

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



Ecole Nationale polytechnique
DEPARTEMENT DE METALLURGIE

PROJET DE FIN D'ETUDES
POUR L'OBTENTION
DU DIPLOME D'INGENIEUR D'ETAT

ELABORATION D'UN PROGRAMME
MATHEMATIQUE DE DETERMINATION
DES CONTRAINTES RESIDUELLES DANS
LES MATERIAUX SOUDES

Réalisé par:

Mr GUERGOUR Mounir.

Proposé et dirigé par :

Mr : M. LARIBI.

Promotion 2005/2006.

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. LARIBI 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 métallurgie.

Mounir

ملخص:

لقد أصبحت تطبيقات التلحيم تكتسب أكثر فأكثر أهمية في ميدان الصناعة. لكن التلحيم غالبا ما يخلف قوى داخلية كبيرة. قمنا إذن؛ في خطوة أولى؛ بدراسة هذه القوى؛ ثم في خطوة ثانية ببناء برنامج لتعيينها في أي نقطة؛ بطريقة نزع الطبقات بالتتالي. كلمات المفاتيح: تلحيم؛ قوى داخلية؛ طريقة نزع الطبقات بالتتالي.

Résumé:

Les applications du soudage de plus en plus importance dans l'industrie. Les pièces soudées présentent des propriétés intéressantes. Cependant, le soudage est souvent la source de contraintes résiduelles importantes. Nous avons dans premier temps établi une étude répartition des contraintes. Dans un deuxième temps nous avons réalisé un programme, basé sur la méthode d'enlèvement de couches successive, permettant le calcul de ces contraintes en chaque point de la pièce.

Mots clé: soudage, contraintes résiduelles, méthode d'enlèvement de couches successive.

Abstract:

Applications of the welding are of growing in the industry. The treated pieces welded present some interesting properties. However, this welding is often the source of important residual stresses.

We have in a first time established a studied of stress distribution. In a second time we achieved a program, based on the removal coat successive method, permitting the determination of these stresses in every point of the piece.

Key words: welding, residual stress, the removal coat successive method.

Sommaire

Sommaire

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

CHAPITRE I

METALLURGIE DU SOUDAGE DES ACIERS

I.1. Introduction.....	4
I.2. Les différentes zones d'un assemblage soudé.....	4
I.2.1. Le métal de base	4
I.2.2. La zone fondue	5
I.2.3. La zone thermiquement affectée	5
I.2.4. Zone de liaison.....	5
I.3. Le soudage des aciers.....	6
I.3.1. Cas général.....	6
I.3.2. L'Arc Electrique.....	6
I.4. Etude thermique du soudage.....	7
I.4.1. Caractères généraux du cycle thermique et de la répartition thermique.....	8
I.4.1.1. Cycle thermique de soudage.....	8
I.4.1.2. Facteurs influençant le cycle et la répartition thermique.....	10
I.6. Fusion de l'électrode et des produits associés à l'électrode.....	14
I.7. Origine et influence des contraintes induites par le soudage.....	16
I.7.1. Origine.....	16
I.7.2. Effets possibles des déformations et contraintes résiduelles.....	18
I.11. Conclusion.....	19

CHAPITRE II

LES CONTRAINTES RESIDUELLES

II.1. Introduction.....	21
II.2. Les ordres de contraintes résiduelles.....	22
II.2.1. Les contraintes internes du troisième ordre.....	22
II.2.2. Les contraintes internes du deuxième ordre.....	22
II.2.3. Les contraintes internes du premier ordre.....	23
II.3. Méthodes expérimentales de détermination des contraintes internes.....	25
II.3.1. Méthodes non destructives.....	25
II.3.1.1. Analyse par diffraction des rayons X.....	25
II.3.1.2. Autres méthodes.....	28
II.3.2. Méthodes semi destructives.....	28
II.3.2.1. La méthode du trou.....	28
II.3.2.2. La méthode du Trépan.....	31
II.3.3. Méthodes destructives (Méthode d'enlèvement de couches successives).....	33
II.4. Conclusion.....	36

CHAPITRE III

MODELISATION MATHEMATIQUE

III.1. Introduction.....	36
III.2. Approche Numérique et Simulation du Modèle Mathématique.....	40
III.3. Hypothèses Simplificatrices de calcul	41
III.4. Formulation du problème.....	41
III.4.1. Elasticité.....	42
III.4.2. Rigidité des matériaux.....	42
III.4.3. Loi de Hooke.....	43
III.5. Modélisation mathématique.....	43
III.5.1. Présentation générale.....	43
III.5.2. Equilibre des forces et des moments des forces.....	46

III.5.3. Elaboration du programme.....	55
III.6. Application du modèle numérique proposé.....	56
III.7. Résultats et interprétations.....	60
Conclusion Générale.....	65
Références Bibliographiques.....	68
Annexes.....	71

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-équilibrées 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 fait 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 3 chapitres :

- Le premier chapitre concerne l'étude de la métallurgie de soudage des aciers.
- Le deuxième chapitre est réservé aux contraintes résiduelles, avec leurs ordres de grandeur et les méthodes utilisées pour les déterminer.
- Le troisième 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.

L'ensemble du travail est clôturé par une conclusion générale.

CHAPITRE I

METALLURGIE DU SOUDAGE
DES ACIERS

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 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 : [2]

- ❖ 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.

I.2. Les différentes zones d'un assemblage soudé.

I.2.1. Le 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 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. La 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]

C'est la région où l'état liquide a régné pendant l'exécution de la soudure. Elle a été obtenue par la fusion du métal de base, avec la précipitation plus au moins importante d'un métal d'apport. Le métal qui constitue la soudure est appelé métal fondu. Le métal apporté à l'état liquide, c'est-à-dire avant dilution, est appelé métal déposé. [2]

I.2.2. La zone thermiquement affectée. (ou zone affectée par la chaleur (Z.A.T))

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 à 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 transformation allotropique, mais seulement modification, par exemple, de la grosseur de la forme des grains du métal. La zone thermiquement affectée comporte différentes parties, on distingue: [2]

- Zone de surchauffe;
- Zone austénitique;
- Zone partiellement austénitisée.

I.2.3. 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]

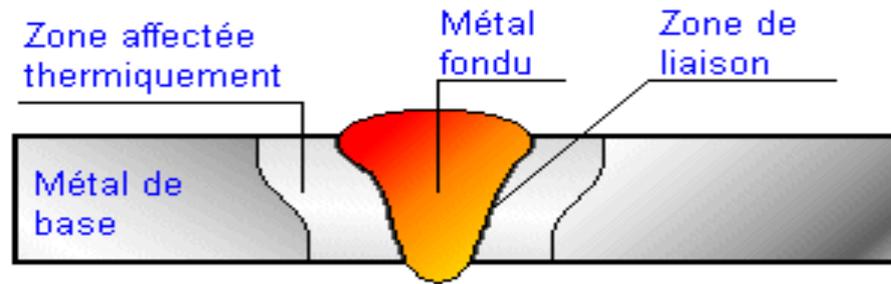


Figure I.1 Les zones constitutives de la soudure. [2]

I.3. Soudage des aciers.

I.3.1. 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 : [4]

- Une bonne continuité géométrique sans défauts de surface qui pourrait 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 ;
- Une bonne tenue mécanique qui sera généralement obtenue si la géométrie de l'assemblage d'une part et la composition chimique du métal fondu sont satisfaisantes, notamment, en ce qui concerne cette dernière, si les conditions nécessaires pour éviter la fissuration à chaud sont satisfaites.

I.3.2. Soudage à l'Arc Electrique.

C'est un procédé de soudure 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 (voir aussi **Annexe.I**). L'électrode est constituée d'un métal dont les caractéristiques mécaniques, chimiques et physiques sont très proches du métal des deux pièces à souder. [2]

L'arc électrique est la source de chaleur à base de nombreux procédés de soudage. Les raisons primordiales de ce choix sont : [2]

- 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 transport de matière qui s'instaurent naturellement et simultanément de l'électrode, lorsqu'elle est fusible, formant un dépôt se diluant 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.

Les procédés de soudage qui utilisent l'arc électrique comme source de fusion sont : [2]

- 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 (voir aussi (**Annexe.I**), procédé de soudage TIG).

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.

I.4. Etude 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, 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).

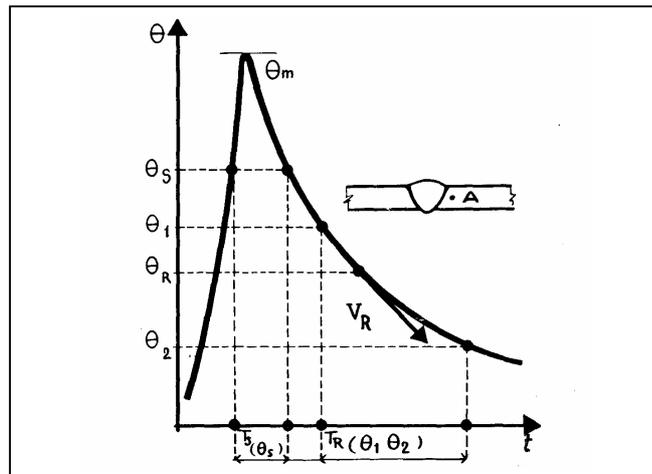


Figure I.2 : $\theta = f(t)$, cycle thermique d'un point A d'une soudure. [2]

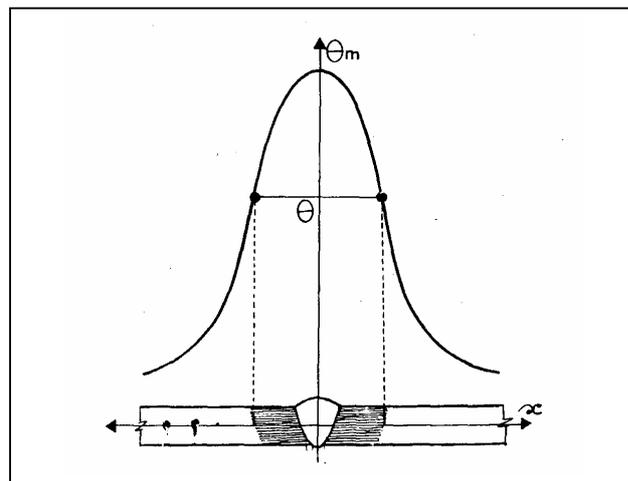


Figure I.3 : $\theta = f(x)$, répartition de la température dans une soudure. [2]

I.4.1. Caractères généraux du cycle thermique et de la répartition thermique.

I.4.1.1. Cycle thermique de soudage. Courbes température-temps

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, nous pouvons 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 : [2]

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 θ_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 θ_{mA} , θ_{mB} , ...etc, qui sont décroissantes à partir de la ligne de soudure, sont franchies pour des temps T_{mA} , T_{mB} , ...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, 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 θ_2 à θ_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.5**). On choisit le plus souvent comme référence le temps de refroidissement entre 800 et 500°.

