMENT

La classification de l'acier est très souvent utilisée par les ingénieurs, les chercheurs, et même les agences gouvernementales pour mettre de l'ordre dans l'évaluation des caractéristiques mécaniques et la qualité des matériaux. [2]

Il existe plusieurs systèmes de classifications tel que (ISO, ASME, AFNOR, ASTM, SAE, ...etc), dont nous citons que ceux qui sont en concordance avec notre thème :

I.6.1 Système de classement ASTM (American Standards of Technical Material)

Ce système de classement attribue à chaque métal un préfixe sous forme de lettre en fonction de sa catégorie. Par exemple, la lettre « A » s'applique aux matériaux en acier et en fer. Un numéro séquentiel est ensuite attribué pour refléter les propriétés spécifiques de ce métal.

I.6.2 Système de classement SAE (Society of Automotive Engineers) :

Un numéro à quatre chiffres est utilisé ici pour la classification. Les deux premiers chiffres indiquent le type d'acier ainsi que la concentration de l'élément d'alliage et les deux derniers reflètent la concentration en carbone de ce métal spécifique.

I.7 SOLLICITATIONS MÉCANIQUES DES SOLIDES

Le comportement mécanique est la réponse d'un matériau lorsqu'il est sollicité, sous la contrainte appliquée le matériau peut se déformer ou se fissurer, le type de déformation engendrée dépend de l'intensité de la contrainte.

Lorsqu'elle est faible la déformation est élastique : le matériau retrouve sa forme originale lorsque la contrainte est levée. Si le retour vers la forme initiale prend un certain temps après l'annulation de la contrainte on parle d'effet anélastique ou viscoélastique.

Des contraintes plus élevées peuvent mener à une déformation plastique : le matériau ne retrouve pas sa forme originale lorsque la contrainte est supprimée.

A haute température, une déformation plastique peut se développer avec un certain retard suite à l'application de la contrainte, cet effet est appelé : fluage.

A plus forte contrainte on assiste à la fracture, le matériau casse et se sépare en plusieurs morceaux. Si la fracture intervient avant que le matériau n'ait subi une large déformation plastique on parle de fracture fragile, dans le cas contraire il s'agit d'une fracture ductile. [6]

I.8 ESSAIS MÉCANIQUES

L'essai des matériaux étudie le comportement des matériaux soumis à différentes sollicitations. Il s'agit pour l'essentiel d'observer le rapport qui existe entre les forces appliquées et la déformation, ainsi que les sollicitations limites résultantes entraînant une défaillance des composants. Les valeurs caractéristiques obtenues par les méthodes d'essai mécanique sont utilisées dans le développement des matériaux, la conception des composants, ainsi que dans l'application de l'assurance qualité. Afin de caractériser aussi précisément que possible les propriétés des matériaux, on dispose d'une série de méthodes d'essai normalisées:[8]

I.8.1 La traction :

Une poutre ou une barre est sollicitée à la traction lorsqu'elle est soumise, à ses deux extrémités, à l'action de deux forces (N) égales et opposées portées par la ligne moyenne et tendant à allonger cette poutre. Il y a trois phases : [6]

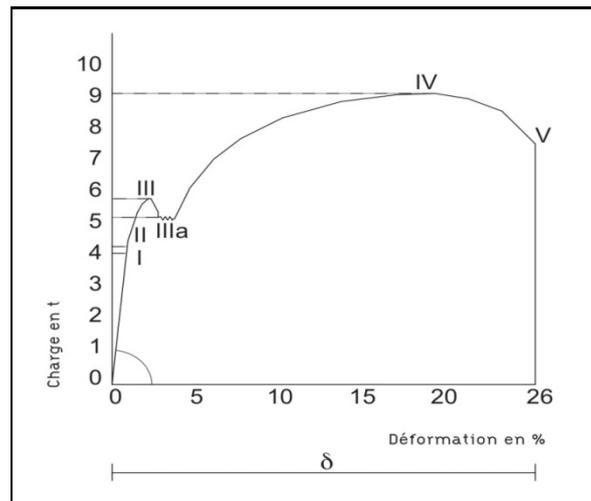


Figure I.7: Courbe de traction. [6]

Phase élastique : soumise à une traction suivant sa section, une barre en acier s'allonge uniformément jusqu'à une certaine limite, appelée limite d'élasticité. Il y a réversibilité du phénomène : si la charge est supprimée, la barre d'acier reprend sa dimension initiale (**loi de Hooke**). C'est la phase dite « élastique » (phases **I** et **II** sur le diagramme).

Phase plastique : Au-delà de la limite d'élasticité, l'allongement de la barre augmente même si la charge évolue peu, puis passe par une phase de déformation plastique où une partie de l'allongement demeure permanent si la charge diminue. Ce phénomène est appelé écrouissage. L'allongement demeure permanent (phases **III** et **IV**).

Phase de rupture : Après une phase d'allongement, la charge diminue car la section d'acier diminue. Ce phénomène est appelé « striction ». Il y a alors rupture de la barre, la déformation totale est appelée « allongement à la rupture » (phase **V**).

Remarque : Dans une construction, les pièces de charpente sont conçues et calculées pour rester la plupart du temps dans le domaine élastique. La limite d'élasticité pour un acier ordinaire est de **235 Mpa (235 N/mm²)** ou de **355 Mpa**. Pour un acier à haute limite d'élasticité, cette valeur peut s'élever à **460 Mpa**, voire **690 Mpa** (Aciers thermomécaniques).

[7]

I.8.2 La flexion :

Considérons une poutre horizontale appuyée à ses deux extrémités et supportant un poids placé au milieu de sa portée. La force extérieure **F** exercée sur la poutre par la charge qu'elle

supporte est perpendiculaire à son axe longitudinal. Elle génère ce qu'on appelle une flexion ou un moment fléchissant.

La poutre se déforme pour produire une réaction qui équilibre le système. Contrairement à la traction où la section du matériau est soumise à une contrainte uniforme, la flexion exerce de part et d'autre de la fibre neutre des contraintes variables et de signes opposés. La face supérieure de la poutre se raccourcit sous un phénomène de compression et la face inférieure s'allonge sous un phénomène inverse de traction.

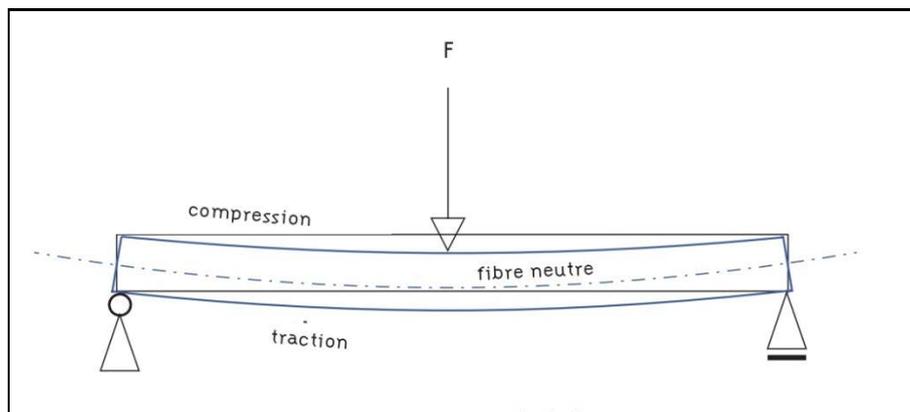


Figure I.8: Essai de flexion sur une poutre. [6]

La résistance de la poutre dépendra donc de la caractéristique géométrique suivante de la section : le module de flexion, à savoir le rapport du moment d'inertie de la poutre sur la distance de la fibre neutre à l'extrémité de la section, soit I/v . Plus le module de flexion est grand, meilleure est la résistance à la flexion. [7]

I.8.3 La compression :

La compression est une contrainte mécanique équivalente à l'action d'une force qui exerce une pression à chaque extrémité d'une poutre.

En mécanique, la compression est l'application de forces équilibrées vers l'intérieur («pousser») à différents points sur un matériau ou une structure.

Les déformations dues à la compression ne jouent pas toujours un rôle déterminant sur les éléments de structure verticaux. En revanche, un phénomène d'instabilité appelé « flambement » apparaît à partir d'une certaine charge et en fonction du rapport existant entre la

section et la hauteur de l'élément considéré. Le flambement est une forme d'instabilité propre aux éléments comprimés élancés tels que les poteaux, colonnes, barres comprimées. [7]

Les essais de compression tiennent une place moins importante que les essais de traction dans le contrôle des matériaux métalliques. Mais ils sont toutefois essentiels pour l'étude de matériaux tels que les pierres naturelles, les briques, le béton, le bois de chauffage, etc. Lors de ces essais, l'éprouvette normalisée de coupe transversale connue est soumise à une force de croissance faible dans la direction longitudinale jusqu'à la rupture. L'éprouvette présente un état de contrainte axiale. Le diagramme force-trajectoire enregistré permet d'illustrer le rapport qui existe entre la contrainte et l'écrasement. Le diagramme contrainte-écrasement met très bien en évidence les différences de comportement des matériaux, et fournit les valeurs caractéristiques de résistance à la compression, de limite d'écrasement à **0,2%**, ainsi que de contrainte de fluage de compression. [8]

I.8.4 Le cisaillement :

L'essai de cisaillement est utilisé pour le contrôle des vis, rivets, tiges et clavettes, et sert à déterminer la résistance au cisaillement du matériau ou le comportement du matériau en cas de sollicitation de cisaillement. À cet effet, on génère des contraintes de cisaillement dans l'éprouvette, en lui appliquant des efforts tranchants externes jusqu'à ce qu'elle se cisaille. Il existe deux méthodes pour déterminer la résistance d'un matériau à la sollicitation de cisaillement: la méthode de test à simple section, et la méthode de test à double section.

Dans le cas de la méthode à double section, l'éprouvette est cisillée au niveau de deux sections, tandis qu'elle ne se cisaille que sur une section dans le cas de la méthode à simple section. Le calcul de la résistance au cisaillement diffère pour ces deux méthodes en ce qui concerne la surface de section à poser. La résistance au cisaillement déterminée lors de l'essai de cisaillement est importante pour le dimensionnement des vis, rivets et tiges, ainsi que pour le calcul de la force requise pour le cisaillement et le poinçonnage. [8]

$\tau = F / 2 A$ (τ résistance au cisaillement, F force, A surface de cisaillement)

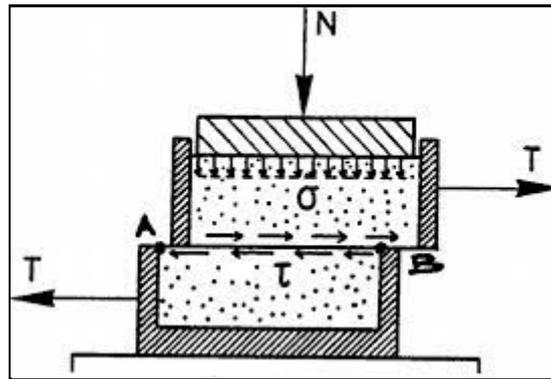


Figure I.9: Essai de cisaillement. [7]

I.8.5 La torsion :

Les composants soumis à des mouvements rotatifs sont sollicités en rotation. Cette rotation est également appelée torsion. La résistance de torsion déterminée par l'essai de torsion sert d'orientation pour connaître la sollicitation admissible du matériau. Cette méthode est utilisée pour les arbres, axes, fils métalliques et ressorts, ainsi que pour évaluer le comportement de ténacité des aciers à outils. [8]

Lors de l'essai de torsion, une éprouvette est fermement fixée à une extrémité, et soumise à l'autre extrémité à un couple en croissance constante, le moment de torsion. Le moment de torsion provoque des contraintes de cisaillement dans la section de l'éprouvette; un état de contrainte s'installe, entraînant une déformation, puis une rupture. [8]

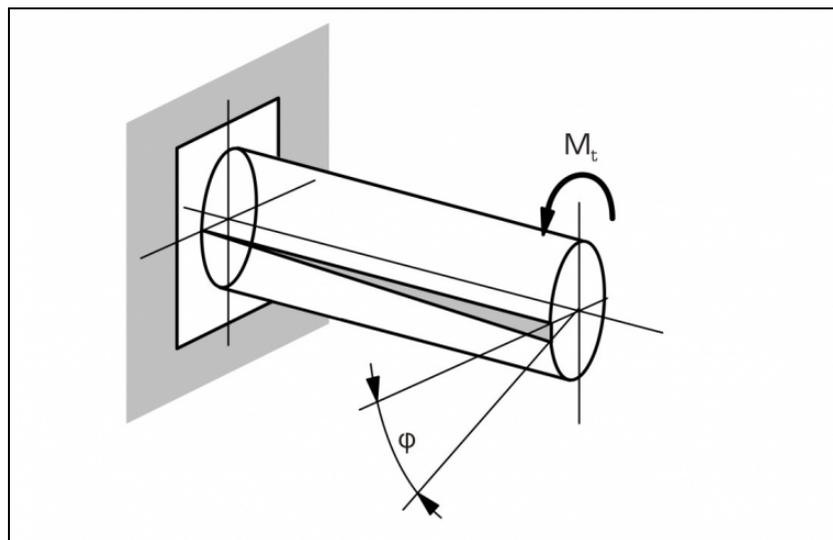


Figure I.10: Essai de Torsion.[8]

I.8.6 La dureté :

La résistance mécanique d'un matériau (éprouvette) à la pénétration d'un autre corps plus dur (pénétrateur ou le diamant). Il existe trois types de dureté : Brinell – Vickers - Rockwell [8]

Principe de l'essai de **dureté Brinell** : Cette méthode d'essai consiste, dans des conditions définies, à enfoncer un corps d'essai normalisé, une bille en métal dur, à l'intérieur du matériau. La surface de l'empreinte laissée est ensuite mesurée optiquement. Puis la surface de l'empreinte est calculée à partir de son diamètre et du diamètre de la bille. La pénétration du corps d'essai entraîne l'apparition d'un état de contrainte triaxiale dans l'éprouvette. La dureté Brinell est calculée à partir de la force d'essai et de la surface de l'empreinte de la section sphérique. [8]

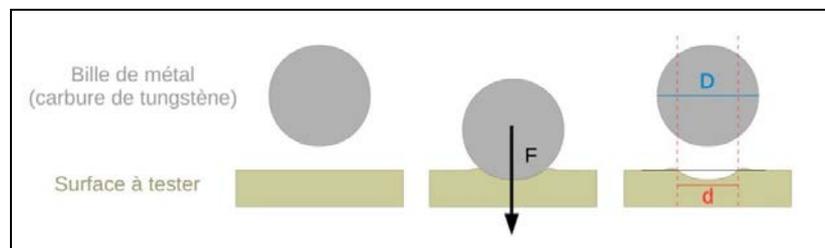


Figure I.11: Essai de dureté Brinell. [8]

Principe de l'essai de **dureté Vickers** : La méthode d'essai est similaire à celle de l'essai de dureté Brinell. Mais à la différence de la méthode Brinell, le corps d'essai utilisé est un diamant de forme pyramidale. La mesure des deux diagonales d_1 et d_2 et le calcul de la moyenne permettent de déterminer la diagonale de l'empreinte. La dureté Vickers est le quotient de la force d'essai par la surface de l'empreinte.

