

Ecole Nationale Polytechnique



Département de Métallurgie  
Mémoire de Fin d'Etudes  
Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en  
génie des matériaux

Etude de la soudabilité hétérogène des aciers  
inoxydables 316L /aciers au carbone A576 :  
modélisation et expérimentation

Hibet El Rrahmane ADJMI

Sous la direction de M. M. DJEGHLEL (Professeur)

Présenté et soutenue publiquement le (24/06/2018)

**Composition de jury :**

Président	M. K.ABADLI	Docteur	ENP
Promoteur	M. DJEGHLEL	Professeur	ENP
Co-promoteur	M. A. BOUDIAF	Docteur	EMP
Examineur	M. H.YOUSFI	Professeur	ENP
Examineur	M. A .KASSER	Docteur	ENP



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département de Métallurgie  
Mémoire de Fin d'Etudes  
Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en  
génie des matériaux

Etude de la soudabilité hétérogène des aciers  
inoxydables 316L /aciers au carbone A576 :  
modélisation et expérimentation

Hibet El Rrahmane ADJMI

Sous la direction de M. M. DJEGHLEL (Professeur)

Présenté et soutenue publiquement le (24/06/2018)

**Composition de jury :**

Président	M. K.ABADLI	Docteur	ENP
Promoteur	M. DJEGHLEL	Professeur	ENP
Co-promoteur	M. A. BOUDIAF	Docteur	EMP
Examineur	M. H.YOUSFI	Professeur	ENP
Examineur	M. A .KASSER	Docteur	ENP

## **Dédicace**

**À mon père** : Tu es le meilleur exemple qui soit, si tu savais ô combien j'aimerais te ressembler, papa... J'y arriverai un jour, sans cesser de m'améliorer. Tu m'as bâtie, construite pour être forte

Tu as su m'inculquer le sens de la responsabilité, de l'optimisme et de la confiance en soi face aux difficultés de la vie

Je te dois ce que je suis aujourd'hui papa et ce que je serai demain et je ferai toujours de mon mieux pour rester ta fierté et ne jamais te décevoir.

Que Dieu le tout puissant te préserve, t'accorde santé, bonheur, quiétude de l'esprit et te protège de tout mal

**A ma mère** : Affable, honorable, aimable : Tu représentes pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi.

Tu as fait plus qu'une mère puisse faire pour que ses enfants suivent le bon chemin dans leur vie et leurs études

Puisse Dieu, le tout puissant, te préserver et t'accorder santé, longue vie et bonheur

## Remerciement

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail.

Ce travail est le fruit de 3 mois d'efforts, au Laboratoire de Génie des Matériaux, relevant de l'Unité d'Enseignement et de Recherche en Mécanique Appliquée, à l'École Militaire Polytechnique de Bordj El Bahri.

Je tiens à remercier les membres de jury qui ont examiné ce modeste travaille

Je tiens à remercier mes encadreur : monsieur le colonel A. BOUDIAF et monsieur le professeur de l'ENP M. DJEGHLAL pour l'orientation, la confiance, la patience qui ont constitué un apport considérable sans lequel ce travail n'aurait pas pu être mené au bon port. Qu'ils trouvent dans ce travail un hommage vivant à leurs hautes personnalités.

Mes remerciements sincères, vont à monsieur KABA Liamine l'attaché de recherche a CRTI ,pour avoir accepté me partager sa grande expérience dans le domaine.

Je n'oublie de remercier les enseignants de l'école nationale polytechnique, en particulier ceux du département de métallurgie, pour m'avoir offert un agréable cadre de formation.

Je tiens à remercie mes deux camarades de l'École Militaire Polytechnique de Bordj El Bahri Abdelhamid NECIB et Lokmane Abdelhakim BEDDIAF qui m'ont accueilli dans leur espace de travail.

J'exprime ma gratitude et ma profonde reconnaissance à mes parents qui m'ont toujours soutenu et encouragé.

Je remercie mes amis, particulièrement TADJER Noussaiba d'avoir m'écouter et me supporter pendant l'accomplissement de ce travail n'est-ce pas Noussa ?

Que toute personne ayant contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail trouve ici l'expression de mes vifs remerciements et ma profonde gratitude.

## ملخص:

هذا العمل هو مساهمة في نمذجة ظاهرة اللحام غير متجانس من الزهر المقاوم للصدأ 316L مع الزهر العادي A576 ، من أجل دراسة السلوك الحراري لمفصل اللحام ، التي تم الحصول عليه من خلال عملية التلحم الكهربائي TIG. يستخدم النموذج الذي يحاكي مصدر طاقة اللحام ، توزيع بنمط غوص للتدفق الحراري عالي السطح اين تم إجراء التقييم الميداني للدورات الحرارية في كل لحظة لتحديد مدى مناطق الخطر. تم الحصول على تقييم دقيق لدرجة الحرارة بفضل الإعداد التجريبي الذي تم تنفيذه كجزء من هذا العمل. وقد تمت المحاكات باستعمال برنامج الحساب COMSOL Multiphysics

الكلمات المفتاحية : 316L , A576 , النمذجة , المحاكات , تلحيم غير متجانس .

## Abstract :

this work is a contribution to the modeling of the heterogeneous welding phenomenon of 304L stainless steel with Carbon Steel A576 , in order to study the thermal behavior of a weld joint, obtained by the TIG electric arc welding process. The model simulating the welding energy source, uses a Gaussian surface flux distribution of, while performing the field evaluation thermal cycles at each moment, to determine the extent of risk areas. A fairly accurate assessment of the temperature distribution has been obtained by the experimental setup carried out as part of this work.. The simulation of the welding operation was carried out with the Comsol Multiphysics calculation code.

Keywords : 316L , A576 , , simulation, modeling, heterogeneous welding

## Résumé :

Ce travail est une contribution à la modélisation du phénomène de soudage hétérogène de l'acier inoxydable 316L avec un acier au carbone A576, afin d'étudier le comportement thermique d'un joint de soudure, obtenu par le procédé de soudage à l'arc électrique TIG. Le modèle simulant la source d'énergie de soudage, utilise une distribution surfacique Gaussienne du flux de chaleur, tout en procédant à l'évaluation des champs est des cycles thermiques à chaque instant, pour déterminer l'étendue des zones à risque. Une évaluation assez exacte de la distribution de la température a été obtenue grâce au dispositif expérimental réalisé dans le cadre de ce travail. La simulation de l'opération de soudage a été réalisée avec le code de calcul Comsol Multiphysics

Les mots clés : 316L, A576, simulation, modélisation, soudage hétérogène.

# Table des matières

## Liste des figures

## Liste des tableaux

1	Introduction Générale.....	10
2	Généralités sur les aciers .....	14
2.1	Aciers au carbone.....	14
2.2	Aciers inoxydables.....	18
2.3	Les différents types d'aciers inoxydables.....	18
2.4	Propriétés mécaniques, physiques et métallurgiques des aciers inoxydables : .....	20
3	Description de l'opération de soudage à l'arc électrique .....	28
3.1	Définition : .....	28
3.2	Procédés de soudage à l'arc : .....	28
3.3	Le procédé de soudage GTAW (TIG) : .....	29
4	Phénomènes physiques et métallurgiques impliqués durant le soudage .....	34
4.1	Plasma et apport d'énergie : .....	34
4.2	Le transfert thermique .....	34
4.3	Changement de phase lors du soudage : .....	36
5	Soudabilités des aciers .....	43
5.1	Diagrammes de constitution .....	43
5.2	L'influence du rapport <i>CreqNieq</i> Sur la microstructure final .....	46
6	La modélisation .....	48
6.1	Introduction : .....	48
6.2	Mise en équation, hypothèses et condition aux limites .....	48
6.3	Modèle thermique de la source d'énergie.....	50
6.4	Résolution numérique par la méthode des différences finies.....	51
	Implémentation sous MATLAB.....	52
6.5	Simulation avec le code COMSOL-multiphysics .....	57
7	Expérimentation.....	63
7.1	Introduction .....	63
7.2	Identification des matériaux : .....	63
7.3	Positionnement sur diagramme de SCHAEFFLER.....	64
7.4	Caractérisation microstructurale des matériaux .....	64
7.5	Caractéristiques mécaniques .....	65
7.6	Réalisation des cycles thermiques .....	66
7.7	Conditions de soudage.....	73
7.8	Plan d'expériences .....	74

7.9	Caractérisation des soudures.....	75
8	Résultats et discussions .....	78
8.1	Les cycles thermiques .....	78
8.2	Comparaison modèle-simulation et validation expérimentale .....	82
8.3	Caractérisation des soudures.....	83
8.4	Evaluation du taux de ferrite $\delta$ .....	87
8.5	Caractérisation mécanique .....	88
9	Conclusion.....	90
10	Bibliographie .....	92
	Annexe A.....	93
	Annexe B .....	96



## Listes des figures

FIGURE 1-1:DIAGRAMME FER - CARBONE [9] .....	14
FIGURE 1-2:MICROSTRUCTURE D'UN ACIER HYPOEUTECTOIDE [3].....	15
FIGURE 1-3:MICROSTRUCTURE D'ACIER EUTECTOIDE .....	15
FIGURE 1-4:MICROSTRUCTURE D'ACIER HYPEREUTECTOIDE [3] .....	16
FIGURE 1-5:L'INFLUENCE DES ELEMENTS D'ADDITION SUR LA DURETE [5].....	17
FIGURE 1-6:L'INFLUENCE DE LA TENEUR EN CARBONE SUR LES PROPRIETES MECANIQUE DU MATERIAUX [3].....	17
FIGURE 1-7:STRUCTURE D'ACIER INOXYDABLE FERRITIQUE [7].....	18
FIGURE 1-8:STRUCTURE AUSTENITIQUE [7].....	19
FIGURE 1-9:STRUCTURE BIPHASEE (AUSTENITE +FERRITE).....	20
FIGURE 1-10:STRUCTURE MARTENSITIQUE [7] .....	20
FIGURE 1-11:DIAGRAMME D'EQUILIBRE DES ALLIAGES BINAIRES FER-CHROME, D'APRES TECHNIQUE D'INGENIEUR [6] .....	22
FIGURE 1-12:BOUCLES GAMMA FORMEES DANS LES DIVERS SYSTEMES BINAIRES DU FER [5] .....	23
FIGURE 1-13:COUPES PSEUDOBINAIRES DU DIAGRAMME D'EQUILIBRE TERNAIRE FE-CR-NI A DES TENEURS CONSTANTES EN FER [5].....	24
FIGURE 2-1:PRINCIPE DU SOUDAGE TIG [10].....	29
FIGURE 3-1:TRANSFERT D'ENERGIE EN PROCEDE TIG .....	34
FIGURE 3-2:LES CYCLES THERMIQUES PENDANT LE SOUDAGE [9] .....	35
FIGURE 3-3:CORDON DE SOUDURE.....	36
FIGURE 3-4:MICROSTRUCTURE DE LA ZONE DE FUSION RESULTANT DE LA SOLIDIFICATION ENTIEREMENT AUSTENITIQUE (TYPE A), D'APRES WELDING METALLURGY AND WELDABILITY OF STAINLESS STEELS, BY JOHN C. LIPPOLD AND DAMIAN J. KOTECKI .....	37
FIGURE 3-5:MICROSTRUCTURE DE LA ZONE DE FUSION RESULTANT DE LA SOLIDIFICATION TYPE AF D'APRES WELDING METALLURGY AND WELDABILITY OF STAINLESS STEELS, BY JOHN C. LIPPOLD AND DAMIAN J. KOTECKI .....	38
FIGURE 3-6:MICROSTRUCTURE DE LA ZONE DE FUSION RESULTANT DE LA SOLIDIFICATION TYPE F AVEC MORPHOLOGIE SQUELETTIQUE, D'APRES WELDING METALLURGY AND WELDABILITY OF STAINLESS STEELS, BY JOHN C. LIPPOLD AND DAMIAN J. KOTECK.....	38
FIGURE 3-7:MICROSTRUCTURE DE LA ZONE DE FUSION RESULTANT DE LA SOLIDIFICATION TYPE F FERRITE ACICULAIRE, D'APRES WELDING METALLURGY AND WELDABILITY OF STAINLESS STEELS, BY JOHN C. LIPPOLD AND DAMIAN J. KOTECKI.....	39
FIGURE 3-8:MICROSTRUCTURE DE LA ZONE DE FUSION RESULTANT DE LA SOLIDIFICATION TYPE F (FERRITE ET L'AUSTENITE DE WIDMANSTÄTTEN) , D'APRES WELDING METALLURGY AND WELDABILITY OF STAINLESS STEELS, BY JOHN C. LIPPOLD AND DAMIAN J. KOTECKI.....	39
FIGURE 3-9:COUPE PSEUDOBINAIRE DU DIAGRAMME DEQUILIBRE TERNAIRE FER-CHROME- NICKEL A 70% DE FER ,D'APRES WELDING METALLURGY AND WELDABILITY OF STAINLESS STEELS, BY JOHN C. LIPPOLD AND DAM.....	40
FIGURE 3-10:CYCLE THERMIQUE D'UN ACIER AU CARBONE.....	40
FIGURE 3-11:EXEMPLE DE DIAGRAMME TRC EN CONDITION DE SOUDAGE $\Theta_M = 1300^\circ\text{C}$	41
FIGURE 4-1:DIAGRAMME DE CONSTITUTION DES ACIERS INOXYDABLES A L'ETAT BRUT DE SOUDAGE [13].....	44

FIGURE 4-2:DIAGRAMME DE DELONG [3] .....	44
FIGURE 4-3:DIAGRAMME D'ESPY .....	45
FIGURE 4-4:DIAGRAMME WRC92 .....	45
FIGURE 5-1:SCHEMA DU PROCESSUS DE SOUDAGE DE DEUX TOLES[1] .....	49
FIGURE 5-2:LE MODELE BI-ELLIPTIQUE DU BAIN DE FUSION .....	51
FIGURE 5-3:PRINCIPE DE LA METHODE DE DIFFERENCES FINIES .....	51
FIGURE 5-4:PAGE D'ACCUEIL DE L'APPLICATION .....	53
FIGURE 5-5:DEFINITION DES MATERIAUX A SOUDER .....	53
FIGURE 5-6:LA GEOMETRIE DE LA PIECE A SOUDER .....	54
FIGURE 5-7:LES PARAMETRES OPERATOIRES LIES AU PROCEDE DE SOUDAGE DES PIECES. 54	
FIGURE 5-8:LES PARAMETRE DE CALCULE (METHODE DE RESOLUTION DE NOTRE SYSTEME D EQUATION INITIAL) .....	55
FIGURE 5-9:CALCULE DES RESULTATS QUI PRENDRA JUSQU'A 2 MINUTES DE CALCULE PAR LE PROCESSEUR .....	55
FIGURE 5-10: LA VISUALISATION DES RESULTATS DE CALCULE .....	56
FIGURE 5-11:HISTORIQUE DES TEMPERATURES.....	56
FIGURE 5-12:INTERFACE COMSOL .....	58
FIGURE 5-13:DECLARATION DES VARIABLES .....	59
FIGURE 5-14:LE MAILLAGE.....	60
FIGURE 5-15:VISUALISATION DES RESULTATS .....	60
FIGURE 6-1:DISPOSITIF ET EPROUVETTES DE L'ESSAI DE TRACTION .....	66
FIGURE 6-2:VUE D'ENSEMBLE DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL REALISE: BANC DU SOUDAGE.....	67
FIGURE 6-3:PREMIERE ARCHITECTURE PROPOSEE.....	68
FIGURE 6-4:TABLE DE TRAVAIL.....	70
FIGURE 6-5:PLAQUE DE GUIDAGE ET SUPPORT. ....	70
FIGURE 6-6:PIECE DE FIXATION DES THERMOCOUPLES. ....	71
FIGURE 6-7:APPUIS DES PIECES A SOUDER.....	71
FIGURE 6-8:EPROUVETTE D'ACIER INOX ET ACIER AU CARBONE POUR SOUDAGE HOMOGENE ET HETEROGENE .....	72
FIGURE 6-9:THERMOCOUPLE DE TYPE K.....	72
FIGURE 6-10:POSITIONS DES THERMOCOUPLES .....	73
FIGURE 6-11:INSPECTION VISUELLE DES SOUDURES .....	75
FIGURE 7-1:LES CYCLES THERMIQUES EN FONCTION DE L'INTENSITE DE SOUDAGE.....	79
FIGURE 7-2:FUSION DU METAL ET DEFAILLANCE DU CAPTEUR .....	80
FIGURE 7-3:INFLUENCE DE L'INTENSITE SUR LA TAILLE DU CORDON.....	80
FIGURE 7-4:LES CYCLES EN FONCTION DE LA VITESSE .....	81
FIGURE 7-5:DIFFERENTES ZONES METALLURGIQUES DU CORDON DE SOUDURE.....	83
FIGURE 7-6:MICROSTRUCTURE D'ACIER 316L .....	84
FIGURE 7-7:MICROSTRUCTURE D'ACIER AU CARBONE (MB) .....	85
FIGURE 7-8:LA ZONE AFFECTEE THERMIQUEMENT COTE D'ACIER AU CARBONE .....	85
FIGURE 7-9:LA ZONE AFFECTEE THERMIQUEMENT COTE D'ACIER INOX 316L.....	86
FIGURE 7-10: LA MICROSTRUCTURE DE LA ZONE FONDU .....	86
FIGURE 7-11:LES COORDONNEES DU POINT JS SUR LE DIAGRAMME: .....	87
FIGURE 7-12: RESULTATS OBTENUS PAR LE LOGICIEL IMAGE J .....	88
FIGURE -7-13:PROFILS DE MICRODURETE VICKERS ETABLIS POUR LA SOUDURE HETEROGENE .....	89

## Liste des tableaux

TABLEAU 1-1:L'INFLUENCE DES ELEMENTS D'ADDITION SUR LES PROPRIETES ESSENTIELLES DES ACIERS .....	17
TABLEAU 1-2:VALEURS TYPIQUE DE PROPRIETES DES DIFFERENTS ACIERS INOXYDABLES [8] .....	21
TABLEAU 1-3:PROPRIETES MECANIQUE DES ACIERS INOXYDABLE [8].....	21
TABLEAU 2-1:RENDEMENT THERMIQUE DE QUELQUES PROCEDES DE SOUDAGE .....	31
TABLEAU 2-2: LES AVANTAGES ET LES INCONVENIENTS DU PROCEDE TIG .....	32
TABLEAU 6-1: LA COMPOSITION CHIMIQUE D'ACIER INOX 316L.....	63
TABLEAU 6-2 :LA COMPOSITION CHIMIQUE D'ACIER AU CARBONE A576.....	63
TABLEAU 6-3: LA COMPOSITION CHIMIQUE DU METAL D'APPORT .....	64
TABLEAU 6-4: RESULTATS DE CALCULES DES POURCENTAGES DE Cr EQUIVALENT ET Ni EQUIVALENT .....	64
TABLEAU 6-5: L'ATTAQUE CHIMIQUE ET LES SOLUTIONS UTILISES .....	65
TABLEAU 6-6:RESULTATS DE L'ESSAI DE TRACTION DE L'ACIER 316L .....	65
TABLEAU 6-7:RESULTATS DE L'ESSAI DE TRACTION DE L'ACIER A576 .....	65
TABLEAU 6-8:LE TABLEAU DES RESULTATS OBTENUS DE LA MICRODURETE.....	66
TABLEAU 6-9: LES POSITIONS DES THERMOCOUPLES SUIVANT X ET Y .....	73
TABLEAU 6-10: LES VALEURS DES PARAMETRES DE L'ESSAI .....	75

### 1 Introduction Générale

Le soudage à l'arc comme tout procédé de soudage électrique impliquant la fusion des bords à assembler est assorti d'un grand nombre de conséquences et modifications en raison de forts gradients de températures qu'imposent la source de chaleur. Les phénomènes mis en jeu lors du soudage sont très nombreux et complexes. En particulier l'influence de cycles thermiques rapides et à haute température sur les propriétés physique, métallurgique et mécanique qui déterminent les caractéristiques [1].

La modélisation numérique de l'opération de soudage est une alternative intéressante. En effet, en permettant une meilleure compréhension des mécanismes de formation de cordon de soudure, la simulation numérique permet d'établir les liens de cause à effet entre le mode opératoire et les caractéristiques permettant de capitaliser les connaissances acquises pour le soudeur ou l'expert scientifique, à travers l'établissement de relations empiriques et de lois physiques.

Notre travail consiste à étudier l'influence des paramètres de soudage sur la soudabilité hétérogène d'acier inoxydable 316L, avec un acier au carbone A758 par le biais des cycles thermiques vécus par le matériau lors du soudage à travers une modélisation du phénomène et à l'aide d'un dispositif conçu et réalisé dans le même cadre.

La simulation numérique du procédé de soudage par la méthode des différences finies ou la méthode des éléments finis est devenu un outil particulièrement intéressant dans la prévention des champs de températures, de ce fait, et dans le cadre de notre travail nous essayons de développer un modèle numérique sous MATLAB qui prédit les isothermes pendant et après soudage et comparer par la suite avec les résultats obtenus par le code COMSOL MULTIPHYSICS, finalement une caractérisation microstructurale et mécanique sera effectuée pour voir les modifications apportées par l'élévation de la température pendant le soudage.

Ce travail s'inscrit dans le cadre d'un projet de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état, réalisé au sein de laboratoire de Génie des Matériaux de l'Ecole Polytechnique Militaire.

Ce présent mémoire est structuré de la manière suivante :

La première partie consiste en une synthèse bibliographique portant des généralités sur les types d'aciers utilisés et le procédé de soudage qui nous a permis de les assembler, par la suite une description des phénomènes impliqués durant le soudage pour pouvoir comprendre la physique du problème et entamer la modélisation et la création du modèle Matlab et Comsol.

La deuxième partie décrit les méthodes expérimentales de la caractérisation des métaux de bases et le cordon soudé ainsi que les étapes de conception du banc d'essai,

## Introduction générale

---

les résultats seront représentés et discutés par la suite pour la validité du modèle implémenté par rapport à la simulation et l'expérimentation et évaluer les changements qui se produisent.

nous terminons par une conclusion générale suivie par certaines perspectives envisagée.

# **Partie 1:**

## Synthèse bibliographique

# **Chapitre 1**

Généralités sur les aciers

## 2 Généralités sur les aciers

### 2.1 Aciers au carbone

#### 2.1.1 Définition

Les aciers au carbone sont largement utilisés dans les différentes branches de l'industrie, on les trouve assemblés même avec d'autre type acier par soudage, destinés au transport et au stockage des produits pétroliers.

Les aciers sont des alliages à base de fer et de carbone comme élément d'alliage en proportions restreintes ne dépasse pas 2.1% (limite théorique), ce dernier est un élément gammagène de ce fait, et parce qu'il permet la formation des carbures. Le carbone joue un rôle majeur dans les alliages ferreux ou il est toujours présent à cause de leur mode d'élaboration. [2]

La connaissance du diagramme d'équilibre binaire fer-carbone est à la base de tous les opérations métallurgiques sur les aciers au carbone notamment le soudage.

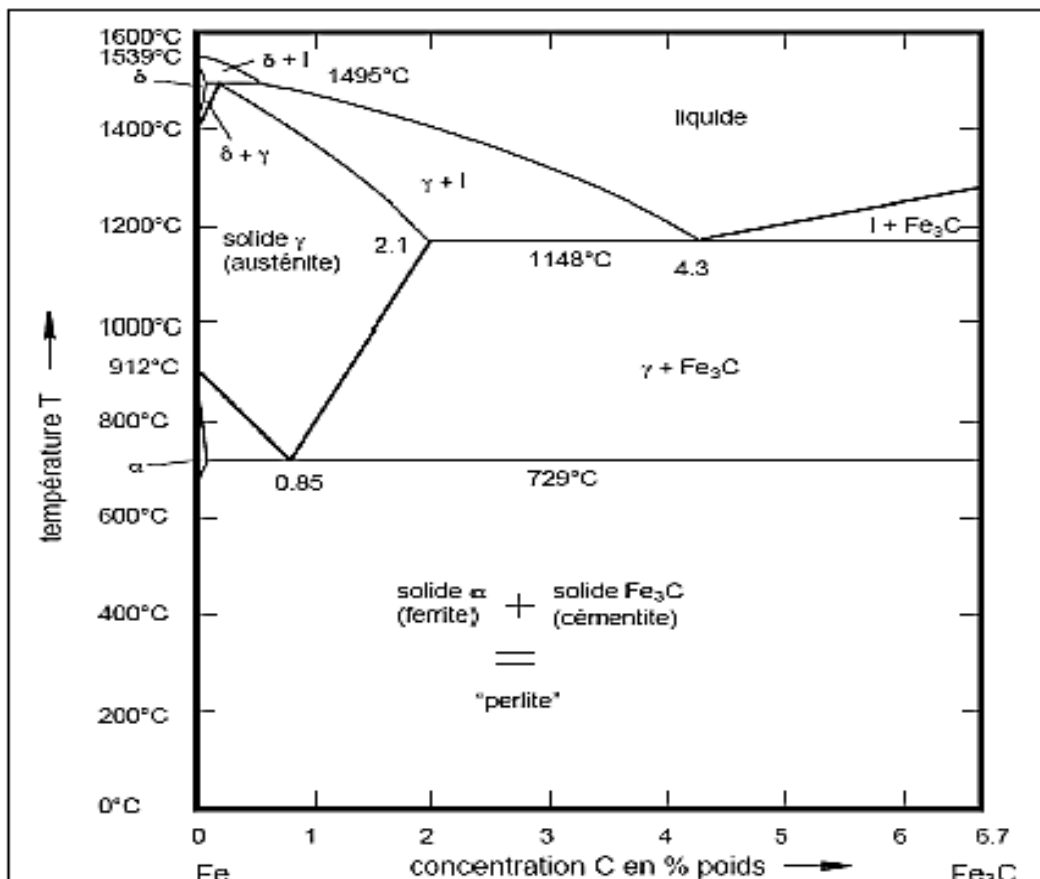


Figure 2-1:diagramme fer - carbone [6]



## Généralités sur les aciers

### 2.1.2 Structure des aciers :

On distingue trois types d'aciers, selon la teneur en carbone :

- Acier hypo eutectoïde : (%C compris entre 0.002% et 0.85%) formé de perlite (ferrite  $\alpha$ +cémentite  $Fe_3C$ ) possédant une structure lamellaire enveloppée dans une phase ferritique [3]

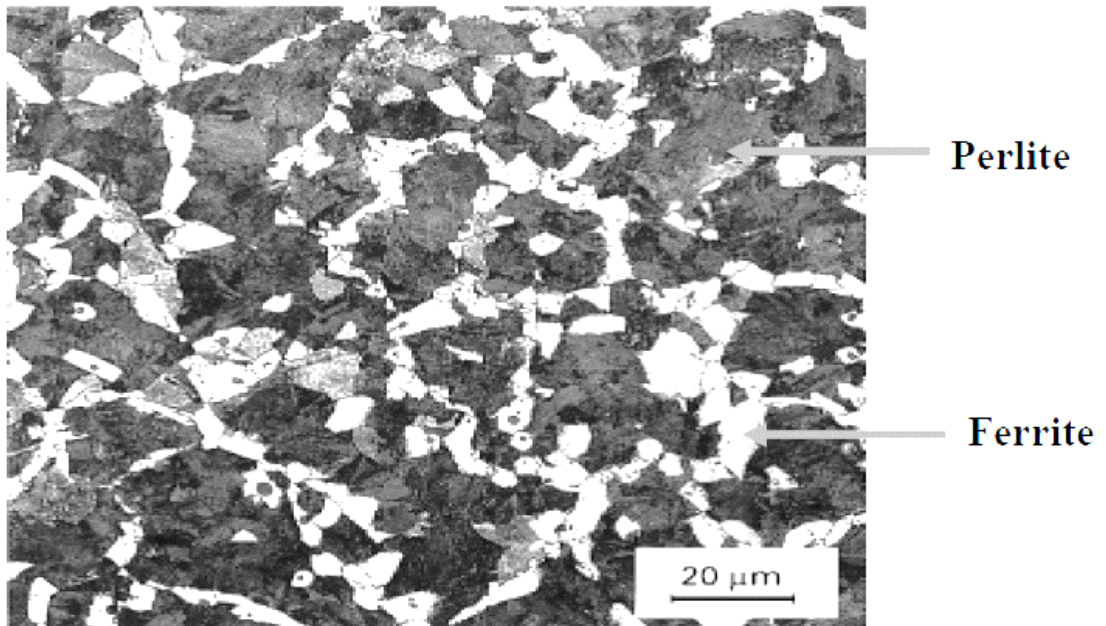


Figure 2-2: Microstructure d'un acier hypo eutectoïde [3]

- Acier eutectoïde : (%C=0.85%) formé de 100% perlite (ferrite  $\alpha$ +cémentite  $Fe_3C$ ) caractérisé par une structure en lamelles.

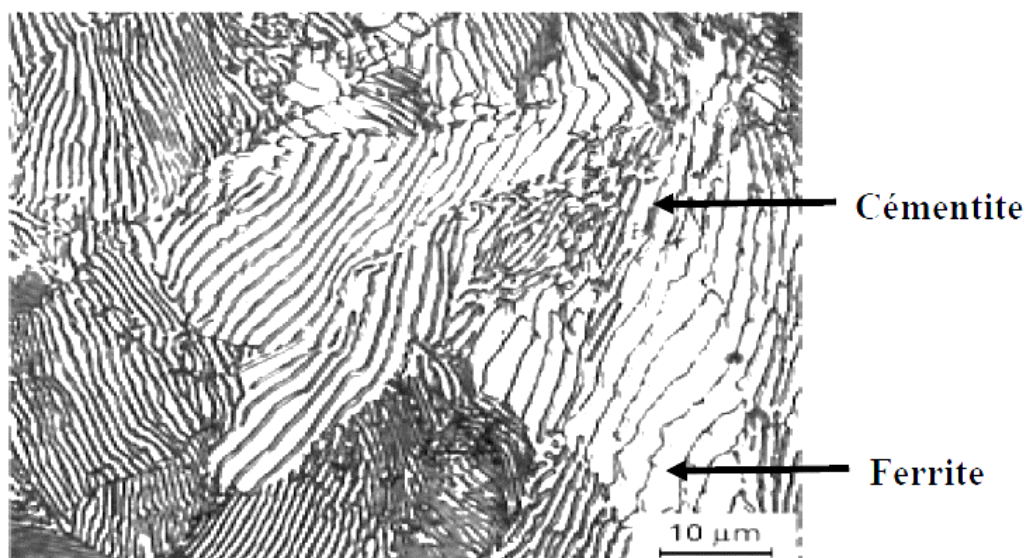


Figure 2-3: Microstructure d'acier eutectoïde

## Généralités sur les aciers

---

- Acier hypereutectoïde : (%C compris entre 0.85% et 2.1%) formé de perlite (ferrite  $\alpha$  + cémentite  $Fe_3C$ ) caractérisé par une structure en lamelle enveloppée dans la cémentite [4].

