

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 Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

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

En : Génie mécanique

Spécialité : Assemblage Soudée et Matériaux

Par : KOUKEB Mohammed Mekki

Sujet

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

Soutenu publiquement, le / / , devant le jury composé de :

BENACHOUR Mustafa
KARA-ALI Djamel
HADJOUI Fethi

Pr
MCB
MCB

Université de Tlemcen
Université de Tlemcen
Université de Tlemcen

Président
Examineur
Encadreur

Année universitaire : 2022/2023

RESUME

L'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 as été mis en évidence dans ce travail.

Le but général de ce travail :

- Présenter un état de l'art sur l'effet thermique lors du soudage qui consiste a démontré le changement de structure du mâtereau lors du chauffage et refroidissement de la pièce soudée.

Puis expliquer l'influence des éléments d'addition sur le comportement en soudage et leur impact sur la fissuration. mais aussi l'influence des impureté et de l'hydrogène sur eux.

Ces éléments d'addition sont souvent convertis en carbone équivalent.

- Faire une modélisation pour voire l'effet du préchauffage sur le comportement de la pièce soudée et ces caractéristiques.

mots cles: Welding, MMA, Traction, Addition element, Thermique effect, Equivalent carbone.

ملخص

تم تسليط الضوء على تأثير عناصر الإضافة على التأثير الحراري على الفولاذ أثناء التجميع الملحوم وتأثيرها على ظاهرة التكسير في هذا العمل.

الهدف العام لهذا العمل:

قدم حالة من الفن على التأثير الحراري أثناء اللحام والذي يتكون من إظهار التغيير في هيكل الصاري أثناء تسخين وتبريد الجزء الملحوم

ثم شرح تأثير عناصر الإضافة على سلوك اللحام وتأثيرها على التكسير. ولكن أيضًا تأثير الشوائب والهيدروجين عليه.

غالبًا ما يتم تحويل عناصر الإضافة هذه إلى كربون مكافئ

عمل نموذج لمعرفة تأثير التسخين المسبق على سلوك الجزء الملحوم وهذه الخصائص .

ABSTRACT

The influence of addition elements on the thermal effect on steel during a welded assembly and their impact on the phenomenon of cracking have been highlighted in this work.

- Present a state of the art on the thermal effect during welding which consists of demonstrating the change in structure of the metal during heating and cooling of the welded part.

Then explain the influence of addition elements on welding behaviour and their impact on cracking, but also the influence of impurities and hydrogen on them.

These addition elements are often converted into equivalent carbon.

- Make a modeling to see the effect of the preheating on the behaviour of the welded part and its characteristics.

REMERCIEMENTS

Je remercie ALLAH de m'avoir donné la force et la patience de mener à terme ce travail.

Je remercie également ma famille et mes amis.

Je tiens à remercier vivement Mr HADJOUI Fethi pour m'avoir encadré tout au long de mon travail.

Je remercie aussi tous mes camarades.

TABLE DES MATIERE :

Introduction général	7
Chapitre I : NOTION DE METALURGIE	9
I. Introduction :	10
II. Métallurgie et mécanique :	10
III. Métallurgie de soudage :	11
III.1 La soudabilité du métal :	11
III.2 les Parties d'un joint soudé :	11
Chapitre II : Etude de l'effet thermique sur les acier soudé	12
I. Cycle thermique du soudage :	13
II. Paramètres thermiques du soudage :	13
III. Définition de la zone affectée par le cycle thermique de soudage :	14
III.1 Transformations ZAT lors du chauffage :	15
III.2 Transformations ZAT lors du refroidissement :	16
IV. RESILIENCE DU JOINT SOUDE :	17
V. Préchauffage de la soudure :	18
V.1 L'importance du préchauffage :	18
V.2 Facteurs influant la température de préchauffage :	18
V.3 Détermination de la température de préchauffage :	19
V.4 Méthode Séférián :	19
V.5 méthode BWRA :	21
V.6 l'opération de préchauffage :	24
V.7 Techniques de préchauffage :	24
VI. Le post-chauffage :	24
Chapitre III : Le phénomène de fissuration	25

I. Fissuration à froid (FAF) :	26
II. Éléments influents dans la Fissuration à froid :	27
II.1 Rôle de la microstructure dans la Fissuration à froid :	27
II. 2 Composition d'un alliage :	28
II.3 Vitesse de refroidissement :	28
II.4 Rôle de l'hydrogène :	29
II.5 Sources et diffusion de l'hydrogène :	31
II.6 Prévention de la fissuration à froid :	32
III. La Fissuration à Chaud (FAC) :	33
III.1 Facteurs influent sur la fissuration a chaud :	34
III.2 Méthodes de Prévention de (FAC) :	34
IV. Fissures par arrachement lamellaire:	35
IV.1 COMMENT EVITER L'ARRACHEMENT LAMELLAIRE :	36
V. Fissure cause par POROSITES :	36
V.1 ORIGINE :	36
V.2 COMMENT EVITER LES POROSITES :	36
Chapitre IV : Influence des élément d'addition sur le comportement en soudage (carbone équivalent)	37
I. Carbone équivalent et soudabilité :	38
II. Calcule du carbone équivalent pour les aciers non alliés :	39
III. Calcule du carbone équivalent pour les aciers faiblement alliés :	39
Chapitre V : Impact des élément d'addition sur le phénomène de fissuration : ..	40
I. Impact de l'hydrogène :	41
II. Impact des impureté :	41
III. Le Diagramme de Schaeffler :	42
IV. Les risques métallurgiques sur le diagramme de Schaeffler :	42
V. Le taux de dilution :	43

VI. Variation du taux de dilution :	44
Chapitre VI : Partie expérimentale	45
I. Préparation des éprouvettes :	46
II. Assemblage Des Eprouvettes :	47
III. La Partie Essai :	51
IV. Présentation des Résultats :	52
1. Les graphes de l'essai de traction :	52
2. Les éprouvettes après l'essai de traction :	58
V. Interprétation des résultats :	61
VI. Conclusion :	61
Conclusion général.....	62

LISTE DES FIGURES

Figure 1 chalumeaux oxy-acetylene	57
Figure 2 éprouvette de $e= 1$ mm non soudée	58
Figure 3 éprouvette de $e= 1$ mm soudée	58
Figure 4 éprouvette de $e= 1$ mm soudée avec préchauffage de 2 min	58
Figure 5 éprouvette de $e= 2.5$ mm non soudée	58
Figure 6 éprouvette de $e= 2.5$ mm soudée	59
Figure 7 éprouvette de $e= 2.5$ mm soudée avec préchauffage de 2 min	59
Figure 8 éprouvette de $e= 2.5$ mm soudée avec préchauffage de 5 min	59
Figure 9 éprouvette de $e= 3$ mm non soudée	60
Figure 10 éprouvette de $e= 3$ mm soudée	60
Figure 11 éprouvette de $e= 3$ mm soudée avec préchauffage de 2 min	60
Figure 12 éprouvette de $e= 3$ mm soudée avec préchauffage de 5 min	60
Figure 13 Eprouvette sans soudure $e= 1$ mm	62
Figure 14 Eprouvette sans soudure $e= 2.5$ mm	62
Figure 15 Eprouvette sans soudure $e= 3$ mm	63
Figure 16 Eprouvette soudée sans préchauffage $e= 1$ mm	63
Figure 17 Eprouvette soudée sans préchauffage $e= 2.5$ mm	64

Figure 18 Epreuve soudée sans préchauffage e= 3 mm	64
Figure 19 Epreuve soudée préchauffage 2 min e= 1 mm	65
Figure 20 Epreuve soudée préchauffage 2 min e= 2.5 mm	65
Figure 21 Epreuve soudée préchauffage 2 min e= 3 mm	66
Figure 22 Epreuve soudée préchauffage 5 min e= 1 mm	66
Figure 23 Epreuve soudée préchauffage 5 min e= 2.5 mm	67
Figure 24 Epreuve soudée préchauffage 5 min e= 3 mm	67
Figure 25 éprouvette de e= 1 mm non soudée après traction	68
Figure 26 éprouvette de e= 1mm soudée après traction	68
Figure 27 éprouvette de e= 1mm soudée avec préchauffage de 2 min après traction	68
Figure 28 éprouvette de e= 1mm soudée avec préchauffage de 5 min après traction	68
Figure 29 éprouvette de e= 2.5 mm non soudée après traction	69
Figure 30 éprouvette de e= 2.5 mm soudée après traction	69
Figure 31 éprouvette de e= 2.5 mm soudée avec préchauffage de 2 min après traction	69
Figure 32 éprouvette de e= 2.5 mm soudée avec préchauffage de 5 min après traction	69
Figure 33 éprouvette de e= 3 mm non soudée après traction	70
Figure 34 éprouvette de e= 3 mm soudée après traction	70
Figure 35 éprouvette de e= 3 mm soudée avec préchauffage de 2 min après traction	70
Figure 36 éprouvette de e= 3 mm soudée avec préchauffage de 5 min après traction	70
Figure 37 zone affecte thermiquement	15
Figure 38 transformation de ZAT lors du chauffage	16
Figure 39 transformation ZAT lors du refroidissement	17
Figure 40 influences des éléments d'alliage et la vitesse de refroidissement sur la température de transition du métal fondu	18
Figure 41 diagramme de Seférian	23
Figure 42 les différentes zones de fissuration.....	29
Figure 43 diagramme Schaeffler.....	31
Figure 44 transformations de ZAT lors du refroidissement.....	32
Figure 45 insertions d'hydrogène	33

Figure 47 diagramme de Schaeffler	35
Figure 48 dilutions lors du soudage	52
Figure 49 dimensions des éprouvettes	55
Figure 50 dimensions des éprouvettes découper	55
Figure 51 scie mécanique OLMO SMA3	56
Figure 52 poste de soudure électrode enrobé SAM PRO PS 250 S.....	57
Figure 53 influences de la vitesse de refroidissement sur la structure.....	14

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: indice TSN selon la position de soudure.....	24
Tableau 2: indice de soudabilité	24
Tableau 3: soudabilité en fonction de TSN et de l'épaisseur.....	25
Tableau 4: soudabilité de différent métaux.....	30
Tableau 5: nécessité de préchauffage selon le carbone équivalent.....	45

Introduction général

L'ajout d'éléments lors d'un assemblage soudé peut avoir une influence significative sur l'effet thermique et le phénomène de la fissuration. Les éléments d'addition les plus couramment utilisés dans les soudures sont le carbone, le manganèse, le nickel, le chrome et le molybdène.

Lors du soudage d'un acier, l'apport de chaleur peut causer une zone affectée thermiquement (ZAT) autour de la soudure. Cette zone peut subir des changements microstructuraux et des contraintes résiduelles, qui peuvent affecter les propriétés mécaniques de l'acier, y compris sa résistance à la fissuration. L'ajout d'éléments peut avoir un effet significatif sur ces changements.

Par exemple, le carbone est souvent utilisé comme élément d'addition pour augmenter la résistance et la dureté de l'acier. Cependant, une quantité excessive de carbone peut entraîner une fragilité accrue et une susceptibilité accrue à la fissuration. Le manganèse, en revanche, peut améliorer la résistance à la fissuration en raison de sa capacité à lier l'oxygène et à réduire la fragilité. Le nickel est souvent utilisé pour améliorer la résistance à la corrosion et la ductilité de l'acier. Cependant, une quantité excessive de nickel peut entraîner une augmentation de la solidification de l'acier, ce qui peut entraîner des défauts de soudure et une fissuration accrue. Le chrome peut également améliorer la résistance à la corrosion, mais il peut augmenter la dureté et la fragilité si utilisé en excès. Le molybdène est souvent ajouté pour améliorer la résistance à la corrosion, la résistance à l'usure et la dureté. Cependant, il peut également causer une fissuration accrue s'il est utilisé en excès.

En résumé, l'ajout d'éléments d'addition peut avoir un impact significatif sur l'effet thermique et le phénomène de fissuration lors du soudage d'un acier. Il est donc important de prendre en compte la quantité et le type d'éléments d'addition utilisés pour minimiser les risques de fissuration et maximiser les propriétés mécaniques de l'acier soudé.

Chapitre I : NOTION DE METALURGIE

I. Introduction :

La métallurgie est parfois considérée comme une activité plus proche de l'art et de l'artisanat que d'une discipline strictement scientifique [1]. Elle est en fait à la fois ceci et cela. C'est à cette discipline que s'attarde ce chapitre, et nous verrons qu'elle emprunte largement aux outils de la physique, de la mécanique, de la chimie et des mathématiques, tout en en créant de nouveaux. La science elle-même participe des disciplines précitées, mais ne peut être réduite à aucune d'entre elles.

En fait, le succès de la métallurgie peut se résumer en cinq mots : l'abondance des métaux dans la croûte terrestre ; leur grande ductilité ; la capacité qu'ils offrent de modifier leurs propriétés mécaniques par un traitement thermomécanique ; une maîtrise extraordinaire de nombreuses technologies connexes ; et enfin Les propriétés conductrices (électriques et thermiques) des métaux et alliages et les propriétés magnétiques de certains d'entre eux.

Il faudra attendre la seconde moitié du XXe siècle pour que des avancées majeures permettent d'expliquer le comportement qui intriguait Lamé en 1840 et sa modélisation « d'ordre zéro ». Elle met en évidence le rôle majeur des défauts cristallins dans le comportement macroscopique et la microstructure des matériaux.

II. Métallurgie et mécanique :

Au fil des siècles, les métaux – et plus généralement les solides couramment utilisés (roche, argile, bois, etc.) – ont été assimilés à un milieu continu, une représentation à la fois commode et plausible pour la manipulation mathématique. C'est ainsi que Hooke, contemporain et rival de Newton, étudie le métal du ressort oscillant, énonçant à sa manière ("Ut tensio, sic vis", 1678) la relation linéaire entre force et déformation, qui est une longue tradition dans mécanique Le début de l'histoire Des mathématiciens comme Cauchy et des physiciens comme Poisson ont fait de brillantes recherches sur les solides.

III. Métallurgie de soudage :

III.1 La soudabilité du métal :

Ce concept implique des modifications des propriétés du matériau au voisinage du joint soudé (ZF : zone de fusion, ZL : zone de jonction, ZAT : zone affectée thermiquement) sous l'effet de cycles thermiques, mécaniques ou thermomécaniques provoqués par le mode de fonctionnement mise en œuvre du soudage (MOS).

Un exemple classique de problèmes de soudabilité localisés est le durcissement martensitique dans les soudures en acier trempé, entraînant des zones ZL et ZAT qui peuvent être trop fragiles et sujettes à la fissuration.