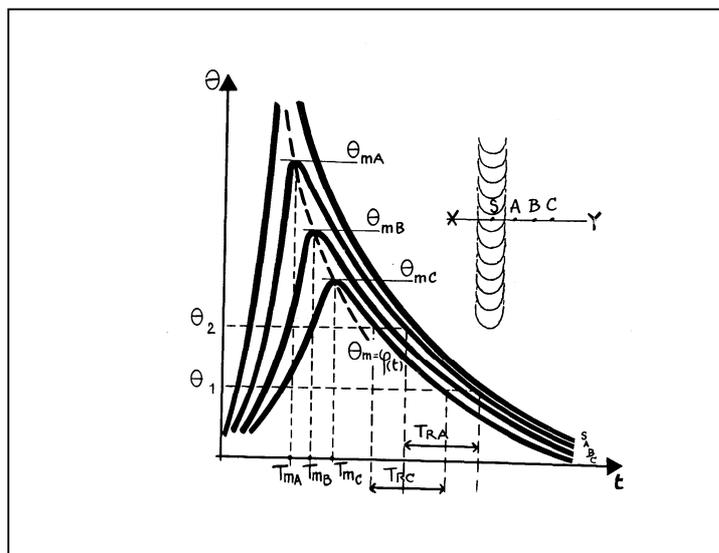


Figure I.4 : Cycles thermiques le long du cordon de soudure. [2]

I.4.1.2. Facteurs influençant le cycle et la répartition thermique.

1) Influence du métal de base :

Il existe trois paramètres qui entrent en jeu : [2]

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

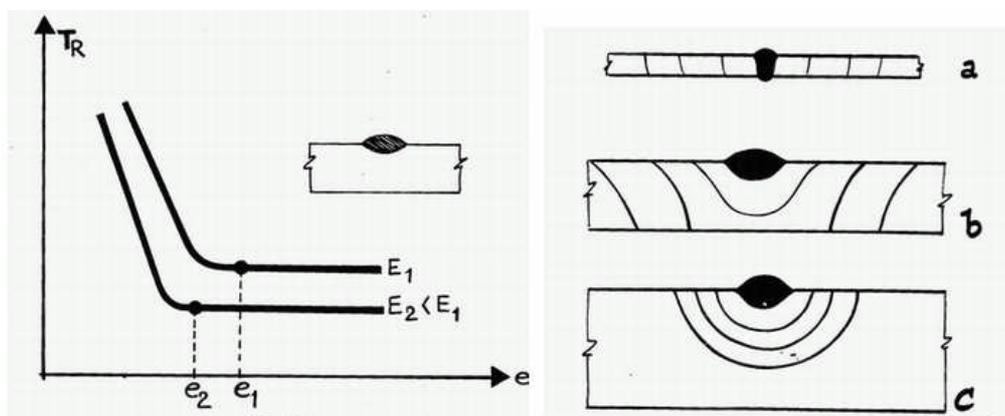


Figure I.5 : Influence de la masse des pièces sur le cycle thermique de soudage. [2]

- 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 II.6.a** montrent que pour des températures initiales θ_0 et θ_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.6.b**), on peut voir que le préchauffage augmente l'étendue de la zone affectée thermiquement (le préchauffage diminue le gradient de température).

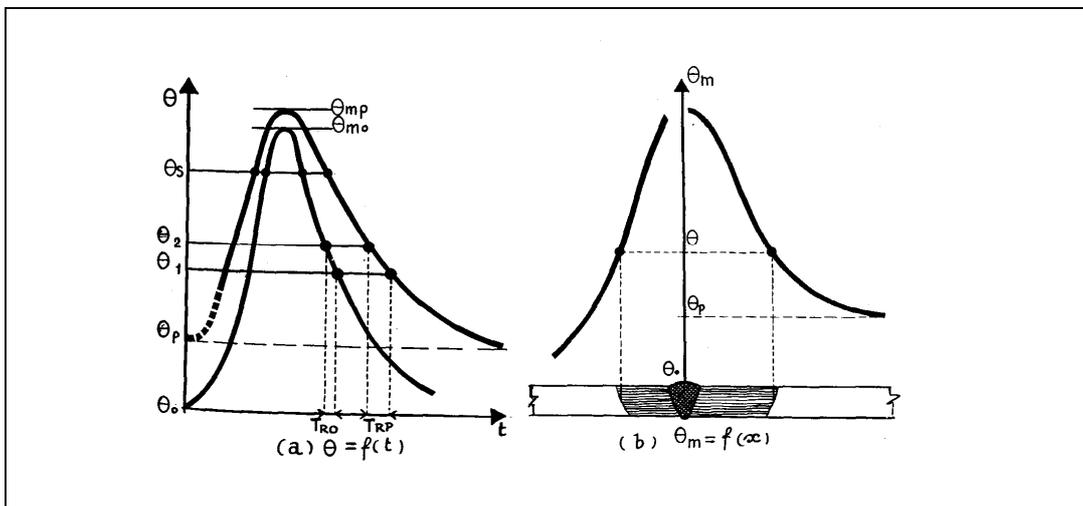


Figure I.6 : Influence de la température initiale sur le cycle thermique de soudage. [2]

2) Influence des conditions de soudage: Energie et environnement

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 : [2]

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

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 déposition 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.

La **figure I.7** 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 (θ_{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.7**) 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]

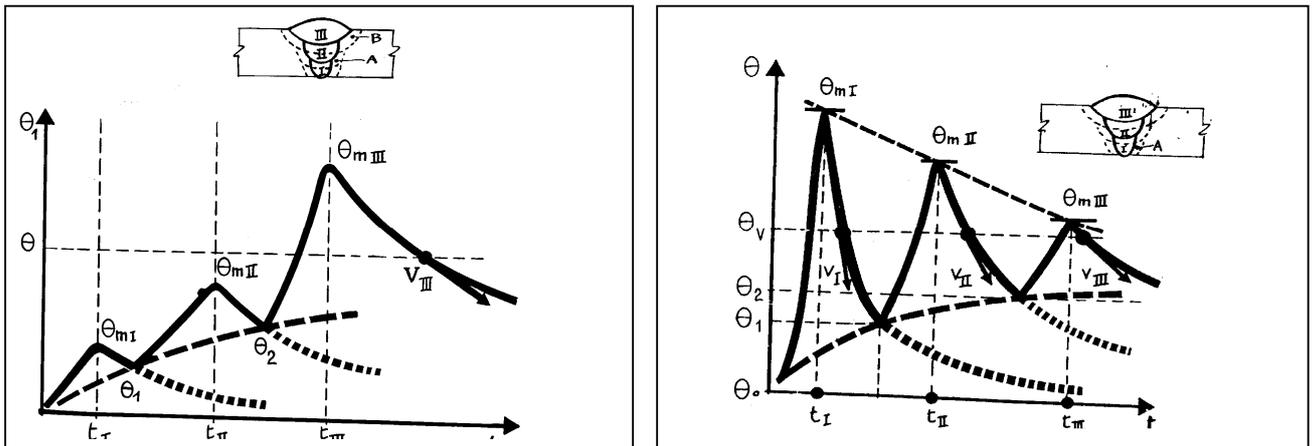


Figure I.7 : Influence du nombre de passes sur le cycle thermique de soudage. [2]

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.7**).
- Suivant la disposition des passes, une même température θ (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 (ou aux dernières) 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.

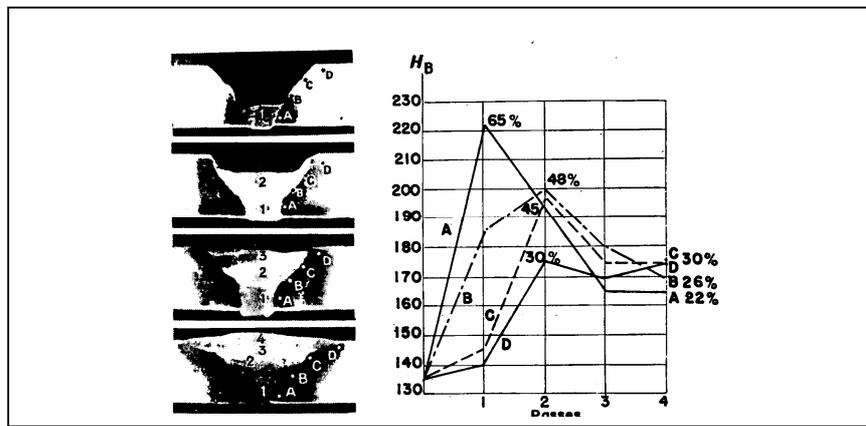


Figure I.8 : Influence des passes successives sur la variation de la dureté de la zone de surchauffe. [2]

I.6. Fusion de l'électrode et des produits associés à l'électrode.

Le métal qui fond à l'extrémité de l'électrode est ensuite transféré dans l'arc (la fusion et la surchauffe qui l'accompagne peuvent engendrer des dégagements gazeux qui projettent le métal fondu). Ce transfert peut se faire selon des modes différents en fonction de la polarité de l'électrode (anode ou cathode) et de la densité de courant. La fusion des produits minéraux (enrobage, flux, fourrage...) associés à l'électrode met au contact du métal fondu un laitier (assurant sa protection contre l'agression de l'atmosphère ambiante) qui, à l'état liquide, peut réagir avec lui. Ces réactions n'atteindront pas l'équilibre : [6]

- Dans tous les cas, les proportions des éléments actifs devront excéder sensiblement celles correspondant à l'équilibre pour tenir compte de la brièveté de la réaction.
- Des éléments métalliques (fer, chrome, nickel...) sont parfois incorporés, sous forme de poudre, dans les enrobages les fourrages; ces éléments qui vont fondre et s'incorporer au métal liquide, peuvent provoquer ainsi, d'une part, un accroissement du volume de ce dernier (augmentation du rendement par ajout de poudre de fer) et d'autre part un enrichissement en éléments d'alliages en vue d'améliorer les qualités du métal fondu (cas de Cr, ni, Mo...).

La 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 (A+B) de la soudure par la formule suivante : [6]

$$\text{Taux de dilution (\%)} = \frac{\text{volume de métal de base fondu}}{\text{volume du métal fondu}} = \frac{B}{A + B}$$

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).

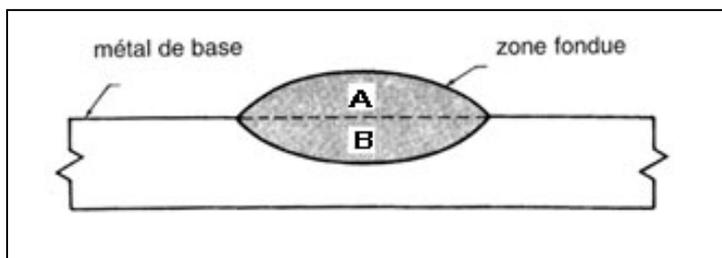


Figure I.9 : Dilution en soudage. [6]

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 du ou 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 et 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. [6]

I.7. Origine et influence des contraintes induites par le soudage.