Principe de l'essai de **dureté Rockwell** : (Diamant en forme de cône) .La méthode d'essai de dureté Rockwell permet de lire directement la valeur de dureté, qui correspond au différentiel des profondeurs de pénétration, sur le comparateur à cadran. [8]

Il reste par ailleurs d'autres phénomènes mécaniques à prendre en compte :

I.8.7 La résistance à la rupture fragile (Résilience) :

L'essai de résilience est une méthode avec sollicitation brutale, essentiellement adaptée à la détermination de la tendance à la rupture de fragilité ou de la propriété de ténacité d'un matériau. La méthode d'essai ne fournit pas de valeurs caractéristiques du matériau. Les

valeurs de résilience déterminées au cours de l'essai de résilience ne sont pas directement utilisées pour calculer la résistance, elles aident uniquement à choisir des matériaux pour des applications spécifiques. La fragilité d'un matériau ne dépend pas seulement de lui, elle est également influencée par des données extérieures telles que la température ou l'état de contrainte. Différentes méthodes d'essai sont utilisées pour déterminer la résilience. [8]

Pour l'essai Charpy, le corps d'essai est maintenu sur deux côtés, et le pendule entre en contact avec le corps d'essai au milieu, à la hauteur de l'entaille. Pour les méthodes d'essai Izod et Dynstat, le corps d'essai est à la verticale, et le pendule entre en contact avec l'extrémité libre du corps d'essai, au-dessus de l'entaille. [8]

Lors de l'essai de résilience, un mouton pendulaire tombe d'une hauteur maximum. Au point le plus bas, selon le principe de Charpy, le mouton entre en contact avec la face arrière d'une éprouvette entaillée. Lorsque les butées transpercent ou passent par l'éprouvette, le mouton transmet son énergie d'impact à l'éprouvette. L'énergie résiduelle du mouton diminue à chaque passage oscillant par le point le plus bas (point zéro), freinant ainsi le mouton. Lorsque le mouton passe en oscillant par le point le plus bas, l'aiguille témoin est entraînée, et le travail délivré pour le choc est indiqué sur une échelle. La forme des éprouvettes de choc est normalisée. L'énergie de choc requise est la force nécessaire pour transpercer une éprouvette entaillée définie. La résilience déterminée à partir de l'énergie de choc donne une mesure de la fragilité du matériau. [8]

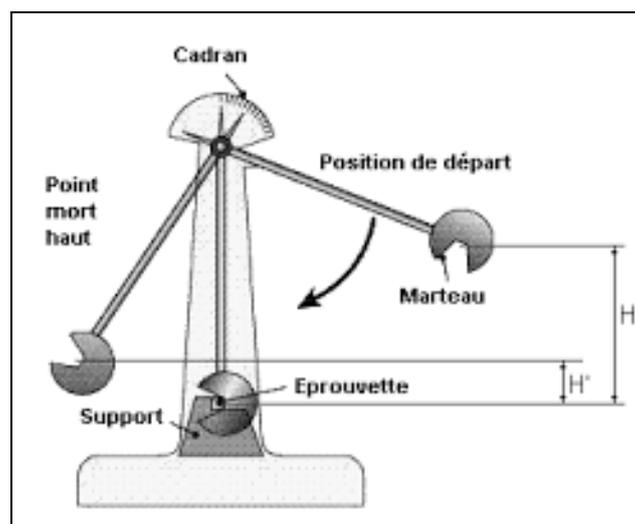


Figure I.12: Essai de résilience (CHARPY). [8]

I.8.8 Le fluage :

À charge égale, des matériaux soumis à des charges statiques sur la durée se comportent différemment selon que la température est élevée ou de local. À température élevée, une déformation plastique lente et irréversible, également appelée fluage, apparaît au bout d'un certain temps, avec des contraintes encore inférieures à la limite élastique à chaud, et sans augmentation de la charge. Lorsque cette charge est maintenue inchangée pendant une certaine durée, cela entraîne la rupture de l'éprouvette. [8]

Principe de l'essai de fluage Lors de l'essai de fluage, une éprouvette est soumise à une charge à contrainte constante et température constante. Cet essai est répété plusieurs fois avec des contraintes différentes, mais toujours à la même température. Les déformations plastiques sont mesurées à des intervalles de temps continus. Toutes les valeurs de mesure peuvent ensuite être reportées dans un diagramme de fluage. La déformation mesurée présente une courbe caractéristique appelée courbe de fluage. Lors de l'essai de fluage, on détermine les valeurs caractéristiques de la résistance au fluage, ainsi que les différentes quantités de déformation. [8]

Courbe déformation-temps Lorsque l'on reporte sur un graphique la déformation en fonction du temps, on obtient ce que l'on appelle la courbe déformation-temps.

Résistance au fluage (limite de rupture dans le temps/limite de déformation dans le temps): contraintes mécaniques entraînant des déformations durables ou une rupture Types de déformation: déformation de fluage, déformation permanente, déformation primaire plastique, recouvrement de forme inélastique Sur la courbe déformation-temps, on distingue trois phases dans les zones techniques de fluage: [8]

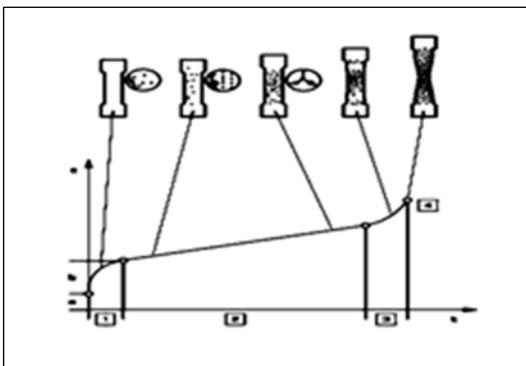


Figure I.13: Une courbe d'essai de fluage. [8]

t temps, **ϵ** déformation, **1** fluage primaire, **2** fluage secondaire, **3** fluage tertiaire
4 rupture de l'éprouvette, **a** déformation élastique, **b** déformation plastique

Phase 1, fluage primaire avec réduction de la vitesse de fluage très importante au début. Ici, l'influence de la perte de résistance mécanique du matériau prévaut (fluage rapide).

Phase 2, fluage secondaire avec vitesse de fluage pratiquement constante. La montée des dislocations au passage d'obstacles de fluage se trouve en équilibre stationnaire.

Phase 3, fluage tertiaire avec vitesse de fluage à nouveau croissante jusqu'à la rupture, suite à une striction à rupture croissante et à l'augmentation des contraintes réelles. Pour les ruptures à faible déformation, la phase 3 peut être très courte.

I.8.9 La fatigue :

La résistance à la fatigue définit la limite de charge jusqu'à laquelle un matériau soumis à une charge de manière dynamique résiste sans se rompre. Ce sont avant tout les pièces de machine en mouvement qui sont soumises à des charges dynamiques provoquées par exemple par des vibrations. Lorsque le nombre d'alternances de charge est élevé, la rupture se produit alors à des contraintes bien inférieures à la limite d'élasticité et à la contrainte de rupture. [8]

Principe de l'essai de résistance à la fatigue, avec sollicitation sur flexion rotative :

Lors de l'essai de résistance à la fatigue, une éprouvette en rotation fixée sur un côté est soumise à un moment de flexion. Ce qui produit dans l'éprouvette cylindrique une sollicitation alternée par flexion rotative. Après un certain nombre de cycles de charge, l'éprouvette se rompt suite à la fatigue du matériau. [8]

I.9 PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DES MATÉRIAUX

Une propriété mécanique est une propriété caractéristique d'un matériau qui décrit son comportement lorsqu'il est soumis à une ou plusieurs contraintes mécaniques. [9]

La connaissance des propriétés mécaniques des matériaux est essentielle à la conception et à la fabrication d'objets techniques. Afin que l'objet technique remplisse sa fonction globale et résiste aux différentes contraintes qu'il subit, il est important de sélectionner les matériaux adéquats. [9]

I.9.1 LA TÉNACITÉ

La ténacité est la capacité d'un matériau à résister à la rupture et la propagation d'une fissure. On peut aussi définir la ténacité comme étant la quantité d'énergie qu'un matériau peut absorber avant de rompre. La ténacité d'un matériau donne la contrainte (en Pascal) qu'une structure faite de ce matériau peut supporter, si elle présente une fissure d'une certaine longueur. [10]

REMARQUE : La ténacité est généralement déterminée expérimentalement à l'aide d'un essai de traction lente sur une éprouvette spécifique. [10]

I.9.2 LA DUCTILITÉ

La ductilité est la capacité d'un matériau de se déformer, plus précisément de s'étirer, sans rompre et de conserver sa nouvelle forme.

La rupture se fait lorsqu'un défaut (fissure ou cavité) devient critique et se propage. Un matériau qui présente une grande déformation plastique à rupture est dit ductile, sinon il est dit fragile. [9]

REMARQUE : La plupart des métaux et alliages possèdent une excellente ductilité. C'est pourquoi ces matériaux sont fréquemment sélectionnés pour la fabrication de fils ou de câbles. [9]

Les matériaux tels que les bois et les céramiques ne sont pas ductiles puisqu'ils ne s'étirent pas. Généralement, les matériaux qui sont ductiles sont aussi malléables. [9]

I.9.3 LA MALLÉABILITÉ

La malléabilité est la capacité d'un matériau à se déformer sans se rompre et à conserver sa nouvelle forme. Ainsi, il peut être aplati, courbé ou plié.

La plupart des métaux et alliages possèdent une bonne malléabilité. C'est pourquoi ces matériaux sont fréquemment sélectionnés pour les emballages alimentaires et la joaillerie.[9]

Exemple : La malléabilité de l'aluminium permet de le laminier en feuilles. Les feuilles d'aluminium sont ensuite pliées pour obtenir des contenants alimentaires.

En bijouterie, l'or est un métal utilisé pour sa grande malléabilité. On peut lui donner des formes très variées. [9]

I.9.4 LA RIGIDITÉ

La rigidité est la capacité d'un matériau à résister à la déformation lorsqu'il est soumis à des contraintes. On retrouve des matériaux d'une bonne rigidité dans tous les types de matériaux. [9]

Exemple : Le noyer (bois), le plexiglas (plastique) et le contreplaqué (matériau composite) sont rigides. Ces matériaux conservent leur forme, c'est-à-dire qu'ils ne plient pas, ne s'étirent pas et ne se courbent pas. Cela en fait de bons choix pour des structures qui supportent des charges élevées comme les bâtiments, les maisons et les ponts. [9]

I.9.5 L'ÉLASTICITÉ

L'élasticité est la capacité d'un matériau à se déformer, puis à reprendre sa forme initiale après avoir subi une déformation. [9]

I.9.6 LA FRAGILITÉ

La fragilité est la capacité d'un matériau à se casser lorsqu'il est soumis à des contraintes. Les céramiques telles que le verre ou la porcelaine sont des matériaux qui ont une bonne fragilité. Lorsqu'elles sont soumises à des contraintes mécaniques, les céramiques se fissurent ou se cassent avant d'être déformées. [9]

REMARQUE : Lorsqu'un matériau est soumis à des contraintes répétitives, cela peut augmenter sa fragilité. Plus la force des contraintes sont élevées, moins le matériau peut en supporter les répétitions. Dans ce cas, on parle de fatigue mécanique. Par exemple, lorsqu'on déplie et replie un trombone plusieurs fois, il finit par se casser.

Généralement, les matériaux qui sont fragiles ne sont ni ductiles ni malléables, mais ils peuvent être rigides. [9]

I.10 INFLUENCE DES ÉLÉMENTS D'ADDITION ET DES IMPURETÉS SUR LE COMPORTEMENT MÉCANIQUE

La métallurgie actuelle fait de plus en plus appel à des aciers ayant des caractéristiques de plus en plus complexes. Si l'ajout de certains éléments confèrent à ces aciers des propriétés intéressantes, ceux-ci vont modifier les réactions au soudage. Quant aux impuretés, elles jouent toujours un rôle important sur les résultats mécaniques. [12]

Éléments d'addition principaux :

- **a) Carbone (C) :**

C'est l'élément prépondérant lors du soudage. Quoique nécessaire pour augmenter la résistance à la rupture, son rôle sera à la fois actif et défavorable. Son influence sur l'effet de trempe du métal de base et dans la ZAT est importante. Il peut agir seul, mais très souvent en relation avec d'autres éléments trempant tels que le Mn; Cr et Mo par exemple. [12]

- **b) Manganèse (Mn) :**

Comme pour le carbone, il augmente la résistance à la traction mais ne diminue pas l'allongement. Par son rôle désoxydant, les caractéristiques sont donc améliorées. Ex. à 13%, il confère à l'acier une forte résistance aux chocs et à l'usure (Acier Hadfield). Dans le cas des aciers ordinaires, sa teneur varie de 0,3 à 0,9% et pour les aciers à haute limite élastique (HLE) de 1 à 1,8%. [12]

- **c) Chrome (Cr) :**

Élément trempant très actif, c'est la raison pour laquelle sa teneur reste inférieure à 1% dans les aciers au carbone, de la classe des soudables. A forte teneur en (C) et de (Cr), les aciers sont durs et résistent à l'usure. Allié au nickel (Ni), ils constituent les aciers inoxydables et réfractaires. A très basse teneur en (C) et à un pourcentage de 13%, il fait partie de la gamme des aciers spéciaux. Le chrome est un élément dont on doit tenir compte lors du soudage. . [12]

- **d) Nickel (Ni) :**

Sans conférer un rôle trempant aux aciers, il améliore les propriétés générales. Allié au chrome, il constitue les aciers inoxydables. Il est utilisé dans les aciers autotrepant allié au (Cr) et au (C) et surtout dans les aciers travaillant à basse température (3 à 9% et $t^{\circ} \approx -190^{\circ}\text{C}$). [12]

- **e) Molybdène (Mo) :**

Très actif au point de vue trempe, élément noble. Dans les aciers de construction, la teneur est en générale de 0,5 à 1%, dans ce cas, il augmente la résistance à chaud (fluage) et diminue les risques de fragilité. Il améliore la résistance à la corrosion dans les aciers inoxydables (ex. tuyauterie véhiculant de l'UREE dans l'industrie chimique). [12]

- **f) Cuivre (Cu) :**

Toujours à faible teneur (0,5%), il améliore la résistance à la corrosion à l'eau de mer (ex. palplanches). Attention aux porosités lors du soudage avec des électrodes de qualité médiocre. [12]

- **g) Silicium (Si) :**

Agent désoxydant, se retrouve en faible pourcentage ($\leq 0,2\%$) sans influence néfaste. Au-delà, il augmente la résistance à la traction, mais diminue l'allongement. [12]

- **h) Aluminium (AL) :**

Affine le grain, il est retenu dans la composition du métal d'apport pour le soudage oxy-acétylénique des aciers. C'est un désoxydant efficace. [12]

- **i) Titane (Ti) :**

Il s'oppose à la trempabilité à l'air des aciers au chrome courants. C'est un élément puissant de résistance à la surchauffe. Il combat la précipitation du (C) et réduit la corrosion intergranulaire. Il donne une meilleure résistance à chaud à l'oxydation (soudures). C'est un agent stabilisant dans les aciers inoxydables. [12]

I.11 PROPRIÉTÉS NON MÉCANIQUES DES MATÉRIAUX

Lors de la conception d'un objet technique, il faut considérer la fonction globale de l'objet, mais aussi les facteurs qui risquent de le dégrader au fil du temps. Connaître les propriétés non mécaniques des matériaux permet d'en faire une sélection appropriée. Ces propriétés non mécaniques peuvent être chimiques ou physiques. [12]

Le tableau suivant présente les principales propriétés non mécaniques des matériaux.

Tableau I. 1 : Propriétés non mécaniques des matériaux. [12]

Propriétés	Description	Exemple
La conductibilité électrique	Capacité de laisser passer le courant électrique	Le cuivre L'or
La conductibilité thermique	Capacité de laisser passer la chaleur	Le cuivre La fonte
La légèreté (faible densité)	Caractéristique d'un matériau dont la masse volumique est faible	La fibre de carbone Le polystyrène (styromousse)
La résistance à la corrosion	Capacité de résister à l'action de substances qui provoquent la corrosion (ex : la rouille)	L'acier inoxydable Le plexiglas

I.12 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté les différents mécanismes d'élaboration de l'acier, les différents types d'acier et leurs systèmes de classement, ainsi que les propriétés et les essais mécaniques.

CHAPITRE II

Concept du préchauffage

II.1 INTRODUCTION

Le processus de soudage utilisé pour assembler les pipelines est essentiel à leur intégrité, mais il peut causer des problèmes s'il n'est pas bien fait. Une solution à cela est le préchauffage par plusieurs méthodes. Cette technique s'est avérée efficace pour améliorer la qualité du soudage des pipelines et réduire le risque de défauts dans la soudure. Dans ce chapitre, nous expliquerons pourquoi le préchauffage est important avant de souder des oléoducs et des gazoducs, son fonctionnement et les avantages qu'il peut apporter. [11]

II.2 SOUDABILITÉ DES MATÉRIAUX

Définition :

La soudabilité d'un matériau métallique est une propriété complexe et de nombreuses définitions ont été proposées, nous retiendrons :

Selon [*the American Welding Society (AWS) – Association Américaine de Soudage*] : [11]

« Capacité d'un métal à être soudé dans des conditions de fabrication imposées à une structure particulière conçue de manière adaptée et à produire l'effet souhaité de manière satisfaisante » [11]

Selon [*The International Institute of Welding (IIW) (Institut International de Soudage)*] :

« Un matériau métallique est dit soudable dans une certaine mesure par un processus donné et dans un but donné, lorsqu'une liaison métallique continue peut être obtenue par soudage en utilisant un processus adapté, de manière que les joints satisfassent aux exigences spécifiées du point de vue de leurs propriétés locale et de leur influence sur la construction dont ils font partie » [11]

On dit que des matériaux ont une bonne soudabilité si leur assemblage par fusion peut s'effectuer facilement. La soudabilité est fonction de la teneur en carbone et du carbone équivalent (Ceq). [18]

II.2.1 FACTEURS INFLUENTS LA SOUDABILITÉ

Il est impossible de mesurer ou calculer la soudabilité, en partie en raison des nombreux facteurs qui influent sur la facilité avec laquelle une soudure est pratiquée et sur les caractéristiques de soudure qui en résultent. ces facteurs sont : [11]

- La conception des joints.

