

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



Université De M'silla

Faculté de Technologie

Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

En Génie Mécanique

Option : Fabrication

Présenté par : Bachiri Abdelhamid

Thème :

**Effets des traitements thermiques sur les contraintes
résiduelles des joints soudés**

| NOM et Prénom | Grade | Qualité |
|------------------------|-------|-----------|
| Zammamouche Radouane | MCB | Président |
|ZAOUI Moussa..... | Pr | Encadreur |
| ...MAKRI Hocine.... | MCA | Examineur |

Année Universitaire 2021 / 2022

Remerciements

Ce travail est arrivé à son terme grâce à l'aide généreuse que j'ai reçu de la part de nombreuses personnes que je tiens à leurs témoigner toute ma gratitude.

Je remercie mon directeur de thèse Monsieur Zaoui. Moussa pour ces conseils et sa disponibilité tout au long de ce travail et pour m'avoir encouragé avec constance dans les quelques moments de doute et d'incertitude et pour m'avoir permis de mener à bien ce travail de recherche.

J'adresse mes profonds remerciements aux membres de Jury qui m'ont fait l'honneur de lire ce mémoire et d'y apporter les fruits de leurs riches expériences et de leur savoir.

Je tiens à remercier l'ensemble du personnel du laboratoire Mécanique des systèmes solides de M'sila.

D'autre part je tiens à remercier l'ensemble du personnel Centre de Recherche de Soudage et de Contrôle pour m'avoir accueilli avec une grande sympathie.

Mes chers remerciements vont à mon père, ma chère mère et mon fils Khalil ainsi que sa mère et mes sœurs et mes frères à qui je dédie ce mémoire en témoignage de ma profonde affection et mon ami Méhaya Noureddine et mon éternelle reconnaissance pour leur soutien pendant toutes mes études.

Merci enfin, et mes excuses à tous ceux que je n'aurais pas cités, d'avoir été là et d'avoir Participé !

Effets de l'effet des traitements thermiques sur les contraintes résiduelles du soudage

Résumé

Le soudage par fusion est largement utilisé dans le domaine de l'automobile, notamment pour la réalisation d'organes de liaison au sol (LAS) où 80% des cordons de soudure sont réalisés à clin. Le procédé de soudage MAG (Metal Active Gas) génère de forts gradients microstructuraux à l'origine de champs de contraintes résiduelles influençant la réponse mécanique et la tenue en service des assemblages soudés. Cet article présente l'étude menée sur deux éprouvettes en acier « dual-phase » soudées à clin, l'une brute de soudage et l'autre ayant subi une sollicitation mécanique cyclique. Des analyses métallurgiques et des essais de micro dureté ont permis de caractériser les effets du procédé de soudage MAG employé dans la réalisation de ces éprouvettes. Les analyses des contraintes résiduelles de soudage par diffraction des rayons X n'ont pas révélé de différences significatives entre les deux éprouvettes compte tenu des dispersions mesurées liées aux états métallurgiques des éprouvettes. L'étude permet de conclure que l'analyse de la relaxation des contraintes de soudage en fatigue nécessite de mener des essais de fatigue interrompus sur une même éprouvette avec les mêmes conditions d'analyse. In-fine, cette approche permettra une meilleure compréhension des phénomènes de relaxation mécanique des contraintes de soudage afin de proposer une modélisation de ceux-ci pour les prendre en compte dans les simulations numériques de tenue en fatigue.

Mots clefs : contraintes résiduelles, soudage, relaxation, diffraction des rayons X, fatigue.

