

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

*UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI-OUZOU*  
*FACULTE DU GENIE DE LA CONSTRUCTION*  
*DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE*



# **MÉMOIRE**

## **DE FIN D'ÉTUDES**

POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME DE MASTER  
EN GÉNIE MÉCANIQUE  
OPTION : SCIENCES DES MATÉRIAUX

THÈME

*EVALUATION DE LA CINÉTIQUE  
DES CONTRAINTES RÉSIDUELLES  
EN SOUDAGE MÉTALLIQUE*

Dirigé par :

M<sup>r</sup> : FILALI

Étudié par :

M<sup>r</sup> : NAILI HICHAM

*Promotion 2012-2013*

## **Remerciements**

*Qu'il me soit permis de remercier et d'exprimer ma profonde gratitude en premier lieu à Dieu, mon créateur, de m'avoir donné toute la force nécessaire d'accomplir ce modeste travail ainsi mes parents et à Mr. FILALI mon promoteur, pour m'avoir confié un travail aussi intéressant et pour ses conseils, ses encouragements et son suivi attentif.*

*Que Mr le président de jury, trouve ici mes remerciements pour m'avoir fait l'honneur de présider mon jury.*

*Que les membres du jury trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude. Et enfin sans oublier le chef du département mécanique.*

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

*Enfin, je remercie toutes les personnes qui ont contribué de loin ou de près à la réalisation de ce travail, qu'elles trouvent ici ma profonde reconnaissance.*

# *Sommaire*

# Sommaire

Introduction Générale .....	1
-----------------------------	---

## CHAPITRE I

### METALLURGIE DE SOUDAGE

I.1 Introduction .....	4
I.2. Différentes zones d'un assemblage soudés.....	4
I.2.1 Métal de base.....	4
I.2.2 Zone fondu.....	5
I.2.3 Zone thermiquement affectée.....	5
I.2.4 Zone de liaison.....	6
I.3 Études thermique du soudage.....	6
I.3.1 Caractères généraux du cycle thermique et de la répartition thermique...	8
I.3.1.1 Cycle thermique de soudage.....	8
I.3.1.2 Facteurs influençant le cycle et la répartition thermique .....	11
I.4. Dilution en soudage.....	16
I.5 Transformation de phase lors du soudage.....	17
I.5.1 Aciers inoxydables .....	17
I.5.2 Aciers au carbone .....	20
I.6 Résumé.....	23

## CHAPITRE II

### PROCEDES DE SOUDAGE

II.1 Introduction.....	25
II.2 Définition et procédés de soudage.....	25
II.2.1 Définition de soudage.....	25
II.2.1.1 Préparation des joints de soudure.....	25
II.2.1.2 Types de soudage.....	26
II.2.2 Classification des procédés de soudage.....	26
II.2.2.1 Cas général.....	26

II.2.3 Critères de choix d'un procédé de soudage.....	31
II.2.4 Soudabilité.....	32
II.2.5 Diagrammes de constitution .....	32
II.2.5.1 Diagramme de schaeffler.....	33
II.2.5.2 Diagramme de Delon.....	34
II.2.5.3 Diagramme d'Epsy.....	35
II.3 Principaux défauts de soudage.....	35
II.4 Origine et influence des contraintes en soudage.....	39
II.5 Effet possibles des déformations et contraintes résiduelles.....	43

### **CHAPITRE III**

#### **LES CONTRAINTES RESIDUELLES**

III.1 Introduction .....	45
III.2 Phénomènes Métallurgiques et leurs Conséquences.....	46
III.3 Dilatation .....	46
III.3.1 Contraction Globale du joint.....	48
III.3.2 Gradient de déformation dans la zone chauffée (ZAT).....	51
III.4 Retraits et contraintes résiduelles dans les assemblages soudés.....	52
III.4.1 Moyen utilisés pour réduire les contraintes et les déformations résiduelles.....	52
III.5 Ordres de contraintes résiduelles.....	53
III.5.1 Contraintes internes du troisième ordre .....	53
III.5.2 Contraintes internes du deuxième ordre.....	54
III.5.3 Contraintes internes du premier ordre.....	54
III.6 Méthodes expérimentales de détermination des contraintes internes.....	56
III.6.1 Méthodes non destructives.....	56
III.6.1.1 Analyse par diffraction des rayons.....	57
III 6.1.2 Autres méthodes.....	58
III.6.2 Méthodes semi destructives .....	59
III.6.2.1 Méthode du trou .....	59
III.6.2.2 Méthode du trépan.....	62
III.6.3 Méthodes destructives (Méthodes d'enlèvement de couches successives).....	64
III.7 Résumé .....	68

## CHAPITRE IV

### MODELISATION MATHEMATIQUE

IV.1 Introduction.....	70
IV.2 Approche Numérique et Simulation du Modèle Mathématique.....	71
IV.3 Hypothèse Simplificatrices de calcul.....	72
IV.4 Formulation du problème.....	72
IV.4.1 L'élasticité.....	73
IV.4.2 Rigidité des matériaux.....	73
IV.4.3 Loi de Hooke.....	74
IV.5 Modélisation mathématique.....	74
IV.5.1 Présentation générale.....	74
IV.5.2 Équilibre des forces et des moments des forces.....	77
IV.5.3 Élaboration du programme .....	86
IV.6 Application du modèle numérique proposé.....	87
IV.7.Résultats et interprétations.....	92
Conclusion Générale.....	97
Références Bibliographiques.....	100
Annexes.....	103

# *Liste de figure*

# Liste des figures

## CHAPITRE I

<b>Figure I.1</b> : Zones constitutives de la soudure .....	6
<b>Figure I.2</b> : Cycle thermique d'un point A d'une soudure .....	7
<b>Figure I.3</b> : Répartition de la température dans une soudure.....	7
<b>Figure I.4</b> : Cycles thermiques le long du cordon de soudure.....	9
<b>Figure I.5</b> : Solide thermique.....	10
<b>Figure I.6</b> : Les isothermes .....	10
<b>Figure I.7</b> : Influence de la masse des pièces sur le cycle thermique de soudage...	11
<b>Figure I.8</b> : Influence de la température initiale sur le cycle thermique de soudage.	12
<b>Figure I.9</b> : Influence du nombre de passes sur le cycle thermique de soudage.....	14
<b>Figure I.10</b> : Influence des passes successives sur la variation de la dureté de la zone De surchauffe.....	15
<b>Figure I.11</b> : Dilution en soudage .....	16
<b>Figure I.12</b> : Illustration de la structure obtenue après refroidissement de la zone Fondu.....	18
<b>Figure I.13</b> : Coupe pseudo binaire du diagramme fer-chrome-nickel à 70% de fer	19
<b>Figure I.14</b> : Cycle thermique de soudage et transformation structurales.....	20
<b>Figure I.15</b> : Les différentes régions de la ZAT et les différentes microstructures Obtenues au voisinage de la zone fondu.....	21
<b>Figure I.16</b> : Diagramme TRC de soudage .....	22

## CHAPITRE II

<b>Figure II.1</b> : Chanfrein en V.....	26
<b>Figure II.2</b> : Diagramme de schaffler.....	33
<b>Figure II.3</b> : Diagramme de Delong.....	34
<b>Figure II.4</b> : Diagramme d'Espy.....	35
<b>Figure II.5</b> : Localisations des fissures de solidification.....	36
<b>Figure II.6</b> : Exemple de fissuration à froid.....	37
<b>Figure II.7</b> : Caniveaux.....	37
<b>Figure II.8</b> : Soudure en angle de tôles pré-peintes.....	38
<b>Figure II.9</b> : Collage.....	38
<b>Figure II.10</b> : Manque de pénétration.....	39
<b>Figure II.11</b> : Inclusion de laitier.....	39
<b>Figure II.12</b> : Contraintes résiduelles transversal développées lors du soudage..	40

<b>Figure II.13 :</b> Courbes de contraintes et température suivant le temps de soudage.	42
<b>Figure II.14 :</b> Contraintes résiduelles radiales et circonférentielles calculées et mesurées.....	42

### CHAPITRE III

<b>Figure III.1 :</b> Condition d'apparition des différents retraits.....	50
<b>Figure III.2 :</b> Répartition des contraintes générées par le retrait.....	51
<b>Figure III.3 :</b> Illustration des différents ordres de contraintes.....	55
<b>Figure III.4 :</b> Schématisation de l'effet des contraintes sur l'angle de diffraction.	57
<b>Figure III.5 :</b> L'effet des contraintes sur les pics de diffraction.....	58
<b>Figure III.6 :</b> État de contraintes au point $P(R, \alpha)$ avant et après perçage du trou .....	60
<b>Figure III.7 :</b> Schéma de la méthode du trépan.....	62
<b>Figure III.8 :</b> Signal de la déformation de la relaxation en fonction de la Profondeur trépanée.....	64
<b>Figure III.9 :</b> Machine d'usinage électrochimique.....	66

### CHAPITRE IV

<b>Figure IV.1 :</b> Les deux alternatives de la résolution des E.D.P et des intégrales..	71
<b>Figure IV.2 :</b> Schéma de la géométrie de la pièce.....	75
<b>Figure IV.3 :</b> Schéma de calcul des contraintes.....	80
<b>Figure IV.4 :</b> Organigramme simplifié du modèle.....	86
<b>Figure IV.5 :</b> Interface du Modèle numérique réalisé.....	88
<b>Figure IV.6 :</b> Affichage des remarques.....	89
<b>Figure IV.7 :</b> Interface et affichage le tableau du Modèle numérique réalisé..	89
<b>Figure IV.8 :</b> Interface et affichage les courbes du Modèle numérique.....	90
<b>Figure IV.9 :</b> Profil des contraintes résiduelles à différents niveaux d'une pièce Soudée.....	94

# *Liste des Symboles*

## *Liste des symboles*

$\theta_m$  : Température maximale à la quelle est porté le point étudié [C°].

$\theta_m(x, t)$  : Température à une distance x et un temps t [C°].

$\theta_0$  : Température initiale du métal à souder [C°].

q : Puissance effective du procédé utilisé [W].

v : Vitesse de soudage [cm/min].

E : Énergie de soudage [J/cm].

$Cp_1$  : Capacité thermique de volume [J/cm<sup>3</sup>.K].

a : Coefficient de diffusion thermique [cm<sup>2</sup>/s].

$\lambda$  : Coefficient de conductibilité thermique [W/cm.K].

$t_r$  : Temps de refroidissement [s].

$y_0$  : Distance du point considéré [mm].

$\delta$  : Épaisseur des pièces à souder.

$\delta^*$  : Épaisseur de transition [cm].

I : Intensité [A].

U : Tension [V].

$\alpha$  : La ferrite.

$\gamma$  : austénite.

$\delta$  : la ferrite  $\delta$ .

M : Martensite.

C+F : Bainite.

Fe<sub>3</sub>C : Cémentite.

P : Perlite.

MB : Métal de base.

ZL : Zone de liaison.

ZF : Zone fondue.

ZAT : Zone affectée thermiquement.

TIG : Tungstène Inert Gaz.

MIG : Metal Inert Gaz.

MAG : Metal Activ Gaz.

$T_f$  : Température de fusion.

# *Introduction Générale*

## *Introduction Générale*

Dans les applications industrielles, les conditions de fonctionnement des structures, des organes et des installations métalliques sont sévères. Cette sévérité peut provenir d'un environnement chimique corrosif, de la température, des contraintes mécaniques ou de la conjugaison de ces facteurs. Ces facteurs engendrant un endommagement (par corrosion, par fatigue, par abrasion, par usure, ...) qui peut être brutal et dangereux.

La résistance à l'endommagement dépend :

- De la nature des matériaux (composition chimique, structure, état métallique,...).
- Des transformations structurales au cours du fonctionnement.
- Des interactions physico-chimiques avec le milieu.
- De la forme, des dimensions et de l'état de surface des pièces.
- Des conditions de service.
- De la nature de l'assemblage : soudage, rivetage, boulonnage, .....

Le soudage est un mode d'assemblage très fréquent. Le développement sans cesse croissant de nouveaux procédés toujours plus performants permet de garantir des joints soudés de bonne qualité, avec une très bonne reproductibilité.

Cependant, les gradients thermiques très localisés mis en jeu lors du soudage engendrent inévitablement des dilatations locales qui ont pour conséquence l'apparition de champs de déformations et de contraintes non uniformes dans le matériau. Ces contraintes et déformations qui subsistent après retour à température ambiante. Les distorsions ainsi induites par le procédé peuvent poser 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). D'autre part, les champs de contraintes résiduelles auto-équilibrés qui subsistent après soudage dans le composant peuvent contribuer à diminuer la durée de vie de celui-ci. Elles favorisent les ruptures de fatigue, la fissuration et la corrosion : c'est notamment le cas pour les composants en acier (circuits de refroidissement, réservoirs sous pressions) des installations nucléaires de type REP (Réacteurs à eau pressurisée), pour lesquels ces aspects ont une importance évidente en termes de sécurité. En outre, dans le cas de structure mince, les contraintes internes liées au soudage peuvent induire un état de flambage.

D'autre part, on assiste depuis une vingtaine d'années, à un développement important des méthodes numériques qui permettent de résoudre beaucoup de problèmes et de comprendre certains phénomènes complexes liés aux procédés de soudage.

Dans ce cas, notre travail consiste à élaborer un programme informatique permettant de calculer l'état de contraintes résiduelles dans une pièce soudée.

Il consiste principalement à établir le formalisme mathématique reliant les contraintes résiduelles aux déformations engendrées par le soudage d'une pièce métallique. L'élaboration du programme informatique s'est faite sous « Visual Basic » en tenant compte des différents paramètres à prendre en compte.

Un exemple concret de soudage d'une pièce en acier inoxydable 316 a été traité par ce programme et les résultats obtenus sont comparables à ceux classiquement obtenus.

La présentation de ce travail a fait l'objet de 4 chapitres :

- Le premier chapitre concerne l'étude de la métallurgie de soudage des aciers.
- Le deuxième chapitre est réservé aux procédés de soudages et ces principaux défauts.
- Le troisième chapitre est réservé aux contraintes résiduelles, avec leurs ordres de grandeur et les méthodes utilisées pour les déterminer.
- Le quatrième chapitre de notre travail est consacré à la modélisation mathématique et conception du simulateur, qui constitue l'objet principal de cette étude, la simulation mathématique prévue pour ce travail. On présentera la méthodologie utilisée pour la mise en équations du phénomène étudié. Le fonctionnement du simulateur et les résultats donnés pour un exemple concret de soudage d'un acier inoxydable.
- L'ensemble du travail est clôturé par une conclusion générale.

# CHAPITRE I

CHAPITRE I

METALLURGIE DU  
SOUDAGE

## **I.1. Introduction.**

La réalisation d'assemblages indémontables, en fabrication mécanique, utilise couramment les procédés de soudage. Les techniques de soudage sont en pleine évolution. Ces techniques assurent la continuité métallurgique des pièces à assembler contrairement au rivetage, sertissage, collage ou boulonnage qui présentent des discontinuités physiques ou chimiques. Au fur et à mesure de la diversification et de l'évolution des procédés, on a peu à peu utilisé le terme de soudage, désignant l'ensemble des techniques mises en œuvre pour la réalisation de soudures, plutôt que celui de soudure, désignant alors le joint par lui-même [1].

L'opération de soudage est caractérisée par trois aspects :

Aspect thermique : le soudage est caractérisé par l'intervention d'une source de chaleur, le plus souvent mobile. Cette source de chaleur provoque des échauffements rapides, des refroidissements rapides et des gradients thermiques entre les différentes zones du joint soudé ;

Aspect chimique : durant le séjour à l'état liquide, des réactions chimiques peuvent se

produire :

- Entre les éléments présents, qu'ils proviennent du métal de base ou du métal d'apport mis en œuvre ;
- Entre le métal fondu et le milieu gazeux environnant.

Aspect thermo-mécanique : le passage par l'état fondu suivi d'une solidification font intervenir deux comportements physiques importants : le retrait à la solidification et la dilatation thermique. Ces deux phénomènes agissent simultanément pour engendrer des déformations et des contraintes résiduelles au niveau des joints soudés [2].

## **I.2. Différentes zones d'un assemblage soudé**

### **I.2.1. Métal de base**

Il constitue le métal des pièces à assembler. Ces pièces peuvent être en métaux semblables ou de nature différente. Le métal de base est soumis à un traitement thermique variable suivant le point considéré. De ce fait, il est le siège de transformations d'ordre physico-chimiques. L'importance des transformations est fonction d'une part du cycle thermique (T-t) et d'autre part de la nature de l'alliage. Les aciers austénitiques par

exemple sont sensibles aux changements de phases par précipitations... [2]

### **I.2.2. Zone fondue**

Dans les soudures par fusion, le bain est formé du métal de base seul (lorsque la soudure est effectuée sans métal d'apport) ou du mélange de métal de base et du métal d'apport à l'état liquide. Le métal composant le bain de fusion prend, après solidification, le nom de métal fondu et le volume qu'il occupe est nommé zone fondue [2].

### **I.2.3. Zone thermiquement affectée (Z.A.T)**

C'est une partie du métal de base qui n'a pas été fondue, mais dont les propriétés mécaniques ou la microstructure ont été modifiés à un degré quelconque par la chaleur du soudage. Dans cette zone, on distingue, dans le cas des soudures exécutées sur des métaux ayant un point de transformation, une zone de transformation contiguë à la soudure et dans laquelle la température a été suffisante pour entraîner une transformation dite allotropie de la structure et donc une modification des propriétés physiques du métal, sans qu'il y ait eu changement de sa composition chimique[2].

Dans l'autre partie de la zone thermiquement affectée, il n'y a pas eu de transformation allotropique notables, mais seulement des modifications, par exemple, de la grosseur et de la forme des grains du métal. La zone thermiquement affectée comporte différentes parties, on distingue:

- Zone de surchauffe;
- Zone austénitique;
- Zone partiellement austénitisé[2].

#### **Zone de surchauffe ( $\theta_s > 1100^\circ\text{C}$ ) :**

Cette zone se trouve au voisinage de la soudure (zone fondue) et dans laquelle la température a été suffisante pour entraîner une transformation allotropique de la structure ce qui implique une modification des propriétés physiques du métal, sans changement de sa composition chimique. C'est l'effet du grossissement du grain.

#### **Zone austénitique (zone de recuit) ( $\theta_s > \theta > A_{c3}$ ) :**

La température est aussi suffisante pour déclencher des transformations structurales mais on constate des modifications de point de vue propriétés physique, zone à gros grains.

**Zone partiellement austénitisé ( $A_{c3} > \theta > A_{c1}$ ) :** elle concerne les températures inférieures à celles de recuit. On observe des phénomènes de précipitation ; et transformation partielles des phases (M+B+F, ou B+F, ou M+F).

### I.2.4 Zone de liaison

Zone marquant la frontière entre la zone fondue et la zone affectée thermiquement (Z.A.T). En quelque sorte, c'est la limite entre le métal qui a été fondu et s'est solidifié et le métal qui est resté à l'état solide au cours de l'opération de soudage [2].

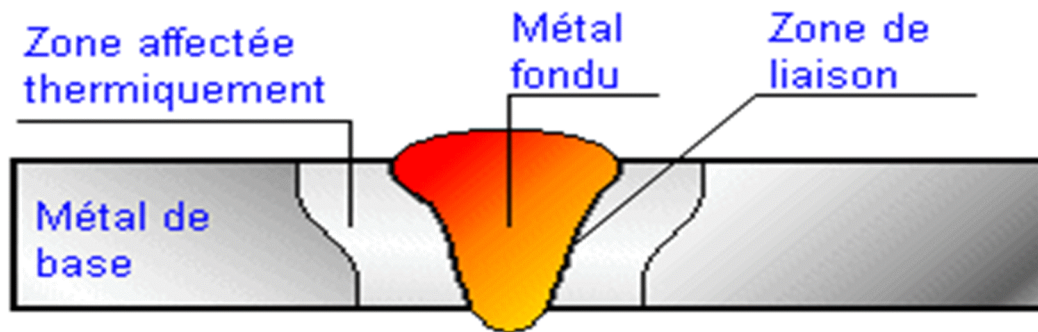
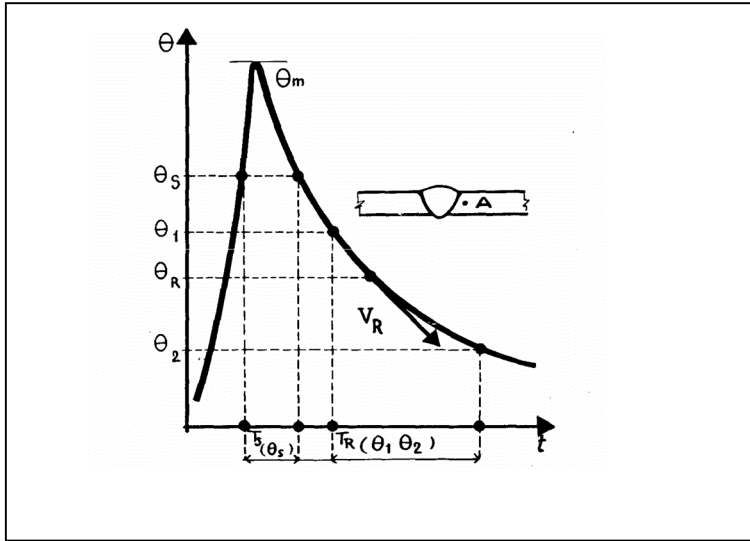


Figure I.1 Zones constitutives de la soudure [2]

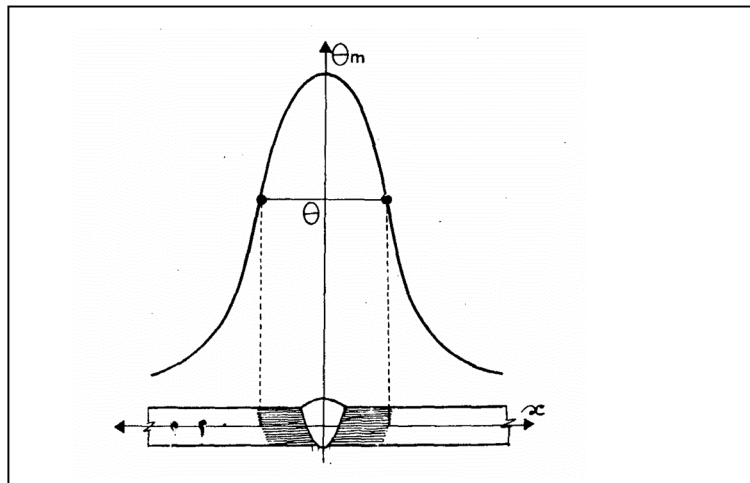
### I.3. Étude thermique du soudage

L'intérêt de la connaissance thermique de l'opération de soudage est de permettre l'interprétation quantitative des phénomènes métallurgiques engendrés par cette opération et par suite de prévoir ces phénomènes pour déterminer le critère de choix des procédés de soudage et des modes opératoires. Pour pouvoir interpréter les phénomènes qui prennent naissance, durant l'opération de soudage, en un point donné de l'assemblage, il faut connaître le cycle thermique de soudage, c'est-à-dire la variation de la température en fonction du temps ( $\theta.t$ ), en tout point de l'assemblage (**Figure I.2** et **figure I.3**) [2].

Les moyens mis en œuvre sont de deux ordres. Expérimental se faisant à l'aide de thermocouples dont la soudure chaude est insérée, et mathématique se faisant par des simulations ou des modèles numériques permettant l'étude métallurgique des effets du soudage. Des logiciels ont été développés dans ce domaine nous citons comme exemple le logiciel ANSYS (utilisé pour simuler les cycles thermiques de soudage).



**Figure I.2** :  $\theta = f(t)$  cycle thermique d'un point A d'une soudure [2]



**Figure I.3:**  $\theta = f(x)$ , répartition de la température dans une soudure [2]

$\theta_m$ : Température max du cycle

$$\theta_m = \frac{0.484 \cdot q}{v \cdot c \cdot \rho \cdot 2 \cdot y \cdot \delta} + \theta_0 \quad [C^\circ]$$

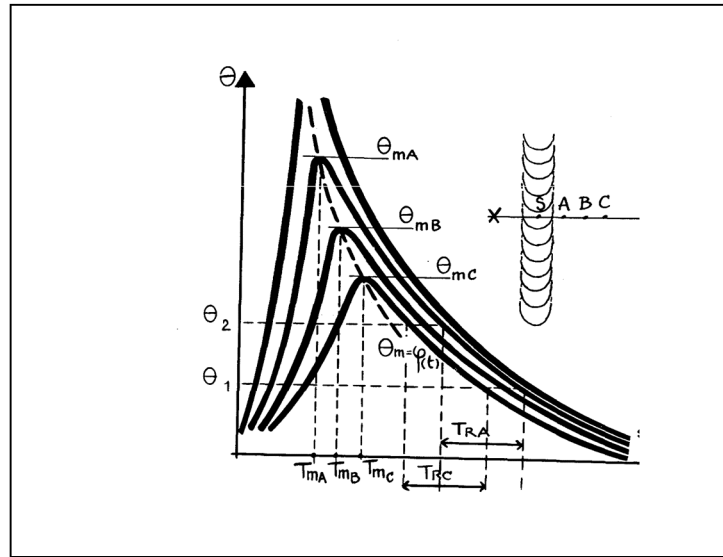
### I.3.1. Caractères généraux du cycle thermique et de la répartition thermique

#### I.3.1.1. Cycle thermique de soudage. [Courbes température-temps $\theta = f(t)$ ] [2]

Les transformations allotropiques que subit le métal de base d'un assemblage soudé peuvent être caractérisées par le cycle thermique, c'est-à-dire l'évolution de la température en fonction du temps en un point fixe de la trajectoire de la source de chaleur. Grâce à l'existence de l'état quasi-stationnaire, on peut limiter la détermination des courbes température-temps à des points A, B, C... répartis sur une droite XY perpendiculaire à la ligne de soudure, tracée à partir d'une position S de la source de chaleur.

On remarque d'après la **figure I.4** que :

- a) Les courbes température-temps se situent les unes au-dessous des autres au fur et à mesure qu'augmente la distance entre les points de mesure (A, B, C...) et la ligne de soudure (point S). Les températures maximales atteintes  $\theta_m$  sont décroissantes et toutes les courbes se rejoignent asymptotiquement au niveau de la température initiale du métal de base ;
- b) Les températures maximales atteintes  $\theta_{m_A}$ ,  $\theta_{m_B}$ , ... etc, qui sont décroissantes à partir de la ligne de soudure, sont franchies pour des temps  $T_{m_A}$ ,  $T_{m_B}$ , ... etc. qui sont croissants. Ce décalage se traduit par la courbe  $\theta_m = \varphi(t)$  qui sépare le domaine des températures croissantes de celui des températures décroissantes. Ceci se traduit par le fait qu'au voisinage de la source de chaleur, les points les plus rapprochés sont déjà en train de se refroidir à partir de la température maximale qu'ils ont atteint alors que les points les plus éloignés en sont encore à la phase d'échauffement ;
- c) La vitesse de refroidissement  $V_r$ , comptée à partir de la température maximale, décroît lorsque la distance à la ligne de soudure croît. Mais à partir d'un certain intervalle de température de  $\theta_2$  à  $\theta_1$ , on observe des temps  $T_R$  pratiquement identiques entre les températures aux points A et C (les courbes de refroidissement constituent un fuseau assez serré comme illustré dans la **figure I.7**). On choisit le plus souvent comme référence le temps de refroidissement  $t_r$  entre  $850$  et  $500^\circ$  ( $t_{r850/500}$ ).



**Figure I.4 :** Cycles thermiques le long du cordon de soudure [2]

### Solide thermique

Pour récapituler, Portevin et seférian ont proposé un modèle qui prend en compte l'état instantané des températures atteintes aux alentours de la source de chaleur S au moment de son passage par l'origine du repère orthonormé, en effet, c'est une représentation qui rend compte selon les trois axes :  $S_x$ , distance à la ligne de soudure,  $S_y$  : distance le long de cette ligne, c'est-à-dire l'axe des temps,  $S_z$  : sur une perpendiculaire au plan  $Sxy$ . Du fait de l'état quasi-stationnaire, le solide thermique reste identique à lui-même tout au long de la soudure selon laquelle il se déplace. En engendrant en chaque point les courbes température/temps décrites sur le solide thermique de la ( **Figure. I.5, Figure .I.6**) dont une moitié seulement est représentée.

Les courbe  $\theta=f(t)$  en des points définis par leur distance  $x$  à la ligne de soudure sont des coupes par des plans parallèles au plan  $XOZ$ . Sur ces courbes, le maxima des températures ce trouve décalé dans le temps, ce dont rend compte la courbe gauche  $\theta_m=\varphi(x,t)$  qui figure sur le solide, alors que la courbe  $\theta=(t)$  dont nous avons souligné l'intérêt n'est que la projection sur la plan  $XOY$ .