III.2 les Parties d'un joint soudé :

Sur la macrographie d'une section transversale d'un joint soudé, on distingue les zones suivantes :

1 - Zone fondue

C'est la zone durant l'opération de soudage où l'état liquide a été obtenu qu'il y ait eu ou non apport de métal.

2 - Zone de liaison

C'est la frontière entre le métal fondu et le métal de base non fondu

3 - Zone affectée thermiquement

Elle concerne le métal de base qui n'a pas fondu mais qui a subi des modifications de structure (grosseur des grains) ou physico-chimiques (natures et proportions des constituants).

Pour les aciers, la ZAT est la zone du métal de base qui a été austénitisée au cours du cycle de soudage.

4 - Métal de base

Le métal de base est la zone qui n'a pas été affectée par l'opération de soudage du point de vue des modifications physico-chimiques. Par contre cette zone peut être le siège de contraintes et de déformations.

Chapitre II : Etude de l'effet thermique sur les aciers soudés

I. Cycle thermique du soudage :

Pendant que la source de chaleur se déplace le long des bords à souder, le matériau environnant s'échauffe, atteint une température maximale puis se refroidit **quand la source 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".

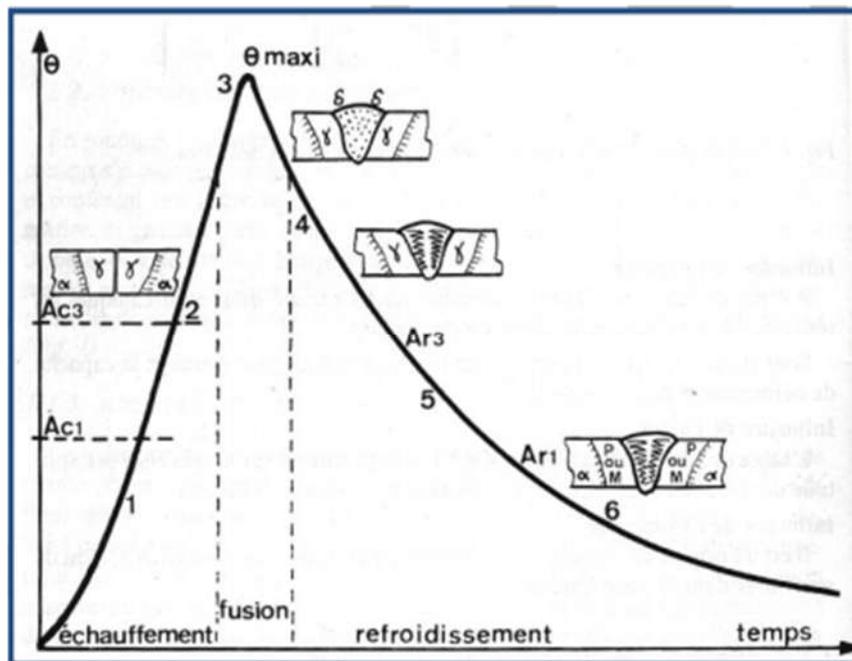


Figure 53 influence de la vitesse de refroidissement sur la structure

- 1 – Dilatation Ac1 : Détensionnement
- 2 – Ac3 : austénisation (changement de maille).
- 3 – Zone fondue : fusion et dilution du MA et du MB.
- 4 – Solidification Ar3 : formation de dendrites, retrait, contraintes.
- 5 – Transformations allotropiques Ar1: trempe (martensite), recuit (perlite).
- 6 – Fin de transformation : contraintes résiduelles, déformations, rupture.

II. Paramètres thermiques du soudage :

La compréhension du cycle thermique de soudage peut prédire les changements dans le métal de base et le métal en fusion. Les paramètres les plus couramment utilisés pour caractériser le cyclage thermique dans les conditions de brasage sont :

- Le $\Delta t_{800/500}$; temps de refroidissement entre 800 et 500°C, utilisé par l'Institut International de Soudure (**I.I.S.**).
- Le $\Delta t_{700/300}$; temps de refroidissement entre 700' et 300°C utilisé par l'Institut de Recherches de la Sidérurgie Française (**I.R.S.I.D.**)

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

- L'énergie de soudage :
- La forme du joint,
- Le procédé de soudage,
- L'épaisseur du métal de base,
- La température de préchauffage et la température entre passes.

Divers abaques prennent en compte ces différents facteurs et permettent de prévoir le $\Delta t_{800/500}$ pour une soudure donnée.

III. Définition de la zone affectée par le cycle thermique de soudage :

Aux abords de la zone de fusion, le métal est soumis à des cycles thermiques de soudage, qui provoquent des transitions liées à la température maximale atteinte et aux conditions de refroidissement du joint soudé.

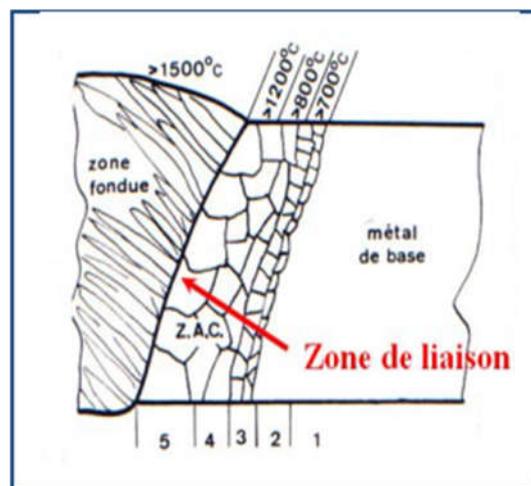


Figure 37 zone affecte thermiquement

1 et 2 Métal de base : température peu élevée ou ambiante, aucune transformation
3, 4 et 5 – Le grain grossi jusqu'à l'approche du bain de fusion, c'est la ZAT. C'est dans cette région que les risques de fissures à froid peuvent naître, ainsi que les modifications des caractéristiques mécaniques du métal.

III.1 Transformations 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 l'instar d'Easterling, il convient de raisonner à partir de ce type de schéma pour expliquer qualitativement les changements microstructuraux (voir figure 38).

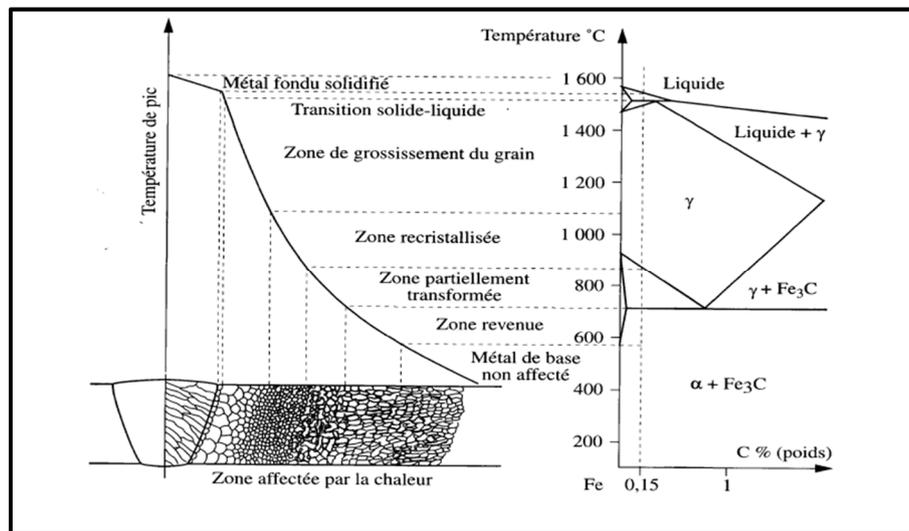


Figure 38 transformation de ZAT lors du chauffage

En se rapprochant de la zone fondue, on trouvera successivement les zones suivantes.

- Le métal de base n'ayant pas subi de transformation de phase au chauffage.
- Une zone subcritique, où l'on ne constate pas encore de changement de phase. Certains phénomènes tels que revenu, globularisation, recristallisation, vieillissement, etc., peuvent éventuellement intervenir.
- Une zone de transformation partielle (ou intercritique).
- A partir de la température A3 et jusqu'à 1 495 °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. Les premiers germes du métal fondu se solidifient par épitaxie (relations de cohérence cristallographique) sur les grains de la Zone Affectée par la Thermiquement ZAT.

III.2 Transformations ZAT lors du refroidissement :

Selon la vitesse de refroidissement, différents types de microstructures peuvent se former.

En soudage, la vitesse de refroidissement HAZ est élevée et dépend des conditions de soudage. Par conséquent, une approche intuitive des phénomènes métallurgiques dans la ZAT ne peut pas comprendre correctement les phénomènes métallurgiques qui se produisent dans la ZAT. Cela peut être fait avec une carte de refroidissement continu tracée dans des conditions de soudage :

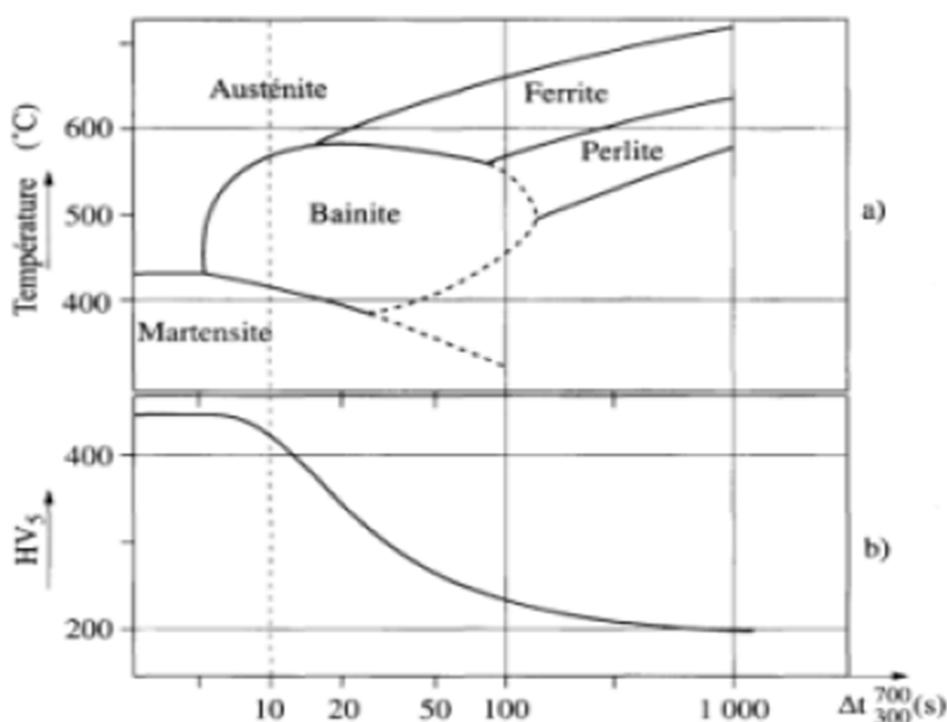


Figure 39 transformation ZAT lors du refroidissement

1. Pour une vitesse de refroidissement lente, nous sommes en présence d'un phénomène de recuit ou normalisation. La structure finale est composée de ferrite-perlite (structure identique au métal de base)
2. Pour une vitesse moyenne, nous avons un effet de trempe douce et nous obtenons une structure finale composée de bainite (ferrite et cémentite),
3. Pour une vitesse de refroidissement rapide l'effet est alors dit de trempe dure. La structure finale est composée de martensite (forte déformation du réseau cristallin et apparition de cisaillements).

IV. RESILIENCE DU JOINT SOUDE :

L'effet de la vitesse de refroidissement et de la composition chimique sur les caractéristiques de résilience :

1. Lorsque la teneur en élément d'alliage est faible (faible trempabilité), on obtient une structure brute de solidification très grossière essentiellement constituée de ferrite proeutectoïde et de constituant lamellaire. La ténacité est alors mauvaise quelle que soit la vitesse de refroidissement (température de transition élevée)
2. Lorsque l'on augmente la teneur en élément d'alliage (Mn, Mo....) et si les inclusions favorables sont présentes, la proportion de ferrite aciculaire s'accroît, ses grains deviennent de plus en plus fins et la ténacité s'améliore fortement.
3. Si l'on continue à augmenter la teneur en élément d'alliage au-delà de T_1 pour $(\Delta t_{8/5})_1$ ou de T_2 pour $(\Delta t_{8/5})_2$, on observe une détérioration des valeurs de résilience car l'effet négatif de durcissement par effet de solution solide lié à l'augmentation des éléments d'alliage devient supérieur à l'effet positif résultant de l'accroissement de la quantité et de la finesse de la ferrite aciculaire,
4. La comparaison des deux courbes de la **figure 40** montre enfin qu'une augmentation de la vitesse de refroidissement ($(\Delta t_{8/5})_1$ comparativement à $(\Delta t_{8/5})_2$) améliore toujours les caractéristiques de résilience.

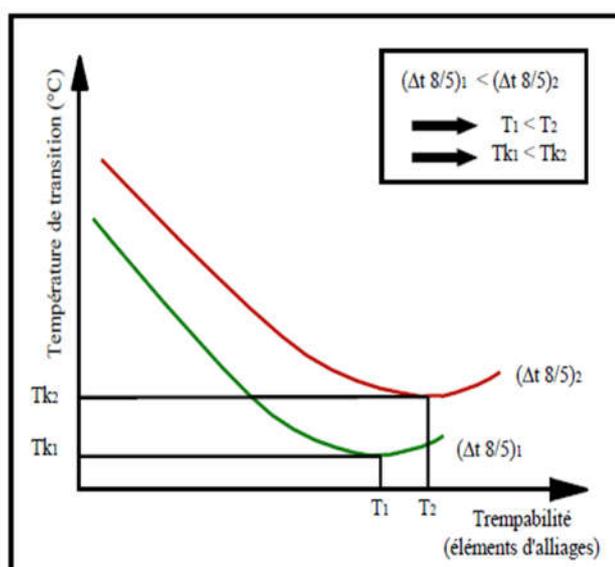


Figure 40 influences des éléments d'alliage et la vitesse de refroidissement sur la température de transition du métal fondu

V. Préchauffage de la soudure :

Le préchauffage consiste à chauffer le métal de base entourant le joint de soudure, à une température minimale prédéterminée spécifique, appelée température de préchauffage, avant de souder ou d'effectuer des soudures par points. L'application de préchauffage peut être soit juste avant le soudage, soit en continu jusqu'à ce que le soudage soit terminé.

Le premier cas s'applique au matériau en acier au carbone épais non allié mais généralement un maintien du préchauffage, c'est-à-dire un préchauffage tout au long du soudage, est nécessaire pour les matériaux plus exotiques tels que les aciers Cr-Mo, les aciers HSLA, etc.

