

Introduction

Le soudage est l'assemblage métallique le plus fiable, le plus efficace et le plus pratique, qui est largement utilisé dans l'industrie et les constructions telles : centrale nucléaire, aérospatiale, automobile, transport et offshore...etc. Malgré les nombreux avantages il y a certaines limites à ce processus, les défauts de soudage influencent les propriétés souhaitées de l'assemblage. Les cycles thermiques affectent de manière significative les paramètres de contraintes résiduelles, déformations, microstructure de l'acier et dureté. En raison de l'échauffement local pendant le processus de soudage, le contrôle des cycles thermiques est critique et souvent nécessaire [Attarha et al, 2011].

L'application de la technologie de soudage dans la fabrication de grandes structures offre plusieurs avantages par rapport aux méthodes d'assemblage mécanique telle que l'amélioration des performances structurelles, la réduction du poids, la flexibilité de la conception et la réduction des coûts, etc. [Liang, 2018]

Dans ce chapitre on présente la soudure et ces techniques, les divers modes de soudages et en particulier le soudage à l'arc avec ses inconvénients et l'estimation des contraintes résiduelles longitudinales et transversales. Ainsi, son utilisation vis-à-vis de la réhabilitation dans le domaine de la construction des ouvrages d'art et bâtiments métalliques, structures navales et aéronautiques ...etc est passé en revue.

II.1 L'opération de soudage

L'assemblage des éléments métalliques par soudage assure la continuité mécanique entre les parties à assembler. Ce procédé est établi par fusion du métal d'apport assurant un meilleur lien entre les pièces. Ce métal d'apport, possède des propriétés au moins égales à une température de fusion du même ordre de grandeur que celle des matériaux à assembler. Différents types d'assemblage peuvent être rencontrés en fonction des contraintes appliquées à la structure réalisée, la nature du matériau et les dimensions de l'élément à assembler (Figure II.1) [Makhlouf, 2008]. Plusieurs normes décrivent ce phénomène de soudage, on cite ceux des assemblages soudés de la norme NF P. 22470 et P.22472 [Morel, 1994].

Durant la phase de soudage, le métal d'apport ainsi que le métal de base des éléments à assembler sont portés à la température de fusion permettant ainsi un mélange des éléments. L'utilisation du métal d'apport offre tout d'abord, la nécessité d'apporter de la matière afin de combler une préparation de joint (chanfrein), assurant une section efficace entre les deux parties à assembler. Et d'autre part, il est aussi nécessaire de changer la composition métallographique de la zone fondue afin de lui donner des caractéristiques mécaniques voulues.

Le cordon de soudure est constitué du mélange des deux métaux de base et dans la plupart des cas d'un métal d'apport. De part et d'autre de cette zone fondue, les éléments de métaux de base soudés subissent des transformations dans leur structure cristalline dues à l'élévation de température. D'après la composition chimique élaborée et celle du traitement thermique, la soudure se décompose de plusieurs zones : le métal de base MB, la zone affectée thermiquement ZAT et la zone fondue ZF. L'étendu de la ZAT et la disposition des passes dans la ZF sont représentés dans la macrographie de la figure. II.1. [Le Guen, 2010] [Abderrahmane et al, 2015]

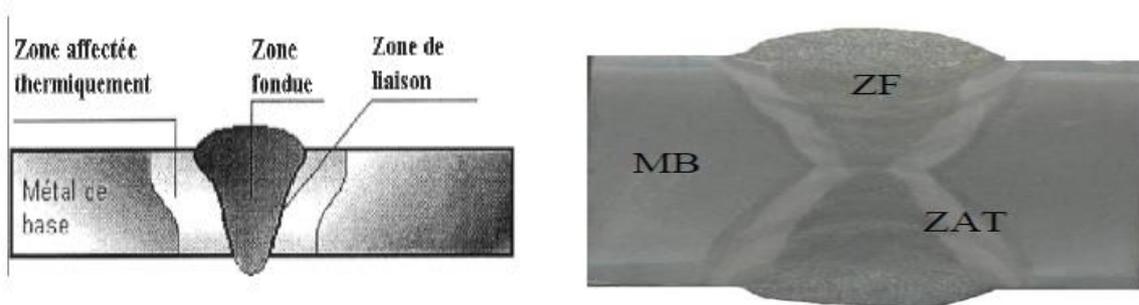


Figure II.1 Cordon de soudure [Makhlouf, 2008]

La zone fondue (ZF) ou l'état liquide a été atteint, et dans laquelle la composition chimique est élaborée, la structure métallurgique obtenue après solidification dépend du cycle de refroidissement. On distingue qu'au sein de cette zone, des gradients de concentration (Ségrégation), où l'examen de la composition d'une soudure ainsi que la variation de dureté est possible. Or la zone affectée thermiquement ZAT de largeur variable, qui se trouve au bordure de la zone ZF, ayant été soumise à l'élévation thermique sans être portée à la fusion. Le chauffage, la composition chimique et la vitesse de refroidissement de cette zone génèrent des modifications plus ou moins importantes de la structure métallurgique.