Ainsi se trouve rassemblé en une représentation les données de la température, temps, de distance, que nécessite la compréhension des phénomènes engendrés par le soudage.

$$\theta(x, t) = \left( \frac{q}{v \cdot \delta \cdot \sqrt{4\pi \cdot \lambda \cdot c \rho \cdot t}} \right) \text{Exp}^{(x^2/4a \cdot t)} + \theta_0 \quad [C^\circ]$$

Selon le procédé dont il s'agit, le solide est plus aigu, mais tous les procédés de soudage avec

déplacement de la source de chaleur sont tributaires de cette représentation.

Le modèle est connu sous le nom de "SOLIDE THERMIQUE", Dans ce modèle on prend en considération l'état quasi-stationnaire.

Notons que le solide thermique se comporte de façon similaire tout au long de la ligne de soudure en donnant lieu aux courbes qu'on observe ci-dessous :

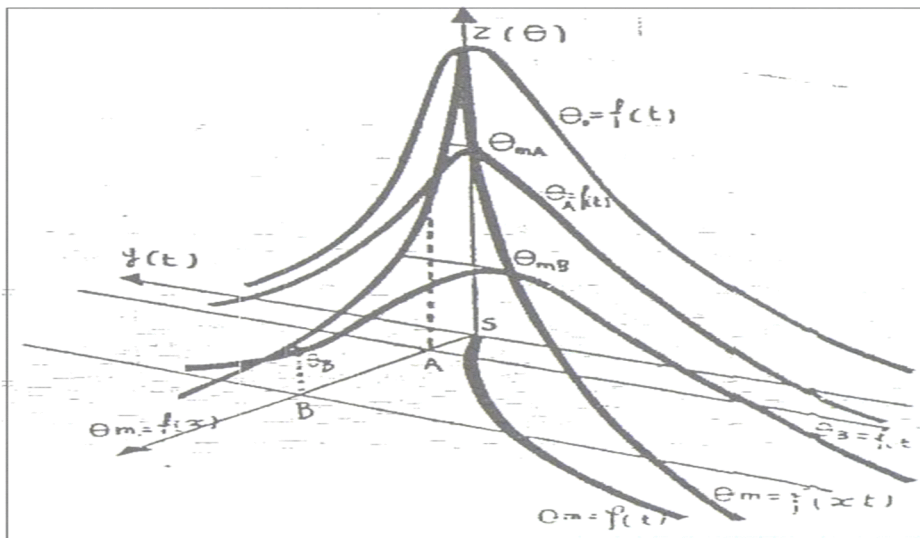


Figure I-5 : Solide thermique [2]

La projection du solide thermique sur le plan xoy donne la répartition des isothermes comme suit :

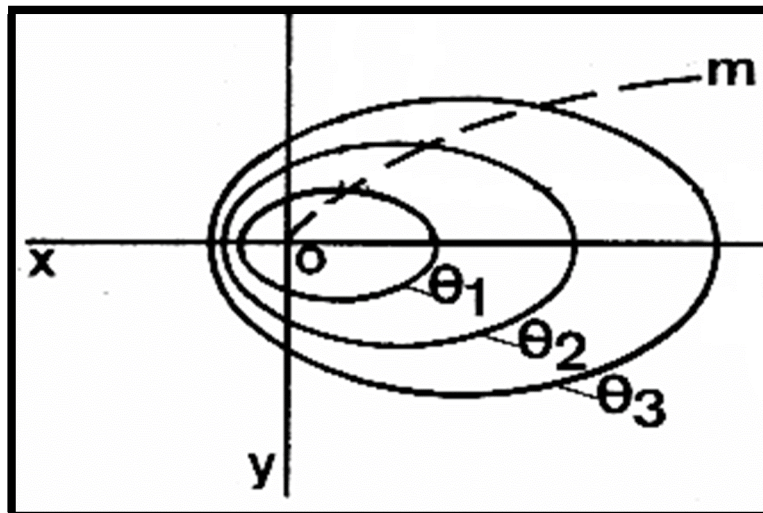


Figure I-6 : Les isothermes [2]

Elles donnent une indication sur le passage de la source de chaleur et permet de délimiter l'étendue des différentes zones au sein du cordon de soudure.

### I.3.1.2. Facteurs influençant le cycle et la répartition thermique dans le cas de soudage

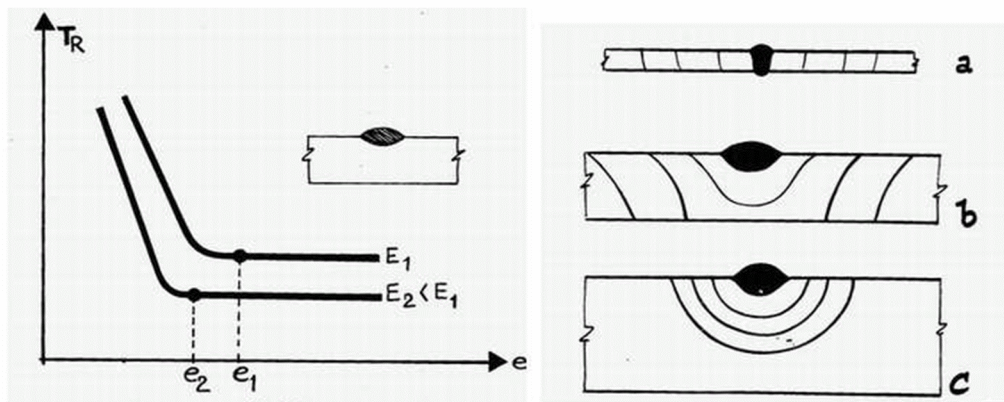
#### 1) Influence du métal de base [2]

Il existe trois paramètres qui entrent en jeu :

- La nature du métal de base, qui intervient par ses caractéristiques de conductibilité calorifique et de capacité calorifique. L'augmentation de ces deux facteurs accroît le gradient de température, réduit le temps de séjour à haute température et augmente la vitesse de refroidissement. Ainsi en est-il pour l'acier inoxydable par rapport à l'acier ordinaire.
- La masse des pièces est une notion qui ne peut être séparée de l'influence des autres conditions de soudage, tel que l'énergie de soudage. Pour deux énergies de soudage différentes  $E_1$  et  $E_2$ , le temps de refroidissement  $T_R$  se stabilise à partir d'une certaine épaisseur, dite épaisseur limite, d'autant plus élevée que l'énergie est plus grande. Pour un produit épais, (c'est-à-dire, du point de vue du soudage, ayant une épaisseur supérieure à l'épaisseur limite associée à l'énergie mise en jeu), les isothermes se répartissent dans la masse symétriquement par rapport à la ligne de soudure sur lesquels ils sont centrés, prenant une forme cylindrique (**Figure I.7**)

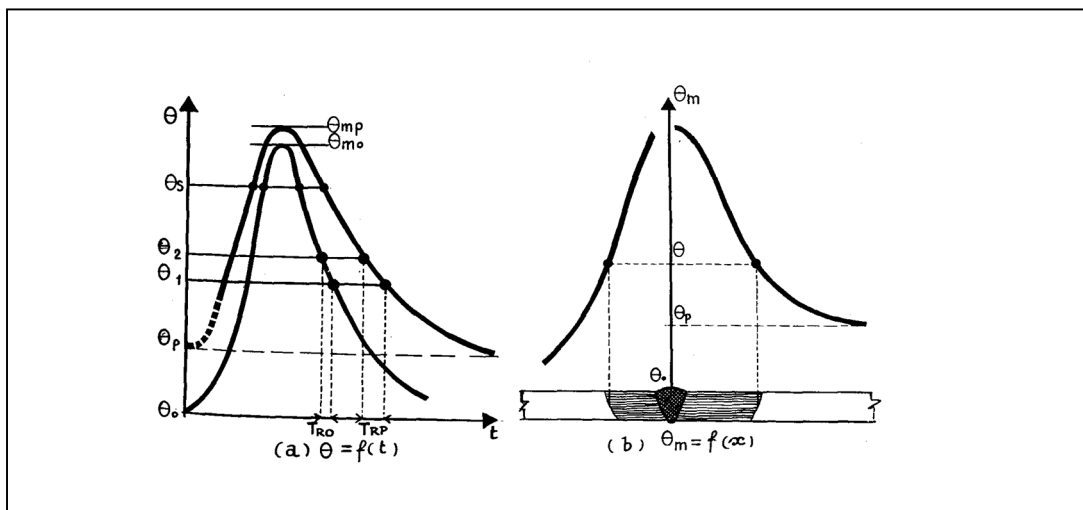
Par contre, dans le cas d'un produit dit mince (un produit affecté sur toute son épaisseur par la fusion) les isothermes se répartissent symétriquement par rapport au plan de symétrie de la ligne de soudure elle-même.

(**Figure I.7.a**) Pour les épaisseurs moyennes, les isothermes sont déformées par l'effet du refroidissement par rayonnement sur la face inférieure de la pièce.



**Figure I.7 :** Influence de la masse des pièces sur le cycle thermique de soudage [2]

- L'influence de la disposition des pièces (ou la géométrie des assemblages) ne peut être négligée. Un cordon de soudure peut être déposé à la surface, ou bien utilisé pour réaliser la première passe d'une soudure sur un chanfrein en V. Chaque cas correspond à un écoulement de chaleur, donc à un cycle thermique différent, bien que l'apport d'énergie est le même ;
- La température initiale du métal de base joue un rôle important vis à vis du cycle et de la répartition thermique en soudage (le gradient de température dépend directement de la température initiale). Les courbes température/temps illustrées par la **Figure I.8.a** montrent que pour des températures initiales  $\theta_0$  et  $\theta_p$  ( $\theta_p > \theta_0$ ), la température maximale atteinte augmente, temps de séjour à haute température augmente ce qui ralentit le refroidissement (le temps de refroidissement est augmenté), qu'il s'agisse du temps total ou du temps entre deux températures. Sur les courbes  $\theta_m = f(x)$  (**Figure I.8.b**), on peut voir que le préchauffage augmente l'étendue de la zone affectée thermiquement (le préchauffage diminue le gradient de température).



**Figure I.8 :** Influence de la température initiale sur le cycle thermique de Soudage [2]

### Relation de calcul des temps de refroidissements $t_r$ 850/500

Cas à 2 dimensions (faible épaisseur)  $t_{r(2D)}$  :

$$t_{r(2d)} = \frac{1}{4\pi\lambda\rho c} \left[ \frac{E}{S} \right]^2 \left[ \left( \frac{1}{500 - \theta_a} \right) - \left( \frac{1}{850 - \theta_a} \right) \right]^2 \quad (s) \quad (I.1)$$

Cas à 3 dimensions (grande épaisseur)  $t_{r(3d)}$  :

$$t_{r(3d)} = \frac{1}{2\pi\lambda} \cdot E \left( \frac{1}{500 - \theta_a} - \frac{1}{850 - \theta_a} \right) \quad (s) \quad (I.2)$$

Épaisseur de transition  $S^*$  (cm) :

$$S^* = \sqrt{\frac{E}{2\rho c} \left( \frac{1}{500 - \theta_a} + \frac{1}{850 - \theta_a} \right)} \quad (cm) \quad (I.3)$$

**Si**  $S > S^*$  → Relation (I.2) à utiliser  
**Si**  $S < S^*$  → Relation (I.1) à utiliser.

Cas des plaques :

$$\theta_{\max}(y) = \frac{0.484\eta E}{2c\rho s} + \theta_a \quad (C^\circ). \quad (I.4)$$

Air thermique = 2.y.s

Cas des pièces massives :

$$\theta_{\max}(r) = \frac{0.368E}{\frac{\pi}{2}r^2c\rho} + \theta_a \quad (C^\circ) \quad (I.5)$$

2) Influence de l'Énergies et environnement [2]

L'influence des conditions de soudage peut s'exprimer en fonction de l'énergie mise en jeu qui peut varier dans une large mesure et qui est un facteur important du cycle thermique et de la répartition thermique. L'énergie mise en jeu est exprimée par :

$$E_n \text{ (énergie nominale)} = \eta \frac{U \times I}{V} 60 \quad (\text{joule par centimètre de soudure}) \text{ (J/cm)}$$

Où :

U : la tension à l'arc (en volts) ;

I : l'intensité du courant de soudage (en ampères) ;

V : la vitesse de soudage (en cm/min).

L'augmentation de l'énergie de soudage étend la zone thermiquement affectée, augmente le temps de séjour à haute température et ralentit le refroidissement.

### 3) Influence du nombre de passes : soudage en plusieurs passes

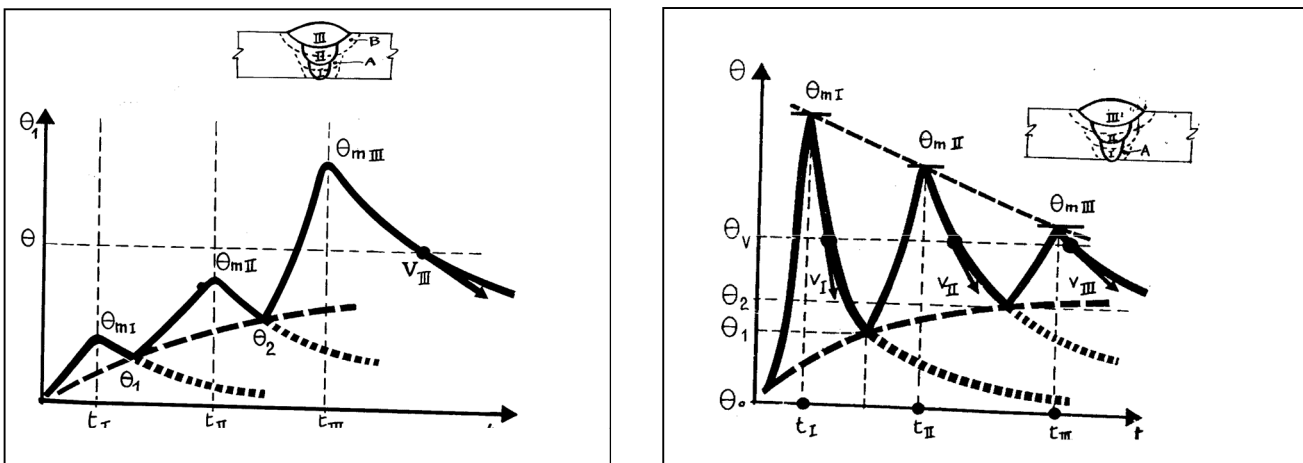
En réalité, le soudage peut être effectué en plusieurs passes. L'évolution de la température au cours de ces passes dépend essentiellement : [2, 3]

- De la température ;
- Du nombre, de la disposition des passes et de leurs conditions d'exécution ;
- De l'intervalle de temps entre passes ;
- De la position par rapport à la soudure du point dont on suit la variation de température.

Le soudage multipasses engendre souvent des fissurations à chaud d'où des précautions à prendre

La **figure I.9** décrit les effets thermiques du soudage en plusieurs passes dans le cas d'une soudure sur bords chanfreinés en V, exécutée en trois passes sans préchauffage. Si la courbe température-temps est déterminée en un point A affecté dès la première passe, l'allure des cycles thermiques varie après chaque passe selon la température initiale correspondante. On remarque que la température maximale ( $\theta_{mi}$ ) diminue ( $\theta_{mI} > \theta_{mII} > \theta_{mIII}$ ), la vitesse de refroidissement ( $V_i$ ) diminue ( $V_I > V_{II} > V_{III}$ ) et le temps de séjour à haute température diminue ( $t_I > t_{II} > t_{III}$ )

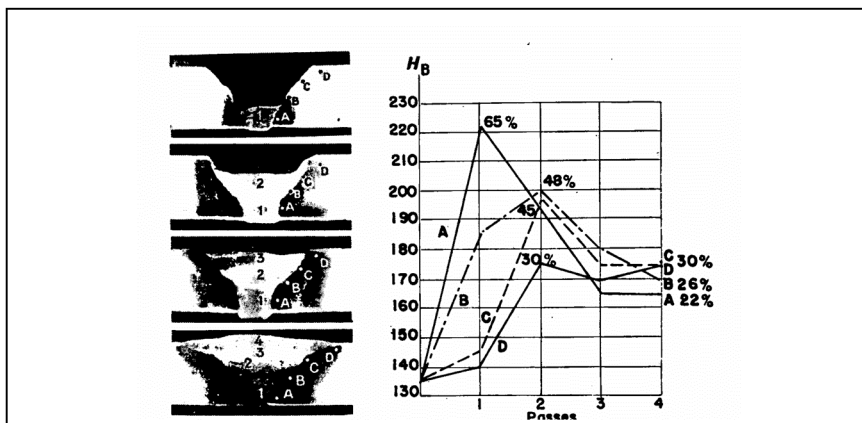
Si on relevait la courbe  $\theta = f(t)$  au niveau du point B (**Figure I.9**) voisin de la troisième et dernière passe, pour des conditions d'exécution identiques au cas précédent, on verrait qu'en ce point le choc thermique dû aux deux premières passes est relativement faible. Ce n'est qu'à la troisième passe que la température maximale est atteinte en ce point, tandis que la vitesse de refroidissement est modérée par l'effet de préchauffage [2].



**Figure I.9** : Influence du nombre de passes sur le cycle thermique de soudage [2]

On peut conclure que lors d'un soudage en plusieurs passes : [2,3 ,5]

- Les cycles thermiques les plus sévères sont observés au voisinage de la première passe. La température maximale atteinte et la rapidité du refroidissement sont de plus en plus atténuées, en raison de l'élévation progressive de la température initiale. L'action atténuée des passes peut modifier la structure de la ZAT ;(**Figure I.9**).
- Suivant la disposition des passes, une même température  $\theta$  (par exemple le point  $A_3$  dans le cas des aciers) peut être dépassée deux ou plusieurs fois en une région donnée au cours des passes successives. La structure finalement observée en cette région est le résultat de la succession de ces cycles.
- On trouvera toujours, dans une soudure en plusieurs passes, des régions correspondant à la dernière passe où la structure résulte seulement du dernier cycle thermique. Ce cycle est en principe moins brutal que les précédents.
- L'intervalle de temps séparant les passes successives joue un rôle important vis-à-vis de la température au moment de chaque passe, d'où la nécessité de le préciser lors de la spécification du mode opératoire.



**Figure I.10** : Influence des passes successives sur la variation de la dureté de la zone de surchauffe [2]

#### I.4. Dilution en soudage

Tous les procédés de soudage par fusion, avec ou sans métal d'apport, mettent en jeu la fusion plus ou moins importante des bords du métal de base et/ou du métal provenant des passes précédentes. La participation du métal de base et du métal d'apport éventuel à l'élaboration de la zone fondue d'une soudure influe sur les propriétés mécaniques, chimiques et métallurgiques de celle-ci.

La dilution est la proportion dans laquelle le métal de base participe, par sa propre fusion, à l'élaboration de la zone fondue de la soudure. En d'autres termes, la dilution est la modification de la composition chimique du métal déposé (par un fil d'apport ou une électrode), provoquée par son mélange avec le métal de base fondu ou le métal fondu résultant des passes précédentes. La dilution permet ainsi de connaître la composition chimique de la zone fondue. En désignant le métal déposé par (A), le métal de base fondu par (B) et le métal fondu par (A+B), on peut exprimer le taux de dilution en pourcentage de métal de base fondu (B) dans le métal fondu [6].

(A+B) de la soudure **Figure I.11** par la formule suivante :

Taux de dilution :

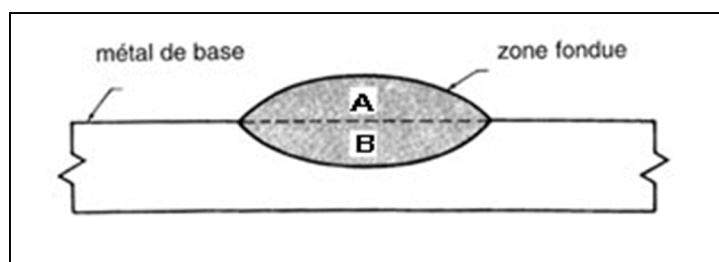
$$d \% = \frac{\text{volume du métal de base fondu}}{\text{volume de la zone fondue}} \times 100$$

En rapport de surface, cela donne :

$$d \% = \frac{SA + SB}{SA + SB + SMA} \times 100$$

Le taux de dilution varie suivant : [6]

- Le procédé : soudo-brasage, soudage TIG, soudage MIG / MAG ;
- Les paramètres : intensité, tension, vitesse de soudage, par exemple : en polarité directe (- à l'électrode) la dilution est plus importante qu'en polarité inverse (+ à l'électrode) ;
- Le nombre de passes.



**Figure I.11** : Dilution en soudage [6]

Lorsque  $B=0$ , c'est à dire lorsque le métal de base n'est pas fondu, on trouve que la dilution est nulle ( $D=0$ ). C'est le cas du brasage et du soudobrasage, procédés dans lequel seul le métal d'apport fond à une température toujours inférieure à la température de fusion des métaux de base en présence [6].

À l'autre limite, lorsque  $A=0$ , c'est-à-dire lorsqu'on n'utilise aucun métal d'apport, on trouve que la dilution est maximale ( $D=1=100\%$ ). C'est le cas du soudage par fusion, sans métal d'apport. Entre ces deux limites extrêmes,  $B=0$ ,  $A=0$ , on trouve toutes les valeurs de dilution intermédiaires des procédés de soudage concernant le soudage par fusion de deux ou plusieurs pièces entre elles. Pour optimiser la composition de structure, on se sert du diagramme de Scheffler [6].

## **I.5. Transformations de phases lors du soudage**

Durant le processus de soudage par fusion des aciers, les transformations qui se produisent dépendent de la composition chimique des différents matériaux mis en jeu et des historiques thermiques subits par ces derniers d'où on aura des modifications qui vont s'opérer au niveau de la zone affectée thermiquement (ZAT) ainsi qu'au niveau de la zone fondue.

### **I.5.1. ACIERS INOXYDABLES [5]**

#### **a) .Solidification et formation des structures**

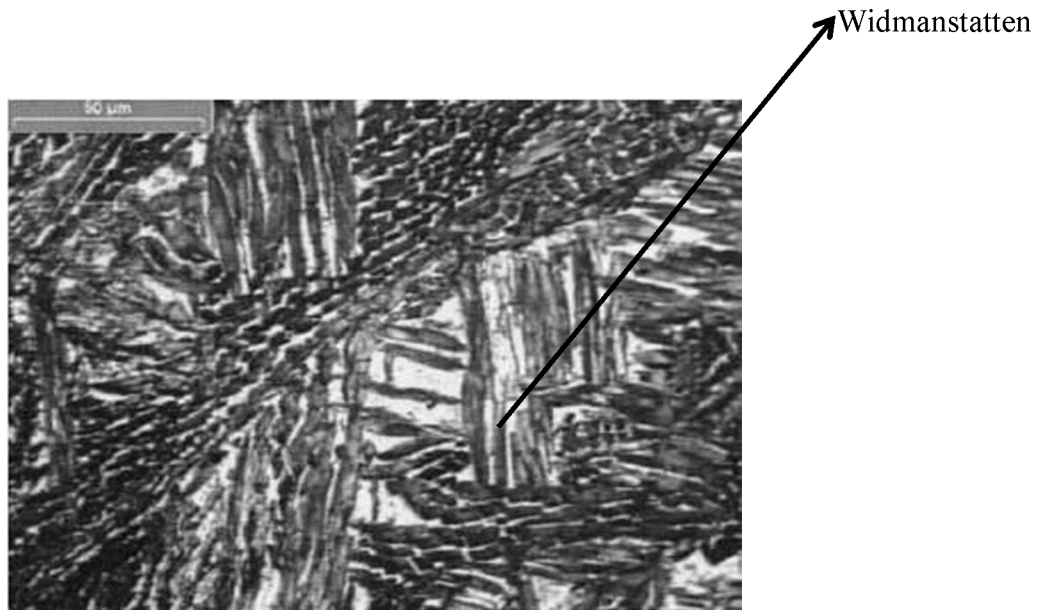
Lors de la solidification des joints de soudures, une structure entièrement ferritique prend place ce n'est qu'en dessous de  $900^{\circ}\text{C}$  que l'austénite commence à précipiter au niveau des joints de grains de la ferrite. La solidification et formation de la ferrite s'effectue par une croissance épitaxiale à partir du métal de base en fonction du gradient thermique.

Quant à l'austénite, sa formation débute au niveau des joints de grains (sites privilégiés de précipitation) ensuite il y a l'austénite du type widmanstätten qui fait apparition dans les sites intragranulaires. Notons que la précipitation de l'austénite est régie par la germination et croissance qui sont gouvernées par la diffusion.

Les cinétiques élevées de refroidissement ne favorisent pas la formation de l'austénite par contre des vitesses de refroidissement lentes permettent d'obtenir une proportion élevée d'austénite.

Étant donné que la germination est favorisée au niveau des joints de grains une densité élevée de ces derniers favorise la formation de l'austénite en quantités élevées sauf que cette éventualité est à écarter vu le grossissement des grains induit par l'apport énergétique du processus.

Une autre alternative consistant à enrichir les métaux d'apport en éléments gamagènes (Le "Nickel" en particulier) est préconisée.

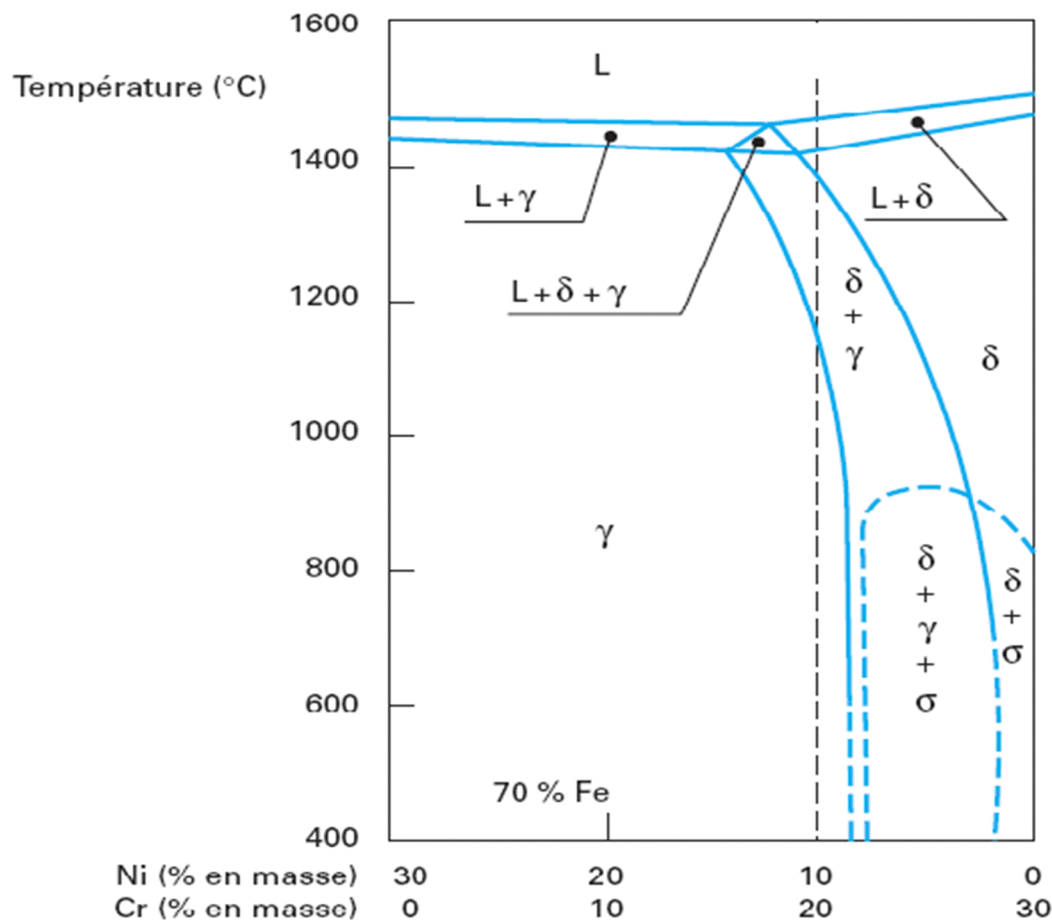


**Figure I-12 :** Illustration de la structure obtenue après refroidissement de la zone fondue [5]

Donc au final on aura une structure constituée de grains de ferrite primaire avec de l'austénite intergranulaire ou intra granulaire principalement précipitée en structure widmanstatten.

### **b). Changements structuraux en soudage**

Pendant l'opération de soudage l'augmentation de la température provoque au niveau de la zone affectée thermiquement une transformation de l'austénite en ferrite " $\delta$ " accompagné d'une croissance des grains dont la taille et la croissance homogène jouent un rôle important lors des transformations de phases au court du refroidissement.