V.1 L'importance du préchauffage :

Pour obtenir un métal d'apport fondu sans criques, les températures de préchauffage avant soudage et de passes intermédiaires sont très importantes. Le préchauffage réduit:

- Le risque de fragilisation par l'hydrogène
- Les contraintes de retrait
- La dureté de la zone affectée thermiquement (ZAT)
- Les tensions internes

La nécessité d'un préchauffage augmente en fonction des facteurs suivants:

- Pourcentage de carbone du métal de base
- Pourcentages des éléments d'alliage du métal de base
- Volume de la pièce
- Température ambiante
- Vitesse de soudage
- Diamètre du métal d'apport

V.2 Facteurs influant la température de préchauffage :

1. Nature et diamètre de l'électrode.
2. L'épaisseur des tôles à assembler.
3. Le type et la forme de l'assemblage.
4. La méthode de soudage.
5. La composition chimique de l'acier.
6. Le carbone équivalent.

V.3 Détermination de la température de préchauffage :

La composition du métal de base doit être connue pour déterminer la température de préchauffage qui est fixée par deux principaux facteurs **d'influence** :

- Teneur en carbone du métal de base
- Teneur des éléments d'alliages du métal de base

La température de préchauffage augmente principalement en fonction du pourcentage de carbone présent dans le matériau. Les éléments d'alliage contribuent également à cette augmentation, mais dans une moindre mesure. Pour déterminer la température de préchauffage, on utilise la méthode du calcul du carbone équivalent, qui se fonde sur la composition chimique du métal de base.

$$C_{eq} = \% C + \% Mn/6 + (\% Cr + \% Mo + \% V)/5 + (\% Ni + \% Cu)/15$$

Un facteur déterminant pour la température de préchauffage est le carbone équivalent (C_{eq}) : plus le C_{eq} est élevé, plus la température de préchauffage nécessaire sera élevée. De plus, l'épaisseur et les dimensions de la pièce sont également des facteurs importants pour déterminer la température de préchauffage. Une pièce plus épaisse et de plus grandes dimensions nécessitera une température de préchauffage plus élevée.

Une fois que la température de préchauffage a été déterminée, il est crucial de la maintenir pendant toute la procédure de soudage. Pour cela, le temps de dispersion est essentiel, car il garantit une température uniforme à travers toute la section de la pièce. Après le soudage, il est important de refroidir la pièce lentement pour éviter les contraintes excessives et les déformations indésirables.

V.4 Méthode Seferian :

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. On peut utiliser une méthode qui permet d'estimer la nécessité du préchauffage et sa température, le cas échéant. Cette méthode s'appelle la **méthode de Séférian**.

Cette méthode s'effectue en 3 étapes:

- Calcul du carbone équivalent (C_{eq})
- Calcul du carbone équivalent compensé ($C_{eq.C}$)
- Calcul de la température de préchauffage.

Pour calculer le Carbone Equivalent, on peut utiliser cette formule qui fait intervenir le carbone, le manganèse, le silicium, le chrome, le molybdène, le vanadium, le nickel et le cuivre. On trouve parfois aussi le phosphore dans certaines formules.

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

- Si $C_{eq} \leq 0,4$: 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** ; préchauffage, électrodes spéciales, traitements thermiques...

Ensuite, on calcule le **carbone équivalent compensé** qui prend en compte les épaisseurs des pièces à souder.

$$C_{eq.C} = C_{eq} \times (1 + 0,005 e)$$

Puis pour terminer, on évalue la température de préchauffage.

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

Le diagramme de Seferian permet aussi de déterminer par lecture les températures de préchauffage:

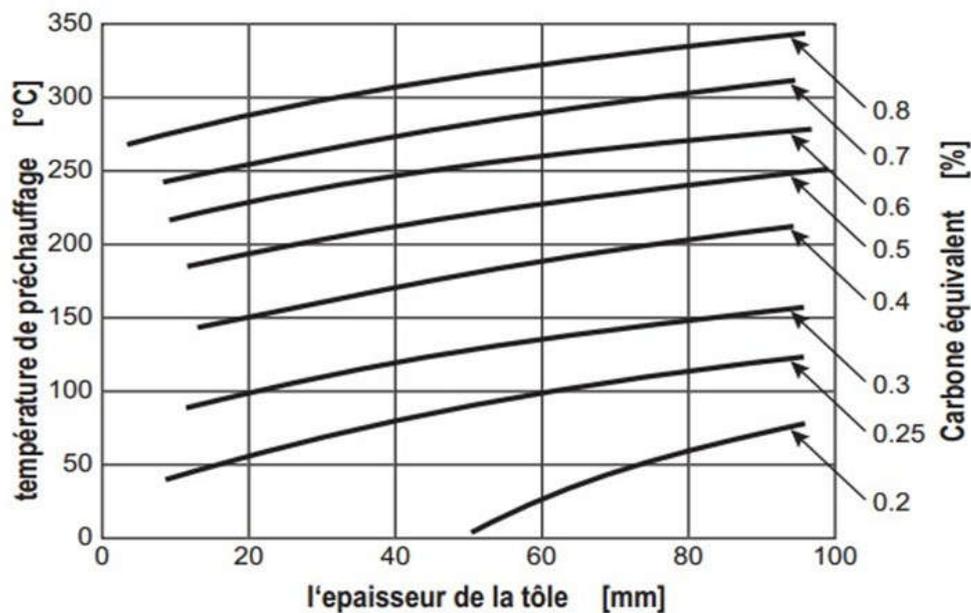


Figure 41 diagramme de Seferian

V.5 méthode BWRA :

On peut aussi calculer la **température de préchauffage** avec la **méthode BWRA** (British Welding Research Association). Cette méthode est adaptée au soudage à l'électrode enrobée.

Cette méthode permet de calculer aussi la température de préchauffage, précise, elle prend en compte:

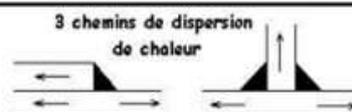
- **L'indice de sévérité thermique**
- **L'indice de soudabilité**
- **Le diamètre des électrodes.**

Il faut commencer par déterminer TSN (Thermic Severity Number) qui prend en compte la géométrie et l'épaisseur de l'assemblage. Il faut diviser par 6 la somme des épaisseurs qui dépend des chemins de dispersion de la chaleur. Par exemple dans le cas d'un assemblage en T, il y'aura 3 chemins de dispersions, donc on aura l'équivalent de 3 épaisseurs.

$$TSN = \frac{\text{Somme des épaisseurs}}{6}$$

Donc, si on soude une tôle de 4 mm sur une tôle de 6 mm, on aura $(6+6+4)/6 = 2,67$

Le tableau suivant donne quelques exemples :

Type de joint	Épaisseur 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

Ensuite, on doit déterminer l'**indice de soudabilité**, qui est fonction du pourcentage en Ceq de l'acier à souder et du type d'électrodes choisies. Le pourcentage du Ceq de l'acier est calculé grâce à la formule:

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

En fonction du résultat trouvé, on pourra dire quel est l'**indice de soudabilité**.

Electrodes rutils	Electrodes basiques	Indices 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

Puis grâce à un nouveau tableau, on utilise l'**indice de sévérité thermique**, puis l'**indice de soudabilité** et le **diamètre de l'électrode** qui sera utilisé, pour déterminer

la température minimale à laquelle on devra souder.

Chiffre de sévérité thermique TSN	Indice de soudabilité	Température minimale à laquelle doit être exécuter la soudure				
		Diamètre de l'électrode				
		3,2	4	5	6	8
TSN 2	D					
	E	50				
	F	125	25			
TSN 3	C	0				
	D	75				
	E	100	25			
TSN 4	F	150	100	25		
	B	25				
	C	50				
TSN 4	D	100	25			
	E	125	75			
	F	175	125	75		
TSN 6	A	25				
	B	50				
	C	100	25			
TSN 6	D	150	100	25		
	E	175	125	75	25	
	F	225	175	125	75	
TSN 8	A	25				
	B	75				
	C	125	75	25		
TSN 8	D	175	125	75		
	E	200	150	125	50	25
	F	225	200	175	125	50
TSN 12	A	75	25			
	B	125	75	25		
	C	150	125	75		
TSN 12	D	200	175	125	75	
	E	225	200	175	100	50
	F	250	225	200	150	125
TSN 16	A	75	25	25		
	B	125	75	50	25	
	C	175	150	125	50	
TSN 16	D	200	175	175	125	50
	E	225	200	200	150	100
	F	250	250	225	200	150
TSN 24	A	75	25	25		
	B	125	75	50	25	
	C	175	150	125	75	
TSN 24	D	200	175	175	125	
	E	225	200	200	175	
	F	250	250	225	200	

V.6 l'opération de préchauffage :

Fixez les pièces à souder et les éléments de fixation temporaires tels que des cavaliers, des martyrs ou des appendices sur un métier de soudage ou un gabarit. Chauffez tous les éléments jusqu'à ce qu'ils atteignent la température requise. Utilisez un thermomètre approprié ou un crayon thermochrome (indicateur à virage coloré) pour contrôler la température. Dès que la température de préchauffage est atteinte, procédez immédiatement à l'alignement des pièces et commencez à souder sans perdre de temps. Assurez-vous de vérifier en permanence la température entre les passes de soudure, qui ne doit jamais être inférieure à la température de préchauffage spécifiée. De plus, veillez à ne pas dépasser la température maximale autorisée indiquée dans la fiche de descriptif de mode opératoire de soudage (DMOS).

V.7 Techniques de préchauffage :

- Chauffage par brûleurs fixes
- Chauffage par matelas chauffant
- Chauffage par induction
- Chauffage par four

VI. Le post-chauffage :

Après le processus de soudage, on procède généralement au post-chauffage, qui implique de chauffer les pièces soudées à une température comprise entre 200 et 300°C. L'objectif du post-chauffage est d'éliminer l'hydrogène gazeux généré pendant le soudage et de prévenir les fissurations à froid. Il est important de noter que la diffusion de l'hydrogène est fortement influencée par la température, suivant une fonction exponentielle.

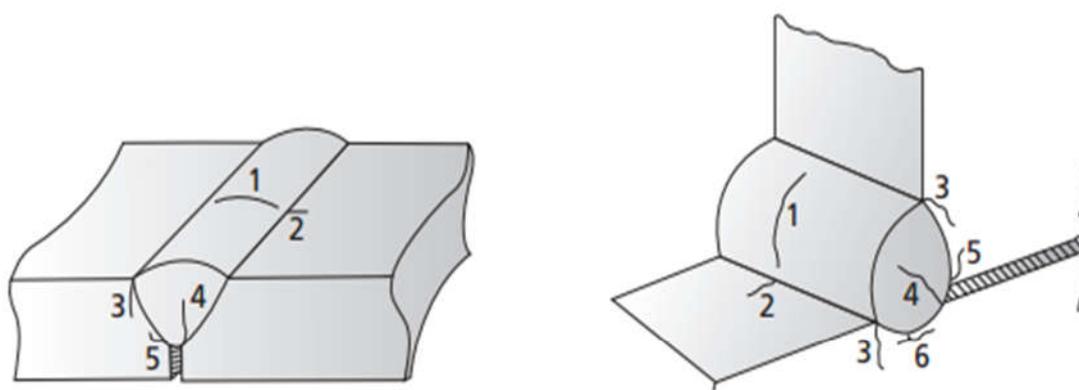
En ce qui concerne les aciers au chrome-molybdène, il est courant de procéder au soudage immédiatement après (ou à la fin du quart de travail si le soudage n'est pas terminé) afin d'éviter toute contrainte qui pourrait entraîner des fissures. Cette pratique vise à minimiser les risques de défauts et à assurer l'intégrité de la soudure.

Chapitre III : Le phénomène de fissuration

I. Fissuration à 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 :

1. elles peuvent se produire dans la zone affectée thermiquement (ZAT) ou le métal fondu (MF) (Figure);
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 [2].



- 1) Fissures transversales dans la zone fondue
- 2) Fissures transversales dans la ZTA
- 3) Fissures dans la zone de liaison
- 4) Fissures dans la zone fondue
- 5) Fissures à la racine
- 6) Fissure sous le cordon

Figure 42 les différentes zones de fissuration

On parle également de fissuration induite par l'hydrogène parce que ce dernier joue le rôle de facilitateur dans l'apparition de ce phénomène.

II. Éléments influents dans la Fissuration à froid :

II.1 Rôle de la microstructure dans la Fissuration à froid :

Certains matériaux comme les aciers faiblement alliés à haute résistance sont plus sensibles à la fragilisation par l'hydrogène (FPH) que d'autres matériaux comme les aciers inoxydables. Le **tableau I.1**(Sensibilité à la fragilisation par l'hydrogène) illustre l'ordre de sensibilité de quelques matériaux à la fragilisation par l'hydrogène [3].