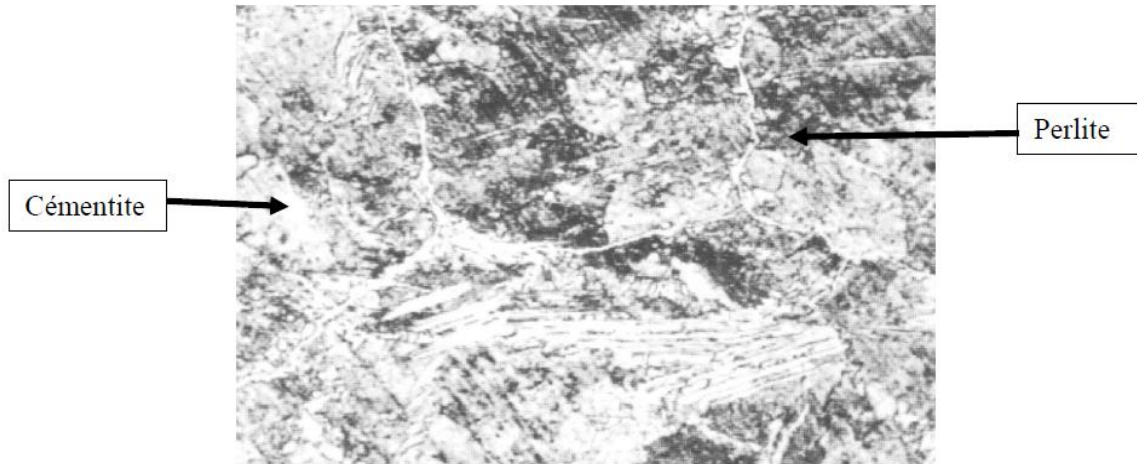


Figure 2-4: microstructure d'acier hypereutectoïde [3]

### 2.1.3 Types d'aciers :

Il existe 4 catégories des aciers selon la norme européenne EN10027 [2]:

Les aciers non-alliés d'usage général (construction), dit « aciers à ferrer les ânes »

Les aciers non-alliés spéciaux

Les aciers faiblement alliés

Les aciers fortement alliés :

- Les aciers inoxydables
- Les aciers rapides

### 2.1.4 Propriétés des aciers

L'acier, le plus polyvalent de tous les matériaux structurels est présent dans pratiquement tous les secteurs : bâtiment et travaux publics, transports (automobile, construction navale), emballage, ameublement, outils, mécanique, produits industriels et grand public [5]. De ce fait une large gamme des propriétés mécanique est nécessaire afin de rassurer une utilisation de longue durée. Les propriétés fondamentales recherchés dans un acier sont traduites par la résistance aux efforts : module d'élasticité, limites élastique, résistance mécanique, dureté, résistance au choc [5].

# Généralités sur les aciers

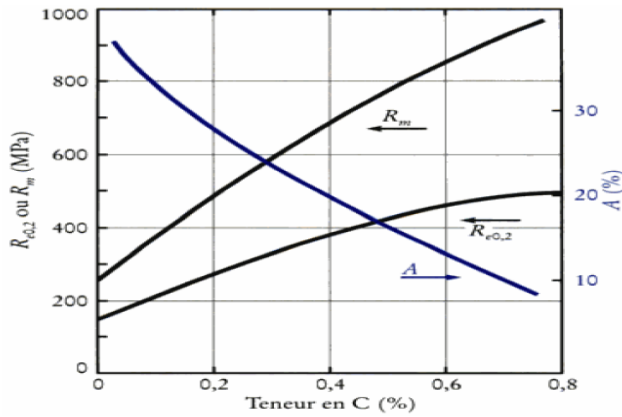


Figure 2-6: l'influence de la teneur en carbone sur les propriétés mécaniques du matériaux [3]

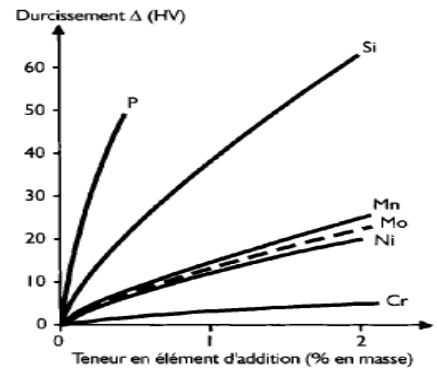


Figure 2-5: l'influence des éléments d'addition sur la dureté [5]

Les propriétés des aciers peuvent être modifiées en ajoutant d'autres éléments, principalement métalliques, et on parle d'aciers alliés. De plus, on peut encore améliorer grandement leurs caractéristiques par des traitements thermiques (notamment les trempes) prenant en surface ou à cœur de la matière ; on parle alors d'aciers traités. [2]

## 2.1.5 Influence des éléments d'addition

Bien que la définition des aciers comme constitués essentiellement de fer et de carbone soit vraie on trouve souvent d'autres éléments d'addition qui sont présents comme impuretés ou éléments additionnés dans le but d'améliorer certaines propriétés de matériaux.

Tableau 2-1: l'influence des éléments d'addition sur les propriétés essentielles des aciers

Propriétés	Éléments d'addition											
	Carbone	Si	Mn	Ni	Cr	W	Va	Mo	Co	Ti	Pb	S
Résistance à la traction	++	+	++	+	++	+	+	++	+	+	+	
Dureté	++	+	++	+	++	+	+	++			+	
Malléabilité	-		+	++	+	+	+	+		+	-	-
Résilience	-		+	+	+	+	+	+	+	+	+	
Magnétisme		-		-	+	++			++			
Résistance au feu	-	-	-	+	++	+		+		+		
Elasticité	+	++	+		+		+	+				
Forgeabilité			+	+			+	+		+		-
Soudabilité	-	-	+				+	+				-
Usinabilité	-	-	-		-			+			+	+
Qualité de coupe	+	-			+	++	++	+	++	+	-	-

Commentaires : + Augmentation ++ Augmentation importante - Diminution

# Généralités sur les aciers

---

## 2.2 Aciers inoxydables

Les aciers inoxydables sont des alliages métalliques à base d'acier (alliage : fer-carbone) qui doivent contenir au moins 13% de chrome et souvent d'autres éléments d'addition tels que le nickel et dans une moindre mesure le molybdène [6].

L'inoxydabilité ou la résistance à l'oxydation est due à la formation d'une couche d'oxyde de chrome passive.

Les éléments d'alliages peuvent être classés en 2 catégories :

Les éléments alphagènes  $\alpha$  :

C'est les éléments d'alliage qui stabilisent la phase  $\alpha$  au point que certain alliage, au-delà d'une certaine teneur, reste CC a toutes températures

La liste des alphagènes comprends presque tous les éléments d'alliage habituels : Si, Al, Cr, Mo, W.

Les éléments gammagènes  $\gamma$  :

C'est les éléments d'alliage qui stabilisent la phase  $\gamma$  au point que certain alliage, au-delà d'une certaine teneur, reste CFC a toutes températures

La liste des gammagènes est assez limitée puisqu'elle ne comporte que : Ni, Mn, Cu.

## 2.3 Les différents types d'aciers inoxydables

### 2.3.1 L'acier inoxydable ferritiques

Contiennent de 12% à 27% de chrome avec de petites quantités d'éléments formant des austénites. Comme la phase de ferrite est stable jusqu'à la température de fusion, aucune martensite indésirable n'est formée. Cependant, un refroidissement lent à travers la plage de température d'environ 474 °C (885 °F) doit être évité, car cela précipite une phase fragile. [7]

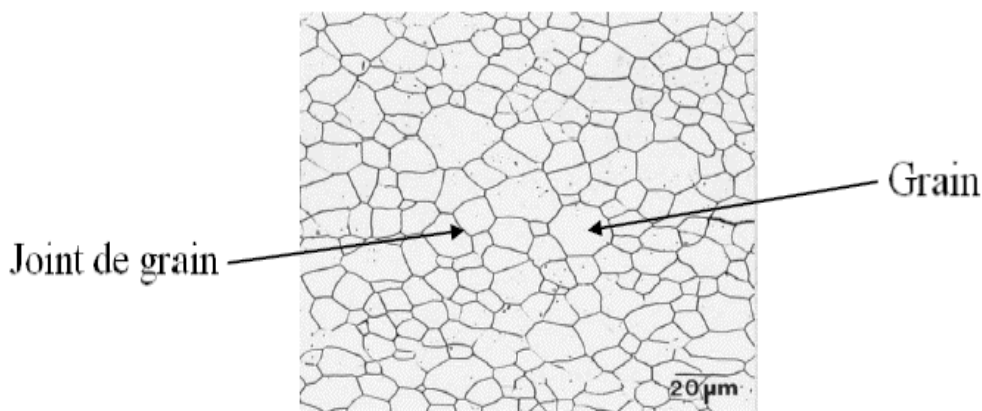


Figure 2-7: structure d'acier inoxydable ferritique [7]

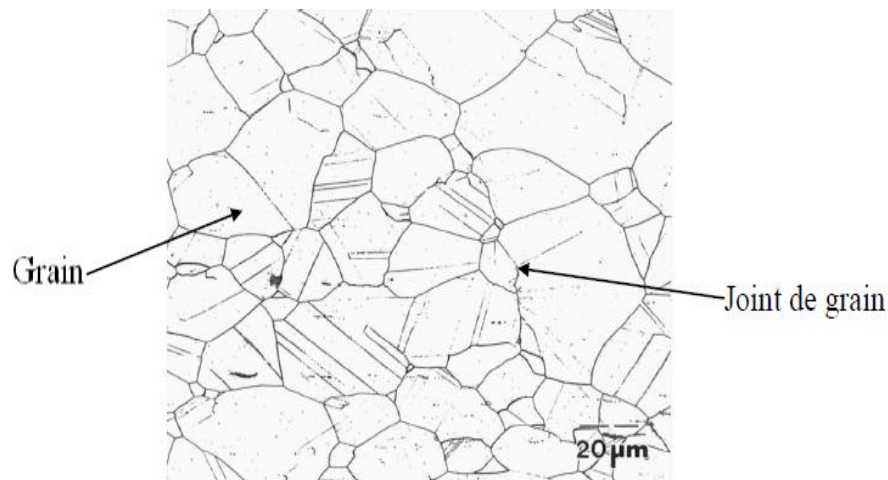
### 2.3.1 L'acier inoxydable austénitique

## Généralités sur les aciers

---

Représentent le plus grand groupe général d'aciers inoxydables et sont produits dans des tonnages plus élevés que tout autre groupe. Ils ont une bonne résistance à la corrosion dans la plupart des environnements. Les aciers inoxydables austénitiques ont des résistances équivalentes à celles de l'acier doux, une limite d'élasticité minimale d'environ 210 MPa à température ambiante, et ne peuvent pas être durci par transformation. Les propriétés d'impact à basse température sont bonnes pour ces alliages, ce qui les rend utiles dans des applications cryogéniques.

Les températures de service peuvent atteindre 760 °C ou même plus, mais la résistance et la résistance à l'oxydation de la plupart de ces aciers sont limitées à des températures aussi élevées. Des éléments favorisant la formation d'austénite, notamment de nickel, sont ajoutés à ces aciers en grande quantité (généralement plus de 8% en poids). D'autres éléments favorisant l'austénite sont C, N et Cu. Le carbone et l'azote sont de puissants promoteurs d'austénite. [6]



**Figure 2-8:structure austénitique [7]**

### 2.3.2 Les aciers inoxydables austeno-ferritique "DUPLEX"

Les aciers inoxydables duplex étant des alliages dont la structure est biphasée et les proportions sont constitués en éléments qui permettent d'obtenir l'équilibre optimal des fractions volumiques d'austénite et de ferrite. Etant donnée leur microstructure biphasée austéno-ferritique ils ont une résistance mécanique élevée et une excellente résistance à la corrosion que les aciers inoxydables austénitiques standard. [6]

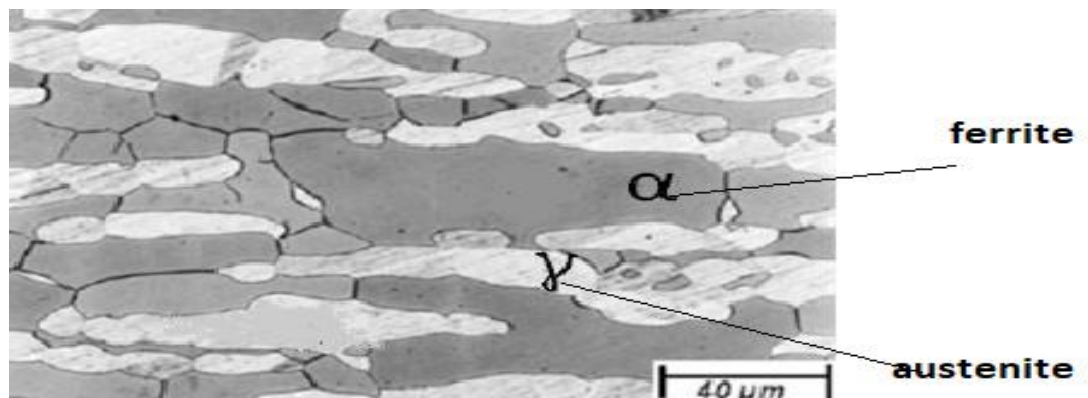


Figure 2-9: Structure biphasée (austénite + ferrite)

### 2.3.3 Les aciers inoxydables martensitiques

Contiennent la plus petite quantité de chrome et présentent une forte trempabilité. Les qualités de coutellerie sont des aciers inoxydables martensitiques. Comme la zone martensitique affectée par la chaleur est susceptible de se fissurer, il faut faire attention lors du soudage de ces aciers. Des traitements de préchauffage et de posttraitement sont nécessaires pour éviter les fissures. [7]

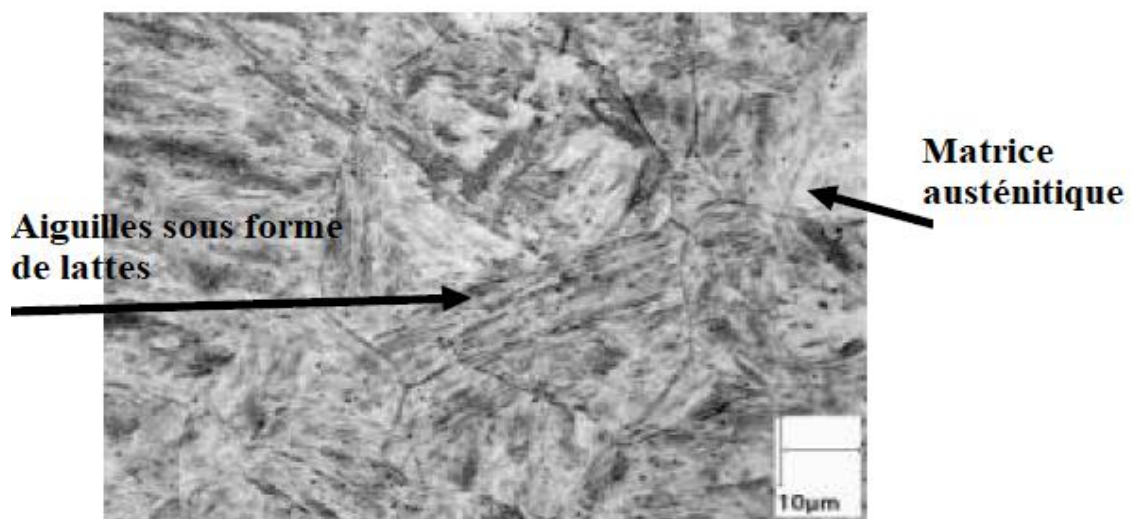


Figure 2-10: Structure martensitique [7]

## 2.4 Propriétés mécaniques, physiques et métallurgiques des aciers inoxydables :

### 2.4.1 Propriétés physique :

## Généralités sur les aciers

**Tableau 2-2:valeurs typique de propriétés des différents aciers inoxydables [8]**

	Masse Volumique	Coefficients De Dilatation à 300°C (10 <sup>6</sup> K <sup>-1</sup> )	Conductivité Thermique a 20°C (Ω.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	Capacité thermique (j.Kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	Résistivité (μΩ.cm)	Magnétisme	Module D'élasticité (GPa).
Ferritique	7.8	10 -11.5	20.9	460	55	Ferromagnétique	206
<b>Austénitiques</b>	<b>7.9 à 8</b>	<b>16.5</b>	<b>14.6</b>	<b>500</b>	<b>72 à 74</b>	<b>Amagnétique</b>	<b>193</b>
Martensitiques	7.8	10.8 à 11.5	25.1	460	55-60	Ferromagnétique	206
Austéno - Ferritique	7.87	15	16.7	500	70	Ferromagnétique	200

### 2.4.2 Propriétés mécanique

**Tableau 2-3:propriétés mécanique des aciers inoxydable [8]**

Acier	Limite D'élasticité	Résistance a la rupture R <sub>m</sub>	Allongement a la rupture A
Ferritique	370	500	26
Austéno-ferritique	620	840	30
<b>Austénitique</b>	<b>270</b>	<b>620</b>	<b>56</b>

### 2.4.3 Propriétés métallurgiques

#### 2.4.3.1 Diagramme de phase

Les aciers inoxydables sont essentiellement des alliages Fe-Cr ou Fe-Cr-Ni à teneur en carbone variant de 0,02% à 1% selon les nuances. Bien qu'un certain nombre d'autres éléments tels que Mo, Cu, Si, Ti, Nb. . . etc., soient ajoutés pour améliorer la tenue à la corrosion ou les propriétés mécaniques, l'essentiel des propriétés des aciers inoxydables est lié à la connaissance des diagrammes de phases.

Les diagrammes d'équilibre peuvent être utilisés pour décrire les transformations de phases et leurs stabilités dans les aciers inoxydables.

##### 2.4.3.1.1 Système Fe-Cr

Le fer pur existe sous deux variétés cristallographiques dont la nature et le domaine

D'existence sont résumés ci-après :

A température ambiante, la structure est cubique centré, le fer se trouve sous sa forme ferritique  $\alpha$ , il est alors magnétique.

A 9120C, il subit une première transformation allotropique, et jusqu'à 13940C, il se trouve sous sa forme austénitique  $\gamma$ , de structure cubique à faces centrées, amagnétique.

## Généralités sur les aciers

Au-delà de 13940C, il retrouve une structure identique à celle de l'ambiante, c'est la ferrite  $\delta$  magnétique

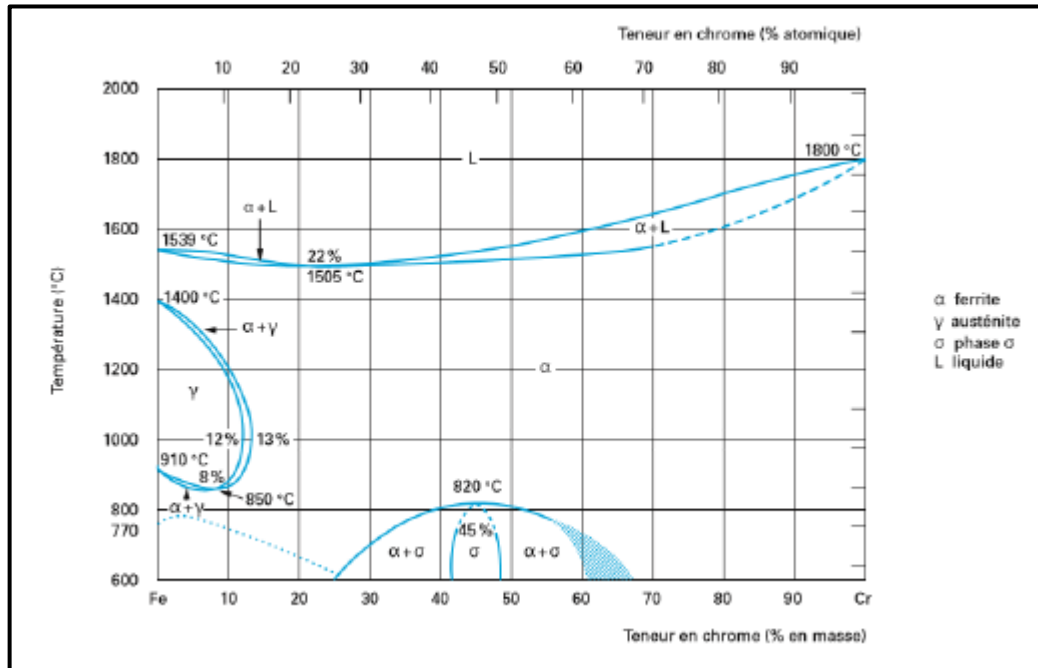


Figure 2-11: Diagramme d'équilibre des alliages binaires fer-chrome, d'après technique d'ingénieur [6]

Etant donné que le chrome est le principal élément d'alliage, la Figure 1-11 représente le point de départ de l'étude de la stabilité de phases des aciers inoxydables.

On remarque :

Aux faibles teneurs en chrome, il y a formation de la boucle  $\gamma$  dans l'intervalle de température 912-13940C

- % Cr > 12,7 : les alliages Fe-Cr dont la teneur en chrome est supérieure à 12,7%  
Sont ferritiques aux températures élevées.
- % Cr < 12 : les alliages Fe-Cr dont la teneur en chrome est inférieure à 12% sont austénitiques aux températures comprises dans la boucle.
- 12 < % Cr < 12,7 : dans ce cas, les deux phases  $\alpha$  et  $\gamma$  coexistent.

### ❖ La boucle « $\gamma$ »

Quand la teneur en Cr atteint à peu près 12%, la ferrite est complètement stable de la température ambiante jusqu'au point de fusion, ce qui engendre en contrepartie un rétrécissement du domaine austénitique produisant ainsi la boucle  $\gamma$ . La figure



## Généralités sur les aciers

Ci-dessous montre que d'autres éléments stabilisateurs de la ferrite comme le vanadium ou le molybdène agissent de la même manière que le chrome lorsqu'il est allié au fer donnant ainsi des boucles gamma  $\gamma$  [6]

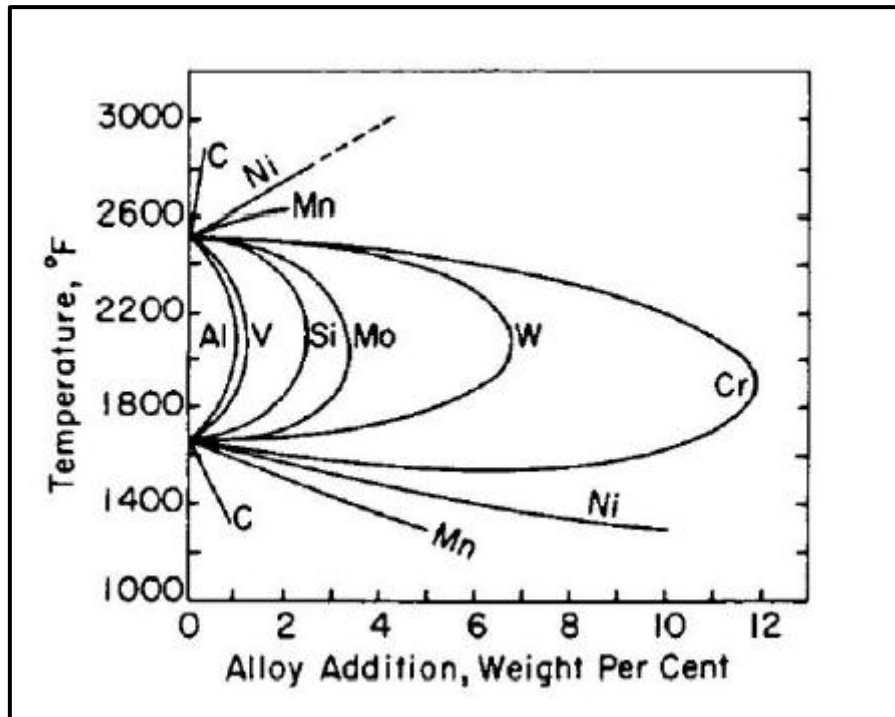


Figure 2-12: Boucles gamma formées dans les divers systèmes binaires du fer [5]

### ❖ La phase $\sigma$ et $\alpha'$

Dans la figure là où est mentionné «  $\sigma$  » (au centre en bas) la structure cristalline n'est pas cubique centrée comme pour la ferrite, mais elle est tétragonale, elle s'avère être très fragile, par conséquent, cette phase sigma est à éviter.

On note aussi la présence d'une ligne discontinue à 475°C d'où l'appellation du Phénomène de « fragilisation à 475°C » qui est due à la formation d'un riche précipité en chrome dans la matrice  $\alpha$  appelé alpha prime  $\alpha'$  ce dernier engendre des fragilisations sévères dans les alliages qui contiennent plus de 14% de chrome. [6]

#### 2.4.3.1.2 Système Fe-Cr-Ni

La figure représente des diagrammes pseudo-binaires extraits du diagramme ternaire Fe-Cr-Ni en effectuant des coupes à des teneurs constants en fer (50%, 60%, 70%, 80%, 90%), et partir de ces diagrammes en déduit :

Les alliages riches en chrome se solidifient en ferrite. Les alliages riches en nickel se solidifient en austénite.

## Généralités sur les aciers

Cependant, de nombreux alliages Fe-Cr-Ni se solidifient en deux phases, ferrite et austénite. Pendant la solidification de ces alliages, le liquide coexiste avec la ferrite et l'austénite.

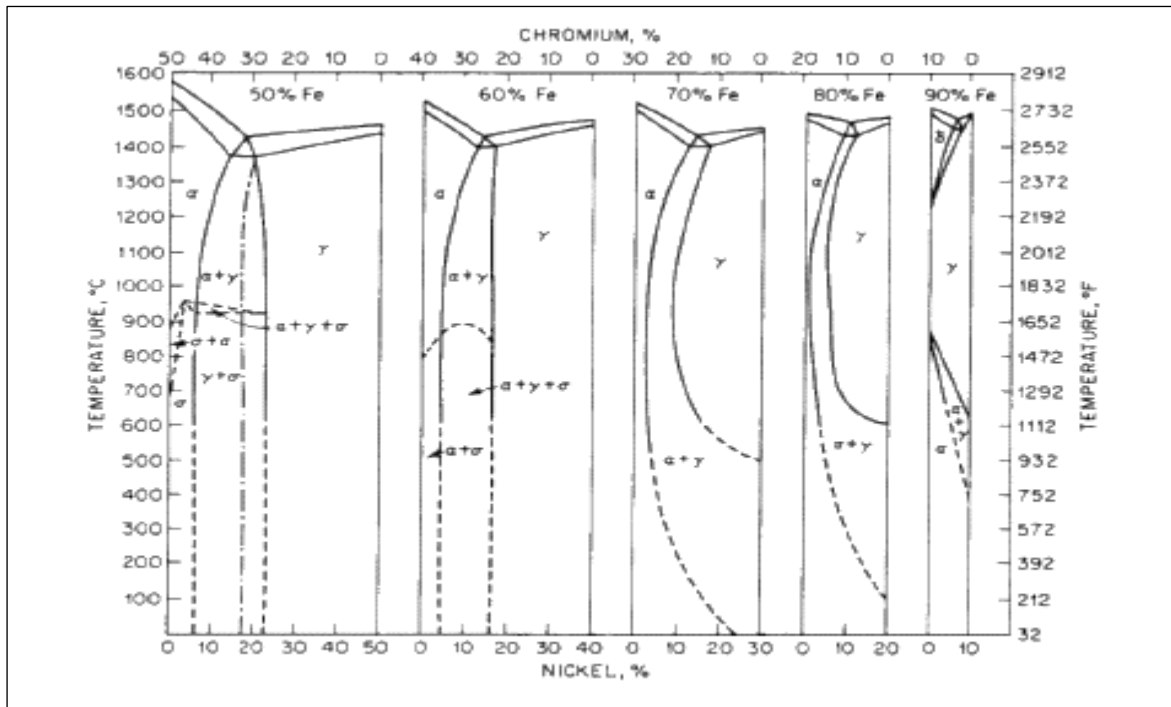


Figure 2-13: Coupes pseudobinaires du diagramme d'équilibre ternaire Fe-Cr-Ni à des teneurs constantes en fer [5]

### 2.4.4 L'influence des éléments d'addition

Les aciers inoxydables sont des alliages à base de fer avec des teneurs en fer allant de 50 à 88% en masse de la composition. Les principaux ajouts d'alliage à l'acier inoxydable sont le chrome et le carbone pour les nuances ferritiques et martensitiques, avec l'ajout de nickel pour les nuances austénitiques et duplex.

Essentiellement, tous les aciers inoxydables contiennent du manganèse et du silicium en tant qu'additions intentionnelles. D'autres additions d'alliage incluent le molybdène, le niobium, le titane, l'aluminium, le cuivre, le tungstène, l'azote et d'autres pour améliorer la fabricabilité, développer des propriétés spéciales, améliorer la résistance à la corrosion ou influencer la microstructure.

Les éléments d'impuretés couramment trouvés dans les aciers inoxydables comprennent l'azote, l'oxygène, le soufre et le phosphore. Tous ces éléments d'alliage et d'impureté ont un certain effet sur la soudabilité et la performance. Dans la plupart des cas, le niveau de ces éléments dans le métal de base ou le métal d'apport est contrôlé par la spécification du matériau pour assurer que l'acier fonctionne comme prévu.

**Chrome :** élément de base de tous les aciers inoxydables augmente la résistance à la corrosion (sauf en milieu sulfurique) et la résistance à l'oxydation à chaud. Avec l'addition de chrome, un oxyde de stœchiométrie  $(Fe-Cr)_2O_3$ , se forme sur la surface

## Généralités sur les aciers

---

De l'acier. La présence de chrome augmente la stabilité de l'oxyde car il a une affinité beaucoup plus élevée pour l'oxygène que le fer [6].

Le chrome est également un formateur de carbure fort. Le carbure le plus commun riche en Cr est  $M_{23}C_6$ , où le "M" est prédominant Cr mais peut également avoir une certaine fraction de Fe et Mo.

Le chrome est également un ingrédient clé dans la formation de composés intermétalliques, dont beaucoup ont tendance à fragiliser les aciers inoxydables. La plus commune est la phase sigma  $\sigma$

**Nickel** : grâce à son rôle gammagène, stabilise l'austénite aussi bien à la température ambiante qu'aux températures très basses, il favorise ainsi la mise en œuvre par Déformation plastique [9].

Le nickel n'est pas un formateur de carbure fort et ne favorise généralement pas la formation de composés intermétalliques.

**Manganèse** : bien que classé comme élément gammagène, a un rôle alphagène pour des teneurs supérieures à 7 % renforçant ainsi la résistance à la fissuration à chaud lors de solidifications rapides (telles que celles rencontrées dans des opérations de soudage) [9], l'ajout d'une quantité suffisante de manganèse et la formation de sulfure de manganèse stable (Mn-S) ont efficacement éliminé le problème de la brièveté chaude [6].

**Silicium** autre élément alphagène, améliore les propriétés d'emploi à haute température mais diminue la résistance à la fissuration lors du soudage [10].