**Figure I-13** : Coupe pseudo binaire du diagramme fer-chrome-nickel à 70% de fer [2].

En plus de la transformation ferrite "δ" ↔ austénite "γ" les aciers duplex peuvent faire objet d'autres transformations tels que :

- précipitation des carbures de chrome du type  $Cr_7C_3$  et  $Cr_{23}C_6$
- précipitation des nitrures  $Cr_2N$ ,  $CrN$
- précipitation de composés intermétalliques tels que la phase  $\sigma$ , .....etc.

Ces phases secondaires sont généralement nocives pour le cordon de soudure. De ce fait, une vitesse de refroidissement élevée est nécessaire pour les éviter.

## I.5.2.ACIERS AU CARBONE

### a. Transformations au cours du soudage :

Au voisinage de la zone fondue, le métal de base subit les effets du cycle thermique de soudage qui provoquent des transformations liées aux conditions de refroidissement du joint soudé.

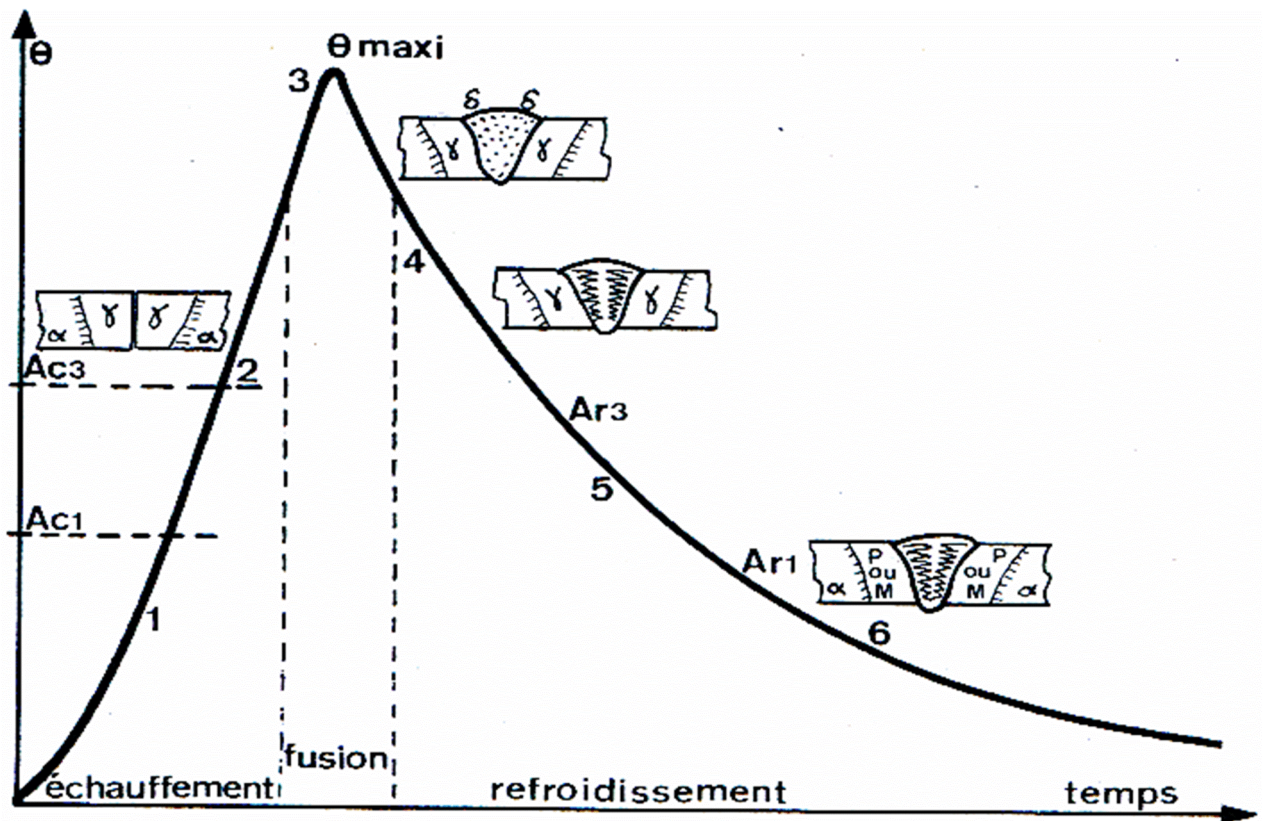
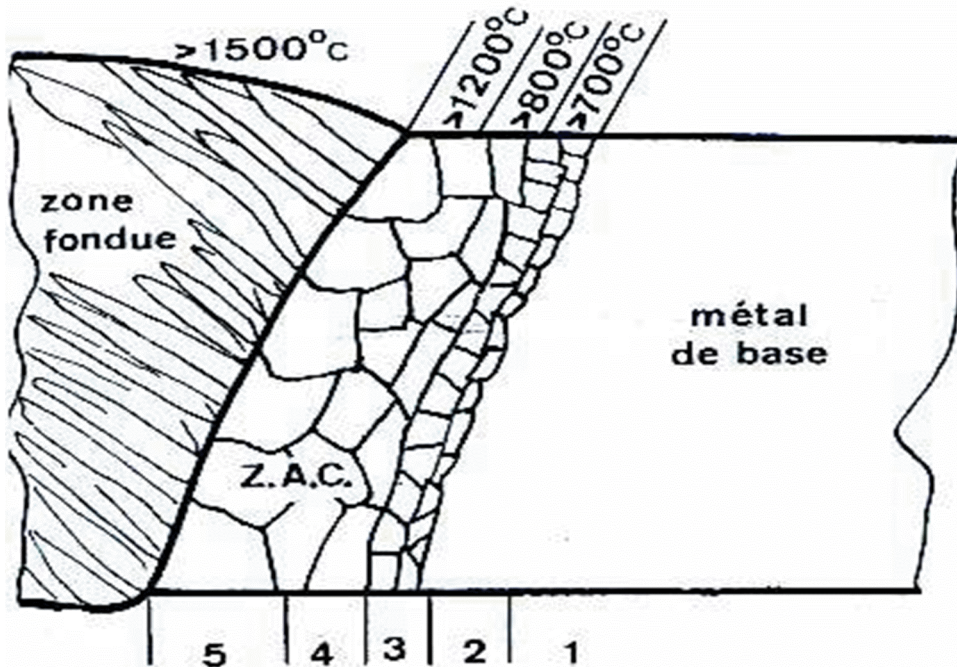


Figure I.14 : Cycle thermique de soudage et transformations structurales [3]

- **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

## b. Transformations lors du chauffage

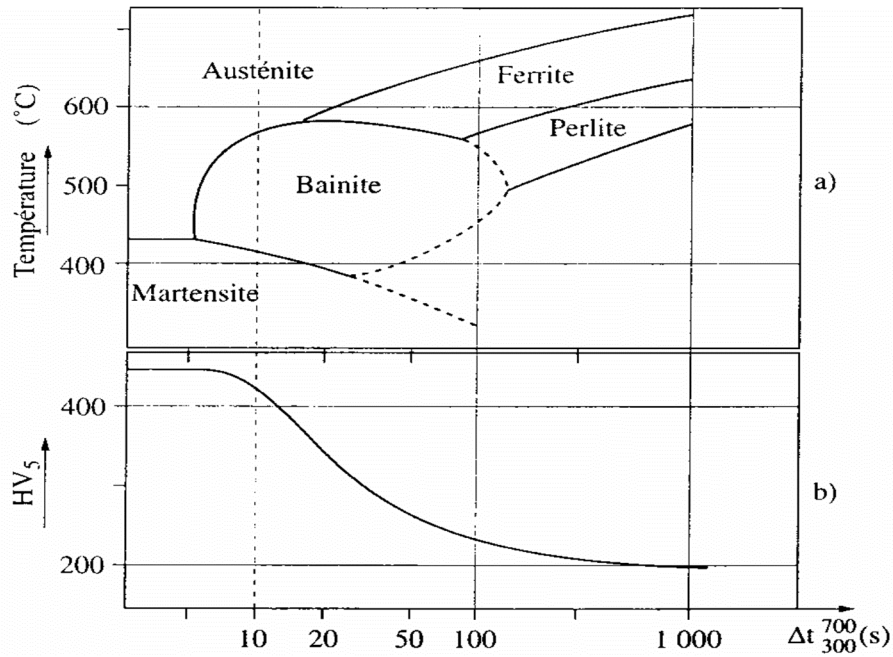


**Figure I-15:** Les différentes régions de la zone affectée par la chaleur et les différentes microstructures obtenues au voisinage de la zone fondue [4]

- 1 : portion où le métal de base n'a pas atteint une température de 600°C environ.
- 2 :  $600^{\circ}\text{C} < \theta < \text{Ac}1$ , on observe quelques modifications tels que la globulisation des lamelles de Ferrite et de cémentite, la recristallisation pour le soudage de produits écrouis, ...etc
- 3 :  $\text{Ac}1 < \theta < \text{Ac}3$  l'austénitisation partielle du métal donne une structure à grains très fins.
- 4 :  $\text{Ac}3 < \theta < 1200^{\circ}\text{C}$  : structure à gros grains
- 5 : Au-delà de 1200°C au contact de la zone fondue (zone de liaison), une structure à gros grains confère au métal une forte trempabilité ; d'où après refroidissement, des structures acciculaires grossières ou même parfois des structures de trempe. D'ailleurs dans cette région il subsiste un risque de fissuration à froid d'où l'impact sur les caractéristiques mécaniques après soudage.

### c. Transformations lors du refroidissement

Contrairement au chauffage, les modifications structurales au court du refroidissement sont décrites à travers des diagrammes TRC établis spécialement pour le soudage.



**Figure I-16:** Diagramme TRC de soudage [4]

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

- La structure martensitique dure et fragile (de réseau tetragonale) 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.

## Résumé

Le chauffage de la pièce à souder, et la création d'un bain de fusion conduisent à résultent des phénomènes thermophysique complexes .L'arc électrique transmet dans la pièce un flux de chaleur intense à la surface

En effet les conditions de soudage ainsi que les paramètres sont choisis de telle manière à obtenir une structure seine 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 comme les fissures.

Les aciers au carbone ainsi que les aciers inoxydables ont une bonne soudabilité puisque les conditions de soudage ainsi que les paramètres (composition du métal d'apport, vitesse de refroidissement, énergie de soudage) soient réunis.



# CHAPITRE II



PROCEDES DE SOUDAGE

## **II.1.Introduction**

L'assemblage par soudage occupe une place primordiale dans l'univers industriel. Il est utilisé dans la construction des bateaux, trains, avions, fusées, automobiles, ponts, tuyaux, réservoirs et tant d'autres choses qui ne sauraient être construites sans le recours au soudage.

La clé des problèmes qui se posent lors d'une construction à souder relève du métier du soudeur ou du constructeur soudeur dont la démarche doit inclure, outre l'opération de soudage, les problèmes se posant en amont et en aval de celle-ci, à savoir :

- La conception des assemblages : découpage de l'assemblage et disposition des joints ;
- La préparation des pièces avant soudage : géométrie des bords, état des surfaces ;
- La mesure de la qualité des soudures et de la tenue de l'assemblage en service.

## **II.2. Définition et procédés de soudage :**

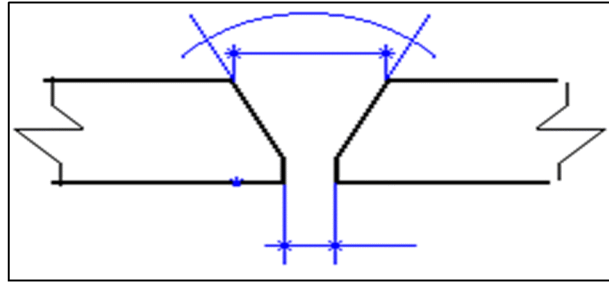
### **II.2.1.Définition du soudage**

Le soudage c'est une opération qui permet de lier quasiment tous les matériaux, des matériaux métalliques jusqu'aux matières plastiques ; en assurant la continuité de la matière à assembler, et en préservant les propriétés mécaniques ainsi que métallurgiques et physiques. Autrement dit, le soudage est un procédé d'assemblage qui consiste à la mise des pièces à souder à la température de soudage (Température de fusion, dans la majorité des cas) au niveau de leur joint, par le biais d'une source de chaleur. Une pression mécanique peut être éventuellement associée à cette chaleur [2].

#### **II.2.1.1. Préparation des joints de soudure**

Pour faciliter l'exécution et obtenir des cordons sans défauts ; la préparation consiste à donner aux bords, ou aux extrémités à souder, la forme qui va permettre le mieux possible une fusion franche et totale et qui donnera le moins lieu aux effets de la dilatation et du retrait.

Cette tâche consiste à abattre l'angle supérieur des bords de façon que, une fois rapprochés ces derniers forment une ouverture en ''V'' dans laquelle la soudure se fait aisément (Figure II-1)



**Figure II-1 : Chanfrein en ''V'' [10].**

C'est le chanfreinage des bords. L'ouverture créée par les chanfreins juxtaposés offre un angle variable suivant la manière à souder ou le procédé utilisé. Pour le soudage à arc, l'angle est de 60 à 70°.

### **II.2.1.2 Types de soudage [2]**

- Une soudure est dite Homogène lorsque les deux matériaux de base et le métal d'apport sont de même nature. Par exemple : le soudage MIG de deux aciers AISI 316L (austénitique) avec apport 316LSi ;

- Une soudure est dite Autogène lorsque les deux matériaux de base sont de la même Composition et que l'assemblage s'effectue sans métal d'apport ;

- On parle d'une soudure ''Hétérogène'' si au moins un des matériaux en question (métaux de Base ou métal d'apport) est différent des autres. Exemple : soudage d'un acier duplex A790 et un acier martensitique 13Cr avec un métal d'apport approprié.

## **II.2.2 Classification des procédés de soudage**

### **II.2.2.1. Cas général.**

De nombreux procédés de soudage par fusion peuvent être employés lors de la mise en œuvre des aciers : soudage à l'arc avec électrode enrobée, sous flux, MIG, TIG, soudage au plasma, soudage par faisceau d'électrons, par faisceau laser. Ces procédés doivent assurer :

- Une bonne continuité géométrique sans défauts de surface qui pourraient constituer des amorces de corrosion ;

- Une bonne conservation de la résistance à la corrosion de l'assemblage ; ce résultat sera obtenu si le procédé permet d'éviter tout départ d'élément d'alliage utile (le chrome notamment) et tout apport d'élément nocif tel que le carbone et l'hydrogène ;

- Une bonne tenue mécanique vis-à-vis de la fissuration sera obtenue si la géométrie de l'assemblage d'une part et la composition chimique du métal fondu d'autre part sont satisfaisantes.

La classification des procédés de soudage se fait en considérant certaines caractéristiques telles que :

-Le type d'énergie mise en œuvre ;

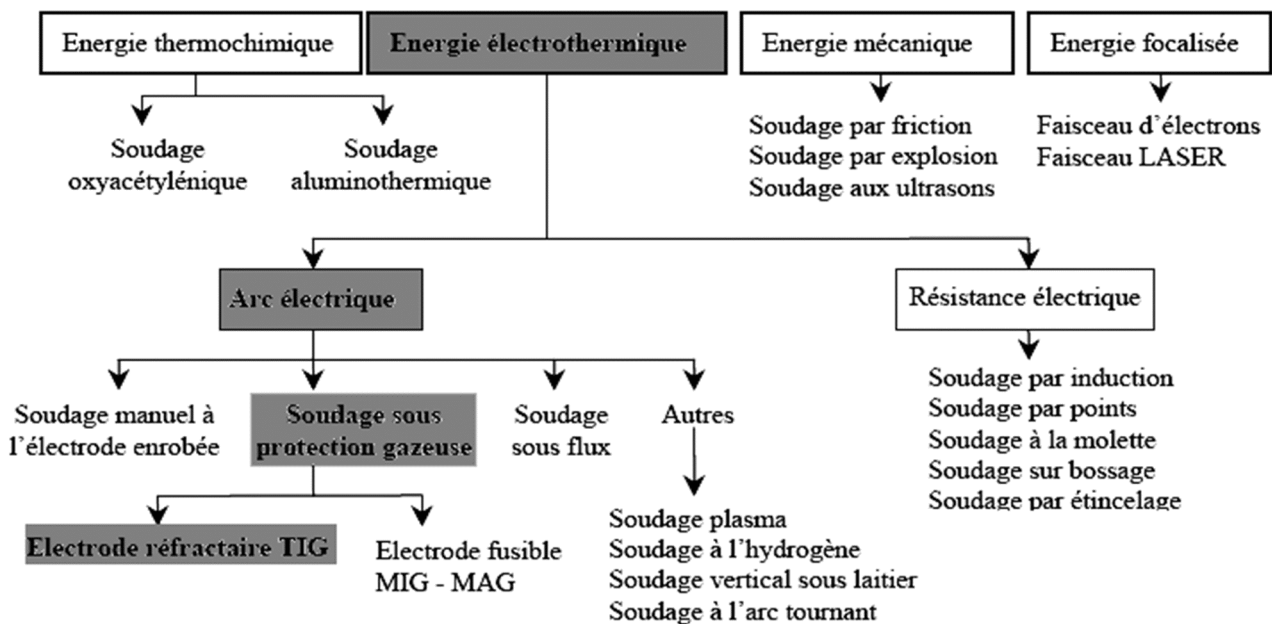
-Les paramètres physiques (température, pression, milieu extérieur) ;

-Le mode d'élaboration de la continuité de la matière (solidification depuis le liquide ou diffusion depuis le solide) ;

-La morphologie de la liaison.

Il existe à l'heure actuelle des dizaines de procédés de soudage, le plus souvent ils sont classés à partir du type d'énergie utilisée, par exemple : énergie électrique, énergie chimique... etc. Les principaux procédés de soudage sont représentés dans le tableau ci-après : (Tab II.1)

**Tableau II-1 :** Classification générale des procédés de soudage en fonction de l'énergie mise en jeu [14]



Le choix du procédé s'opère selon des critères bien définis : Matériaux à souder ; Facteurs Technologiques ; Critères de qualité ; Critères économiques.

## 1. Soudage à la forge

C'est le plus ancien des procédés de soudage. Les bords des pièces à souder sont portés à la température qualifiée de « blanc soudant » (de 950C° à 1050C°) estimée à l'œil. Une fois la température requise atteinte, les parties à assembler sont juxtaposées puis martelées. Ce procédé s'apparente au brasage car il n'y a pas à proprement parler de fusion ; ce principe est en partie repris dans le soudage par ultrasons.

## 2. Soudage à la flamme

Une flamme est dirigée sur la pièce à souder, le métal d'apport étant apporté dans le bain de fusion sous forme d'une baguette tenue à la main

## 3. Soudage à l'Arc Électrique

C'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 par amorçage L'électrode est constituée d'un métal dont les caractéristiques mécaniques, chimiques et physiques sont très proches du métal des deux pièces à souder.

L'arc électrique est la source de chaleur à base de nombreux procédés de soudage. Les raisons primordiales de ce choix sont :

- les effets thermiques aux électrodes : l'arc de soudage est un arc court entre une électrode formant ainsi l'outil et les pièces à souder portées localement à la température de fusion.
- Les phénomènes de transfert de matière qui s'instaurent naturellement et simultanément de l'électrode, lorsqu'elle est fusible, forment un dépôt qui se dilue avec les bords à souder pour constituer après refroidissement la liaison métallique recherchée. Il est à noter que pour le cas des électrodes réfractaires, il n'y a pas de transfert entre l'électrode et la pièce.

L'effet thermique provoque la fusion aussi bien de l'électrode que du métal de base, pour amorcer un arc il faut que le courant parcourt un circuit fermé, d'une part la pièce et de l'autre l'électrode.

Les procédés de soudage utilisant l'arc électrique comme source de fusion sont :

- Le soudage automatique sous flux ;
- Le soudage avec électrodes enrobées ;
- Le soudage semi-automatique sous protection gazeuse : MIG ou MAG ;
- Le soudage avec électrodes réfractaires TIG, procédé de soudage TIG).

### **3.1 Soudage automatique sous flux**

Un arc électrique éclate entre un métal d'apport constitué d'un fil-électrode nu ou fourré qui se dévide mécaniquement et la pièce à souder. L'arc et le bain de fusion étant submergés par un flux pulvérulent [15].

### **3.2 Soudage avec électrodes enrobées**

Un arc électrique éclate entre un métal d'apport constitué d'une électrode enrobée fusible et la pièce à souder.

### **3.3 Soudage MIG (*Metal Inert Gaz*)**

Un arc électrique s'amorce entre un métal d'apport constitué d'un fil-électrode nu qui se dévide mécaniquement et la pièce à souder, l'arc et le bain de fusion étant environnés d'une atmosphère protectrice chimiquement inerte d'argon ou d'hélium.

### **3.4 Soudage MAG (*Metal Active Gaz*)**

Un arc électrique éclate entre un métal d'apport constitué par un fil-électrode nu ou fourré qui se dévide mécaniquement et la pièce à souder. L'arc et le bain de fusion étant environnés d'une atmosphère protectrice chimiquement active qui peut

être du type CO<sub>2</sub> ou d'un mélange argon/CO<sub>2</sub>.

### **3.5 Soudage TIG (*Tungstène Inert Gaz*)**

Un arc électrique s'amorce entre une électrode non fusible en tungstène et la pièce à souder. S'il faut un métal d'apport, celui-ci est amené dans le bain de fusion à la main (baguette d'apport) ou mécaniquement (bobine de fil d'apport).

### **4. Soudage au plasma**

Un plasma électrique est maintenu entre une électrode non fusible en tungstène et la pièce à souder. En cas de besoin d'un métal d'apport, celui-ci est apporté dans le bain de fusion manuellement (baguette d'apport) ou mécaniquement (bobine de fil d'apport).

### **5. Soudage par effet Joule sous flux protecteur**

L'effet Joule est produit entre un fil ou un feuillard qui se dévide mécaniquement dans le bain de fusion formé avec les pièces à souder (ou à revêtir). Le bain de fusion étant protégé de l'oxydation par un flux pulvérulent flottant à sa surface. Ce procédé est souvent dénommé « Electrogaz » dont le gaz protecteur est inerte.

### **6. Soudage par résistance**

Des électrodes non fusibles et refroidies pincement adéquatement deux pièces superposées et conduisent un courant électrique ; la température de fusion est atteinte par effet Joule à l'interface des pièces à souder et le soudage s'effectue lors du pincement. L'air constitue une résistance chimique importante.

### **7. Soudage par étincelage**

Des étincelles jaillissent entre les bords des pièces à souder. Une fois la fusion obtenue, les bords à souder sont vivement rapprochés jusqu'à provoquer l'éjection de la phase liquide et des impuretés éventuelles. Puis, on maintient l'ensemble sous pression.

### **8. Soudage par décharge de condensateur**

Les pièces sont maintenues en contact jusqu'à décharge d'un condensateur libérant ainsi l'énergie nécessaire à la production du bain de fusion. Les pièces sont maintenues pressées l'une contre l'autre jusqu'à la solidification du joint (ce procédé est très utilisé

pour le soudage de fil thermocouple sur paroi métallique).

### **9. Soudage par faisceau d'électrons**

Un faisceau d'électrons bombarde les pièces à souder et produit une source de chaleur tridimensionnelle étroite et intense formant un trou ou un tunnel débouchant à travers les matériaux et se déplaçant le long du joint à souder ; la machine et les pièces à assembler sont maintenues dans une enceinte sous vide.

### **10. Soudage par faisceau laser :**

C'est une technique similaire à la précédente. Le faisceau d'électrons est remplacé par un faisceau laser et le soudage n'est pas effectué sous vide.

### **11. Soudage par ultrasons**

C'est un procédé de soudage à l'état solide car la température atteinte est comprise entre 30 à 50% de la température de fusion. Les surfaces à assembler sont maintenues en position par des sonotrodes reliées à un transducteur d'ultrasons. Les vibrations ultrasoniques communiquées aux pièces à souder portent l'interface à un état pâteux qui, associé aux efforts mécaniques appropriés, permet de créer une zone de liaison comparable à celle d'une soudure. Cette technique s'apparente au brasage.

### **12. Soudage par aluminothermie**

Une réaction exothermique est provoquée au sein d'un mélange approprié d'oxydes métalliques et d'agents réducteurs maintenu entre les bords de pièces à assembler. Une fois la réaction amorcée, le mélange exothermique et les bords des pièces entrent en fusion et forment le joint soudé, contenu généralement dans une coquille réfractaire.

### **13. Soudage par friction**

Les bords des pièces à souder sont maintenus l'un contre l'autre et mis en mouvement jusqu'à ce que le frottement provoque la fusion. Les pièces sont alors vivement rapprochées et maintenues sous pression.

## **II.2.3. Critères de choix d'un procédé de soudage [2]**

Chaque procédé a ses avantages et ses inconvénients selon l'application, selon que l'on soude en atelier ou en extérieur, selon l'accessibilité de la pièce et selon les possibilités d'utiliser ou non des robots.

Quand on choisit un procédé de soudage, il est nécessaire de prendre en compte un certain

Nombre de facteur

- L'épaisseur du matériau à souder ;
- La composition de l'acier ;
- Le lieu où la soudure doit être faite ;
- L'accès au joint ;
- La position de soudage (à plat, vertical, au plafond) ;
- Le rendement du procédé.

#### **II.2.4. Soudabilité**

Sous cette appellation sont rassemblés les assemblages de matériaux identiques au moyen de produits d'apport permettant d'obtenir un métal fondu de structure et donc de propriétés très différentes de celles du métal de base mais aussi, les assemblages de matériaux différents.

La soudabilité des matériaux métalliques est leur aptitude 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.

À ce sujet les soudeurs souhaitent en particulier prévoir les risques immédiats ou à venir qui vont rencontrer lors des opérations d'assemblage. Ils souhaitent en particulier savoir quel est le meilleur procédé à utiliser et, si un métal d'apport est nécessaire, quel est le meilleur métallurgiquement parlant.

#### **II.2.5 Diagrammes de constitution**

Partant des pouvoirs alphagènes et gammagènes 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 répondu et le plus connu étant le diagramme de "Schaeffler" bien sûr.

### II.2.5.1. Diagramme de schaeffler

Le diagramme de Schaeffler permet de prédéterminer la structure métallurgique du métal fondu. La composition chimique des éléments en présence. Il permet aussi de sélectionner un métal d'apport approprié à l'assemblage hétérogène par rapport à un taux de dilution déterminé. Le principe est basé sur l'équivalence en Chrome (élément alphagène) et l'équivalence en Nickel (élément gammagène).

Le chrome favorise la formation de la ferrite et le nickel favorise l'austénite.

Le diagramme permet d'évaluer aussi la teneur en ferrite d'un assemblage. L'objectif étant d'obtenir un pourcentage de ferrite compris entre 3 et 10%. Afin d'éviter les fissurations à chaud. La ferrite  $\delta$  de 2 à 4% permet déjà à réduire ce risque.