I.7.1. 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. [2] 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. [2]

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 I.10**): [2]

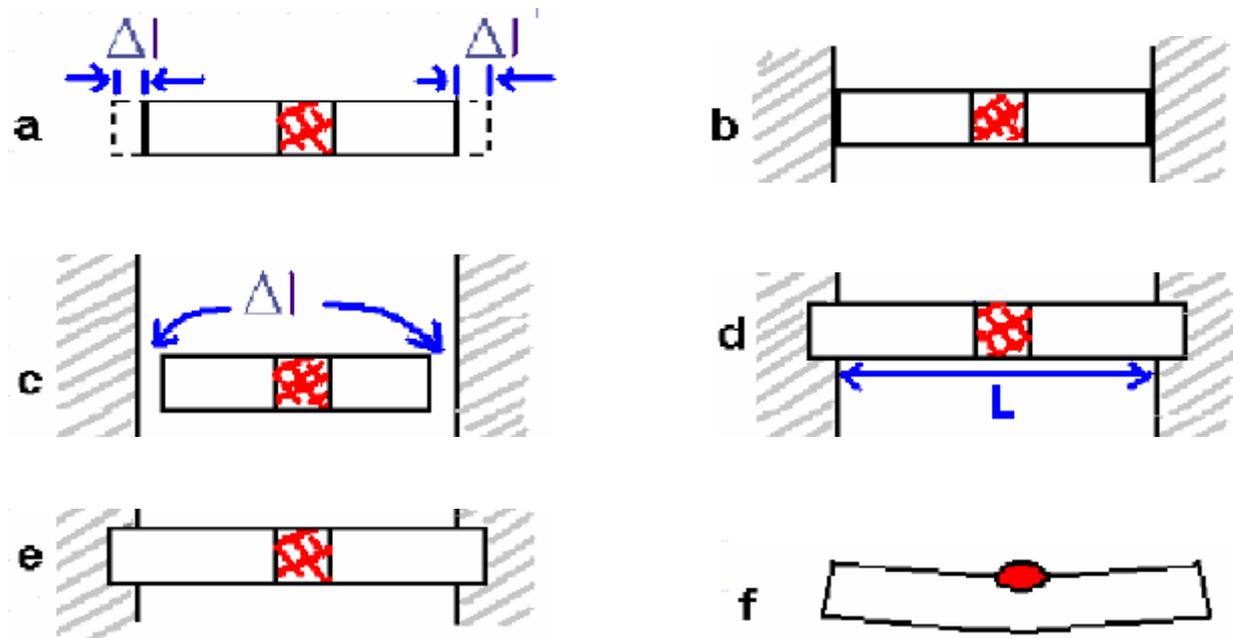


Figure I.10 : Contraintes résiduelles développées lors du soudage. [2]

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 : [2]

- Les contraintes résiduelles résultant 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 (**fig I.11**);
- La valeur des contraintes résiduelles est d'autant plus élevée que les déformations sont plus empêchées.
- Les contraintes résiduelles sont un peu plus élevées dans la zone fondue (**fig I.12**)

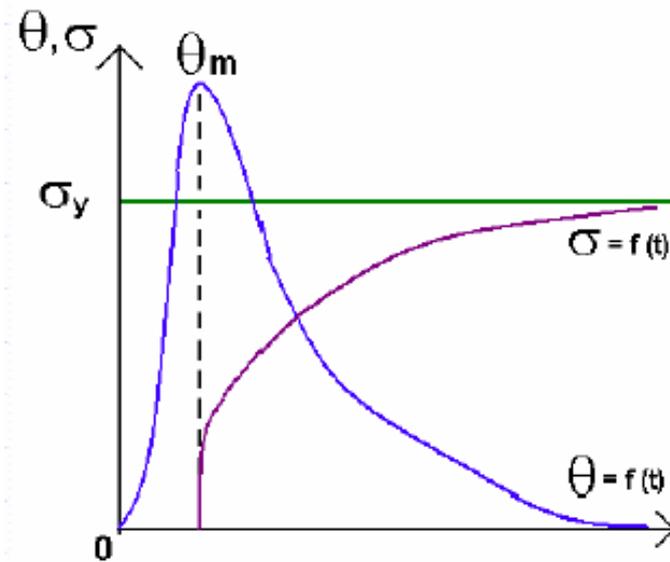


Figure I.11 : Courbes de contraintes et de température suivant le temps de soudage. [2]

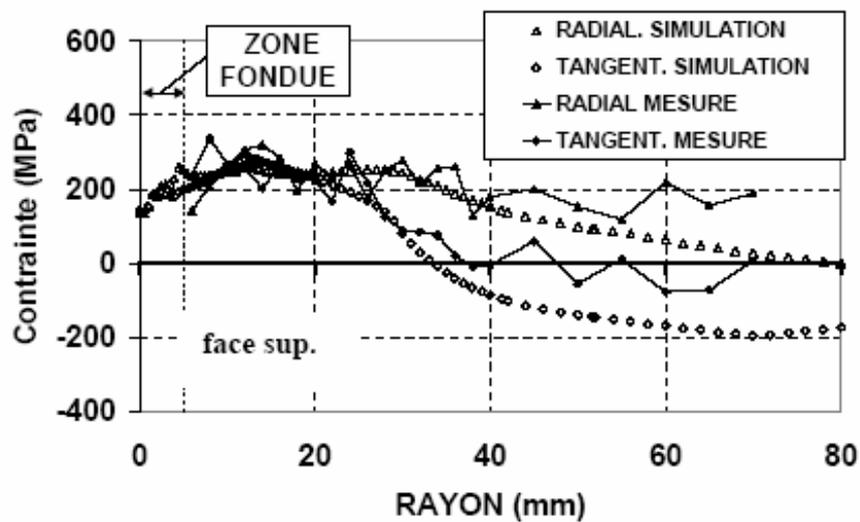


Figure I.12 : Contraintes résiduelles radiales et circonférentielles calculées et mesurées (diffraction X) en fonction du rayon. [7]

I.7.2. 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.

I.5. Conclusion.

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

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.

CHAPITRE II

LES CONTRAINTES RESIDUELLES

II.1. Introduction.

L'état mécanique du matériau est entièrement défini par les sollicitations extérieures auxquelles est ou a été soumise 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 thermo-chimique 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]

II.2. Les ordres de contraintes résiduelles.

II.2.1. Les 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. Nous pouvons distinguer, selon la nature et la configuration de ces défauts, deux niveaux de contraintes : [9]

- 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. [9]

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. [9]

II.2.2. Les 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. [9]

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. [9]

II.2.3. Les contraintes internes du premier ordre.

Ces contraintes intéressent un volume relativement important de matière et c'est pour cette raison qu'elles sont parfois **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 : [9]

- **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 dilatation incompatibles avec les déformations élastiques du matériau aux températures considérées.
- **Mécanique**, comme conséquence d'un écrouissage hétérogène (laminage, grenailage, étirage,...). [9]

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

La **Figure II.1** suivante illustre le champ de contraintes internes dans un échantillon selon une direction x , [9] tel que :

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

Où :

- σ_x est la contrainte totale suivant X.
- σ_x^3 est la composante du troisième ordre.
- σ_x^2 est la composante du deuxième ordre.
- σ_x^1 est la composante du premier ordre.

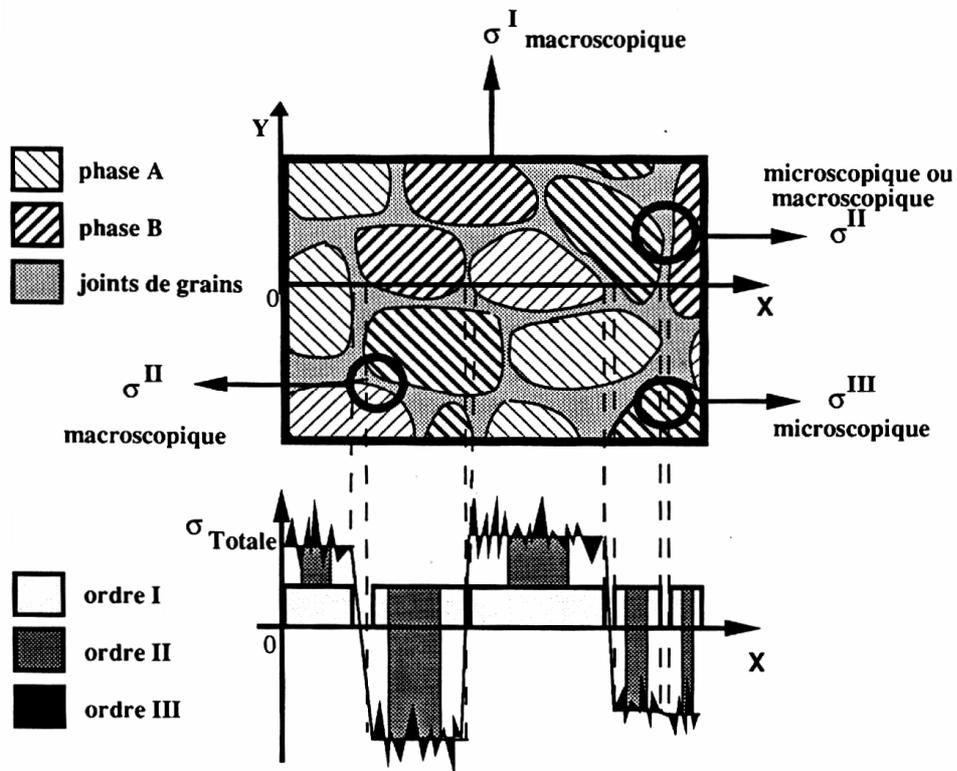


Figure II.1 : Illustration des différents ordres de contraintes. [8]

Le **tableau II.1** suivant présente l'ordre et l'origine des contraintes résiduelles à différents échelles d'un matériau :

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

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

II.3. Méthodes expérimentales de détermination les contraintes internes.

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 qu l'on classe en trois catégories : [13]

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

II.3.1. 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 convenablement choisie qui varie en fonction du champ de contraintes imposées.

II.3.1.1. 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 :

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

Avec :

θ : Angle de diffraction (de Bragg).

λ : Longueur d'onde des rayons X incidents.

n : Nombre entier naturel.

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

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

Après division par d_0 on obtient :

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

Et la variation totale de l'angle de diffraction ε s'écrit :

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

La **Figure II.2** suivante montre l'effet de la contrainte sur l'angle de diffraction.

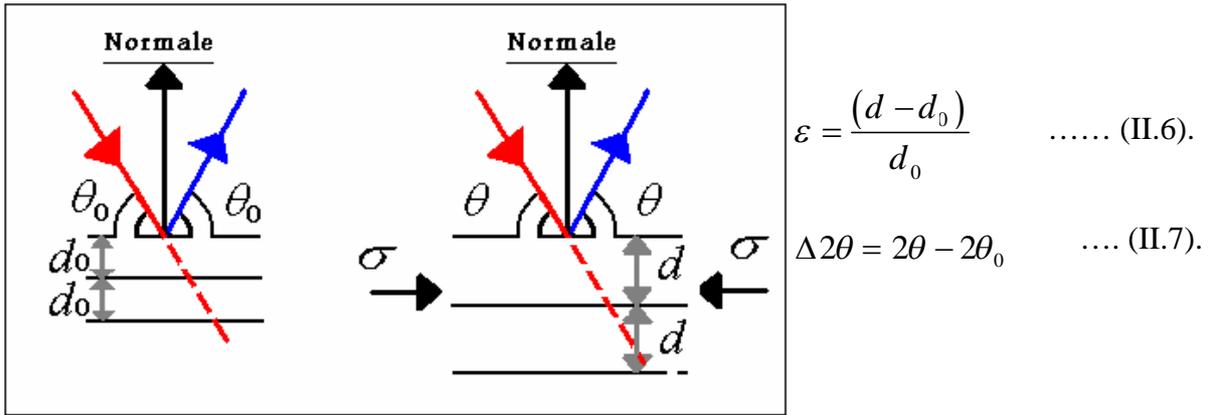


Figure II.2 : Schématisation de l'effet des contraintes sur l'angle de diffraction. [9]

Les variations de d_{hkl} ont différents effets sur la déformation des raies de diffractions selon leur 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.