Le silicium est bien connu pour améliorer la fluidité de l'acier en fusion. Pour cette raison, il peut être ajouté dans des quantités légèrement supérieures à la normale pour souder des métaux d'apport. Certains aciers inoxydables, en particulier les nuances austénitiques, ont tendance à être assez léthargiques à l'état fondu, et l'ajout de silicium peut grandement améliorer la fluidité

**Molybdène** ajouté à un certain nombre d'aciers inoxydables et a des fonctions

Différentes selon le grade particulier. Pour les nuances ferritiques, austénitique et duplex, Mo est ajouté en quantités allant jusqu'à 6% ou plus dans les super austénitiques Afin d'améliorer la résistance à la corrosion, en particulier en ce qui concerne Les piqûres et la corrosion cavernuse. [10]

Dans les aciers inoxydables austénitiques, Mo améliore également la résistance à la température élevée. Par exemple, l'addition de 2% en poids de Mo à un alliage 18Cr-8Ni standard entraîne une augmentation de 40% de la résistance à la traction à 760 °C, cela peut également avoir un effet négatif. Être plus difficile à travailler à chaud, le molybdène est aussi un élément favorisant la ferrite, et sa présence favorisera la formation et la rétention des femelles dans la microstructure [10].

## Généralités sur les aciers

---

**Azote** puissant élément gammagène, contribue également à stabiliser l'austénite, associé à une basse teneur en carbone, l'azote permet d'atteindre des limites d'élasticité élevées sans diminuer la résistance à la corrosion inter-granulaire [6].

**Carbone** élément fortement gammagène contribue à stabiliser l'austénite lors de déformations à froid. Par contre, il peut provoquer la formation de carbures de chrome comme  $Cr_23C_6$  inter-granulaires diminuant la résistance à la corrosion inter-granulaire [5].

**Éléments durcissant par précipitation** L'aluminium, le titane, le cuivre et le Molybdène peuvent être ajoutés aux aciers inoxydables pour favoriser une réaction de Précipitation qui durcit l'alliage. Les alliages martensitiques durcissables par précipitation (PH) contiennent du Cu, de l'Al et de Mo et peuvent être traités thermiquement Pour produire des résistances à la température ambiante supérieures à 1375 MPa .

# Chapitre 2

Le procédé de soudage à l'arc

### 3 Description de l'opération de soudage à l'arc électrique

#### 3.1 Définition :

*Le soudage* est une opération d'assemblage qui consiste à établir la continuité mécanique et métallurgique entre les parties à assembler. Le joint soudé ainsi formé peut-être le résultat du seul mélange des métaux de base (les métaux à souder) ou du mélange des métaux de base et d'un métal d'apport. [9]

*La soudabilité* est l'aptitude d'un matériau à être soudé dans les conditions de fabrication imposées dans une structure spécifique appropriée et à effectuer de manière satisfaisante dans le service prévu. Selon cette définition, la soudabilité de certains systèmes peut être mauvaise dans certaines conditions, mais satisfaisante sous d'autres conditions. La soudabilité dépend de la forme et de l'épaisseur de la section, de l'états des surfaces à assembler et des propriétés mécaniques des métaux. Elle est divisée en trois types :

*La soudabilité opératoire* qui caractérise les possibilités d'utilisation d'un procédé Pour réaliser un assemblage en un métal donné dans les conditions imposées (forme des assemblages, positions...);

*La soudabilité métallurgique* (dite encore soudabilité locale) qui caractérise l'aptitude d'un métal à subir sans dommage toutes les conséquences des phénomènes métallurgiques engendrés par une opération de soudage ;

*La soudabilité globale* qui caractérise l'aptitude d'une construction soudée à résister Sans dommage aux sollicitations d'épreuve et de service.

*Le soudage à l'arc* est un procédé de soudage par fusion où la chaleur est produite par un arc électrique, formé entre le métal de base et l'électrode, ou entre deux ou plusieurs électrodes. Le contact puis le léger éloignement de l'électrode par rapport aux pièces provoque l'arc électrique. [4]

#### 3.2 Procédés de soudage à l'arc :

Un arc est une décharge électrique établie et entretenue dans un gaz entre deux électrodes reliées aux pôles d'un générateur et dégageant de la lumière et de chaleur ; il forme une colonne ionisée conductrice qui répond à des lois physiques électriques et thermiques.

Le principe des procédés de soudage à l'arc a été fondé sur le principe de la décharge électrique.

Les procédés de soudage à l'arc se caractérisent chacun par deux éléments essentiels :

- *la nature de l'électrode* : baguette, fil fusible ou tige réfractaire ;
- *la nature du milieu* : gaz ou vapeurs, dans lequel s'établit la décharge électrique et qui doit avoir des propriétés protectrices vis-à-vis de l'atmosphère ambiante.

Les différents procédés de soudage à l'arc sont :

SMAW : Shielded metal arc welding ou bien soudage à l'arc avec électrode enrobée;

## Le procédé de soudage à l'arc

PAW : Plasma arc welding ou bien Soudage au plasma;

GMAW : Gas metal arc welding ou bien Soudage semi-automatique MIG et MAG avec fil électrode fusible;

FCAW : Flux-cored arc welding ou bien Soudage avec fil fourré;

SAW : Submerged arc welding ou bien Soudage sous flux en poudre;

GTAW : Gas tungsten arcwelding ou bien soudage avec une électrode réfractaire

### 3.3 Le procédé de soudage GTAW (TIG) :

L'existence du procédé TIG remonte aux années 1930 et son développement remonte à la deuxième guerre mondiale avec l'utilisation de nouveaux matériaux tels que les alliages d'aluminium et de magnésium.

Le soudage TIG (Tungsten Inert Gas), également appelé GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) aux Etats-Unis, est un procédé de soudage dit « par fusion ». Le principe du TIG est de créer un arc électrique entre une électrode réfractaire (c'est à dire non fusible) en tungstène et la pièce à souder. [10]

L'électrode et le bain fondu sont protégés contre l'oxydation de l'air par un bouclier de gaz inerte, généralement de l'argon pur. Parfois un mélange Argon-Hélium est utilisé pour augmenter la pénétration du bain de fusion, l'ajout d'Hélium permettant d'augmenter la tension d'arc en raison du potentiel d'ionisation plus élevé de celui-ci. L'Hydrogène, parfois présent dans le mélange gazeux, joue un rôle similaire à l'Hélium. L'électrode réfractaire en tungstène peut contenir des éléments d'addition comme le thorium ou l'yttrium qui favorisent l'émission électronique.

Le soudage TIG n'apporte que des calories à la pièce à souder, et s'effectue sans métal d'apport, contrairement à d'autres procédés à l'arc (électrode enrobée, MIG, MAG...). Néanmoins, un supplément de matière peut être apporté, sous forme de fil ou baguette. Le métal d'apport peut être de même constitution que le métal de base (soudage homogène), ou de constitution différente (soudage hétérogène).

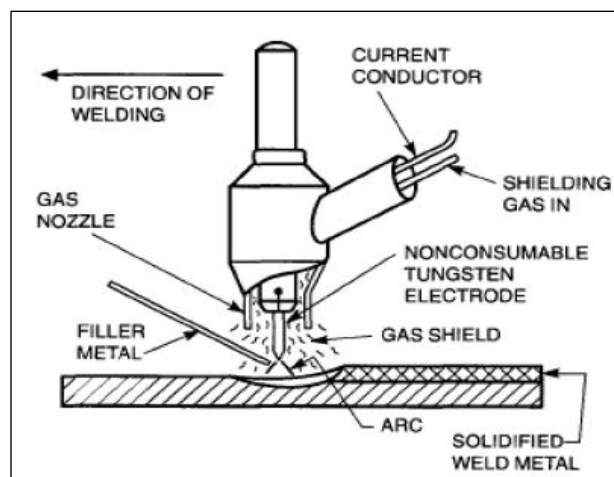


Figure 3-1: Principe du soudage TIG [10]

### 3.3.1 Matériels nécessaires

- **Générateur de courant** : la source électrique délivre un courant continu lisse, continu pulsé

Ou alternatif. La plage d'intensités s'étend de quelques ampères à plus de 400A pour les postes automatisés. La tension de soudage varie de 8 à 30V. Toute l'électronique de commande du cycle de soudage (temporisation avant et après soudage, amorçage haute fréquence, dispositif de stabilisation d'arc, rampe de montée ou d'évanouissement d'arc, fréquence et intensité des pulsations) est intégrée dans la source et le cycle est programmé via un pupitre de commande

- **La torche** : cette derniers est Composée d'une électrode de tungstène, d'une buse céramique canalisant le flux de gaz neutre et d'une gâchette utilisable en soudage manuel pour commander l'arc.

- **Gaz de protection** : système de protection gazeuse est incorporé à la torche pour Protéger l'arc et le bain. Bien souvent, l'utilisation d'un traînard de protection, endroit ou envers, vient garantir l'intégrité métallurgique du matériau au cours de son refroidissement (notamment dans le cas de matériaux très sensibles à la pollution gazeuse comme le titane ou ses alliages).

### 3.3.2 Propriétés énergétiques de l'arc électrique

Les sources de courant conçues spécifiquement pour le procédé TIG offrent la possibilité d'utiliser un courant alternatif ou continu. En effet, le soudeur a besoin de courant alternatif pour souder certains métaux, comme l'aluminium, alors qu'il utilise du courant continu pour le soudage de la plupart des autres métaux.

- ✚ Flux énergétique dans la colonne d'arc selon la pression :

L'importance relative de la conduction et de la convection dans la colonne d'arc peut Être évaluée par le nombre de **Peclet ( $P_e$ )**, dont l'expression est donnée par :

$$p_e = \frac{\rho V L C_p}{K}$$

À la pression atmosphérique, ce nombre  $p_e$  est d'environ '10'. Pour les basses pressions,  $p_e$  peut chuter sous la valeur de '1', alors le transfert de chaleur s'effectue principalement par conduction. Pour les pressions supérieures à la pression atmosphérique,  $p_e$  augmente et c'est la convection qui prédomine.

- ✚ Energie nominale et énergie dissipée dans le joint soudé :

L'énergie nominale ( $En$ ) représente l'énergie fournie au niveau de l'arc pour exécuter une soudure, elle est exprimée par :



$$E_n = \frac{UI}{V_s}$$

L'énergie fournie par l'arc n'est pas entièrement transmise aux pièces à souder en raison des pertes par rayonnement et par convection de la colonne d'arc dans l'atmosphère ambiante. Donc l'énergie dissipée ( $E_d$ ) dans un cordon de soudure (pièces) est donné par :

$$E_d = E_n \cdot \eta$$

$\eta$  : rendement de l'arc

✚ Rendement de l'arc électrique :

La proportion de l'énergie nominale d'arc transférée à l'assemblage est connue par le rendement de l'arc électrique  $\eta$ . Pour les procédés TIG et MIG/MAG, Dupont et al [Dupont 1995] estiment que le rendement ne varie pas de façon significative avec le courant de soudage. Le tableau I.1 indique les valeurs du rendement déterminées par quelques travaux expérimentaux. [11]

**Tableau 3-1:Rendement thermique de quelques procédés de soudage**

Procédé de soudage	de RYKALIN (1951)	HRISTENSEN(1965)	TSAI(1985)	DUPONT (1995)
Soudage MIG/MAG	0.65-0.85	0.66-0.70	0.80	0.80-0.88
Soudage TIG	<b>0.20-0.75</b>	<b>0.22-0.48</b>	-	<b>0.60-0.72</b>
Soudage à l'arc submerge SMAW	0.65-0.85	0.66-0.85	0.55-0.90	-

La variation du rendement de l'arc est fonction :

- ❖ Du procédé de soudage ; De la nature du courant (légère variation).
- ❖ Du matériau à souder.
- ❖ De l'épaisseur de la pièce à souder.

### 3.3.3 Avantages et les inconvénients du procédé

La grande qualité des soudures obtenues par le soudage TIG a fait de celui-ci un procédé idéal pour le soudage de presque tous les métaux ; il ne requiert que peu et même parfois aucun nettoyage après soudage.

Le soudage TIG s'exécute facilement dans toutes les positions sans aucune projection de métal ; les soudures se font sans emploi de laitier éliminant ainsi les inclusions de celui-ci et le bain de fusion est étroit et la vitesse de soudage relativement élevée.

En raison du gaz inerte, on peut dire que les émanations de vapeur et de fumée toxique sont éliminées dans la plupart des cas. Le dépôt de soudure est dense et le procédé permet d'exécuter les soudures sans porosité même sur des métaux difficilement soudables, tels

## Le procédé de soudage à l'arc

---

les alliages de titane, l'aluminium et le zirconium. Enfin, le procédé est aussi idéal pour effectuer des réparations ou fabriquer de petites séries de pièces.

**Tableau 3-2: les avantages et les inconvénients du procédé TIG**

Les avantage	Les inconvénients
<ul style="list-style-type: none"><li>• Inertie chimique exceptionnelle.</li><li>• Ce procédé de soudage apporte une grande qualité de régularité au cordon de soudure.</li><li>• Possibilité de soudage d'une vaste gamme de matériaux sous réserve de trouver le couple (gaz fil) correspondant.</li><li>• Le procédé GTAW permet d'assembler des aciers fortement alliés, des alliages : d'Aluminium, de Nickel, de Cuivre et de Magnésium.</li><li>• Automatisation possible</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Préparation des assemblages plus soignée.</li><li>• Taux de dépôt et vitesses de soudage faibles, d'où le procédé n'est pas utilisé pour le soudage des matériaux nobles</li></ul>

# Chapitre 3

les phénomènes impliqués durant le soudage

## 4 Phénomènes physiques et métallurgiques impliqués durant le soudage

### 4.1 Plasma et apport d'énergie :

La différence de potentiel entre anode (pièce à souder) et cathode (électrode) crée un courant électrique, qui engendre un champ magnétique auto-induit. Ce champ magnétique crée à son tour des forces de Lorentz qui vont entraîner le gaz en projection vers la surface de la pièce. L'énergie produite par effet Joule, due au passage du courant, va garder le gaz dans un état ionisé (plasma), à haute température.

C'est l'énergie calorifique provenant de ce plasma, constitué d'électrons, de particules lourdes, d'éléments métalliques vaporisés, et possédant une forte conductivité électrique, qui permet de faire fondre la pièce. Le plasma agit donc à la fois comme un flux de chaleur à la surface et comme une source de courant non uniforme à travers le métal de base. [10]

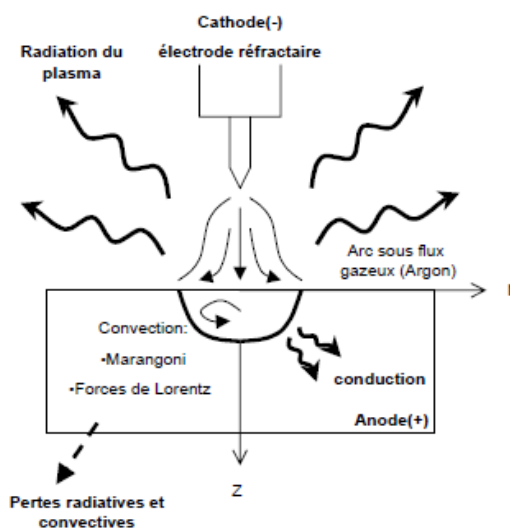


Figure 4-1: Transfert d'énergie en procédé TIG

### 4.2 Le transfert thermique

Le bain de fusion créé lors du soudage TIG (éventuellement alimenté par un apport extérieur de matière) est le siège de processus thermophysiques très complexes mettant en jeu des phénomènes thermiques, convectifs, chimiques et électromagnétiques interdépendants. Ces mouvements de convection du métal liquide influencent de façon importante les transferts de chaleur et la forme du cordon. [4]

L'énergie qui pénètre dans la pièce crée un bain de fusion. Dans ce bain de fusion, la chaleur se transmet par conduction, mais également par convection, cette dernière influençant tout particulièrement la forme du front de fusion. En outre, à la frontière liquide-solide, le flux de conduction qui passe de la partie liquide à la partie solide subit en outre une discontinuité, égale à la chaleur latente de changement de phase. Dans la partie solide, les transferts de chaleur se font par conduction uniquement. Sur les bords

solides de la pièce, les échanges avec l'environnement sont de types radiatifs et convectifs.

### 4.2.1 Les conséquences du transfert thermique :

Constituent un point important dans l'opération du soudage, puisqu'ils nous donnent la possibilité d'interpréter quantitativement les phénomènes métallurgiques que cette opération engendre et par suite de prévoir ces phénomènes pour en tenir compte dans le choix des procédés de soudage et des modes opératoires.

#### 1. Les cycles thermiques :

C'est la variation de la température en fonction du temps en un point donné de l'assemblage, ce qui commande des phénomènes tel que : les transformations, la dilatation et le retrait [9]

Les cycles thermiques fournissent les informations nécessaires à l'interprétation métallurgique des phénomènes thermique ainsi les informations suivantes :

- La température maximale  $T_{max}$
- Le temps de séjour à haute température  $T_s$
- La loi de refroidissement et la vitesse de refroidissement

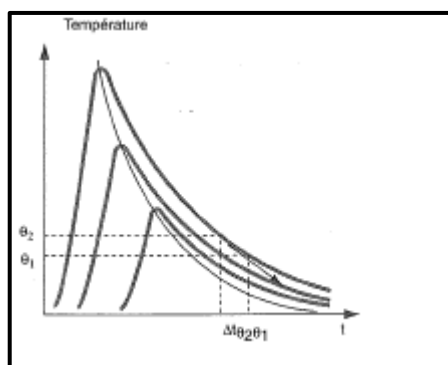


Figure 4-2: les cycles thermiques pendant le soudage [9]

Rappelons que lors d'un soudage par fusion, avec ou sans métal d'apport, le métal fondu et le métal chauffé vont subir un cycle thermique qui se caractérise par :

- Un chauffage très rapide quelques fractions de secondes jusqu'à une température variante entre la température de fusion et la température initiale du métal, le niveau atteint étant d'autant plus élevés que la distance au bain fondu est faible
- Un refroidissement immédiat dont la vitesse dépend de
- L'ensemble des conditions opératoires
  - L'épaisseurs des produits assemblés
  - Les paramètres de soudage (voltage et intensité)
  - Le procédé et son rendement thermique

#### 2. La Répartition thermique :

On peut également déterminer à travers ces données la répartition thermique aux alentours du cordon de soudure, qui représente la variation de la température maximale

atteinte  $\theta_m$  en fonction de la distance  $x$  qui nous permettra de délimiter les étendues des différentes zones.

### 4.2.1.1.1 Zone métallurgique du cordon de soudure :

L'opération peut être assimilée à une opération locale d'élaboration métallurgique et à des opérations locales de traitements thermiques donnant une structure cristalline dépendant à la fois de la composition chimique élaborée et du traitement thermique. Ainsi réalisée, la soudure se décompose en plusieurs zones:

- **La zone fondue:** (nommée ZF) zone où l'état liquide a été atteint [4], Elle est obtenue par fusion du métal de base, avec une contribution significative du métal d'apport, le métal qui constitue la soudure est appelé métal de soudure. Le métal ajouté à l'état liquide, c'est-à-dire avant dilution, est appelé métal déposé [6]. La structure métallurgique obtenue après solidification, dépend du cycle de refroidissement [4].
- **la zone de liaison:** Cette zone correspond à la limite à laquelle le métal-de base a été amené à fondre. Il marque également la frontière de la zone de fusion et se manifeste par la différence de structure que nous pouvons voir de chaque côté. Si nous regardons de plus près, nous devons tenir compte du fait que tout alliage (dans le sens le plus large du terme) est caractérisé par une plage de température appelée plage de solidification dans laquelle le liquide et le solide les phases coexistent [6].
- **La zone affectée thermiquement:** (nommée ZAT) zone se trouvant en bordure de la zone fondue, de largeur variable, ayant été soumise à l'élévation de température sans être portée à la fusion. Des modifications plus ou moins importantes dans la structure métallurgique sont générées en fonction de la température maximale atteinte, la composition chimique des métaux de base et du métal d'apport s'il existe ainsi que la vitesse de refroidissement.
- **Le métal de base:** au-delà de la zone affectée thermiquement, l'élévation de température

Est insuffisante pour engendrer une quelconque transformation structurale.

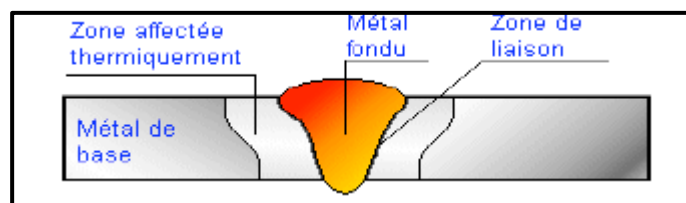


Figure 4-3:Cordon de soudure

## 4.3 Changement de phase lors du soudage :

Les conséquences des cycles thermiques du soudage dépendent de la nature de l'acier et de ses transformations éventuelles, il est donc nécessaire pour rentrer dans les détails des transformations métallurgiques, de considérer chaque type d'acier individuellement.

### 4.3.1 Solidification et formation des structures :

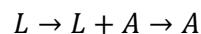
#### 4.3.1.1 Aciers inoxydables :

L'élévation de la température durant le soudage a pour intérêt de fusionner localement le métal pour rassurer la cohésion après refroidissement ; ainsi on obtient une continuité de la matière macroscopiquement observé, microscopiquement cette température représente l'énergie qui engendre de nombreuses transformation métallurgique, ces transformations dépendent à la fois du type d'acier et de ses éléments d'additions.

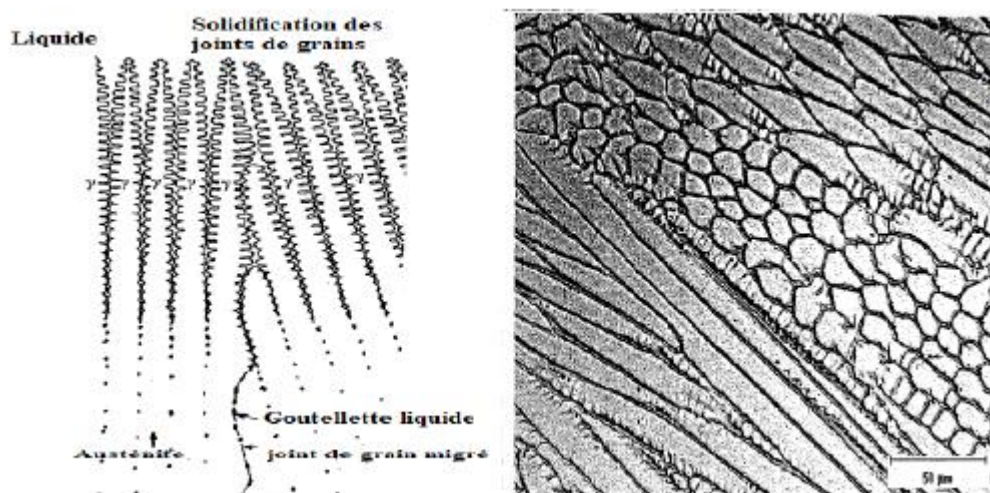
La zone fondue d'un acier inoxydable pendant le refroidissement est le siège d'une des transformations à l'état solide suivantes :

- Transformation de type A

Sa réaction est donnée par :



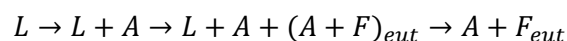
La microstructure finale après solidification est entièrement austénitique, bien définie



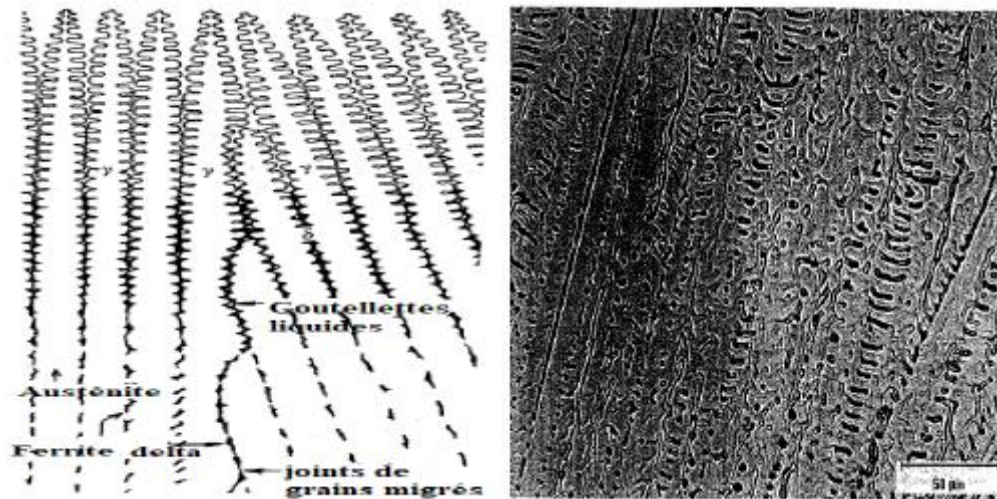
**Figure 4-4: Microstructure de la zone de fusion résultant de la solidification entièrement austénitique (type A), d'après *Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels*, by John C. Lippold and Damian J. Kotecki**

- Sa Transformation de type AF

Sa réaction est donnée par :



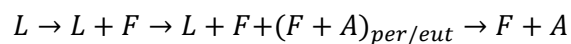
La structure finale est constitué de ferrite aux limites des cellules et des dendrites.



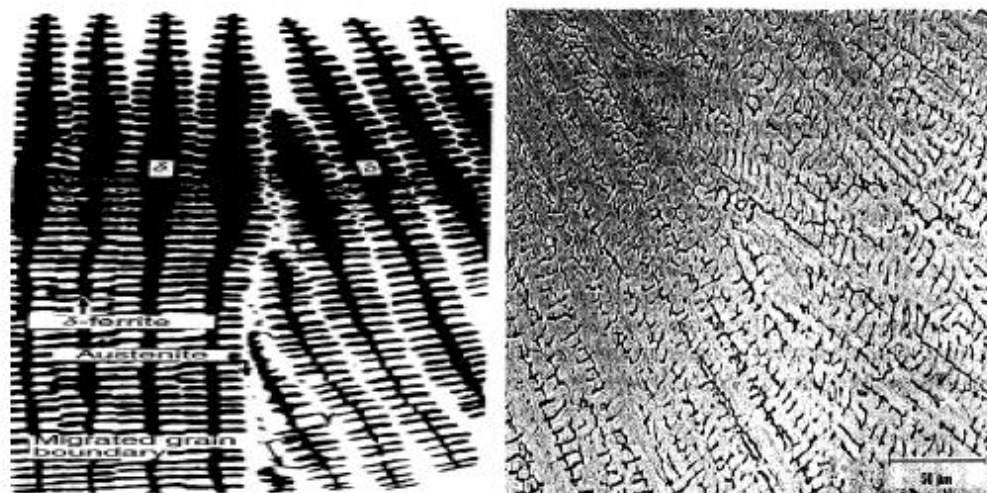
**Figure 4-5: Microstructure de la zone de fusion résultant de la solidification type AF d'après Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels, by John C. Lippold and Damian J. Kotecki**

- Transformation de type FA :

Sa réaction est donnée par :



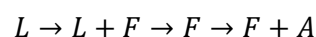
La microstructure finale est composée de Squelettiques et / ou lathy ferrite résultant de la transformation ferrite-à-austénite



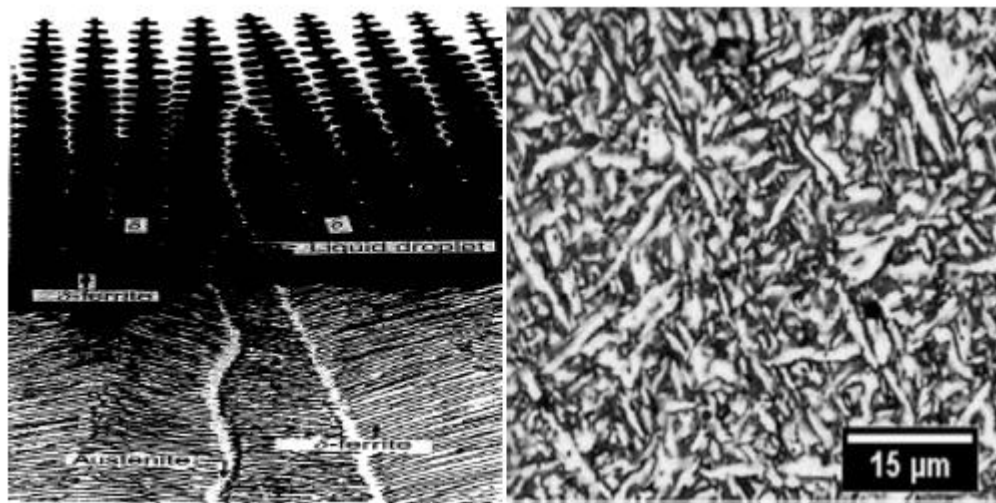
**Figure 4-6: Microstructure de la zone de fusion résultant de la solidification type F avec morphologie squelettique, d'après Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels, by John C. Lippold and Damian J.**

- Transformation de type F

Sa réaction est donnée par :

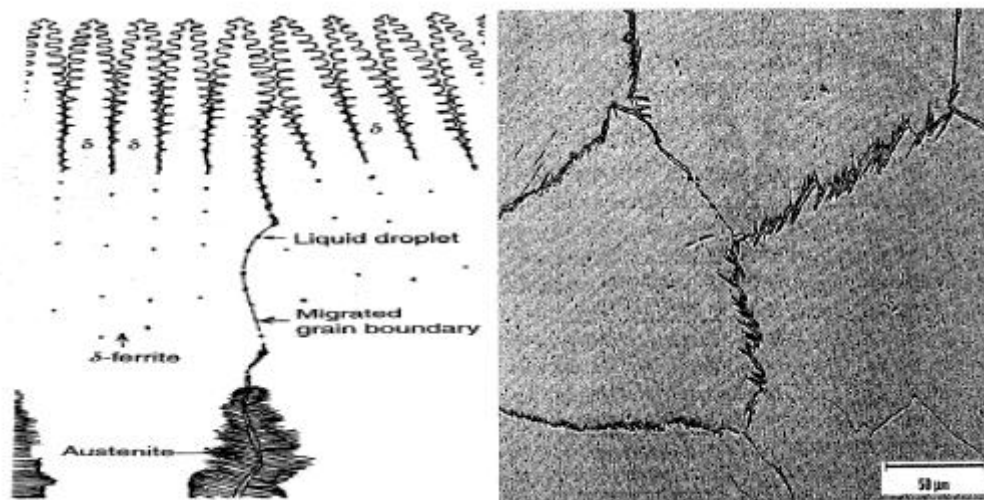






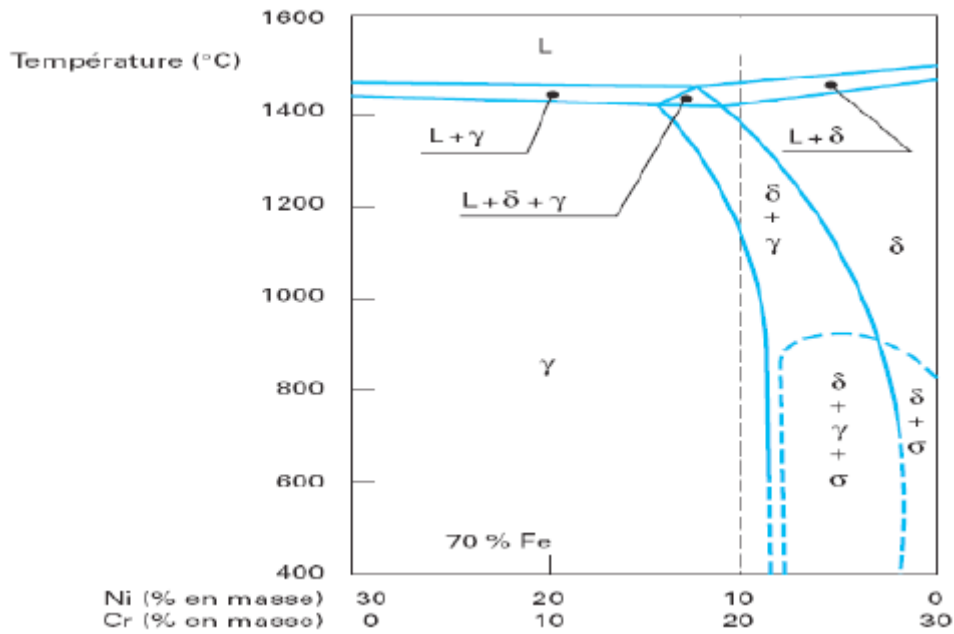
**Figure 4-7: Microstructure de la zone de fusion résultant de la solidification type F ferrite aciculaire, d'après Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels, by John C. Lippold and Damian J. Kotecki**

La microstructure finale est une matrice de ferrite ou ferrite aciculaire avec austénite aux joints de grains et plaques latérales Widmanstätten.