- Les propriétés métallurgiques.
- Les propriétés physiques.
- Les propriétés chimiques.

II.2.2 INFLUENCE DU MANGANESE SUR LA SOUDABILITÉ

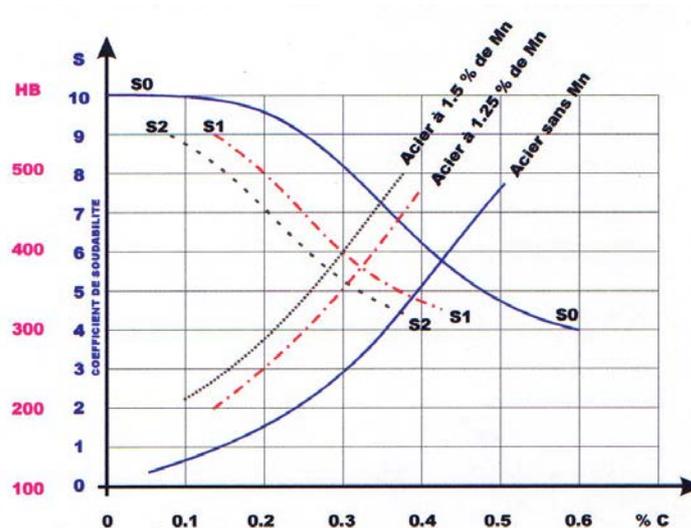


Figure II.1: Influence du Mn sur la soudabilité. [22]

II.2.3 CRITÈRES DE LA SOUDABILITÉ

Afin d'assurer la fonctionnalité des assemblages réalisés, un mode opératoire de soudage doit satisfaire à plusieurs critères dits de soudabilité, qui définissent les exigences relatives au soudage. [17]

Parmi ces critères nous citerons :

La soudabilité métallurgique :

Elle correspond à la possibilité de réaliser une soudure sans former des défauts de compacité ou de structure qui résulteraient du comportement des matériaux lors du soudage (fissures, structures fragiles,...). [17]

Elle est conditionnée par les transformations métallurgiques, sous l'effet de la fusion et du refroidissement postérieur, dans les zones soudées (métal déposé et ZAT) et qui peuvent conduire à des structures fragiles dans lesquelles des risques de fissuration peuvent apparaître, dont le plus important est le risque de fissuration à froid. [12]

Elle a pour but : [13]

- Examiner la cristallisation.
- Examiner les modifications de la structure dues aux transformations physiques et chimiques telles que l'apparition de constituants durs et fragiles.
- Examiner la dilution.

La soudabilité opératoire ou relative :

Elle correspond à la possibilité pratique de réaliser une soudure dans les conditions réelles de fabrication (pièces et son environnement, procédé et position de soudage,...). [17]

Elle est liée aux problèmes rencontrés par le soudeur ou l'opérateur, lors de l'exécution du joint par un procédé de soudage. [12]

La soudabilité globale ou constructive :

Elle correspond à l'aptitude de l'assemblage soudé à satisfaire aux conditions de service qui lui seront imposées (tenue mécanique, résistance à la corrosion). [17]

Elle définit les possibilités de résistance du joint dans un ensemble d'une construction.(éviter les discontinuités géométriques , éviter le croisement de cordon). [13]

Elle aussi concerne les problèmes liés au comportement des joints soudés dans une construction, compte tenu de l'influence de facteurs tels que : [13]

- Forme de la pièce, de sa masse et les caractéristiques mécaniques du métal
- Bridage et l'existence de tensions internes.
- Possibilités de répartition des déformations à travers la structure.
- Conception de la construction soudée et le type de joint.

Ces trois critères de soudabilité constituent une liste non exhaustive à laquelle peuvent s'ajouter des critères concernant : [17]

- La conception et le calcul des constructions soudées.
- Le contrôle en fabrication ou en service des assemblages soudés.
- La conformité à une réglementation ou à un code.

II.3 Les propriétés physiques qui influent sur la soudabilité des aciers inoxydables :

- Un point de fusion inférieur : la température nécessaire pour obtenir la fusion du métal est moins élevée par conséquent, l'énergie nécessaire pour le soudage sera moindre.

- Une conductibilité thermique plus faible : ce facteur accroît encore l'importance de prévoir une moins grande énergie pour le soudage, car une conductibilité thermique.
- Une résistance électrique plus élevée : plus la résistance électrique est élevée, plus le bain de fusion est facile à créer. Par contre, l'amorçage de l'arc est plus difficile.
- Pour toutes ces raisons, la taille de la ZAT d'un acier inox sera de +/- 50% plus importante que celle d'un acier au carbone, dans les mêmes conditions.
- Les fontes blanches ne se soudent pratiquement pas. Les autres fontes (grises, malléables et nodulaires) peuvent être soudées sous certaines conditions. Les fontes nodulaires étant de loin les plus faciles à souder.
- Les alliages d'aluminium sans durcissement structural (Al pur, Al + Mg, Al + Mn, Al + Si) ont une bonne soudabilité (TIG, MIG, plasma) avec métal d'apport compatible.
- Les alliages à durcissement structural (Al + Mg + Si, Al + Cu, Al + Zn + Mg) sont plus difficile à souder (MIG) et nécessitent plus de précautions. [12]

II.4 CARBONE EQUIVALENT DE L'ACIER

Le carbone équivalent (CE) d'un acier (matériau de base ou métal de la soudure) renseigne sur certains aspects de son comportement, notamment en ce qui concerne son aptitude à la trempe et le risque de criquage dû à la présence d'hydrogène. Le CE s'exprime en pourcentage. [11]

L'acier à CE élevé risque davantage de durcir dans les zones thermiquement affectées des soudures réalisées et est plus sujet au criquage dû à la présence d'hydrogène que l'acier à faible CE. [11]

L'aptitude à la trempe joue sur la soudabilité; c'est pourquoi il est plus difficile de réussir le soudage d'acier à CE élevé. [11]

Le CE est influencé par les éléments d'alliage de l'acier. Diverses formules permettent de calculer le CE, la formule utilisée étant déterminée par le type d'acier et les aspects particuliers et importants du comportement. Le CE de l'acier modérément allié, en ce qui concerne son aptitude à la trempe et son risque de criquage dû à l'hydrogène, se calcule souvent grâce à la formule du *International Institute of Welding (IIW)* : [11]

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Cu+Ni}{15} \quad [1]$$

Le carbone et le manganèse ont l'impact le plus important sur la valeur du CE en ce qui concerne les aciers modérément alliés. C'est pourquoi pour des calculs d'ordre général, la formule peut parfois être raccourcie: [11]

$$CE = C + \frac{Mn}{6} \quad [2]$$

II.5 CYCLE THERMIQUE DE SOUDAGE

Lorsque la source de chaleur se déplace le long du bord à souder, le matériau environnant chauffe jusqu'à sa température maximale puis se refroidit à mesure que la source de chaleur s'éloigne.

La loi suivant laquelle la température varie en un point de la pièce, en fonction du temps, porte le nom de « Cycle thermique de soudage ». [19]

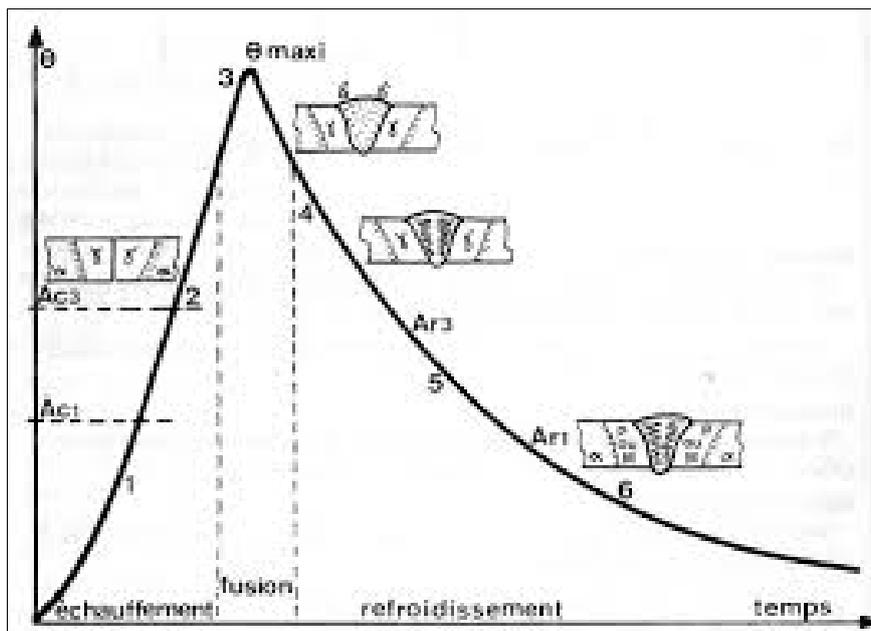


Figure II.2: Cycle thermique de soudage. [19]

- 1-Dilatation Ac_1 : Détensionnement.
- 2- Ac_3 : Austénisation (changement de maille).
- 3-Zone fondue : Fusion et dilution du MA et du MB.
- 4-Solidification Ar_3 : formation de dendrites, retrait, contraintes.

5-Transformation allotropiques Ar1 : Trempe (Martensite), recuit (Perlite).

6-Fin de transformation ; contraintes résiduelles, déformation, rupture.

II.5.1 FACTEURS INFLUENT SUR LE CYCLE THERMIQUE

Les principaux facteurs qui ont une influence sur le cycle thermique sont : [19]

- L'énergie de soudage.
- La forme du joint.
- Le procédé de soudage.
- L'épaisseur de la pièce.
- La température de préchauffage et la température entre passe.

II.6 ZONE AFFECTÉE THERMIQUEMENT

Lors du soudage par fusion, sous l'action d'une source de chaleur à haute température, la zone proche des deux côtés de la soudure où la structure et les propriétés changent dans une certaine plage est appelée «zone proche de la soudure». Le joint soudé se compose principalement de deux parties : la soudure et la zone affectée thermiquement (ZAT). [20]

Il existe une zone de transition entre les deux, appelée zone de fusion. Par conséquent, afin de garantir la qualité du joint soudé, la structure et les performances de la soudure et la zone affectée thermiquement doivent être améliorées. Répondre aux exigences en même temps avec l'utilisation continue de divers aciers à haute résistance, d'aciers inoxydables, d'aciers résistants à la chaleur et de matériaux spéciaux dans la production, les domaines problématiques du soudage thermique sont devenus plus complexes et deviennent les zones faibles des joints soudés. [20]

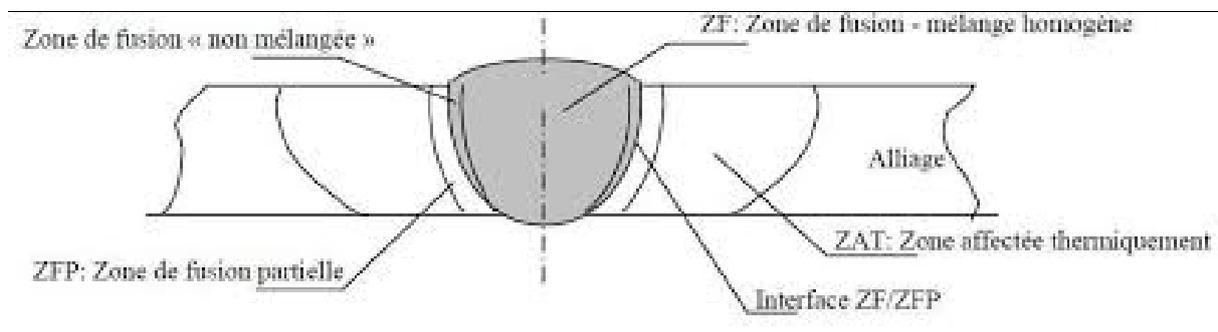


Figure II.3: Différentes zones d'une pièce à souder. [20]

II.6.1 DISTRIBUTION DES TISSUS

Selon les caractéristiques de traitement thermique de l'acier, l'acier pour le soudage est divisé en deux catégories, comme l'acier à faible teneur en carbone et un acier à faible alliage, qui est appelé acier à relâchement dur; L'autre est la tendance du durcissement. Les catégories en acier plus grandes, telles que l'acier moyen en carbone, l'acier allié à faible et moyen en carbone, en alliage, etc., sont appelés acier facilement éteint. En raison de la tendance différente de l'extinction, la structure de la zone affectée par la chaleur de soudage des deux types d'aciers est également différente. [20]

Aux abords immédiats de la zone fondue, le métal subit les effets du cycle thermique de soudage qui provoque des transformations liées à la température maximale atteinte et aux conditions de refroidissement du joint soudé. [19]

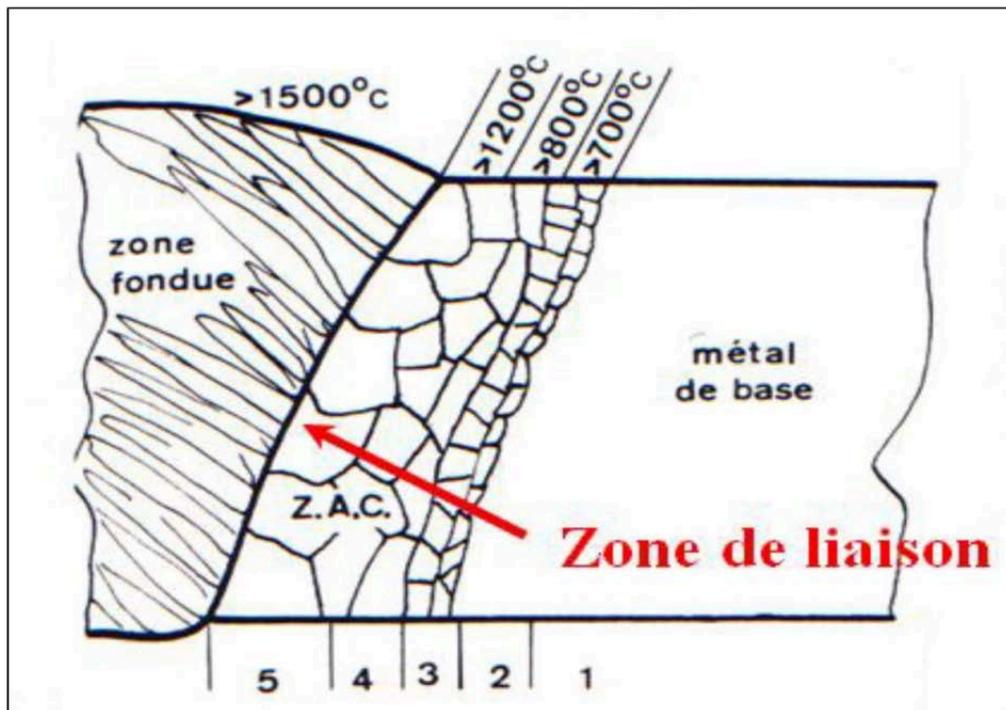


Figure II.4: Différentes régions de la ZAT et microstructures au voisinage de la zone fondue.[19]

1 et 2 Métal de base : La température peu élevée ou ambiante, aucune transformation

3, 4 et 5 : Le grain grossit jusqu'à l'approche du bain de fusion, c'est la ZAT.