Soudabilité	Elevée	Basse	Presque inexistante
Matériaux	<ul style="list-style-type: none">• Aciers à haute résistance• Aciers à haute résistance de type nickel• Aciers à moyenne ou basse résistance• Alliage de cobalt	<ul style="list-style-type: none">• Aciers inoxydables austénitiques: 310, 304	<ul style="list-style-type: none">• Aciers inoxydables stabilisés• Alliage d'aluminium

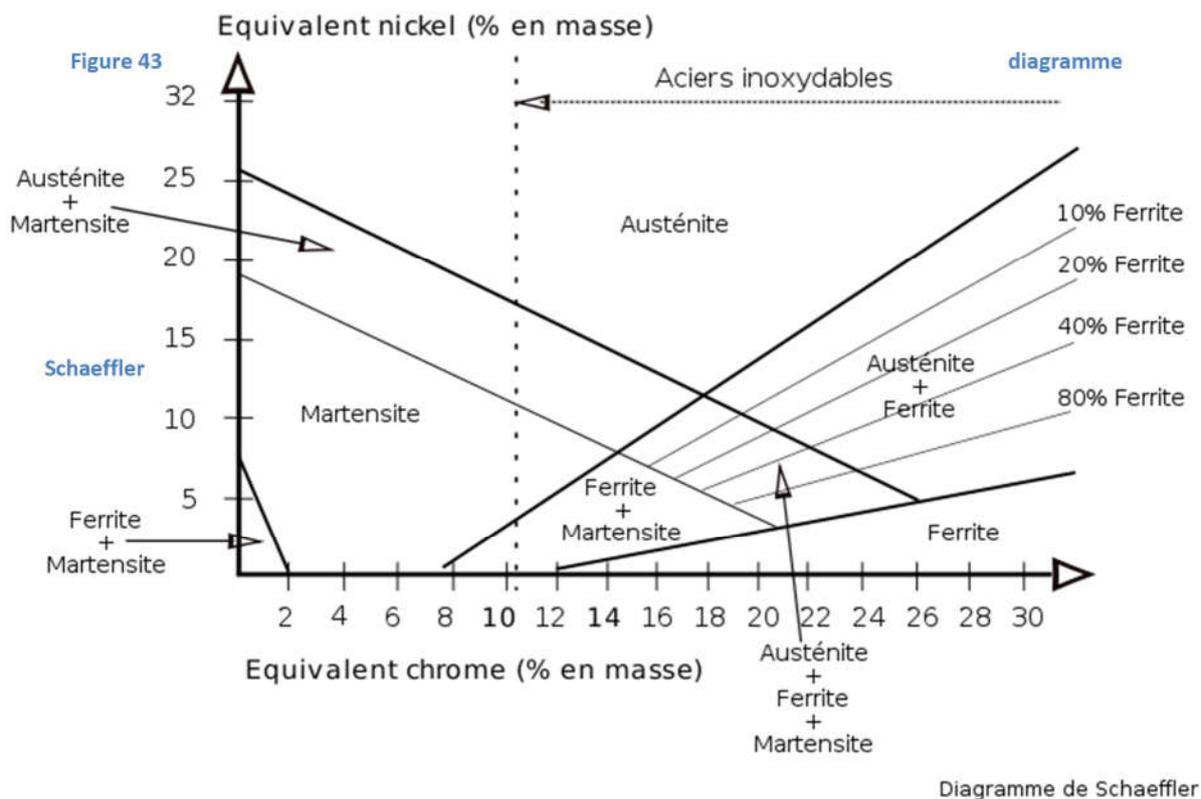
La dureté de la microstructure est considérée comme un indicateur de la sensibilité à la fragilisation par l'hydrogène. Selon l'expérience mentionnée dans la référence [5], une valeur maximale acceptable de 350 HV3 est considérée pour la dureté de la zone affectée par la chaleur (ZAT) afin d'éviter la fissuration à froid. Il est important de souligner que cette valeur n'est pas universelle et ne s'applique pas à tous les matériaux. Cependant, pour un matériau spécifique, plus la dureté de la microstructure est élevée, plus sa sensibilité à la fissuration à froid est élevée.

La dureté de la ZAT est influencée à la fois par la composition chimique du matériau et par la vitesse de refroidissement lors du soudage.

II. 2 Composition d'un alliage :

La microstructure métallurgique d'une soudure peut être déterminée approximativement par le diagramme Schaeffler lorsque sa composition chimique est connue. Cette méthode consiste à calculer le chrome équivalent et le nickel équivalent

- Chrome équivalent : $(Cr)_{eq} = (\%Cr) + 1,5(\%Si) + (\%Mo) + 0,5(\%Nb)$
- Nickel équivalent : $(Ni)_{eq} = (\%Ni) + 0,5(\%Mn) + 30(\%C)$



II.3 Vitesse de refroidissement :

La composition chimique de l'alliage influence la facilité d'obtention de la martensite (phénomène de trempe). Cependant, c'est le cycle thermique qui détermine la proportion de martensite formée dans la zone affectée par la chaleur (ZAT). À haute température, l'acier se trouve dans un état austénitique. Lorsque le refroidissement est extrêmement rapide, les atomes de soluté n'ont pas suffisamment de temps pour diffuser. La ZAT se transforme alors en martensite, comme illustré dans le graphe de la **Figure 44**.

Pour des vitesses de refroidissement intermédiaires, une diffusion des atomes de soluté se produit sur de courtes distances, ce qui conduit à la formation de bainite. Pour des vitesses de refroidissement assez lentes, les atomes de soluté ont suffisamment de temps pour se déplacer, et l'austénite se transforme en perlite. Les températures de début et de fin de la transformation martensitique sont indiquées par Ms et Mf respectivement [6].

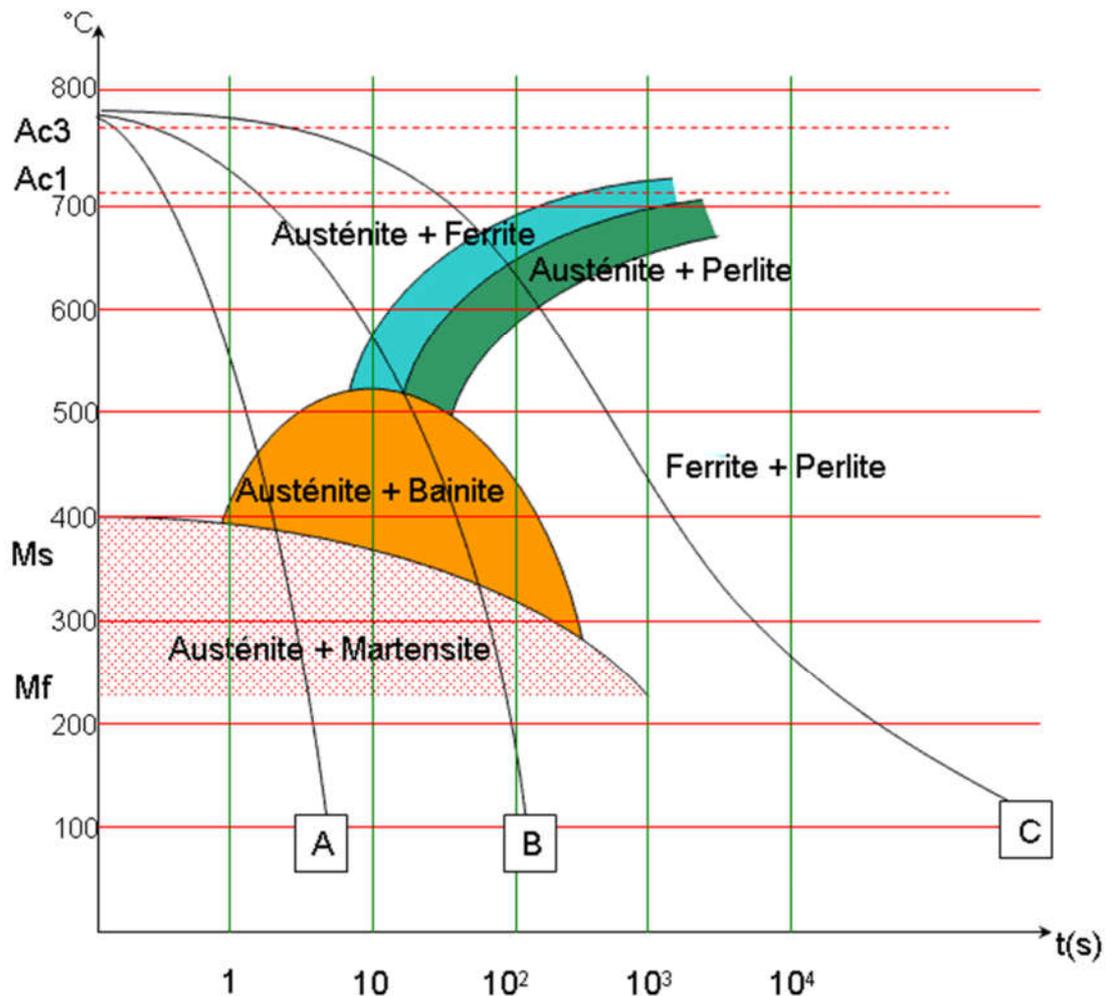


Figure 44 transformation de ZAT lors du refroidissement

II.4 Rôle de l'hydrogène :

Dans l'opération de soudage, l'hydrogène provenant de l'humidité et d'autres sources entre dans le bain de fusion sous forme atomique et se diffuse vers le métal de base. Une partie de l'hydrogène se diffuse vers l'extérieur au cours de la solidification. Une partie est piégée dans les défauts tels que les lacunes, joints de grains, micro-cavités *etc.* La dernière partie appelée hydrogène diffusible désigne l'hydrogène qui peut se diffuser librement vers le métal de base à partir du métal fondu. L'hydrogène diffusible est le facteur causal [7, 8] de la fissuration à froid. Cela a été justifié par le fait qu'un

postchauffage à basse température (100- 150°C) élimine le plus souvent la fissuration à froid, car le postchauffage permet de chasser l'hydrogène diffusible efficacement. Mais cette température n'est pas assez élevée pour chasser l'hydrogène piégé.

L'hydrogène est le plus petit des atomes. Son faible rayon atomique de $5,3 \cdot 10^{-2}$ nm lui permet de s'insérer dans la structure des aciers. Pour les structures cubiques centrées (Fe_{α} , ferrite, bainite, perlite ou martensite, phase α), l'hydrogène peut s'insérer dans les 12 sites tétraédriques de rayon $3,7 \cdot 10^{-2}$ nm tandis que pour les structures cubiques à faces centrées (Fe_{γ} , austénite, phase γ), il peut s'introduire dans les 6 sites octaédriques de rayon $5,2 \cdot 10^{-2}$ nm (Figure 45) [9].

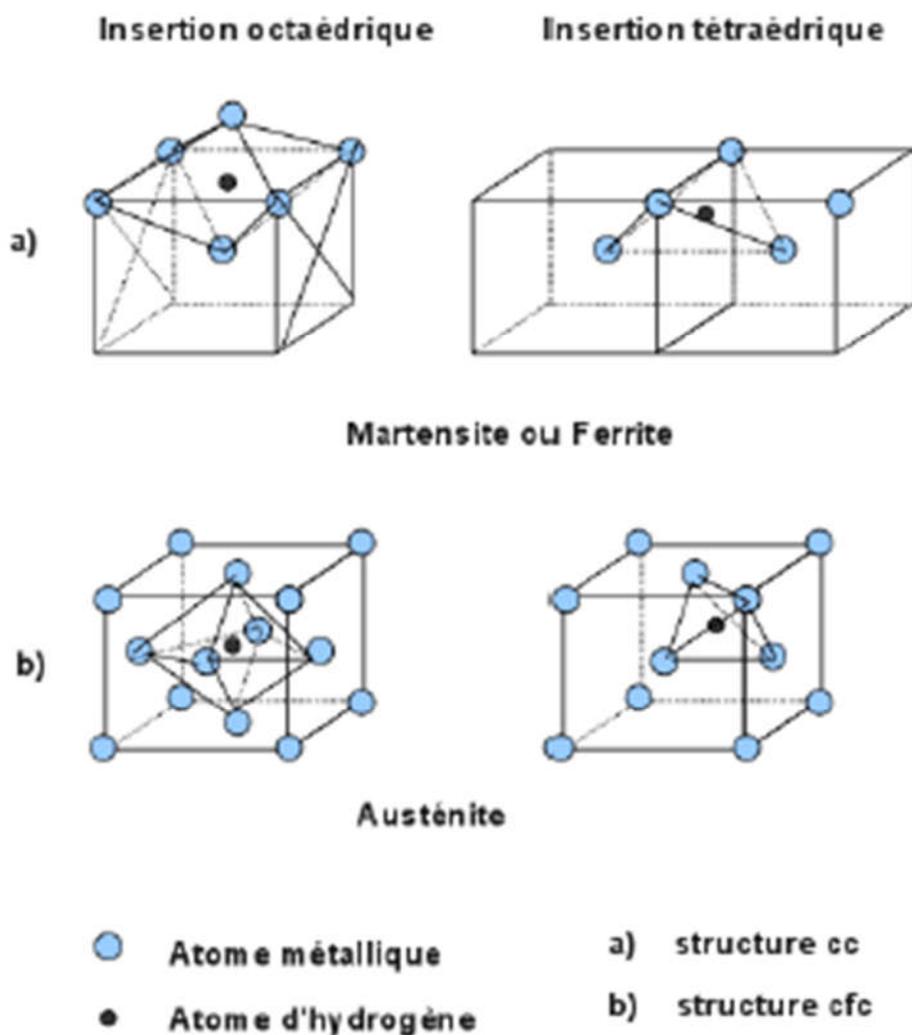


Figure 45 insertion d'hydrogène

II.5 Sources et diffusion de l'hydrogène :

D'après [ISO 3690], les principales sources d'hydrogène sont :

1. l'humidité présente et captée dans les flux et les enrobages des électrodes ;
2. les autres éléments contenant de l'hydrogène susceptibles de se décomposer à la chaleur de l'arc ;
3. l'huile, les impuretés et la graisse à la surface de la tôle ou bien piégées dans les couches superficielles des fils-électrodes ;
4. l'humidité atmosphérique lors du soudage.

L'hydrogène qui peut être absorbé par le bain de fusion dépend du type de soudage que l'on utilise. Par exemple, pour un soudage à l'arc avec une électrode enrobée, la source principale est l'humidité présente dans le flux, c'est-à-dire l'électrode elle-même.

La fissuration à froid peut se produire soit dans la zone affectée par la chaleur (ZAT), soit dans le métal fondu. La manière dont l'hydrogène se diffuse joue un rôle déterminant dans la zone où les fissures apparaîtront.

Dans le cas où le métal fondu subit une transformation perlitique tandis que le métal de base subit une transformation martensitique, les isothermes TF et TMs sont décalées d'un intervalle de temps correspondant au déplacement de l'électrode sur la distance AB. La transformation perlitique se produit à une température plus élevée que la transformation martensitique. Ainsi, en haut de la ligne de liaison dans l'intervalle AB, le métal fondu devient ferrito-perlitique, où la solubilité de l'hydrogène est moins importante mais le coefficient de diffusion est plus élevé. En revanche, en bas de la ligne de liaison dans l'intervalle AB, le métal de base est toujours austénitique. Cela entraîne une diffusion de l'hydrogène du métal fondu vers le métal de base. Comme l'hydrogène se diffuse moins facilement dans l'austénite que dans la ferrite, il ne se diffuse pas très profondément dans la ZAT. Lorsque l'isotherme TMs est atteinte, la ZAT se retrouve dans un état martensitique en sursaturation d'hydrogène. Par conséquent, la fissuration à froid se produit plus facilement dans la ZAT.

Dans le cas où le métal fondu est plus trempant que le métal de base (**Figure 46**), il subit une transformation martensitique au point A. Au contraire, le métal de base se transforme en perlite au point B. Au-dessus de l'intervalle AB, le métal fondu est en phase austénitique dans laquelle, l'hydrogène est moins diffusible. En dessous de l'intervalle AB, le métal de base est devenu perlite. Cela permet à l'hydrogène de se

diffuser plus profondément dans le métal de base. Lors de l'arrivée de l'isotherme T_{Ms} , c'est le métal fondu qui devient martensite en sursaturation d'hydrogène. Donc, la fissuration à froid se produit plus aisément dans le métal.