La zone de liaison située à la frontière entre la zone ZF et la zone ZAT, elle correspond à la surface sur laquelle la solidification du métal fondu a commencé. [Makhlouf, 2008] [Chérifi, 2015] [Aissani, 2012]

Le métal de base MB est la zone dite non affectée, il se trouve au-delà de la zone ZAT, car la distribution thermique est insuffisante pour engendrer une quelconque transformation structurale. [Makhlouf, 2008] [Chérifi, 2015]

II.2 Classification des procédés

Il existe de nombreux procédés de soudage, dont les principes et la mise en œuvre sont très différents. Pour les uns, l'assemblage est obtenu par fusion locale des éléments à assembler, pour d'autres, la continuité métallique est obtenue sans fusion par effets purement mécaniques. On peut aisément classer ces procédés en fonction des énergies mises en œuvre comme présenté sur la figure II.2. On retrouve que certains auteurs [Aissani 2012] ont étudié le classement du soudage à l'arc électrique TIG et soudage par friction malaxage FSW. Le chercheur Nguyen s'intéressait à son tour à la modélisation et la simulation multiphasique du bain de fusion en soudage à l'arc TIG. Ce pendant, l'auteur Kechaou a montré les procédés TIG qui restent les plus largement utilisés en fabrication soudée. [Aissani, 2012], [Kechaou, 2013] [Nguyen, 2015].

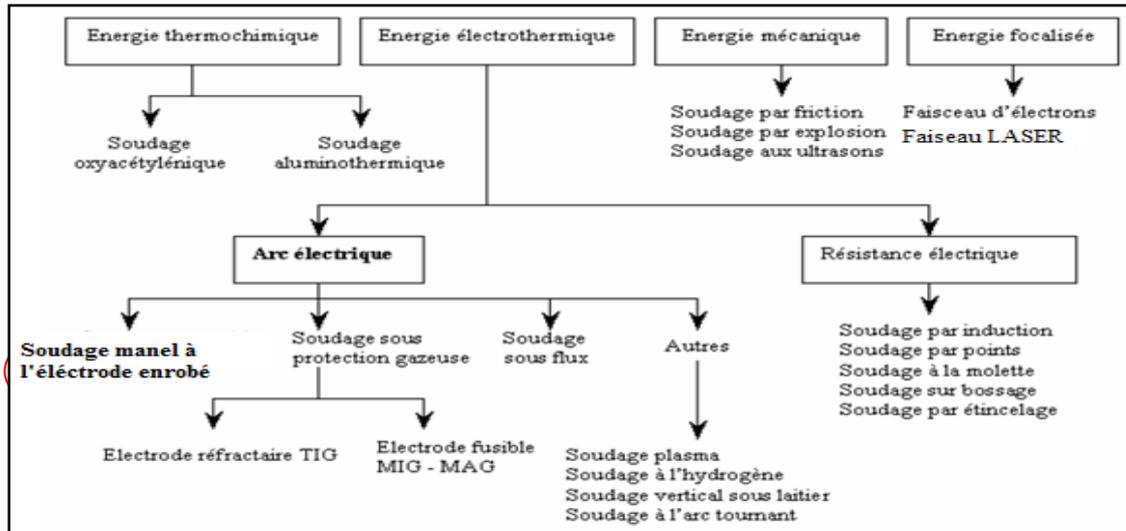


Figure II.2 Classification des procédés du soudage [Benadla, 2005], [Aissani, 2012].

A partir du schéma de la figure II.2 de la classification des procédés du soudage, on a visé la technique du soudage à l'arc électrique, particulièrement celle élaborée manuellement à électrode enrobée. Pour notre recherche on présente les détails concernant ce mode tiré de la littérature, ainsi pour les plus utilisés dans les simulations expérimentales et numériques avec la fixation des divers paramètres bien choisis (poutres renforcées par des corbières soudées dans la semelle inférieure, et plaques métalliques munies des raidisseurs) pour ce chapitre et ceux qui suivent. Le logiciel ABAQUS est le moyen qu'on a adopté pour la modélisation, car le processus de soudage est en fait très compliqué. Il exige souvent des outils performants et puissants, avec le progrès de la technologie du matériel informatique à nos jours. D'où, la simulation numérique reste la seule solution pour résoudre ce genre de problème.

II.2.1 Processus de soudage à l'arc des aciers

Le soudage à l'arc est un terme générique au cours duquel un arc électrique est créé entre une électrode et les pièces à assembler. Afin de conduire à une fusion superficielle et à la formation d'un bain de métal fondu qui se solidifie sans action extérieure. Il regroupe quatre (04) procédés :

II.2.1.a Soudage manuel à l'électrode enrobée

Cette méthode manuelle constitue l'une des méthodes opératoires de soudage à l'arc les plus répandues. Elle nécessite une compétence considérable pour réaliser des soudures de bonne qualité. L'électrode est constituée d'un fil à cœur d'acier et d'un flux d'enrobage contenant des éléments alliés, comme par exemple le manganèse et la silice. Un arc électrique est créé entre une électrode fusible (Cathode) et les pièces à souder (Anode), grâce à un générateur de courant, alternatif ou continu, de faible voltage, mais de fort ampérage.