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

Le taux de ferrite peut être déterminé si l'analyse de la zone fondue est connue par la formule suivante :

$$\% \text{ ferrite} = 3 (\text{Creq} - 0,93 \text{ Nieq} - 6,7) \quad (1)$$

Formule de SEFERIAN

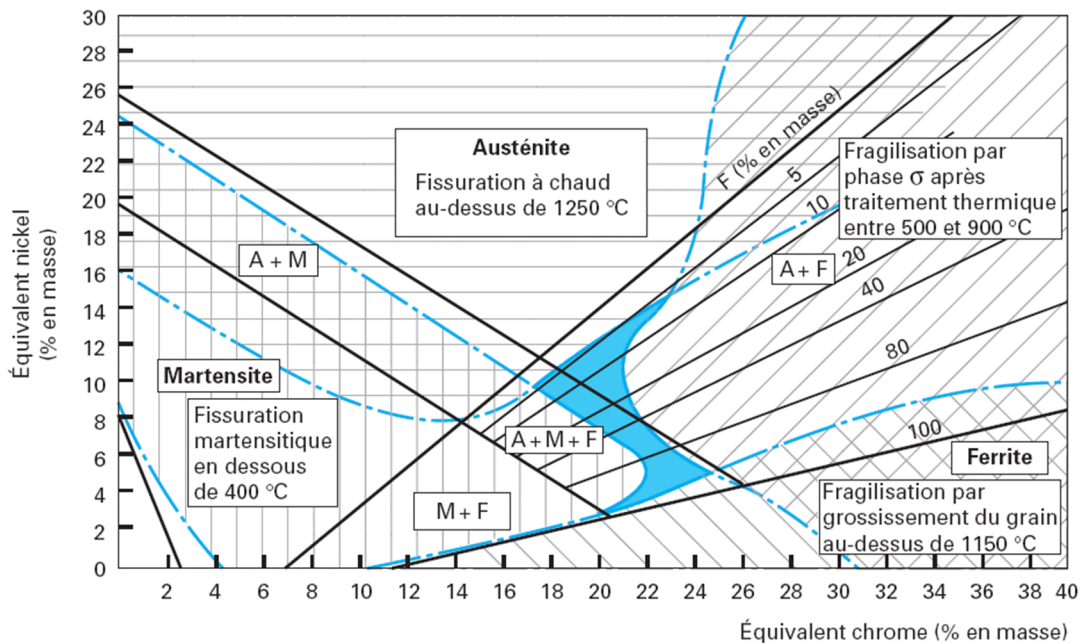


Figure II-2 : Diagramme de schaeffler [3]

### II.2.5.2. Diagramme de Delon

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

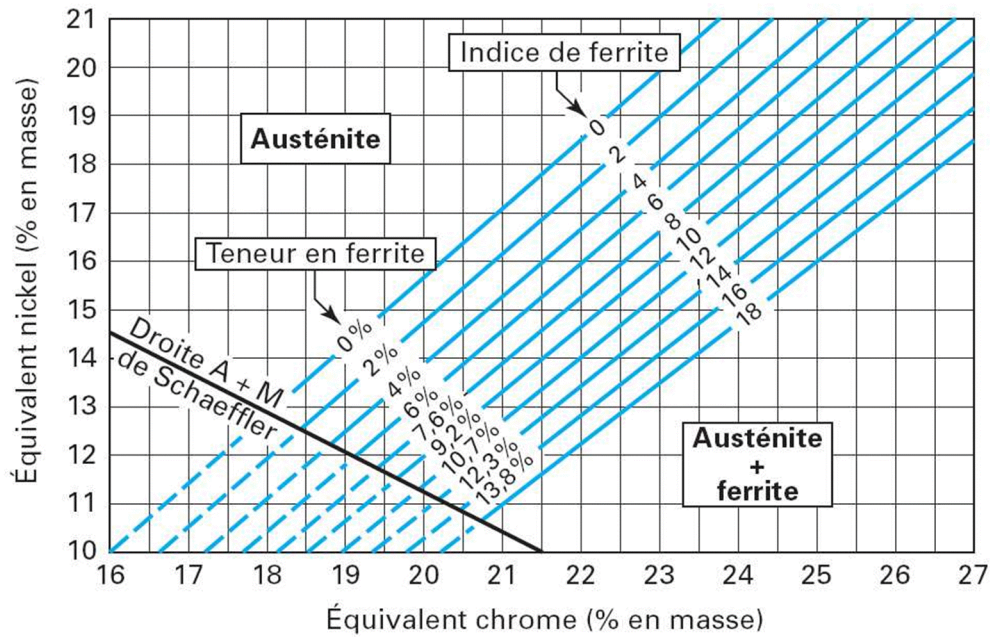
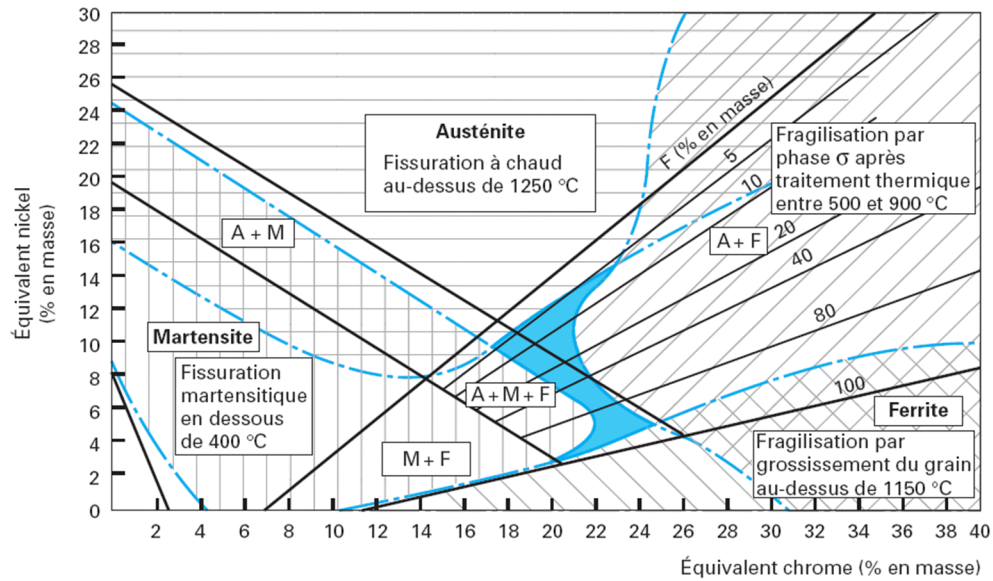


Figure II-3: Diagramme de Delong[3 ]

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

### II.2.5.3. Diagramme d'Espy

Identique au diagramme de schaeffler ; à part que les formules des (Creq, Nieq) ont été légèrement affinées. Ce diagramme est bien adapté aux nuances à a teneurs élevée en azote et en manganèse.



**Figure II-4:** Diagramme d'Espy [3]

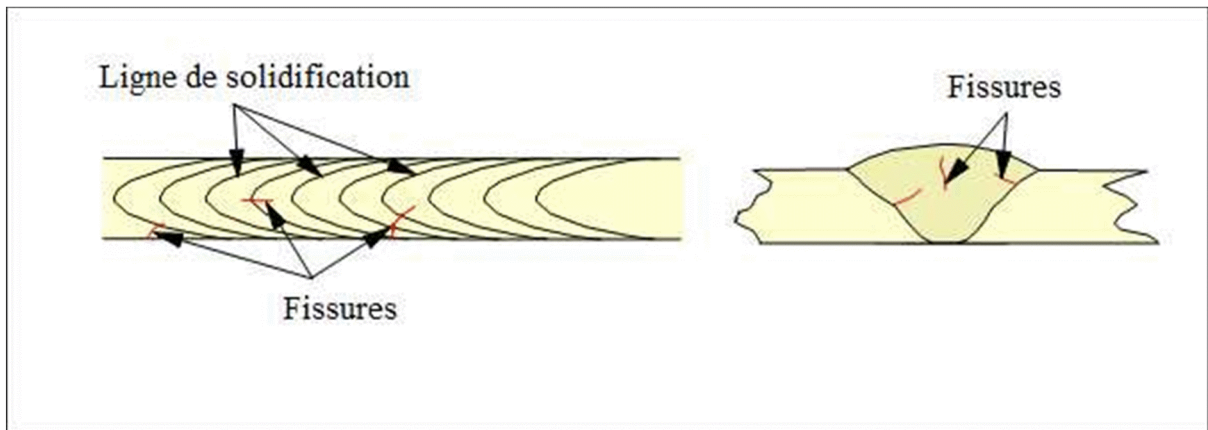
### II.3. Principaux défauts de soudage

Les défauts d'une soudure ou de la zone de métal de base qui lui adhère réduisent d'une certaine façon la résistance mécanique de l'assemblage. Parmi les principaux défauts des soudures, on distingue :

#### 1. Fissuration à chaud

Sous ce vocable nous regroupons les fissures de solidification, les fissures de liquation et les fissures résultant d'un manque de ductilité à haute température. A titre d'exemple, les fissures de solidification, apparaissent en fin de solidification. Elles peuvent être internes ou déboucher en surface

Mais elles sont toujours localisées dans les espaces interdendritiques et suivent donc les directions de solidification (**Figure.II.5**). Perpendiculaires aux isothermes. Comme elles se forment à haute température, elles sont oxydées au contact de l'air en débouchant en surface. Enfin, elles sont toujours larges du fait de la contraction du métal environnant durant le refroidissement. Ce germe de fissuration se manifeste généralement en soudage des aciers austénitiques, en formant des composés chimiques de faible température de fusion aux joints des gains.



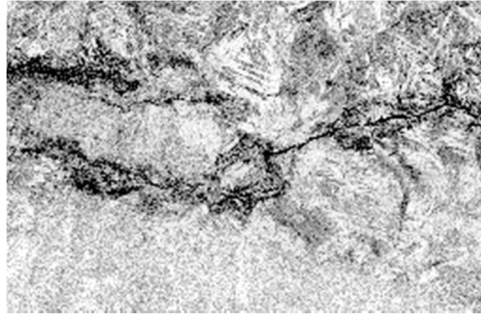
**Figure II.5 :** *Localisations des fissures de solidification* [6]

## 2. Fissuration à froid

Ces fissures apparaissent à basse température ( $< 300\text{ °C}$ ). De ce fait, elles sont fines et présentent une surface non oxydée. Elles n'ont pas d'orientation privilégiée par rapport à la microstructure. Elles se développent le plus souvent dans la zone affectée par la chaleur (ZAT) mais peuvent parfois se rencontrer dans le métal fondu lorsque celui-ci possède une très haute limite d'élasticité. Elles sont tributaires du champ de contraintes ce qui explique qu'elles prennent naissance dans les zones de concentration que constituent les défauts de surface (mauvais mouillage, caniveaux) ou les discontinuités liées à la conception de l'assemblage (pénétration partielle par exemple).

Facteurs induisant à ce type de fissure sont :

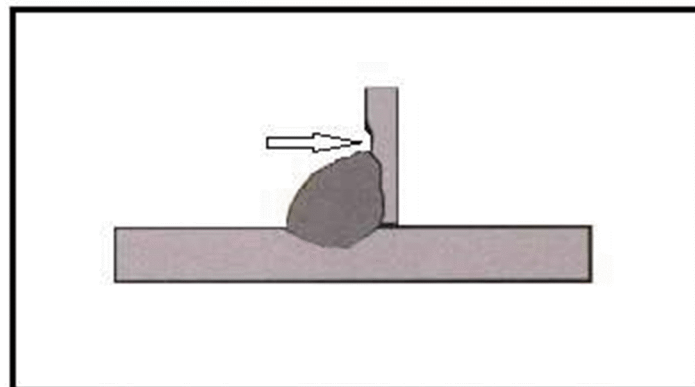
- Régime thermique de surface faible ; (Vitesse de refroidissement rapide) ;
- Teneur en carbone élevé ;
- $V_r$  rapide (martensite) ;
- Diffusion d'hydrogène ;
- Contraintes résiduelles.



**Figure II.6 :** *Exemple de fissuration à froid* [6]

### **3. Caniveaux**

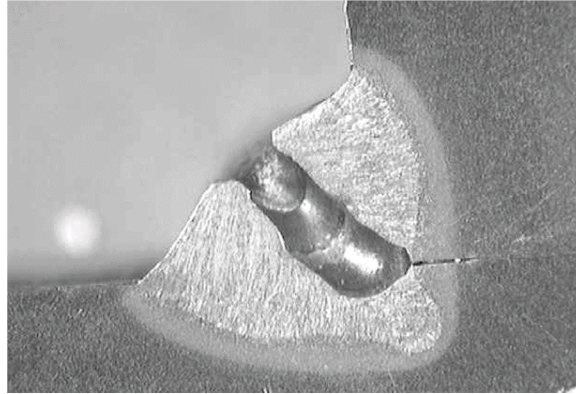
C'est un manque de métal en forme de sillon en bordure du cordon. Ils sont dus à un courant de soudage trop intense et à une technique opératoire défectueuse.



**Figure II.7 :** Caniveaux [6]

### **4. Porosité**

L'apparition des piqures, des soufflures ou des rugosités à la surface du cordon.



**Figure II.8 :** Soudure en angle de tôles pré-peintes [6]  
*(Porosité résultant de la décomposition de la peinture sous le cordon).*

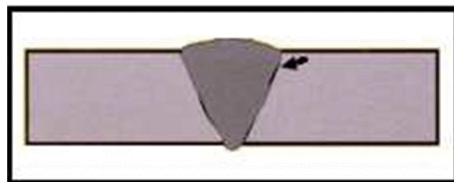
## 5. Manque de fusion

### 5.1. Collage

C'est un manque de liaison entre le métal de base et le métal déposé. Il constitue une entaille

aiguë susceptible de jouer le rôle d'amorce pour une fissure de fatigue. Avec les procédés MIG

- MAG, les risques de collage sont importants.



**Figure II.9 :** Collage

### 5.2. Manque de pénétration

Manque de fusion des deux bords laissant subsister un intervalle entre les bords. Ce défaut est très dangereux car il réduit la section résistante du cordon et il se situe en racine du cordon où les concentrations de contraintes sont importantes.

De plus, ce défaut est à l'origine d'entailles qui peuvent servir d'amorces de rupture par fatigue.

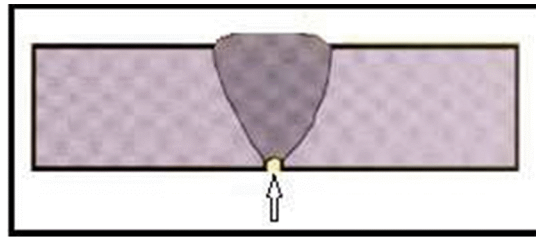


Figure II.10: Manque de pénétration

#### 6. Inclusion de laitier :

En soudage à l'arc à l'électrode enrobée, le laitier provient de la fusion des éléments non métalliques de l'enrobage. Celui-ci étant moins dense que le métal fondu et doit donc flotter à la surface.

Lorsqu'il reste inclus dans le cordon, cela peut provenir.

Des chanfreins trop étroits ;

- Du mauvais dégrassage entre passes ;
- Du Choix de l'électrode ;
- De la mauvaise intensité appliquée.

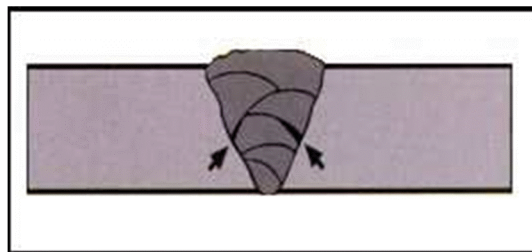


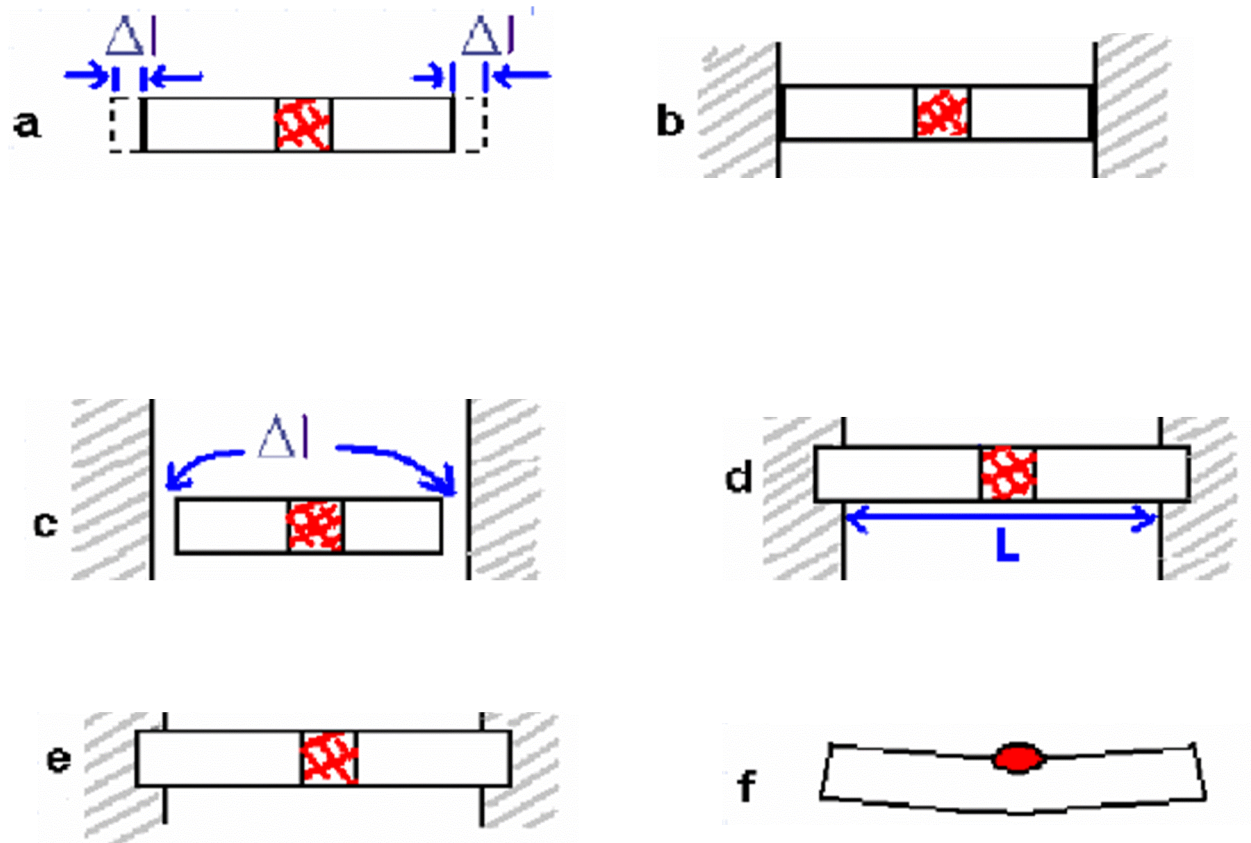
Figure II.11 : Inclusion de laitier

## II.4. Origine et influence des contraintes en soudage

### Origine :

Le soudage entraîne généralement la création de contraintes résiduelles de tension qui tendent à réduire notablement la résistance à la fatigue des pièces mécanosoudées. Différents traitements de parachèvement de la soudure permettent heureusement d'améliorer leur tenue en fatigue en modifiant l'état de contraintes résiduelles de la zone critique du pied du cordon (ZAT).

Pour mieux comprendre les contraintes et déformations qui se développent lors du soudage, nous utiliserons l'exemple d'un barreau de métal chauffé en son centre (Fig II.12):



**Figure II.12** : Contraintes résiduelles transversales développées lors du soudage [2]

**a)** Barreau libre chauffé localement uniformément puis refroidi librement. Ce barreau s'allonge globalement d'une longueur dépendant de la largeur chauffée et de la température atteinte, puis revient par refroidissement à sa longueur initiale. Pas de déformation ni de contrainte résiduelle.

**b)** Barreau traité comme en **a)** mais retenu à ses deux extrémités entre des parois fixes. Durant le chauffage, le barreau ne peut pas s'allonger, il se met en compression ce qui déforme plastiquement la zone chauffée.

c) Au refroidissement, la zone chauffée se contracte comme en a) mais la longueur finale est diminuée de  $2 \Delta l$  qui a été absorbée par la déformation de la zone chauffée. Le barreau est raccourci mais n'est le siège d'aucune contrainte.

d) Si le barreau est encastré dans les parois, le raccourcissement est empêché. Il en résulte une mise en contrainte du barreau qui atteint son maximum à la fin du refroidissement lorsque la limite élastique a repris sa valeur initiale. Si on libère le barreau après refroidissement, la contrainte du barreau qui était au plus égale à la limite d'élasticité, se trouve relaxée par le retrait élastique et le barreau se raccourcit d'autant.

e) Comme d), mais on poursuit le chauffage jusqu'à la fusion. Le retrait dû à la solidification vient s'ajouter à la contraction lors du refroidissement. Toutefois ce retrait ne se traduit pas par une contrainte parce que le métal qui vient de se solidifier se déforme plastiquement. La valeur maximale de la contrainte est égale à la plus basse des deux limites d'élasticité, celle du métal de base ou celle du métal fondu.

### **Contrainte $\leq$ limite d'élasticité la plus basse**

f) Lorsque la zone chauffée ou fondue n'affecte pas la totalité de la section droite, on observe un empêchement des déformations à l'échauffement comme au refroidissement d'où déformations et contraintes résiduelles.

En résumé, on peut énumérer comme suit les caractères essentiels de la formation des contraintes résiduelles en soudage :

- Les contraintes résiduelles résultent d'un empêchement du retrait thermique au refroidissement, faisant suite à une plastification associée à un échauffement localisé;
- Les contraintes résiduelles apparaissent dès le début du refroidissement et atteignent leur maximum à la fin du refroidissement (**figure II.13**);
- La valeur des contraintes résiduelles est d'autant plus élevée que les déformations sont sévèrement empêchées.
- Les contraintes résiduelles sont un peu plus élevées dans la zone fondue (**figure II.14**)

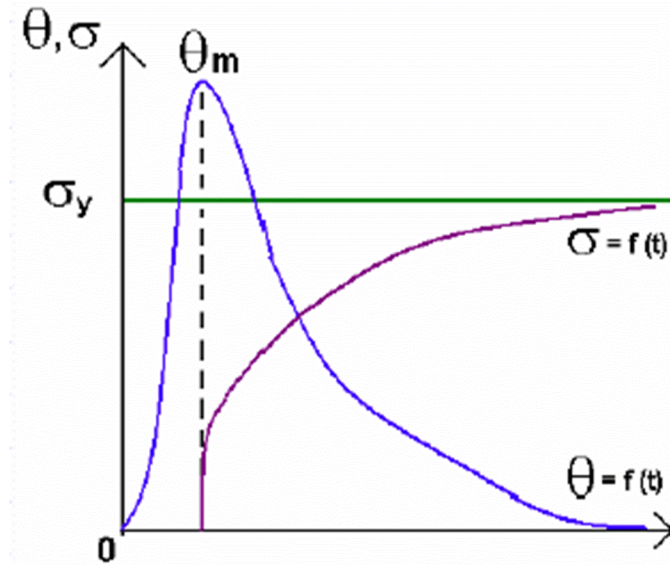


Figure II.13 : Courbes de contraintes et de température suivant le temps de soudage [8]

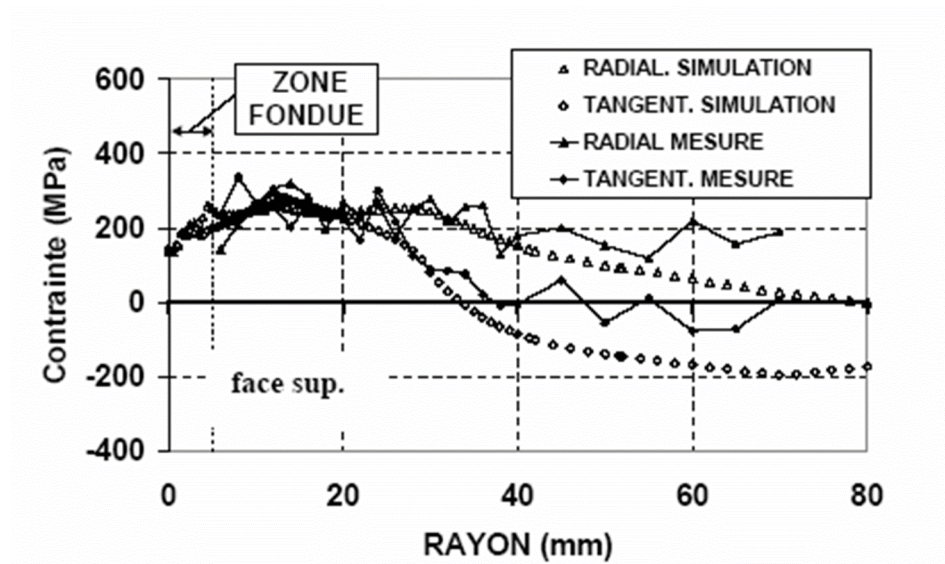


Figure II.14 : Contraintes résiduelles radiales et circonférentielles calculées et mesurées [8] (diffraction X) en fonction du rayon.

## II.5. Effets possibles des déformations et contraintes résiduelles [2]

Les déformations et contraintes résiduelles engendrées par le soudage sont susceptibles de prendre part aux comportements et phénomènes suivants :

- Durant le soudage ou peu après :
  - Fissuration à chaud ;
  - Fissuration à froid ;
  - vieillissement ;
  - Arrachement lamellaire.
  
- En fabrication, après soudage :
  - Fissuration au réchauffage ;
  - Instabilité dimensionnelle.
  
- En service :
  - Tenue mécanique (flambage) ;
  - Participation au processus de rupture (fragile ou par fatigue) ;
  - Corrosion sous contraintes ;
  - Instabilité dimensionnelle.

# CHAPITRE III

LES CONTRAINTES  
RESIDUELLES

### III.1. INTRODUCTION

L'état mécanique du matériau est entièrement défini par les sollicitations extérieures auxquelles est soumis la pièce. Si le matériau chargé est continu, les déformations doivent vérifier les lois de comptabilité tout au long de la charge. Les contraintes alors induites doivent compenser les moments et les forces extérieurs en respectant les équations d'équilibre [10].

Les matériaux ne sont cependant ni continus ni homogènes. Des atomes et défauts cristallins aux porosités et inclusions, en passant par les grains et les précipités, représentent le champ de déformation et de contraintes [10].

Le champ de contraintes qui existe au sein d'un matériau lorsque celui-ci n'est soumis à aucune force ni moment extérieur est appelé champ de contraintes résiduelles. Il s'agit d'un champ de contraintes statistiques et multiaxiales dont la répartition est régie par l'équilibre mécanique des forces et des moments de la pièce au repos. Donc, les contraintes résiduelles sont des tensions qui existent dans une structure en l'absence de toute force ou sollicitation mécanique extérieure[8].

Les processus de fabrication sont les causes plus fréquentes de contraintes résiduelles. Virtuellement, toutes les méthodes telles que le moulage, le **soudage**, l'usinage, le forgeage, l'extrusion, le traitement thermique, chimique ou thermochimique sont génératrices de contraintes résiduelles. Aussi, les contraintes résiduelles ou internes peuvent être introduites plus tard dans la vie de la structure par le montage ou l'assemblage, par des surcharges accidentelles, par des mouvements de sols... [8]

Il est important de connaître l'ordre de grandeur de ces contraintes et leur répartition afin de mieux prévoir leur influence, de choisir les traitements destinés à les atténuer ou même les utiliser judicieusement car les contraintes résiduelles constituent le facteur principal d'endommagement et de mauvaise tenue en fatigue des pièces d'une structure [9]. En soudage, leur combinaison avec les teneurs élevés d'hydrogène  $H_2$  et du carbone pourrait conduire à la fissuration à froid notamment au niveau de la ZAT.

### **III.2 Phénomènes Métallurgiques et Leurs Conséquences**

Le bref rappel des principes des différents procédés de soudage vue dans le chapitre précédent montre qu'un certain nombre de phénomènes métallurgiques pourront être mis en jeu ; leur liste, tous procédés confondus, s'établit comme suit [22]:

Phénomènes dus aux variations de température :

- Fusion et élaboration du bain liquide ;
- Solidification ;
- Transformations allotropiques ;
- Dilatation.

Phénomènes dus à l'environnement :

- Action de l'atmosphère ;
- Actions des polluants.

Phénomènes dus aux inclusions.

En effet, ces phénomènes métallurgiques se produisent et manifestent leurs conséquences dans un champ de déformation de contraintes dont il faut tenir compte. Dans notre cas, on va s'intéresser à la dilatation :

### **III.3 Dilatation [22]**

Toute modification de la température d'un métal s'accompagne de variations de son volume massique :

- Systématiques et continues par le jeu de la dilatation ;
- Éventuelles et discontinues par le jeu des transformations allotropiques (volume spécifique des phases).

Au cours de la réalisation d'un joint soudé on peut considérer, schématiquement, qu'on crée :

- Globalement un volume chauffé constitué par le métal fondu et la zone affectée par la chaleur (ZAT) ;

- Localement, dans toute la ZAT, des gradients thermiques importants.

En ce qui concerne les dilatations, ces effets thermiques ont des conséquences diverses :

-Le volume globalement chauffé reprend ses dimensions d'équilibre lors de la solidification du métal fondu, laquelle crée la continuité solide. Le refroidissement de ce volume engendre une contraction, réplique de la dilatation, qui doit être accompagnée par le métal de base non affecté par la chaleur. Les déformations seront plastiques ou élastiques selon le comportement mécanique du métal.

-Les gradients thermiques locaux engendrent des modifications dimensionnelles non uniformes ; de point en point, le métal doit donc s'adapter, c'est-à-dire se déformer pour résorber les écarts. Ces déformations dans le volume même du joint peuvent être élastiques ou plastiques suivant le comportement mécanique du métal, le retrait étant empêché laissant place aux contraintes résiduelles.

Le comportement mécanique du joint au cours de son refroidissement prend beaucoup d'importance. Pendant la phase initiale du refroidissement, les déformations induites restent plastiques et ne deviennent élastiques (avec apparition de contraintes) qu'au cours de la phase terminale du refroidissement.

Mais alors ces déformations élastiques  $\Delta l_e$  vont devoir, pour rétablir l'équilibre mécanique, compenser les déformations d'origine thermique  $\Delta l_t$  de telle sorte que l'on ait soit :

$$\alpha \Delta T - \sigma / E = 0 \quad \text{ou} \quad \sigma = E \Delta T \alpha$$

Avec

$\alpha$  : coefficient de dilatation linéique vrai à T ;

E : Module d'élasticité, (MPa).