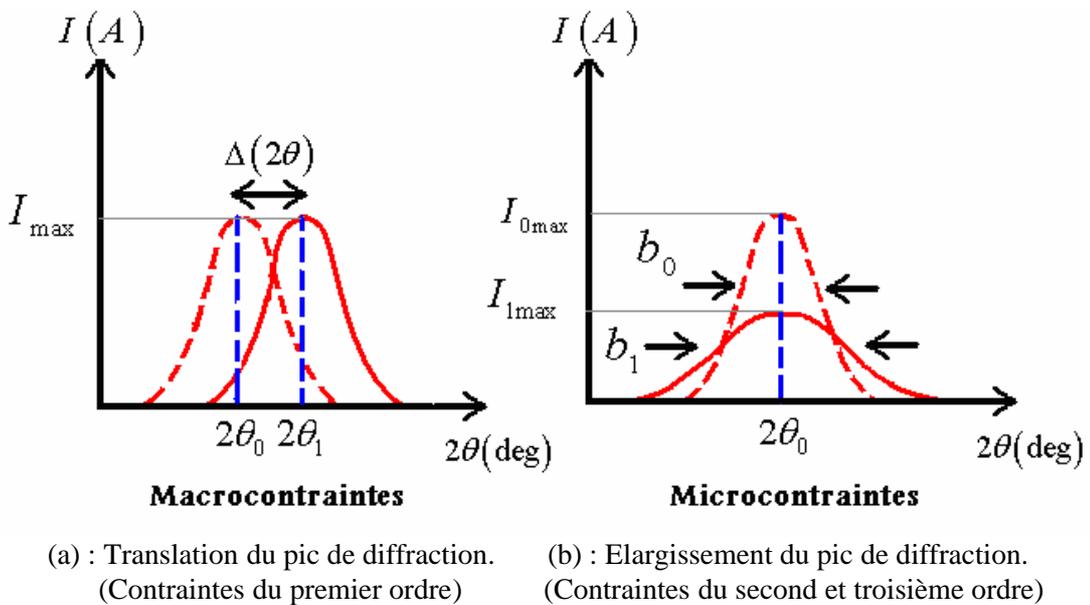


Figure II.3 : L'effet des contraintes sur les pics de diffraction. [9]

II.3.1.2. Autres méthodes.

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

II.3.2. Méthodes semi destructives.

II.3.2.1. La méthode du trou. [15]

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

- a) Approximativement égale à son diamètre.
- b) 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.

Théorie du trou débouchant : [15]

La **Figure II.4** ci-dessous représente une plaque mince soumise à un de contrainte uniforme σ_x . L'état initial de contraintes en tout point $\mathbf{P}(R, \alpha)$ s'exprime en coordonnées polaires par :

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

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

$$t'_{r\theta} = \frac{-\sigma_x}{2} \sin(2\alpha)$$

II.10

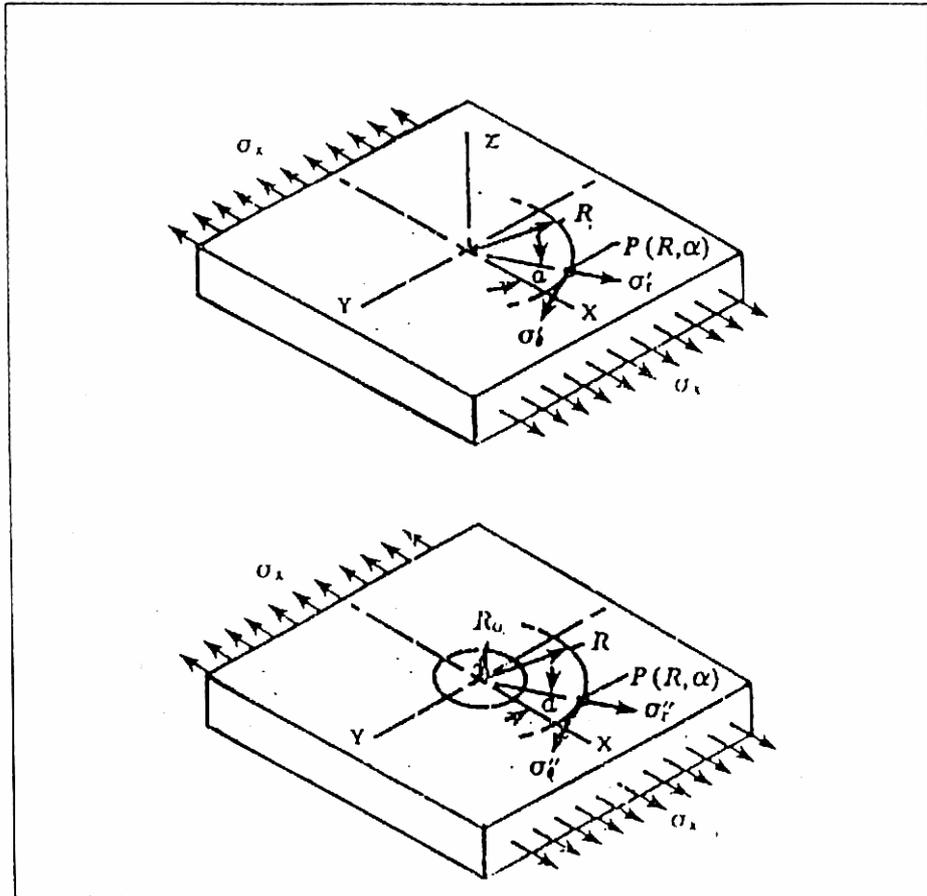


Figure II.4 : Etat de contraintes au point $P(R, \alpha)$ avant et après perçage du trou. [16]

Après perçage d'un petit trou de rayon R_0 , les contraintes à proximité sont différentes. En effet, les contraintes σ_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 un point $P(R, \alpha)$:

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

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

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

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

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

$$\Delta\sigma_r = \sigma'_r - \sigma_r \quad \text{II.14}$$

$$\Delta\sigma_\theta = \sigma'_\theta - \sigma_\theta \quad \text{II.15}$$

$$\Delta\sigma_{r\theta} = \sigma'_{r\theta} - \sigma_{r\theta} \quad \text{II.16}$$

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) :

$$\varepsilon_r = -\frac{\sigma_x(1+\nu)}{2E} \times \left[\frac{1}{r^2} - \frac{3}{r^4} \times \cos(2\alpha) + \frac{4}{r^2 \times (1+\nu)} \times \cos(2\alpha) \right] \quad \text{II.17}$$

$$\varepsilon_\theta = -\frac{\sigma_x(1+\nu)}{2E} \times \left[-\frac{1}{r^2} + \frac{3}{r^4} \times \cos(2\alpha) - \frac{4}{r^2 \times (1+\nu)} \times \cos(2\alpha) \right] \quad \text{II.18}$$

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 aire par rapport à celle du trou débouchant. Il s'agit du rapport $\frac{Z}{D_0}$ où Z et D_0 sont la profondeur et le diamètre du trou respectivement.

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 au maximum selon la norme ASTM E 837-85)

II.3.2.2. La 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 :

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

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

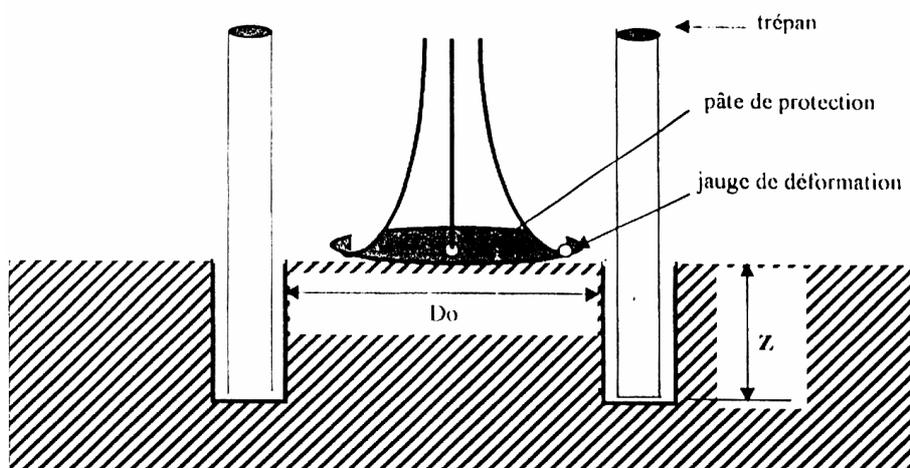


Figure II.5 : Schéma de la méthode du trépan. [16]

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 \mathbf{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 se 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 II.5**)

La diamètre du trépan doit être suffisamment petit pour assurer la relaxation complète, mais pas trop, afin de 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 $R(z)$ 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 7 millimètres.

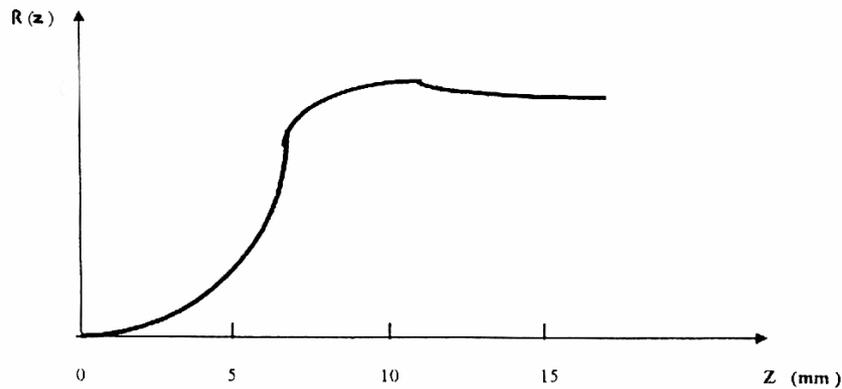


Figure II.6 : Signal de déformation de la relaxation en fonction de la profondeur trépanée. [16]

Si l'on est amené à faire plusieurs mesures sur une pièce, il faut s'assurer que la trépanation en un point, ne modifie pas l'état des contraintes en un point voisin. Pratiquement, ceci est garanti par un espacement des points de mesures de 70 mm pour un trépan de diamètre extérieur de 20 mm.

II.3.3. Méthodes destructives. Méthode d'enlèvement de couches successive

On traite ici un exemple qui est l'enlèvement de couches successives : [11]

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, σ_z est très inférieure à σ_x et σ_y .

De plus, les contraintes σ_x et σ_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 Δh 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 σ_x et σ_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 : [11]

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.