Table des matières

Chapitre 1. Les différents types de soudage

| | |
|---|------------------------------|
| 1. Généralités et définitions..... | 2 |
| 1.1. Définition. | 2 |
| 1.2. Classification. | 2 |
| 1.2.1. Soudage autogène. | 2 |
| 1.2.2. Brasage et soudobrasage..... | 2 |
| 1.3. Soudabilité..... | 2 |
| 1.3.1. Conditions physiques. | 2 |
| 1.3.2. Conditions chimiques..... | 3 |
| 1.3.3. Conditions métallurgiques..... | 3 |
| 2. Matériaux soudables..... | 3 |
| 2.1. Matériaux ferreux..... | 3 |
| 2.2. Cuivre et ses alliages..... | 3 |
| 2.3. Aluminium et ses alliages. | 3 |
| 3. Les procédés de soudage..... | Error! Bookmark not defined. |
| 3.1. Le soudage à l'arc. | 4 |
| 3.1.1. Électrodes fusible sans protection gazeuse..... | 5 |
| 3.1.1.1. Soudage à électrode enrobée : <i>SMAW</i> (Shielded Metal Arc Welding) | 5 |
| 3.1.1.2. <i>GTAW</i> (Gas Tungsten Arc Welding) ou <i>TIG</i> (Tungsten Inert Gas)..... | 6 |
| 3.1.1.3. <i>GMAW</i> (Gas Metal Arc Welding)..... | 7 |
| 3.1.1.4. <i>FCAW</i> (Flux Cored Arc Welding) et <i>MCAW</i> (Metal Cored Arc Welding). | 11 |
| 3.2. Soudage par résistance. | 15 |
| 3.2.1. Introduction. | 15 |
| 3.2.2. Principe des procédés de soudage par points..... | 15 |
| 3.2.3. Soudage à la molette Error! Bookmark not defined. | |
| 3.2.3.1. Principe du procédé. | 17 |
| 3.3. Soudage par pression en phase solide. | 18 |
| 3.3.1. Principe du soudage par friction rotative..... | 18 |
| Chapitre2. Etude thermique et métallurgie de soudage | 20 |
| 1. Introduction. | 20 |
| 2. Rôle de la métallurgie..... | 20 |
| 2.1. La variation de la structure des matériaux. | 20 |
| 3. Rôle de la métallurgie de soudage. | 21 |
| 4. Comprendre le comportement métallurgique. | 22 |
| 5. Caractères généraux de l'opération de soudage. | 24 |

| | |
|--|-------------------------------------|
| 5.1. Phénomènes thermiques lors du soudage. | 25 |
| 5.2. Cas du soudage multi passe..... | 26 |
| 5.3. Aspect chimique : | 27 |
| 5.4. Aspect thermomécanique :..... | 28 |
| 5.5. Aspect constructif..... | 29 |
| 6. Types de joints. | 29 |
| 6.1. Les joints bout à bout. | 29 |
| 6.2. Joint bout à bout avec bords relevés. | 30 |
| 6.3. Le joint à recouvrement. | 30 |
| 6.4. Joint en T. | 31 |
| 6.5. Le joint en angle. | 31 |
| Chapitre3. Les défauts de soudure | 32 |
| 1. Introduction : | 32 |
| 2. Fissurations :..... | 32 |
| 2.1. Fissuration à chaud :..... | 32 |
| 2.2. Fissuration à froid :..... | 34 |
| 3. Défauts communs et causes..... | 35 |
| 3.1. Soufflures. | 35 |
| 4. Pollution ferreuse..... | 36 |
| 4.1. Inclusions..... | 36 |
| 5. Retassures et criques de solidification :..... | 37 |
| 6. Morsures et caniveaux : | 37 |
| 7. Effondrements et trous..... | 38 |
| 8. Défauts géométriques du cordon..... | 38 |
| 9. Débordements du cordon :..... | 40 |
| 10. Défauts de pénétration. | 40 |
| 11. Collage ou manque de fusion | 41 |
| 12. Projections : | 41 |
| Chapitre4. Contrôlés des soudures | Error! Bookmark not defined. |
| 1. Introduction : | Error! Bookmark not defined. |
| 1.1. Contrôles avant le soudage..... | Error! Bookmark not defined. |
| 1.2. Contrôles pendant le soudage. | Error! Bookmark not defined. |
| 1.3. Contrôles après soudage..... | Error! Bookmark not defined. |
| 2. Contrôles destructifs..... | Error! Bookmark not defined. |
| 2.1. Essais de traction..... | Error! Bookmark not defined. |
| 2.1.1. Essais de traction dans le sens travers. | Error! Bookmark not defined. |
| 2.1.2. Essais de traction dans le sens longitudinal. | Error! Bookmark not defined. |