Afin de limiter l'oxydation et la nitruration du métal, l'âme métallique de l'électrode est enrobée par un oxydant, un acide, une base ou un cellulosique selon les besoins. Il a pour but de faciliter l'amorçage, de protéger le métal et le cordon contre un refroidissement trop rapide, ainsi que de guider l'arc grâce à un retard à la fusion. Suivant les propriétés recherchées pour le cordon ou le laitier, différents modèles d'électrode enrobée existent (Figure II.3).

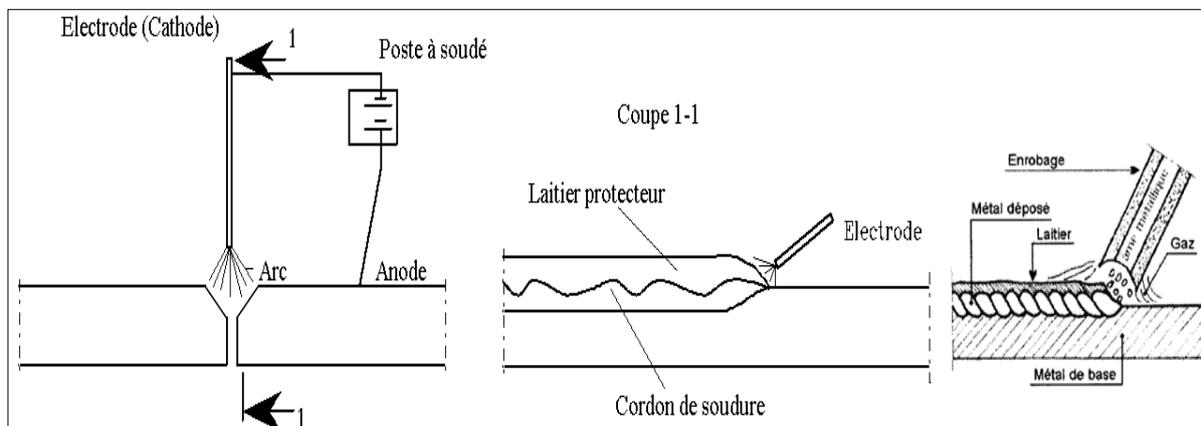


Figure II.3 Arc avec électrode enrobée [Clergé, 2000]

La température au cœur de l'arc à la cathode est environ 5500°C , 2700°C à l'anode et 3500°C au fond du métal de l'électrode ainsi qu'une partie des pièces à assembler. Le métal fondu remplit les vides entre pièces et forme après refroidissement l'assemblage.

Les électrodes enrobées sont constituées par une baguette métallique appelée âme, entourée d'un revêtement adhérent appelé enrobage (Figure II.4). Cet enrobage est constitué par des poudres de composition complexe, parfaitement homogénéisées et assemblée par un liant généralement du silicate de soude ou de potasse. Lors de la fusion l'enrobage de l'électrode donne naissance à un laitier, étant plus léger que le métal, il se dépose à la surface du bain de fusion et forme une protection de la soudure. Cette protection a pour rôle de protéger le métal contre l'oxygène O_2 et l'azote N de l'air (fragile), et de retarder le refroidissement de l'acier pour éviter le phénomène de trempe. Les corps principaux de l'enrobage sont: SiO_2 , CaO , Mn , Fe_3O_4 ; [Clergé, 2000]

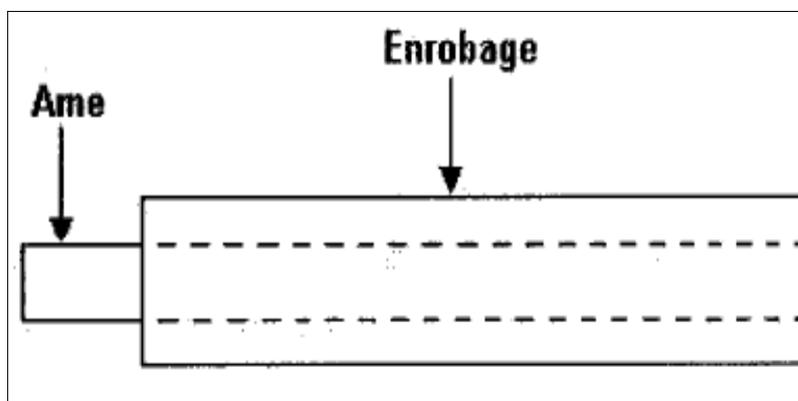


Figure II.4 Présentation d'une électrode enrobée [Clergé, 2000].

II.2.1.b Soudage sous protection gazeuse

II.2.1.b.1 Le soudage électrode fusible ou avec fils pleins (MIG/MAG Metal inert/active Gas ou GMAW Gas Metal Arc Welding)

L'électrode est composée d'un fil fusible continu, servant de métal d'apport et se dévidant automatiquement sous protection gazeuse (Argon Ar ou Oxyde de carbone CO₂). [Tekriwal et al, 1988]

II.2.1.b.2 Le soudage avec une électrode réfractaire (TIG)

L'électrode non consommable est constituée d'une pointe de tungstène W portée par une torche dotée d'une arrivée annulaire d'un gaz protecteur. On nomme aussi cette technique Tungstène Inert Gaz (TIG) [Mougenot, 2013], [Nguyen, 2015].