C'est dans cette région que les risques de fissure à froid peuvent naître, ainsi que les modifications des caractéristiques mécaniques du métal. [19]

II.6.2 PERFORMANCE DE LA ZONE AFFECTÉE THERMIQUEMENT

La distribution de microstructure de la zone de soudage affectée par la chaleur n'est pas uniforme, et donc les performances sont également non uniformes. La zone de soudage touchée par la chaleur est différente de la couture de soudage, et la couture de soudage peut répondre aux exigences de performance en ajustant la composition chimique et en correspondant au processus de soudage approprié. Les performances de la zone touchée par la chaleur ne peuvent pas être ajustées en composition, et c'est un problème de non-uniformité qui se produit sous l'action des cycles thermiques de soudage. Pour les structures soudées générales, le durcissement, la fragilisation, le durcissement et le ramollissement de la zone touchée par la chaleur, ainsi que les propriétés mécaniques complètes, la résistance à la corrosion et les propriétés de fatigue sont principalement considérées, qui sont déterminées en fonction des exigences d'utilisation spécifiques de la structure soudée. [20]

II.6.3 TRANSFORMATION DE LA ZAT LORS DU CHAUFFAGE :

Au sens strict, la nature rapide du cycle thermique de soudage ne permet pas d'utiliser des diagrammes d'équilibre pour prédire la nature exacte des différentes phases à proximité de la ligne de fusion. Cependant, à partir de ce type de schéma nous pouvons expliquer qualitativement les changements microstructuraux (voir figure II.5). [20]

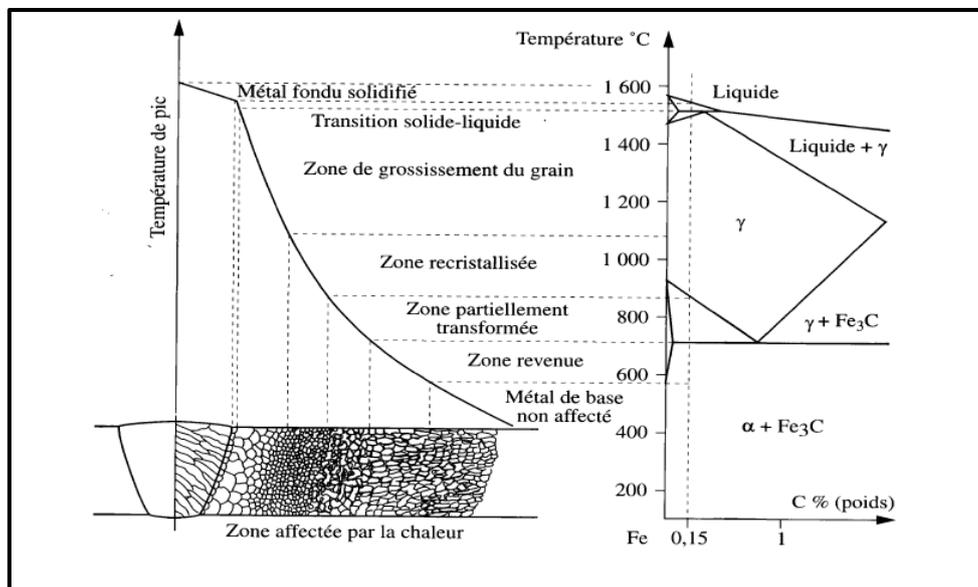


Figure II.5: Les changements microstructuraux de la ZAT lors de chauffage. [20]

En se rapprochant de la zone fondue, nous trouverons successivement les zones suivantes :
[20]

- Le métal de base n'ayant pas subi de transformation de phase au chauffage.
- Une zone critique, où l'on ne constate pas encore de changement de phase. Certains phénomènes tels que revenu, globalisation, recristallisation, vieillissement, etc., peuvent éventuellement intervenir.
- Une zone de transformation partielle.
- A partir de la température A3 et jusqu'à 1495 °C environ, la transformation en austénite est totale. La nouvelle structure ainsi formée remplace et «efface» toute trace de la structure antérieure. C'est au sein de cette zone qu'intervient un grossissement du grain, la plus susceptible de causer certains problèmes métallurgiques
- Une zone portée partiellement à l'état liquide, où coexistent une phase ferritique solide (δ) et une phase liquide.

Enfin le métal fondu a souvent une composition différente de celle du métal de base.

II.7 PRÉCHAUFFAGE

II.7.1 DÉFINITION

Le préchauffage, tel que défini dans les termes et définitions de soudage standard d'AWS, est « la chaleur appliquée au métal de base ou au substrat pour atteindre une température donnée et la maintenir avant l'opération de soudage ». [14]

Le préchauffage consiste à appliquer de la chaleur à un joint juste avant le soudage.

II.7.2 INFLUENCE DE LA TEMPÉRATURE

Pour obtenir des résultats supérieurs, il est essentiel que le chauffage soit uniforme autour de la zone d'assemblage. Un chauffage intense et non uniforme est peu utile pour retarder le refroidissement et peut être préjudiciable en provoquant des contraintes résiduelles plus élevées, une distorsion ou des changements métallurgiques indésirables dans le matériau de base. [14]

Lorsqu'un préchauffage est spécifié, l'ensemble de l'assemblage soudé doit être chauffé uniformément sur toute l'épaisseur du matériau jusqu'à la température minimale souhaitée.

Pour obtenir une température uniforme sur toute l'épaisseur du matériau, il est souhaitable d'appliquer les sources de chauffage sur un côté de la surface du matériau et de mesurer la température du matériau sur le côté opposé. [14]

Chaque fois que le chauffage et la mesure de la température doivent être effectués sur la même surface, l'inspecteur doit veiller à étendre le chauffage au-delà de cette surface. Il est important de s'assurer que toute l'épaisseur du matériau a été chauffée à une température uniforme. [14]

En fonction des propriétés métallurgiques du matériau et/ou des propriétés mécaniques souhaitées du composant soudé, la température de préchauffage et entre passes peut être évaluée pour diverses raisons. Par exemple, une procédure de soudage d'acier doux, ayant une faible teneur en carbone, une trempabilité relativement faible, et qui est utilisée dans une application sans exigences de service particulières, peut utiliser une température minimale de préchauffage et entre passes basée sur l'épaisseur du matériau. [14]

Dans les applications critiques, la température de préchauffage doit être contrôlée avec précision. Dans ces situations, des systèmes de chauffage contrôlables sont utilisés et des thermocouples sont fixés pour surveiller la pièce chauffée. Ces thermocouples fournissent un signal à l'unité de contrôle qui peut réguler la source d'énergie nécessaire au chauffage. À l'aide de ce type d'équipement, la pièce chauffée peut être contrôlée avec des tolérances extrêmement étroites. [14]

Les températures de préchauffage pour les soudures sur du tube en acier sont généralement déterminées selon: [11]

- Le C_{eq} du matériau.
- L'épaisseur du matériau.
- L'énergie de l'arc (en kJ/mm).

II.7.3 PARAMÈTRES DU TEMPÉRATURE DE PRÉCHAUFFAGE

La température de préchauffage dépend de plusieurs paramètres dont:[12]

- La présence de certains éléments d'alliages en plus du carbone
- L'épaisseur des pièces à souder
- Le type d'acier

- Le procédé de soudage
- Le traitement thermique éventuel
- Le produit d'apport

II.8 RELATION ENTRE LE COEFFICIENT DE SOUDABILITÉ ET LE PRÉCHAUFFAGE

Le préchauffage a une relation forte avec le coefficient de soudabilité, c'est pourquoi il faut le déterminer pour les aciers, en fonction de leur teneur en carbone. Ce coefficient sera nommé **S** et variera de **0 à 10**. [12]

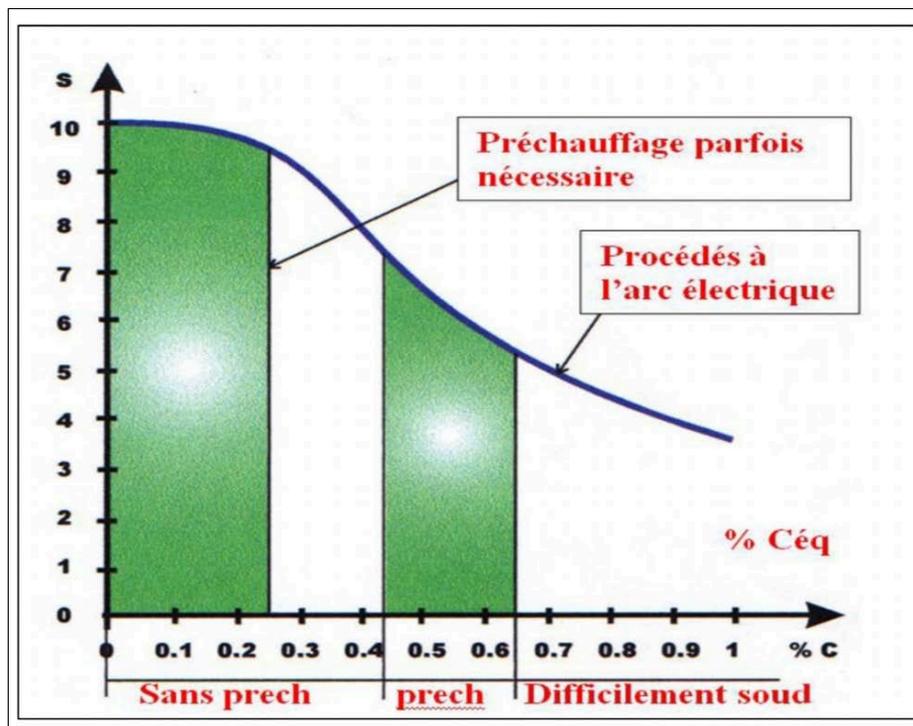


Figure II.6: Variation de la soudabilité en fonction du carbone. [12]

Les aciers au carbone et faiblement alliés seront dits : [12]

- **Parfaitement soudables** : si la teneur en C varie de **0 à 0,25%**. S sera **9 ou 10**. (Nota: Si les épaisseurs sont fortes, en revanche, un préchauffage peut être envisagé.)
- **Moyennement soudables** : si la teneur en C varie de **0,25 à 0,45%**. S sera de **7 à 9**.
- **Soudable avec préchauffage** : si la teneur en C varie de **0,45 à 0,65%**. S sera de **5 à 7**.
- **Difficilement soudables** : si la teneur en C est supérieur à **0,65%**. S sera de **0 à 5**.

Acier au carbone et faiblement allié				
Soudable				
	Parfaitement	Moyennement	Avec préchauffage	Difficile
%C	0 à 0,25	0,25 à 0,45	0,45 à 0,65	> 0,65
	9 à 10	7 à 9	5 à 7	0 à 5
S	Sans préchauffage		Avec préchauffage	Préchauffage indispensable

Figure II.7: Préchauffage et le pourcentage de carbone. [12]

II.9 DÉTERMINATION DU TEMPÉRATURE DE PRÉCHAUFFAGE

Il existe plusieurs méthodes pour évaluer les températures de préchauffage avant soudage. Ceci dépend notamment des nuances d'aciers et des procédés à mettre en œuvre. Nous pouvons citer deux méthodes les plus utilisées : [12]

II.9.1 Méthode de Séférian :

C'est une méthode qui permet d'estimer la nécessité du préchauffage et sa température. Elle consiste pour un acier donné, à déterminer la température de préchauffage des pièces à souder, de manière à éviter un refroidissement trop rapide du joint qui conduirait à la formation d'une structure fragile (martensite) dans la zone affectée thermiquement.

Les étapes de cette méthode : Elle s'effectue en 3 étapes: [12]

1. Calcul du carbone équivalent (Ceq).
2. Calcul du carbone équivalent compensé (Ceq.C).
3. Calcul de la température de préchauffage.

CARBONE ÉQUIVALENT : EXPRESSION DE SEFERIAN

Il est déterminé selon la relation suivante : [19]

$$Ceq = C + \frac{Mn+Cr}{9} + \frac{Ni}{18} + \frac{7Mo}{90} \text{ (en fonction du pourcentage \%)} \quad [3]$$

Si $Ceq \leq 0,4$: l'acier est parfaitement soudable à température ambiante.

Si $0,45 \leq C_{eq} \leq 0,7$: l'acier est moyennement soudable, un préchauffage de 100 à 400 °C sera nécessaire. La température exacte sera déterminée plus bas. On est confronté à un risque de fissuration à froid.

Si $C_{eq} > 0,7$: l'acier est difficilement soudable, nécessite le préchauffage, électrodes spéciales, traitements thermiques...

CARBONE ÉQUIVALENT COMPENSÉ

Ensuite, on calcule le carbone équivalent compensé qui prend en compte les épaisseurs des pièces à souder (en mm) ainsi que du carbone équivalent. [19]

$$\text{Formule : } C_{eq.C} = C_{eq} \times (1 + 0.005 \times e) \quad [4]$$

Si $C_{eq.C} \leq 0.45$ Il n'y a pas de risque de trempe.

TEMPÉRATURE DE PRÉCHAUFFAGE

Il existe deux méthodes peuvent être utilisées pour déterminer la température de préchauffage. [19]

- ❖ Par calcul.
- ❖ Directement d'après un graphe.

Par calcul :

Elle est calculée en fonction du $C_{eq.C}$ par l'expression suivante :

$$T_p = 350 \sqrt{(C_{eq.C} - 0.25)} \quad [5]$$

Par graphe :

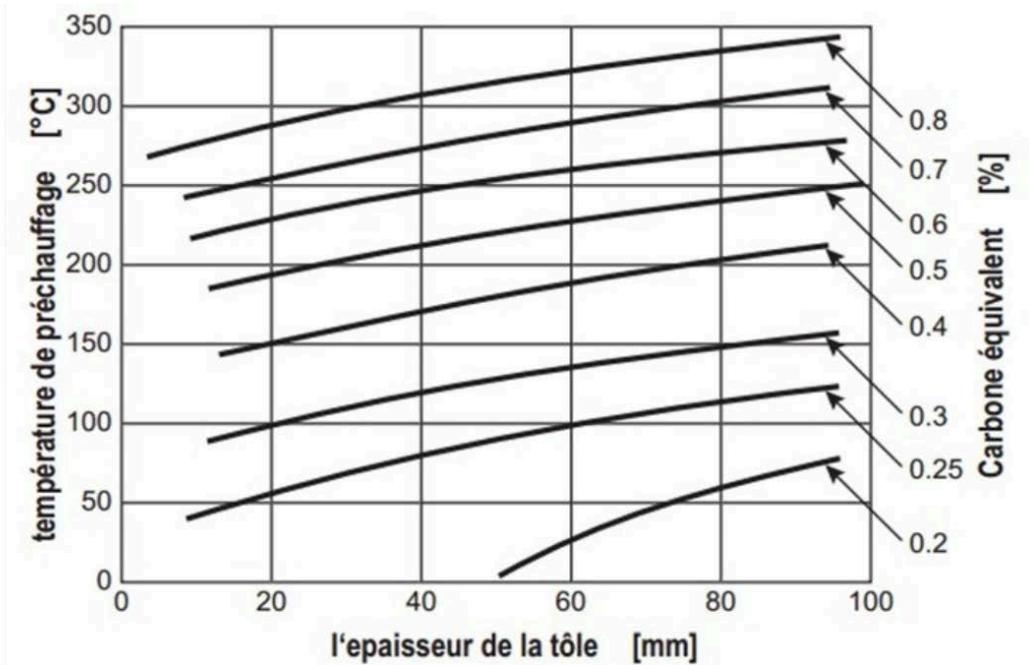


Figure II.8: Diagramme de Séférian. [19]

II.9.2 Méthode BWRA: British Welding Research Association

Cette méthode est adaptée au soudage à l'électrode enrobée. Elle consiste à calculer la température de préchauffage des pièces en tenant compte des paramètres suivants :

1. Indice de sévérité thermique.
2. Indice de soudabilité.
3. Diamètre des électrodes.

INDICE DE SÉVÉRITÉ THERMIQUE

Il caractérise la géométrie et l'épaisseur, l'indice TSN (*Thermic Severity Number*) est obtenu en divisant la somme des épaisseurs à souder (en mm) par 6 .

$$TSN = \frac{\Sigma \text{ épaisseurs}}{6} \quad [6]$$

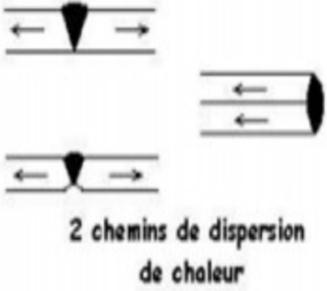
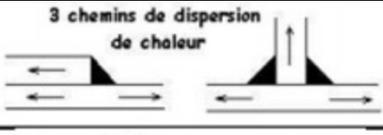
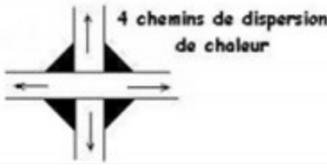
Remarque : La somme des épaisseurs est en fonction du nombre de chemins de dispersion de la chaleur lors du soudage.