$\sigma$  : contrainte résultante. (MPa).

### III.3.1 Contraction Globale Du Joint [22]

Schématiquement, on peut distinguer dans un assemblage (**Figure III.1**) un volume chauffé qui englobe le métal fondu et la ZAT. À la fin de la solidification, ce volume a pris les dimensions que lui impose le métal de base environnant (tous les écarts dimensionnels ont été résorbés par une déformation plastique rendue très facile par l'élévation de température). Le refroidissement du volume chauffé engendre sa contraction (éventuellement perturbée par des anomalies de dilatation dues aux transformations allotropiques) qui, en l'absence de toute liaison mécanique avec le métal de base, l'amènerait à un volume réduit. La continuité métallique qui existe entre les éléments de l'assemblage impose une accommodation des deux volumes l'un par rapport à l'autre.

#### 1. Selon l'axe XX' (Retrait longitudinal)

Le volume chauffé impose un retrait longitudinal au métal de base qui tend à conserver sa longueur initiale ; le métal de base, selon l'axe XX', est donc soumis à une compression alors que le volume chauffé subit un allongement qui, à haute température, peut être plastique si le métal est assez ductile (et dans le cas contraire il y a risque de fissuration transversale du métal fondu) et qui à la fin du refroidissement engendre des contraintes résiduelles de traction. Cette mise sous contrainte est progressive au cours du déplacement de la source de chaleur. La (**Figure III.2a, b**) schématise ce qu'est la répartition de ces contraintes résiduelles dans le sens transversal et longitudinal d'un assemblage. Les effets pratiques du retrait longitudinal dépendent :

Exemple,

- Du rapport entre la section du joint et celle des pièces assemblées ; si ces dernières sont minces, l'effort de compression engendre leur ondulation ou leur déversement, si au contraire ces dernières sont très massives, la contrainte de compression sera faible mais par contre les contraintes de traction seront très élevées dans la zone chauffée (ZAT) ;
- De la position du joint par rapport aux pièces assemblées ; plus le joint sera éloigné de l'axe de symétrie, plus il sera générateur de distorsions.

## 2. Selon l'axe YY' (Retrait transversal)

Le volume chauffé impose un retrait transversal au métal de base qui, selon son volume et sa géométrie peut :

- Tendre (s'il est libre) à se déplacer pour accompagner le métal chauffé ; le métal de base, selon l'axe YY', est donc soumis à un déplacement progressif au fur et à mesure que la source de chaleur progresse, ce qui peut perturber ou empêcher la poursuite de l'opération de soudage ;
- Conserver sa position initiale (on dit alors qu'il est bridé) l'assemblage est donc tendu selon l'axe YY', ce qui a pour conséquences, au cours du refroidissement, de soumettre tout d'abord le métal fondu à une déformation plastique qui peut dépasser sa plasticité et provoquer une fissuration longitudinale à chaud, puis d'engendrer ensuite une mise sous contraintes de traction de la partie de la construction qui est immobilisée (contraintes de bridage). Ces contraintes sont les plus nocives car elles sont perpendiculaires au plan de joint et peuvent gravement affecter la résistance mécanique de l'ensemble.

C'est en jouant sur la préparation de l'assemblage, les conditions et les séquences de soudage que l'opérateur pourra les minimiser.

Le retrait transversal varie le long du cordon. Il est habituellement plus important aux extrémités. En général, ses effets participent aux deux processus décrits, induisant à la fois des déplacements et des contraintes. La (**FigureIII.2b**) donne un exemple de la répartition des contraintes longitudinales dans une soudure rectiligne sur pièces non bridées [22].

### 3. Selon l'axe ZZ' (Suivant l'épaisseur)

Le retrait est généralement considéré comme ayant une ampleur et des conséquences négligeables.

Le retrait transversal peut avoir une autre conséquence ; le pliage, c'est-à-dire le pivotement des pièces assemblées autour de l'axe de la soudure. Ce pliage est la manifestation d'une irrégularité du retrait sur la hauteur de l'assemblage, celle-ci pouvant être due à la distance entre le cordon et la fibre neutre, à la forme en coin du cordon ou à l'accumulation de passes successives et dissymétriques [22].

Selon qu'il est gêné ou pas, le pliage crée des contraintes généralement de flexion ou des déformations.

Face aux problèmes de déformations, l'opérateur prend des mesures préventives quant à la préparation de l'assemblage, au positionnement des pièces et à leur maintien et surtout au choix judicieux de l'énergie de soudage.

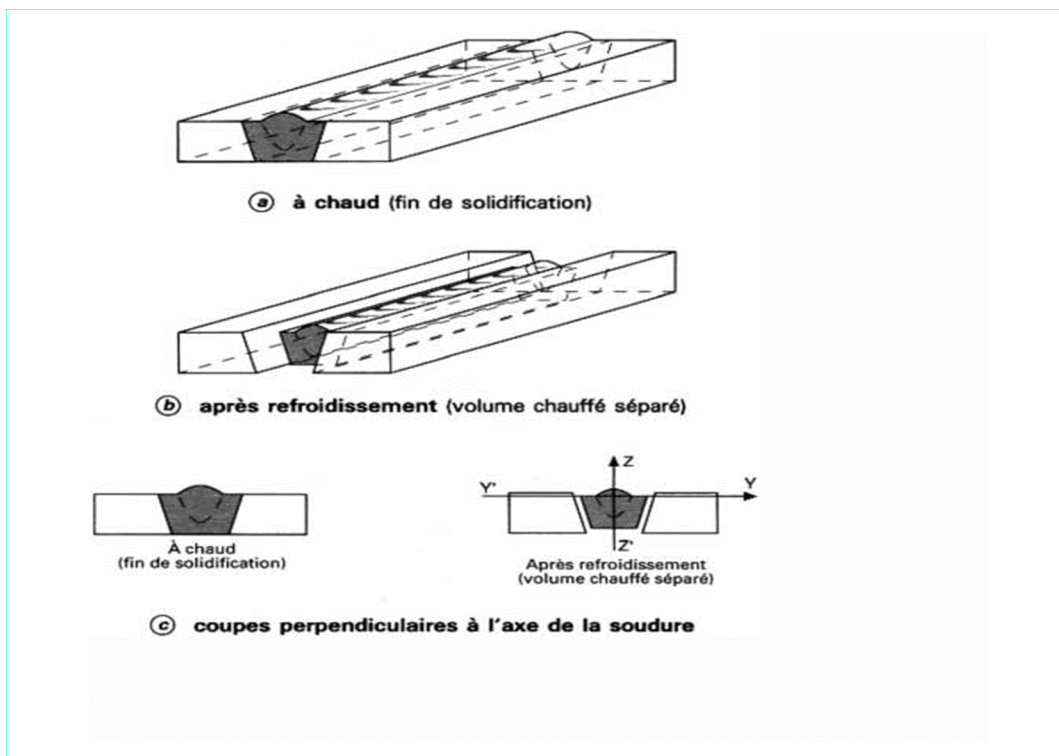


Figure III.1 Condition d'apparition des différents retraits [22]

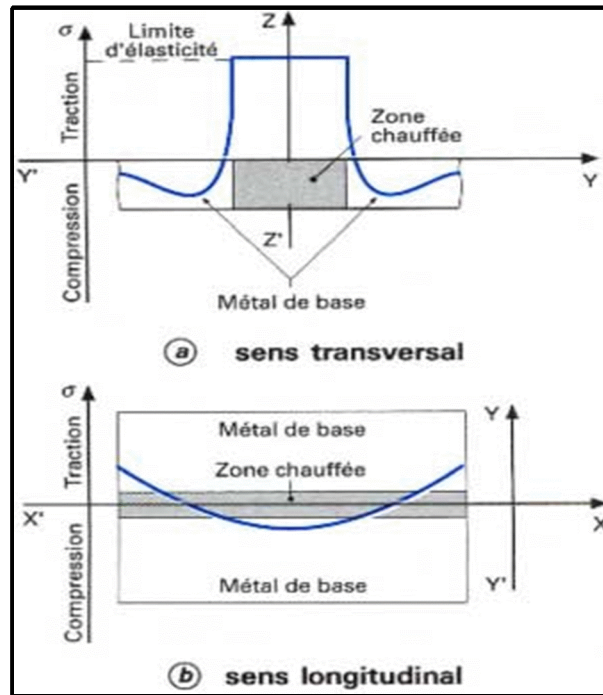


Figure III.2 Répartition des contraintes générées par le retrait [22].

### III.3.2. Gradient de déformation dans la zone chauffée (ZAT)

Dans l'ensemble de la zone chauffée, les gradients thermiques engendrent des dilatations non uniformes; de point en point, le métal doit donc s'adapter, c'est-à-dire se déformer pour résorber les écarts. Ces déformations dans le volume même du joint sont essentiellement plastiques au cours du chauffage (de par les températures atteintes) mais, si elles le sont encore au début du refroidissement, elles deviennent élastiques à la fin de celui-ci. Les anomalies de dilatation interfèrent avec ce processus pour en modifier le déroulement et le résultat final. Ainsi donc apparaissent des contraintes résiduelles qui s'interviennent dans la fissuration à froid et dans le comportement mécanique du joint [22].

### **III.4 Retraits et contraintes résiduelles dans les assemblages soudés**

Dans les assemblages soudés il y a pratiquement toujours des retraits empêchés et donne des contraintes résiduelles. En effet, les parties chaudes des pièces tendent à se dilater, mais ne pourront pas vaincre la résistance des parties froides ;elles se verront donc comprimés, refoulées plastiquement ;(la température étant supérieure à 650°C l'acier rentre dans le domaine plastique). Au refroidissement, le retrait s'opère donc sur les dimensions d'origine ;le métal en refroidissement, rentre dans le domaine élastique, mais ne peut subir un retrait libre puisque le métal froid s'y oppose en « Le bridant », d'où la formation de contrainte résiduelles dues au retrait empêché.

Parmi ces différents retrait, le retrait transversal (rt) est le plus important. Au point de vue contraintes résiduelles, on appelle en général « bridage »,le retrait empêché qui en est la cause.

Les contraintes résiduelles sont dites « directes »ou « indirectes », suivant que le bridage est dû aux pièces elles-mêmes ou à des causes extérieures. On distingue également, suivant la direction des retraits empêchés correspondants, les contraintes longitudinales, transversales et suivant l'épaisseur, ainsi que celles dues à un éventuel retrait angulaire empêché [22].

#### **III.4 .1 Moyen utilisés pour réduire les contraintes et les déformations résiduelles :**

- Préchauffage et recuit de relaxation ;
- Martelage des soudures à chaud ou à froid ; a pour effet de réduire considérablement les contraintes résiduelles longitudinales et transversales. L'écrouissage du martelage provoque un allongement compensant les retraits ;
- Méthode dite « des chaudes de retrait » :c'est une opération de chauffage rapide et localisé de certaines zones de pièces, afin d'obtenir, au refroidissement une contraction locale du métal aux endroits qui ont été chauffés.

- Traitements d'égalisation des contraintes à basse température : dans ce procédé, le métal de base est chauffé de chaque côté de la soudure donc le métal se déforme plastiquement. Au refroidissement, le métal de base tend à revenir à sa longueur initiale, tandis que la soudure maintenue à la température ambiante, reste allongée plastiquement. Les contraintes résiduelles sont ainsi diminuées ;
- Déformation préalable et de sens contraire à la déformation prévue.
- Répartition de l'échauffement du au soudage par des méthodes appropriées ;(par « rebroussement », par « portions »opposées,...)

### **III.5. Ordres de contraintes résiduelles [8, 9,13]**

#### **a) Contraintes internes du troisième ordre**

A l'échelle de la maille, les contraintes internes sont engendrées par les défauts du réseau, tel que les lacunes, les impuretés, les dislocations ou l'arrangement des dislocations.

Par convention, on les appelle **contraintes internes du troisième ordre**. A ce stade, on peut distinguer, selon la nature et la configuration de ces défauts, deux niveaux de contraintes :

- A «courte distance», au voisinage immédiat des défauts ponctuels (quelques distances interatomiques).
- A «grande distance», autour des défauts linéaires et des précipités cohérents (quelques dizaines ou centaines de distance interatomiques).

Ces contraintes s'équilibrent d'elles-mêmes sur le volume constitué par un cristal. Leur mesure est impossible et l'on cherche le plus souvent, à partir des modèles théoriques appropriés, à avoir un ordre de grandeur qui peut avoisiner, dans certains cas, la limite élastique théorique.

A «grande distance», elles peuvent être estimées par leur action sur la mobilité des dislocations, par les essais de fluage. Elles sont au voisinage de la limite élastique du matériau.

## b) Contraintes internes du deuxième ordre

Ces contraintes sont liées aux problèmes de compatibilité de déformation de grains sous l'action d'une sollicitation.

Lorsque deux grains voisins soumis à une sollicitation, ils se déforment différemment du fait de leurs orientations cristallographiques différentes par rapport à la direction de traction.

Après suppression de l'effort, ils reviennent à une moyenne, il y a alors une accommodation élastique résiduelle au niveau du joint de grain, qui rend compte des incompatibilités de déformation des deux grains qui n'ont pas été résorbée par les déformations plastiques. C'est cette accommodation de type élastique qui est à l'origine des contraintes internes du deuxième ordre. Celles-ci s'équilibrent à l'échelle de plusieurs grains.

Il est possible d'accéder expérimentalement à ces contraintes du fait qu'elles influent sur les profils des raies obtenues par diffraction X. En effet, les déformations élastiques qu'elles introduisent au niveau des plans cristallographiques, équilibrées statiquement sur un ensemble de grains participant à la diffraction, vont se traduire par l'élargissement des raies. Le niveau de ces contraintes approche la limite d'écoulement macroscopique du matériau pour le taux de déformation correspondant.

### III.5.3. Contraintes internes du premier ordre

Ces contraintes intéressent un volume relativement important de la matière et c'est pour cette raison qu'elles sont appelées **contraintes macroscopiques**.

Elles proviennent d'une répartition non statistique des contraintes internes du deuxième ordre. Cette hétérogénéité est engendrée par l'existence, dans le volume de matière considéré d'un gradient de déformation dont l'origine peut être :

- **Chimique**, conséquence indirecte d'une hétérogénéité de la composition chimique du matériau (cas d'une décarburation superficielle, d'une cémentation,.....) ;
- **Physico-chimique**, par la présence des différentes phases, de volumes spécifiques différents ou de phases homogènes n'apparaissant pas simultanément en tout point du matériau ;
- **Thermique**, un simple gradient thermique peut produire des écarts de dilatation incompatibles avec les déformations élastiques du matériau aux températures considérées ;

- **Mécanique**, comme conséquence d'un écouissage hétérogène  
(laminage, grenailage, étirage,...).

En fait, toute hétérogénéité macroscopique, qu'elle qu'en soit l'origine, est un facteur générateur de contraintes résiduelles.

La **Figure III.3** suivante illustre le champ de contraintes internes dans un échantillon selon une direction  $x$ , [9] tel que :

$$\sigma_x = \sigma_x^3 + \sigma_x^2 + \sigma_x^1 \quad \text{III.1}$$

Ou  $\sigma_x$  : Contrainte totale suivant X.

$\sigma_x^3$  : Contrainte du troisième ordre.

$\sigma_x^2$  : Contrainte du deuxième ordre.

$\sigma_x^1$  : Contrainte du premier ordre.

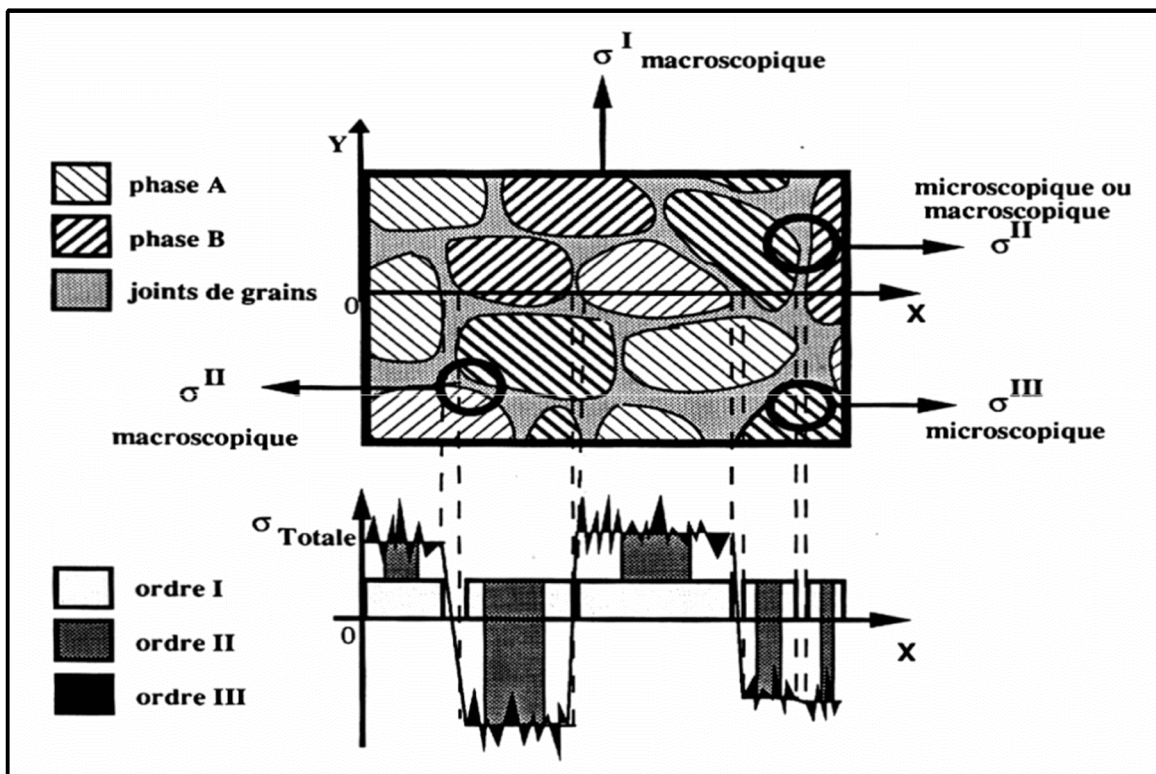


Figure III.3 : Illustration des différents ordres de contraintes [8]

Le **tableau III.1** ci-dessous présente l'ordre et l'origine des contraintes résiduelles à différentes échelles d'un matériau :

Type d'analyse	Volume	Discontinuités
Microscopique. <b>(ordre I)</b>	Quelque mm.	Surface, fissures, cavités
Mésoscopique et microscopique. <b>(ordre II)</b>	Un grain ou des sous-grains.	Joints de grains ou sous joints, joints de phases dispersoïdes, phase hors solution.
Nanoscopique. <b>(ordre III)</b>	Echelle atomique.	Dislocation, interstitiels, atomes substitutionnels, lacunes, précipités.

**Tableau III.1** : Définition des différentes échelles d'analyse [9]

### **III.6 Méthodes expérimentales de détermination des contraintes internes ou résiduelles [13]**

Chaque type de contraintes possède ses propres méthodes d'investigations. La détermination des contraintes internes du premier ordre ou contraintes résiduelles peut se faire à l'aide de plusieurs méthodes que l'on classe en trois catégories :

- Les méthodes destructives ;
- Les méthodes semi-destructives ;
- Les méthodes non-destructives.

#### **III.6.1 Méthodes non destructives**

Le prototype de ces méthodes est une technique fondée sur la diffraction des rayons X qui permet de déterminer les déformations du réseau sous un champ de contraintes bi axiales à la surface d'un solide. Elle est basée sur la mesure des distances inter-réticulaires d'une famille de plans cristallographique ( $d_{hkl}$ ) convenablement choisie qui varie en fonction du champ de contraintes imposées.

**a) Analyse par diffraction des rayons X [9]**

Soit  $d_{hkl}$  la distance inter-réticulaire d'une famille de plans  $\{h k l\}$  et  $d_0$  sa valeur au repos. Comme il a été précédemment dit, sous l'effet d'une contrainte, la distance  $d_{hkl}$  va différer de  $d_0$  d'une distance  $\Delta d = d_{hkl} - d_0$ . La mesure de la distance inter-réticulaire se fait en utilisant la loi de Bragg :

$$2 \times d_{hkl} \times \sin\theta = n \times \lambda \quad \text{III.2}$$

Avec :

$\theta$  : Angle de diffractions (de Bragg).

$\lambda$  : Longueur d'onde des rayons X incidents (Hz/s).

$n$  : Nombre entier naturel.

Si l'on différencie en  $d_0$  cette relation, on obtient(en isolant  $d_{hkl}$  à gauche) :

$$\Delta d_{hkl} = - n \times \lambda \times \frac{\cos\theta_0}{(\sin\theta_0)^2} \times \Delta\theta \quad \text{III.3}$$

Après division par  $d_0$  on obtient :

$$\frac{\Delta d_{hkl}}{d_0} = -(\cot\theta_0) \times \Delta\theta \quad \text{III.4}$$

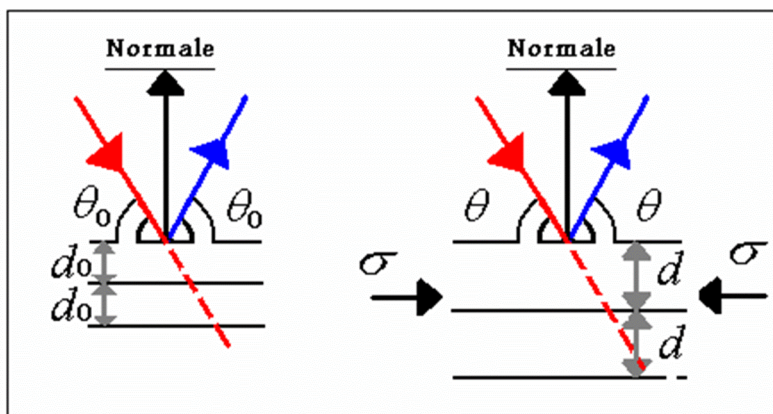
Et la variation totale de l'angle de diffraction  $\varepsilon$  s'écrit :

$$\varepsilon = 2 \times \frac{\Delta d_{hkl}}{d_0} = (\cot\theta_0) \times \Delta 2\theta \quad \text{III.5}$$

La **figure III.4** ci-dessous montre l'effet de la contrainte sur l'angle de diffraction.

$$\varepsilon = \frac{(d - d_0)}{d_0} \quad \text{III.6}$$

$$\Delta 2\theta = 2\theta - 2\theta_0 \quad \text{III.7} \quad \theta \neq \theta_0$$

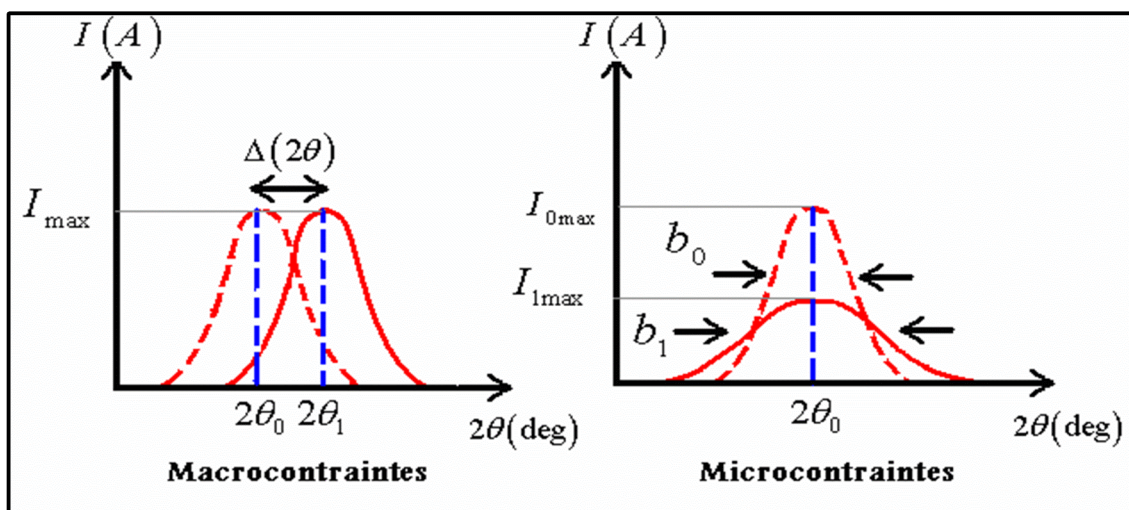


**Figure III.4** : Schématisation de l'effet des contraintes sur l'angle de diffraction [9].

La variation de  $d_{hkl}$  a différents effets sur la déformation des raies de diffractions selon leurs échelles :

- **A l'échelle macroscopique** : La déformation peut être considérée uniforme et il y a effectivement, dans ce cas, une translation uniforme du pic de diffraction ;
- **A l'échelle microscopique** : La déformation n'est plus uniforme et il y a élargissement du pic de diffraction qui peut être caractérisé par la mesure de la largeur de corde à mi-hauteur.

On peut alors déduire les contraintes macroscopiques et microscopiques des déformations correspondantes obtenues des raies de diffraction.



(a) : Translation du pic de diffraction.  
(Contraintes du premier ordre)

(b) : Elargissement du pic de diffraction.  
(Contraintes du second et troisième ordre)

**Figure III.5** : L'effet des contraintes sur les pics de diffraction [9].

## b. Autres méthodes

Elles sont pratiquement toutes basées sur la diffractométrie : diffraction des neutrons, méthode par ultrasons, méthode magnétique par effet BARKHAUSEN et quelques autres méthodes avancées telles que la thermographie, l'interférométrie des ondes thermiques et acoustiques.

## III.6.2 Méthodes semi destructives

### a. Méthodes du trou [15]

Cette méthode, d'usage courant, consiste à mesurer la relaxation de contraintes survenant à la surface après y avoir percé le trou.

Une rosette, constituée de trois jauges d'extensomètre est d'abord fixée est centrée autour du point où l'on veut effectuer la mesure. Celle-ci est reliée à un pont d'extensomètre par une boîte de commutation. On équilibre le zéro des jauges puis on perce un trou au point de mesure et on mesure les déformations obtenues. Dans la plupart des cas, le trou percé est borgne et sa profondeur est :

- Approximativement égale à son diamètre.
- Fiable par rapport à l'épaisseur de la structure.

Malheureusement, la méthode du trou borgne est complexe est nécessite l'introduction de facteurs empiriques dans les équations élastiques. Une solution rigoureuse peut cependant être obtenue dans le cadre du trou débouchant dans une plaque mince dans laquelle les contraintes sont uniformes selon l'épaisseur. Ces résultats pourront ensuite être généralisés au cas du trou borgne [15].

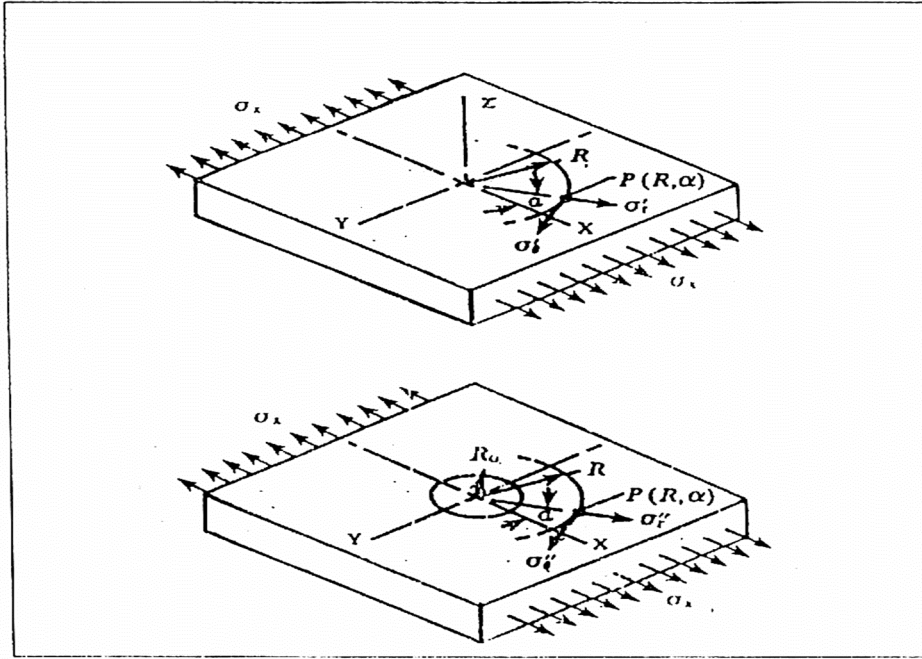
#### -Théorie du trou débouchant :

La **Figure III.6** ci-dessous représente une plaque mince soumise à des contraintes uniformes  $\sigma_x$ . L'état initial de contraintes en tout point  $P(R, \alpha)$  s'exprime en coordonnées polaires par :

$$\sigma'_r = \frac{\sigma_x}{2} [1 + \cos(2\alpha)] \quad \text{III.8}$$

$$\sigma'_\theta = \frac{\sigma_x}{2} [1 - \cos(2\alpha)] \quad \text{III.9}$$

$$t'_\theta = \frac{-\sigma_x}{2} \sin(2\alpha) \quad \text{III.10}$$



**Figure III.6 :** État de contraintes au point  $P(R, \alpha)$  avant et après perçage du trou [15,16]

Après perçage d'un petit trou de rayon  $R_0$ , les contraintes à proximité sont différentes. En effet, les contraintes  $\sigma_r$  et  $t_{r,\theta}$  doivent être nulles en tout point de la surface du trou. Une solution proposée par G.Kirsch en 1898 permet d'écrire, en point  $P(R, \alpha)$  :

$$\sigma_r = \frac{\sigma_x}{2} \left[ \left( 1 - \frac{1}{r^2} \right) + \left( 1 + \frac{3}{r^4} + \frac{4}{r^2} \right) \times \cos(2\alpha) \right] \quad \text{III.11}$$

$$\sigma_\theta = \frac{\sigma_x}{2} \left[ \left( 1 + \frac{1}{r^2} \right) - \left( 1 + \frac{3}{r^4} + \frac{4}{r^2} \right) \times \cos(2\alpha) \right] \quad \text{III.12}$$

$$t_{r\theta} = \frac{\sigma_x}{2} \left( 1 + \frac{3}{r^4} + \frac{2}{r^2} \right) \times \sin(2\alpha) \quad \text{III.13}$$

Avec  $r = \frac{R}{R_0}$  et  $R \geq R_0$ .