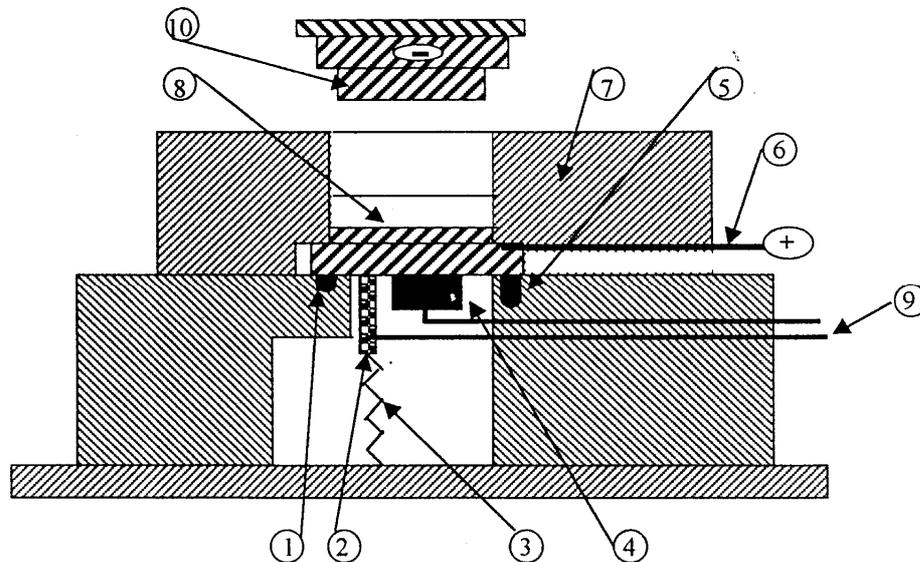


Figure II.7 : Machine d'usinage électrochimique. [13]

- 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) Electrode outil.

II.4. Conclusion.

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 dans l'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]

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

Critères de choix d'une méthode	Méthode du trépan	Méthode d'enlèvement de couches
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.	$\pm 30 \frac{N}{mm^2}$.	$\pm 40 \frac{N}{mm^2}$.
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.

Tableau II.2 Comparaison entre la méthode du trépan et la méthode d'enlèvement des couches.

[16]

CHAPITRE III

MODELISATION MATHÉMATIQUE

III.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 qui sont vues au deuxième 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.

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 :[17]

- 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 utilisés. 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.

III.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 : [19]

- 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 sont régissent ces problèmes.

La figure suivante donne les grandes étapes vers une approche analytique et une approche numérique.

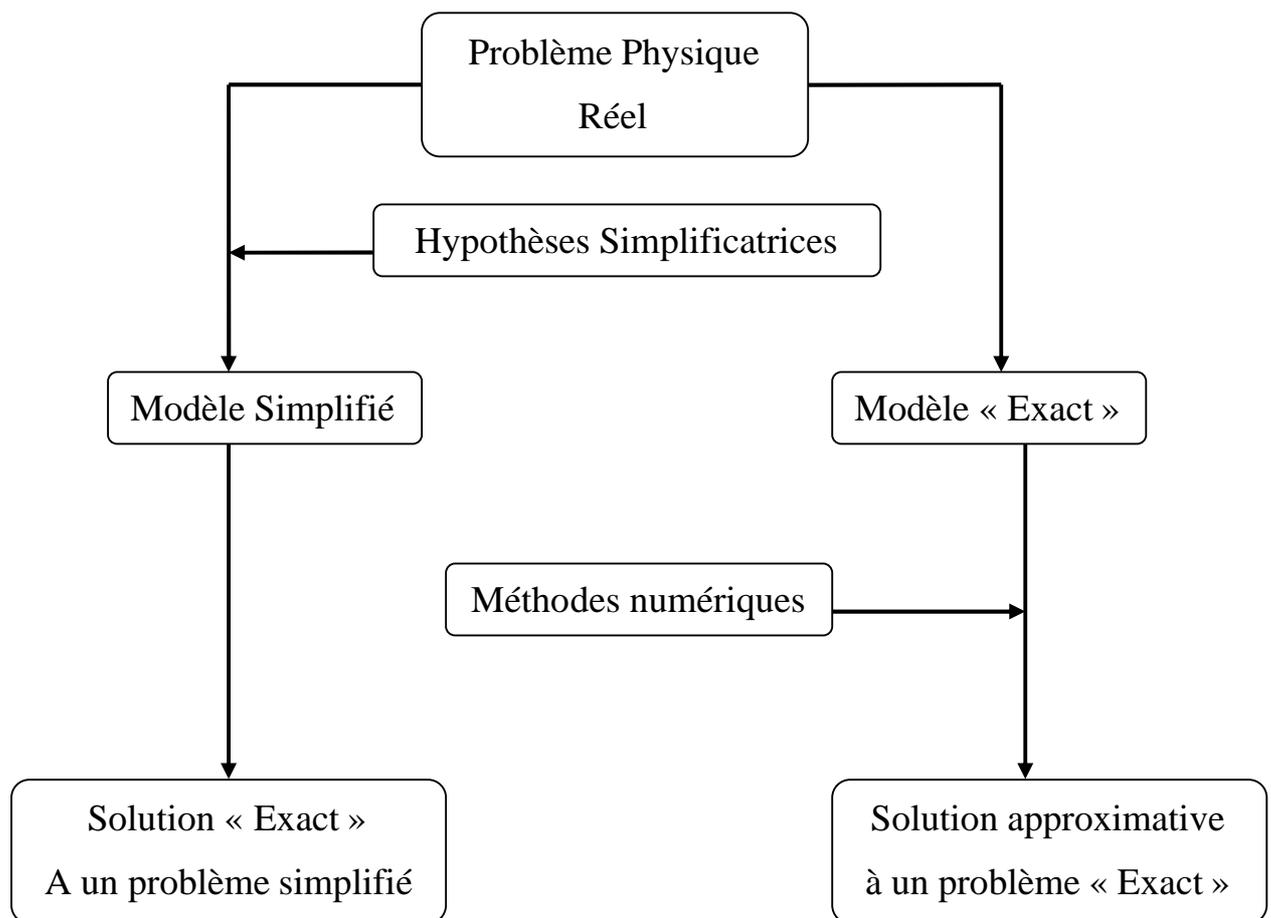


Figure III.1 : Les deux alternatives de résolution des E.D.P et des intégrales. [18]

Les méthodes numériques ont permis de résoudre des modèles mathématiques de plus en plus complexes, provenant de problèmes physiques de plus en plus sophistiqués.[20]

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

III.3. Hypothèses 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 prises 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 ν).
- Les matériaux utilisés ne contiennent pas de sources internes de chaleur.
- Le substrat est maintenu immobile lors du soudage.

III.4. Formulation du problème.

En se basant sur les deux chapitres précédents, nous pouvons maintenant présenter la problématique qui fait l'objet de notre étude, qui porte sur la détermination 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, nous allons donner des notions de base sur l'élasticité, la rigidité des matériaux et la loi de Hooke.

III.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]

III.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 ε tel que : [22]

$$\sigma = E \times \varepsilon \quad \text{III.1}$$

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.

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 : [22]

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

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

III.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]

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

δ : 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 :

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

III.5. Modélisation mathématique.

III.5.1. Présentation générale.

Nous allons citer 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.

Lorsque le matériau a, dans la zone usinée, une hauteur $h+dh$, il règne à la côte 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 côte z sera donc : [19]

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

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 : [19]

- 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 II.7**) [14]

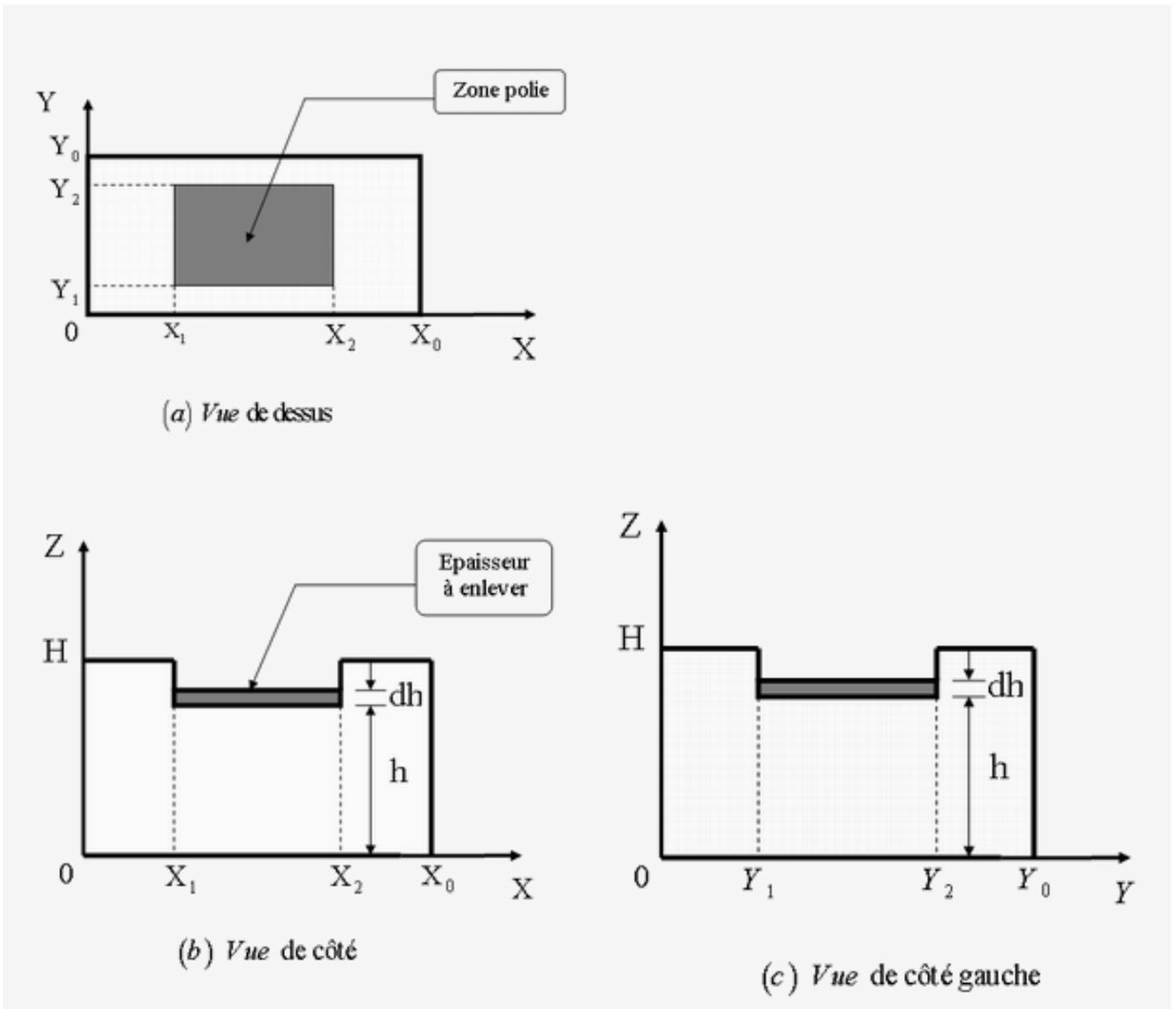


Figure III.2 : Schéma de la géométrie de la pièce.