**Figure 4-8: Microstructure de la zone de fusion résultant de la solidification type F (ferrite et l'austénite de Widmanstätten), d'après Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels, by John C. Lippold and Damian J. Kotecki**

La Coupe pseudo binaire du diagramme Fe-Cr-Ni résume les 4 transformations citées :

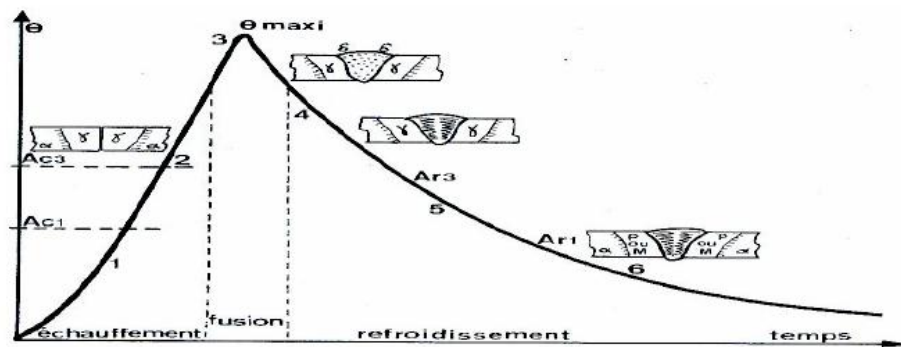


**Figure 4-9: Coupe pseudobinaire du diagramme d'équilibre ternaire fer-chrome-nickel à 70% de fer, d'après Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels, by John C. Lippold and Dam**

#### 4.3.1.2 Acier au carbone

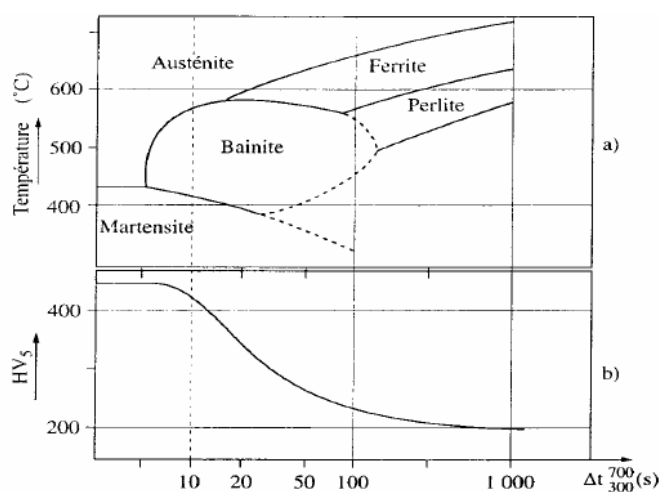
Tout comme les aciers inoxydables, au voisinage de la zone fondue, le métal subit les effets des cycles thermiques et les transformations qui auront lieu sont liées aux conditions de refroidissement du joint soudé. La figure représente les transformations au cours du soudage en fonction du temps de refroidissement.

- 1: Dilatation, plastification ; Ac1 cessation des états hors équilibre.
- 2: Dilatation, plastification ; Ac3 début de l'austénitisation.
- 3: (zone fondue) fusion, dilution du métal d'apport et du métal de base et changement de la Structure (ferrite  $\delta$ ).
- 4: solidification et formation des premières dendrites austénitiques accompagné d'un retrait, Ar3.
- 5: transformations allotropiques (M ou, M+F+C ou, F+C) diffusion de l'hydrogène, ainsi qu'une Présence de contraintes locales est constaté Ar1.
- 6: Fin de transformation, contraction, contraintes résiduelles ; avec des risques de fissuration à froid



**Figure 4-10: cycle thermique d'un acier au carbone**

Les modifications structurales au court du refroidissement sont décrites à travers des diagrammes TRC établis spécialement pour le soudage :



**Figure 4-11: exemple de diagramme TRC en condition de soudage  $\Theta_M = 1300^\circ\text{C}$**

En fonction de la cinétique de refroidissement la transformation de l'austénite s'opère de différentes manières:

- La structure martensitique dure (de réseau tétragonale) prend place ; pour des cinétiques

Rapides de refroidissement.

- Pour des cinétiques intermédiaires c'est la structure bainitique qui prend forme.
- Par contre pour de faibles vitesses de refroidissement l'austénite c'est le mode perlitique qui prend forme.

Notons que les conditions de soudage ainsi que les paramètres sont choisis de tel manière à obtenir une structure saine et adéquate de manière à assurer des propriétés mécaniques et Métallurgiques voulues et d'éviter de surcroit toute structure nocive qui pourrait affecter le cordon de soudure. [12]

# Chapitre 4

le soudage hétérogène

## 5 Soudabilités des aciers

On appelle assemblage hétérogène tout assemblage dont un des composants est différents du ou des autres :

- Matériaux de base à assembler différents
- Matériaux de base identiques soudées avec un métal d'apport différent

La soudabilité des matériaux métalliques est leurs aptitudes à permettre la réalisation pratique d'assemblages soudés dont les propriétés sont compatibles avec les conditions d'utilisations imposées. Elle est étroitement liée aux procédés et aux conditions de soudage mis en œuvre et elle dépend essentiellement des types et des propriétés des structures métalliques obtenues.

Un assemblage hétérogène sain est un assemblage qui a la résistance mécanique à minimum de celle du plus faible des matériaux à assembler et une ductilité suffisante pour éviter la rupture dans la zone fondue

Afin de rassurer une continuité parfaite des propriétés mécanique, différents moyens ont été proposés pour permettre d'évaluer ce que sera la structure du métal fondu après son retour à la température ambiante en fonction de sa composition chimique.

### 5.1 Diagrammes de constitution

Partant des pouvoirs alphas et gammas des différents éléments, des diagrammes ont été tracés avec pour objectif de prévoir la structure du métal à l'état brut de soudage en premier lieu.

Parmi ces diagrammes on dénomme : celui de SCHAEFFLER, DELONG, ESPY, WRC,.....etc.

Le plus répandu et le plus connu étant le diagramme de "SCHAEFFLER" .

#### 5.1.1 Le diagramme de SCHAEFFLER /BYSTRAM

Sur un diagramme de SCHAEFFLER, BYSTRAM a positionné les zones à risque de :

- Fissuration à chaud lors du soudage
- Fissuration martensitique à froid
- Fragilisation par grossissement de grain
- Fragilisation par précipitation de phase  $\delta$

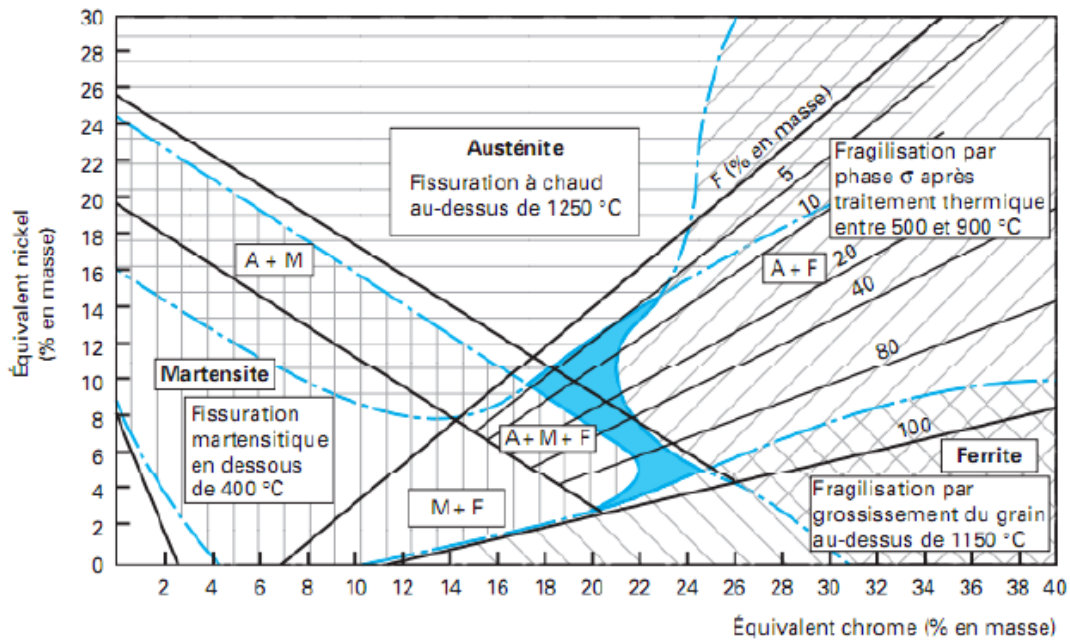
Notons cependant qu'il existe aussi une zone sans risque dans laquelle on s'efforcera, dans la mesure du possible de placer le point représentatif de la structure de la zone fondue [9]

Ce diagramme nous permettra donc de prévoir les différents types de microstructure en fonction de ce qu'il existe comme élément d'alliage on pourra ainsi :

- Choisir un métal d'apport adapté, garant de bonnes qualités métallurgiques
- Prédire la structure de la zone fondue à l'état brut de soudage

- Appréhender les différents risques métallurgiques lors d'un assemblage soudé

Le seul inconvénient de ce diagramme est qu'il n'est pas adapté aux nuances à teneurs élevées en azote et/ou manganèse.



**Figure 5-1: Diagramme de constitution des aciers inoxydables à l'état brut de soudage [13]**

chrome équivalent:  $\% Cr + \% Mo + 1,5(\% Si) + 0,5(\% Nb)$

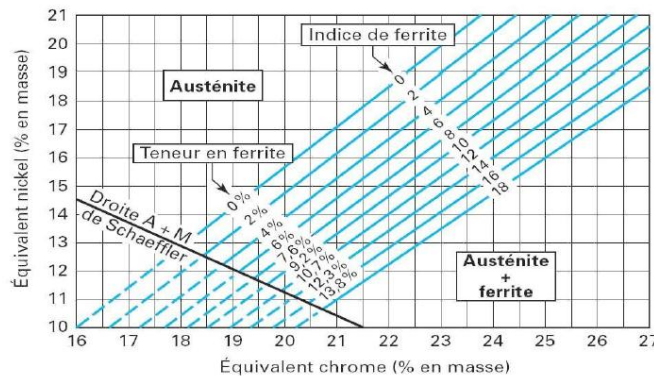
Nickel équivalent:  $\% Ni + 30(\% C) + 0,5(\% Mn)$

Le taux de ferrite peut être déterminé si l'analyse de la zone fondue est connue par la formule suivante : (formule de SEFERIAN) [13]

$$\% \text{ ferrite} = 3 (\text{Creq} - 0,93 \text{ Nieq} - 6,7)$$

### 5.1.2 Diagramme de DELONG

La prise en considération par ce dernier de l'effet de l'azote en tant qu'élément gamma gène, A conduit à une légère rectification du diagramme de schaeffler (notamment au niveau du domaine Austénite+Ferrite). [13]



**Figure 5-2: Diagramme de DELONG [3]**

Le diagramme de DELONG n'est pas utilisable pour le soudage hétérogène, et non adapté aux nuances fort en Manganèse et/ou Azote

### 5.1.3 Diagramme d'ESPY

Identique au diagramme de SCHAEFFLER à part que les formules des  $(C_{req}, N_{ieq})$  ont été légèrement affinées. Ce diagramme est bien adapté aux nuances à teneur élevée en azote manganèse. [13]

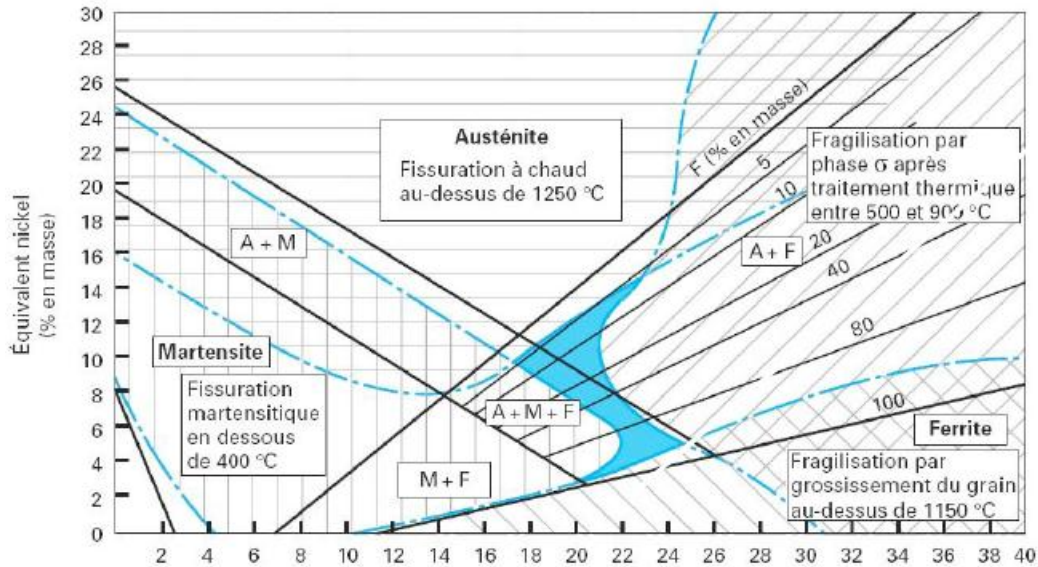


Figure 5-3: diagramme D'ESPY

### 5.1.4 Diagramme WRC92

Vers la fin des années 1980, le Welding Research Council a proposé un diagramme simplifié, limité aux aciers inoxydables austénitiques et austéno-ferritiques et gradué spécifiquement en FN (ferrite number ou indice de ferrite) [7]

Nota: il n'existe pas de relation continue entre FN (ferrite number ou indice de ferrite) et le pourcentage de Ferrite. Des relations partielles, limitées à certains domaines, peuvent être établies de plus le diagramme présente :

- Un nombre réduit d'éléments pour le calcul des  $C_{Req}$  et  $N_{ieq}$ .
- Un domaine d'application restreint le rendant mal utilisable pour le soudage hétérogène.

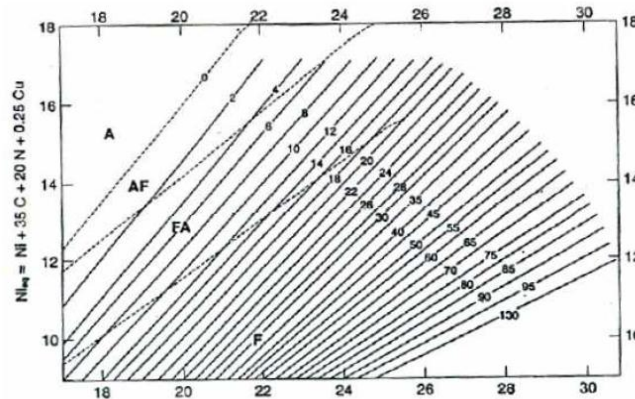


Figure 5-4: Diagramme WRC92

## 5.2 L'influence du rapport $C_{req}/N_{i_{eq}}$ Sur la microstructure final

Il a été montré que les modes de transformations cités dans le chapitre précédent pouvaient se déduire d'un rapport noté :

$$C_{req}/N_{i_{eq}}$$

- $\frac{C_{req}}{N_{i_{eq}}} < 1.25$  : mode A ;
- $1.25 < \frac{C_{req}}{N_{i_{eq}}} < 1.48$  : mode AF ;
- $1.48 < \frac{C_{req}}{N_{i_{eq}}} < 1.95$  : mode FA ;
- $\frac{C_{req}}{N_{i_{eq}}} > 1.95$  : mode F

Il est clair que la microstructure finale est un résultat du type de solidification, comme dans le cas de mode FA si le rapport  $C_r/N_i$  augmente, la morphologie de la ferrite évolue et prend un aspect lattes bidimensionnelles, parallèles et régulièrement espacées.

Dans le cas du mode AF, la ferrite a aussi un aspect squelettique mais elle est interdendritique il est tout fois difficile de distinguer les deux types de ferrite en micrographie.



# Chapitre 5

modélisation et simulation numérique

## 6 La modélisation

### 6.1 Introduction :

La connaissance du flux thermique et la maîtrise de l'étendu de ces zones thermiques à risques sont importantes pour toute étude préventive de l'effet des différents paramètres de soudage qui les influence. En conséquence, la direction des flux thermiques et les variations de température, en termes de vitesse de refroidissement local, déterminent l'état microstructural et les propriétés mécaniques du cordon de soudure. Donc l'étude thermique est primordiale pour toute étude d'optimisation des caractéristiques des cordons de soudure ou amélioration de leur qualité

Modélisation du transfert thermique [4]

### 6.2 Mise en équation, hypothèses et condition aux limites

#### 6.2.1 Mise en équation

La modélisation véritablement complète du problème thermique nécessiterait la modélisation des transferts de chaleurs thermofluides dans l'arc électrique, avec prise en compte des phénomènes électromagnétiques, la modélisation des mouvements convectifs dans le bain fondu, en interaction avec le plasma de couverture, et les transferts de chaleur dans la partie solide

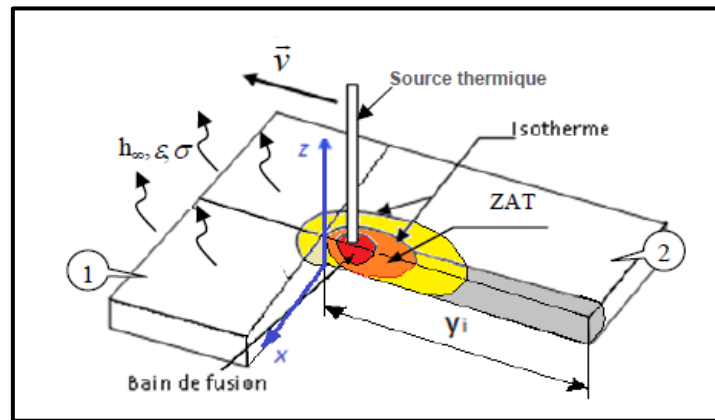
Nous nous placerons par la suite dans une optique de modélisation avec des codes de calculs industriels, qui ne permettent pas de modéliser les phénomènes présents dans l'arc et le bain fondu. Ceux-ci sont remplacés par la définition d'une source de chaleur de forme adéquate, avec éventuellement une modification des propriétés thermophysiques de façon artificielle après fusion, Seule la conduction de la chaleur est par conséquent modélisée, c'est pourquoi il ne sera pas fait allusion à la modélisation de l'arc et du bain par la suite. [1]

L'équation de conduction de la chaleur dans la tôle à souder s'écrit en générale :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \vec{\nabla})T = \frac{\partial}{\partial x} \left( K \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K \frac{\partial T}{\partial z} \right) + S$$

Avec :

T : Température ; t : Temps ;  $\rho$  : Densité du matériau à souder, V : vitesse de Soudage,  $C_p$  : Chaleur spécifique ; K : Conductivité thermique ; S : Source de chaleur (Générée ou absorbée).



**Figure 6-1:Schéma du processus de soudage de deux tôles[1]**

### 6.2.2 Les hypothèses

Pour modéliser le processus du transfert d'énergie entre l'arc et la surface des métaux où un bain de fusion est généré. Il est important de noter et d'évoquer les hypothèses suivantes:

1. Le régime est transitoire et bidimensionnel (O, x, y).
2. La direction de soudage s'effectue selon l'axe 'x' entre deux tôles minces.
3. La vitesse de soudage est monodirectionnelle et sa valeur est prise comme constante.
4. Les propriétés thermiques (K,  $\rho$ , Cp ) du matériau sont indépendantes de la température.
5. Les changements de phases dans les métaux à souder ne sont pas pris en compte.
6. L'écoulement du bain de fusion est négligeable.
7. La source de chaleur est mobile et répartie.
8. Les déperditions calorifiques par convection et rayonnement à travers les surfaces libres et les frontières de la pièce sont considérées. [4]

### 6.2.3 LES CONDITIONS AUX LIMITES ET INITIALES :

La résolution de l'équation différentielle nécessite la détermination des conditions aux limites et initiale, pour bien poser le problème et avoir une solution unique. Les conditions aux limites se résument donc, comme suit:

- Au niveau des frontières, on a le flux  $q_n$  égale:

$$q_n = h_\infty(T - T_\infty) - \sigma\varepsilon(T^4 - T_\infty^4)$$

- Au plan symétrique d'assemblage, le flux de chaleur est nul donc:

$$q_n = 0$$

- La température initiale du matériau est supposée égale à la température ambiante:

$$T_0 = 300K$$

Après simplification l'équation devient :

$$\frac{\partial T}{\partial t} + V \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + \frac{S}{\rho C_p}$$

Avec:

$\alpha$  : est la diffusivité thermique.

### 6.3 Modèle thermique de la source d'énergie

Le terme 'S' de l'équation est la source de la chaleur qui s'écrit selon le Modèle du bain de fusion bi-elliptique [14]:

- Pour le métal de base, c'est l'énergie interne générée :

$$S = 2h_{\infty}(T - T_{\infty}) + 2\sigma\varepsilon(T^4 - T_{\infty}^4)$$

- Au niveau du cordon :

$$S = h_{\infty}(T - T_{\infty}) + 2\sigma\varepsilon(T^4 - T_{\infty}^4) + q_0 e^{f(x,y,t)}$$

- Ce terme doit être représenté sous la forme linéaire :

$$S = SC + SP * TP$$

Tel que, la linéarisation de ce terme s'obtient en utilisant la méthode de la tangente. Nous l'adaptions sous une forme générale, équations (3), (Au niveau du métal de base et du cordon de soudure) comme suit :

$$\begin{cases} SC = (2 - cas)(h_{\infty} + 3\sigma\varepsilon T^{\circ 4} + \sigma\varepsilon T_{\infty}^4) + cas * q_0 e^{f(x,y,t)} \\ SP = -(2 - cas)(h_{\infty} + 4\sigma\varepsilon T^{\circ 3}) \end{cases}$$

Où : cas = 0 Au niveau du métal de base ;

Cas = 1 Au niveau du cordon de soudure.

L'indice '°' de  $T^{\circ}$  indique que la température est calculée à l'instant précédent.

Le coefficient  $q_0$  de l'expression II.4 de la source de chaleur est égal :

$$q_0 = \frac{3Q}{\pi r * (r_{yav} + r_{yar})/2}$$

$$Q = \eta UI$$

Tel que :

U: Tension électrique (V) ; I : l'intensité de courant (A) ;  $\eta$ : le rendement de l'arc.

La fonction  $f(x, y, t)$  est égale à :

$$f(x, y, t) = -3 \left( \frac{x^2}{r_x^2} + \frac{(y - vt)^2}{r_y^2} \right)$$

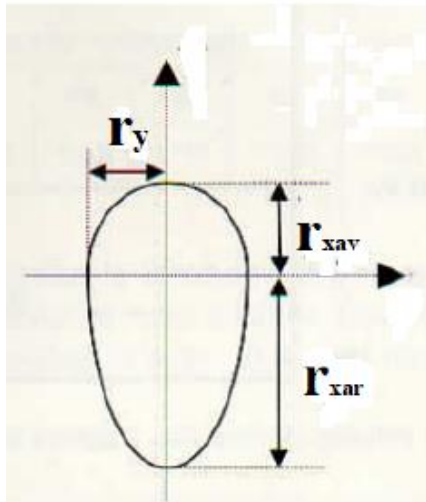


Figure 6-2:le modèle bi-elliptique du bain de fusion

Les rayons du bain bi-elliptique ( $r_x$  ,  $r_{yav}$  et  $r_{yar}$  ) sont définis de manière que 95% de la chaleur générée soit contenue dans la bi-ellipse.

## 6.4 Résolution numérique par la méthode des différences finies

### 6.4.1 Principe de la méthode

La méthode consiste à déterminer la température des points ( $i, j$ ) qui dépend du temps et des températures des points voisins tel :

$$f(j, i, t) = T(j, i, t) + \Delta t \left( \frac{K}{\rho C_p} \right) \left( \frac{T(j, i + 1, t) + T(j + 1, i, t) - 4T(j, i, t)}{\Delta x^2} \right)$$

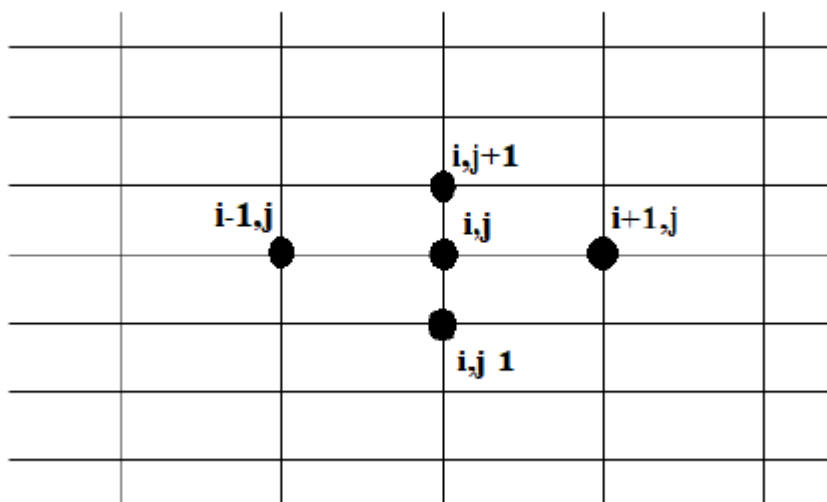


Figure 6-3:Principe de la méthode de différences finies

**Itération GAUSS-SEIDEL** : Lorsque le nombre de nœuds est très important, une technique itérative peut souvent donner une solution plus efficace aux équations nodales qu'une inversion matricielle directe [7]. Une telle méthode est appelée l'itération de Gauss-Seidel et est appliquée de la manière suivante :

- Un ensemble initial de valeurs pour de  $T(i, j)$  est supposé. Cette hypothèse initiale peut être obtenue par n'importe quelle méthode expérimentale. Pour qu'un grand nombre de nœuds soient résolus sur un ordinateur, les  $T(i, j)$  reçoivent généralement une valeur de température ambiante pour démarrer le calcul.
- Ensuite, les nouvelles valeurs des températures nodales sont calculées selon l'équation, en utilisant toujours les valeurs les plus récentes du  $T(i, j)$ .
- Le processus est répété jusqu'à ce que les calculs successifs diffèrent d'une quantité suffisamment faible. En termes de programme d'ordinateur, cela signifie qu'un test peut être inséré pour arrêter les calculs lorsque :

$$|T(i, j)_{n+1} - T(i, j)_n| \leq \delta$$

D'où  $\delta$  est une constante à choisir selon la précision voulu et  $n$  est le nombre d'itération .

Alternativement, un test non dimensionnel peut être sélectionné de telle sorte que :

$$\left| \frac{T(i, j)_{n+1} - T(i, j)_n}{T(i, j)_n} \right| \leq \varepsilon$$

De toute évidence, plus la valeur de  $\delta$  est petite, plus le temps de calcul nécessaire pour obtenir le résultat souhaité est grand. L'utilisateur devrait noter, cependant, que la précision de la solution au problème physique ne dépend pas seulement de la valeur  $\delta$ . Cette constante régit la précision de la solution. La solution au problème physique dépend également de la sélection de l'incrément  $\Delta x$ .

Concernant le critère de convergence choisis, nous avons opté comme solution définir expérimentalement l'étendu de la zone affectée thermiquement ensuite pour chaque itération on conserve la Map des températures obtenues et on relance le calcul jusqu'à ce que la différence de température dans un nœud donné entre deux itérations soit égal à 1 °C.