En retranchant les contraintes avant et après perçage, on obtient la relaxation :

$$\Delta\sigma_r = \sigma_r' - \sigma_r \quad \text{III.14}$$

$$\Delta\sigma_\theta = \sigma_\theta' - \sigma_\theta \quad \text{III.15}$$

$$\Delta\sigma_{r\theta} = \sigma_{r\theta}' - \sigma_{r\theta} \quad \text{III.16}$$

Si le matériau est homogène et reste dans le domaine élastique, en appliquant la loi de **Hooke**, on obtient les déformations correspondantes au point P(R,α) :

$$\varepsilon_r = -\frac{\sigma_x(1+\nu)}{2E} \times \left[ \frac{1}{r^2} - \frac{3}{r^4} \times \cos(2\alpha) + \frac{4}{r^2 \times (1+\nu)} \times \cos(2\alpha) \right]$$

$$\varepsilon_\theta = -\frac{\sigma_x(1+\nu)}{2E} \times \left[ -\frac{1}{r^2} + \frac{3}{r^4} \times \cos(2\alpha) - \frac{4}{r^2 \times (1+\nu)} \times \cos(2\alpha) \right]$$

E et ν sont, respectivement, le module de Young et le coefficient de Poisson du matériau.

### **Théorie du trou borgne [15]**

La base théorique de la méthode du trou a été développée précédemment à partir du petit trou débouchant complètement dans une plaque mince soumise à un état de contrainte uniforme. Une telle configuration est assez éloignée des pièces ou des structures à étudier, qui ne sont généralement pas plates, ni minces. C'est pour cette raison qu'un trou borgne est généralement percé dans la plupart des applications de la méthode du trou.

Le perçage d'un trou borgne dans un champ de contraintes planes produit un état local de contraintes très complexe. Celui-ci n'a d'ailleurs pas encore de solution exacte dans le cadre de la théorie élastique.

La méthode du trou borgne fait intervenir une variable supplémentaire par rapport à celle du trou débouchant. Il s'agit du rapport  $\frac{Z}{D_0}$  ou  $Z$  et  $D_0$  sont respectivement la profondeur et le diamètre du trou.

Pour tout état initial de contraintes résiduelles et pour un trou de diamètre  $D_0$ , les déformations libérées augmentent (à une vitesse décroissante) au fur et à mesure que la profondeur  $Z$  du trou augmente jusqu'à ce qu'elle atteigne la profondeur du trou ou une valeur

légèrement plus grande. Ainsi afin d'avoir un signal maximal, le trou est percé jusqu'à une profondeur  $Z$  tel que  $\frac{Z}{D_0} = 1$  (Ou 1,2 maximum selon la norme ASTM E 837-85)

### b) Méthode du trépan [11]

Le principe de la méthode du trépan consiste à isoler mécaniquement, par une saignée circulaire, un petit élément de volume, dont on désire connaître l'état de contraintes. La différence :

- État initial (avec contraintes résiduelles) ;
- État final (sans contraintes) indique le niveau des contraintes résiduelles.

On supposera que le champ de contraintes est uniforme dans l'élément considéré et que  $\sigma_z = 0$ ,  $z$  étant la direction de l'épaisseur.

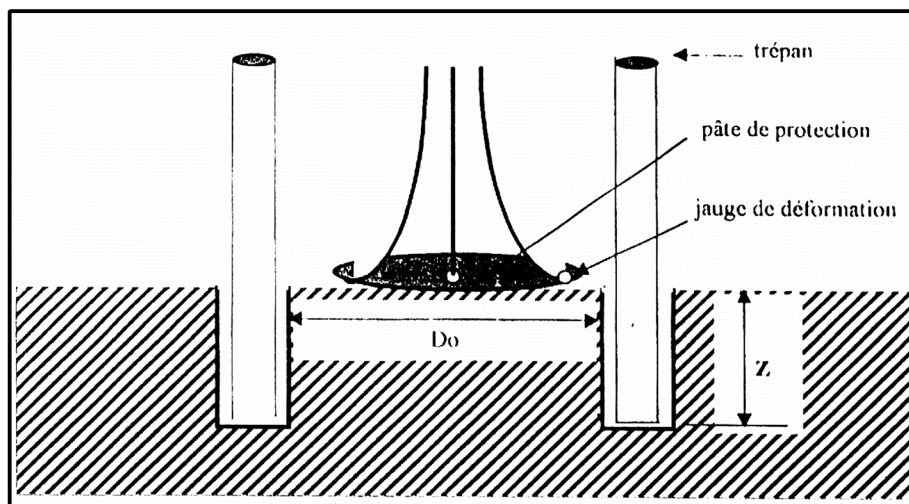


Figure III.7 : Schéma de la méthode du trépan [16].

Il est important de noter que mesurer une contrainte résiduelle par trépanation consiste à mesurer le retour élastique d'un élément. Ceci implique que l'on peut avoir accès à une précédente déformation plastique éventuelle. De même, la contrainte équivalente ainsi mesurée ne peut excéder la contrainte d'écoulement du matériau.

Dans le cas le plus général, déterminer l'état des contraintes résiduelles revient à déterminer les inconnues suivantes :

- Une direction principale des contraintes, c'est-à-dire une direction où la scission sur la face perpendiculaire est nulle. La direction  $z$  étant une direction principale, on en déduit aisément la troisième, orthogonale aux 2 premières ;
- Les deux valeurs des contraintes principales dans le plan de la surface de l'élément.

Il suffit donc, de mesurer les déformations associées à la trépanation dans 3 directions arbitraires. Ceci de fait habituellement à l'aide de jauges de déformation tridirectionnelles.

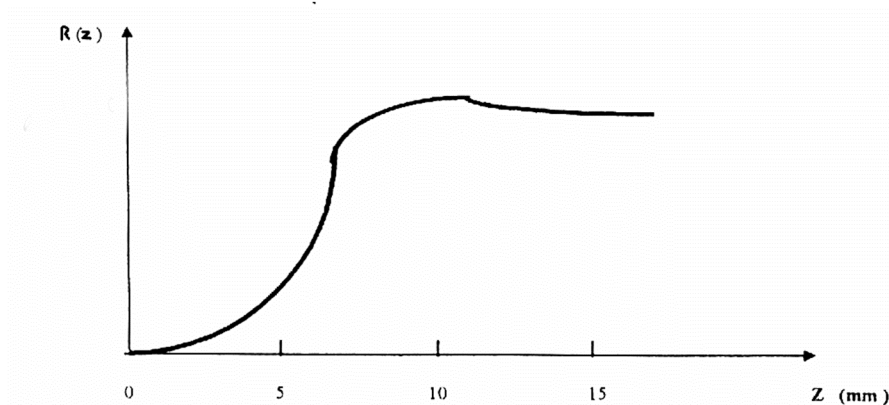
### **Mise en œuvre pratique de la méthode du trépan [11]**

Une jauge tridirectionnelle est collée à l'endroit où on désire mesurer les contraintes. On pratique ensuite une saignée circulaire autour de la jauge à une profondeur suffisante pour relâcher complètement les contraintes dans la **carotte (Figure III.7)**.

Le diamètre du trépan doit être suffisamment petit pour assurer la relaxation complète, mais pas trop, afin ne pas introduire des contraintes d'usinage qui ne seraient plus négligeables vis-à-vis des phénomènes mesurés.

Le trépanage est mené par « pas » successifs de 0.5 à 1 millimètre afin d'éviter un échauffement excessif et de permettre l'enlèvement des copeaux. Le centrage de l'outil par rapport à la jauge n'est pas aussi critique que dans la méthode du trou.

Ci-dessous, est représenté d'une manière schématique à la figure, le signal de relaxation d'une jauge  $R(z)$  (**Figure III.8**) en fonction de la profondeur trépanée : Il convient de prendre pour profondeur d'usinage minimum, la profondeur à partir de laquelle  $R(z)$  atteint son palier. Pour un diamètre de trépan de 15 millimètres, ceci correspond à une profondeur d'au moins de 7 millimètres.



**Figure III.8 :** Signal de déformation de la relaxation en fonction de la profondeur trépanée. [16]

Pratiquement, ceci est garanti par un espacement des points de mesures de 70 mm pour un trépan de diamètre extérieur de 20 mm.

### III.6.3 Méthodes destructives [11, 17,18]

#### Méthode d'enlèvement de couches successive

On traite ici un exemple qui est l'enlèvement de couches successives. Le principe de cette méthode repose sur l'exploitation d'un réarrangement des contraintes qui se produit au sein d'une pièce parallélépipédique lorsqu'on enlève une fine épaisseur en surface.

On peut alors mesurer soit la variation résultante de la courbure de la pièce (méthode de la «flèche»), soit les déformations associées sur la face opposée à l'enlèvement de matière à l'aide de jauges de déformation.

Supposons une pièce parallélépipédique dans laquelle règne un état de contraintes quasi plan, c'est-à-dire qu'en tout point,  $\sigma_z$  est très inférieure à  $\sigma_x$  et  $\sigma_y$ .

De plus, les contraintes  $\sigma_x$  et  $\sigma_y$  sont supposées être uniformes dans tout plan xy.

L'équilibre initial se traduit par la nullité de la résultante des forces et des moments des contraintes résiduelles.

Un enlèvement de couche d'épaisseur  $\Delta h$  provoque un effort normal et un moment de flexion dans l'épaisseur restante, ce qui se traduit par des variations linéaires des contraintes :

$\Delta\sigma_x$  et  $\Delta\sigma_y$ .

La connaissance des déformations principales  $\Delta\varepsilon_x$  et  $\Delta\varepsilon_y$  sur la face opposée à l'enlèvement de couche permet de connaître les expressions  $\Delta\sigma_x, \Delta\sigma_y$  et les contraintes  $\sigma_x$  et  $\sigma_y$  qui existaient dans la fine couche de matériau enlevé.

Il est alors possible de déterminer les contraintes existant dans toute l'épaisseur de l'échantillon en poursuivant l'opération jusqu'à destruction complète.

### **Mise en œuvre pratique de la méthode d'enlèvement de couches**

Dans le cas le plus général, l'élément parallélépipédique à tester est découpé d'un ensemble plus grand. Ceci entraîne une relaxation partielle qu'il est nécessaire d'enregistrer.

On procède alors de la manière suivante :

Deux jauges de déformation sont placées aux faces inférieure et supérieure de l'élément à isoler. La découpe se traduit par deux variations de contraintes sur chacune des faces.

En supposant que les contraintes qui résultent d'un effort normal ou d'un moment ont une variation linéaire dans l'épaisseur, il est possible de les calculer à tout niveau. Comme l'ont démontré ROSENTHAL et NORTON [17] ou FRICK et AL [18], ceci est valable si les dimensions, de la longueur  $L$  et de la largeur  $l$ , de l'élément sont au moins deux fois égales à son épaisseur  $h$ . Il en résulte que la méthode ne devrait s'appliquer qu'aux pièces telles que  $L \geq 2h$  et  $l \geq 2h$ .

On procède ensuite à la phase de rabotage proprement dite (ce qui élimine naturellement une des deux jauges) par « pas » de 0.5 ou de 1 mm. On peut employer des méthodes d'érosion chimique ou mécanique.

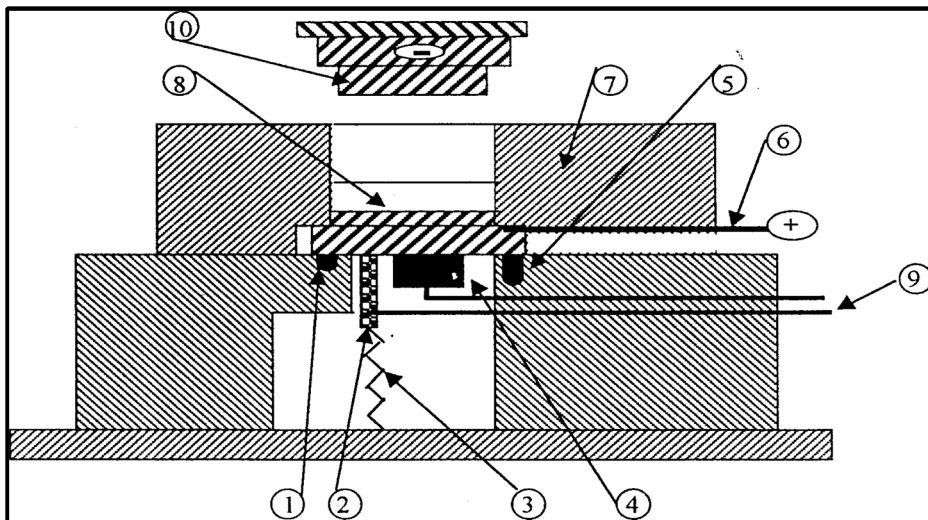
L'usinage mécanique est utilisé dans le cas des matériaux non-conducteurs électriques seulement. En effet, il peut générer des contraintes résiduelles mécaniques ou thermiques et fausser les résultats. C'est pour cela qu'on lui préfère **l'usinage électrochimique**, qui ne présente pas cet inconvénient et permet en outre d'enlever des couches d'épaisseur variable et contrôlable (contrairement à l'attaque chimique) [14].

Dans le cas d'un usinage mécanique, on attend le retour à l'équilibre thermique avant de relever à chaque pas la déformation associée.

Le retour à l'équilibre thermique dépend naturellement des dimensions et de la nature de la pièce et des conditions d'usinage. A titre indicatif, des mesures réalisées par des thermocouples ont démontré qu'un temps minimum d'une heure était nécessaire entre chaque passe.

Le rabotage est arrêté lorsque l'épaisseur enlevée ne devient plus négligeable par rapport à l'épaisseur restante, c'est-à-dire pratiquement entre 5 et 10mm.

On donne, dans la figure suivante, un schéma représentatif d'un banc d'usinage électrochimique :



**Figure III.9 :** Machine d'usinage électrochimique [13].

- 1) Joint torique pour protéger les capteurs de tout contact avec l'électrolyte.
- 2) Capteur ultrasonore.
- 3) Fil d'alimentation des capteurs
- 4) Jauges de déformation.
- 5) Vis de pression pour bloquer la plaque contre l'échantillon.
- 6) Plaque en cuivre pour l'amenée du courant.
- 7) Couvercle.
- 8) Pièce.
- 9) Fils d'alimentation des captions.
- 10) Électrode outil.

<b>Critères de choix d'une méthode</b>	<b>Méthode du trépan</b>	<b>Méthode d'enlèvement de couches</b>
Hypothèse de base	Champ uniforme en profondeur, $\sigma_z = 0$ sur une surface de diamètre minimum 20mm.	Champ variable en profondeur, $\sigma_z = 0$ sur un rectangle de côté suffisamment grand par rapport à l'épaisseur ( $L, l \geq 2h$ )
Contraintes mesurées sur une pièce avec gradient de contraintes dans l'épaisseur.	Résultat intégrant le gradient dans l'épaisseur de 0 à quelques mm.	Gradient dans toute l'épaisseur des couches enlevées.
Précision.	$\pm 30N/mm^2$ ou $30 MPa$	$\pm 40N/mm^2$ ou $40 MPa$
Degrés de destructivité.	Méthode semi-destructive	Méthode destructive.
Mise en œuvre opératoire.	Assez simple.	Assez simple.
Possibilité de travailler sur site.	Oui.	Non.
Rapidité de mesure.	Grande.	Peu élevée.
Dépouillement des résultats.	Assez facile.	Assez difficile.

Le tableau ci-dessous rassemble les caractéristiques de la méthode du trépan et de la méthode d'enlèvement de couches :

**Tableau II.2** Comparaison entre la méthode du trépan et la méthode d'enlèvement de Couches [16]

### III.7 Résumé

Le choix d'une méthode de mesure des contraintes résiduelles s'effectuera en fonction des objectifs et des possibilités naturelles de chaque méthode :

- L'application de la méthode du trou est parfaite si la contrainte est uniforme dans la profondeur. Dans ce cas, les coefficients de calcul sont parfaitement connus et les contraintes sont définies avec une précision raisonnable, en supposant qu'il n'y ait pas d'erreur expérimentale.
- La méthode de diffraction des rayons X est une méthode non destructive, pouvant faire des mesures sur des surfaces très localisées ( $< 1 \text{ mm}^2$ ) et donnant des informations sur l'état de déformation de la microstructure, à la fois à l'échelle macroscopique et à l'échelle microscopique. La faible pénétration des rayons X utilisée en diffraction en fait une méthode particulièrement adaptée aux problèmes dans lesquels les couches superficielles des matériaux interviennent.
- la méthode du trépan sera préférée dans le cas des pièces présentant de faible gradient d'épaisseur, et lorsque l'on désire connaître la contrainte à quelques millimètres sous la surface.

Si l'on désire obtenir des informations sur le gradient des contraintes sur plus grande épaisseur, la méthode par enlèvement de couches successive sera adoptée, au prix de la rapidité et la simplicité de la première méthode.

Dans cette optique, la simulation numérique par cette méthode, rendue possible par le développement de fortes puissances de calcul, est devenue un outil particulièrement intéressant pour prédire contraintes et distorsions résiduelles résultant du soudage [7].

# *CHAPITRE IV*

*CHAPITRE IV*

MODELISATION  
MATHEMATIQUE

## IV.1. Introduction.

Les contraintes résiduelles générées par l'élaboration des matériaux ou par leur mise en service peuvent être déterminées par plusieurs méthodes expérimentales comme celles précitées au troisième chapitre. Comme ces montages expérimentaux sont coûteux et laborieux et que les méthodes numériques se développent au même rythme que le matériel informatique et par conséquent, permettent de comprendre des phénomènes de plus complexes, La simulation mathématique est devenue un outil de recherche incontournable en raison de son faible coût, de sa vitesse de travail et du peu de moyens qu'elle mobilise [17].

La modélisation mathématique permet de simuler des phénomènes par le biais des équations mathématiques qui quantifient les différents aspects de ces phénomènes. Les équations mathématiques trouvent leur application par la mise en œuvre des conditions initiales et aux limites.

En somme, les avantages de la modélisation mathématique sont les suivants :

- Elle permet d'accroître notre compréhension de l'évolution d'un phénomène du point de vue des mécanismes fondamentaux ;
- Elle permet d'étudier, par simple calcul, l'effet des différents variables d'un procédé ;
- Le coût d'une approche numérique est bien inférieur à celui d'une expérience en laboratoire ;
  
- Lorsqu'une série d'expériences est réalisée, le modèle mathématique peut aider à évaluer les résultats des essais.

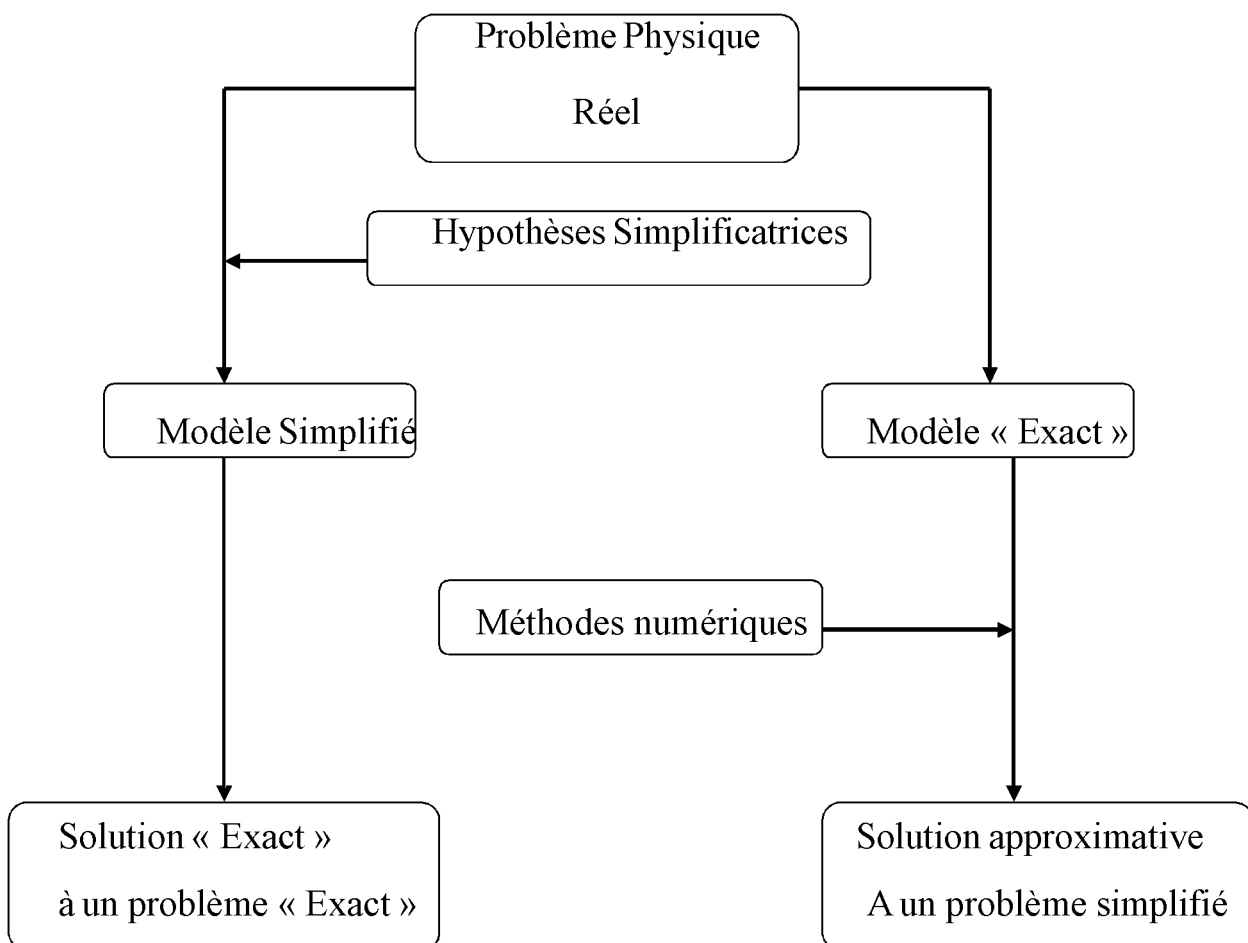
Il faut rappeler qu'il est aussi difficile de cerner tous les comportements d'un phénomène physique que de le simuler. Dans ce cas la modélisation mathématique doit être entreprise en liaison avec un travail expérimental. Dans ce qui suit, sera présentée la méthodologie de calcul des contraintes résiduelles générées par le soudage. On présentera d'abord le formalisme mathématique avec les hypothèses sur les équations et sur l'expérience utilisée. Le simulateur élaboré sera présenté avec les différentes étapes d'exécution et finalement les résultats de l'exemple étudié seront commentés en fin de chapitre.

## IV.2. Approche Numérique et Modèle Mathématique.

Pour la plupart des problèmes physiques réels, il est impossible de déterminer analytiquement des solutions exactes pour les variables d'intérêt à cause :

- Des géométries complexes des systèmes étudiés ;
- De la variation (dans le temps et dans l'espace) des propriétés physiques ;
- De la complexité et la variabilité des conditions initiales et aux limites ;
- De la forme des équations aux dérivées partielles (E.D.P) et les intégrales, qui régissent ces problèmes.

La figure suivante donne les grandes étapes vers une approche analytique et une approche numérique [19] :



**Figure IV.1 :** Les deux alternatives de résolution des E.D.P et des intégrales [18]

Après le choix de l'approche numérique appropriée et l'application de ce modèle mathématique, on passe à la simulation de ce dernier.

### IV.3. Hypothèse Simplificatrices de calcul

Dans l'optique d'obtenir un modèle mathématique avec moins de complexités de sorte qu'il soit facilement résolu par les méthodes numériques connues, certaines hypothèses ont été prise en compte : [21]

-Le problème posé peut être caractérisé comme bidimensionnel du fait qu'il étudie un solide révolution, à savoir : un solide de forme parallélépipédique. Par raison de symétrie, les deux composantes de déplacement dans une section plane quelconque de la structure passant par son axe de symétrie définissent complètement l'état de déformation et par conséquent l'état de contrainte.

-On admet que les matériaux étudiés sont **homogènes et isotropes**, c'est-à-dire présentant les mêmes propriétés en tout point et dans toutes les directions issues d'un même point. Il en découle la constance, des paramètres mécaniques (module de Young **E**, et coefficient de poisson  **$\nu$** ).

-Les matériaux utilisés ne contiennent pas de sources internes de chaleur.

-Le substrat est maintenu immobile lors du soudage.

### IV.4. Formulation du problème

En se basant sur les trois chapitres précédents, on a maintenant présenter la problématique qui fait l'objet de cette étude, qui porte sur l'évaluation des contraintes résiduelles au joint soudé d'un acier par la méthode d'enlèvement de couches.

La méthode d'enlèvement de couches consiste à mesurer l'effet de l'enlèvement d'une couche sur le reste de la pièce et de pouvoir ainsi par le calcul remonter à la valeur du champ des contraintes existant à l'origine de la pièce.

Les mécanismes du rééquilibrage restent les mêmes c'est-à-dire que chaque enlèvement de couche conduit à une flexion dans le domaine élastique de l'épaisseur restante ce qui donne

toujours une variation linéaire de la déformation et par voie de conséquence, une discontinuité sur les variations des contraintes lorsque l'on passe d'un matériau à l'autre ou pour le soudage (un cordon soudé à un métal de base).

Pour une meilleure compréhension du modèle mathématique, on donne des notions de base sur l'élasticité, la rigidité des matériaux et la loi de Hooke.

#### **IV.4.1. L'élasticité.**

L'élasticité est la propriété physique d'un corps de reprendre sa forme initiale après suppression de la sollicitation. Le corps est parfaitement élastique s'il retrouve complètement sa forme originale après avoir retiré la charge.

L'élasticité des matériaux se traduit par des constantes nommées constantes d'élasticité, qui représentent la rigidité du matériau et son aptitude à la déformation élastique [22].

#### **IV.4.2. Rigidité des matériaux.**

Dans une courbe de traction, la partie linéaire s'appelle domaine d'élasticité, où la loi de Hooke s'applique pour des faibles valeurs de la déformation  $\epsilon$  tel que :

$$\sigma = E \times \epsilon \quad \text{IV.1}$$

La constante de proportionnalité  $E$  de cette loi, appelé module de Young, est une mesure de la rigidité du matériau, c'est à dire de la propriété qu'a le matériau de se déformer de façon élastique réversible sous l'action d'une contrainte.

Pour une valeur donnée de la contrainte, un matériau est d'autant plus rigide que sa déformation élastique résultante est faible [22].

Notons que le module de Young  $E$  n'est pas la seule mesure de rigidité d'un matériau. Elle peut aussi être caractérisée par le module de cisaillement  $G$  ou par le module de compression, il existe des relations entre eux :

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad \text{IV.2}$$

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad \text{IV.3}$$

$\nu$  : Coefficient de poisson.

### IV.4.3. Loi de Hooke.

C'est la loi de déformation élastique, qui lie l'effort à l'allongement par une relation linéaire qui peut s'exprimer de la façon suivante [22] :

$$\delta = \frac{1}{K} \times F \quad \text{IV.4}$$

$\delta$  : Déplacement relatif ou allongement résultant ;

F : La force appliquée

; K : La rigidité.