III.5.2. Equilibre 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 :

$$\iint_{S_x} \sigma_x (Z) dydz = 0 \quad (\text{Équilibre des efforts}) \quad \text{III.7}$$

Avec :

$$\int_0^H \int_0^{Y_0} \sigma_x (Z) dydz = \int_0^H \int_0^{Y_1} \sigma_x (Z) dydz + \int_0^{h+dh} \int_{Y_1}^{Y_2} \sigma_x (Z) dydz + \int_0^H \int_{Y_2}^{Y_0} \sigma_x (Z) dydz \quad \text{III.8}$$

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

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

On pose :

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

Puisque, par définition dh est petit, on aura :

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

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

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

Ou encore :

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

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

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

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

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

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

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

Soit encore :

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

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

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

Que l'on peut développer :

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

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

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

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

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

En multipliant la relation (III.10) :

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

On aura donc :

$$(r-1) \int_0^H d\sigma_x(z) \left[z - \frac{H}{2} \right] dz + \int_0^h d\sigma_x(z) \left[z - \frac{h}{2} \right] dz = \sigma_x(h) \frac{h}{2} dh + (r-1) \frac{dh}{2} \int_0^H \sigma_x(z) dz + \frac{dh^2}{2} \sigma_x(h) \quad \text{III.22}$$

Si nous admettons comme précédemment que :

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

La relation (III.22) s'écrira alors :

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

On pose :

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

On aura alors :

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

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

Donc :

$$d\sigma_x(z) = \frac{6\sigma_x(h)(h+dh)dh}{H^3(r-1)+h^3} \times z + \frac{\sigma_x(h)dh}{H(r-1)+h} - \frac{6\sigma_x(h)[H^2(r-1)+h^2]dh}{[H^3(r-1)+h^3][H(r-1)+h]} \quad \text{III.26}$$

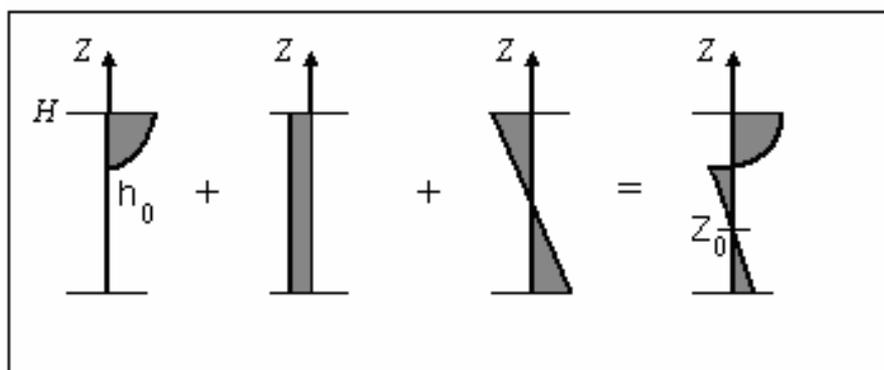
Contraintes prises en compte : [8]

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

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

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 III.3 : Schéma de calcul des contraintes. [8]

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

Equations des forces :

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

Equations des moments :

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

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

$$M_y = \int_0^H \sigma_x^F(z) \left(z - \frac{H}{2} \right) dz = - \int_{h0}^H \sigma_x^R(z) \left(z - \frac{H}{2} \right) dz$$

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

Donc :

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

D'après l'équation (III.29), on a :

$$M_y = \int_0^H \sigma_x^F(z) \left(z - \frac{H}{2} \right) dz = - \int_{h0}^H \sigma_x^R(z) \left(z - \frac{H}{2} \right) dz \quad \text{III.32}$$

Donc :

$$\sigma_x^F(z) = - \left[\int_{h0}^H \sigma_x^R(z) \left(z - \frac{H}{2} \right) dz \right] \times \frac{6(2z - H)}{Y_0 \times H^3} \quad \text{III.33}$$

D'après l'équation (III.28), on a :

$$\sigma_x^N(z) = - \frac{1}{H} \int_{h0}^H \sigma_x^R(z) dz \quad \text{III.34}$$

On pose N_x^R et M_y^R avec :

$$N_x^R = \int_{h0}^H \sigma_x^R(z) dz \quad \text{III.35}$$

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

Nous aurons alors :

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

Et

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

On pose A_X et B_X telle que :

$$A_X = \int_{h_0}^H \sigma_x^V(z) dz \quad \text{III.39}$$

Et

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

Sachant que : $\sigma_x^V(z) = \sigma_x^R(z) + \sigma_x^N(z) + \sigma_x^F(z)$ on aura :

$$\left\{ \begin{aligned} A_X &= \int_{h_0}^H -\frac{1}{H} N_X^R dz + \int_{h_0}^H -\frac{6(2z - H)}{Y_0 \times H^3} \times M_Y^R dz + N_X^R \end{aligned} \right. \quad \text{III.41}$$

$$\left\{ \begin{aligned} B_X &= \int_{h_0}^H -\frac{1}{H} N_X^R \left(z - \frac{H}{2} \right) dz + \int_{h_0}^H -\frac{6(2z - H)}{Y_0 \times H^3} \times M_Y^R \left(z - \frac{H}{2} \right) dz + M_X^R \end{aligned} \right. \quad \text{III.42}$$

Soit en regroupant et en intégrant :

$$\left\{ \begin{array}{l} A_X = \frac{h_0}{H} \times N_X^R + \frac{6h_0}{H^3} (h_0 - H) \times M_Y^R \end{array} \right. \quad \text{III.44}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} B_X = \frac{h_0(h_0 - H)}{2H} \times N_X^R + \frac{(3H^2 \times h_0 - 6H \times h_0^2 + 4h_0^3)}{H^3} \times M_Y^R \end{array} \right. \quad \text{III.43}$$

On pose :

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

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

Donc :

$$\begin{cases} A_X = \beta \times N_X^R + \delta \times M_Y^R \\ B_X = \gamma \times N_X^R + \eta \times M_Y^R \end{cases}$$

$$N_X^R = \frac{(\eta \times A_X - \delta \times B_X)}{\rho} \quad \rho = \beta \times \eta - \gamma \times \delta$$

$$M_Y^R = \frac{(\beta \times A_X - \gamma \times B_X)}{\rho}$$

On trouve

$$N_X^R = \frac{(\eta \times A_X - \delta \times B_X)}{\rho} \quad \text{III.45}$$

$$M_Y^R = \frac{(\beta \times A_X - \gamma \times B_X)}{\rho} \quad \text{III.46}$$

$$\text{Avec : } \quad \rho = \beta \times \eta - \gamma \times \delta$$

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 :

L'équilibre des forces s'écrit :

$$\sigma_{X,Y}(z_i)\Delta x_i = \int_{x_i}^0 \Delta\sigma_{X,Y}(z_i)dz \quad \text{III.47}$$

L'équilibre des moments des forces s'écrit :

$$\sigma_{X,Y}(z_i)x_i\Delta x_i = \int_{x_i}^0 \Delta\sigma_{X,Y}(z_i)z_i dz \quad \text{III.48}$$

Sous le signe somme des équations (III.47) et (III.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 i ème couche est remplacée par son expression donnée par la loi de Hooke généralisée écrite ci-dessous :

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

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

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

Tel que :

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

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

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

$$\Delta\sigma_X^R = \left[\frac{h^2 + 7 \times h \times dh + dh^2}{-2h^2 + h \times dh + dh^2} \right] \times \frac{E}{1 - \nu^2} [\Delta\varepsilon_X + \nu \times \Delta\varepsilon_Y] \quad \text{III.52}$$

Avec le même raisonnement, on retrouve σ_Y^R :

$$\Delta\sigma_Y^R = \left[\frac{h^2 + 7 \times h \times dh + dh^2}{-2h^2 + h \times dh + dh^2} \right] \times \frac{E}{1 - \nu^2} [\Delta\varepsilon_Y + \nu \times \Delta\varepsilon_X] \quad \text{III.53}$$

III.5.3. Elaboration 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 :

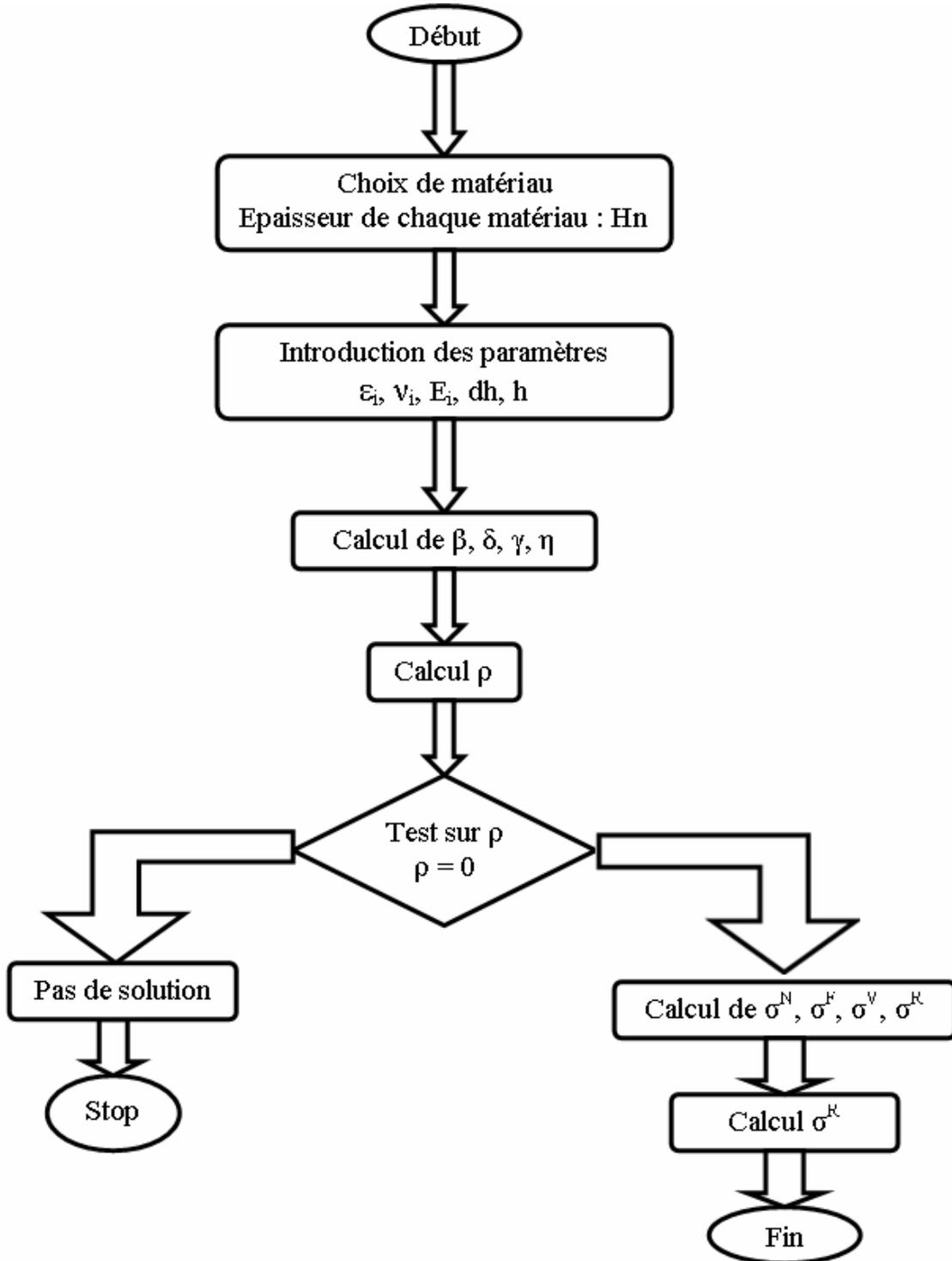


Figure III.4 : Organigramme simplifié du modèle.

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 , ν_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.