**Implémentation sous MATLAB** : Après la modélisation du problème physique et sa discrétisation nous avons implémenté le modèle sur MATLAB, le programme nécessite la définition de plusieurs paramètres (Géométrie, Matériau, Calcul et opératoire), dans cette optique une interface graphique facilitant à l'utilisateur leur

## Modélisation et simulation numérique

introduction a été conçue. Les figures illustrent les étapes d'introduction des variables, l'exécution et la visualisation des résultats:

### 1. Démarrage de l'application



Figure 6-4:page d'accueil de l'application

### 2. L'insertion des paramètres de soudage :

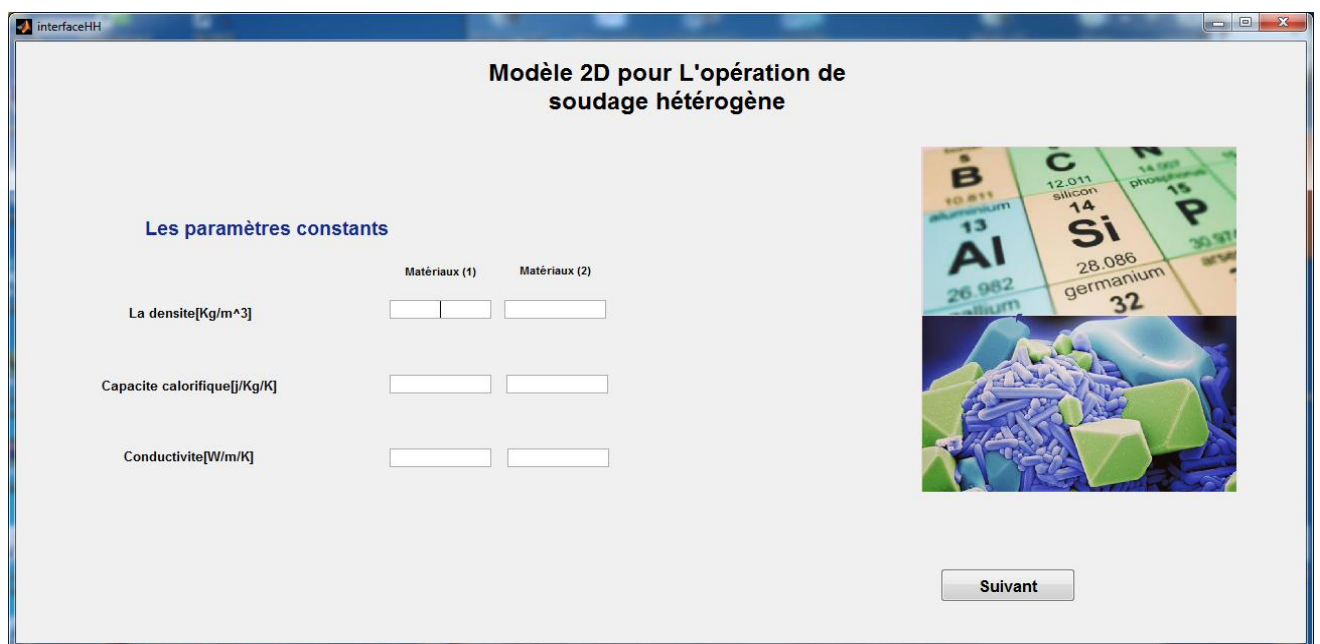


Figure 6-5:définition des matériaux à souder

### 3. Définir la géométrie deux pièces

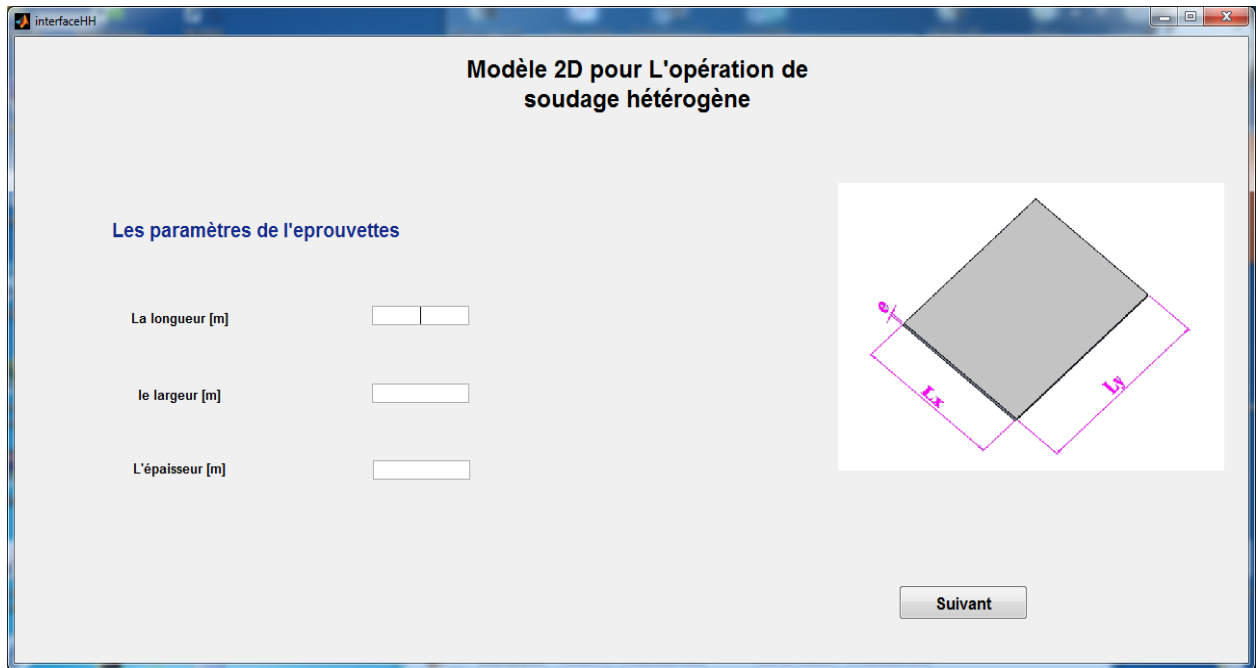


Figure 6-6: la géométrie de la pièce à souder

#### 4. Introduction des paramètres opératoires :

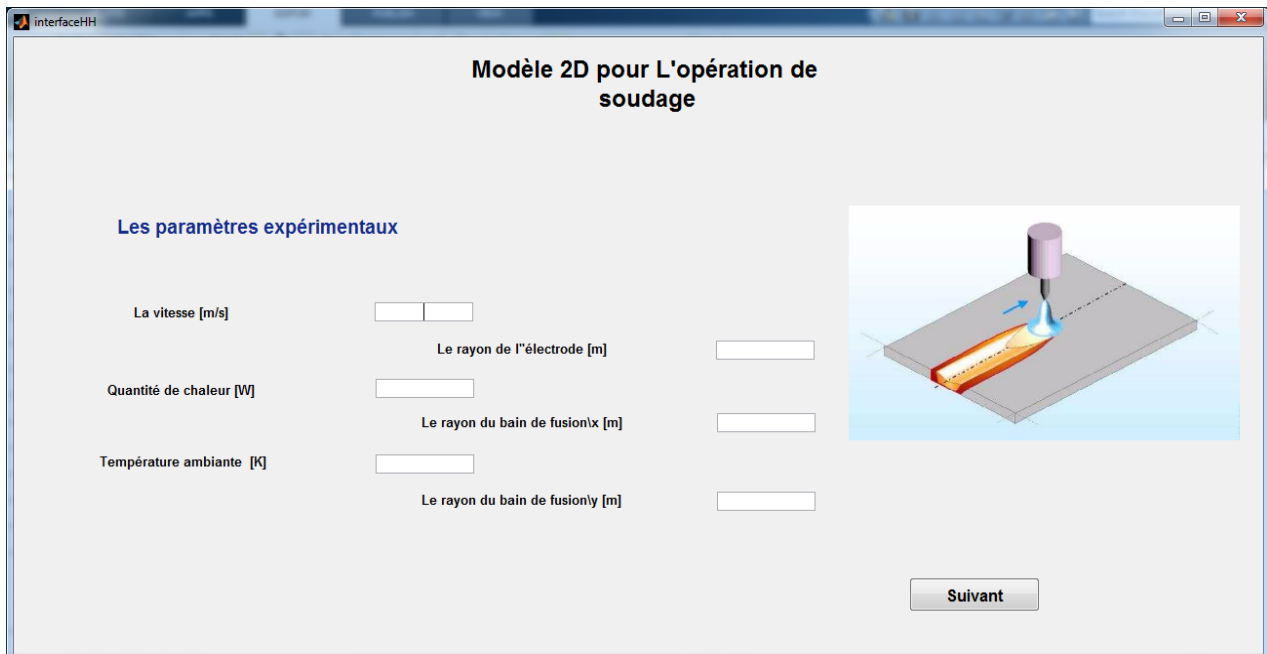


Figure 6-7: les paramètres opératoires liés au procédé de soudage des pièces



## 5. Paramètre de calcul

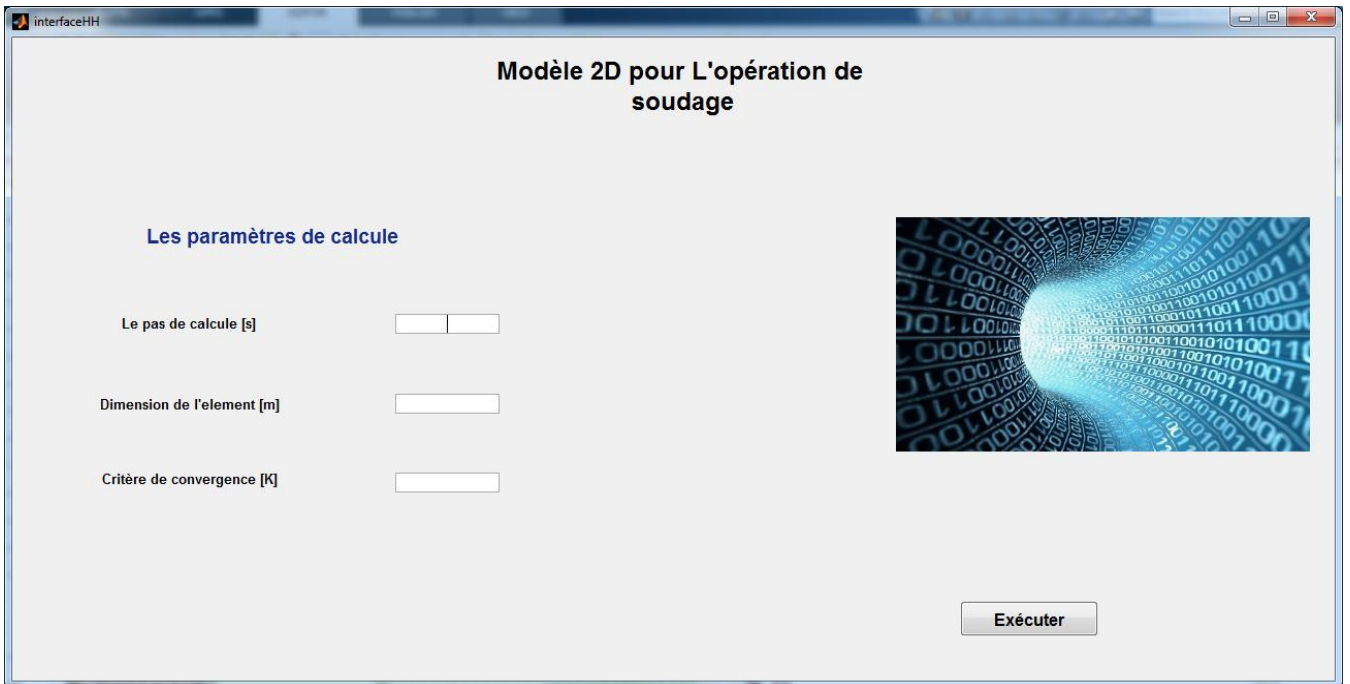


Figure 6-8: les paramètres de calcul (méthode de résolution de notre système d'équation initial)

## 6. Calcul des résultats



Figure 6-9: calcul des résultats qui prendra jusqu'à 2 minutes de calcul par le processeur

## 7. Visualisation des résultats :

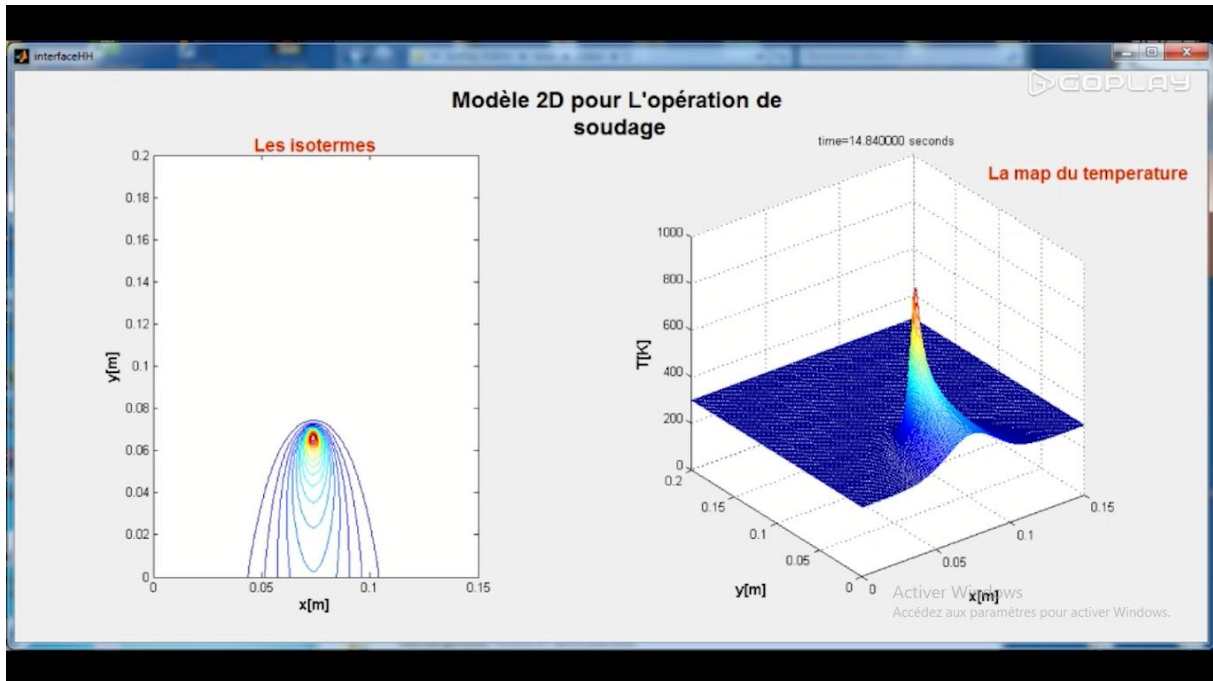


Figure 6-10: la visualisation des résultats de calcul

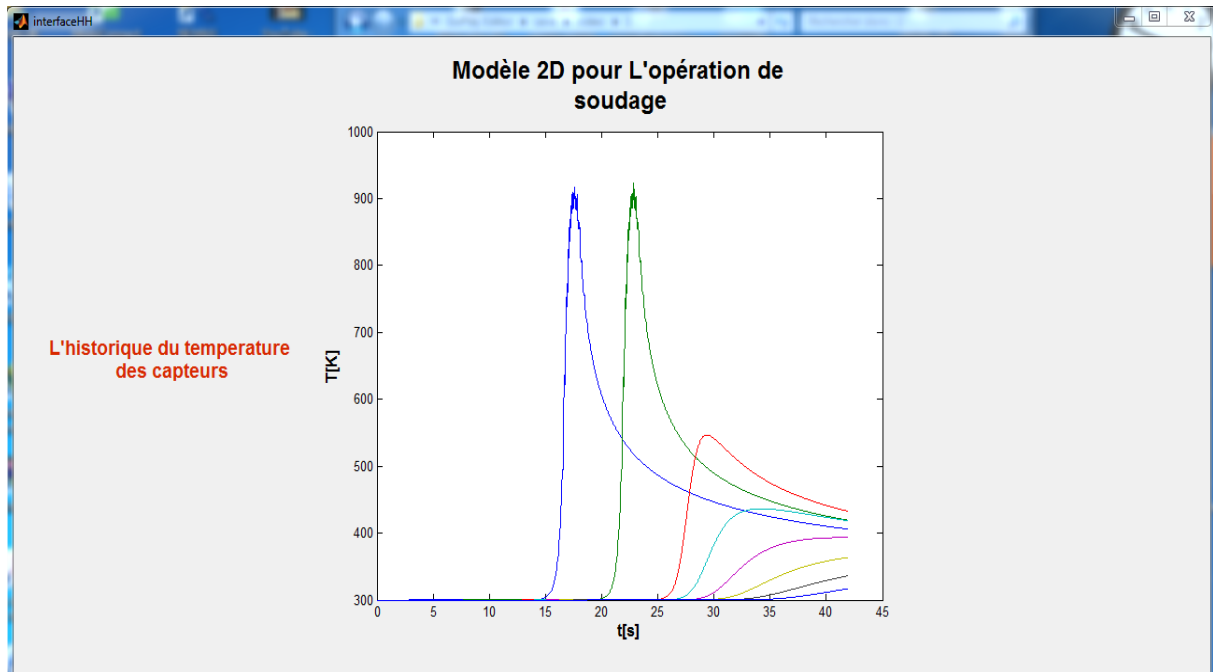


Figure 6-11: historique des températures

### **6.5 Simulation avec le code COMSOL-multiphysics**

#### **6.5.1 Présentation de COMSOL**

COMSOL a été créé en juillet 1986 par Svante Littmarck et Farhad Saeidi à l'Institut royal de technologie (KTH) de Stockholm, en Suède [15].

COMSOL Multiphysics est un logiciel multiplateforme d'analyse par éléments finis, de solveur et de simulation multiphysique. Il permet des interfaces classiques basées sur la physique et des systèmes couplés d'équations aux dérivées partielles (EDP) [16].

COMSOL fournit un flux de travail IDE et unifié pour les applications électriques, mécaniques, fluides et chimiques. Une API pour Java et LiveLink pour MATLAB peuvent être utilisées pour contrôler le logiciel en externe, et la même API est également utilisée via l'éditeur de méthode [15].

#### **6.5.2 Aspect multiphysique**

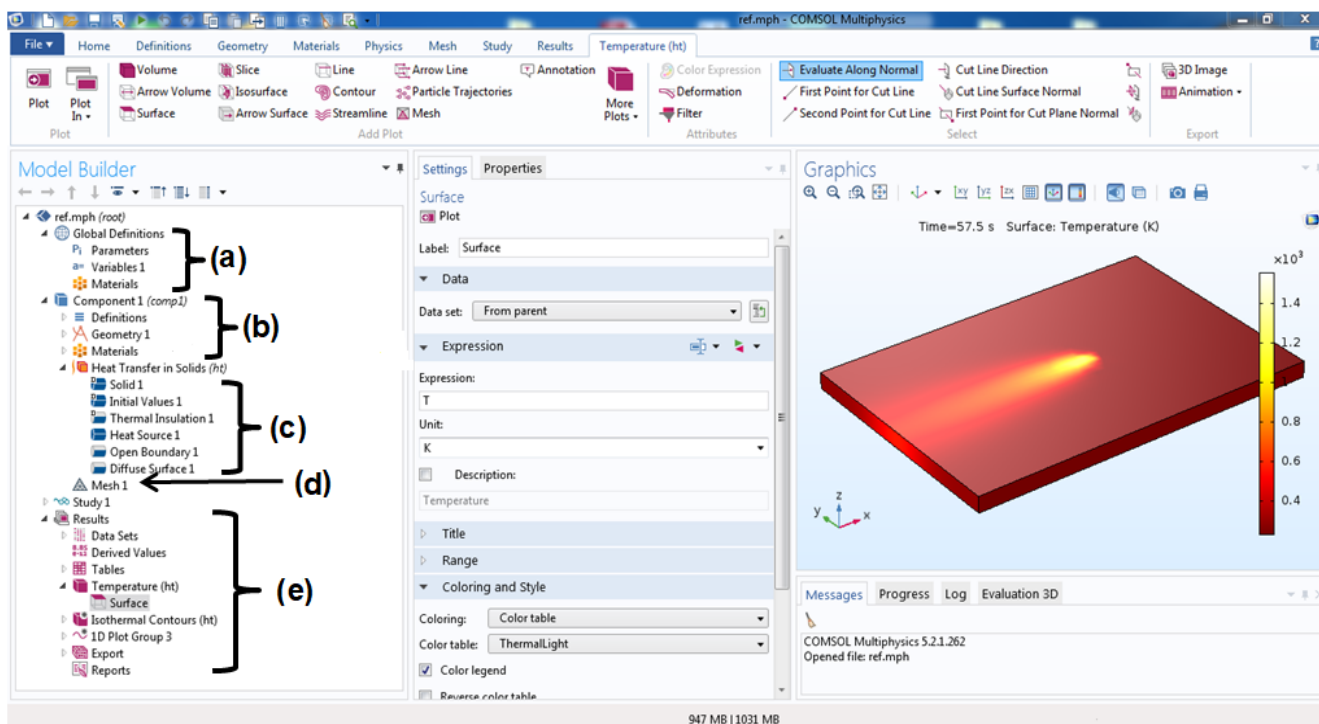
Plusieurs modules sont disponibles pour COMSOL, classés en fonction des domaines d'application, à savoir: Électrique, Mécanique, Fluide, Chimique, Multifonction et Interfaçage, on s'intéressera dans notre cas par le module "Fluid and heat" spécialement le "heat transfert module" [17].

C'est un module de transfert de chaleur qui contient des outils de simulation pour étudier les mécanismes de transfert de chaleur conduction, convection et rayonnement souvent en collaboration avec d'autres physiciens, tels que la mécanique des structures, la dynamique des fluides, l'électromagnétisme et les réactions chimiques.

#### **6.5.3 Implémentation du modèle sous COMSOL**

L'opération de soudage va être simulée à un déplacement d'une source de chaleur à une vitesse constante sur une plaque tridimensionnelle de dimension  $220 \times 75 \times 3 \text{ mm}^3$  où nous nous intéressons juste au phénomène de transfert de chaleur par conduction.

Pour le calcul des isothermes dans les deux matériaux l'introduction des paramètres s'effectuera séparément par division du domaine d'étude (la plaque à souder)



**Figure 6-12: interface COMSOL**

La réalisation de la simulation passera par les étapes suivantes:

**(a) Déclaration des variables et des différents paramètres** Avant tout calcul il faut introduire les formulations des différents paramètres de l'équation de transfert de chaleur par conduction, le grand souci était comment déclarer des variables qui dépendront d'autres par exemple le terme  $q_{in}$  de source de chaleur et le temps pour l'expression de déplacement suivant l'axe  $\vec{X}$  sans oublier la précision des unités de calcul. Les paramètres des cas étudiés en variant la vitesse de soudage ou bien l'intensité sont inclus dans cette section où nous pouvons définir les constantes telles que la tension de soudage les rayons de la bi-ellipse de Goldak [14].

**(b) Construction de la géométrie et choix du matériau** Pour la géométrie, nous avons le choix soit la construire en utilisant les outils fournis par COMSOL soit importée un modèle CAO sous format PART.

COMSOL multiphysics fournit une bibliothèque riche de matériaux répartie selon le type d'alliage et offre à l'utilisateur la possibilité de varier les propriétés physiques du matériau.

Parameters				Variables			
Parameters				Label: Variables1			
Name	Expression	Value	Description	Name	Expression	Unit	Description
x0	0[m]	0 m		X	$x0+Vs*t$	m	
y0	75[mm]	0.075 m		Y	y0	m	
q0	$120*15.2*0.65[W]$	1185.6 W		Qin	$q0/(e*3.14*Rs^2)*exp...$	W/m <sup>3</sup>	
Rs	5[mm]	0.005 m					
Vs	0.28[cm/s]	0.0028 m/s					
e	3[mm]	0.003 m					

**Figure 6-13: Déclaration des variables**

**(c) Introduction des conditions de la physique :** Les conditions aux limites et les conditions initiales varient selon la physique choisie, pour notre cas d'autres considérations sont à prendre en compte tel que le terme source.

La compréhension du problème et sa modélisation physique joueront un rôle clé dans la validité des résultats de ce fait nous avons choisi la configuration suivante :

- Les conditions initiales: nous avons considéré une température initiale constante Sur la totalité du matériau  $T=300K$ .

- Les conditions aux limites: la surface supérieure de soudage sera exposée à un rayonnement ou nous avons introduit l'émissivité du matériau qui égale  $\varepsilon=0.02$ , pour les surfaces latérales et à cause de leurs superficies réduites, nous avons supposé qu'elles sont exposées à une convection naturelle à l'air ambiant, alors que le reste du matériau est exposé à un transfert de chaleur par conduction.

**(d) Maillage** Idem que la géométrie, COMSOL nous offre la possibilité d'effectuer le maillage avec des éléments prédéfinis ou bien d'importer le maillage prés avec autres logiciels plus performant sous différentes formats STL...

L'élément de volume choisi est un tétraèdre libre où la taille de l'élément est définie selon la taille du maillage choisie, plusieurs possibilités sont offertes d'une taille extrêmement fine jusqu'à une taille grossière tout dépend le degré de criticité du phénomène.

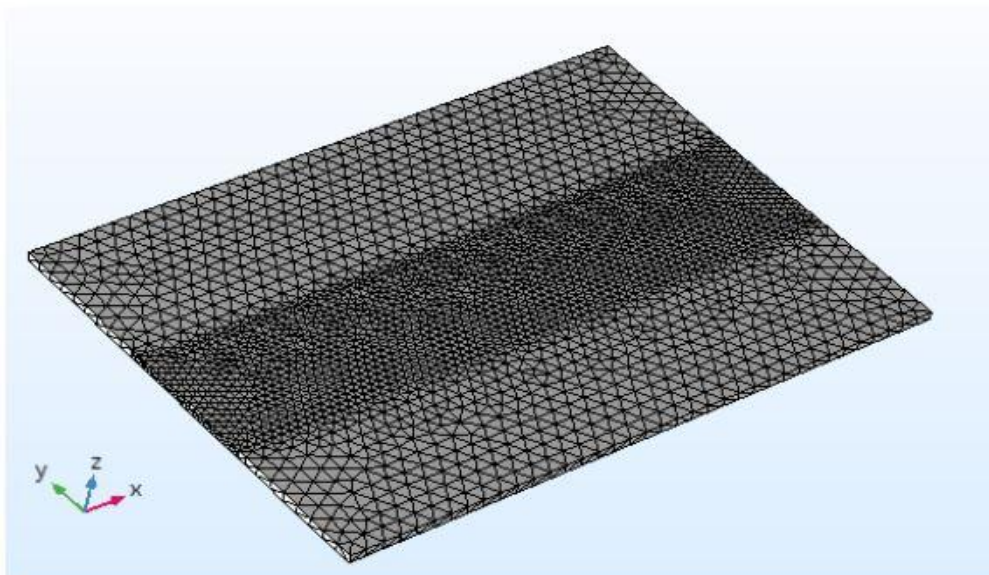


Figure 6-14:le maillage

**(e) Visualisation et exportation des résultats :**Après lancement de calcul les résultats peuvent être manipulés d'une façon très simple sur COMSOL où nous pourrons soit visualiser les contours de températures ou bien l'historique dans une position bien précise soit les exportés sous format txt.

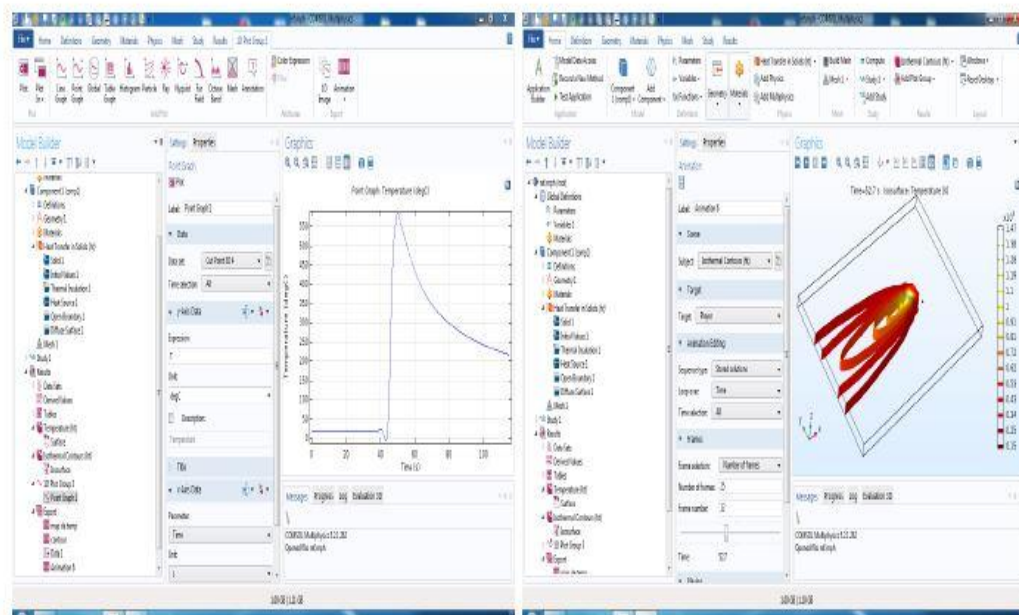


Figure 6-15:visualisation des résultats

# Partie 2

Expérimentation

# Chapitre 6

matériaux et méthodes expérimentaux



## 7 Expérimentation

### 7.1 Introduction

Le présent chapitre est consacré à la description du déroulement des essais conduits sur le matériau sujet de l'étude. En premier lieu, nous commencerons par la caractérisation du matériau puis, nous détaillerons les étapes du déroulement des essais de soudage et l'enregistrement des cycles thermiques et nous terminerons par les différents essais mécaniques.

### 7.2 Identification des matériaux :

Le soudage hétérogène qu'on a effectué nécessite deux plaques un acier inoxydable 316L et un acier au carbone A578 et un métal d'apport

- **Le métal de base « l'acier inoxydable »**

C'est un acier inoxydable du type A.I.S.I. 316 L sous forme de tôle d'épaisseur de 3mm. Une analyse chimique par spectroscopie de masse a été réalisée sur des échantillons prélevés de la tôle au niveau du CSC pour déterminer la composition exacte de la nuance. Le sous type L signifie ``low carbon ``et indique que l'acier contient moins de 0,03% de carbone. Sa nuance suivant la norme EN 10027 est **X2CrNiMo17-12-2 (1.4404)**

**Tableau 7-1: la composition chimique d'acier inox 316L**

L'élément	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
(%)	0.175	0.444	0.85	0.0377	<0.0005	15.60	2.40	8.730

- **Le métal de base « acier doux »**

C'est un acier au carbone du type A.I.S.I A576 sous forme de tôle d'épaisseur de 3mm. une analyse chimique par spectroscopie de masse a été réalisée sur des échantillons prélevés de la tôle au niveau du CSC pour déterminer la composition exacte de la nuance Sa nuance selon la norme **EN 10027** est **11SMn30 (1.0715)**

**Tableau 7-2 :la composition chimique d'acier au carbone A576**

L'élément	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
(%)	0.0925	0.177	0.838	0.107	0.264	0.0625	0.413	0.259

- **Le métal d'apport**

Ce sont des baguettes de métal d'apport de type **AWS A 5-9 : ER 309L** destiné pour le soudage TIG des aciers inoxydables (fortement alliés) austénitiques et duplex.

Ce type de baguette est souvent utilisable pour souder les aciers dissemblables ou inox sur acier peu ou faiblement allié, tôles de chaudière, tôles plaquées.

Sa composition chimique est indiquée sur sa fiche technique :

**Tableau 7-3: la composition chimique du métal d'apport**

L'élément	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S
(%)	0.02	24	13	0.04	1.8	<0.45	0.02	<0.02

### 7.3 Positionnement sur diagramme de SCHAEFFLER

#### 7.3.1 Calcule des équivalents :

Les relations empiriques utilisés :

$$\%Nieq = \%Ni + 30 \times \%C + 0.5 \times \%Mn$$

$$\%Creq = \%Cr + \%Mo + 1.5 \times \%Si + 0.5 \times \%N$$

**Tableau 7-4: résultats de calcules des pourcentages de Cr équivalent et Ni équivalent**

	<b>Cr<sub>eq</sub></b>	<b>Ni<sub>eq</sub></b>
<b>MA</b>	16.67%	14.405%
<b>MB</b>	0.7435%	3.453%
<b>MC</b>	25%	14.5%

**MA** : métal de base « acier inoxydable »

**MB** : métal de base « acier doux »

**MC** : métal d'apport

### 7.4 Caractérisation microstructurale des matériaux

La microstructure des matériaux opaques comme les métaux s'étudie à l'aide d'un microscope optique a réflexion, afin de voir la microstructure des deux aciers, un balayage continu dans les trois directions de l'espace du matériau a été effectué dans un microscope de type au sein de laboratoire CSC après polissage et attaque chimique.