| | |
|---|-------------------------------------|
| 2.2. Essais de flexion par choc..... | Error! Bookmark not defined. |
| 2.3. Essais de pliage..... | Error! Bookmark not defined. |
| 2.4. Filiations de dureté. | Error! Bookmark not defined. |
| 3. Contrôle semi-destructif..... | Error! Bookmark not defined. |
| 4. Le contrôle non destructif (CND)..... | Error! Bookmark not defined. |
| 4.1. Généralités. | Error! Bookmark not defined. |
| 4.2. Examen visuel (VT) EN 970. | Error! Bookmark not defined. |
| 4.2.1. Principe..... | Error! Bookmark not defined. |
| 4.3. Le ressuage (PT) EN 571-1 et EN 1289. | Error! Bookmark not defined. |
| 4.3.1. Définition. | Error! Bookmark not defined. |
| 4.3.2. Principe..... | Error! Bookmark not defined. |
| 4.3.3. Applications..... | Error! Bookmark not defined. |
| 4.4. L'examen magnétoscopique. | Error! Bookmark not defined. |
| 4.4.1. Principe..... | Error! Bookmark not defined. |
| 4.4.2. Visualisation du champ de fuite. | Error! Bookmark not defined. |
| 4.4.3. Techniques de magnétisation des pièces à examiner..... | Error! Bookmark not defined. |
| 4.4.4. Mise en œuvre du contrôle. | Error! Bookmark not defined. |
| 4.5. L'examen radiographique..... | Error! Bookmark not defined. |
| 4.5.1. Principe de la méthode. | Error! Bookmark not defined. |
| 4.5.2. Sources utilisées. | Error! Bookmark not defined. |
| 4.5.3. Définition de la qualité d'un cliché..... | Error! Bookmark not defined. |
| 4.6. Examen par ultrasons (UT) EN 1714-10..... | Error! Bookmark not defined. |
| 4.6.1. Principe..... | Error! Bookmark not defined. |
| 4.6.2. Vitesse de propagation : | Error! Bookmark not defined. |
| 4.6.3. Mise en œuvre. | Error! Bookmark not defined. |
| 4.6.4. Variantes..... | Error! Bookmark not defined. |
| 4.6.5. Domaine d'application. | Error! Bookmark not defined. |
| Chapitre5. Les contraintes résiduelles | Error! Bookmark not defined. |
| 1. Définition et types de contraintes. | Error! Bookmark not defined. |
| 2. Origine des contraintes résiduelles de soudage..... | Error! Bookmark not defined. |
| 2.1. Le retrait. | Error! Bookmark not defined. |
| 2.2. La trempe..... | Error! Bookmark not defined. |
| 2.3. Transformations de phase. | Error! Bookmark not defined. |
| 3. Formation des contraintes résiduelles au cours du soudage..... | Error! Bookmark not defined. |
| 4. Effets des contraintes résiduelles de soudage..... | Error! Bookmark not defined. |