II.2.1.c Le soudage à arc submergé sous flux solide

Un flux en poudre est versé en talus autour du fil de l'électrode, l'arc jaillissant à l'intérieur du flux est ainsi protégé de l'oxydation et d'un refroidissement trop rapide.

D'autres techniques sont moins utilisées par rapport aux trois méthodes qu'on vient de présenter. On cite : le soudage plasma, à l'hydrogène, verticale sous laitier, et à l'arc tournant. [Benadla, 2005], [Aissani, 2012]

II.3 Phénomènes impliqués lors de l'opération de soudage

L'opération de soudage fait intervenir plusieurs phénomènes physiques de l'ordre thermique comme le chauffage et refroidissement du matériau, de l'ordre métallurgique tel que la solidification et le changement des phases du matériau, d'ordre mécanique par la fusion des matériaux (mécanique des fluides) et de la mécanique des solides concernant la fatigue, la torsion, les fissures, et l'apparition de contraintes et déformations résiduelles) (Figure II.5) [Makhlouf, 2008], [Aissani, 2012].

Les interactions entre ces différents phénomènes peuvent être classées en plusieurs catégories. La figure II.5 schématise ces interactions et les conséquences qui sont plus ou moins importantes entre ces quatre évolutions physiques.

L'interaction thermo-métallurgique, dont l'évolution du champ de température provoque des changements de phase et des modifications microstructurales. Les réactions métallurgiques sont accompagnées par l'absorption et le dégagement de la chaleur latente qui fait varier le champ de température. Il faut donc prendre en considération à l'échelle macroscopique la distribution thermique du matériau.

L'interaction thermo-mécanique, où le champ de température à l'intérieur de la pièce soudée provoque des déformations thermiques et affecte les propriétés mécaniques qui sont en fonction de la température. Ces déformations mécaniques engendrent des dilatations thermiques et des distorsions résiduelles dues au dégagement de la chaleur. Lors d'un changement de phases, les caractéristiques mécaniques propres précisément : le module de Young et le coefficient de poisson sont peu affectés alors que les propriétés de plasticité (limite d'élasticité et module d'écrouissage) sont fortement influencées. De plus, les changements des arrangements cristallographiques consécutifs aux modifications de phases, induisant un changement de volume et donc des contraintes internes. Localement, le niveau de

ces contraintes internes peut dépasser la limite d'élasticité et conduire à une plastification engendrant des déformations résiduelles.

Dans l'interaction thermo-hydraulique, le procédé de soudage induit un gradient thermique important : le bain de métal fondu est le siège d'une variation de température qui s'échelonne entre la température de fusion et celle de vaporisation du matériau. Ce bain de fusion est soumis à plusieurs forces volumiques ou surfaciques tel que : la gravité, pression de l'arc, le cisaillement aérodynamique et la convection...etc. L'écoulement est influencé par les courants de convection naturelle qui se forme sous le fait du gradient thermique.

L'interaction mécanique des solides et des fluides (hydraulique), dont la déformation de la structure conduit à un changement géométrie du bain et modifie donc son écoulement. En plus la pression du fluide modifie localement le champ de contrainte dans la structure, ce genre d'interaction peut être négligé dans la pratique.

L'interaction mécanique des fluide- métallurgique, dont l'écoulement dans le bain de fusion favorise le mélange des composants du matériau plus une macro ségrégation dépendante de la composition chimique. [Makhlouf, 2008]

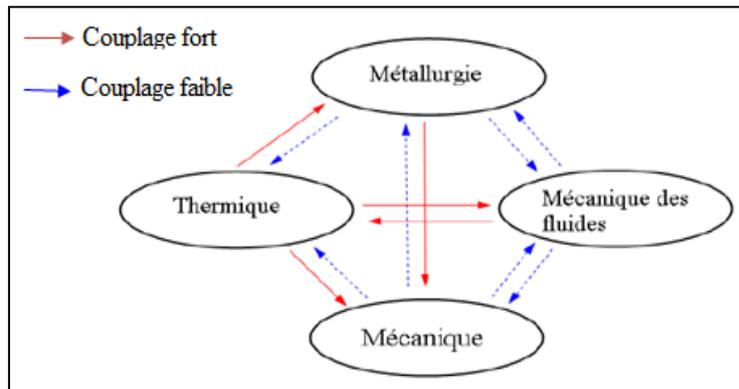


Figure II.5 Phénomène physique et autres impliqués et leurs couplages [Makhlouf, 2008] [Aissani, 2012]

II.4 Caractéristiques physiques de l'opération de soudage (Cycle thermique)

On peut établir une courbe délimitant les zones en tension et les zones en compression de la torche le long de l'axe de soudage (Figure II.6). Elles sont identifiées aux zones respectivement soumises au chauffage et au refroidissement [Pichot, 2012].