Le polissage jusqu'au 1200 a produit un état de surface comparable à celui d'un miroir et l'attaque chimique de la surface polie a relevé les phases présentes dans la microstructure.

Une fois la microstructure est obtenue, un logiciel sous java (image J) a été utilisé pour estimer la proportion de ferrite et la comparer avec celle obtenue par le diagramme de **SHAFFLER**.

. Les attaques chimiques utilisées sont résumées dans les tableaux suivants :

**Tableau 7-5: l'attaque chimique et les solutions utilisés**

	<b>Solution</b>	<b>Commentaire</b>
<b>Les attaques chimiques effectuées</b>	Villela (5ml HCL, 1g d'acide picrique, 100ml méthanol)	Révèle la ferrite, la phase $\sigma$ et les carbures
	Régal (eau) (15ml HCL, 5ml HNO <sub>3</sub> , 100ml H <sub>2</sub> O)	Révèle l'austénite

## 7.5 Caractéristiques mécaniques

### 7.5.1 Essai de traction :

L'essai de traction, l'un des essais les plus pratiqués, permet de déterminer des caractéristiques mécaniques fondamentales des matériaux : limite d'élasticité, charge de rupture, et allongement de rupture notamment, il consiste à réaliser, dans une éprouvette, un champ de contraintes uniformes uniaxiale de traction et à enregistrer l'allongement résultant.

Une machine de traction est composée de deux mors, l'un sur une traverse fixe, l'autre sur une traverse mobile. Entre les deux mors, on fixe l'éprouvette. Ensuite, deux systèmes de mesure sont nécessaires, l'un pour mesurer l'effort appliqué, l'autre pour mesurer le déplacement relatif des deux mors, ou la déformation de l'éprouvette.

Ces essais de traction ont été effectués à l'aide d'une machine de traction électromécanique de type **LLOYD (AMETER)** de capacité 20 KN. Les essais ont été réalisés à vitesse de déplacement imposé (2 mm/mm).

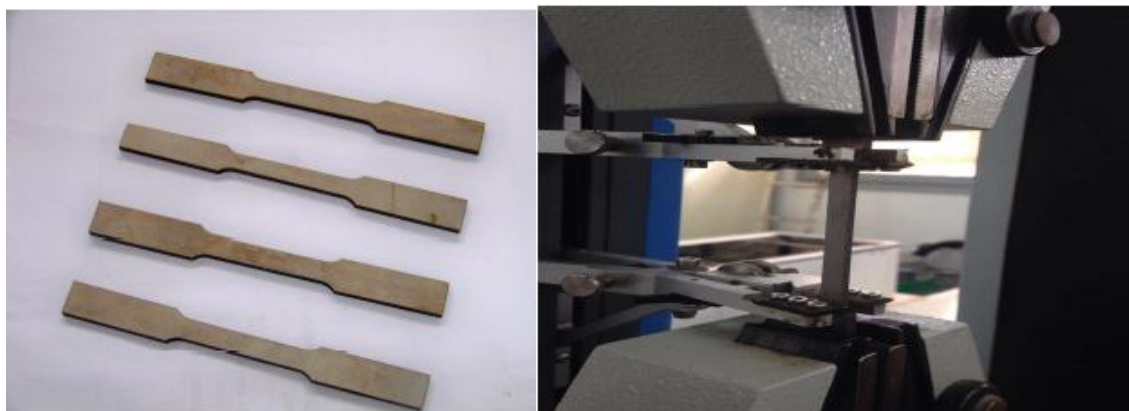
Les caractéristiques mécaniques sont prélevées d'un essai fait sur une éprouvette à section rectangulaire montrée sur la figure spécifiée selon la norme **ASTM B557 2a** (voir annexe) découpée par le procédé robot fil (électro-érosion) pour éviter tout risque de modification métallographique, les résultats sont indiqués dans le Tableau :

**Tableau 7-6: résultats de l'essai de traction de l'acier 316L**

Propriétés	E(MPa)	Re(MPa)	Rm (MPa)	A%
Valeur	223440	89586	4470	715

**Tableau 7-7: résultats de l'essai de traction de l'acier A576**

Propriétés	E(MPa)	Re(Mpa)	Rm(MPa)	A%
Valeur	206000	210	410	25



**Figure 7-1:dispositif et éprouvettes de l'essai de traction**

### 7.5.2 La micro dureté :

L'essai de dureté est largement utilisé sur les métaux. Il caractérise la résistance qu'oppose le matériau à la pénétration d'un autre corps plus dur que lui. Ainsi, pour des conditions expérimentales données, la dureté du métal sera d'autant plus grande que la pénétration du corps sera faible. Il existe trois principaux type d'essais de dureté, qui diffèrent essentiellement par la forme du pénétrateur: l'essai Brinell, l'essai Vickers et l'essai Rockwell.

Les mesures de microdureté Vickers ont été réalisées pour les des deux métaux de base qui vont constituer notre cordon de soudure (acier inoxydable, acier au carbone) en appliquant une charge de 300 g

**Tableau 7-8:Le tableau des résultats obtenus de la microdureté**

Type d'acier	A576	316L
Valeurs	181HV	123HV

## 7.6 Réalisation des cycles thermiques

### 7.6.1 Dispositif expérimental :

Le dispositif conçu permet de souder à l'aide d'un poste TELWIN Tecnica inverter 190 Tig des joints de soudures sur des plaques de dimensions variables d'un test à l'autre en fonction des objectifs visés.

La conception et la réalisation de banc de soudage étaient les premières tâches effectuées avant d'entamer tout essai sur notre sujet.

Au cours de chaque essai nous imposons :

L'intensité de soudage I, le débit du gaz d, la vitesse de déplacement de la torche Vs et les conditions de bridage.

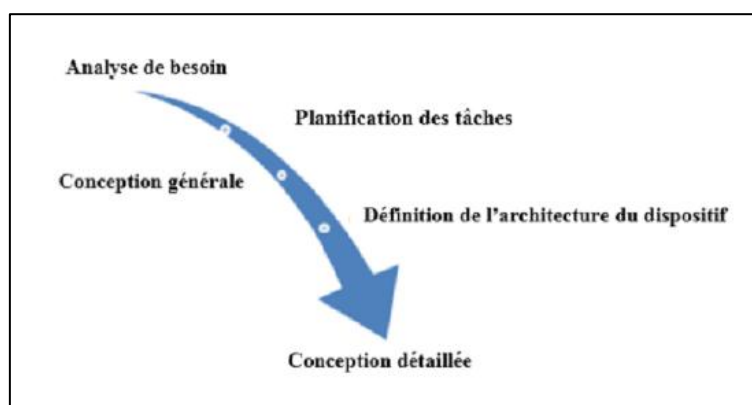
L'intensité de soudage  $I$  est réglée par le poste de soudage, les essais réalisés consistent à déposer un cordon de soudure en une seule passe entre deux plaques une en acier inoxydable austénitique (304L) et une autre en acier doux (A576), de dimensions  $220 \times 75 \times 3 \text{ mm}^3$ , Le dispositif expérimental est illustré sur la figure :



**Figure 7-2: Vue d'ensemble du dispositif expérimental réalisé:  
Banc du soudage**

### 7.6.2 Conception du dispositif

L'objectif de cette section est de concevoir un banc d'essai pour la détermination expérimentale des cycles thermiques caractéristiques au soudage des tôles de différentes épaisseurs. Nous allons suivre le processus linéaire décrit sur la figure, pour la conception du dispositif.



### 1. Analyse du besoin :

La réalisation de cette étape revient à comprendre le mécanisme des essais expérimentaux à réaliser et de lister un ensemble de points qui devront être pris en charge lors de la conception du banc d'essai. La révélation des températures consiste à préciser un certain nombre de points échantillons qu'on connaît leurs coordonnées dans un repère lié à la pièce à condition qu'**ils englobent la phénoménologie du problème** et ensuite placé les thermocouples dedans pour avoir les mesures des températures à cet endroit à une fréquence donnée.

Un cahier de charge a été proposé en se basant sur quelques anciens travaux où il y'avait **des problèmes de fixation** des capteurs, inexistence **des conditions de bridage** et l'adaptation du dispositif avec **des dimensions variables** de pièces à souder sans oublier **l'aspect ergonomique** de l'opération ce qui concerne **les mesures de sécurité** de l'opérateur, **la protection du système d'acquisition**, **le moindre encombrement** ainsi que l'aspect **esthétique**.

### 2. Planification des tâches

La deuxième étape du processus de conception est la planification des tâches. Elle a été réalisée en suivant l'ordre suivant :

- proposer une architecture à notre dispositif.
- montrer l'architecture proposée aux promoteurs...
- corriger les fautes et modifier les points remarqués.
- ramener la nouvelle architecture aux promoteurs.
- en cas d'obtention de la validation ça sera la ligne de départ pour la dernière étape qui est la conception détaillée.

### 3. Conception général

L'idée principale est d'avoir un système sur lequel repose les pièces à souder et qui permette en même temps l'accès des thermocouples ainsi que leurs fixations le tout sera déposer sur une table prête qui sera juste adaptée aux objectifs.

A. **Proposition d'architectures pour le banc d'essai** Une première architecture a été proposée. Elle est montrée ci-dessous :



**Figure 7-3:première architecture proposée**

Cette solution a été proposée aux différents acteurs (encadrement, réalisateurs et même aux camarades) où plusieurs remarques ont été soulevées :

- Le calcul de dimensionnement n'était pas nécessaire comme il n'y aura pas de charge intense sur le dispositif.
- La fixation des capteurs via des petits trous de diamètre 1.5mm demande une précision et un outillage
- Proposition de rajout d'une pièce annexe qui fera le rôle de guidage des thermocouples  
Et permette l'accès à ces derniers à travers un taraudage ou nous utiliserons des vis pour les appuyer.
- L'ajout d'un support de fixation pour caméra thermique.

### 7.6.3 Conception détaillée

Finalement notre dispositif est composé de :

1. Table de travail.
2. Support de soudage :
  - Plaque de guidage des thermocouples.
  - Pièce annexe de fixation et de guidage.
  - Appuis des pièces à souder.
  - les pièces à souder
3. Poste de soudage TIG.
4. Système d'acquisition.
5. Thermocouples.
6. Un ordinateur.

### 7.6.4 Description du banc d'essai

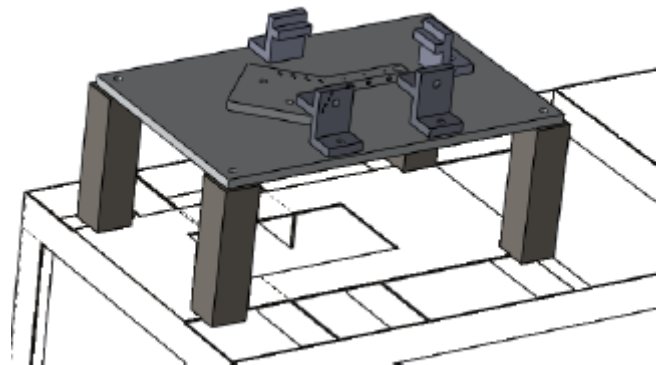
Le choix des éléments qui constituent notre banc d'essai reste toujours discutable, de nombreux travaux ont été faits dans le même but et qui ont été la source de notre inspiration . [4] [10]

Le support principal qui est la table était disponible au niveau du laboratoire de génie Des matériaux où nous avons juste fait quelques modifications, les principaux changements concernaient exactement l'ajout de quatre pieds pour donner plus d'hauteur aux opérateurs pour la maîtrise de la position de soudage à plat (bout à bout), un découpage montré sur la figure suivante est réalisé pour permettre l'accès du câblage des capteurs, concernant le support de la caméra thermique, ça sera perpendiculaire au plan de soudage pour éviter tout angle de vue qui compliquera la détermination des coordonnées des points de mesure. Voir annexe B



**Figure 7-4:Table de travail**

Le support de travail est une plaque qui portera les appuis des pièces à souder, son rôle principal est le guidage des thermocouples, ils seront placés à l'intérieur de la plaque, insérés dans des perçages de 1.5 mm de diamètre, Les positions des thermocouples (TC) sont réparties selon un angle de 45°, afin de minimiser les perturbations provoquées par les thermocouples voisins alors que trois autres seront placés le long du cordon de soudure. Ainsi, l'incertitude sur la localisation de la prise de mesure est d'environ 0.5 mm.



**Figure 7-5:Plaque de guidage et support.**

Pour assurer la fixation des thermocouples une pièce annexe a été ajoutée au-dessous de la plaque qui contiendra aussi la même disposition des capteurs, grâce à cet ajout nous pourrons les serrer latéralement, la forme de losange était au début triangulaire mais c'est changé pour faciliter sa mise en place sur la fraiseuse.



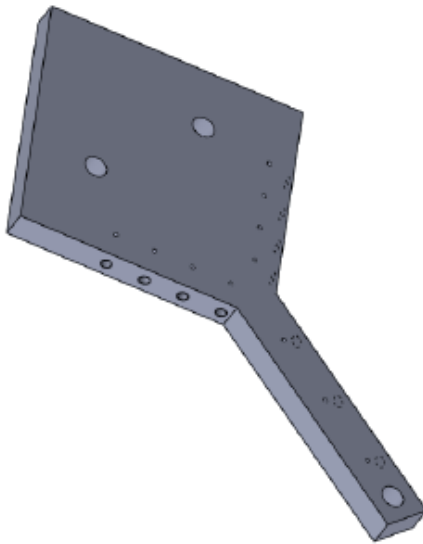


Figure 7-6: Pièce de fixation des thermocouples.

Les pièces à souder reposeront sur des appuis nous nous inspirions l'idée du [4], nous avons ajouté des taraudages pour imposer les conditions de bridage et un autre appui pour empêcher tout mouvement pouvant se provoquer lors du soudage, deux types d'appuis sont présentés sur la figure suivante :

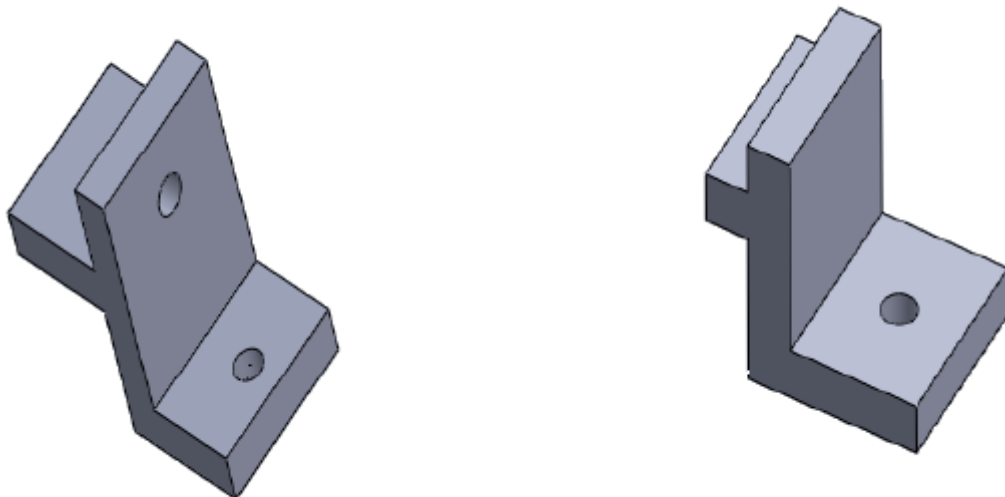
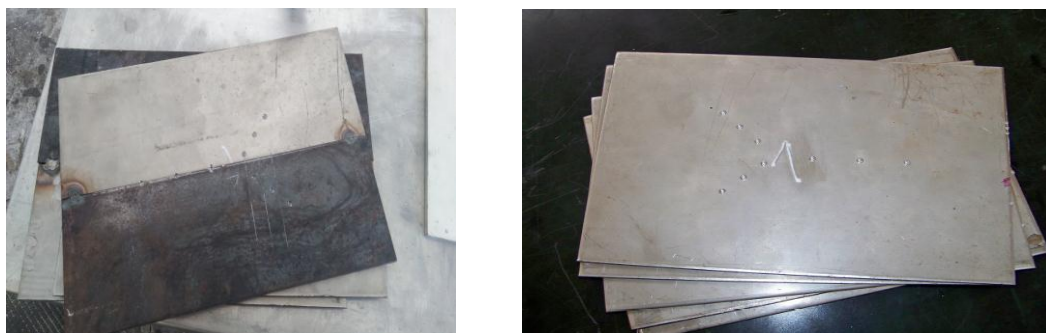


Figure 7-7: Appuis des pièces à souder

La géométrie des éprouvettes est spécifiée sur la figure Les dimensions ont été choisies de façon à satisfaire les critères suivants :

- Épaisseur réduite pour permettre des modélisations 2D sans conduire à des temps de calcul trop importants;
- Dimension longitudinale selon la direction de soudage suffisamment importante pour l'établissement d'un régime thermique quasi-stationnaire;

- Dimension transversale perpendiculaire à la direction de soudage suffisamment importante pour Observations de la ZF et de la ZAT "macroscopiques".

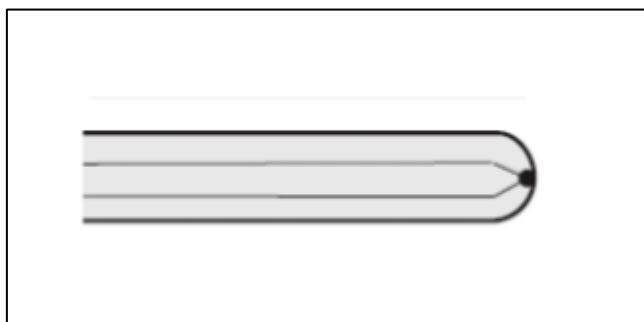


**Figure 7-8:épreuve d'acier inox et acier au carbone pour soudage homogène et hétérogène**

Le procédé de soudage à l'arc au tungstène est surtout utilisé pour le soudage des tôles minces mais plus particulièrement pour tous les métaux difficiles à souder. Parmi ces métaux, mentionnons l'aluminium, le magnésium, l'acier inoxydable, le cuivre et ses alliages, et les aciers au carbone de différentes épaisseurs. On emploie le procédé dans la construction aéronautique, pour les ustensiles de cuisine, les bloc-moteurs, les réservoirs, les citernes les carrosseries, les cabines de camions, les téléphériques, dans les industries alimentaires et chimiques pour les échangeurs de chaleur, les pièces décoratives et bien d'autres encore.

L'acquisition des données sera effectuée avec un DAQ Scxi 1000 doté d'un module Scxi 1112 National Instrument avec une fréquence de 100 Hz. Voir annexe A

La température varie considérablement près de la ligne de soudure et cette variation se produit très rapidement, notamment au chauffage. Les thermocouples doivent donc posséder un très bon temps de réponse. Celui-ci dépend de la dimension des conducteurs et du type de jonction, de ce fait nous allons utiliser des thermocouples de type K (Chromel-Alumel) de diamètre de 150  $\mu m$  qui peuvent mesurer des températures variant entre -200 et 1250  $^{\circ}C$ .



**Figure 7-9:thermocouple de type K**

Comme cité précédemment les thermocouples sont placés à l'intérieur de la plaque, insérés dans des trous de diamètre 1.5 mm, Les positions des thermocouples (TC) sont réparties selon un angle de 45°, afin de minimiser les perturbations provoquées par les thermocouples voisins. Pour chaque test, huit thermocouples seront positionnés sur les

plaques, pour plus de précision le tableau et la figure montrent l'emplacement exacte des différents capteurs.

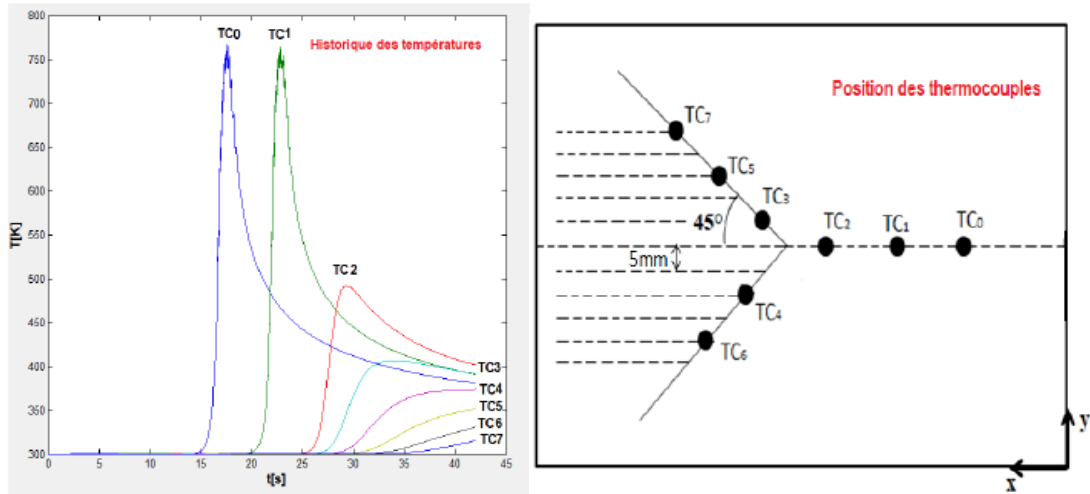


Figure 7-10: Positions des thermocouples

Tableau 7-9: les positions des thermocouples suivant x et y

Tc	X(mm)	Y(mm)
0	55	75
1	80	75
2	105	75
3	130	80
4	135	65
5	140	90
6	145	55
7	150	100

## 7.7 Conditions de soudage

Pour le déroulement de notre expérience, il est évident que certains paramètres doivent être strictement choisis par le biais des différents modes de réglages ; la tension et l'intensité ont été choisies quasiment constants avec une alimentation du poste en courant continu, l'arc est donc stable ou calme et ne présente pas d'éjection. Ces exigences nous emmènent à nous limiter dans le domaine des intensités allant de 30 à 150 Ampères avec des épaisseurs réduites à 3 mm

C'est ainsi qu'on a choisi le reste des paramètres listées ci – dessous :

- **Procédé** : TIG manuel à électrode de tungstène thorié à 2%;
- **Position de soudage** : bout à bout (16 selon AWS);
- **Gaz de protection (Gaz inerte)** : Ar;
- **Débit du Gaz** : 10 l/min;
- **Prégaz et Postgaz** : 10 secondes à 100 A;
- **Polarité** : directe;
- **Tension** :  $U = [10;16]$  V;

- **Diamètre de l'électrode:** 2.4 mm;
- **Diamètre de la buse:** 12mm;
- **Angle de la torche :** [70°, 90 °]

Rappelons que notre étude a pour but : mettre en évidence un moyen de prévention pour la qualité de soudure hétérogène des aciers, en se basant sur les cycles thermiques qui représentent l'historique des températures atteintes par les différentes zones de matériaux et qui peuvent largement nous fournir des renseignements sur l'état des matériaux après le soudage (vitesse de refroidissement, la température maximale atteinte, la largeur de la ZAT.). [12]

**La durée nominale** de soudage est un paramètre qui dépend de la longueur du cordon de soudage qu'on veut réaliser éventuellement, la longueur de la pièce à souder (220mm). Comme la longueur est fixe durant le soudage, **la vitesse** est donc naturellement influencée par le temps de soudage et quant aux restes des paramètres (**intensité et voltage**) ils sont représentés en terme d'énergie nominale de soudage qui est un rapport entre la vitesse et l'intensité et le voltage. Pour cela, on est amené à fixer trois intervalles du temps de soudage dont on a varié l'intensité et le voltage pour pouvoir étudier aisément l'influence de tous les paramètres.

On rappelle l'expression de l'énergie nominale :

$$= \frac{UI\eta}{V_s} \left[ \frac{Kj}{Cm} \right]$$

On suppose que l'déplacement vertical n'est pas permis et le bridage est imposé latéralement grâce aux vis de fixation.

### 7.8 Plan d'expériences

La détermination des paramètres optimales des différents procédés de soudage est le souci de plusieurs chercheurs [20,21], la présente étude marque une contribution dans ce sujet de recherche dans le cas du soudage hétérogène des aciers inoxydables avec les aciers doux.

Notre expérience consiste à souder deux plaques en acier inoxydable austénitique **A.I.S.I. A316L** avec un acier au carbone **A.I.S.I A576** de dimensions égales (75\*220 \*3 mm<sup>3</sup>) par le procédé à l'arc **TIG** manuellement et sous protection gazeuse d'argon.

8 thermocouples sont positionnés au-dessous des deux plaques reliées à un système d'acquisition qui est aussi relié à un ordinateur.

Afin d'approcher les valeurs de la vitesse et de l'intensité de soudage, nous avons soudé en parallèle deux plaques d'aciers austénitiques avec les mêmes conditions que précédemment. Notons que le positionnement des thermocouples ainsi que le plan d'expérience étaient tributaire des conditions relatives au mode opératoire choisi.

Le système d'acquisition est maintenu en marche pendant que le soudeur effectue le soudage des pièces, c'est ainsi que les signaux provenant des thermocouples sont

convertis en terme de température par le système d'acquisition et affiché et enregistré par la suite sur l'ordinateur.

Cinq expériences ont été réalisées afin d'étudier l'influence des paramètres du processus de soudage.

Le tableau résume les paramètres choisis dans les 5 essais.

**Tableau 7-10: les valeurs des paramètres de l'essai**

Expérience N°	Intensité (A)	Vitesse de soudage (mm/s)
1	60	2
2	80	2
3	120	2
4	120	3.6
5	120	5.5

## 7.9 Caractérisation des soudures

### 7.9.1 Macrographie de la soudure

Une caractérisation macrographique a été effectuée sur la soudure, afin de déterminer l'étendue de la zone fondue, examiner la qualité de soudage (couleurs) et spécialement visualiser les distorsions qui caractérisent les aciers inoxydables austénitiques.



**Figure 7-11:inspection visuelle des soudures**

### 7.9.2 Micrographie de la soudure

Dans le même objectif que pour la caractérisation micrographique du matériau, la micrographie optique des soudures sert à déterminer la nature des phases en terme de proportions et formes de ce fait, une application de traitement d'image sous java **image J nous** a permis de calculer le pourcentage de la ferrite dans la matrice austénitique en se

basant sur les couleurs des pixels spécialement le rouge qui présente un très grand écart entre les deux phases.

### **7.9.2.1 Caractérisation mécanique**

#### **7.9.2.2 Microdureté**

Afin d'identifier les différentes zones que constitue la pièce soudée (MB , MF , ZAT) , une prise de micro-dureté a été effectuée au sein de centre de soudage (CSC), une charge de 300g a été appliquée le long d'une ligne a partir du premier métal de base ( acier au carbone ) jusqu'au deuxième métal de base ( acier austénitique) pour tracer ensuite la courbe  $H_v=f(y)$  tel que y est la direction orthogonale des soudeurs , les filiations de dureté ont été réalisés avec un pas de 0.5mm en balayant les trois zones de la soudure

# Chapitre 7

Résultats et discussions

### 8 Résultats et discussions

#### 8.1 Les cycles thermiques

##### 8.1.1 Cycles thermiques expérimentaux :

Les cycles thermiques sont définis comme l'historique des températures atteintes par les différentes parties du métal soudé en fonction du temps.

Le cycle thermique en tout point voisin de la zone soudée traduit ainsi l'évacuation de la chaleur correspondant au soudage, et dépend donc de variables liées au procédé (l'intensité, la vitesse.)

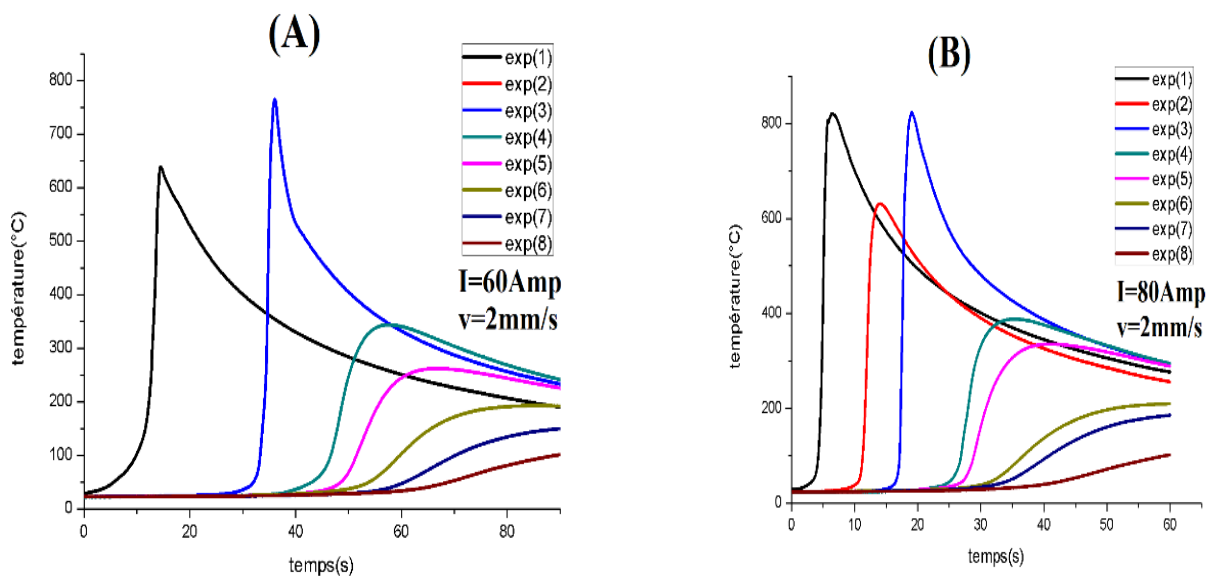
L'étude de l'effet de ce cycle thermique sur la structure lors de l'opération de soudage montre son incidence sur les propriétés, les caractéristiques et l'intégrité obtenues une fois le joint soudé. Les effets du cycle thermique en soudage sont à la fois physiques et métallurgiques et ont des conséquences sur la tenue mécanique du joint soudé, la stabilité dimensionnelle et les tolérances géométriques de la structure soudée. [12]

Les cycles thermiques vécus par le matériau sont obtenus via le dispositif présenté

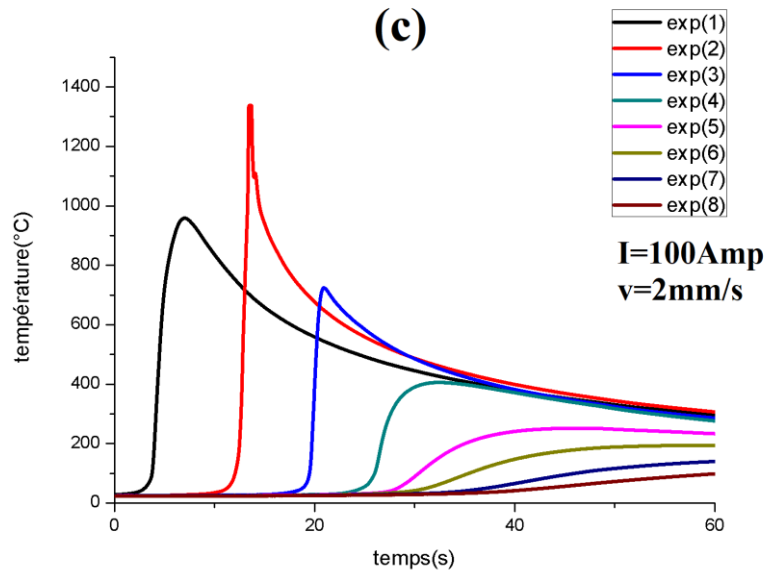
Dans la partie expérimentale, les positions d'évaluation de la température ont été résumées dans le tableau dans le plan d'expérience.