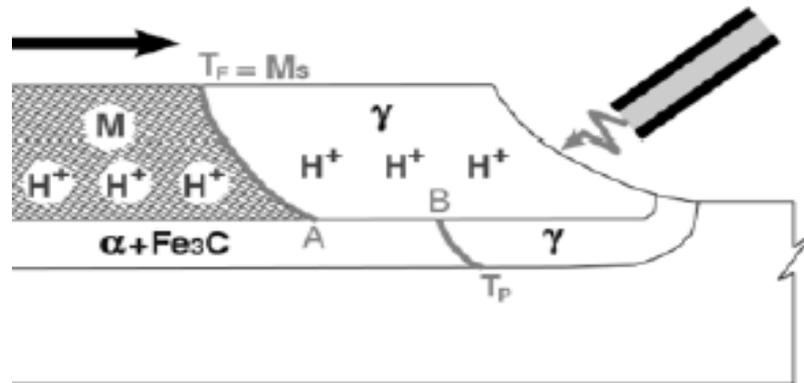


Figure 46 emprisonnements de l'hydrogène

II.6 Prévention de la fissuration à froid :

Les méthodes de prévention de la fissuration à froid consistent à réduire au moins l'un des trois facteurs qui contribuent à ce phénomène. Les avancées dans la fabrication des aciers ont permis de produire des aciers avec une teneur en carbone équivalent plus faible, ce qui rend la microstructure de la ZAT moins sensible à la fissuration à froid et améliore globalement la soudabilité.

Une méthode efficace pour prévenir la fissuration à froid est de réduire la teneur en hydrogène, soit en utilisant des procédés de soudage intrinsèquement moins producteurs d'hydrogène, soit en appliquant des techniques telles que le préchauffage ou le post-chauffage pendant le soudage. Des études, telles que celle réalisée par [3], ont démontré que l'utilisation de paramètres de soudage appropriés peut considérablement réduire la teneur en hydrogène. Par exemple, pour le soudage à l'arc avec électrode enrobée, les revêtements de type basique génèrent une teneur en hydrogène plus faible que les revêtements de type rutile. L'énergie de soudage a également un impact significatif sur la teneur en hydrogène. L'utilisation d'une énergie élevée implique une vitesse de refroidissement plus lente, ce qui favorise le dégazage de l'hydrogène et réduit sa teneur. Le préchauffage ou le post-chauffage agissent à la fois sur le dégazage de l'hydrogène et sur la vitesse de refroidissement en la ralentissant, ce qui permet de diminuer la formation de martensite

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.

III. La Fissuration à Chaud (FAC) :

La fissuration à chaud se produit à des températures élevées pendant le refroidissement du bain de fusion lors du soudage. Lors de la solidification de la soudure, des cristaux se forment et se propagent de la zone de liaison vers le centre et la surface de la soudure. Cette solidification entraîne d'importantes contractions qui peuvent provoquer la séparation des cristaux, surtout si la surface de la soudure n'est pas suffisamment lisse et présente des ondulations.

Les fissures à chaud sont généralement interdendritiques et se développent le long de l'axe du cordon de soudure. Les contraintes jouent un rôle majeur dans la formation de ces fissures. Elles peuvent être causées par une limite d'élasticité élevée, les contractions pendant la solidification (ce qui favorise les contraintes, notamment dans les aciers à forte teneur en carbone), ou la présence de cordons concaves qui n'ont pas assez de matière pour se dilater (par exemple, en cas de vitesse de soudage trop élevée).

Les aciers inoxydables austénitiques, ainsi que les aciers inoxydables ferritiques (SA) et austéno-ferritiques (AF), sont particulièrement sensibles à la fissuration à chaud. Pour prévenir ce phénomène, on tente d'introduire une faible quantité de ferrite dans la microstructure de la soudure (environ 3-10%), ce qui permet de piéger les impuretés et réduire la sensibilité à la fissuration. Cependant, il est important de noter que plus la soudure est réalisée à des températures élevées, plus il y a de risques de former de la ferrite et de dépasser la limite de 10%.

III.1 Facteurs influent sur la fissuration a chaud :

Ségrégation d'impuretés :

Tels que S et P pour les aciers dont les teneurs cumulées dépassent 0,015% (et B aussi) car forment des composés à bas point de fusion.

Le Si est un élément d'impureté pour Cu et Ni.

Pour l'Al, risque si Si entre 0,5-1,5% et/ou Mg entre 0,5-2,5% dans le BF (plus ou moins = pas de risque).

Contraintes résiduelles au retrait :

amplifié selon le coefficient de dilatation : crée la fissure autour de la température de solidification via bridage (forcé ou naturel de la pièce) ou épaisseur importante des pièces.

L'inox A ou l'Aluminium ont un coefficient élevé de dilatation, donc de retrait.

Forme du cordon :

Une forme concave facilite la FAC, ou trop bombé, ou trop étroit par rapport à sa largeur.

Carbone en quantité importante :

Le C est un élément fondant, il abaisse la température de solidification, donc augmente l'intervalle de solidification, donc la zone à risque de FAC.

Alu : les alliages trempant sont sensibles (6xxx beaucoup, 2xxx, 7xxx), ainsi que les alliages haute résistance. Les alliages sans TT ne sont pas sensibles (1xxx, 3xxx, 4xxx, 5xxx).

III.2 Méthodes de Prévention de (FAC) :

- **Choix de l'acier :**

Choisir un acier a taux d'impuretés faible teneurs cumulées de S et P inférieures à 0.015%. Faible taux général d'impuretés.

- **Acier a faible taux de carbone :**

Faible intervalle de solidification dans le diagramme Fe-C (tout en haut), donc faible potentiel de ségrégation.

- **Souder a l'électrodes à enrobage basique :**

Car il élimine le S et le P mieux que des rutils.

- **Souder à froid :**

Environ 10kJ/cm pour les aciers, 8kJ/cm maxi pour les nickel et faible Vitesse d'avance, pas de préchauffage pour limiter la ségrégation.

- **Chanfrein ouvert :**

Pour diminuer les contraintes résiduelles un rapport Largeur / Hauteur > 0.7 ou procédé à chanfrein très étroit (5xx)

- **Utiliser un procédé limitant le risque :**

Résistance, friction linéaire, 5xx, friction malaxage...etc

- **Nettoyer les surfaces.**
- **Forme de cordon convexe.**
- **Limiter le bridage.**

Et pour l'aluminium :

- Choix d'un métal d'apport en alliage non sensible pour réduire le retrait type 5xxx ou 4xxx.
- Refroidissement lent.
- Taux de Si et Mg en dehors des zones à risque.
- Éviter les cratères en début et fin de cordon.
- Apport de métal d'apport suffisant.

IV. Fissures par arrachement lamellaire:

Ces fissures se forment lorsque des contraintes sont appliquées dans la direction de l'épaisseur d'un produit laminé, au niveau d'une soudure sollicitant le joint soudé. Elles se développent par décollement le long des plans d'inclusions présents dans le métal de base, notamment pour des épaisseurs supérieures à 25 mm.

Pour prévenir ces fissures, il est essentiel de veiller à une conception adéquate du joint soudé et de choisir un acier présentant un minimum d'inclusions. En concevant correctement le joint soudé, on peut réduire les contraintes qui s'exercent sur la soudure et ainsi diminuer le risque de fissuration. Le choix d'un acier avec un faible contenu en inclusions est également important, car les inclusions peuvent servir de points de départ aux fissures. En optant pour un acier de meilleure qualité, on réduit la sensibilité à la fissuration.

IV.1 COMMENT EVITER L'ARRACHEMENT LAMELLAIRE :

- Voir la géométrie du joint avant soudage.
- Limiter les contraintes perpendiculaires à la peau.
- Optimiser la procédure de soudage. Séquence de soudage. Beurrage etc...
- Choisir des aciers à caractéristiques garanties dans le sens travers court

V. Fissure cause par POROSITES :

- Ce sont des petites bulles de gaz qui n'ont pu se dégager lorsque le bain de fusion était liquide (Flocons).

V.1 ORIGINE :

- Dégagement :
- D'hydrogène.
- D'azote.
- De CO.
- De gaz sulfureux SO₂.

V.2 COMMENT EVITER LES POROSITES :

- Souder sur des pièces propres : Non humides, exemptes de rouille, non grasses, exemptes de calamine.
- Utiliser des produits d'apport désoxydants contenant du silicium, de l'aluminium.
- Utiliser une énergie de soudage moyenne :
- Energie trop faible = Bain trop froid.
- Energie trop forte = La quantité de gaz dans le bain de fusion augmente très rapidement.

Chapitre IV : Influence des élément d'addition sur le comportement en soudage (carbone équivalent)

I. Carbone équivalent et soudabilité :

L'équivalent carbone est un prédicteur important de la trempabilité, de la soudabilité et de la fissuration induite par l'hydrogène de l'acier [10]. Cependant, les soudeurs n'ont pas une compréhension fondamentale du fonctionnement de la prévisibilité de l'équivalent carbone des propriétés de l'acier. Si peu d'entre eux en ont une vague idée, la plupart d'entre eux n'ont jamais entendu parler d'équivalent carbone auparavant. Pas étonnant que la plupart des soudeurs rejettent la plupart des travaux impliquant des aciers faiblement alliés au motif que "ces aciers sont difficiles à souder" et disent par expérience que ces métaux sont durs et peuvent facilement se fissurer pendant ou après le soudage. La plupart des ferrailles sont liées à la réparation des aciers micro et faiblement alliés pour les pièces mécaniques. C'est dans ce contexte que cette étude a été menée pour étudier le niveau de compréhension parmi les soudeurs au sein de la communauté. De plus, initier les soudeurs à la capacité d'évaluation de l'équivalent carbone.

Le carbone équivalent est utilisé pour trouver les propriétés de l'acier si d'autres éléments d'alliage, en dehors du carbone, sont inclus [14]. Cependant, l'équivalence carbone était initialement limitée à une valeur numérique pour une composition d'acier. Cette valeur expliquait la teneur en carbone qui contribuerait à l'équivalence. L'équivalent carbone est une mesure de la tendance de la soudure à former de la martensite lors du refroidissement et à subir une rupture fragile [10]. Lorsque l'équivalence carbone est comprise entre 0,40 et 0,60, un préchauffage de la soudure peut être nécessaire. Cependant, une valeur d'équivalence carbone inférieure à 0,35 ne nécessite aucun préchauffage. Lorsque l'équivalent carbone est Supérieur à 0,60, un préchauffage est nécessaire et un post-chauffage peut être nécessaire. AWS indique que pour des teneurs équivalentes en carbone supérieures à 0,40 %, il existe un risque de fissuration dans la zone affectée thermiquement (ZAT) des bords et des soudures oxycoupés. Apparemment, le CE est rarement utilisé dans les normes d'ingénierie structurelle, limitant plutôt les pourcentages maximaux de certains éléments d'alliage. Les équivalents carbonés sont utilisés en soudage pour examiner les différents éléments d'alliage qui affectent la dureté de l'acier à souder [11]. Il est pertinent de comprendre que les fissures de refroidissement par hydrogène sont le défaut de soudage le plus courant dans l'acier. La fissuration induite par l'hydrogène est un facteur commun déterminant la soudabilité de l'acier.

Des valeurs plus élevées de carbone et d'autres éléments d'alliage ont tendance à augmenter la dureté de l'acier et à réduire la soudabilité.

carbone équivalent	soudabilité	préchauffage
Jusqu'à 0.35	excellent	Pas nécessaire
0.36 - 0.40	Très bonne	recommandé
0.41 - 0.45	bonne	nécessaire
0.46 - 0.50	moyen	nécessaire
Plus de 0.51	mauvaise	nécessaire

II. Calcule du carbone équivalent pour les aciers non alliés :

La formule à utiliser pour les aciers non alliés est en réalité un morceau de la formule complète de l'IIS (Institut International de soudure) qui ne reprend que le C et Mn :

$$C_{eq} = C + Mn/6$$

Cette formule n'est pas entièrement représentative de la trempabilité de ces matériaux. Mais elle est utilisée par convention.

III. Calcule du carbone équivalent pour les aciers faiblement alliés :

Pour les aciers faiblement alliés, on utilisera la plupart du temps la formule complète du C_{eq} de l'IIS. A noter qu'il en existe d'autres qui changent la pondération des éléments, tout en donnant des résultats du même ordre. Il se calcule sur les teneurs réelles des éléments.

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \text{ en \%}$$

Cette formule sous-entend qu'à teneurs égales, le Carbone est six fois plus trempant que le Manganèse (0,6% de Manganèse sont nécessaire pour obtenir la même trempabilité qu'avec 0,1% de Carbone).

**Chapitre V : Impact des élément
d'addition sur le phénomène de
fissuration :**

I. Impact de l'hydrogène :

Il est généralement admis que l'hydrogène réduit la déformation maximale à la rupture et rend ainsi le métal cassant [15]. Cependant, peu d'essais ont montré une diminution de la contrainte maximale due à la présence d'hydrogène dans le matériau. [12] citent des essais montrant que la génération d'hydrogène gazeux par charge électrolytique dans le fer conduit à une réduction significative de la contrainte maximale de rupture à des températures autour de 300K. En revanche, d'autres expériences, comme celles de Pussegoda et Tyson [13], ont montré que la présence d'hydrogène dans certains matériaux augmente la contrainte maximale.

Ces phénomènes de ramollissement et de durcissement peuvent être liés à la formation d'hydrures ou à des dommages de surface dus au gradient de contraintes introduit lors de la charge électrolytique. Mais le mécanisme semble difficile à mettre en évidence. Tous les travaux antérieurs ont bien documenté que l'hydrogène dans l'acier réduit la ductilité. La ductilité caractérise la capacité d'un matériau à se déformer plastiquement sans rupture. Des essais de traction mesurant l'allongement à la rupture et la striction ont été réalisés par [17] et ont montré une diminution de la ductilité pour les éprouvettes chargées en hydrogène. [16] ont spécifiquement étudié différentes régions de soudures en acier à haute résistance. Ses tests ont montré que la ductilité diminuait dans tous les domaines (métal d'apport, métal de base) en raison de la charge d'hydrogène.

II. Impact des impuretés :

Habituellement, dans ZF, la fissuration est associée à la présence d'impuretés, principalement du soufre et du phosphore (également du bore ou du cuivre), cumulativement supérieures à 0,015 % (le risque commence de 0,10 %, à 0,15 %, il est considéré comme un risque élevé). Le carbone des métaux de base avec des taux de dilution élevés (ϵ_{LS} élevé) favorise également cette fissuration. D'autre part, le manganèse réduit le risque de fissuration.