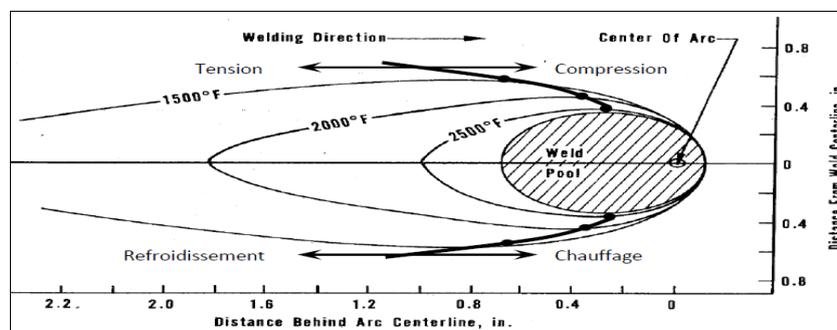


Figure II.6 Limitations des zones en tension et en compression au cours du soudage avec la torche mobile [Pichot, 2012]

Le soudage par électrodes enrobées (EE) est un soudage par fusion, qui produit un échauffement local des pièces à souder avec apport de métal liquide. Cet apport de chaleur se déplace le long du joint à souder. Chaque point de la zone soudée ainsi que son voisinage, subit un cycle thermique, c'est à dire un chauffage rapide et un refroidissement plus ou moins lent. La connaissance du cycle thermique que subit l'assemblage au niveau de la soudure, est nécessaire pour interpréter les phénomènes mécaniques et métallurgiques résultant de l'opération de soudage. Le cycle thermique correspond à la variation de la température en fonction du temps au cours du soudage. Cette évolution thermique est de la forme $\theta = f(t)$. Pratiquement, ces cycles thermiques sont obtenus au moyen de thermocouples placés dans la zone affectée thermiquement (ZAT) dans les assemblages soudés. La figure II.7 présente la répartition thermique dans un assemblage soudé bout à bout, au voisinage d'une soudure. [Clergé, 2000]

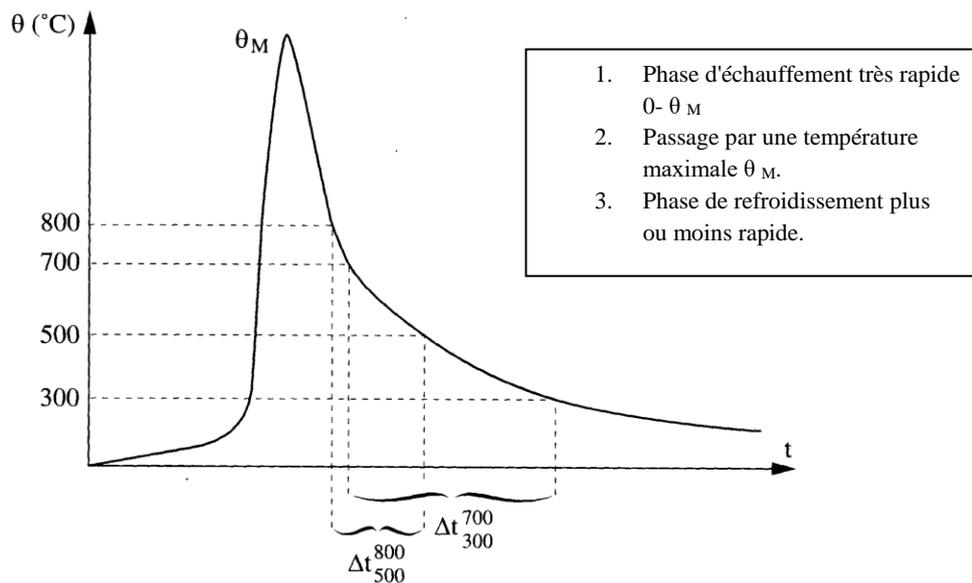


Figure II.7 Evolution du cycle thermique de soudage dans la zone affectée thermiquement [Clergé, 2000]

Les principaux paramètres caractérisant le régime thermique de soudage peuvent s'exprimer, pour un assemblage et un procédé de soudage donnés, en fonction de la durée de refroidissement entre 800 °C et 500 °C : Δt_{500}^{800} . La figure II.8 présente la répartition type de la température maximale θ_m atteinte pendant l'opération de soudage, en chaque point d'un assemblage bout à bout. La durée et l'amplitude du cycle thermique varie suivant le type et l'énergie de soudage. [Clergé, 2000]

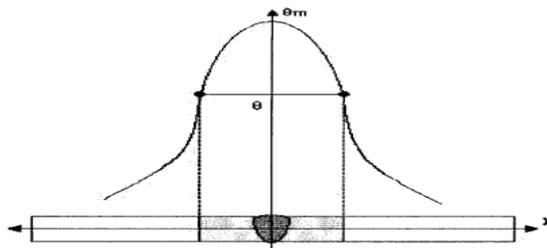


Figure II. 8 Répartition type de la température maximale θ_m [Clergé, 2000]