Par exemple : soudage en T sur épaisseur de 6mm , nous avons trois chemins de dispersion , donc :

$$TSN = \frac{6+6+6}{6} \quad \longrightarrow \quad TSN = 3$$

Le tableau ci-dessous donne les valeurs de l'indice TSN pour les types d'assemblage les plus courants.

Tableau II. 1 : Indices de Sévérité Thermique.[19]

Type de joint	Epaisseur des tôles en mm	TSN
 <p>2 chemins de dispersion de chaleur</p>	6 et 6	2
	6 et 12	3
	6 et 18	4
	12 et 12	4
	24 et 24	8
	24 et 48	12
 <p>3 chemins de dispersion de chaleur</p>	6 et 6	3
	12 et 12	6
	24 et 24	12
 <p>4 chemins de dispersion de chaleur</p>	6 et 6	4
	12 et 12	8
	24 et 24	16
	6-12-12-12	7

INDICE DE SOUDABILITÉ

Il est fonction du pourcentage en Ceq de l'acier à souder, ainsi que de la nature des électrodes utilisées. [19]

Le pourcentage du Ceq de l'acier est calculé grâce à la formule:

$$[C] = C + \frac{Mn}{20} + \frac{Ni}{15} + \frac{Cr+Mo+V}{10} \quad [7]$$

Tableau II. 2: Indice de soudabilité. [19]

Electrodes rutilés	Electrodes basiques	Indice de soudabilité
[C] jusqu'à 0,20%	[C] jusqu'à 0,25%	A
De 0,21 à 0,23%	De 0,26 à 0,30%	B
De 0,24 à 0,27%	De 0,31 à 0,35%	C
De 0,28 à 0,32%	De 0,36 à 0,40%	D
De 0,33 à 0,38%	De 0,41 à 0,45%	E
De 0,39 à 0,45%	De 0,46 à 0,50%	F
> 0,45%	> 0,50%	G

DIAMÈTRE DES ÉLECTRODES :

La quantité de chaleur transmise au joint étant liée au diamètre des électrodes utilisées, donc on prend en compte ce paramètre pour le calcul de T_p .

Le diamètre de l'électrode influe sur l'épaisseur de la passe donc du cordon.

Tableau II. 3: Température de préchauffage.[19]

Indice de TSN	Indice de soudabilité	Température minimum à laquelle doit être effectuée la soudure				
		Diamètre des électrodes en mm				
		3,2	4	5	6	8
		(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)
T.S.N 2	D	0	-	-	-	-
	E	50	0	-	-	-
	F	125	25	-	-	-
T.S.N 3	C	0	-	-	-	-
	D	75	0	-	-	-

	E	100	25	0	-	-
	F	150	100	25	-	-
T.S.N 4	C	50	-	-	-	-
	D	100	25	-	-	-
	E	125	75	0	-	-
	F	175	125	75	0	-
T.S.N 6	B	50	-	-	-	-
	C	100	25	-	-	-
	D	125	100	25	-	-
	E	175	125	75	0	-
	F	225	175	225	75	0
T.S.N 8	A	25	-	-	-	-
	B	75	25	-	-	-
	C	125	75	25	-	-
	D	175	125	75	0	-
	E	200	175	125	50	25
	F	225	200	175	125	50
T.S.N 12	A	75	25	-	-	-
	B	125	75	25	-	-
	C	150	125	75	0	-
	D	200	175	125	75	0
	E	225	200	175	100	50
	F	250	225	200	150	125
T.S.N 16	A	75	25	0	-	-
	B	125	75	50	0	-
	C	150	150	125	50	25

	D	200	175	175	125	50
	E	225	200	200	155	100
	F	250	250	225	200	200
T.S.N 24	A	75	25	0	-	-
	B	125	75	50	25	-
	C	150	150	125	75	25
	D	200	175	175	125	100
	E	225	200	200	175	150
	F	250	250	250	200	150

II.10 TECHNIQUES DE PRÉCHAUFFAGE

Le préchauffage peut être effectué à l'aide de : **[15]**

- Chauffage par induction.
- Brûleurs à gaz (chalumeau).
- Flammes à oxy-combustion.
- Couvertures chauffantes.
- Chauffage dans un four.

II.10.1 CHAUFFAGE PAR INDUCTION

Est un procédé utilisé dans le soudage des oléoducs et des gazoducs pour aider à assurer la qualité et la longévité de la soudure. Cette méthode de préchauffage utilise des ondes électromagnétiques pour chauffer le métal avant le soudage. Le cœur du système de préchauffage par induction est une bobine d'induction enroulée autour du tuyau à souder. La bobine crée un champ magnétique qui induit un courant électrique dans le métal, générant de la chaleur. **[15]**

Cette chaleur est ensuite répartie uniformément dans tout le métal, ce qui permet d'éviter les chocs thermiques pendant le processus de soudage. Ceci est important car un choc thermique peut provoquer la fissuration du métal, ce qui peut entraîner des fuites dans la canalisation. Le préchauffage par induction contribue également à réduire le risque de fissuration par l'hydrogène, qui peut se produire lors du soudage à basse température. **[15]**

En utilisant le préchauffage par induction, le soudeur peut s'assurer que le métal est à la bonne température pour le soudage, ce qui contribue à produire une soudure solide et fiable. Dans l'ensemble, le préchauffage par induction est une étape essentielle du processus de soudage des oléoducs et des gazoducs, et il contribue à assurer la sécurité et la fiabilité des pipelines pour les années à venir. [15]



Figure II.9 : Préchauffage par induction. [15]

II.10.1.1 CHOIX D'UN PRÉCHAUFFAGE PAR INDUCTION

Lors du choix de l'équipement de préchauffage par induction approprié, tenez principalement compte des aspects suivants : [15]

La forme et la taille de la pièce chauffée: Grande pièce, matériau de barre, matériau solide, puissance relative sélectionnée, équipement de chauffage par induction à basse fréquence. Si la pièce est petite, tuyau, plaque, engrenage, etc., l'équipement de préchauffage par induction à faible puissance relative et haute fréquence doit être sélectionné.

La profondeur et la zone à chauffer : profondeur de chauffage profonde, grande surface, chauffage global, devrait choisir un équipement de chauffage par induction à grande puissance et basse fréquence.

Profondeur de chauffage peu profonde, petite surface, chauffage local, sélection d'une puissance relativement faible, équipement de préchauffage par induction à haute fréquence.

La vitesse de chauffage requise : si la vitesse de chauffage est rapide, l'équipement de chauffage par induction avec une puissance relativement importante et une fréquence relativement élevée doit être sélectionné.

Temps de travail continu de l'équipement : Le temps de travail continu est long, sélectionnez relativement un équipement de préchauffage par induction légèrement plus grand.

Distance entre la tête de chauffage par induction et la machine à induction: Une connexion longue, même l'utilisation d'une connexion par câble refroidie à l'eau, doit être une machine de préchauffage par induction de puissance relativement importante.

II.10.1.2 AVANTAGES DU PRÉCHAUFFAGE PAR INDUCTION [15]

Le préchauffage par induction est un processus crucial pour les oléoducs et les gazoducs qui sont soudés ensemble.

Le processus implique l'utilisation de l'induction électromagnétique pour chauffer le pipeline avant le début du processus de soudage.

Ce processus est particulièrement important car il aide à prévenir une série de problèmes qui peuvent survenir pendant le processus de soudage. L'un des avantages les plus importants de cette méthode est qu'il aide à prévenir le gauchissement et la distorsion de la canalisation.

En effet, la chaleur est répartie plus uniformément dans le pipeline, ce qui aide à empêcher le métal de se dilater ou de se contracter excessivement.

Il permet également de réduire le risque de fissuration, qui peut survenir lorsque le métal est exposé à des températures élevées puis refroidit trop rapidement. Enfin, le préchauffage par induction permet de créer une soudure plus homogène et fiable. La chaleur est répartie uniformément, ce qui contribue à garantir que la soudure est solide et sûre. [15]

II.10.2 FONCTIONALITÉS DE LA COUVERTURE CHAUFFANTE [15]

- Refroidissement par air: fonctionne bien à -10 °C -40 °C.
- Puissance de chauffage par induction: pour chauffer le travail avec une couverture isolante autour. Vitesse de chauffage et efficacité de chauffage élevé avec peu d'énergie perdue.
- Écran tactile PLC: intuitif à voir et facile à utiliser.

- Bobine d'induction douce: facile à enrouler sur différentes pièces.
- La bobine d'induction à ouverture amovible: facile à utiliser et à déplacer.
- Enregistreur de température: enregistrez toute la courbe de chauffe.
- Régulateur de température: Chauffage selon les détails des besoins en chauffage avec une tolérance de $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Figure II.10: Machine d'alimentation de la couverture chauffante. [15]



Figure II.11: Application de la couverture chauffante. [15]

II.10.3 Flamme oxy-combustion :

Un procédé d'oxy-combustion est où l'on utilise directement du dioxygène (O_2) comme comburant plutôt que simplement de l'air. En excluant l'azote de la combustion, la température de flamme augmente significativement et on limite la quantité de fumée générée.

[15]

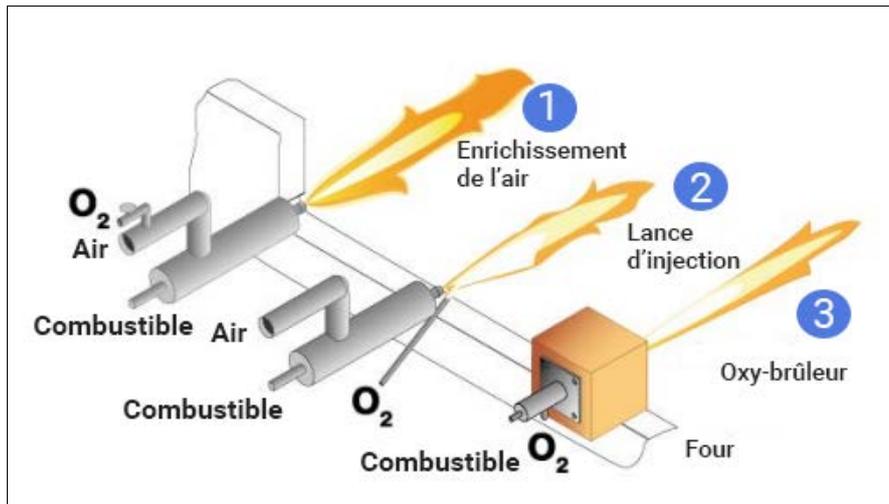


Figure II.12: Équipement de la flamme oxy-combustion. [15]

Atteignant 3100°C , la flamme oxyacétylénique permet de chauffer ou de porter au point de fusion (température de flamme) rapidement. Cela vous donnera l'avantage de gagner au moins 20 % de temps par rapport aux autres flammes. Ces gaz sont particulièrement adaptés pour du soudage autogène.

Trois fois plus puissante que des combustibles courants (propane...), la flamme permet de chauffer une zone bien délimitée en échauffant le moins possible le reste de la pièce. Les procédés flamme permettent des opérations de soudage ou de brasage sur des tubes de plus de 20 mm, sans difficultés ni déformation. Le résultat de ces procédés sont des soudures et des brasures de qualité. [21]

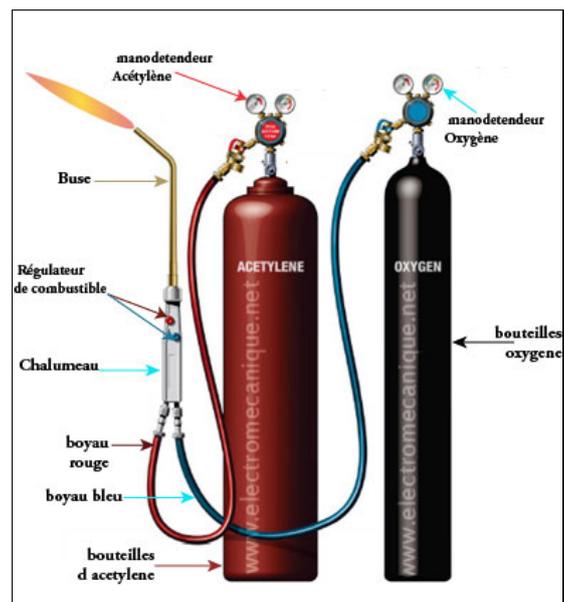


Figure II.13: Équipement de préchauffage oxy-acétylénique. [15]

II.11 ROLE DE PRÉCHAUFFAGE :

Les principales raisons justifiant le préchauffage sont les suivantes : [14]

a) Pour évacuer l'humidité de la zone de soudure : généralement, ceci est réalisé en chauffant la surface du matériau à une température relativement basse, juste au-dessus du point d'ébullition de l'eau. Cela assèche la surface de la plaque et élimine les contaminants indésirables pouvant autrement provoquer une porosité, une fragilisation par hydrogène ou une fissuration par introduction d'hydrogène pendant le procédé de soudage.

b) Pour diminuer le gradient thermique : tous les procédés de soudage à l'arc utilisent une source de chaleur à haute température. Une forte différence de température se produit entre la source de chaleur localisée et le matériau de base froid à souder. Cette différence de température provoque une dilatation et une contraction thermiques différentielles, ainsi que des contraintes élevées autour de la zone soudée. La réduction du différentiel de température par le préchauffage du matériau de base minimise les problèmes associés à la distorsion et aux contraintes résiduelles excessives. Si un préchauffage n'est pas effectué, une grande différence de température peut être présente entre la zone de soudure et le matériau de base. Cela peut provoquer un refroidissement rapide, entraînant la formation de martensite et une fissuration probable lors du soudage de certains matériaux à haute trempabilité. [14]

Il est parfois nécessaire de préchauffer pour éviter la formation d'une structure très dure dans la ZAT (Zone Affectée Thermiquement). Ce durcissement est dû à l'influence du carbone et de certains éléments d'alliage. Le durcissement est d'autant plus dur que le refroidissement est rapide. [12]

Donc, plus la zone de soudage est importante et chaude, plus ce durcissement sera grand. On préchauffe alors pour limiter les écarts de températures et on gère le refroidissement de manière à le rendre plus long dans le temps. Ainsi, on limite les risques de durcissement et de fissurations. Plus la température de préchauffage sera élevée, plus la vitesse de refroidissement devra être lente. [12]

II.12 AVANTAGES DE PRÉCHAUFFAGE

Le préchauffage comporte de nombreux avantages : [14]

- le préchauffage ralentit et abaisse la vitesse de refroidissement du métal de soudure et métal de base, ce qui diminue la dureté et donne plus de temps à l'hydrogène pour se diffuser.
- le préchauffage élimine l'humidité et certaines autres sources d'hydrogène dans la région de la préparation du joint.
- le préchauffage réduit les risques de défauts de fusion provoqués par la rapidité de la prise du métal de la soudure en fusion.
- le préchauffage aide à uniformiser la répartition des contraintes entre la soudure et le matériau de base.

II.13 MÉCANISME DE CRIQUAGE :

L'hydrogène - provenant de l'humidité l'atmosphère ou de l'humidité dans le flux de l'électrode- entre dans une soudure par l'arc de soudage. L'énergie thermique élevée de l'arc suffit largement pour décomposer les composés de l'hydrogène (ou hydrogène moléculaire (H_2) dans leur forme atomique (H)). L'hydrogène est hautement soluble dans l'acier en fusion. C'est donc là que l'on retrouve l'hydrogène lorsque le métal est à l'état liquide. A mesure que le métal se solidifie et se refroidit, l'hydrogène se diffuse, au début à un rythme lent par la région austénitique puis à un rythme plus élevé dans la région ferritique. En dessous de $200^\circ C$ environ, les inclusions de carbures et non-métalliques commencent à piéger l'hydrogène dans le métal. [14]

L'élément de l'hydrogène est un élément diatomique et préfère ainsi être dans sa forme moléculaire (H_2). Si de nombreuses molécules d'hydrogène sont piégées, une grande pression est exercée, ce qui ne donne qu'une alternative à la microstructure adjacente : soit elle se déforme du point de vue de sa plasticité pour réduire la pression, soit elle se rompt (criquage) pour réduire la pression.