Le silicium est une impureté pour les alliages à base de cuivre et de nickel.

Pour l'aluminium, il existe un risque de fissuration si le bain de soudure a une teneur en silicium comprise entre 0,5 % et/ou 1,5 %, et/ou une teneur en magnésium comprise entre 0,5 % et 2,5 %, ces proportions étant plus ou moins exemptes de risque de fissuration.

III. Le Diagramme de Schaeffler :

Le diagramme de Schaeffler permet de Prédire la structure métallurgique d'un dépôt à l'état brut de soudage à partir de l'analyse chimique cela est fait pour Sélectionner un métal d'apport et Appréhender les risques métallurgiques.

Il est constitué de :

1. **Axe des abscisses** : Représentant le chrome équivalent, calculé par la somme de la teneur du chrome et des teneurs en autres éléments, (qui sont des éléments alphagènes : tel que le chrome, le molybdène, le silicium, le titane, le niobium, l'aluminium, le tungstène, et le zirconium) qui favorisent la structure ferritique d'un acier inoxydable affectés de coefficients représentant leur influence comparée à celle du chrome selon les formules suivantes :

- $\text{Éq. Cr} = \% \text{Cr} + \% \text{Mo} + [1,5 \times (\% \text{Si})] + [0,5 \times (\% \text{Nb})]$

- $\text{Éq. Cr} = \% \text{Cr} + \% \text{Mo} + [1,5 \times (\% \text{Si})] + [0,5 \times (\% \text{Nb})] + [8 \times (\% \text{Al})]$

2. **Axe des ordonnées** : Représentant le nickel équivalent, calculé par la somme de la teneur du nickel et des teneurs en autres éléments, (qui sont des éléments gammagènes : tel que le nickel, le carbone, l'azote, le cuivre, le cobalt, le manganèse) qui favorisent la structure austénitique d'un acier inoxydable affectés de coefficients représentant leur influence comparée à celle du nickel selon les formules suivantes :

- $\text{Éq. Ni} = \% \text{Ni} + [30 \times (\% \text{C})] + [0,5 \times (\% \text{Mn})]$

IV. Les risques métallurgiques sur le diagramme de Schaeffler :

- La structure **martensitique** : risque de fissuration à froid
- La structure **austénitique** : risque de fissuration à chaud
- La structure **ferritique** : risque de fragilisation par grossissement de grains (faible ductilité)
- La structure **austéno-ferritique** : risque de fragilisation par composés intermétalliques de phase sigma (Equivalent Cr > 25)

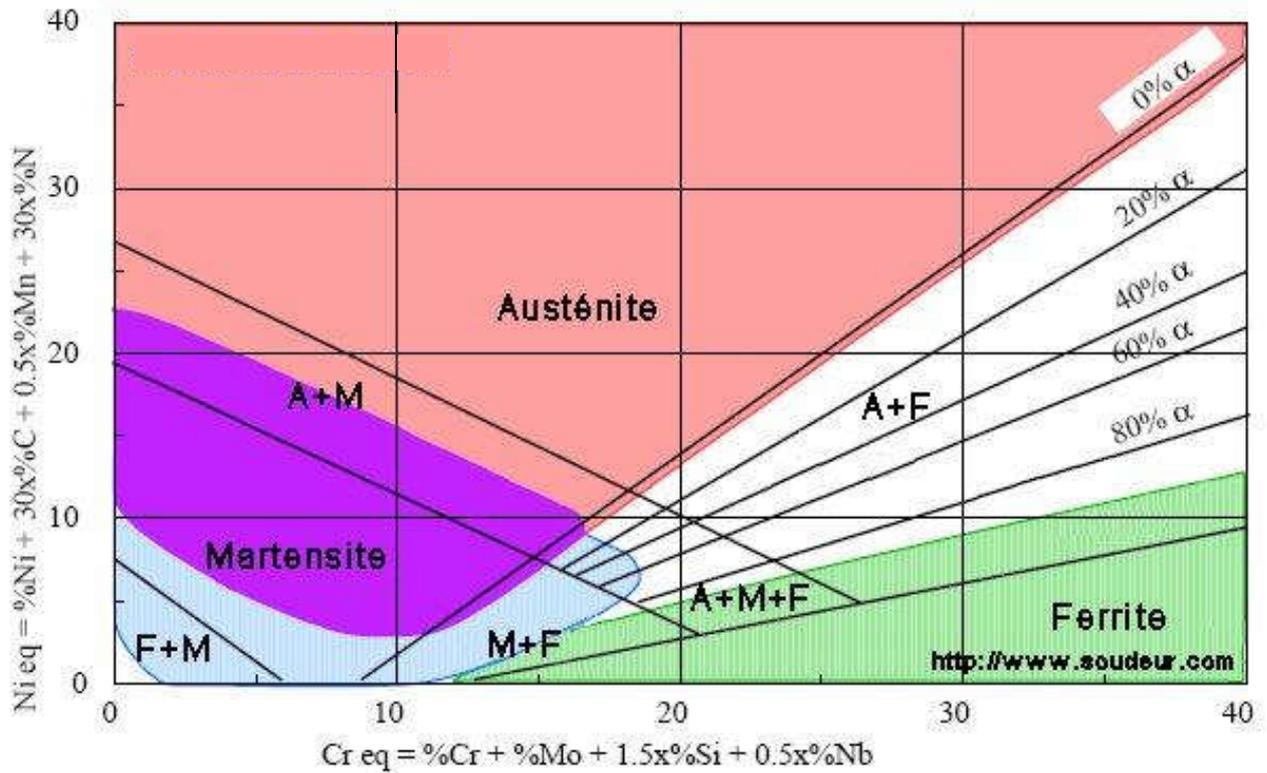


Figure 47 diagramme de Schaeffler

V. Le taux de dilution :

La dilution exprimée en pourcentage est le rapport entre la somme des volumes de métal de base fondu et la somme des volumes de l'ensemble de la zone fondue, du métal d'apport fondu et du métal de base fondu et il est Le pourcentage est déterminé à partir d'une coupe macrographique.

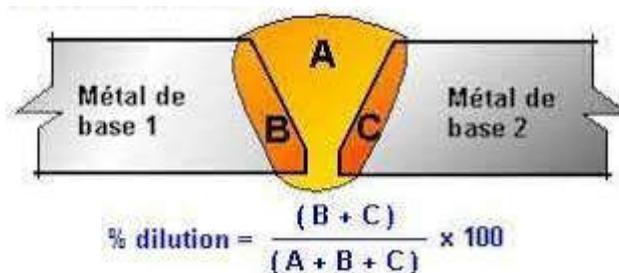


Figure 48 dilution lors du soudage

A : Représente le métal fondu du métal d'apport,

B et C : Représentent le métal fondu du métal des métaux de base.

VI. Variation du taux de dilution :

Le taux de dilution varie suivant plusieurs facteurs dont le procédé de soudage utilisé :

Procédé TIG /GTAW (141) : dilution d'environ 15 à 30 %.

Procédé ARC E.E./SMAW (111) : dilution d'environ 10 à 35 %.

Procédé MAG fil nu / GMAW (135) : dilution d'environ 20 à 40 %

Procédé MAG fil fourré / FCAW (136) : dilution d'environ 20 à 40 %

Procédé A.S.F. / SAW (121) : dilution d'environ 60 à 80 %

Pour un soudage sans métal d'apport dilution de 100 %

La dilution varie selon la géométrie et le type de préparation des bords à souder.

Il varie également en fonction de l'énergie de soudage appliquée, de la polarité et du transfert d'arc (intensité, tension et vitesse de soudage). Les taux de dilution des composants hétérogènes en acier au carbone et en acier inoxydable doivent être parfaitement adaptés afin que le métal en fusion contienne suffisamment de ferrite pour limiter le risque d'arrachement à chaud, mais également suffisamment austénitique pour limiter le risque de fissuration à froid.

Chapitre VI : Partie expérimentale

I. Préparation des éprouvettes :

1. Découpage des éprouvettes aux bonnes dimensions

$L = 200 \text{ mm}$

$A = 40 \text{ mm}$

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

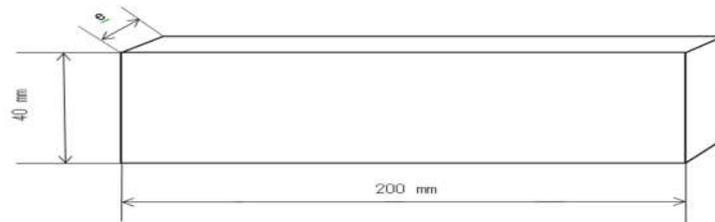


Figure 49 dimensions des éprouvettes

2. Découpage des éprouvettes au milieu pour préparer l'opération de soudage

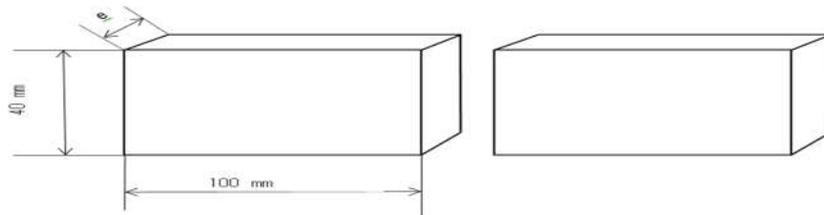


Figure 50 dimensions des éprouvettes découper

3. La préparation des éprouvettes a été faite au niveau du hall technologique a la faculté de technologie Chetouane

Le découpage avec une scie mécanique de type OLMO SMA3



Figure 51 scie mécanique OLMO SMA3

II. Assemblage Des Eprovettes :

La partie assemblage par soudage as été réaliser au niveau de l'atelier de soudage avec l'électrode enrobé rutile E6013 avec un machine de soudage de type SAM PRO PS 250 S



Figure 52 poste de soudure électrode enrobé SAM PRO PS 250 S

Le préchauffage a été fait avec les chalumeaux oxy-acetylene



Figure 1 chalumeaux oxy-acetylene

1) Epreuve de $e = 1 \text{ mm}$:



Figure 2 éprouvette de $e = 1 \text{ mm}$ non soudée



Figure 3 éprouvette de $e = 1 \text{ mm}$ soudée



Figure 4 éprouvette de $e = 1 \text{ mm}$ soudée avec préchauffage de 2 min



Figure 5 éprouvette de $e = 1 \text{ mm}$ soudée avec préchauffage de 5 min

2) Epreuve de $e = 2.5 \text{ mm}$:



Figure 5 éprouvette de $e = 2.5 \text{ mm}$ non soudée



Figure 6 éprouvette de $e = 2.5 \text{ mm}$ soudée



Figure 7 éprouvette de $e = 2.5 \text{ mm}$ soudée avec préchauffage de 2 min



Figure 8 éprouvette de $e = 2.5 \text{ mm}$ soudée avec préchauffage de 5 min

Eprouvette de $e = 3 \text{ mm}$:



Figure 9 éprouvette de $e = 3 \text{ mm}$ non soudée



Figure 10 éprouvette de $e = 3 \text{ mm}$ soudée



Figure 11 éprouvette de $e = 3 \text{ mm}$ soudée avec préchauffage de 2 min



Figure 12 éprouvette de $e = 3 \text{ mm}$ soudée avec préchauffage de 5 min

III. Partie Essai :

La partie des essais de traction a été effectuée au niveau du laboratoire de SDM de la faculté de technologie Chetouane. Sur une machine de traction 600KN



Machine de traction 600 KN

IV. Présentation des Résultats :

1. Les graphes de l'essai de traction :

Les graphes suivants ont été donnés par la machine de traction :