Les expériences planifiées se sont déroulées et les résultats ont été soigneusement importés et interprétés dans cette partie

##### 8.1.1.1 L'effet de la variation de l'intensité







**Figure 8-1: les cycles thermiques en fonction de l'intensité de soudage**

Avant d'entamer une comparaison entre les courbes, il est nécessaire de justifier les différentes allures obtenues :

Le fait de mettre trois capteurs successifs le long du cordon, logiquement nous devons avoir trois courbes identiques juste un décalage de montée causé par le retard de la torche qui n'arrive pas encore au thermocouple concerné, c'est vrai qu'à chaque fois nous obtenons trois historiques de températures semblables mais il y avait toujours une différence entre la première courbe et les deux autres qui la suivent en terme de température maximale atteinte, l'explication que nous avons trouvé en littérature c'est que le premier capteur n'atteint pas le régime quasi-stationnaire alors que les deux autres sont suffisamment loin pour qu'ils atteignent le régime permanent.

Dans la plupart du temps la seconde courbe et la troisième n'arrivent pas à la même valeur maximale c'est le cas des courbes (c) de la figure ci-dessus où la seule explication c'est que les thermocouples ne sont pas logés profondément aux trous de guidage, le problème soulevé lorsque nous rapprochons le capteur à la surface de soudage nous remarquons la fusion du métal et la défaillance du capteur ce qui s'est passé avec le deuxième thermocouple sur les courbes (a).

## Résultats et discussions

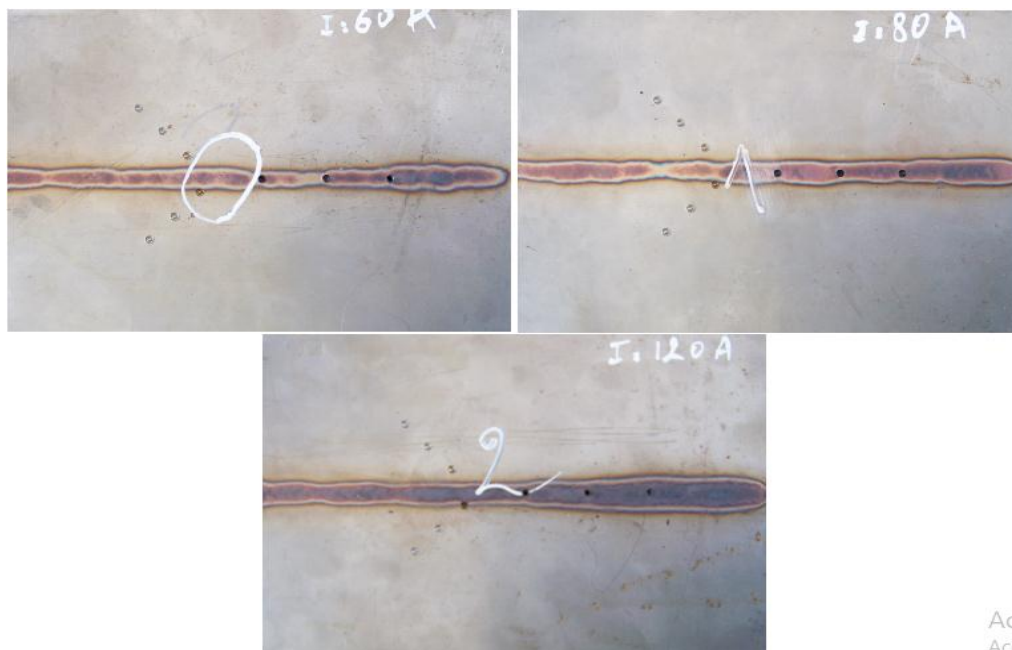


**Figure 8-2:fusion du métal et défaillance du capteur**

Passant maintenant à la comparaison entre les résultats après variation d'intensité, ce que nous remarquons c'est que nous aurons une augmentation intense dans les valeurs maximales atteintes pour une augmentation de l'intensité de 60A jusqu'à 120A [686, 774, 1372 °C].

Il est bien connu qu'une augmentation de courant entraîne une augmentation de la puissance linéique apportée au cordon de soudure et une densité de courant plus élevée, provoquant la fusion d'un plus grand volume de matériau de base et par conséquent une pénétration plus profonde. En augmentant le courant, la température augmente également, ce qui à son tour augmente la teneur en chaleur des gouttelettes et à cause de laquelle plus de chaleur est transférée au matériau de base.

En outre, une augmentation du courant de soudage en maintenant d'autres variables constantes, entraîne une augmentation de la profondeur de pénétration, une augmentation du taux de dépôt et une augmentation de la taille et de la forme des cordons de soudure à une section donnée [16] [18], ce qui se confirme réellement aux figures suivantes :



**Figure 8-3:influence de l'intensité sur la taille du cordon**

Act  
Accr

## Résultats et discussions

### 8.1.1.2 Variation de la vitesse

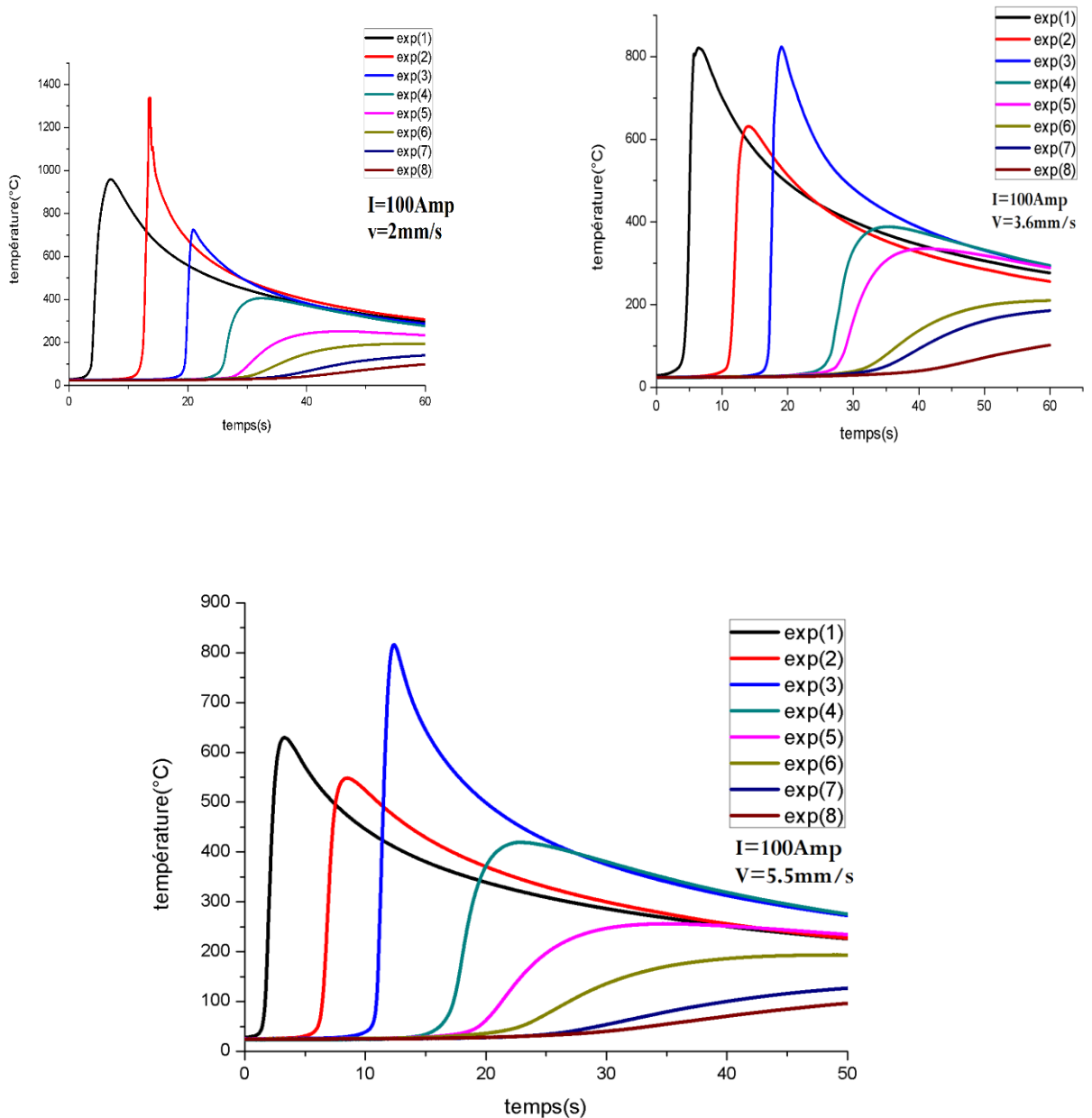


Figure 8-4: les cycles en fonction de la vitesse

Concernant la variation de la vitesse, les résultats se confirment aux formules théoriques où l'augmentation de vitesse de soudage diminue les températures maximales atteintes pour chaque essai ce qui apparait dans la formule de l'apport de chaleur, pour ces essais nous avons essayé de ne pas rapprocher les thermocouples à la surface supérieure pour ne pas louper aucun d'eux.

De même, à des vitesses de soudage plus élevées, l'électrode se déplace plus rapidement et couvre plus de distance par unité de temps, ce qui entraîne une diminution

## Résultats et discussions

Du taux de dépôt de métal par unité de longueur de cordon de soudure. Il est également attribué à la diminution de l'apport de chaleur, du taux de dépôt de métal et de la puissance d'excavation de l'arc avec l'augmentation de la vitesse de soudage, ce qui entraîne une diminution de la pénétration du métal de soudage.

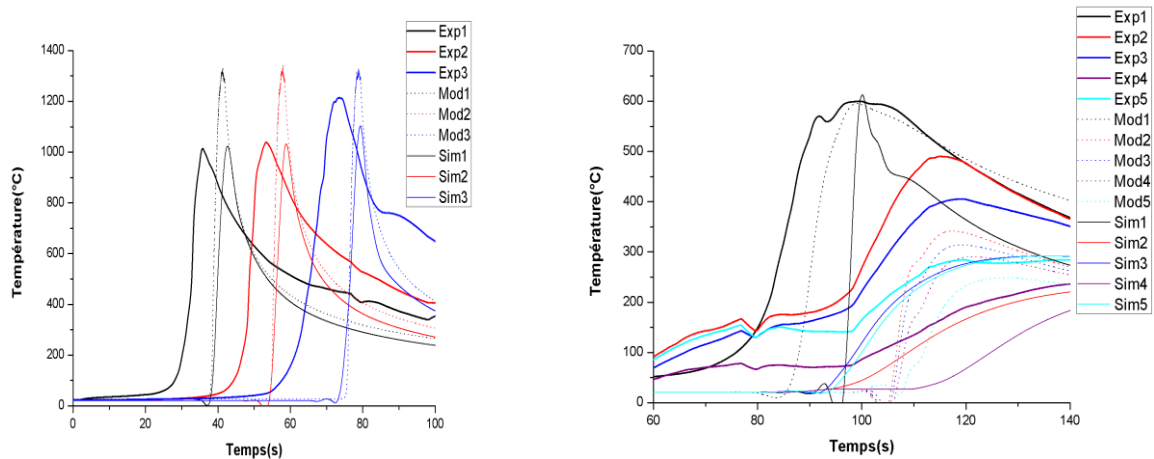
Une augmentation de la vitesse de soudage entraîne également une diminution de l'apport de chaleur linéaire à la pièce cela a clairement montré qu'un courant de soudage plus élevé et une vitesse de soudage plus faible entraînent normalement une meilleure pénétration, ce qui est également confirmé par la présente étude, donc pour le reste du travail nous allons concentrer l'étude sur le cas  $I=100A$  et  $V=2mm/s$  où nous effectuerons des tests de caractérisation pour voir l'influence de l'apport calorifique sur les caractéristiques mécaniques et microstructurales du matériau.

Sur la figure nous présentons l'évolution de la température maximale atteinte sur la ligne perpendiculaire au cordon de soudure

### 8.2 Comparaison modèle-simulation et validation expérimentale

Nous rappelons ici que le modèle implémenté sous MATLAB décrit le transfert de chaleur par conduction dans un métal solide supposé bidimensionnel où la source de chaleur est exprimée par la relation de GOLDACK [17], pour la simulation avec le code de calcul COMSOL nous avons modélisé le problème comme un déplacement d'une source de chaleur ayant la même expression que la précédente sur deux blocs solides de 3mm d'épaisseur de matériaux différents en adoptant les mêmes conditions aux limites pour les deux cas.

Les résultats vont être comparés avec ceux obtenus expérimentalement pour estimer leur justesse et désigner les faillites de chaque calcul.



#### 8.2.1 Interprétation

Les évolutions des températures mesurées par les trois méthodes, pour chaque Thermocouple sont données sur la figure précédente. Tous les thermocouples subissent Le cycle caractéristique de soudage avec un chauffage rapide jusqu'à 1300 °C suivi d'un refroidissement plus modéré avec un temps de refroidissement  $\Delta T_{500}^{800}=10s$

## Résultats et discussions

---

La première remarque soulevée c'est qu'il y'a toujours un décalage de montée entre l'essai expérimental et ceux de la simulation et du modèle, ce décalage est dû à l'irrégularité de la vitesse de soudage causée par le facteur humain, ce qui est clair c'est que la courbe du modèle et celle de la simulation démarre en même temps parce que la constance des vitesses est assurée numériquement

On constate une grande dispersion sur les mesures de température entre les trois méthodes, Avec une variation pouvant atteindre  $T = 120\text{ °C}$  entre des thermocouples supposés à même distance de la ligne de fusion. Des erreurs importantes sont à constater par rapport aux positions théoriques, notamment un écart de 0.5 mm est constaté sur le Tc2. Les écarts remarquables sur Les températures sont donc **imputables aux erreurs de positionnement** des thermocouples mais aussi aux **conditions de contact** entre les thermocouples et la plaque. Enfin, le contact n'est assuré que par une pré-charge lors de la fixation des thermocouples dans les trous usinés.

Pour cela nous proposons l'utilisation de la caméra thermique qui donnera une image thermique 2D à distance qui n'est pas influencée par la nature et la distance de contact, sans oublier la complexité des différents phénomènes le long du cordon et que nous n'avons pas pris en considération lors de la modélisation et la simulation parlant des phénomènes **Marangoni** et les phénomènes électromagnétiques et la différence entre une étude à 2D et une autre à 3D ce qui provoque une erreur pouvant atteindre 15%.

### 8.3 Caractérisation des soudures

#### 8.3.1 Caractérisation métallographique

Dans cette section, nous présentons les résultats des caractérisations métallographiques

Des soudures, la technique utilisée est l'observation macroscopique.

#### 8.3.2 Inspection macroscopique

Une caractérisation macrographique a été effectuée sur la soudure ayant les paramètres [ $I=100\text{A}$ ,  $V=2\text{mm/s}$ ], afin de déterminer l'étendue de la zone fondue ainsi que l'interprétation des couleurs et de la forme du joint et visualiser les distorsions caractérisant les aciers inoxydables.

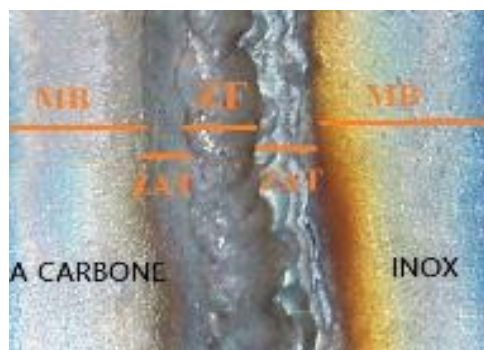


Figure 8-5: Différentes zones métallurgiques du cordon de soudure

## Résultats et discussions

---

Ces colorations surfaciques sont dues en partie à la contamination avec l'air ambiant lors du refroidissement du cordon, Cette contamination est surfacique et facile à éliminer Il suffit de bien brosser la soudure après soudage avec une brosse à poils métalliques inox pour éliminer ces colorations.

La macrographie montre clairement une hétérogénéité du métal d'apport avec l'acier au carbone ce qui était prévisible vu la différence en termes de composition chimique et de morphologie structurale ; par contre du côté d'austénite on observe une homogénéité presque parfaite (les deux métaux ont des structures et des nuances presque similaires à quelques proportions près 316L et 309L)

On constate du côté droit de la zone fondue (acier au carbone) un contraste qui représente un changement de structure au niveau du métal de base, c'est une zone un peu plus foncée que le métal de base ''cette zone est surnommée Zone affectée thermiquement ou Z.A.T.'' Elle est relativement épaisse comparée à celle du côté acier inoxydable Cependant il subsiste une différence morphologique entre le métal fondu et les deux métaux de base. La mise en évidence de ce changement sera un peu plus clair dans la micrographie.

### 8.3.3 Observations métallographiques

- **Métal de base « acier inoxydable 316L »**

Notre travail a été entamé par une observation microscopique de l'acier inoxydable austénitique à son état de réception. Cette observation a montré l'existence d'une structure granulaire qui contient une certaine quantité de ferrite au niveau des joints de grains

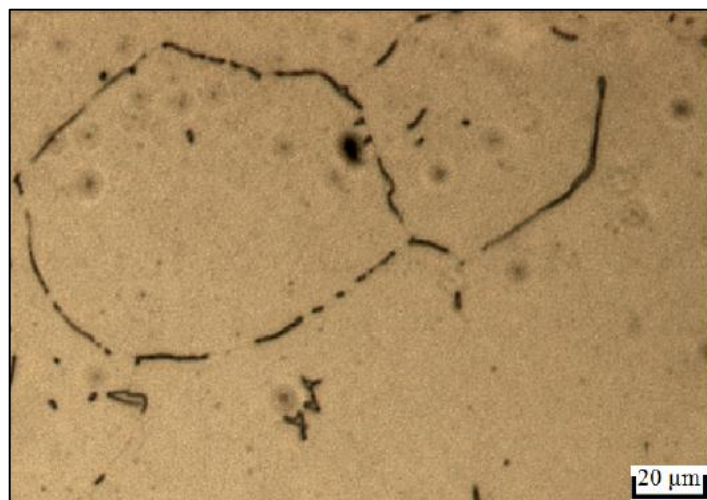


Figure 8-6: microstructure d'acier 316L

- **Métal de base acier « au carbone A576 »**

La microstructure de l'acier A576 est formée par des grains de ferrite et de perlite, il s'agit d'un acier hypo eutectoïde

## Résultats et discussions

---

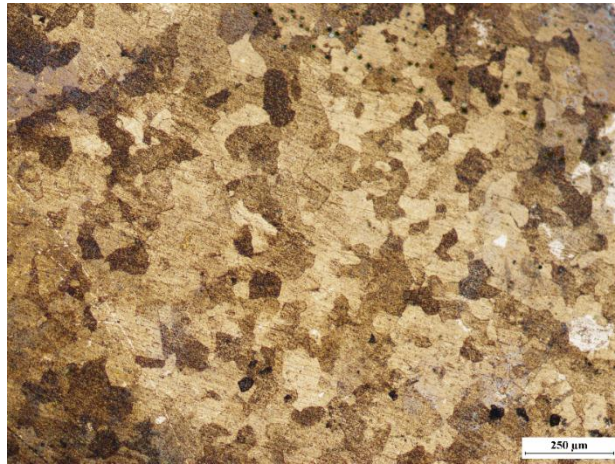


Figure 8-7: microstructure d'acier au carbone (MB)

- **Zone affectée thermiquement ZAT**

*Acier au carbone* : A proximité de la zone fondue (la zone affectée par la température) du côté acier au carbone, la microstructure se révèle comme celle du métal de base, néanmoins la taille des grains a connu un grossissement très significatif sous l'influence de l'élévation de la température apportée par la source de chaleur lors de l'opération du soudage

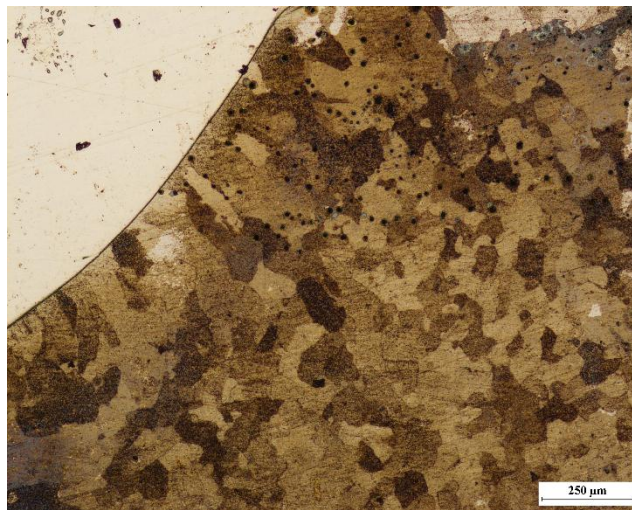


Figure 8-8: la zone affectée thermiquement côté d'acier au carbone

*Acier austénitique* : révèle des dendrites qui sont dues au type de refroidissement de la zone affecté thermiquement, on note une épitaxie structurale suivant la direction de propagation de la chaleur.

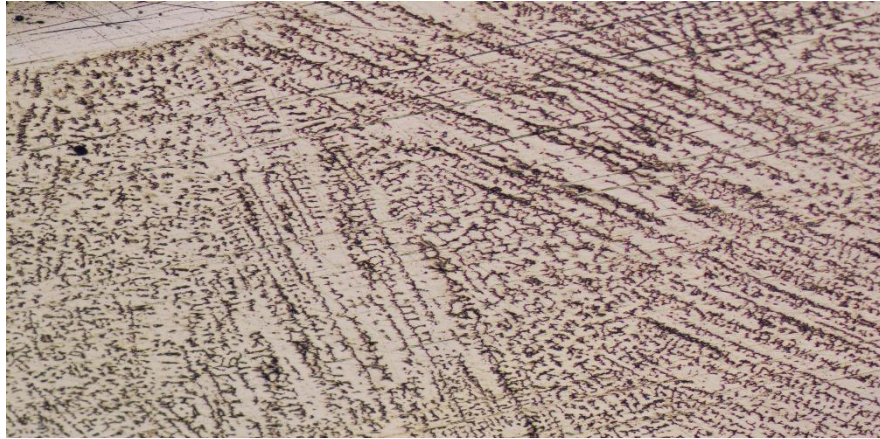


Figure 8-9: la zone affectée thermiquement côté d'acier inox 316L

Les microstructures observées dans la ZAC (zone affecté par la chaleur) des joints soudés correspondent au produit de transformation de l'austénite, prévoir ces structures à partir des diagrammes en refroidissement continu (TRC) classique est impossible car ; ceux-ci sont généralement établis à partir de traitements austénitiques a des températures relativement basses (900-950°C) et pour des temps de maintien long , c'est-à-dire exactement la situation contraire à celle rencontrée en ZAC ou la température dépasse 1200°C. [12]

Afin de se placer dans des conditions plus représentatives, les phénomènes aux transformations métallurgiques sont étudiés à partir des cycles thermiques simulés très proches de ceux relevés en soudage et à des conditions d'austénitisation données (température généralement supérieure à 1200°C, de manière à simuler la ZAC a gros grains).

- **Zone fondue :**

Suite au processus de solidification la zone fondue possède une structure dendritique

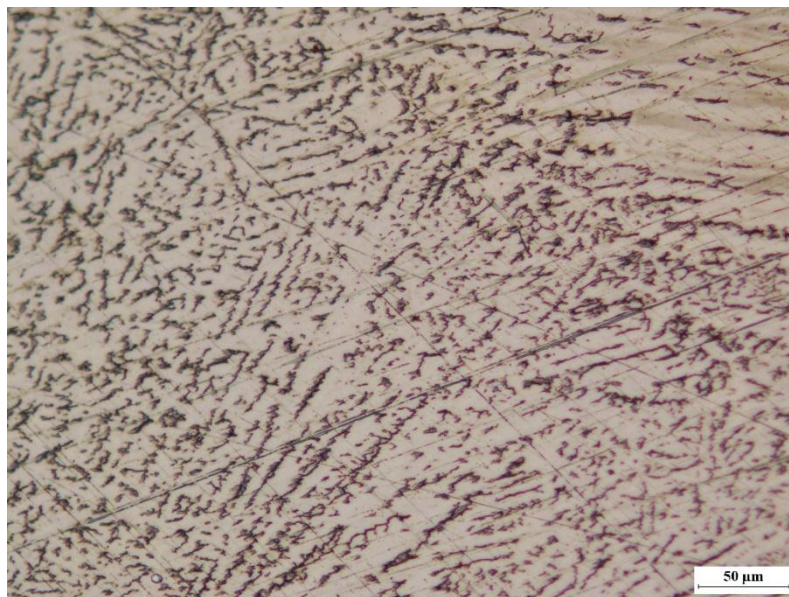


Figure 8-10: la microstructure de la zone fondue



## Résultats et discussions

Il s'agit d'une matrice austénitique regroupant un taux de ferrite résiduelle qui sera calculé dans ce qui suit.

### 8.4 Evaluation du taux de ferrite $\delta$

- Diagramme de SHAEFFLER

En se positionnant sur le diagramme de SHAEFFLER, et en utilisant la formule de SEFERIAN le taux de ferrite  $\delta$  a été estimé aux environs de 13% ; ainsi que les coordonnées du point figuratif JS ( $Cr_{eq} = 23\%$  ,  $N_{eq} = 13\%$ )

8-1:

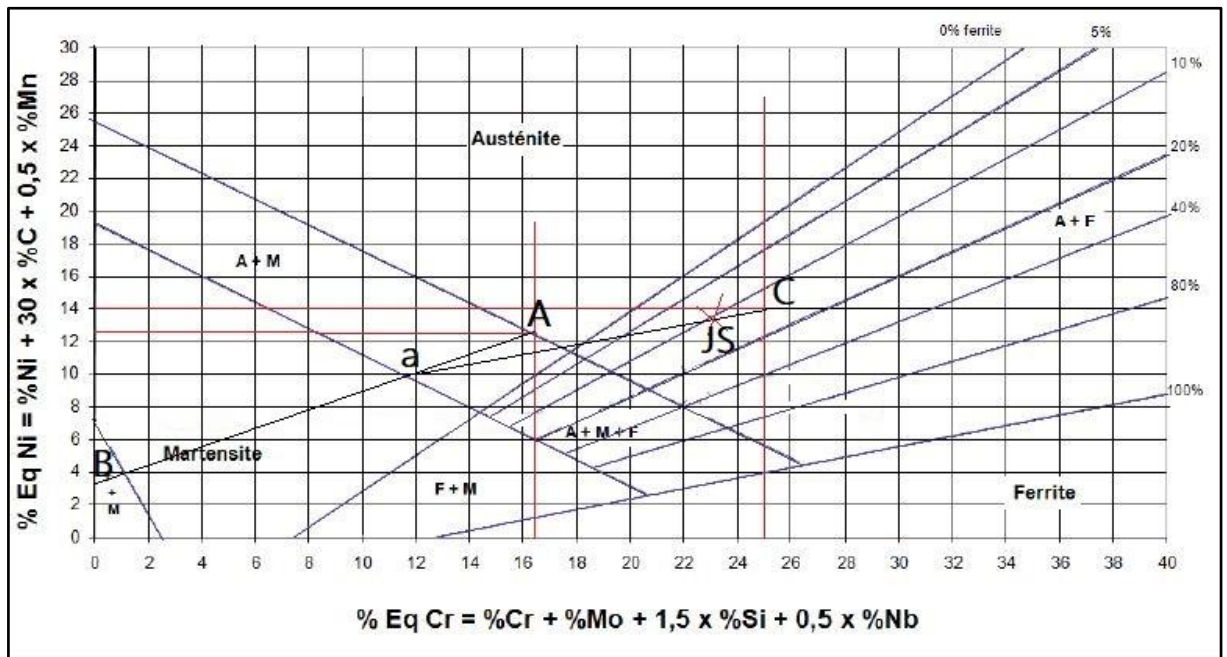
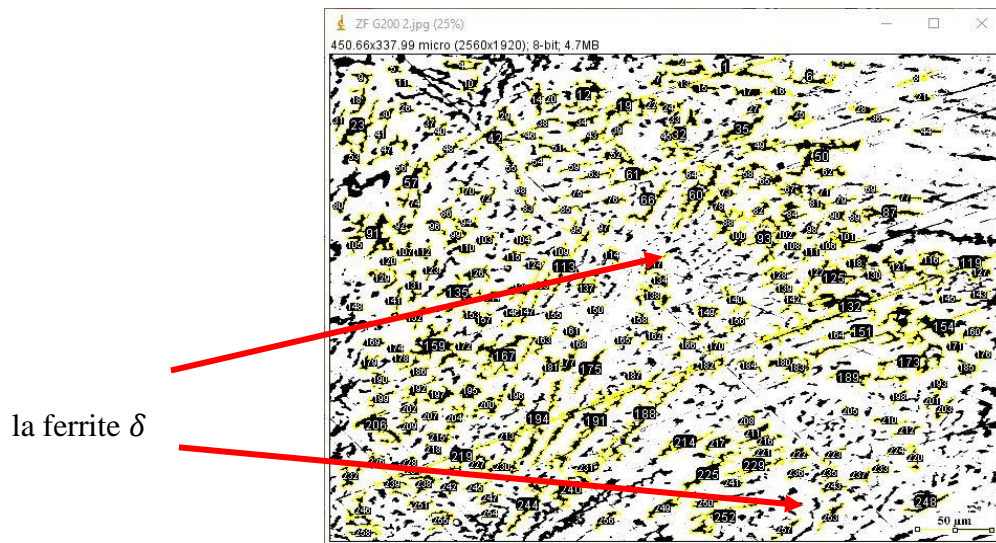


Figure 8-11: les coordonnées du point JS sur le diagramme:

- Traitement d'image :

## Résultats et discussions

Pour plus de confirmation on a opté pour l'utilisation du logiciel Image J pour le calcul du taux de ferrite et on a abouti à une valeur de 14% de ferrite



Slice	Count	Total Area	Average Size	%Area	Mean
ZF G200 2.jpg	258	21802.763	84.507	14.314	102.913

Figure 8-12: résultats obtenus par le logiciel image J

## 8.5 Caractérisation mécanique

### 8.5.1 La microdureté

Des mesures de microdureté ont été prises dans la direction orthogonale du joint de soudure, la distance entre chaque prise est de 5mm à partir de l'acier inox vers l'acier au carbone.