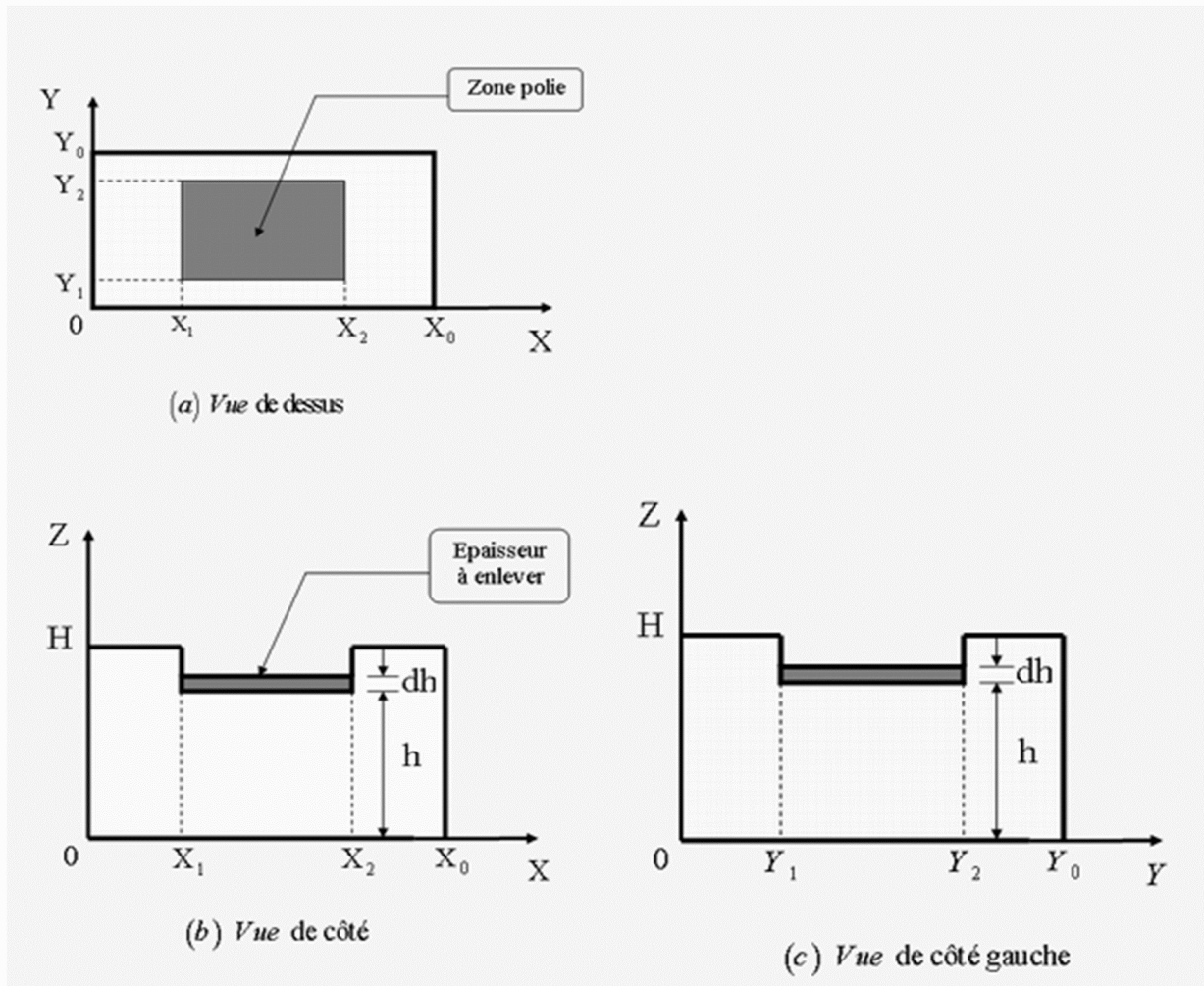
La rigidité K est constante pour une géométrie et un matériau donné, à condition que le matériau soit élastique, La loi de Hooke a cependant été généralisée pour permettre d'établir une corrélation entre la déformation et la contrainte. C'est ainsi que pour un matériau élastique et isotrope, on a la relation linéaire suivante :

$$\varepsilon = \frac{1}{E} \times \sigma \quad \text{Ou bien} \quad \sigma = \varepsilon \times E \quad \text{IV.5}$$

## IV.5 Modélisation mathématique [14,19]

### IV.5.1. Présentation générale.

On cite dans cette partie, en détail, les équations nécessaires pour le déroulement du modèle numérique. Pour cela, envisageons le problème suivant l'axe des x, sachant qu'il en est de même sur l'axe des y.



**Figure IV.2** : Schéma de la géométrie de la pièce

Lorsque le matériau, dans la zone usinée, a une hauteur  $h+dh$ , il règne à la cote  $z$  une contrainte normale de composante  $\sigma_x(z)$  dans la direction  $x$  [14].

Quand la couche  $dh$  est enlevée ( $dh \ll h$ ), il y a redistribution des contraintes afin que l'équilibre statique de la pièce soit assuré. Soit  $d\sigma_x(z)$  la variation locale, la nouvelle contrainte à la cote  $z$  sera donc :

$$\sigma_x(z) + d\sigma_x(z) \quad \text{IV.6}$$

Il faut noter que l'enlèvement des couches s'effectue, dans le cas d'un matériau conducteur par usinage électrochimique. En effet, ce mode d'usinage offre les avantages suivants :

- Il n'est pas générateur de contraintes d'origine mécanique ou thermique, ce qui est le cas d'usinage par outil coupant ou par électroérosion ;
- Il permet une vitesse d'usinage relativement importante, de 0,1 à 1 mm/mn, contrairement à l'attaque chimique (la plupart des céramiques et d'autres matériaux sont résistants aux agents chimiques).

Pour les revêtements non-conducteurs électriques, l'usinage électrochimique est impossible, on utilise dans ce cas l'usinage mécanique et dès qu'une couche conductrice d'électricité est atteinte, l'enlèvement de matière est poursuivi en usinage électrochimique en conservant les mêmes jauges pour la mesure des déformations, (Voir la **figure III.7**) .

### IV.5.2 Équilibre des forces et des moments des forces.[8]

Si  $S_x$  est la section droite de normale, l'axe des  $x$ , il faut vérifier l'équilibre des efforts normaux suivant l'axe des  $X$  avant l'enlèvement de la couche  $dh$ , tel que :

$$\iint_{S_x} \sigma_x(Z) d_y d_z = 0 \quad (\text{Équilibre des efforts}) \quad \text{IV.7}$$

Avec :

$$\int_0^H \int_0^{Y_0} \sigma_x(z) dy dz = \int_0^H \int_0^{Y_1} \sigma_x(z) dy dz + \int_0^{h+dh} \int_{Y_1}^{Y_2} \sigma_x(z) dy dz + \int_0^H \int_{Y_2}^{Y_0} \sigma_x(z) dy dz \quad \text{IV.8}$$

$\sigma_x(z)$  n'est pas une fonction à priori et les intégrales ont convergentes, nous pouvons donc écrire :

$$\int_0^H \sigma_x(z) dz + (Y_2 - Y_1) \int_0^{h+dh} \sigma_x(z) dz + (Y_0 - Y_1) \int_0^H \sigma_x(z) dz = 0 \quad \text{IV.9}$$

On pose :

$$r = \frac{Y_0}{Y_2 - Y_1} \quad \text{avec : } 1 < r < \infty$$

Puisque, par définition  $dh$  est petit, on aura :

$$(r-1) \int_0^H \sigma_x(z) dz + \int_0^h \sigma_x(z) dz + \sigma_x(h) \times dh = 0 \quad \text{IV.10}$$

Avec les mêmes principes que précédemment, nous pouvons réécrire la dernière équation après enlèvement de la couche  $dh$  comme suit :

$$(r-1) \int_0^H (\sigma_x(z) + d\sigma_x(z)) dz + \int_0^h (\sigma_x(z) + d\sigma_x(z)) dz = 0 \quad \text{IV.11}$$

On encore :

$$(r-1) \int_0^H \sigma_x(z) dz + (r-1) \int_0^H d\sigma_x(z) dz + \int_0^h \sigma_x(z) dz + \int_0^h d\sigma_x(z) dz = 0 \quad \text{IV.12}$$

Après suppression des termes identiques, l'égalité des équations(IV.10)et(IV.12)donne :

$$(r-1) \int_0^H d\sigma_x(z)dz + \int_0^h d\sigma_x(z)dz = \sigma_x(h) \times dh \quad \text{IV.13}$$

Si nous supposons que la relaxation des contraintes suit une loi linéaire de la forme :

$$d\sigma_x(z) = a \times z + b \quad \text{IV.14}$$

Nous pouvons alors résoudre l'équation(IV.13) qui devient :

$$(r-1) \left[ a \times \frac{H^2}{2} + b \times H \right] + a \times \frac{h^2}{2} + b \times h = \sigma_x(h) \times dh \quad \text{IV.15}$$

Soit encore :

$$\left[ H^2(r-1) + h^2 \right] + b \times [H(r-1) + h] = \sigma_x(h) \times dh \quad \text{IV.16}$$

Ecrivons maintenant l'équilibre des moments fléchissant avant l'enlèvement de la couche dh :

$$(r-1) \int_0^H \sigma_x(z) \left[ z - \frac{H}{2} \right] dz + \int_0^{h+dh} \sigma_x(z) \left[ z - \frac{h+dh}{2} \right] dz = 0 \quad \text{IV.17}$$

Que l'on peut développer :

$$(r-1) \int_0^H \sigma_x(z) \left[ z - \frac{H}{2} \right] dz + \int_0^h \sigma_x(z) \left[ z - \frac{h}{2} \right] dz + \int_0^h \sigma_x(z) \left[ -\frac{dh}{2} \right] dz + \sigma_x(h) \frac{h}{2} dh = 0 \quad \text{IV.18}$$

Après l'enlèvement de la couche dh, nous aurons :

$$(r-1) \int_0^H [\sigma_x(z) + d\sigma_x(z)] \left[ z - \frac{H}{2} \right] dz + \int_0^h [\sigma_x(z) + d\sigma_x(z)] \left[ z - \frac{h}{2} \right] dz = 0 \quad \text{IV.19}$$

En égalant les relations (IV.13)et (IV.19) et en simplifiant, on obtient l'équation suivante :

$$(r-1) \int_0^H d\sigma_x(z) \left[ z - \frac{H}{2} \right] dz + \int_0^h d\sigma_x(z) \left[ z - \frac{h}{2} \right] dz = \sigma_x(h) \frac{h}{2} dh - \frac{h}{2} \int_0^h \sigma_x(z) dz \quad \text{IV.20}$$

En multipliant la relation (IV.10) :

$$(r-1) \frac{dh}{2} \int_0^H \sigma_x(z) dz + \frac{dh^2}{2} \sigma_x(h) = -\frac{h}{2} \int_0^h \sigma_x(z) dz \quad \text{IV.21}$$

On aura donc :

$$(r-1) \int_0^H d\sigma_x(z) \left[ z - \frac{H}{2} \right] dz + \int_0^h d\sigma_x(z) \left[ z - \frac{h}{2} \right] dz = \sigma_x(h) \frac{h}{2} dh + (r-1) \frac{dh}{2} \int_0^H \sigma_x(z) dz + \frac{dh^2}{2} \sigma_x(h)$$

IV.22

Si nous admettons comme précédemment que :

$$d\sigma_x(z) = a \times z + b$$

La relation (IV.22) s'écrira alors :

$$(r-1) \frac{dh}{2} \int_0^H \sigma_x(z) dz + \frac{(dh+h)}{2} dh \times \sigma_x(h) = (r-1) \frac{aH^3}{12} + \frac{ah^3}{12} \quad \text{IV.23}$$

On pose :

$$(r-1) \frac{dh}{2} \int_0^H \sigma_x(z) dz \cong 0$$

On aura alors :

$$a = \frac{6\sigma_x(h)(h+dh)dh}{H^3(r-1) + h^3} \quad \text{IV.24}$$

$$b = \frac{\sigma_x(h)dh}{H(r-1)+h} - \frac{6\sigma_x(h)[H^2(r-1)+h^2]dh}{[H^3(r-1)+h^3][H(r-1)+h]} \quad \text{IV.25}$$

Donc :

$$\sigma_x(z) = \frac{6\sigma_x(h)(h+dh)dh}{H^3(r-1)+h^3} \times z + \frac{\sigma_x(h)dh}{H(r-1)+dh} - \frac{6\sigma_x(h)[H^2(r-1)+h^2]dh}{[H^3(r-1)+h^3][H(r-1)+h]}$$

IV.26

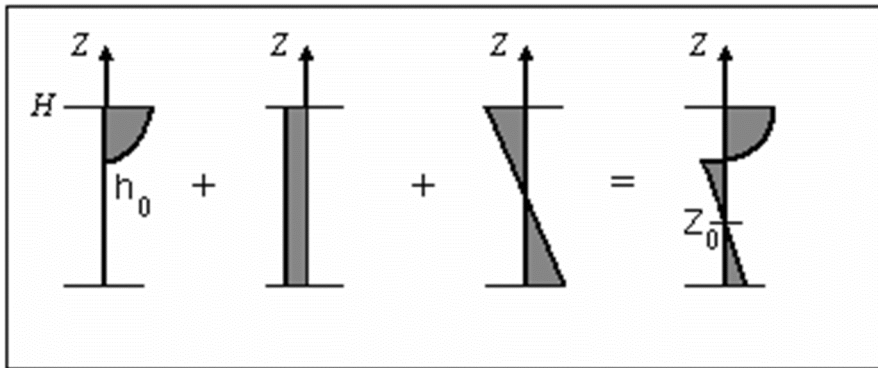
**Contraintes prises en compte :[8]**

Nous adopterons l'expression suivante pour la contrainte vraie ou totale :

$$\sigma_x^v(z) = \sigma_x^R(z) + \sigma_x^N(z) + \sigma_x^F(z) \quad \text{IV.27}$$

Avec :

- $\sigma_x^v(z)$  : Contraintes vraies ;
- $\sigma_x^R(z)$  : Contraintes résiduelles ;
- $\sigma_x^N(z)$  : Contraintes normales ;
- $\sigma_x^F(z)$  : Contraintes flexion ;



- a) Contraintes Résiduelles.      b) Contraintes Normales.      c) Contraintes de flexion.      d) Contraintes Vraie.

**Figure IV.3 :** Schéma de calcul des contraintes [8]

D'après la figure précédente, on peut écrire les équations ci-après :

**Équations des forces :**

$$y_0 \int_{h_0}^H \sigma_x^R(z) dz + y_0 \times H \times \sigma_x^N(z) = 0 \quad \text{IV.28}$$

**Équations des moments :**

$$y_0 \int_{h_0}^H \sigma_x^R(z) \left( z - \frac{H}{2} \right) dz + y_0 \int_0^H \sigma_x^F(z) \left( z - \frac{H}{2} \right) dz = 0 \quad \text{IV.29}$$

Et d'après la notion de la résistance des matériaux, l'équation du moment fléchissant est égale :

$$M_y = \int_0^H \sigma_x^F(z) \left( z - \frac{H}{2} \right) dz = - \int_{h_0}^H \sigma_x^R(z) \left( z - \frac{H}{2} \right) dz$$

$$\sigma_x^F(z) = - \frac{6(2z - H)}{Y_0 \times H^3} \times M_X^R \quad \text{IV.30}$$

Donc :

$$\sigma_x^F(z) = M_y \frac{z - \frac{H}{2}}{Y_0 \times \frac{H^3}{12}} = M_y \frac{6(2z - H)}{Y_0 \times H^3} \quad \text{IV.31}$$

D'après l'équation (IV.29), on a :

$$M_y = \int_0^H \sigma_x^F(z) \left( z - \frac{H}{2} \right) dz = - \int_{h_0}^H \sigma_x^R(z) \left( z - \frac{H}{2} \right) dz \quad \text{IV.32}$$

Donc :

$$\sigma_x^F(z) = - \left[ \int_{h_0}^H \sigma_x^R(z) \left( z - \frac{H}{2} \right) dz \right] \times \frac{6(2z - H)}{Y_0 \times H^3} \quad \text{IV.33}$$

D'après l'équation (IV.28), on a :

$$\sigma_x^N(z) = -\frac{1}{H} \int_{h_0}^H \sigma_x^R(z) dz \quad \text{IV.34}$$

On pose  $N_X^R$  et  $M_Y^R$  avec :

$$N_X^R = \int_{h_0}^H \sigma_x^R(z) dz \quad \text{IV.35}$$

$$M_Y^R = \int_{h_0}^H \sigma_x^R(z) \left( z - \frac{H}{2} \right) dz \quad \text{IV.36}$$

Nous aurons alors :

$$\sigma_x^N(z) = -\frac{1}{H} N_X^R \quad (\text{Indépendant de } z) \quad \text{IV.37}$$

Et

$$\sigma_x^F(z) = -\frac{6(2z-H)}{Y_0 \times H^3} \times M_Y^R \quad (\text{Fonction linéaire de } z) \quad \text{IV.38}$$

On pose  $A_X$  et  $B_X$  telle que :

$$A_x = \int_{h_0}^H \sigma_x^v(z) dz \quad \text{IV.39}$$

Et

$$B_X = \int_{h_0}^H \sigma_x^v(z) \left( z - \frac{H}{2} \right) dz \quad \text{IV.40}$$

Sachant que :

$$\sigma_x^v(z) = \sigma_x^R(z) + \sigma_x^N(z) + \sigma_x^F(z) \quad \text{On aura :}$$

$$A_x = \int_{h_0}^H -\frac{1}{H} N_X^R dz + \int_{h_0}^H -\frac{6(2z-H)}{Y_0 \times H^3} \times M_Y^R dz + N_X^R \quad \text{IV.41}$$

$$B_x = \int_{h_0}^H -\frac{1}{H} N_X^R \left( z - \frac{H}{2} \right) dz + \int_{h_0}^H -\frac{6(2z-H)}{Y_0 \times H^3} \times M_Y^R \left( z - \frac{H}{2} \right) dz + M_x^R \quad \text{IV.42}$$

Soit en regroupant et en intégrant :

$$A_x = \frac{h_0}{H} \times N_X^R + \frac{6h_0}{H^3} (h_0 - H) \times M_Y^R \quad \text{IV.43}$$

$$B_x = \frac{h_0(h_0 - H)}{2H} \times N_X^R + \frac{(3H^2 \times h_0 - 6H \times h_0^2 + 4h_0^3)}{H^3} \times M_Y^R \quad \text{IV.44}$$

On pose :

$$\beta = \frac{h_0}{H}, \quad \delta = \frac{6h_0}{H^3} (h_0 - H), \quad \gamma = \frac{h_0(h_0 - H)}{2H},$$

Et 
$$\eta = \frac{(3H^2 \times h_0 - 6H \times h_0^2 + 4h_0^3)}{H^3}$$

Donc :

$$A_x = \beta \times N_X^R + \delta \times M_Y^R$$

$$B_x = \gamma \times N_X^R + \eta \times M_Y^R$$

On trouve :

$$N_X^R = \frac{(\eta \times A_x - \delta \times B_x)}{\rho} \quad \text{IV.45}$$

$$M_Y^R = \frac{(\beta \times A_x - \gamma \times B_x)}{\rho} \quad \text{IV.46}$$

Avec : 
$$\rho = \beta \times \eta - \gamma \times \delta$$

Ceci permet de calculer aussitôt  $N_X^R, M_Y^R, A_x$  et  $B_x$ .

Le niveau des contraintes internes dans une couche  $i$  avant son usinage s'écrit  $\sigma_{x,y}(z_i)$ , après usinage, il contribue au rééquilibrage par l'action de l'effort et du moment correspondant à une variation de contrainte  $\Delta\sigma_{x,y}(z_i)$  sur l'épaisseur restante, donc on a :

$$\sigma_{x,y}(z_i)\Delta x_i = \int_{x_i}^0 \Delta\sigma_{x,y}(z_i) dz \quad \text{IV.47}$$

L'équilibre des moments des forces s'écrit :

$$\sigma_{x,y}(z_i)x_i\Delta x_i = \int_{x_i}^0 \Delta\sigma_{x,y}(z_i)z_i dz \quad \text{IV.48}$$

Sous le signe somme des équations(IV.47) et (IV.48), la variation de contrainte  $\sigma_{x,y}(z_i)$  à la cote  $z_i$  d'un matériau (N) provoquée par l'usinage de la ième couche est remplacer son expression donnée par la loi de Hooke généralisée écrite ci-dessous :

$$\Delta\sigma_{x,y}(z_i) = \frac{E(N)}{1-\nu^2(N)} \left[ \Delta\varepsilon_{x,y}(z_i) + \nu(N) \times \Delta\varepsilon_{x,y}(z_i) \right] \quad \text{IV.49}$$

Et nous avons aussi pour les contraintes résiduelles d'après (IV.45) et (IV.46) :

$$\sigma_x^R(z) = a \times z + b$$

Tel que :

$$a = \frac{6dh}{-2h^2 + h \times dh + dh^2} \times \frac{E}{1-\nu} \left[ \Delta\varepsilon_x(z_i) + \nu \times \Delta\varepsilon_y(z_i) \right] \quad \text{IV.50}$$

$$b = \frac{h^2 + h \times dh + dh^2}{-2h^2 + h \times dh + dh^2} \times \frac{E}{1-\nu^2} \left[ \Delta\varepsilon_x(z_i) + \nu \times \Delta\varepsilon_y(z_i) \right] \quad \text{IV.51}$$

D'où l'équation de la contrainte résiduelle en fonction des déformations l'axe des X, pour  $z=h$  (cote de la passe) :

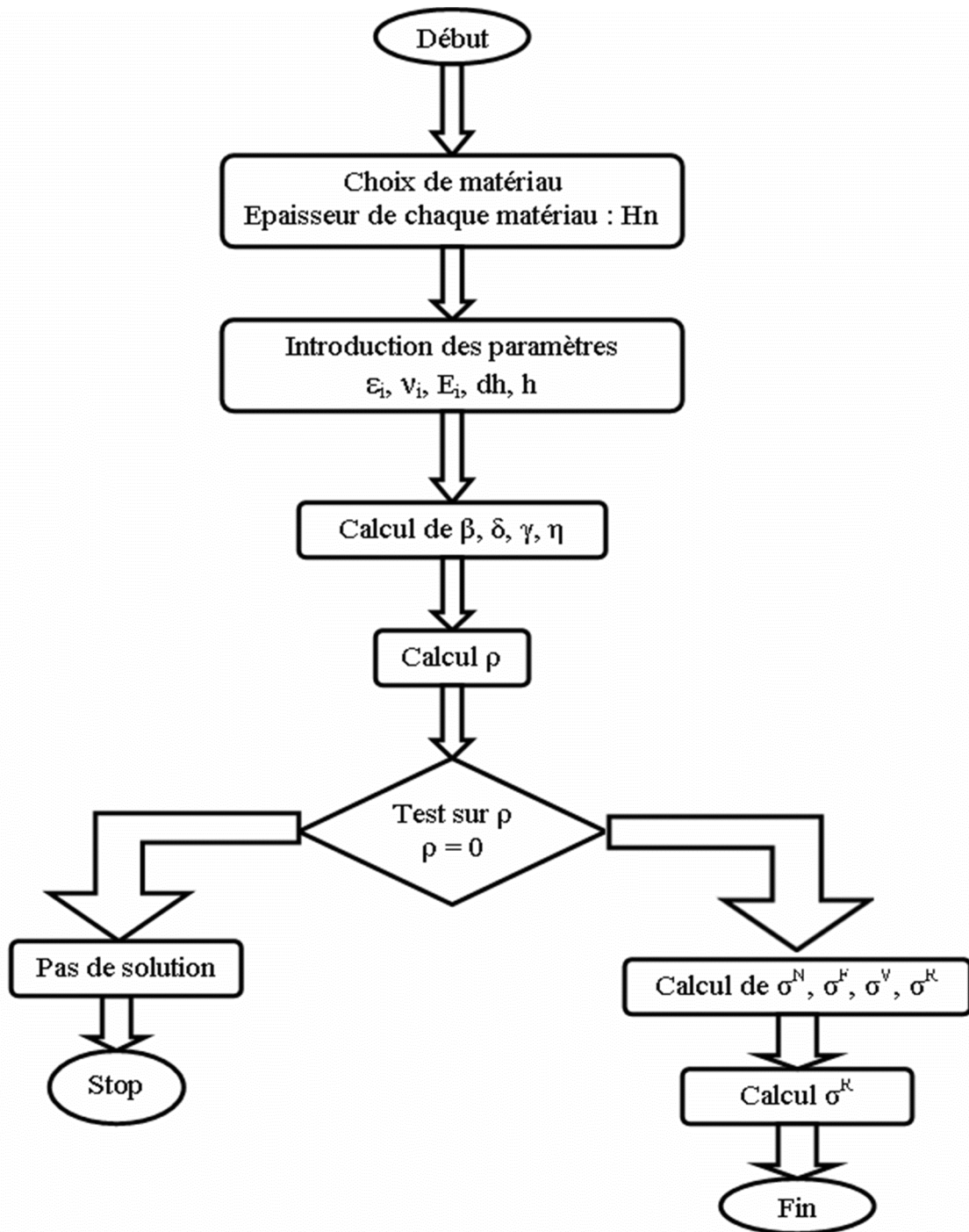
$$\Delta\sigma_x^R = \left[ \frac{h^2 + 7 \times h \times dh + dh^2}{-2h^2 + h \times dh + dh^2} \right] \times \frac{E}{1-\nu^2} \left[ \Delta\varepsilon_x + \nu \times \Delta\varepsilon_y \right] \quad \text{IV.52}$$

Avec le même raisonnement, on trouve  $\sigma_y^R$  :

$$\Delta\sigma_y^R = \left[ \frac{h^2 + 7 \times h \times dh + dh^2}{-2h^2 + h \times dh + dh^2} \right] \times \frac{E}{1-\nu^2} \left[ \Delta\varepsilon_y + \nu \times \Delta\varepsilon_x \right] \quad \text{IV.53}$$

### IV.5.3. Élaboration du programme.

Les équations citées précédemment, nous ont permis d'élaborer le modèle numérique. L'organigramme suivant permet de résumer les différentes étapes de déroulement du modèle proposé :



IV.4 : Organigramme simplifié du modèle.

Ce programme est écrit en langage **Visual Basic 6.0** (voir **annexe. II**) avec ses différentes instructions.

L'exécution du modèle nécessite l'entrée des données. Il demande une quantité d'informations multiples sur les propriétés physiques des matériaux traités ( $E_i$ ,  $\nu_i$ ), l'épaisseur de la couche enlevée et les deux déformations (longitudinale et transversale) pour chaque passe. Ces valeurs de déformations sont déterminées par la méthode extensométrique d'enlèvement successif de couches citée précédemment.

Les résultats obtenus par le modèle sont les contraintes résiduelles transversales et longitudinales à différents niveaux de l'épaisseur de la pièce soudée c'est à dire à partir du cordon de soudage jusqu'à une profondeur du métal de base en passant par la zone fondue.

#### **IV.6. Application du modèle numérique proposé :**


Le modèle numérique que nous avons élaboré permet le calcul des contraintes résiduelles à différents niveaux de l'épaisseur de la pièce soudée c'est à dire à partir du cordon de soudage jusqu'à une profondeur du métal de base en passant par la zone fondue.


Le modèle nécessite la connaissance :

- ✓ Des déformations dans les deux directions (longitudinale et transversale)  $\epsilon_X$  et  $\epsilon_Y$  ;
- ✓ De l'épaisseur des couches enlevées  $dh$  ;
- ✓ Des valeurs constantes élastiques « $\nu$ » et « $E$ » des matériaux constituant chaque couche.