II.4.1 Influence de la température sur l'acier lors du soudage

Lors du soudage, une zone localisée de la pièce ou de l'assemblage est soumise à un chargement thermique intense. Ce qui engendre des phénomènes de changement de phases (fusion et solidification), conduisant de ce fait aux modifications des propriétés thermiques du matériau (Figure II.9). [Makhlouf, 2008]

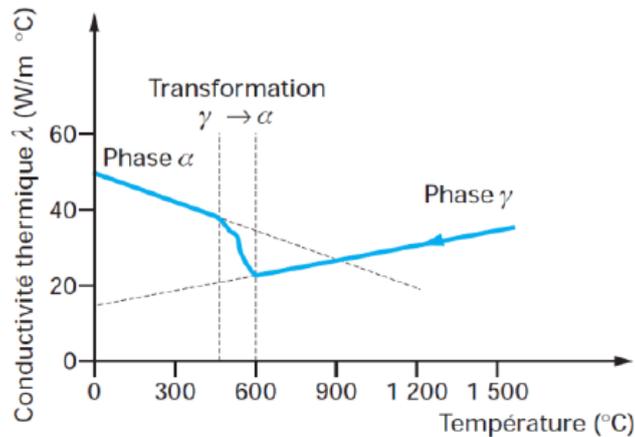


Figure II.9 Influence des changements de phase sur la conductivité thermique d'un acier [Makhlouf, 2008].

Afin de quantifier les états de contrainte et de déformation liés au procédé de soudage, il est nécessaire de décrire le comportement du matériau par un modèle. Le soudage à l'arc nécessite une loi qui reproduit bien le comportement de matériau métallique sous l'effet de la température ambiante et aux hautes températures. Les modèles que l'on retrouve fréquemment dans les travaux récents pour caractériser des alliages à haute température (à l'état solide) sont des lois de comportement de type élasto-viscoplastique. Dans ces modèles, on considère en général que la déformation totale peut être partitionnée ainsi [Bouffier, 2013]:

$$\varepsilon = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{th} + \varepsilon_{vp} \quad (\text{II.1})$$

où :

ε_{el} est la déformation élastique (Loi de Hooke généralisée).

ε_{th} est la dilatation thermique telle que $\varepsilon_{th} = \alpha(T) \cdot (T - T_0)$.

α est le coefficient de dilatation thermique qui dépend de la température.

ε_{vp} est la déformation viscoplastique qui varie suivant les modèles.

II.5. Conséquences du soudage

Le souhait de tout industriel est de réaliser un soudage parfait, qui contient moins de contraintes résiduelles et moins de distorsions. Or, la chaleur hautement localisée à la zone du soudage et les phénomènes d'expansion et de contraction de la matière dus aux processus de chauffage, et le refroidissement non uniformes, créent des déformations plastiques. Ce genre de déformation est indésirable au niveau de la soudure, ainsi que dans les régions avoisinantes (Figure II.10). En conséquence des contraintes résiduelles, et des distorsions sont produites en permanence dans les structures soudées. [Benadla, 2005]

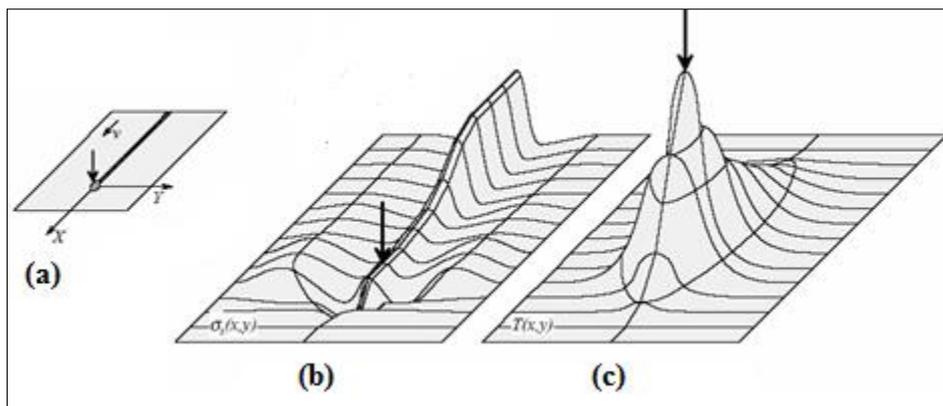


Figure II.10 Représentation du changement de température et les contraintes durant le processus de soudage [Benadla, 2005]

(a) Schéma du processus du soudage, b) La distribution de la contrainte longitudinale, c) La répartition de la température

En outre d'autres conséquences dues à l'opération de soudage comme (Figure II.11):

- *Le retrait longitudinal* est parallèle à la ligne de soudage, relativement simple et uniforme, car induit par le bridage des zones restant froides situées de part et d'autres de la soudure (Figure II.11.a).

- *Le retrait transversal* est perpendiculaire à la ligne de soudage, il est plus complexe à définir car son effet varie suivant que les éléments à assembler sont longs ou courts, libres ou bridés (Figure II.11.b).