Les criques associées à l'hydrogène qui sont provoquées par le soudage et sont plus susceptibles de se produire dans la zone thermiquement affectée, étant donné que cette région a une résistance inférieure aux entailles à celle de la soudure ou du matériau de base. [14]

II.14 POST-CHAUFFAGE

II.14.1 DÉFINITION

Le post-chauffage (généralement 200 à 300°C) est effectué immédiatement après le soudage pour éliminer l'hydrogène gazeux du soudage et pour éviter la fissuration à froid. En fait, la diffusion de l'hydrogène est une fonction exponentielle de la température. En règle générale, avec les aciers au chrome-molybdène, le soudage est effectué immédiatement (ou à la fin du quart de travail si la soudure n'est pas terminée) avant tout travail sur la soudure pour éviter toute contrainte susceptible de provoquer des fissures. [22]

Lors de l'utilisation d'aciers à haute résistance, le post-chauffage joue un rôle décisif pour maintenir les propriétés du matériau après le soudage. [22]



Figure II.14: Équipement de post chauffage. [22]

II.14.2 DESCRIPTION DE POST CHAUFFAGE :

Le post-chauffage fait référence au maintien du préchauffage une fois la soudure terminée, pour permettre des taux accrus de dégagement d'hydrogène de la soudure. La température de post-chauffage peut être identique ou supérieure à la température de préchauffage d'origine spécifiée. Le post-chauffage est différent du traitement thermique après soudage. [23]

Le post-chauffage n'est généralement pas obligatoire dans les normes, mais peut être spécifié par les clients. Il existe certaines indications (température approximative et durée requise) dans les normes, mais elles ne sont pas spécifiques et des conseils supplémentaires peuvent

s'avérer nécessaires. Une exigence de post-chauffage dans une procédure de soudage implique généralement la nécessité d'un préchauffage.

Le post-chauffage nécessite un contrôle total du temps et de la température pour être efficace dans l'élimination de l'hydrogène de la soudure, et les techniques contrôlées incorporant des thermocouples sont préférables. Il est préférable d'éviter les méthodes non contrôlées telles que les torches à flamme portatives surveillées par des crayons indicateurs de température. [23]

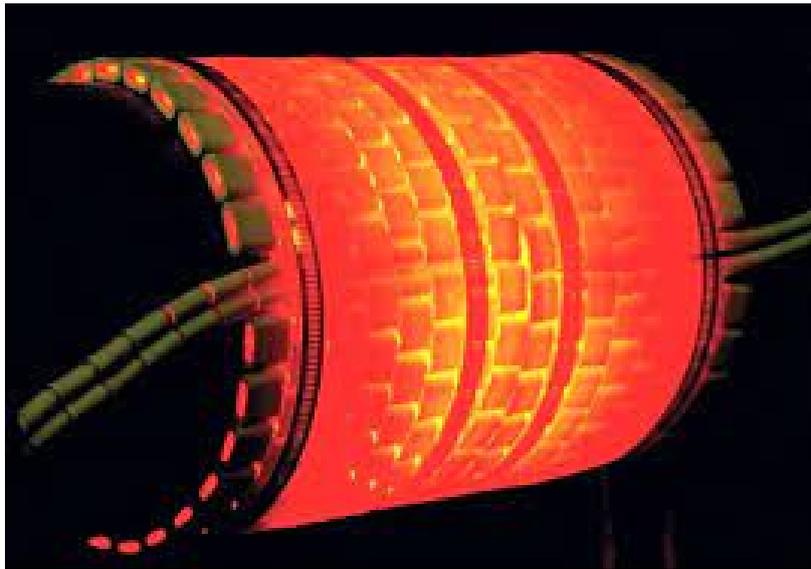


Figure II.15: Température de post-chauffage. [23]

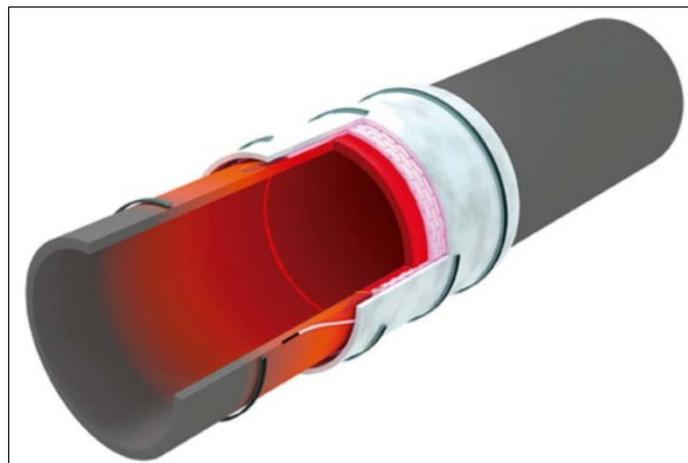


Figure II.16 : Intérieure du tube pendant le post-chauffage. [23]

II.14.3 Post-chauffage à l'aide d'un chalumeau

Si une pièce est préchauffée avant le soudage, elle doit souvent être post-chauffée. Cette opération est effectuée immédiatement après le soudage, souvent avec un chalumeau. La zone autour du cordon de soudure est alors chauffée afin d'éliminer les tensions résiduelles et l'hydrogène diffusible. Ensuite, on procède souvent à un processus de refroidissement régulé qui empêche efficacement la formation de fissures à froid. [23]

II.14.4 Post-chauffage à l'acétylène

L'acétylène s'est révélé être le gaz combustible idéal pour le post-chauffage. Les propriétés de la flamme permettent un chauffage très rapide et précis, un gain de temps considérable étant réalisable. Les brûleurs à gaz de Linde utilisent les propriétés physiques et chimiques supérieures qu'offre l'acétylène comme gaz combustible. [23]

II.15 TRAITEMENT THERMIQUE APRÈS SOUDAGE

Différents types de traitements thermiques après soudage sont utilisés pour diverses raisons et divers matériaux : [14]

a) Relaxation des contraintes : un traitement thermique après soudage est le plus généralement utilisé pour la relaxation des contraintes. L'objectif de la relaxation des contraintes est d'éliminer toutes les contraintes internes ou résiduelles qui peuvent être présentes lors de l'opération de soudage. La relaxation des contraintes après soudage peut être nécessaire pour réduire le risque de brisure franche, éviter une déformation ultérieure lors de l'usinage ou éliminer le risque de corrosion sous contrainte.

b) Obtenir une structure métallurgique appropriée : Pour certains aciers alliés, un traitement de trempe thermique peut être nécessaire pour obtenir une structure métallurgique adaptée. Ce traitement est effectué après le refroidissement de la soudure, mais dans certaines circonstances, il peut être nécessaire de l'effectuer avant le refroidissement pour éviter la fissuration.

c) Normalisation après soudage : Les structures de soudure extrêmement grossières en acier, telles que celles obtenues avec le procédé de soudage sous laitier électrolytique, peuvent nécessiter une normalisation après soudage. Ce traitement affine la structure à gros grains,

réduit les contraintes après soudage et élimine les zones dures dans la zone thermiquement affectée.

d) Retrouver les propriétés d'origine : Les alliages à durcissement par précipitation, tels que les alliages d'aluminium pouvant être traités thermiquement, doivent parfois subir un traitement thermique après soudage pour retrouver leurs propriétés d'origine. Dans certains cas, seul un traitement de vieillissement est utilisé, bien qu'un traitement thermique en solution complète et un traitement de vieillissement artificiel permettent une meilleure récupération des propriétés après soudage.

Lorsque les opérations de soudage impliquent un préchauffage et/ou un traitement thermique après soudage, il est important que l'inspecteur du soudage comprenne ces exigences pour s'assurer qu'elles sont correctement respectées, conformément aux exigences du mode opératoire de soudage et/ou aux exigences du code. [14]

II.16 FISSURATION A CHAUD

La fissuration à chaud se forme à très haute température lors du refroidissement du bain de fusion. La solidification de la soudure se fait par la formation de cristaux portant de la zone de liaison vers le centre et la surface de la soudure.

Durant cette solidification il y a des contractions importantes (dues au retrait) qui tendent à séparer les cristaux. Le phénomène plus important dans le cas où la soudure n'est pas suffisamment lisse. Lorsqu'elle forme des « vagues ». [25]



Figure II.17: Fissuration à chaud longitudinale. [25]

II.16.1 Facteurs qui provoquent la fissuration à chaud

Ce type de défaut peut être dû à : [25]

- La composition chimique du bain.
- La forme du cordon.
- Aux contraintes pendant la solidification du cordon.

II.16.2 Conseils pour éviter la fissuration à chaud [25]

- ✓ Contrôler la composition chimique du bain.
- ✓ Diminuer le taux de dilution.
- ✓ Diminuer le taux de C et de S.
- ✓ Minimiser au maximum Cu.
- ✓ Un préchauffage sur une grande surface peut être favorable.

II.17 INTRODUCTION SUR LA FISSURATION A FROID

Lorsque les conditions de la fissuration à froid sont réunies, ce type de défaut apparaît dans la région soudée, en fin de refroidissement de la soudure (d'où le terme de fissuration à froid) en dessous de 150°C par exemple.

Cette fissuration ne dépend pas du "degré de qualité" d'un acier. Autrement dit, il n'est pas possible de s'en prémunir par le choix d'une nuance de qualité dite supérieure. Chaque acier est plus ou moins sensible à ce type de fissuration en fonction de sa composition chimique. Certains aciers y sont quasiment insensibles, alors que d'autres le sont extrêmement.

Pour éviter la fissuration à froid, nous verrons qu'il est nécessaire d'adapter le mode opératoire de soudage vis à vis de l'acier, du type d'assemblage et du procédé mis en œuvre. [17]

II.17.1 FISSURATION A FROID : (FAF)

La fissuration à froid (FAF) ou fissuration induite par l'hydrogène est un des risques industriels souvent rencontré dans l'opération de soudage sur des aciers peu alliés. On parle de fissuration à froid parce qu'elle se produit à une température inférieure à 200°C durant ou jusqu'à plusieurs jours après le refroidissement. Les fissures à froid présentent certaines autres caractéristiques : [22]

1. Elles peuvent se produire dans la zone affectée thermiquement (ZAT) ou le métal fondu.

2. Elles peuvent être longitudinales ou transversales par rapport à la direction de soudage.
3. La fissuration à froid peut arriver dans un délai de quelques secondes, de quelques minutes, voire de quelques jours. Le délai d'apparition dépend du type d'acier du métal d'apport, de la contrainte résiduelle et de la teneur en hydrogène.

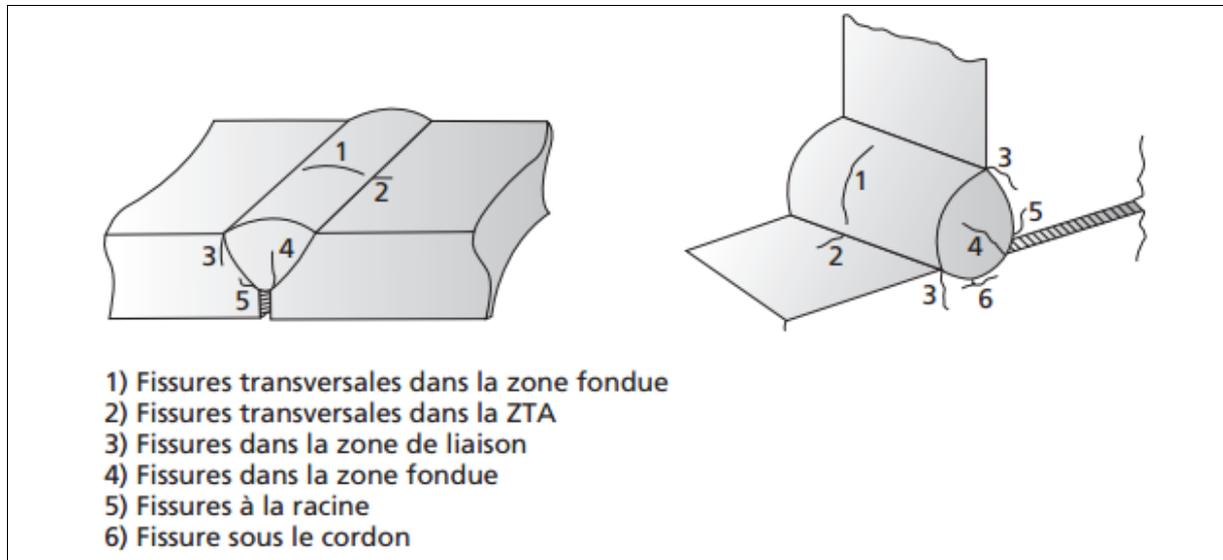


Figure II.18: Types de fissure. [22]

II.17.2 DESCRIPTION DES FISSURES

Les fissures à froid peuvent se localiser en zone affectée thermiquement (ZAT), ou en zone fondue (ZF), qui constitue les régions de l'assemblage où le soudage affecte la structure du métal. Elles peuvent s'orienter dans le sens longitudinal ou transversal par rapport au cordon.

Enfin elles peuvent être débouchantes ou internes, continues ou très locales. Il en résulte que ces défauts sont souvent difficiles à détecter après soudage. [17]

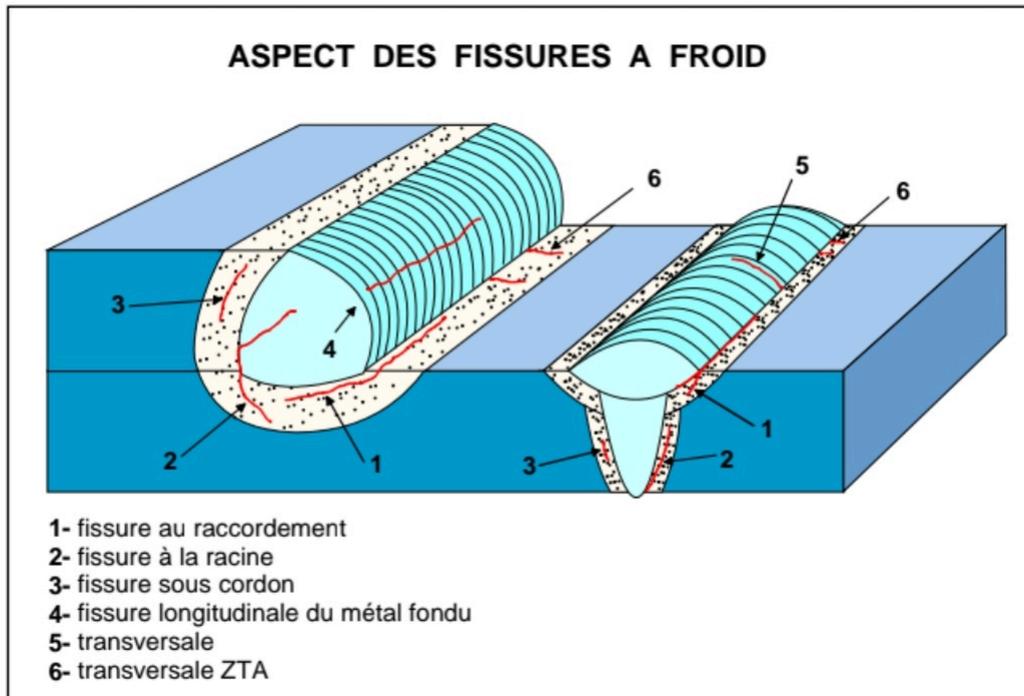


Figure II.19: Aspect des fissures à froid. [17]

II.17.3 FACTEURS DE LA FISSURATION A FROID

La fissuration à froid est la conséquence des effets simultanés de trois facteurs qui doivent intervenir ensembles au cours du soudage, à savoir : [17]

- Des contraintes de soudage.
- De l'hydrogène.
- Une structure fragile (surtout martensitique).

La fissuration à froid ne nécessite pas que chacun de ces facteurs soit individuellement à un niveau minimum. Elle se produit uniquement si la somme des trois facteurs réunis dépasse un seuil critique, et donc d'autant plus facilement que l'intensité des contraintes, la teneur en hydrogène, ou la fragilité de la microstructure sont élevées. [17]

II.17.4 Vitesse de refroidissement :

La composition chimique de l'alliage définit la facilité à obtenir la martensite (Trempe). Mais c'est le cycle thermique qui définit la proportion de martensite transformée dans la ZAT. A haute température, l'acier est en état austénitique. Lorsque la vitesse de refroidissement est extrêmement rapide, la diffusion des atomes de soluté n'a pas le temps de se produire. La ZAT se transforme en martensite comme le montre le graphe de la **Figure II.20** ci-dessous.