#### **Méthode d'utilisation du modèle.**

Ce logiciel peut s'exécuter sur tout type de Windows après son installation. Pour maîtriser ce logiciel, on suit les instructions citées ci-dessous:

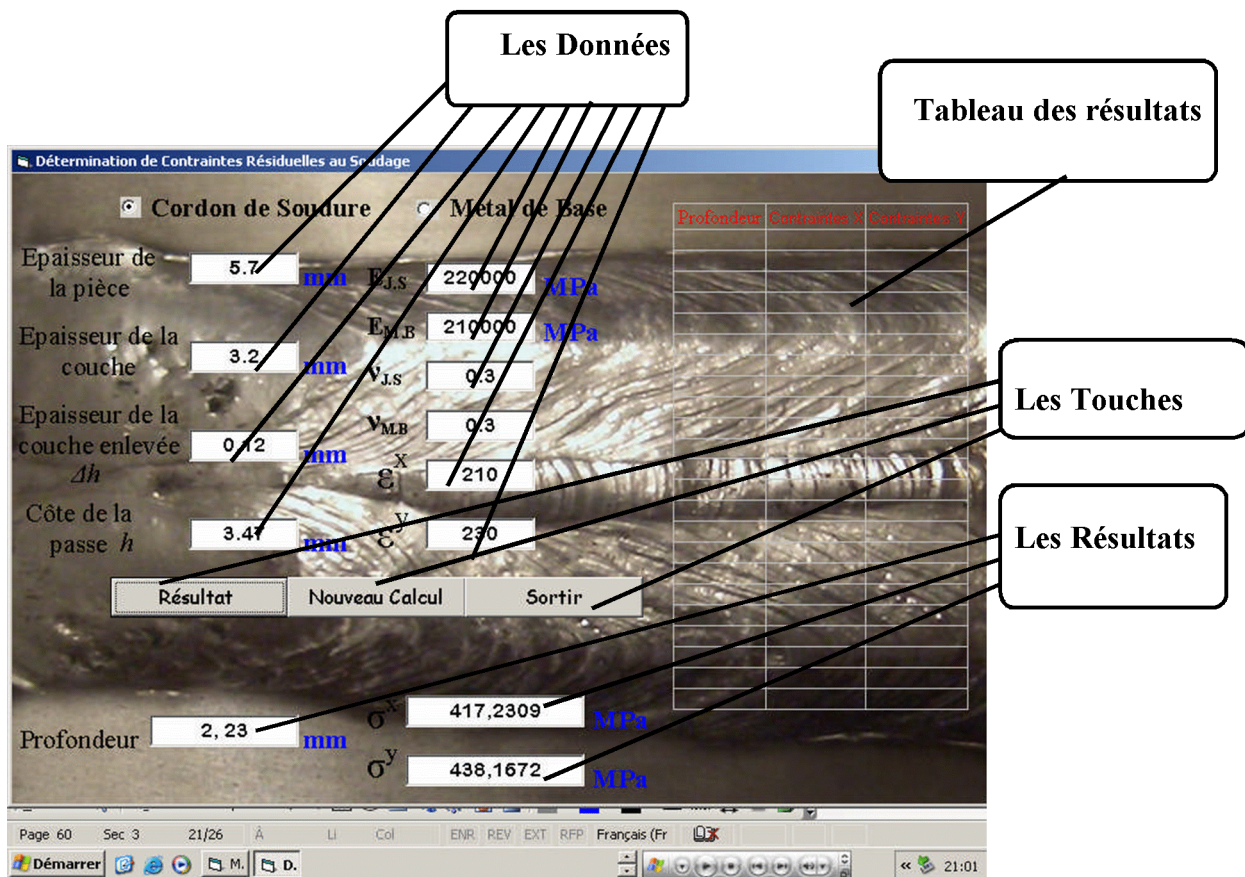
 L'exécution du logiciel fait apparaître la fenêtre de la **figure IV.5**.

 Fonction de la couche où se trouve, on choisit soit le cordon de soudage soit le métal de base. On injecte ensuite les données relatives à cette couche et on clique sur la touche "**Résultat**".

✚ Les résultats de la profondeur, des contraintes résiduelles longitudinales et transversales vont s'afficher dans les cases en bas de la fenêtre. Ensuite, le programme va automatiquement injecter les résultats dans le tableau à côté. Le calcul des contraintes et de la profondeur pour chaque épaisseur nécessite la même exécution. Ainsi, pour une nouvelle opération de calcul, on clique sur la touche "**Nouveau calcul**". Après l'enregistrement **Ctrl + S**, la touche "**Sortir**" permet de quitter le programme.

✚ Dans le cas d'oubli d'une donnée, le programme va afficher des remarques pour indiquer l'oubli de cette donnée. (Exemple; "**entrer la côte de passe**" voir **figure IV.6**). Dans le cas où nous injectons des valeurs non valides, le programme va afficher une remarque pour indiquer cette erreur. (Exemple : "**vérifier l'épaisseur de la pièce et la côte de la pièce**" voir la **Figure IV.6**).

✚ L'injection des données continue et les résultats pour chaque passe seront affichés complètement dans le tableau indiqué à droite (voir **figure IV.7**).



**Figure IV.5** : Interface du Modèle numérique réalisé.

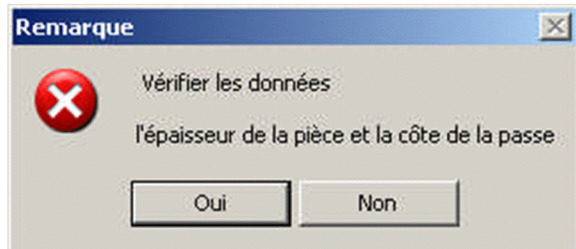
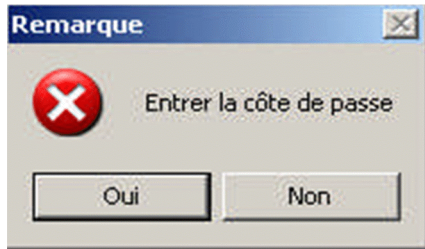


Figure IV.6 : affichage des remarques

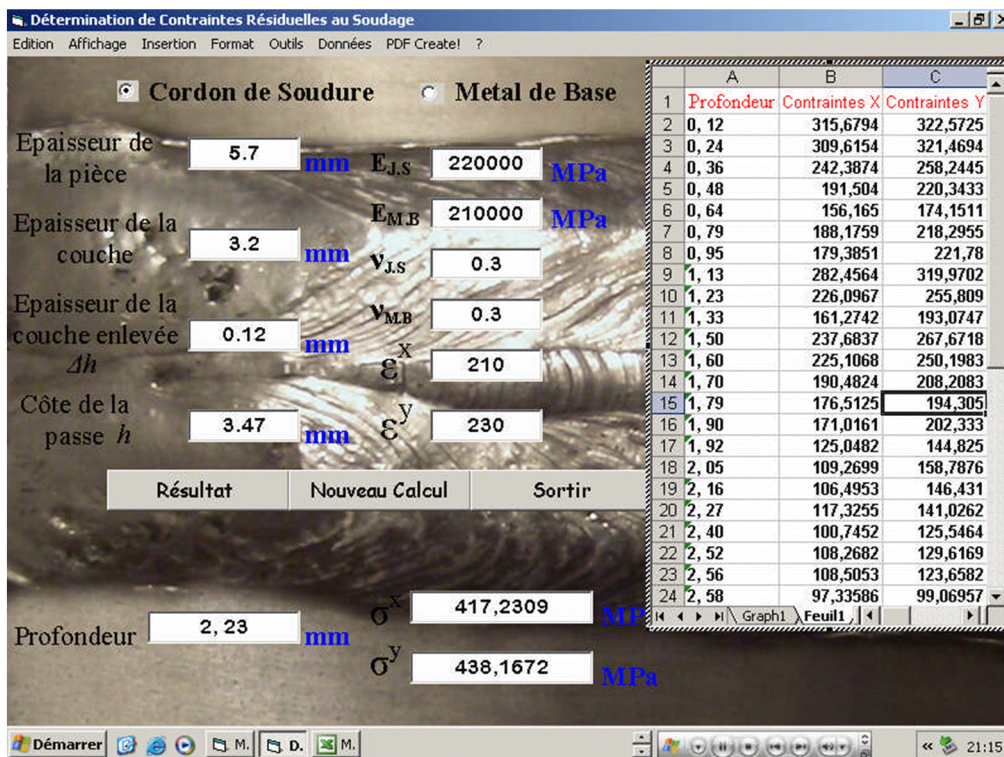


Figure IV.7 : Interface et affichage le tableau du Modèle numérique réalisé.

Cette option de tableau complété permet de faciliter et développer les courbes des contraintes résiduelles longitudinales et transversales en fonction de la profondeur.

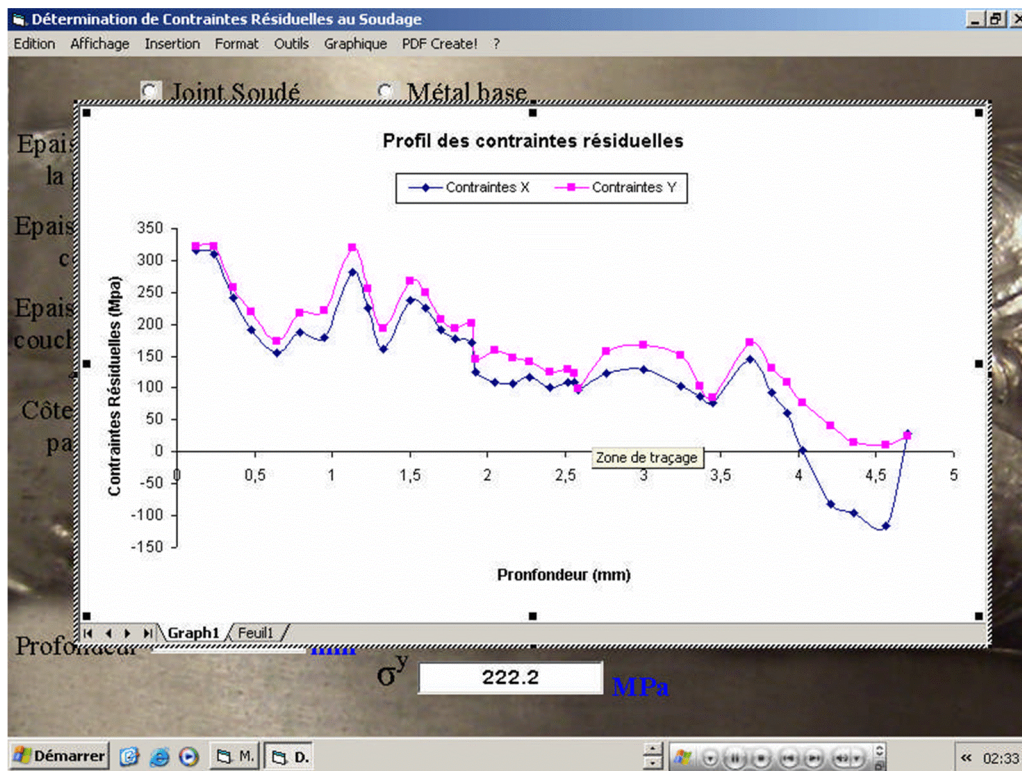


Figure IV.8 Interface et affichage les courbes du Modèle numérique.

Afin de mettre en application notre modèle ainsi que sa validation, nous avons réalisé un cas pratique de soudage sur un acier inoxydable. Les paramètres caractéristiques de ce soudage et des matériaux en présence sont :

- **Métal base : acier inoxydable 316 Ti**  
 Module Young : 220.000 MPa  
 Coefficient de poisson : 0.3  
 Épaisseur de métal : 2.5
- **Cordon de soudage : acier inox 306 L**  
 Module Young : 210.000  
 Coefficient de poisson : 0.3  
 Épaisseur : 3.5

Calcul de la déformation  $\epsilon$  à l'aide des formules mathématiques et à l'aide de l'énergie de soudage utilisé :

Données :

X = 10.1 cm. (longueur de cordon).

t = 9.84 sec. (Temps de soudage).

a) Vitesse de soudage : 
$$v = \frac{X}{t} = \frac{10.1}{9.84} \times 60 = 61.58 \text{ (cm/min)}.$$

Calcul de l'énergie E :

$$E = \eta \frac{UI}{v} 60 \text{ J/cm.}$$

Le procédé utilisé c'est le MAG donc  $\eta=0.9$ .

U = 24 volts. (Tension de soudage) [v]

I = 160 A. (Intensité de soudage) [A]

$$\rightarrow E = 3367.32 \text{ J / cm}$$

Calcul de  $\theta_{\max}$  : on est dans le cas d'une plaque

$$\text{Air thermique} = 2 y s = 2 \times 3.2 \times 5.7 = 36.48 \text{ mm}^2 = 0.364 \text{ cm}^2$$

$$c \cdot \rho_1 = 4.3 \text{ (J/cm}^3 \cdot \text{K)}.$$

AN :

$$\theta_{\max} = \frac{0.484 \eta E}{2 c \rho_1 y s} + T_a \text{ C}^\circ \rightarrow \theta_{\max} = 1007.84 \text{ C}^\circ$$

Calcul de  $\varepsilon$  : 
$$\Delta L = L_0 \alpha \theta_{\max} \rightarrow \varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \alpha \theta_{\max}$$

AN :  $\varepsilon = 0.012$

Calcul de  $\varepsilon$  à  $\theta = 650 \text{ C}^\circ$  ; donc on s'éloigne du cordon donc y change :

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \alpha \theta_{650} = 0.0078$$

#### IV.7. Résultats et interprétation: Les Conditions expérimentales [14] :

Pour l'enlèvement des couches, nous utilisons dans le cas d'un matériau conducteur, l'usinage électrochimique. En effet ce mode d'usinage offre, dans notre cas, les avantages suivants :

- Il n'est pas générateur de contraintes d'origine mécanique ou thermique, ceci est évité par circulation d'eau froide pendant l'essai d'enlèvement de couches.
- Il permet une vitesse d'usinage relativement importante, de 0.05 mm / min suivant les paramètres électrolytiques choisis. Il s'agit d'une solution de 40 grs de NaCl par litre, d'une tension de 20 volts et d'une intensité de 8 ampères.

Le montage de la **figure III.9 (chapitre III)** est conçu pour répondre aux critères suivants :

- Centrer la pièce par rapport à l'électrode-outil et maintenir cette position pendant l'usinage. Ceci est assuré par le couvercle (10), dans lequel la pièce (8) et l'outil (12) viennent se loger ;
- Protéger les jauges de déformation ;
- Mesurer l'épaisseur de la pièce pendant l'usinage et l'épaisseur enlevée à tout instant.

Aussi pour mesurer les déformations, une jauge bidimensionnelle (ou deux jauges perpendiculaires) est collée sur la face opposée à l'enlèvement de matière. La mesure des déformations dues à l'enlèvement des couches s'est effectuée à l'aide d'un pont d'extensométrie Vishay. Les mesures sont faites à température constante maintenue aux environs de 30 –35 °C par circulation d'eau froide dans l'appareil de polissage électrolytique.

Après introduction des données et des paramètres relatifs à chaque (joint soudé et métal de base), les valeurs trouvées des contraintes résiduelles transversales  $\sigma_x^R$  et longitudinales  $\sigma_y^R$

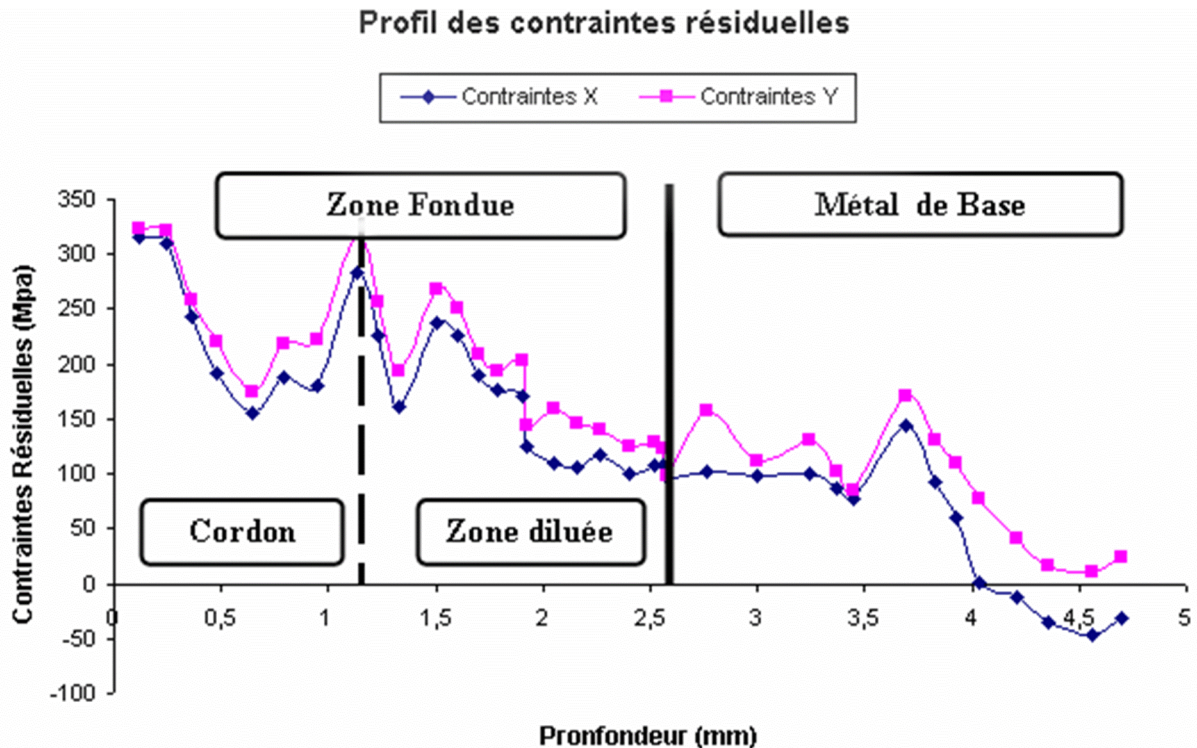
A différents niveaux sont représentées dans le tableau suivant :

Profondeur (mm)	Contraintes transversales	Contraintes longitudinales
	$\sigma_x^R$ (MPa)	$\sigma_y^R$ (MPa)
0,12	315,6794	322,5725
0,24	309,6154	321,4694
0,36	242,3874	258,2445
0.48	191,504	220,3433
0,64	156,165	174,1511

0,79	188,1759	218,2955
0,95	179,3851	221,78
1,13	282,4564	319,9702
1,23	226,0967	255,809
1,33	161,2742	193,0747
1,5	237,6837	267,6718
1,6	225,1068	250,1983
1,7	190,4824	208,2083
1,79	176,5125	194,305
1,9	171,0161	202,333
1,92	125,0482	144,825
2,05	109,2699	158,7876
2,16	106,4953	146,431
2,27	117,3255	141,0262
2,4	100,7452	125,5464
2,52	108,2682	129,6169
2,56	108,5053	123,6582
2,58	97,33586	99,06957
2,76	96,8179	158,0951
3	101,5123	123,7588
3,24	103,5771	121,2391
3,37	86,65497	102,8924
3,45	76,56295	85,82104
3,69	144,8041	170,4251
3,83	93,0532	131,6721
3,93	59,88596	108,7928
4,03	1,695434	77,65082

**Tableau IV.1:** Valeurs des contraintes longitudinales et transversales dans l'épaisseur de la pièce soudée.

Afin d'illustrer les résultats obtenus, nous avons réalisé le graphe de variation des contraintes en fonction de la profondeur explorée dans la pièce soudée citée plus haut:



**Figure IV.9:** Profil des contraintes résiduelles à différents niveaux d'une pièce soudée.

### Interprétation :

Les deux courbes présentées montrent que l'ordre de grandeur des contraintes résiduelles dans les pièces soudées est pratiquement différent dans les deux directions transversale et longitudinale. Les contraintes longitudinales (dans le sens du soudage) sont un peu plus importantes que les contraintes transversales (sens perpendiculaire) mais toujours de traction. Ces résultats sont similaires à ceux d'autres auteurs [7] voir la **figure I1.15**.

La zone fondue étant formée de 2 parties, les profils des contraintes également. La partie « cordon » possède des contraintes commençant à partir d'environ **320 MPa** suivi d'une chute vers le centre du cordon pour des valeurs de  $\sim$  **170 MPa** pour remonter ensuite à des valeurs similaires qu'au début.

Dans la zone diluée, les contraintes sont plutôt décroissantes jusqu'à environ 120 MPa à l'interface zone fondue – métal de base.

Dans le métal de base, on assiste à une régression progressive des contraintes jusqu'à s'annuler à des profondeurs d'environ 4,5 mm.

### **Discussion des résultats :**

On constate que les valeurs des contraintes résiduelles, pour l'énergie de soudage appliqué varient suivant l'épaisseur de la pièce.

La valeur maximale de la contrainte transversal  $\sigma_{xm} = 315.67$  MPa et longitudinal  $\sigma_{ym} = 322.5725$  MPa situé au niveau de la partie supérieure de la pièce donc dans le cordon de soudure, et la valeur minimale  $\sigma_{xr} = 1.70$  MPa,  $\sigma_{yr} = 77.65$  MPa dans la partie inférieure qui représente le métal de base. Cette variation résulte de la composition des constituants en présence (Martensite, bainite) dans la ZAT vu que cette zone subit des transformations allotropiques de la structure dues à l'élévation de la température durant le soudage ce qui implique une modification des propriétés mécaniques du métal, et aussi le retrait empêché imposé par le métal de base durant le refroidissement. On remarque aussi que les contraintes longitudinales sont plus importantes que les contraintes transversales.

# *Conclusion Générale*

## *Conclusion Générale*

Par ce travail, nous on a d'abord montré l'intérêt de la modélisation mathématique et son application de plus en plus grandissante dans le domaine de la métallurgie.

Le soudage est l'un des procédés métallurgiques où beaucoup de phénomènes sont à expliquer et modeler. La génération des contraintes résiduelles résulte d'un empêchement du retrait thermique au refroidissement faisant suite à une plastification associée à un échauffement localisé.

Le programme élaboré permet justement de calculer les contraintes résiduelles dans les pièces soudées. Suite à une mise en équations judicieuse avec prise en compte des différents paramètres, ce programme est conçu dans l'environnement « **Visual Basic** » qui est facile à utiliser.

Signalons toutefois qu'une technique expérimentale de détermination des déformations bidirectionnelles dans le cordon et dans le métal de base a été utilisée. Ces deux paramètres ainsi que les caractéristiques des métaux en présence sont nécessaires au fonctionnement du programme.

Les résultats sous forme de graphe sont en accord avec la littérature. Ils montrent que les profils de contraintes résiduelles longitudinales (sens de la soudure) et transversale (sens perpendiculaire à la soudure) sont différents. Ils sont généralement de traction dans le cordon et dans la zone fondue mais avec une décroissance vers les valeurs nulles dans les profondeurs du métal base.

Le programme peut donc être utilisé pour la prédétermination de contraintes résiduelles dans les procédés similaires de soudage moyennant la connaissance des déformations engendrées ainsi que les caractéristique intrinsèques des matériaux.

Il permet également d'entreprendre des précautions afin de minimiser leur ampleur sur la tenue du cordon sans risque de fissuration à froid. A cet effet, un choix judicieux des métaux (base et apport) et l'énergie de soudage  $E$  est nécessaire.

Pour cerner exactement les contours de cette problématique il serait plus intéressant de pouvoir prédire l'état de contraintes dans les matériaux soudé par élaboration d'un programme plus important sans avoir à recourir aux méthodes expérimentales, par exemple moyennant la **méthode des éléments finis.**

# *Références Bibliographique*

# *Références Bibliographique*

- [1] : B.CHASSIGNOLE, Thèse de doctorat, « Influence de la structure métallique des soudures en aciers inoxydables austénitiques sur le contrôle non destructif par ultrason »Insa-lyon.2000
- [2] : H.GRANJON. « Bases métallurgiques de soudage ».2<sup>ème</sup> édition. Publication du soudage et de ses application.Paris.1995.
- [3] : VARISSELLAZ. « Soudage et éléments de conception ». DUNOD .Paris.1998.
- [4] : ATS-OTUA. «Conseil pour le soudage des aciers inoxydables ». Paris.2000
- [5]: G.BERANGER, G .HENRY, G.LABBE, P.SOULIANAC. «Les aciers Spéciaux ».LA VOISIER.Paris.1996.
- [6] : Site internet.[www.soudure.com](http://www.soudure.com).
- [7] : L .DEPRADEUX, Thèse « Simulation numérique du soudage –Acier 316L. Validation sur cas tests de complexité croissante ».INSA de lyon2003.
- [8] : V.GUIPONT. Thèse : « Détermination Expérimentales de contraintes Résiduelles au sein d'assemblages Céramique/Métal réalisé par brasage : Application au couple nitrure de Silicium/acier inox doux »École central De Lyon 1994.
- [9] : G.MARDER, J.L.LEBRUN, «Détermination des contraintes résiduelles par Diffraction des rayons X ».Edition ENSSAM Paris 1987.
- [10] : J.LEMAITRE, J.L.CHARBOUCHE, « Mécanique des matériaux solides ». Edition DUNOD Paris 1985.
- [11] : D.KAEDER, « Les méthodes de mesure de contraintes résiduelles par Trépanage et par enlèvement de couches ».Edition IRSID .RE.1164, 1983.
- [12]: D.ROSENTHAL, J .T.NORTON « A method of measuring triaxial residual Stresses of plates ».Journal of American Welding society n°24, 1983.

- [13]: R.P.FRICK, G.A.GURTMAN, H.D.MERIWETHER, « Experimental Determination of residual stresses in orthotropic materials » Journal of Materials, 1967.
- [14]: M.LARACINE, M.VANNES, «Adaptation de la méthode d'enlèvement de Couches à la détermination des contraintes résiduelles dans le cas de Revêtement céramique épais ».CETIM, (septembre 1990).
- [15]: VISHAY Micromesures « Mesure des contraintes résiduelles par la méthode Du trou »NT47D, 1990.
- [16]: A.BENHARRATS, « Modélisation des contraintes résiduelles sur Bimatériau réalisé par projection thermique »PFE, Département de Métallurgie, ENP, 2000.
- [17]: J.HERNANDEZ, Thèse « Études de structure bimétalliques réalisées à L'aide de faisceaux de haute énergie (PLASMA PTA, LASER), Détermination et modélisation des contraintes résiduelles », INSA de Lyon.
- [18]: I.RECKEY, R.EVANS, « Introduction à la méthode des éléments fini », Eyrolles.Paris 1988.
- [19]: J.L.BATOZ, « Modélisation des structures par éléments finis », Edition Hermès.Paris 1983.
- [20]: J.P.GREMY, « Simulation », Encyclopédie universalis, Éditeur à Paris Volume 16(1985).
- [21]: O.K.ZIENKIEWICZ, « La méthode des éléments finis » ,troisième édition Mc Grawhil, (1979).
- [22]: Technique d'ingénieur, M300, M715.

# Annexes

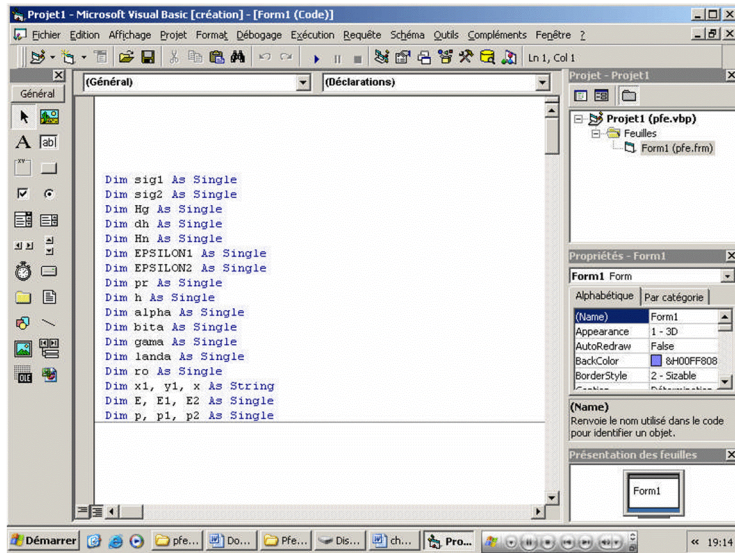
## I. Annexe:

### II.1. Visual Basic.

Visual Basic de Microsoft est l'outil le plus rapide et le plus facile à utiliser pour créer des applications Microsoft Windows®. Que vous soyez un programmeur professionnel où que vous découvriez la programmation sous Windows (voir la **figure II.1**), Visual Basic vous offre une gamme complète d'outils qui simplifient et accélèrent le développement d'applications.

Le mot « Visual » fait référence à la méthode utilisée pour créer l'interface graphique utilisateur (GUI, *Graphical User Interface*). Au lieu de rédiger de multiples lignes de code pour décrire l'apparence et l'emplacement des éléments d'interface, il vous suffit d'ajouter des objets prédéfinis à l'endroit adéquat sur l'écran. Si vous avez déjà utilisé des programmes de dessin tels que Paint, vous disposez de la plupart des compétences requises pour créer une interface utilisateur performante.

Le mot « Basic » fait référence au langage BASIC (*Beginners All-Purpose Symbolic Instruction Code*), langage le plus utilisé par les programmeurs depuis les débuts de l'informatique. Visual Basic constitue une évolution par rapport au langage BASIC initial et comporte aujourd'hui plusieurs centaines d'instructions, de fonctions et de mots clés, dont un grand nombre font directement référence à l'interface graphique utilisateur (GUI) de Windows. Si vous débutez, vous serez en mesure de créer des applications très utiles en n'apprenant que quelques mots clés ; et si vous êtes un programmeur professionnel, la puissance de ce langage vous permettra de développer tout ce qu'il est possible de développer avec tout autre langage de programmation Windows.



**Figure II.1:** Interface du Visual Basic