- *L'effet de pliage* est dû à la variation du retrait transversal dans l'épaisseur de la soudure qui provoque une rotation des éléments assemblés suivant l'axe longitudinal (axe de soudage) (Figure II.11.c).

- *L'effet de serrage* revient au décalage dans le temps du retrait transversal lors de la réalisation de la soudure. Il se caractérise par un resserrement ou desserrement des pièces à assembler, selon la vitesse et l'énergie du procédé. Pour s'opposer à cet effet particulièrement gênant lors du soudage monopasse sur pièces minces, on procède à des points de soudure ou pointages (Figure II.11.d).

- *L'effet de cintrage* est dû à la variation du retrait longitudinal dans l'épaisseur de la soudure et qui provoque une rotation des éléments assemblés suivant l'axe transversal (axe perpendiculaire à l'axe de soudage) (Figure II.11.e).

- *Le flambage* est à cause des contraintes de compression qui engendrent une instabilité de la structure lors du soudage monopasse sur pièces minces. La structure présente alors des ondulations ou un voilement (mise en hélice), cet effet est également lié au retrait longitudinal (Figure II.11.f).

- *La distorsion angulaire*, le volume de la zone fondue et sa géométrie vont conditionner les déformations de la pièce soudée. Les déformations permanentes locales entraînent un déplacement d'ensemble de la structure qu'il faut maîtriser pour la mise au point du mode opératoire de soudage : problème d'alignement au cours du soudage, non respect des tolérances imposées par la conception...

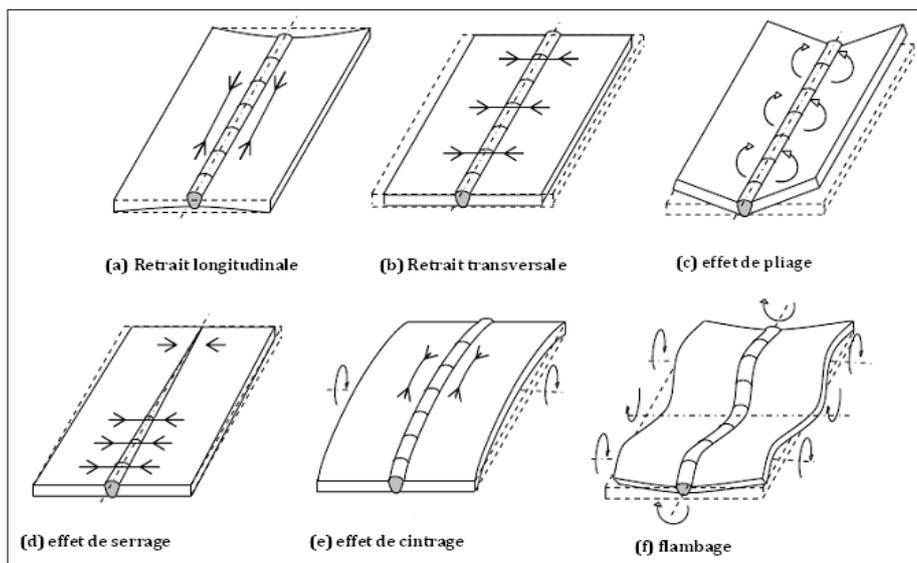


Figure II.11 Différentes déformations dues au soudage

Pour des pièces de grandes dimensions, de longues soudures ou des chanfreins remplis en plusieurs passes, ces déformations peuvent avoir des conséquences très coûteuses. Le soudeur cherchera alors à symétriser les géométries de cordon pour compenser les déformations induites par le procédé. Dans le cas d'un assemblage de plusieurs soudures, la séquence de dépôt des cordons se fera de manière à réduire les distorsions. Pour le soudage multi-passes bout-à-bout de deux plaques, des chanfreins en X seront préférés par rapport à ceux en V pour le remplissage de la liaison (Figure II.12). [Robin, 2012]

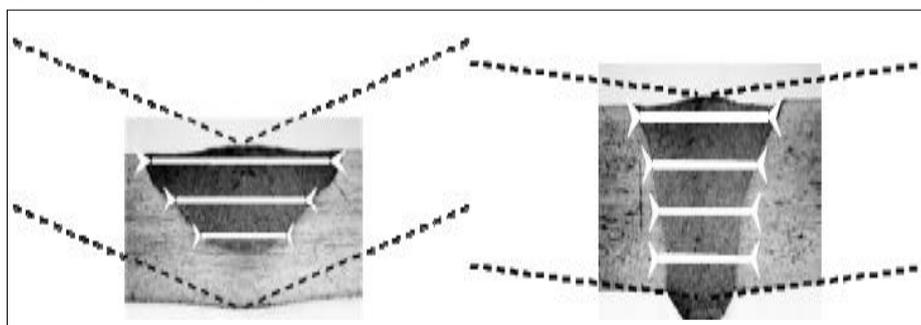


Figure II.12 Distorsion angulaire amplifiée selon la morphologie de la zone fondue [Robin, 2012].