Pour les vitesses de refroidissement intermédiaires, la diffusion des atomes de soluté se produit à courte distance. Cela crée de la bainite. Pour les vitesses de refroidissement assez lentes, le déplacement des atomes de soluté est assez important. L'austénite se transforme en perlite. Ms et Mf indiquent respectivement les températures de début et de fin de la transformation martensitique. [17]

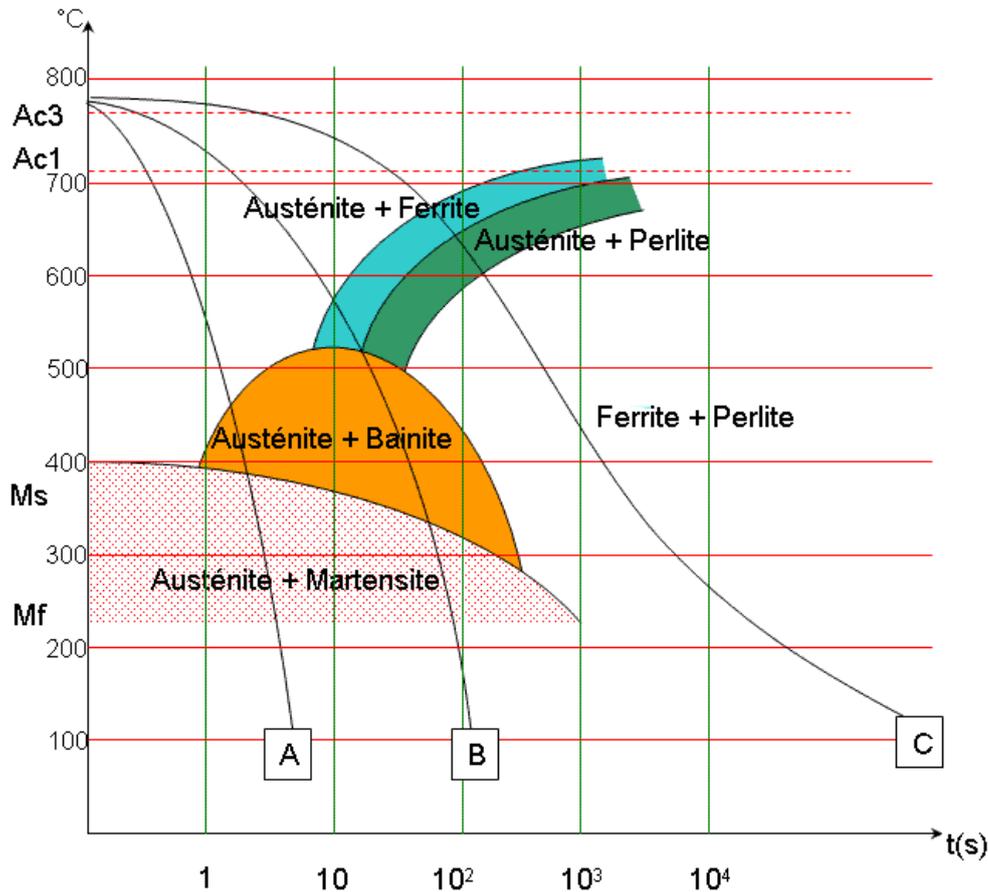


Figure II.20: Vitesse de refroidissement. [17]

II.17.5 PRÉVENTION DE LA FISSURATION A FROID :

Les méthodes de prévention consistent à diminuer au moins un des trois facteurs à l'origine de fissuration à froid. Les améliorations du procédé de fabrication des aciers permettent d'avoir des aciers avec une plus faible teneur en carbone équivalent, par conséquent, la microstructure dans la ZAT est moins sensible à la fissuration à froid, ce qui améliore globalement la soudabilité. [17]

Une méthode efficace de prévention de la fissuration à froid est la réduction de la teneur en hydrogène : soit par application d'un procédé de soudage qui intrinsèquement, introduit moins d'hydrogène ; soit en appliquant un préchauffage ou/et un post-chauffage durant le soudage.

A étudié l'influence des procédés de soudage et a justifié que l'utilisation de paramètres de soudage appropriés peut diminuer considérablement la teneur en hydrogène. Par exemple, pour le soudage à l'arc à l'électrode enrobée, l'enrobage de type basique donne une teneur en hydrogène plus faible que l'enrobage de type rutile. L'énergie de soudage a également une forte influence sur la teneur en hydrogène. L'application d'une énergie élevée implique une vitesse de refroidissement moins rapide, cela permet de dégazer plus d'hydrogène, et donc de diminuer la teneur en hydrogène. Le pré- ou post-chauffage permet d'agir à la fois sur le dégazage de l'hydrogène et sur la vitesse de refroidissement en la ralentissant pour diminuer le taux de martensite engendré. [17]

On peut également réduire le risque en stockant les enrobages dans un environnement sec pour minimiser l'humidité absorbée. Afin de diminuer l'humidité absorbée dans le métal de base avant le soudage, le nettoyage de la surface du métal de base ne doit pas être négligé.

D'autre part, pour diminuer les contraintes résiduelles, l'intensité du bridage ne doit pas être trop importante. Les sollicitations extérieures durant le refroidissement doivent en particulier être contrôlées. En plus, la taille et la forme du cordon peuvent avoir une influence sur l'intensité de contraintes.

II.17.6 ORIGINE DES CONTRAINTES

Les contraintes à l'origine de la fissuration à froid sont les contraintes dites résiduelles de soudage. Elles s'établissent au moment du soudage, ce ne sont pas les contraintes de service.

Si l'on considère une pièce chauffée de manière homogène dans toute sa masse, celle-ci subit une augmentation de l'ensemble de son volume par dilatation thermique. Au refroidissement le processus inverse s'accompagne en même proportion d'un retrait de l'ensemble du métal. [17]

En soudage, le chauffage (et le refroidissement) ont un caractère local. Il en résulte que la dilatation et le retrait intéressent uniquement une petite région (la région soudée) tandis que le métal qui entoure la soudure reste plus froid et ne varie quasiment pas de volume.

Si l'on considère la dilatation et le retrait qui s'effectuent dans le sens transversal au cordon, deux situations extrêmes sont possibles : [17]

1. les pièces à souder peuvent s'écarter et se resserrer pour accompagner la dilatation et le retrait du cordon,

2. les pièces à souder sont maintenues l'une par rapport à l'autre ce qui les empêche d'accompagner librement les variations de volume du métal soumis aux cycles thermique de soudage.

II.18 FACTEURS AFFECTENT LE NIVEAU DE CONTRAINTE DE L'ACIER

Méthode de chauffage pour PWHT (Post Weld Heat Treatment)

La qualité du métal est grandement influencée par la vitesse à laquelle il est chauffé et refroidi. Le traitement thermique après soudage fonctionne en abaissant la température du métal pour le ramener à son niveau d'origine. Plus le métal est épais, plus il est susceptible d'être affecté par les contraintes résiduelles. D'autres facteurs qui affectent le niveau de contrainte de l'acier comprennent : [24]

-Lorsque deux matériaux différents sont soudés ensemble, leur structure a la capacité de modifier la structure du métal d'origine.

-Si de l'hydrogène est introduit dans le processus de soudage, le métal deviendra facile à craquer et à rouiller.

-Si la zone de soudure est plus dure que le reste de l'acier, le risque potentiel de corrosion et de meulage augmentera.

-Lorsque la forme des pièces soudées est différente, des gradients thermiques peuvent se former sur différentes parties de l'acier.

CHAPITRE III

Partie expérimentale

III.1 Introduction

Le préchauffage est une opération de chauffage effectué avant l'opération de soudage pour éviter le phénomène de trempe et remédier au problème de fissuration à chaud, ainsi avoir de bonnes caractéristiques mécaniques.

Nous allons faire l'essai de traction, qui nous permet d'évaluer l'influence de cette opération sur le comportement mécanique, notamment la résistance à la traction et le comportement en fonction de la charge appliquée.

Les résultats de l'impact de préchauffage sur le comportement mécanique sont regroupés dans ce chapitre, tant sur des éprouvettes soudées avec et sans préchauffage.

Les paramètres étudiés dans ce chapitre sont résumés comme suit :

- Effet de préchauffage sur le comportement mécanique de l'acier.
- Effet de la température de préchauffage.
- Effet de l'épaisseur sur la résistance à la traction.

L'étude de préchauffage a été effectuée sur l'acier de type X42 suivant les étapes suivantes :

1. La présentation de matériau étudié.
2. La préparation des éprouvettes.
3. Le préchauffage.
4. L'essai de traction pour analyser les propriétés mécanique de notre matériau.

III.2 La présentation de matériau étudié :

La nuance d'acier dans laquelle est fabriquée ce tuyau suit la norme l'*American petroleum Institut* : API 5L X42. La composition chimique de l'acier soudé spirale, présenté dans le tableau III.1, doit être conforme aux exigences de la dernière édition de la norme API 5L PSL2.

Et ses propriétés mécaniques se présenter dans le tableau III.2.

Tableau III. 1: Composition chimique de l'acier X42 de notre étude.

S	C	Mn	P	Si
0,03 %	0,22 %	1,40 %	0,025 %	0,015 %

Tableau III. 2: Propriétés mécaniques de l'acier X42.

Nuance	Limite d'élasticité minimale Re (N/mm ²)	Résistance à la traction minimale Rm (N/mm ²)
X42	290	415

III.3 Préparation des éprouvettes :

Afin de mener notre étude à bon port, il est nécessaire de préciser certains détails relatifs aux prélèvements des échantillons, donc il se fait au niveau du hall technologique à la faculté de technologie ABOUBEKR BELKAID – Chetouenne. Le prélèvement des échantillons se fait selon trois types :

1. Sans soudure.
2. Avec soudure et sans préchauffage.
3. Avec soudure et avec préchauffage.

Les dimensions des éprouvettes comme suit :

$$L = 200 \text{ mm}$$

$$A = 40 \text{ mm}$$

$$E = 1 \text{ mm}, 2.5 \text{ mm}, 3 \text{ mm}$$

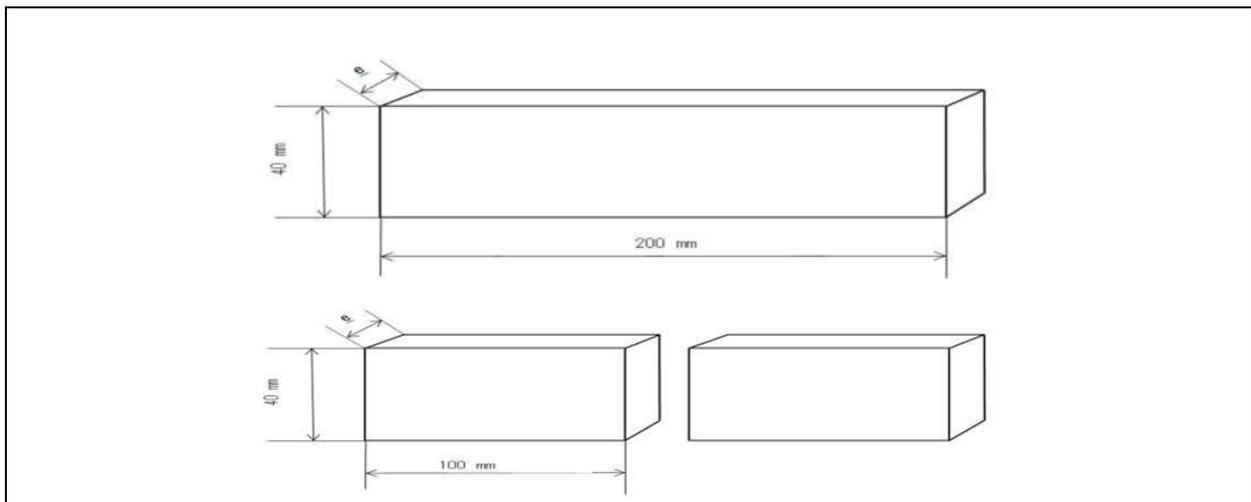


Figure III.1: Dimensions des éprouvettes.

Le découpage avec une scie mécanique de type **OLMO SMA3**



Figure III.2 : Scie mécanique OLMO SMA3.

Procédé de soudage utilisé :

Le soudage se fait par le procédé EE (Electrode enrobée), baguette rutile **E6013** à l'aide d'une machine de soudage de type **SAM PRO PS 250S**.



Figure III.3: Poste de soudure par électrode enrobée SAM PRO PS 250S.

III.4 Préchauffage :

Les éprouvettes soudées subissent un préchauffage à de deux différents températures **150°C** et **200 °C** à l'aide d'un four électrique. **Figure III.4**



Figure III.4: Four électrique.

Tableau III. 3: Photo des éprouvettes de 1mm.

État de l'éprouvette 1mm	Figure de l'éprouvette
Non soudée	
Soudée sans préchauffage	
Soudée avec préchauffage de 150°C	
Soudée avec préchauffage de 200°C	

Tableau III. 4: Photo des éprouvettes de 2,5 mm.

État de l'éprouvette 2.5mm	Figure de l'éprouvette
Non soudée	
Soudée sans préchauffage	
Soudée avec préchauffage de 150°C	
Soudée avec préchauffage de 200°C	

Tableau III. 5: Photo des éprouvettes de 3mm.

État de l'éprouvette 3mm	Figure de l'éprouvette
Non soudée	
Soudée sans préchauffage	
Soudée avec préchauffage de 150°C	
Soudée avec préchauffage de 200°C	

III.5 Essai de traction :

Nous allons faire l'essai de traction sur les éprouvettes non soudées et soudées avec et sans préchauffage, à l'aide d'une machine de traction **600KN (Figure III.5)**, au niveau du laboratoire de SDM de la faculté de technologie ABOU BEKR BELKAID – Chetouane. Pour déterminer le comportement mécanique de ce matériau. Un test de traction consiste à exercer une pression sur un matériau donné jusqu'à sa rupture. Ceci afin de déterminer son degré de résistance et son élasticité.



Figure III.5: Machine de traction.

Tableau III. 6: Photo des éprouvettes de 1mm après la traction.

État de l'éprouvette 1mm	Figure de l'éprouvette après la traction
Non soudée	
Soudée sans préchauffage	
Soudée avec préchauffage de 150°C	

<p>Soudée avec préchauffage de 200°C</p>	
--	--

Tableau III. 7: Photo des éprouvettes de 2,5mm après la traction.

<p>État de l'éprouvette 2,5mm</p>	<p>Figure de l'éprouvette après la traction</p>
<p>Non soudée</p>	
<p>Soudée sans préchauffage</p>	
<p>Soudée avec préchauffage de 150°C</p>	
<p>Soudée avec préchauffage de 200°C</p>	

Tableau III. 8: Photo des éprouvettes de 3mm après la traction.

<p>État de l'éprouvette 3mm</p>	<p>Figure de l'éprouvette après la traction</p>
<p>Non soudée</p>	
<p>Soudée sans préchauffage</p>	
<p>Soudée avec préchauffage de 150°C</p>	
<p>Soudée avec préchauffage de 200°C</p>	

III.6 Interprétation des résultats

III.6.1 Effet de l'épaisseur sur la résistance à la traction :

La figure III.6 suivante représente les courbes de traction (charge F en fonction de l'allongement Δl) des éprouvettes en acier X42 sans soudure de trois épaisseurs différents (1mm, 2,5mm et 3mm).

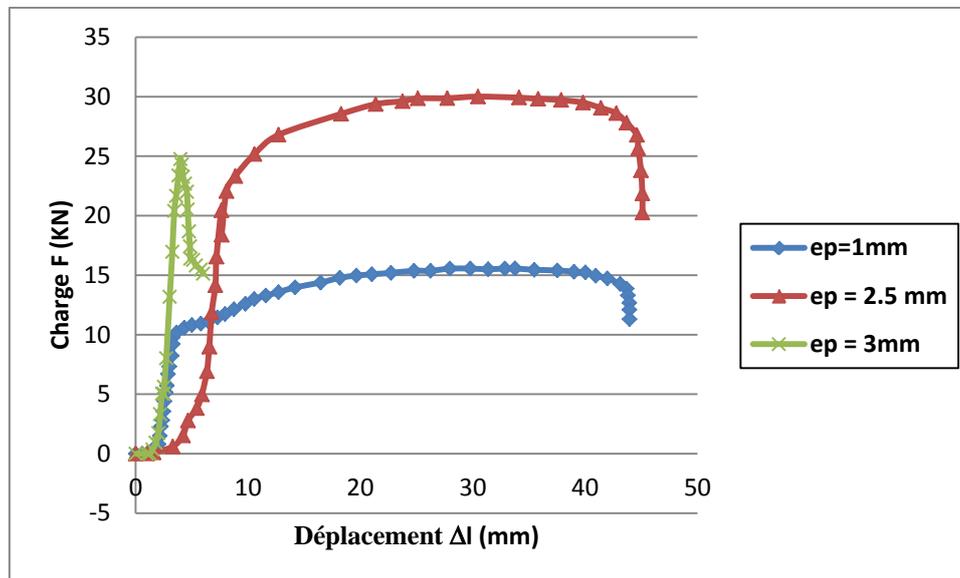


Figure III.6: Essai de traction sur des éprouvettes sans soudures.