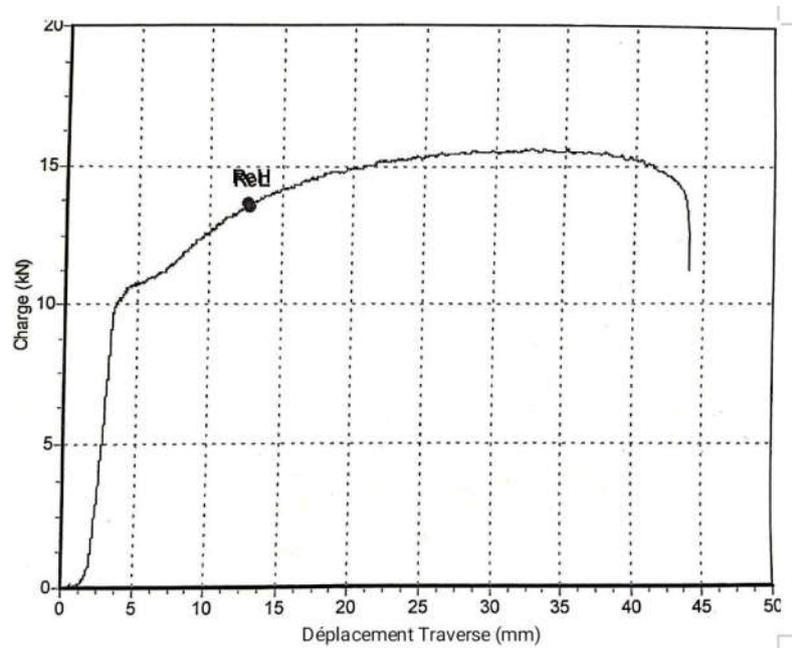


Figure 13 Eprovette sans soudure $e = 1 \text{ mm}$

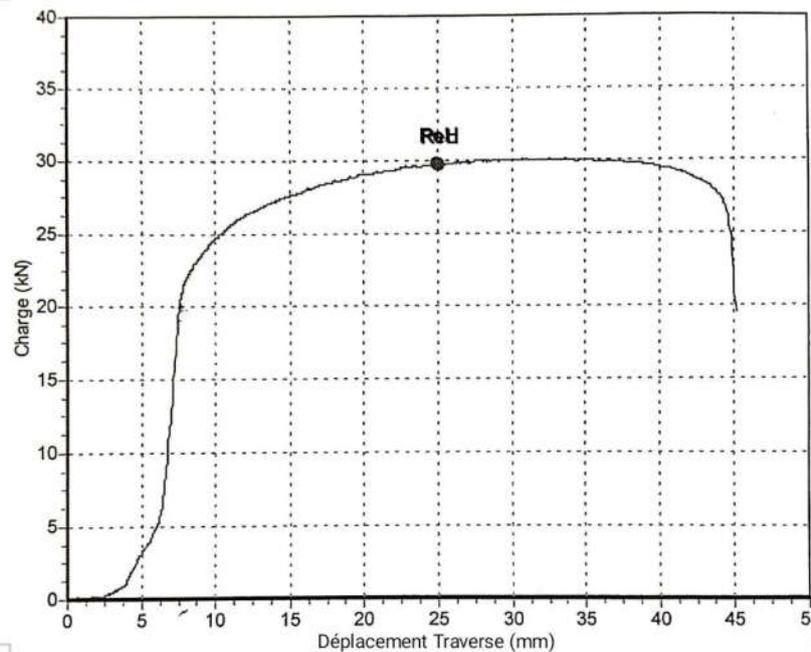


Figure 14 Eprovette sans soudure $e = 2.5 \text{ mm}$

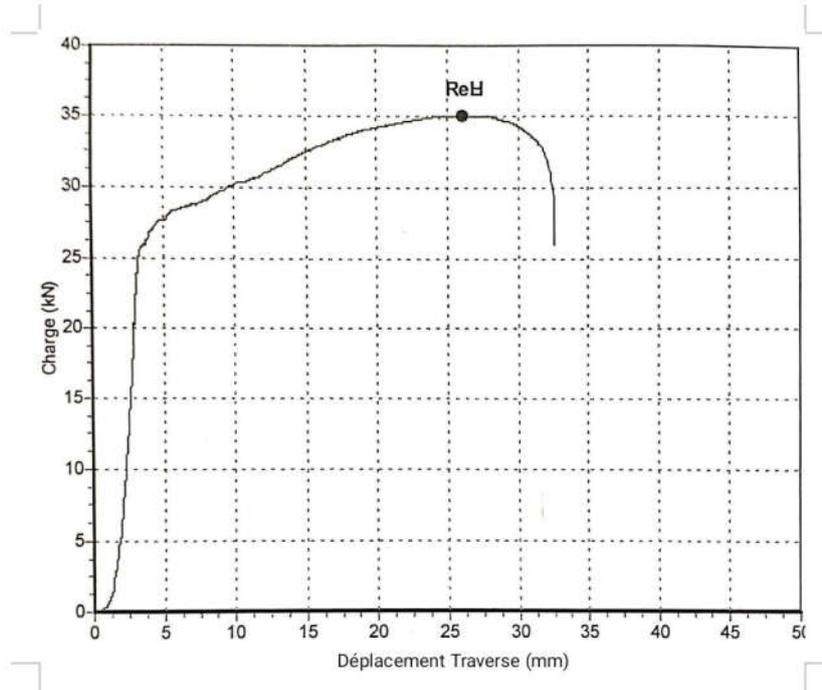


Figure 15 Eprouvette sans soudure e= 3 mm

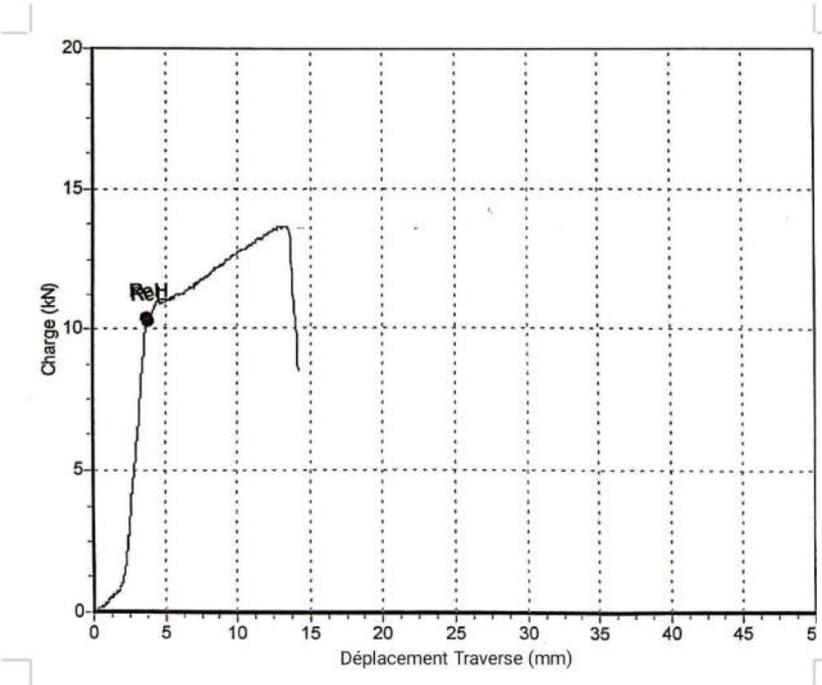


Figure 16 Eprouvette soudée sans préchauffage e= 1 mm

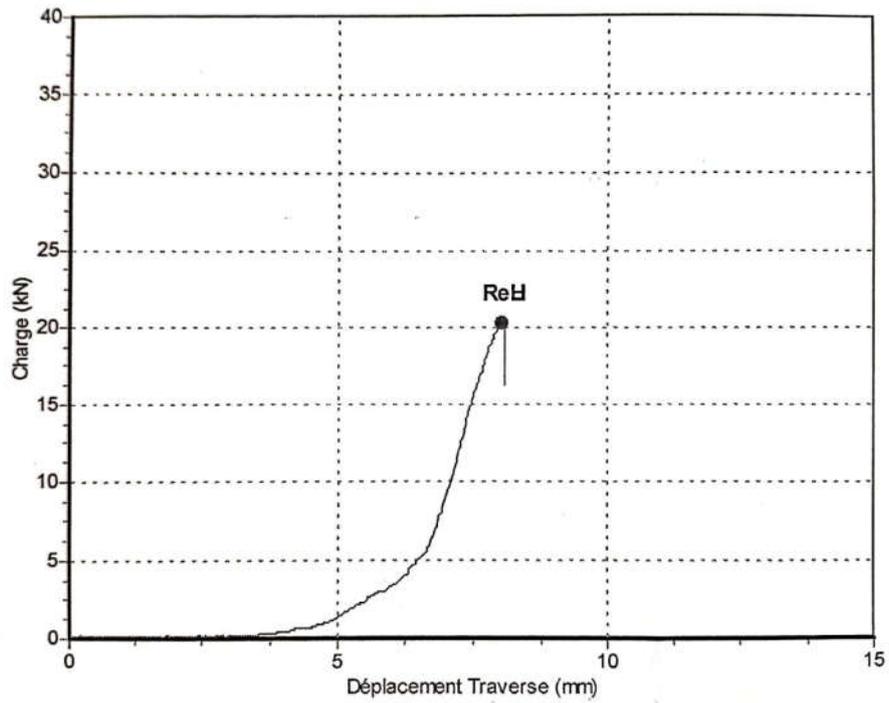


Figure 17 Eprouvette soudée sans préchauffage $e= 2.5$ mm

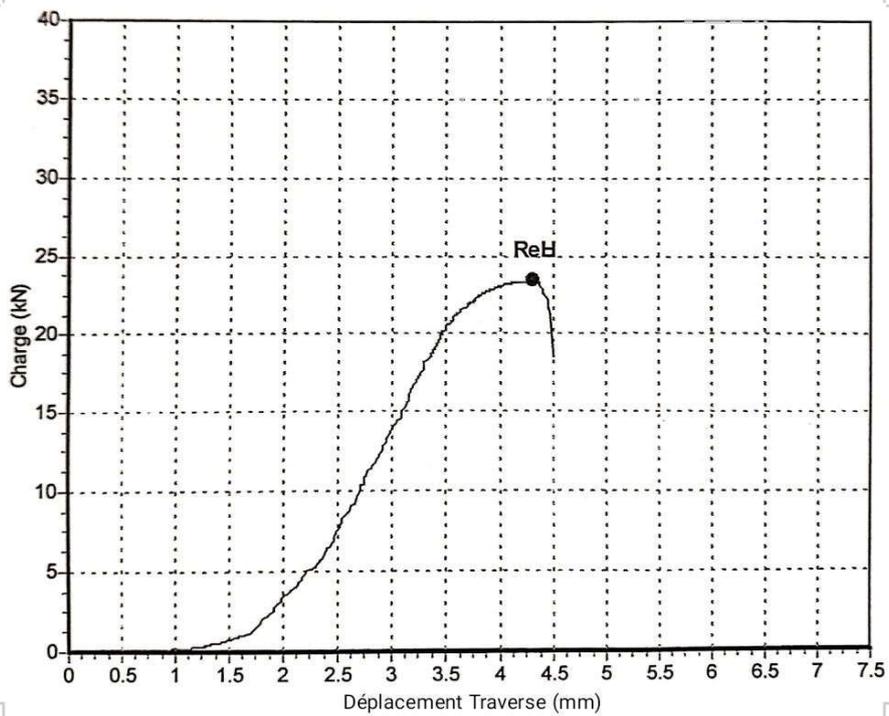


Figure 18 Eprouvette soudée sans préchauffage $e= 3$ mm

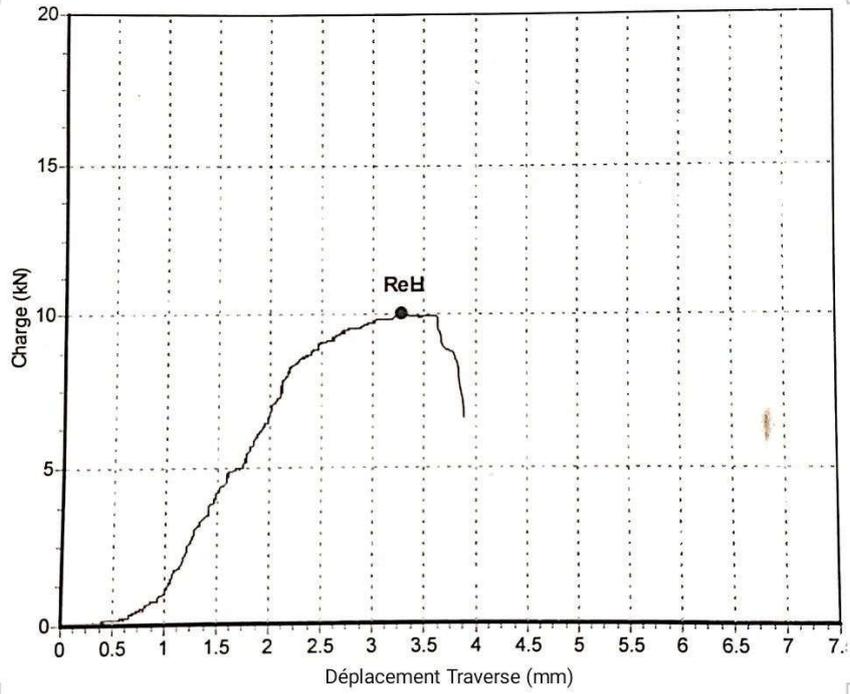


Figure 19 Epreuve soudée préchauffage 2 min $e = 1$ mm

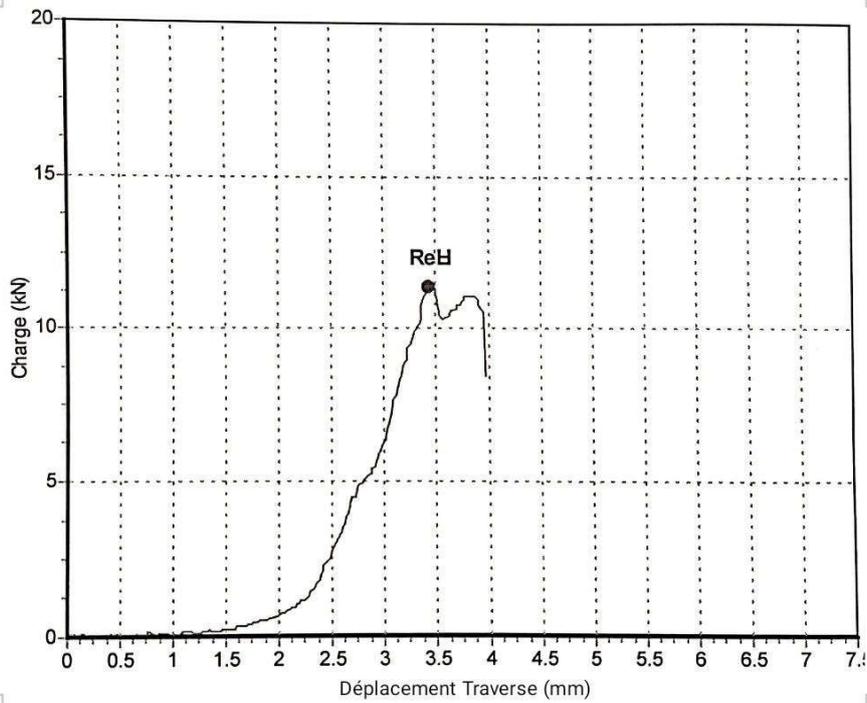


Figure 20 Epreuve soudée préchauffage 2 min $e = 2.5$ mm

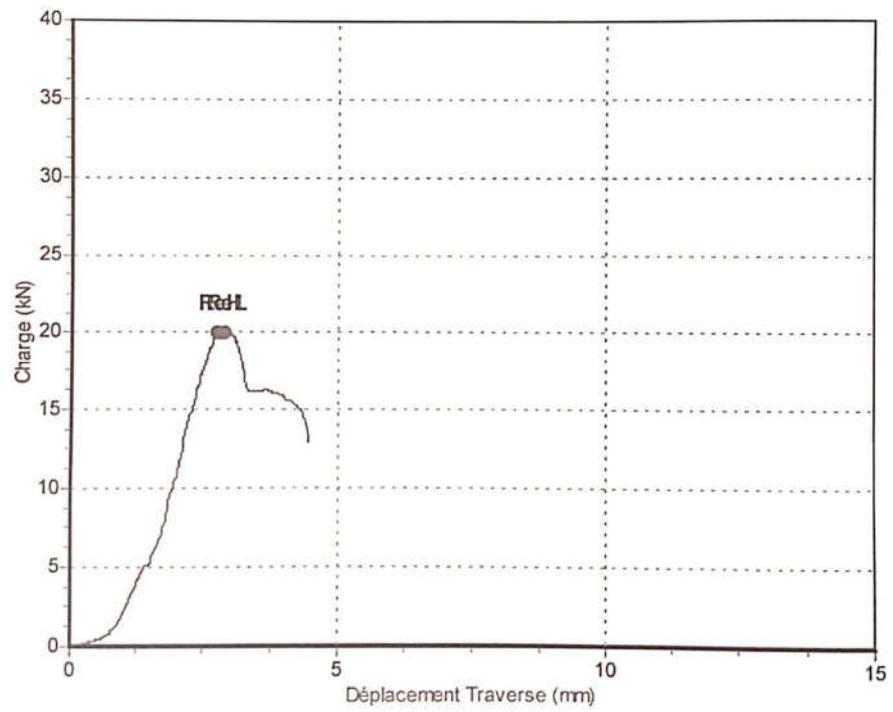


Figure 21 Eprouvette soudée préchauffage 2 min e= 3 mm

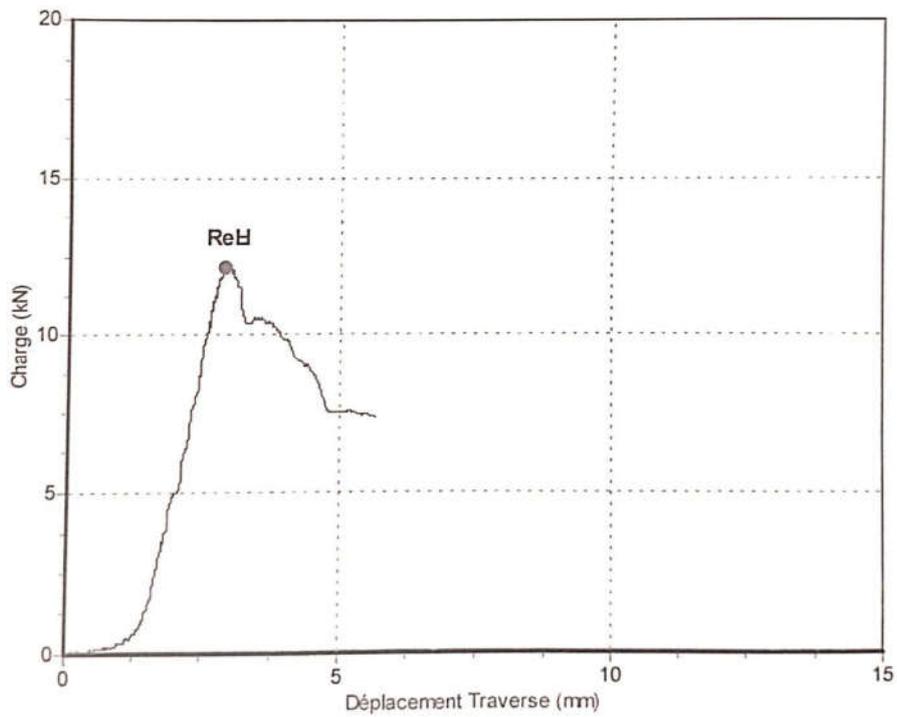


Figure 22 Eprouvette soudée préchauffage 5 min e= 1 mm

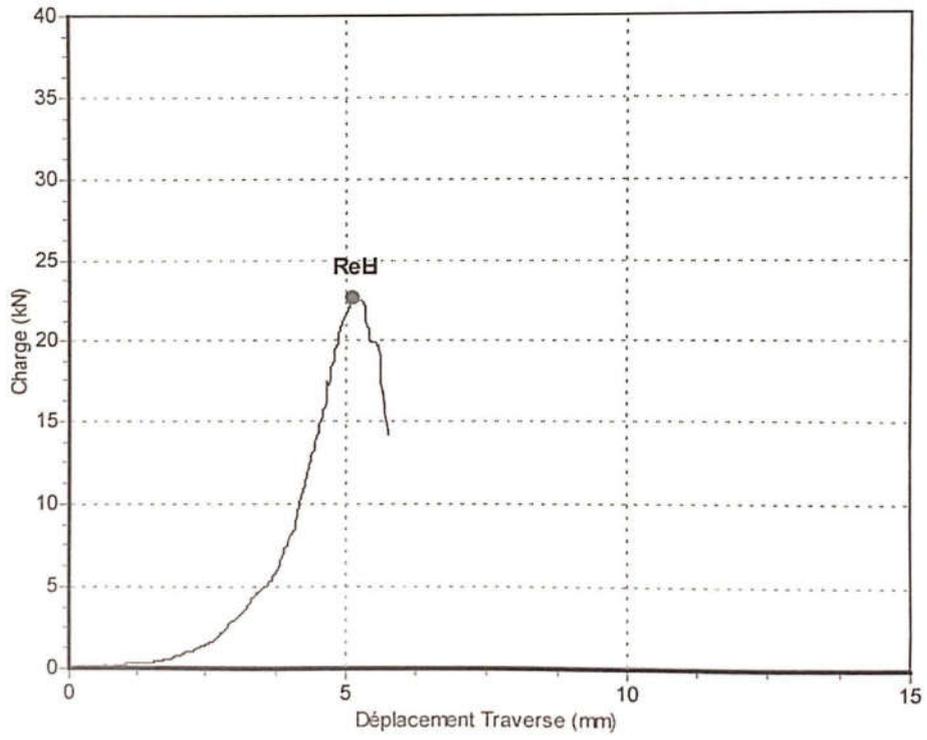


Figure 23 Eprovette soudée préchauffage 5 min $e = 2.5$ mm

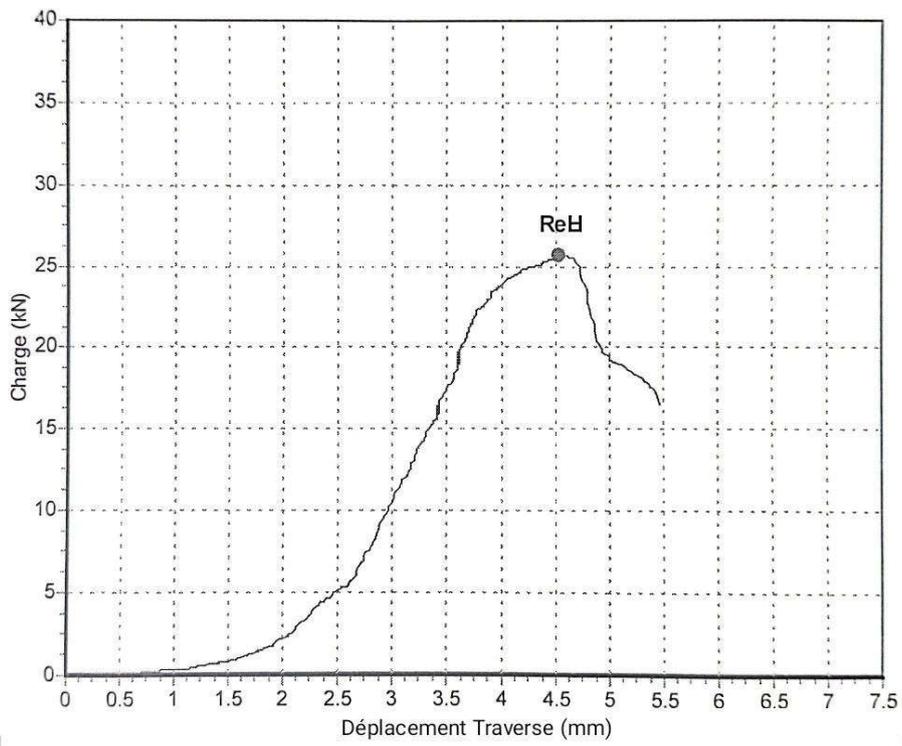


Figure 24 Eprovette soudée préchauffage 5 min $e = 3$ mm

2. Les éprouvettes après l'essai de traction :

1) Epreuve de $e = 1 \text{ mm}$:



Figure 25 éprouvette de $e = 1 \text{ mm}$ non soudée après traction



Figure 26 éprouvette de $e = 1 \text{ mm}$ soudée après traction



Figure 27 éprouvette de $e = 1 \text{ mm}$ soudée avec préchauffage de 2 min après traction



Figure 28 éprouvette de $e = 1 \text{ mm}$ soudée avec préchauffage de 5 min après traction

2) Epreuve de $e = 2.5 \text{ mm}$:



Figure 29 éprouvette de $e = 2.5 \text{ mm}$ non soudée après traction



Figure 30 éprouvette de $e = 2.5 \text{ mm}$ soudée après traction



Figure 31 éprouvette de $e = 2.5 \text{ mm}$ soudée avec préchauffage de 2 min après traction



Figure 32 éprouvette de $e = 2.5 \text{ mm}$ soudée avec préchauffage de 5 min après traction

3) Epreuve de $e=3\text{ mm}$:



Figure 33 éprouvette de $e=3\text{ mm}$ non soudée après traction



Figure 34 éprouvette de $e=3\text{ mm}$ soudée après traction



Figure 35 éprouvette de $e=3\text{ mm}$ soudée avec préchauffage de 2 min après traction



Figure 36 éprouvette de $e=3\text{ mm}$ soudée avec préchauffage de 5 min après traction

V. Interprétation des résultats :

On remarque que pour les éprouvettes non soudées la résistance à la rupture R_m est plus importante et la déformation des matériaux est beaucoup plus conséquente que les éprouvettes soudées. Les éprouvettes préchauffées à 2 minutes ont une résistance à la rupture R_m moindre que les éprouvettes soudées directement, les éprouvettes préchauffées à 5 minutes ont une résistance à la rupture R_m beaucoup plus importante que les éprouvettes soudées directement et les éprouvettes préchauffées à 2 minutes. Leur résistance à la rupture est presque comparable au métal de base mais la déformation avant la rupture est très minime. Et plus l'épaisseur du métal soudé est importante plus la différence est haute. On a remarqué que lors du soudage les éprouvettes préchauffées étaient plus facilement soudables que les éprouvettes non préchauffées, le préchauffage a donné une bonne coulabilité du bain de fusion sur les pièces soudées.

VI. Conclusion :

Le préchauffage avant soudure est pratiqué souvent pour minimiser le risque de fissuration lors du soudage car il réduit les contraintes thermiques qui se développent en raison de la différence de température entre la zone chauffée et le reste de la pièce.

Mais également pour éliminer l'humidité de la pièce qui peut provoquer elle aussi des fissurations on se vaporisant. Elle réduit également la vitesse de solidification car dans certains matériaux comme l'acier allié cela peut entraîner des microfissures à froid (fissure de solidification).

Le préchauffage contribue également à réduire les contraintes résiduelles résultant du refroidissement rapide après le soudage. Ces contraintes résiduelles peuvent affecter les propriétés mécaniques de la soudure et augmenter le risque de fissuration à long terme.