Nous constatons que la dureté augmente en s'éloignant du joint c'est probablement dû au grossissement des grains provoqués par l'élévation de température lors du soudage du côté de l'acier au carbone.

## Résultats et discussions

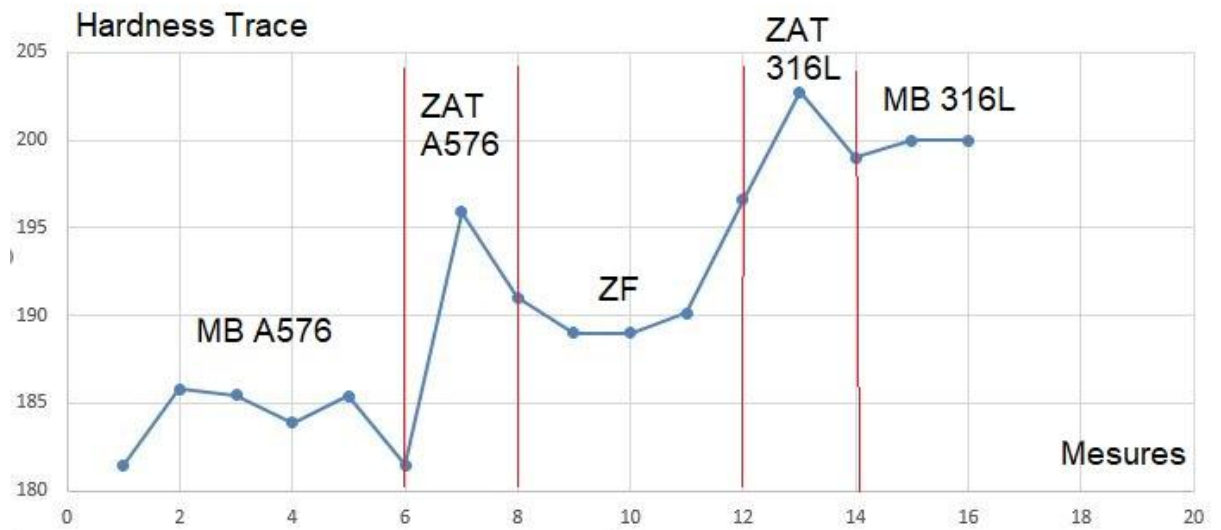


Figure -8-13: Profils de microdureté Vickers établis pour la soudure hétérogène

### 9 Conclusion

Le projet réalisé rentre dans le cadre des activités de recherche du Laboratoire Génie des matériaux (LGM) de l'Unité d'Enseignement et de Recherche de la Mécanique Appliquée (UERMA) dans la thématique liée au soudage des aciers.

L'étude a mis en évidence l'effet de la vitesse et l'intensité de soudage sur les cycles thermiques pour un joint de soudure hétérogène entre les deux aciers 316L et A576

Le soudage TIG mono passe a été réalisé avec un métal d'apport afin, d'étudier l'influence des cycles thermiques vécus par le matériau lors de l'opération de soudage, ces cycles sont obtenus à l'aide un banc d'essai conçu et réalisé dans ce contexte.

Ce travail a porté sur l'étude des transferts thermiques par développement d'un modèle en utilisant la méthode des éléments finis, dans le bain de fusion lors d'une opération de soudage TIG. Le modèle a été validé par les essais expérimentaux réalisés par le biais d'un banc d'essai conçu pour le même but que le modèle. Les résultats obtenus sont comparés aussi à ceux relevés d'une simulation numérique avec le code de calcul commercial COMSOL qui se base sur la méthode des éléments finis. Par la suite des caractérisations métallographiques et mécaniques ont été faites pour évaluer les changements induits par l'apport calorifique du soudage.

Les conclusions tirées de l'étude sont rapportées comme suit:

Malgré les conditions de bridage sévères, les plaques de l'acier ont subi des distorsions intenses qui poseront des problèmes de tolérances dimensionnelles, tout particulièrement si les structures soudées sont minces (comme c'est le cas pour l'industrie automobile ou l'aéronautique).

Le métal d'apport a été choisi d'une façon à s'approcher de la zone idéale présente dans le diagramme de SHAEFFLER .

La dureté du joint soudé est inférieure à la dureté des deux métaux (316L et A7

Le taux de ferrite  $\delta$  dans le joint est de 14% .

On a rencontré des problèmes expérimentaux qui résident dans la fixation des thermocouples dans les perçages, donc à chaque fois il y avait une ou plusieurs mesures erronées. Pour le modèle implémenté, il y avait une bonne concordance avec celui du COMSOL spécialement hors joint.

En conclusion on peut dire que l'étude qui traite d'une conception d'un banc d'essai pour le soudage et de la modélisation et simulation des profils de température de soudage qui sont un paramètre fondamental, car le mode opératoire est un atout majeur dans la

## **Conclusion**

---

soudabilité des matériaux, a été étoffée par un étude expérimentale ou on a montré par les techniques utilisées la validité de nos modélisations et simulations.

Comme perspective pour ce travail nous proposons :

- L'automatisation de l'opération de soudage.
- L'utilisation d'une caméra thermique pour relever la distribution des températures.
- L'amélioration du modèle de transfert de chaleur pour inclure plus de phénomènes physiques tel que la transformation solide/liquide et les mouvements du bain fondu.
- La réalisation de plus d'essais pour assurer la validité des résultats expérimentaux.

.

---

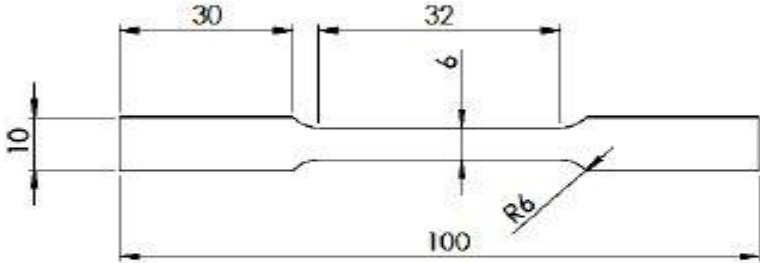
## 10 Bibliographie

- [1] Research center of welding and control (CSC), «contribution a la modélisation du soudage TIG,» *PHYS IV France 124 EDP Sciences*, p. 1, 2005.
- [2] G. J.Baralis, Précis de Metallurgie ( élaboration - structures ), Nathan, 1990.
- [3] J. B.Thomas, «Durcissement Des Aciers : Role de la microstructure,» *Technique de l'ingenieur*, vol. m43141, 2002.
- [4] M. Hamide, «modelisation numerique du soudage a l'arc des aciers,» Mine Paris , 2008.
- [5] M. Durand, La microstructure des Aciers et des fontes, Paris: SIRP, 1997.
- [6] P.J.Cunat, «Acier inoxydables : Critères de choix et structure,» *Technique de l'ingénieur*, n° %1M4540, 2000.
- [7] R.Blondeau, procédés et applications industrielles du soudage, Paris : Hermès Science Publications , 2001.
- [8] *Practical guidelines for the fabrication of high performance austenitic stainless.*
- [9] J. C. Damian J. Kotecki, Welding Metallurgie and weldability of stainless steels, USA: wiley-Interscience , 2005.
- [10] L. Depradeux, «simulation numerique du soudage d'acier 316L,» L'institut National des Sciences Appliquees de LYON, LYON , 2004.
- [11] H.GRANJON, Fundamentals of welding metallurgy, England : wood head publishing, 1991.
- [12] R. Blondeau, Metallurgie et mecanique du soudage, paris : Lavoisier , 2001.
- [13] D.Séférian, Metallurgie de la soudure, PARIS: Dunod , 1965.
- [14] J. G. Mehdi Aklaghi, «Computational Welding Mechanics,» *Springer*, 2005.
- [15] C. multiphysics.
- [16] R. U. a. al, «Effect of heat input on the microstructure, residual,» *Materials Characterization*, n° %193, p. 10–23, 2014.
- [17] V. K. a. J. GOLDAK, «Error due two dimensional approximation in heat transfer analysis of welds,» *Welding Journal*, n° %172, pp. 1-10, 1993.
- [18] K. D. R. a. al, «Effect of optimal weld parameters in the,» *Materials & Design*, n° %166, p. 356 – 365, 1980-2015.

---

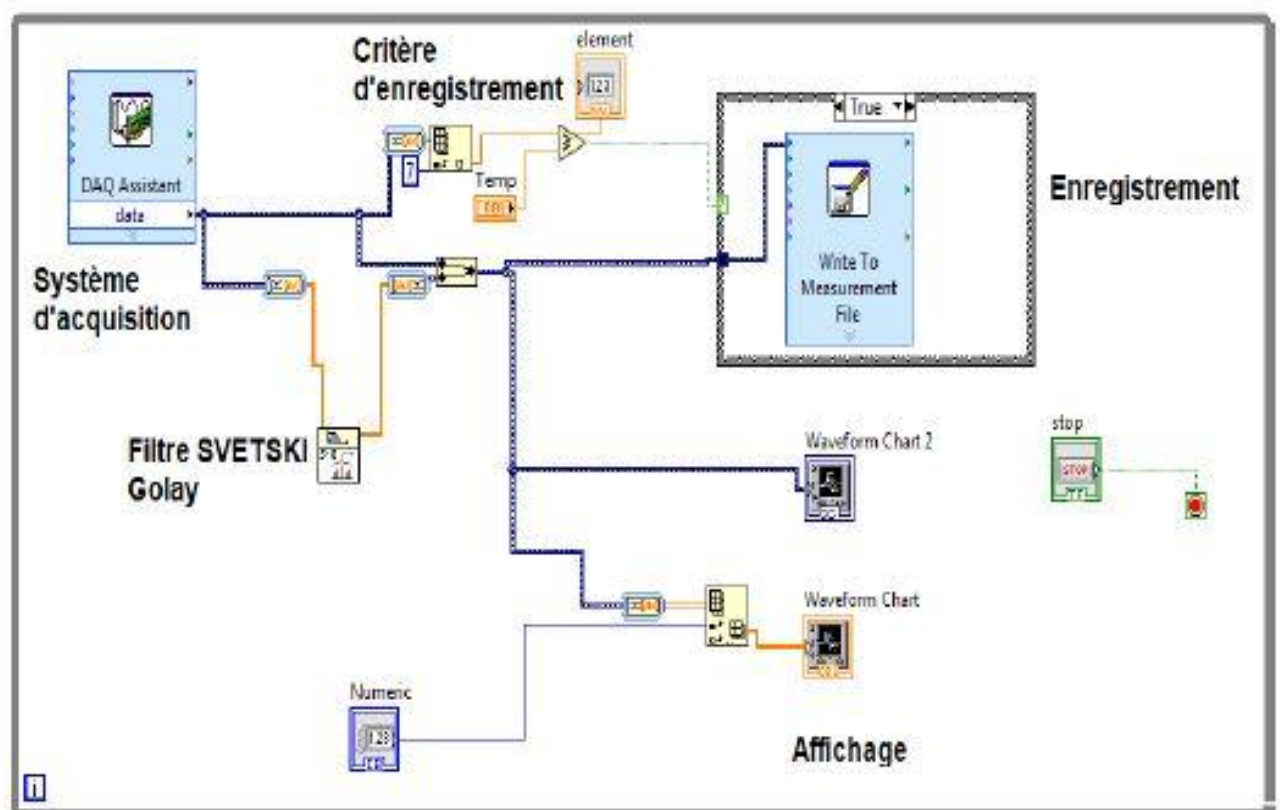
# **Annexe A**

**Éprouvette de traction normalisée (ASTM B557 2A)**



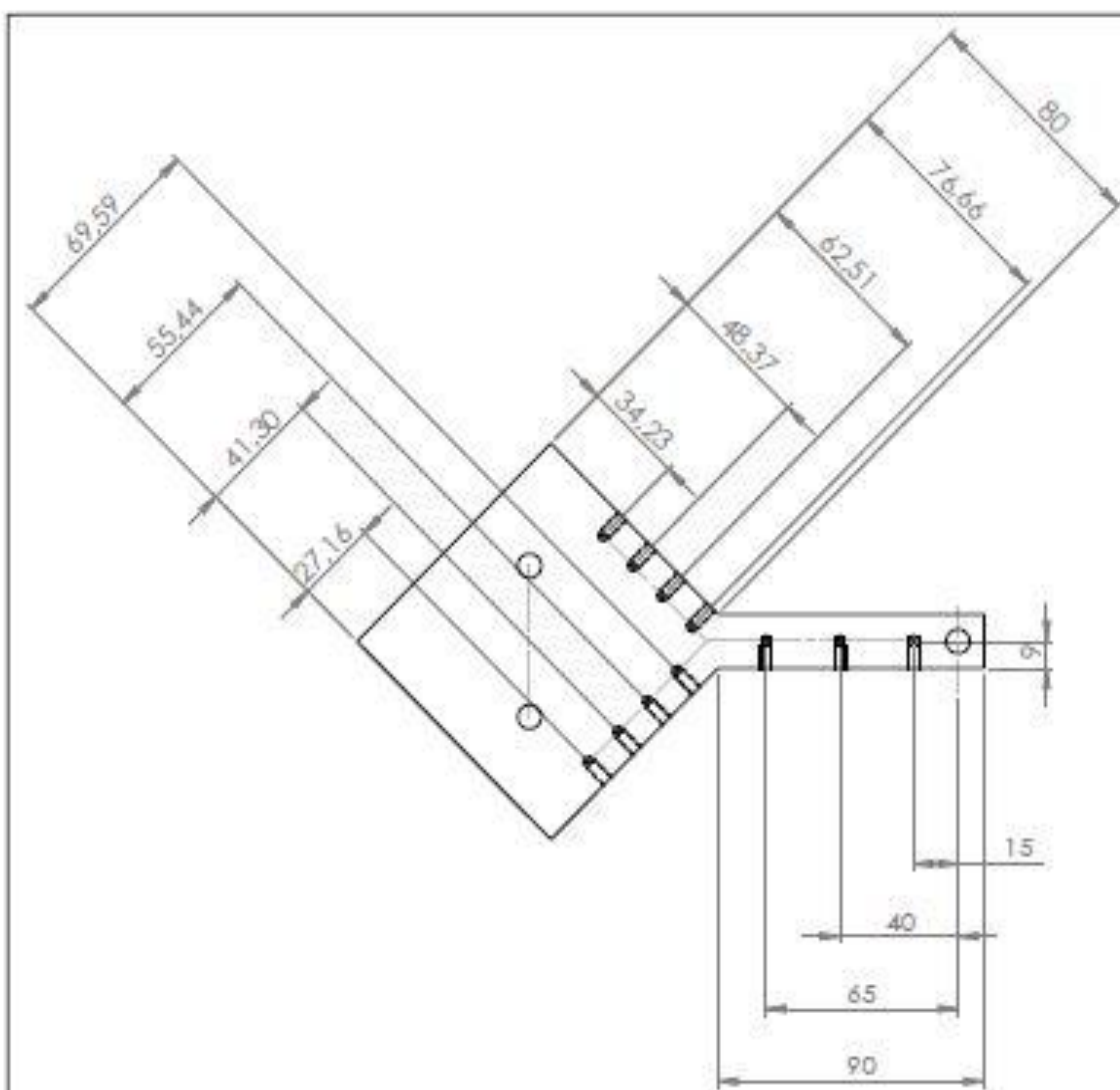


## Organigramme de la chaîne d'acquisition des Températures sous LabView



---

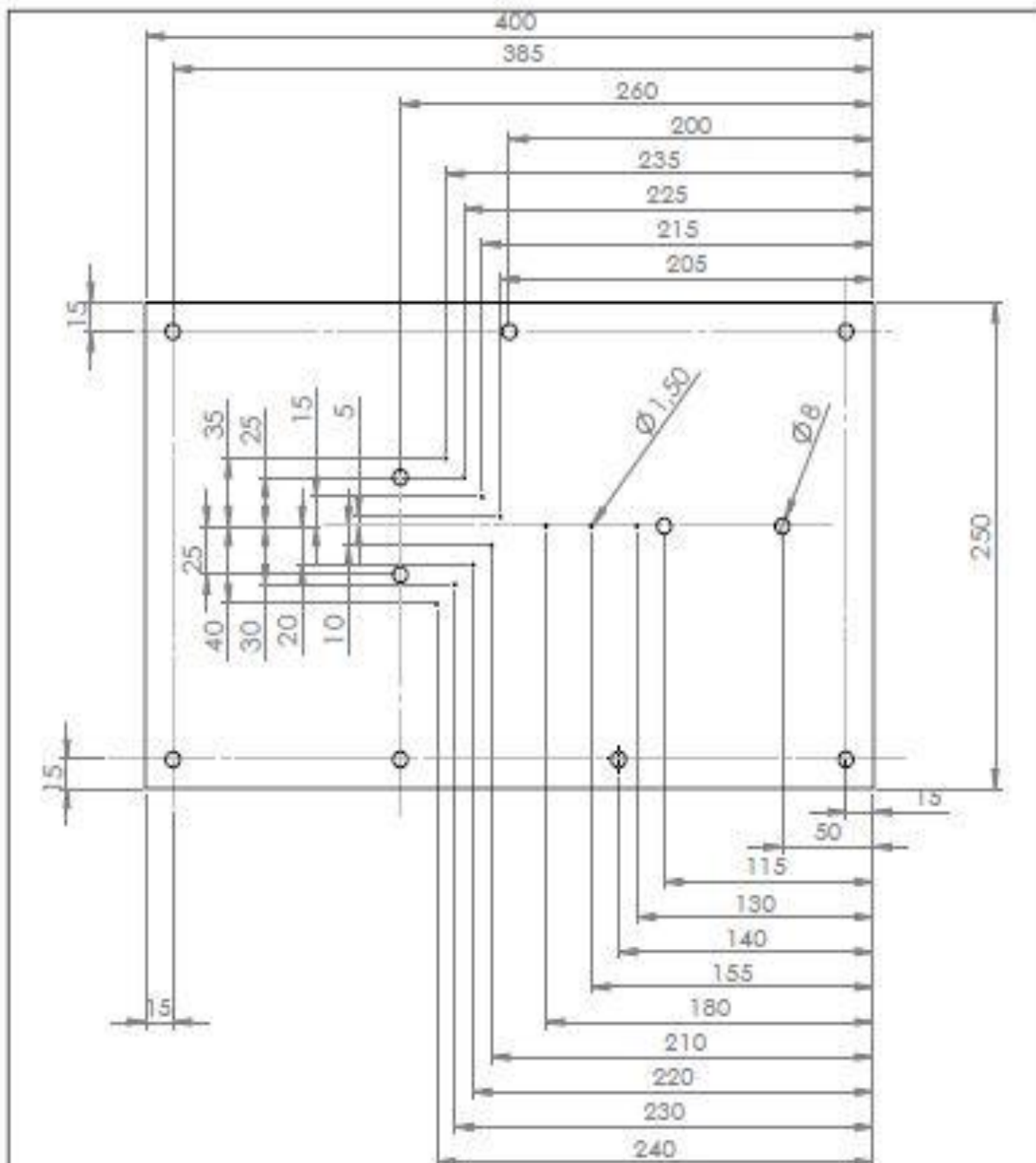
## **Annexe B**



### La position des taraudages

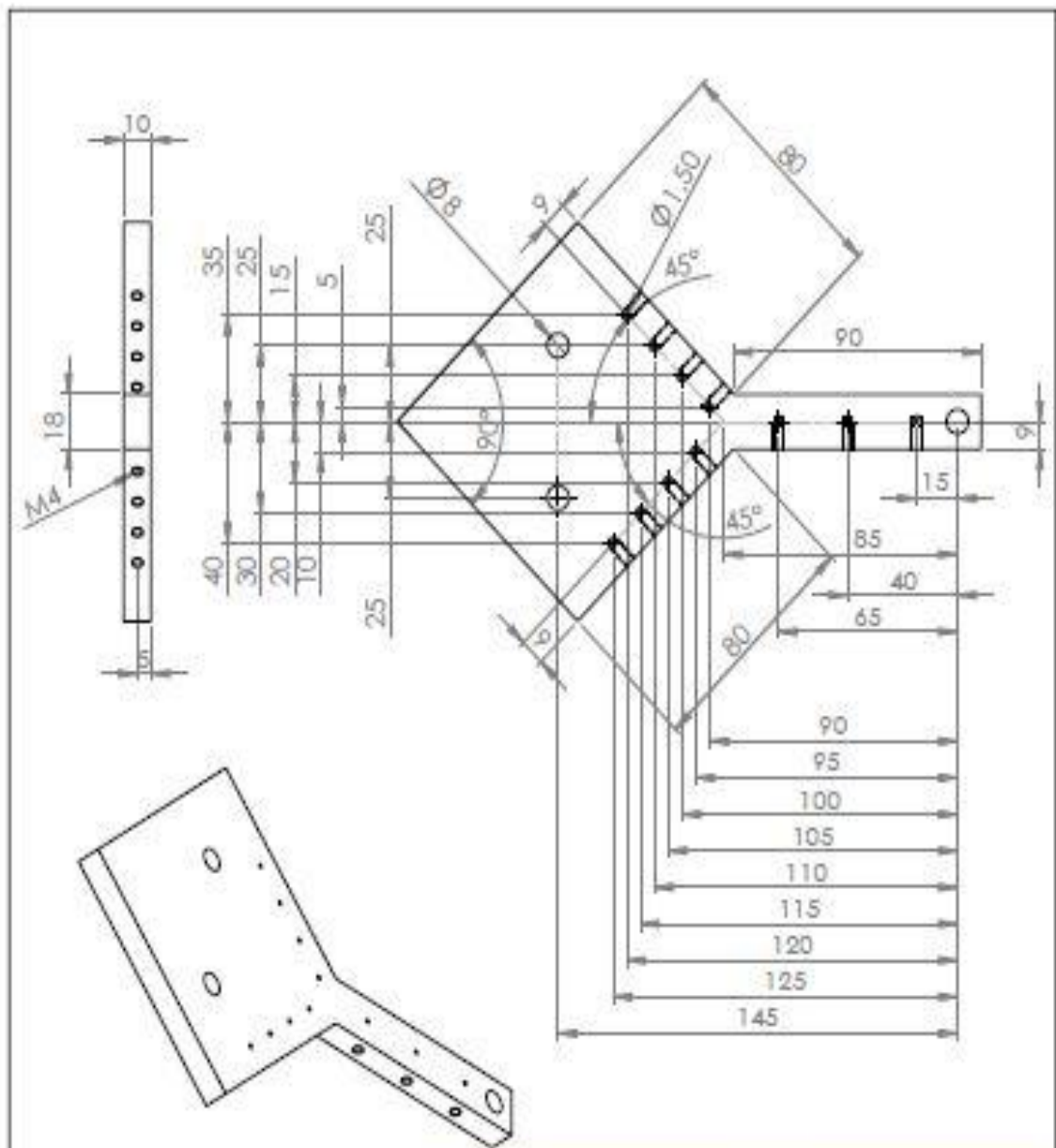
Tous les taraudages sont de type M4

Echelle: 1:2	<b>AUXILIAIRE</b>		Mat: ALUMINIUM
	E . M . P B . E . B	ALGER	
NECIB - BEDDIAF	S A I N G M E C A N I Q U E \ M A T E R I A U X		



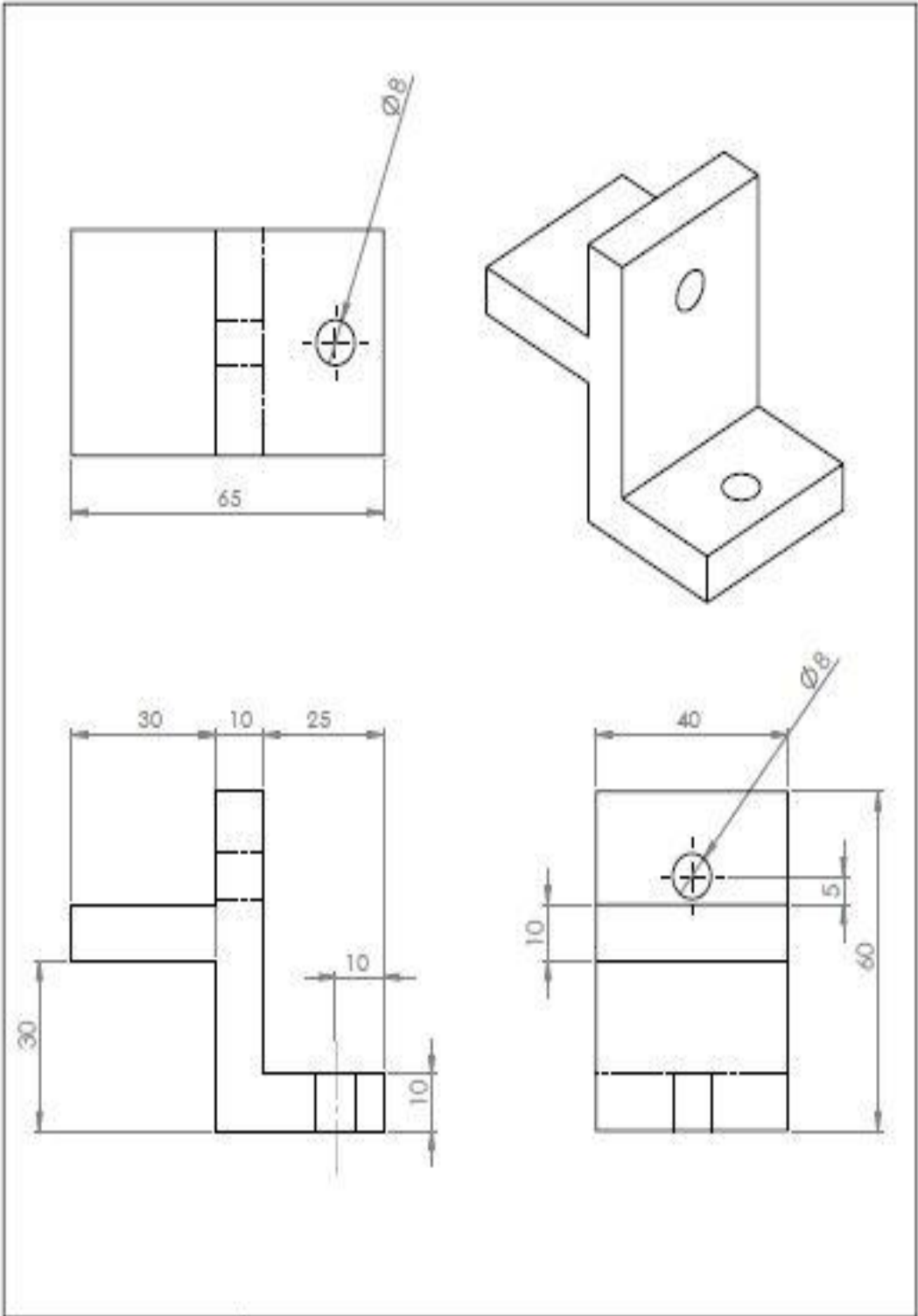
Tous les petits trous sont de diametre : $\varnothing 1.50$
Tous les grands trous sont de diametre : $\varnothing 8$
L'epaisseur de la plaque est de : 10mm

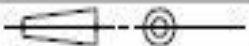
Echelle: 1:3	<b>PLAQUE</b>	Mat: ALUMINIUM
	E . M . P . B . E . B	ALGER
NECIB - BEDDIAF	3 A ING MECANIQUE \ MATERIAUX	

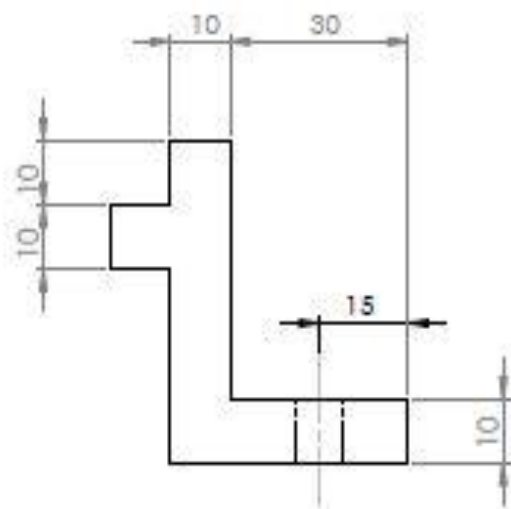
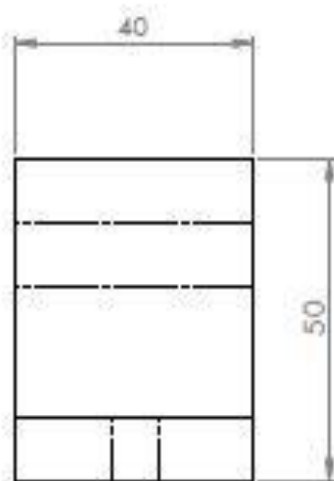
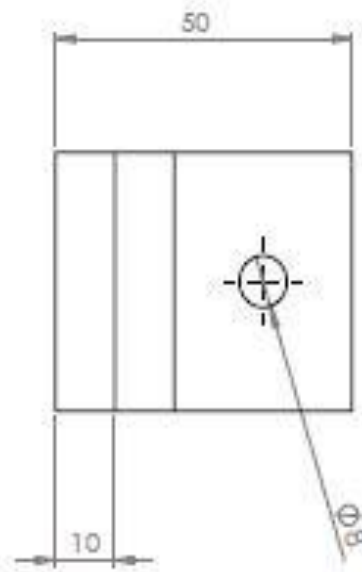
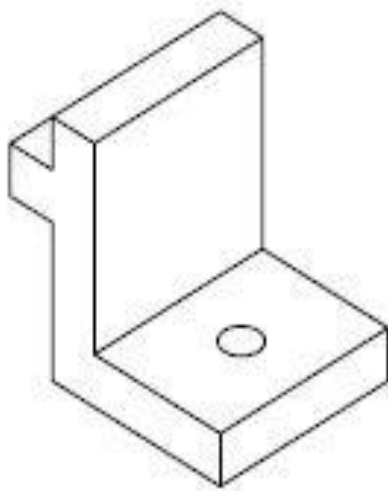



Tous les petits trous sont de diamètre  $\varnothing 1.50$   
 Tous les grands trous sont de diamètre  $\varnothing 8$   
 Tous les taraudages sont de type M4

Echelle: 1:2	<b>AUXILIAIRE</b>		Mat: ALUMINIUM
			
	E . M . P B . E . B	ALGER	
NECIB - BEDDIAF	3 A ING MECANIQUE \ MATERIAUX		



Echelle: 1:1	<b>SUPPORT 1</b>		
	Mat: ALUMINIUM		
	E . M . P . B . E . B	ALGER	qrs 2
NECIB - BEDDIAF	3 A ING MECANIQUE \ MATERIAUX		



Echelle: 1:1	<b>SUPPORT 2</b>		Mat: ALUMINIUM	
	E . M . P . B . E . B      ALGER		qts	2
NECIB - BEDDIAF	3 A ING MECANIQUE \ MATERIAUX			