Les résultats obtenus sont groupés dans le tableau III.9 suivant :

Tableau III. 9: Résultats de l'essai de traction.

Épaisseur (mm)	F max (KN)	Re (N/ mm ²)	Δl (mm)
1	10	250	40
2.5	23	230	42
3	25	208	3

D'après les résultats obtenus nous déduisons que l'épaisseur de 2,5 mm nous donne les meilleures caractéristiques mécaniques.

III.6.2 Effet de préchauffage et leur température sur le comportement mécanique

Pour que les résultats soient validés nous avons effectué des essais sur des éprouvettes soudées avec et sans préchauffage sur des éprouvettes de différentes épaisseurs (1mm- 2,5mm et 3mm), avec des températures de 150°C et de 200°C.

III.6.3 Cas des éprouvettes soudées sans préchauffage :

La figure 3.7 représente les trois courbes de traction des éprouvettes en acier X42 soudées avec l'électrode enrobée sans préchauffage avec différentes épaisseurs (1mm-2,5mm-3mm).

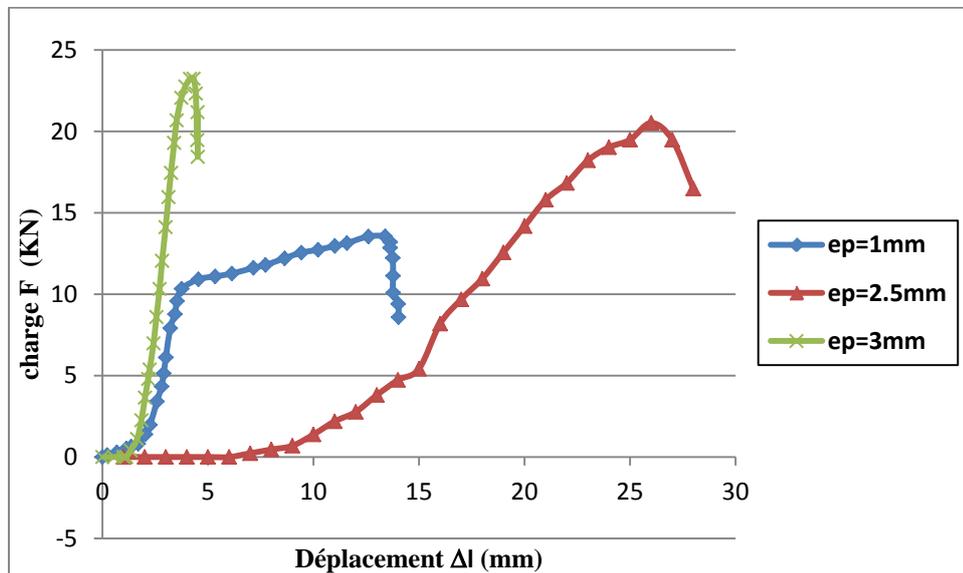


Figure III.7: Essai de traction sur des éprouvettes soudées avec EE sans préchauffage.

La courbe bleue représente la force en fonction du déplacement pour une épaisseur de 1mm. Elle montre comment la force varie lorsque le déplacement augmente jusqu'à la charge de **14KN** elle rompre avec une limite d'élasticité de **12 mm**, par contre la courbe verte de ep=3mm elle est bien résister jusqu'à la charge de **24 KN** ce qui provoque directement une chute avec baisse limite d'élasticité **3mm**.

Nous constatons que pour l'épaisseur :

Les résultats obtenus sont selon le tableau III.10 suivant :

Tableau III. 10: Résultats de l'essai de traction des éprouvettes soudées sans préchauffage.

Epaisseur (mm)	F max (KN)	Re (N/ mm ²)	Δl (mm)
1	14	275	12
2.5	20	200	26
3	24	200	3

L'épaisseur de 1mm nous donne un Re plus important mais avec une charge moins importante.

Conclusion : Plus l'épaisseur de l'éprouvette est grande, plus elle peut supporter des charges plus importantes.

III.6.4 Cas des éprouvettes soudées avec préchauffage à 150 °C :

La figure 3.8 représente la charge appliquée en fonction de déplacement sur trois éprouvettes soudées avec préchauffage de 150 °C avec différents épaisseurs.

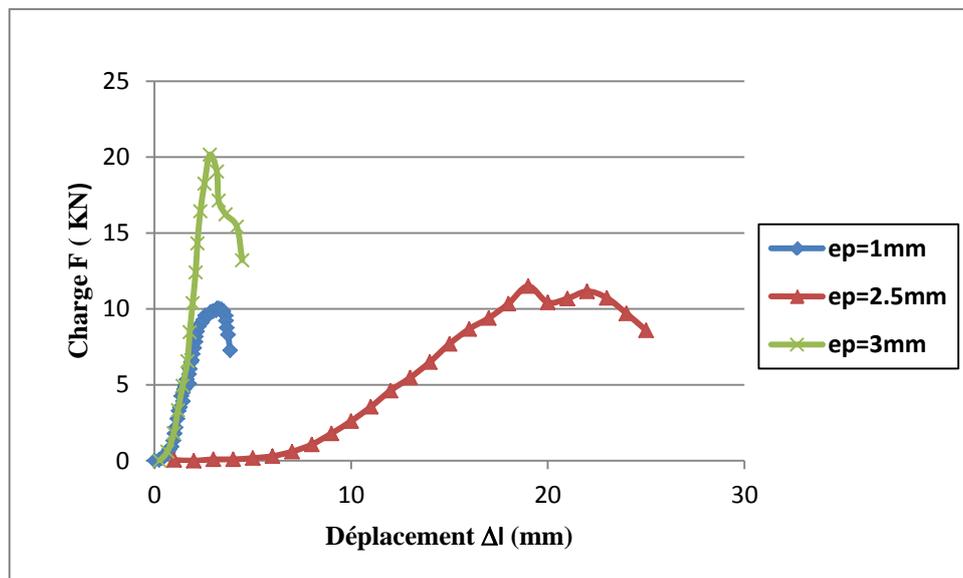


Figure III.8: Essai de traction sur des éprouvettes soudées avec préchauffage de 150 °C.

Les résultats obtenus sont dans le tableau III.11 suivant :

Tableau III. 11 : Résultats de l'essai de traction des éprouvettes soudées avec préchauffage de 150°C.

Épaisseur (mm)	F max (KN)	Re (N/ mm ²)	Δl (mm)
1	10	250	2
2.5	12	120	22
3	20	166	3

Nous observons que le préchauffage de 150°C a donné une influence néfaste sur le Δl pour l'épaisseur de 1mm (Δl =3mm).

III.6.5 Cas des éprouvettes soudées avec préchauffage à 200 °C :

La figure III.9 représente la charge appliquée en fonction de déplacement sur trois éprouvettes soudées avec préchauffage de 200 °C avec différents épaisseurs.

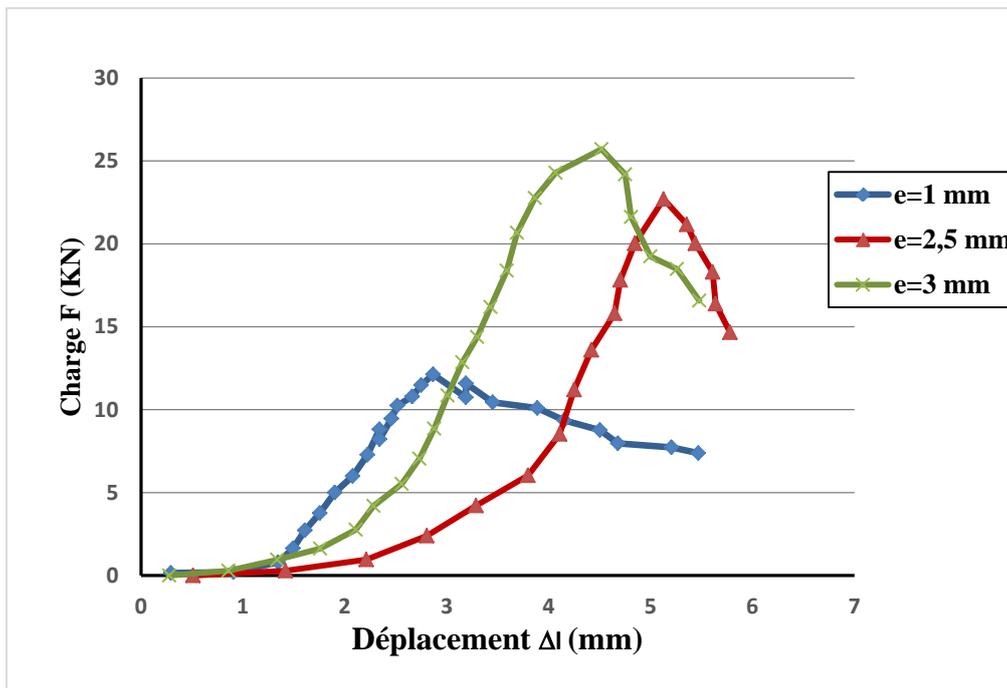


Figure III.9: Essai de traction sur des éprouvettes soudées avec préchauffage de 200°C.

Nous constatons que le préchauffage de 200°C à donne des caractéristiques plus importantes pour l'épaisseur de 3mm : $\Delta l = 5,5$ mm et $Re = 216$ N/mm²

Par contre pour l'épaisseur de 2,5mm nous donne $\Delta l = 5,7$ mm et $Re = 230$ N/mm²

Et pour l'éprouvette de 1mm $\Delta l = 5,4$ mm et $Re = 300$ N/mm²

Tableau III. 12: Résultats de l'essai de traction des éprouvettes soudées avec préchauffage de 200°C.

Épaisseur (mm)	F max (KN)	Re (N/ mm ²)	Δl (mm)
1	13	325	3
2.5	23	230	4,5
3	26	216	5

Le préchauffage à une influence sur le comportement mécanique [Traction, Re et Δl] et sur des épaisseurs plus grandes inversement à des épaisseurs minces.

III.7 Conclusion :

Il y a une relation directe entre la température de préchauffage et l'épaisseur de la pièce à souder, plus l'épaisseur augmente, plus la température de préchauffage doit être élevée pour assurer une fusion adéquate du matériau lors du soudage. Cela permet de prévenir les contraintes résiduelles et les défauts de soudage.

*CONCLUSION
GÉNÉRALE*

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'objectif de notre projet de fin d'étude est de mettre en évidence l'effet de préchauffage sur le comportement mécanique d'un acier en faisant varier d'une part l'épaisseur des éprouvettes et d'autre part la température de préchauffage.

Le préchauffage peut significativement réduire les contraintes internes, en favorisant une microstructure plus homogène. Cela conduit à une meilleure résistance à la rupture, une plus grande ductilité et une réduction du risque de fissuration lors de la soudure ou du traitement thermique ultérieur. En somme, le préchauffage peut jouer un rôle crucial dans l'optimisation du comportement mécanique de l'acier.

L'importance du préchauffage dans la réduction des contraintes résiduelles, l'amélioration de la qualité des soudures et la garantie de performances mécaniques optimales des pièces soudées.

Ce travail met en lumière l'effet significatif du préchauffage sur la durabilité et la résistance des structures soudées, offrant ainsi des perspectives prometteuses pour l'industrie manufacturière et la sécurité des structures.

Il est important de noter que l'acier X42 a une résistance à la traction, une dureté et une ténacité élevées pour résister aux fractures et aux fissures. En plus de sa bonne soudabilité.

RÉFÉRENCES

WEBOGRAPHIE

- [1] <https://www.techniques-ingenieur.fr/glossaire/acier>
- [2] <https://www.weerg.com/fr/guides/acier-quels-sont-les-4-types>
- [3] <https://www.jungheinrich-profishop.fr/fr/guide-pro/propriete-acier-inoxydable/>
- [4] <https://ferroplanes.com/fr/types-dacier-inoxydable-en-usinage-les-plus-utilises/>
- [5] <https://www.bs-decolletage.com/post/diffents-types-acier>
- [7] [https://metalconcept49.fr/fr/post/actualites/comportement-mecanique-de-l-acier#:~:text=Soumise%20%C3%A0%20une%20traction%20suivant,initiale%20\(loi%20de%20Hooke\).](https://metalconcept49.fr/fr/post/actualites/comportement-mecanique-de-l-acier#:~:text=Soumise%20%C3%A0%20une%20traction%20suivant,initiale%20(loi%20de%20Hooke).)
- [8] https://www.gunt.de/images/download/mechanical_testing_methods_french.pdf
- [9] <https://www.alloprof.qc.ca/fr/eleves/bv/sciences/les-proprietes-des-materiaux-s1447>
- [10] <https://nte.mines-albi.fr/SciMat/fr/co/SM6uc2-2.html>
- [12] <https://www.rocdacier.com/soudabilite-x/>
- [14] https://esab.com/fr/eur_fr/esab-university/articles/preheating-and-post-weld-heat-treatments/#:~:text=Comment%20effectuer%20le%20pr%C3%A9chauffage,un%20chauffage%20dans%20un%20four.
- [15] <https://fr.dw-inductionheater.com/produit/pr%C3%A9chauffage-par-induction-avant-soudage-pour-ol%C3%A9oducs-et-gazoducs>
- [16] <https://www.a3ms.fr/wp-content/uploads/2017/02/comment-fabrique-acier.pdf>
- [18] <https://www.mattechjournal.org/articles/mattech/abs/1958/08/mattech19584108p224/mattech19584108p224.html>
- [20] <https://fr.harsle.com/welding-heat-affected-area.html>
- [21] <https://fr.airliquide.com/gaz/gaz-soudage-flamme-oxyacetylenique-oxycoupage>
- [23] <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-what-is-meant-by-post-heating-and-how-is-it-applied>
- [24] <http://www.oiltubulars.com/What-is-News/how-much-do-you-know-about-post-weld-heat-treatments.html>
- [25] <https://www.rocdacier.com/fissuration-a-chaud/>
- [27] <https://www.lincolnelectric.com/fr-ca/welding-and-cutting-resource-center/process-and-theory/what-is-preheat#:~:text=Pr%C3%A9chauffage%20pour%20le%20soudage%20expliqu%C3%A9,de%20pr%C3%A9chauffage%20C%20avant%20le%20soudage>

BIBLIOGRAPHIE

- [6] MEHDI Ahmed (2022). Etude du comportement mécanique de la soudure à l'étain. Mémoire fin d'étude MASTER 2, Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –.
- [11] Cours de soudage et rechargement de Dr TOUALBIA Djamel -Institut de soudure et maintenance industriel Université Mohamed Cherif Massaada Souk Ahras - Faculté des sciences et de la technologie - Département de Génie Mécanique.
- [13] L'ouvrage APPLICATION DU SOUDAGE AUX CONSTRUCTION R.BAUS ET W.CHAPEAU. Publié avec le concours de la Fondation universitaire de Belgique 1977.
- [17] J.SCHUTZ. Institut de soudure - Cours technique général de soudabilité des aciers date de l'édition **16/02/99**.
- [19] Cours de soudabilité des aciers non alliés et faiblement alliés. Module de métallurgie de soudage **MASTER 1 Mr HAJOUI Féthi**.
- [22] KOUKEB Mohamed Mekki (2023). Influence des éléments d'addition sur l'effet thermique sur un acier lors d'un assemblage soudé et leur impact sur le phénomène de la fissuration. Mémoire fin d'étude MASTER 2, Université Aboubakr Belkaïd de Tlemcen.
- [26] Projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme de MASTER 2 en Fabrication mécanique et productique réalisé par BOUALAM Mouhamed, BELAID Abdesslem et Bradaia Ahmed, Université Saad Dahlab de Blida 1 (2019).