Le préchauffage peut contribuer à améliorer la qualité de la soudure en réduisant les défauts tels que les porosités, les inclusions et les soufflures. En chauffant le matériau avant le soudage, les impuretés et l'humidité peuvent être éliminées, ce qui favorise une meilleure fusion et pénétration de la soudure. Il est important de noter que le préchauffage n'est pas toujours nécessaire et son utilisation dépend du matériau spécifique, de l'épaisseur de la pièce, du procédé de soudage et des exigences de conception. Les paramètres de préchauffage appropriés sont généralement définis par les codes et les normes de soudage.

Conclusion général

Ce travail présente un état de l'art sur l'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. Les effets du préchauffage et du post chauffage ont été présentés ainsi que l'influence des éléments d'addition.

Le résultat mesuré démontre que les éléments d'addition ont une grande influence sur le phénomène de fissuration des soudures. En effet, pour la valeur du carbone équivalent inférieure à 0.35% il y a peu de risque de fissuration lors de la trempe.

Pour le préchauffage des pièces soudées, ce travail a démontré son importance selon la forme géométrique et l'épaisseur, et les risques liés à ne pas préchauffer les zones à souder, en effet le préchauffage est nécessaire quand le carbone équivalent est supérieur à 0.45%.

Ces températures de préchauffage peuvent être déduites du graphique tr800-500.

Bibliographie :

- [1] Adda Y., Dupouy JM., Philibert J. et Quéré Y. (1987). *Éléments de Métallurgie physique* (6 tomes). Ed. INSIN.
- [2] H. W. Lee : Weld metal hydrogen-assisted cracking in thick steel plate weldments. *Materials Science and Engineering, A 445-446* : 328 - 335, 2007.
- [3] M. Pitrun : The effect of welding parameters on levels of diffusible hydrogen in weld metal deposited using gas shielded rutile flux cored wires. Thèse de doctorat, University of Wollongong, 2004.
- [4] N. N. Yurioka et H. Suzuki : Hydrogen assisted cracking in C-Mn and low alloy steel weldments. *International Materials Reviews, vol. 35, no. 4, pp. 217-249*, 1990.
- [5] J. Dearden and H. O'Neill : *Trans. Inst. Weld., vol. 3, pp. 203-214*, 1940.
- [6] N.T. Trinh : Sur la modélisation du comportement thermomécanique et métallurgique des aciers. Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique et ENSTA ParisTech, 2008.
- [7] J.-B. Leblond : Etude théorique et numérique de la diffusion de l'hydrogène dans les aciers. Thèse de doctorat d'état, *Université Pierre et Marie Curie Paris VI*, 1984.
- [8] P. Nevasmaa : Predictive model for the prevention of weld metal hydrogen cracking in high-strength multipass welds. *Thèse de doctorat, University of Oulu*, 2003.
- [9] A. M. Brass, J. Chêne et L. Coubreuse : Fragilisation des aciers par l'hydrogène. Technical report, *Techniques de l'Ingénieur, traité Matériaux métalliques*, 2005.
- [ISO 3690] ISO3690 : Détermination de la teneur en hydrogène dans le métal fondu pour le soudage à l'arc des aciers ferritique. Norme International ISO, 2000.

- [10] Kasuya, T. and Yurioka, N. (1991) Carbon Equivalent and Multiplying Factor for Hardenability of Steel. The 72nd Annual AWS Meeting, Detroit, Mich, 15-19 April 1991.
- [11] Reeve, L. (1939) Metallurgy of Ferrous Welding, Note on Cambridge Welding Conference. Transactions of the Institute of Welding, 2, 7-18.
- [12] E. Sirois et H. K. Birnbaum : Effects of hydrogen and carbon on thermally activated deformation in nickel. Technical report, *University of Illinois at Urbana-Champaign*, 1991.
- [13] N. Yurioka, M. Okumura, T. Kasuya, et H. J. U. Cotton : Prediction of haz hardness of transformable steels. *Metals Construction 19 (4) 217R-223R*. 1987.
- [14] Ito, I. and Bessyo, K. (1968) Cracking Parameter of High Strength Steels Related to HAZ Cracking. Journal of the Japan Welding Society, 9, 983-991.
- [15] N. Yurioka, M. Okumura, T. Kasuya, et H. J. U. Cotton : Prediction of haz hardness of transformable steels. *Metals Construction 19 (4) 217R-223R*. 1987.
- [16] J. Cwiek : Hydrogen degradation of high strength weldable steels. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 20 :223-226, 2007.
- [17] F. Lecoester, J. Chêne et D. Noel : Hydrogen embrittlement of the ni-base alloy 600 correlated with hydrogen transport by dislocations. *Materials Science and Engineering*, 1999.