Lors d'une opération de soudage d'une structure métallique, les incompatibilités de déformations engendrées par la dilatation thermique localisée, et les modifications de microstructure du matériau. Ils engendrent des pressions dans le matériau qui subsistent à température ambiante, ces champs de pressions internes auto-équilibrés sont appelés champs de contraintes résiduelles. Le profil des contraintes résiduelles dans les pièces soudées varie en fonction du type de matériau utilisé.

La figure II.13 montre les profils des contraintes résiduelles longitudinales pour trois différents matériaux. La courbe (a) représente l'acier doux, démontre une contrainte en tension égale à la limite d'écoulement du matériau au centre de la soudure, et d'une contrainte de compression loin de la soudure [Morin, 2006].

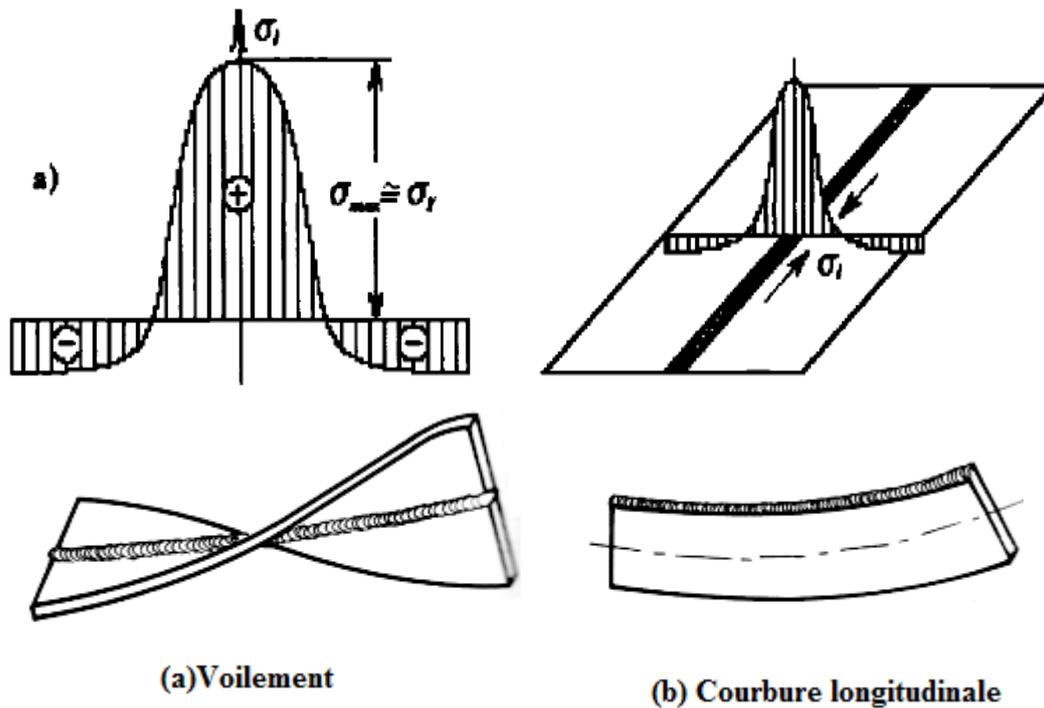


Figure II.13. Types de déformations résultant de contraintes longitudinales [Morin, 2006]

La figure II.14 représente les contraintes résiduelles transversales qui interviennent lors de l'autobridage. Du fait que le soudage est exécuté de proche en proche, l'autobridage n'est pas constant, il est très faible au début de l'exécution d'une soudure et devient plus sévère à la fin. En conséquence, les déformations et les contraintes transversales ne sont pas réparties régulièrement. [Kechaou, 2013]

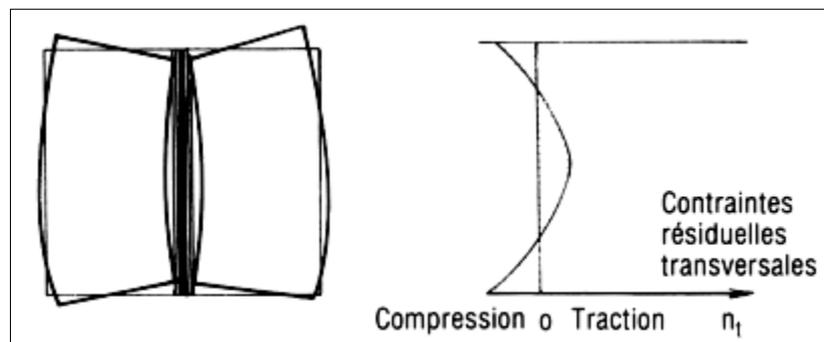


Figure II.14 Répartition des déformations et des contraintes résiduelles transversales induites [Kechaou, 2013]

II.6 Modélisation de la source de chaleur et théories de propagation

Pour modéliser l'apport de chaleur du procédé de soudage, la représentation d'un flux de chaleur, qui peut être volumique ou surfacique. Ce flux est déterminé par la puissance de soudage apportée à l'assemblage, soit la puissance de soudage nominale multipliée par le rendement de procédé qu'il faut ajuster. La distribution de ce flux est sensiblement liée au procédé de soudage utilisé.