III.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) ϵ_X et ϵ_Y ;
- ✓ De l'épaisseur des couches enlevées dh ;
- ✓ Des valeurs constantes élastiques « ν » 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 III.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 transversale 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 III.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 III.6**).
- ✚ L'injection des données continue et les résultats pour chaque passe seront affichés complètement dans le tableau indiqué à droite (voir **figure III.7**).

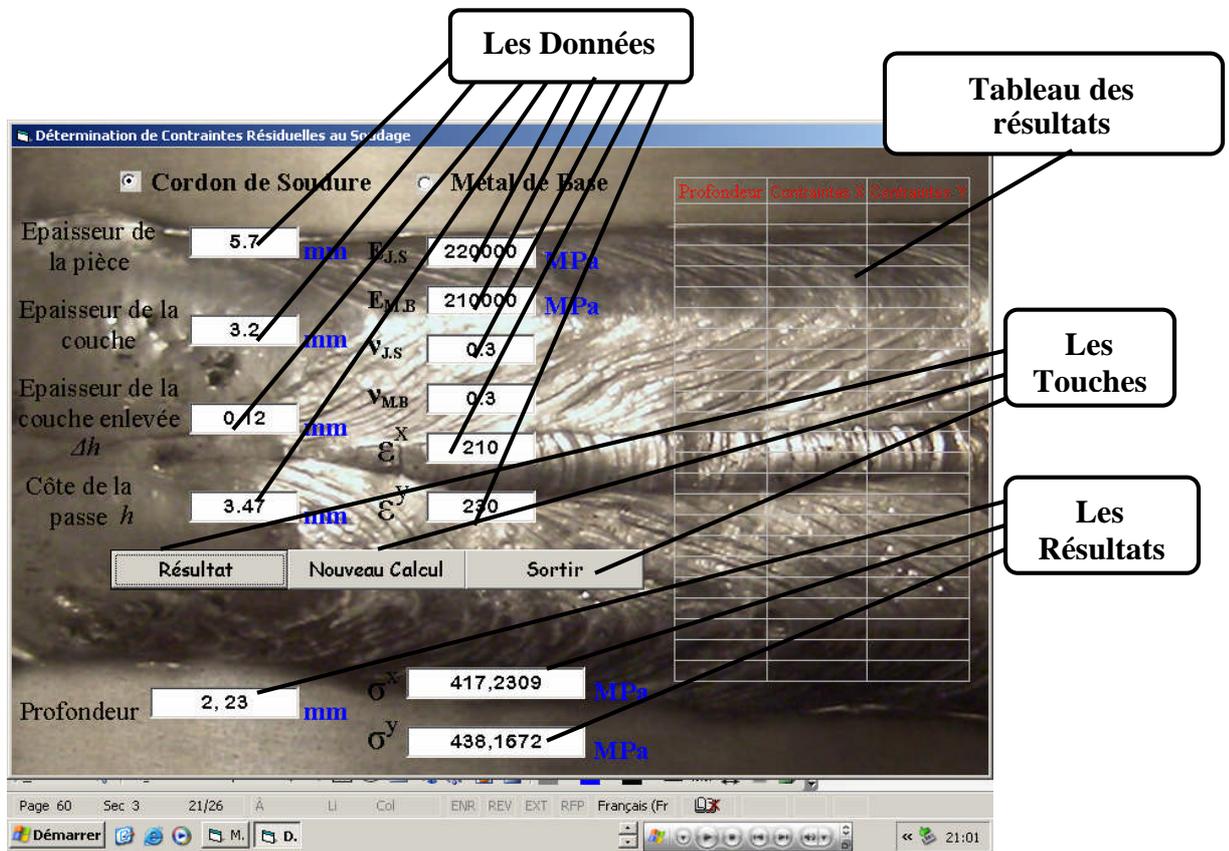


Figure III.5: Interface du Modèle numérique réalisé.



Figure III.6: affichage des remarques.

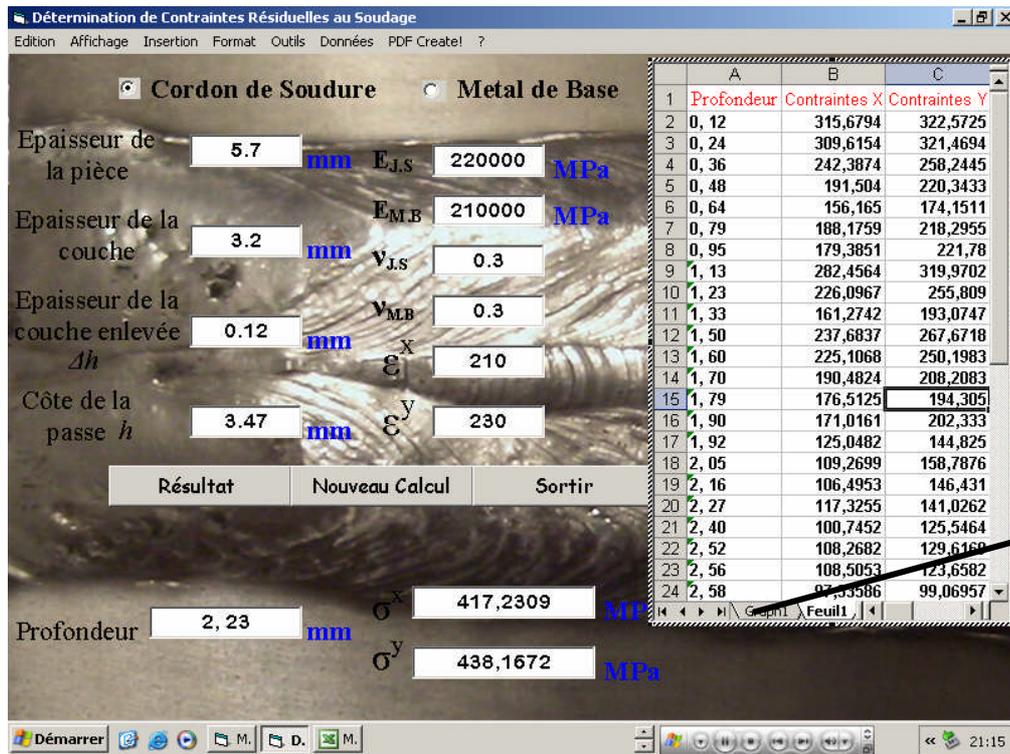


Figure III.7: Interface et affichage le tableau du Modèle numérique réalisé.

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

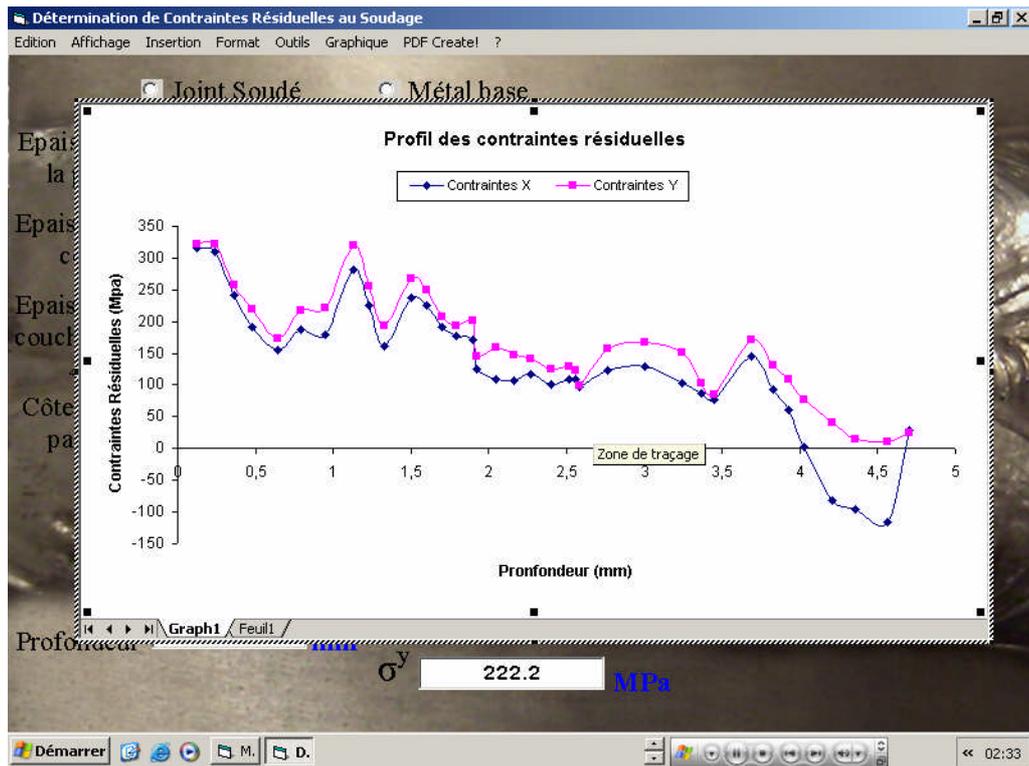


Figure III.8: Interface et affichage les courbes du Modèle numérique réalisé.

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
 Epaisseur de métal : 2.5

- **Cordon de soudage : acier inox 306 L**
 Module Young : 210.000
 Coefficient de poisson : 0.3
 Epaisseur : 3.5

III.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 II.7 (chapitre II)** 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.

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 couche (joint soudé et métal base), les valeurs trouvées des contraintes résiduelles transversales σ_X^R et longitudinales σ_Y^R à différents niveaux sont représentées dans le tableau suivant :

Profondeur (mm)	Contraintes transversales σ_X^R (MPa)	Contraintes longitudinales σ_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
4,21	-20,19157	40,28999
4,36	-34,91299	15,46983
4,56	-50,9493	10,17099
4,7	-25,83119	24,32095

Tableau III.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:

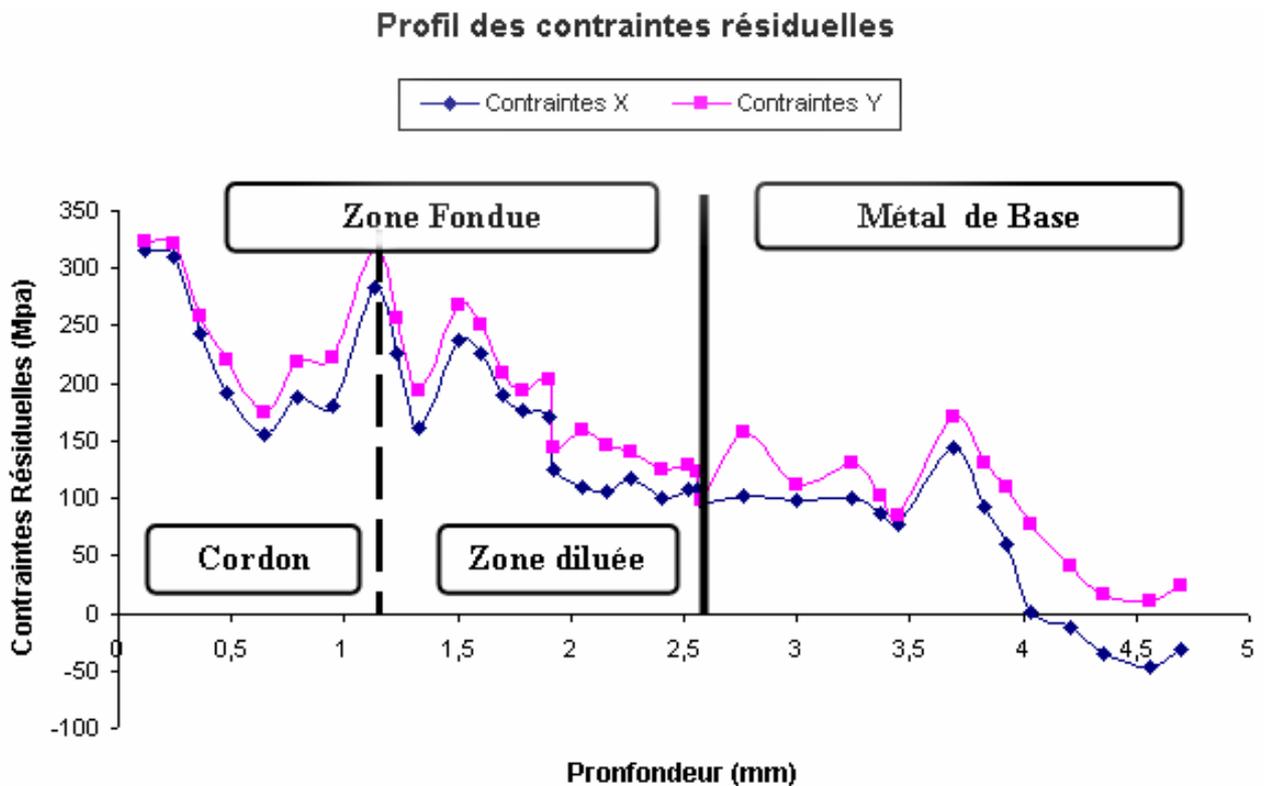


Figure III.9: Profil des contraintes résiduelles à différents niveaux d'une pièce soudée.

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 I1.2**.

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 ~ 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.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Par ce travail, nous avons 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 d'utilisation.

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.

L'exécution et la validation de ce programme élaboré a été faite sur un exemple de soudage réalisé sur un substrat en acier inox.

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.

On peut dire que le programme conçu est simple à comprendre et à utiliser. Il peut donc être utilisé pour la détermination de contraintes résiduelles dans les procédés similaires de soudage moyennant la connaissance des déformations engendrées ainsi que les paramètres intrinsèques des matériaux.

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 Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] : B.CHASSIGNOLE, Thèse de doctorat, « Influence de la structure métallurgique des soudures en aciers inoxydables austénitiques sur le contrôle non destructif par ultrason ». Insa- Lyon. 2000.
- [2] : H. GRANJON. « Bases métallurgiques de soudage ». 2^{ème} édition. Publication du soudage et de ses applications. 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. SOULIGNAC. « Les aciers spéciaux ». LAVOISIER. Paris. 1996.
- [6] : Site Internet. www.soudeur.com.
- [7] : L.DEPRADEUX, Thèse : « Simulation numérique du soudage – Acier 316L. Validation sur cas tests de complexité croissante ». INSA de Lyon 2003.
- [8] : V. GUIPONT, Thèse : « Détermination Expérimentales de contraintes Résiduelles au sien d'assemblages Céramique/Métal réalisés par brasage : application au couple nitrure de silicium/acier doux ». Ecole Centrale 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.CHABOUCHE, « 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 methode 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 revêtements 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 : « Etude de structure bimétalliques réalisées à l'aide de faisceaux de hautes énergie (PLASMA PTA, LASER), Détermination et modélisation des contraintes résiduelles », INSA de Lyon, 1986.
- [18] : I.RCKEY, R.EVANS, « Introduction à la méthode des éléments finis», Edition Eyrolles. Paris 1988
- [19] : J.L.BATOZ, « Modélisation des structures par éléments finis», Edition Hermès. Paris 1983
- [20] : J.P.GREMY, « Simulation », Encyclopédia universalis, Editeur à Paris, volume 16, (1985).
- [21] : O.K.ZIENKIEWICZ, « La méthode des éléments finis », Troisième édition Mc Grawhill, (1979).
- [22] : Technique d'ingénieur, M300.

A n n e x e s

I. Annexe I :

I.1. Procédé de soudage par l'arc électrique:

C'est un procédé de soudure par fusion où la chaleur est produite par un arc électrique. 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.

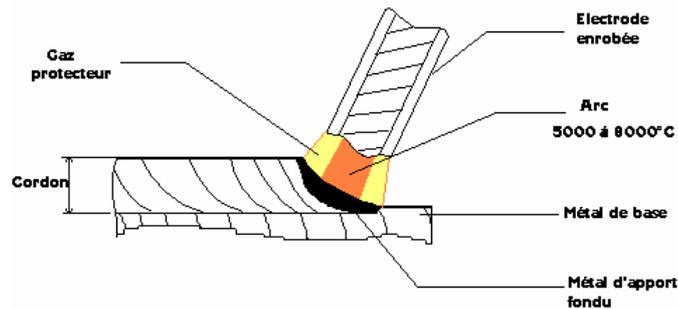


Figure 1: Principe de soudage à l'arc électrique.

I.2. Les Caractéristiques des procédés de soudages à l'arc électrique :

Le **Tableau.1** montre les différents facteurs et paramètres influents sur les procédés de soudage à l'arc électrique les plus connus dans l'industrie:

Procédé	Caractéristiques
Electrode Enrobée	Procédé applicable à tous les métaux en toutes positions et d'un faible coût.
TIG	Soudures extrêmement bonnes en toutes positions. Requier plus de préparations. Les faibles vitesses de dépôts limitent le procédé aux faibles épaisseurs, aux faibles diamètres et en première passe sur tuyauterie à haute sécurité.
Soudage semi-automatique	Domaine d'application diversifié. Les équipements sont plus coûteux, plus complexes et moins portables que ceux des électrodes enrobées. C'est un procédé propre avec des vitesses de soudage plus élevées qu'avec les électrodes enrobées.
Soudage automatique sous flux	Procédé à vitesses de soudage élevées et à pénétration élevée. Naturel pour le soudage des fortes épaisseurs.

Tableau.1 : Les principales Caractéristiques des procédés de soudages à l'arc électrique.

I.3. Procédé de soudage TIG:

I.3.1. Principe:

Ce procédé se caractérise par la création d'un arc électrique créé et entretenu entre l'électrode infusible de tungstène (de Ø 1,0 mm à Ø 8,0 mm) et la pièce à souder dans une veine de gaz inerte. La source de chaleur utilisée est un arc électrique jaillissant entre une électrode réfractaire de tungstène, pur ou thoriée d'une part, et la pièce à souder d'autre part.

L'électrode réfractaire en tungstène peut contenir des éléments d'addition comme le thorium qui favorise l'émission électronique. L'arc et le bain fondu sont protégés de l'atmosphère ambiante par l'utilisation d'un gaz neutre. Le bain de fusion est protégé de l'atmosphère externe par un cône invisible de gaz inerte (de 5 à 25 litres/minute) de protection Argon (ou Argon + Hélium ou Argon + H₂ pour les procédés automatiques) pour améliorer la soudabilité.

Le métal d'apport (baguette de fil dressé de Ø 0,8 mm à Ø 4,0 mm) est amené manuellement ou automatiquement avec un dévidoir motorisé (bobine de fil de Ø 0,8 mm à Ø 2,0 mm) dans le bain de fusion.

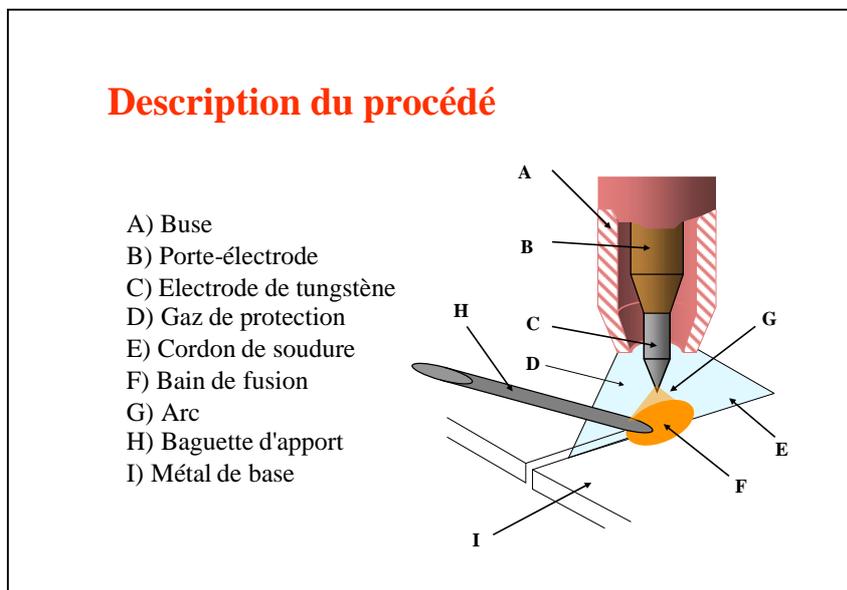


Figure 2: Description du procédé

I.3.2. Application:

Le procédé TIG (ou GTAW, l'appellation anglaise qui signifie : Gas Tungsten Arc Welding) est utilisé particulièrement pour le soudage de plaques minces ainsi que pour le soudage de tous les métaux ayant une faible soudabilité. Parmi ces métaux, mentionnons les alliages de nickel (Monel, Inconel) ainsi que le titane, pour le soudage duquel le procédé GTAW est le procédé préféré.

On emploie le procédé TIG dans la construction aéronautique, dans le domaine de la restauration (comptoirs, réfrigérateurs, chariots, etc.), pour la fabrication de blocs-moteurs, de réservoirs, de citernes, de carrosseries, de cabines de camions, de téléphériques, dans les industries alimentaire et chimique pour les échangeurs de chaleur, pour fabriquer des pièces décoratives et pour bien d'autres applications encore.

Enfin, le procédé GTAW s'avère aussi idéal pour réaliser des réparations et pour la fabrication de petites séries de pièces.

II. Annexe II :

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.

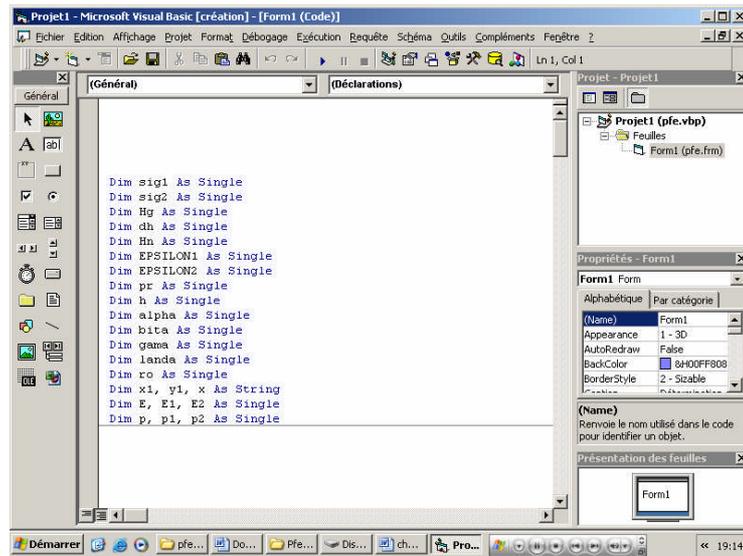


Figure II.1: Interface du Visual Basic