| | |
|---|------------------------------|
| 5. Méthodes d'évaluation des contraintes résiduelles..... | Error! Bookmark not defined. |
| 5.1. Types de méthodes. | Error! Bookmark not defined. |
| 5.2. Les méthodes destructives. | Error! Bookmark not defined. |
| 5.2.1. La méthode du trou incrémental..... | Error! Bookmark not defined. |
| 5.2.2. La méthode de la rainure. | Error! Bookmark not defined. |
| 5.2.3. Le découpage..... | Error! Bookmark not defined. |
| 5.3. Les méthodes non-destructives. | Error! Bookmark not defined. |
| 5.3.1. La diffraction (X, des neutrons et synchrotron).Error! | Bookmark not defined. |
| 5.3.2. Autres méthodes. | Error! Bookmark not defined. |
| 6. Conclusion du chapitre 5. | Error! Bookmark not defined. |
| 7. Origine des contraintes résiduelles de soudage..... | Error! Bookmark not defined. |
| Chapitre6. Les traitements thermiques des soudures..... | Error! Bookmark not defined. |
| 1. Introduction | Error! Bookmark not defined. |
| 2. Cycle d'un traitement thermique :..... | Error! Bookmark not defined. |
| 2.1. Chauffage des pièces | Error! Bookmark not defined. |
| 3. Diagramme d'équilibre. | Error! Bookmark not defined. |
| 3.1. Diagramme fer-carbone métastable. | Error! Bookmark not defined. |
| 3.2. Les constituants d'équilibres des alliages Fer- Carbone. | Error! Bookmark not defined. |
| 3.2. Les constituants d'équilibres des alliages Fer- Carbone. | Error! Bookmark not defined. |
| 4. Traitements thermiques des soudures. | Error! Bookmark not defined. |
| 4.1. Objet et mise en œuvre des traitements thermiques. | Error! Bookmark not defined. |
| 4.1.1. Classification selon l'objet : | Error! Bookmark not defined. |
| 4.1.2. Modes de mise en œuvre : | Error! Bookmark not defined. |
| 4.2. Traitement de relaxation. | Error! Bookmark not defined. |
| 4.2.1. Objet. | Error! Bookmark not defined. |
| 4.2.2. Mécanisme de la relaxation. | Error! Bookmark not defined. |
| 4.2.3. Effets métallurgiques du traitement. | Error! Bookmark not defined. |
| 4.3. Traitements comportant une austénitisation..... | Error! Bookmark not defined. |
| 4.3.1. Recuit. | Error! Bookmark not defined. |
| 4.3.1.1. Définition. | Error! Bookmark not defined. |
| 4.3.1.2. Les types de recuit. | Error! Bookmark not defined. |
| 4.3.2. Traitement inter critique. | Error! Bookmark not defined. |
| 4.3.3. Trempe et revenu des ensembles soudés..... | Error! Bookmark not defined. |
| Chapitre7. Analyses des contraintes résiduelles de soudage dans des études précédentes. | |
| 1. Introduction. | Error! Bookmark not defined. |
| 2. Etude des effets métallurgiques et mécaniques du soudage MAG à clin des éprouvettes | Error! Bookmark not defined. |

| | |
|---|-------------------------------------|
| 3. Analyses de contraintes résiduelles de soudage sur éprouvettes soudées à clin non-sollicitée et sollicitée..... | Error! Bookmark not defined. |
| 4. Discussion. | Error! Bookmark not defined. |
| 5. Conclusion et perspective. | Error! Bookmark not defined. |

Figures

| | |
|---|----|
| Figure 1.1.Soudage autogène et brasage. | 2 |
| Figure1.2.Principe du soudage à électrode enrobée. | 5 |
| Figure 1.3.Principe du soudage à électrode enrobée. | 6 |
| Figure1.4.Principe de fonctionnement du procédé GMAW. | 9 |
| Figure 1.5.Influence des gaz de protection. | 11 |
| Figure 1.6.Cordons obtenus avec différents gaz de protection (en transfert pulsé sur de l'acier). | 11 |
| Figure1.7.Soudage avec fil fourré et gaz de protection. | 12 |
| Figure1.8.Comparaison des taux de dépôts obtenus pour différents procédés. | 13 |
| Figure1.9.Schéma de soudage par point. | 16 |
| Figure1.10.Représentation schématisée des phases du soudage par point. | 16 |
| Figure1.11. Schéma de soudage à la molette Figure1.12. Schéma de soudage à la molette | 17 |
| Figure1. 13.Schéma de soudage à la molette | 18 |
| Figure1.14.Principe du soudage par friction rotative. | 18 |
| Figure1.15.: Principe du soudage par friction malaxage. | 19 |
| Figure2. 1.Structure d'un alliage métallique au microscope électronique. | 22 |
| Figure 2.2.Macrographie d'une soudure d'acier | 22 |
| Figure2.3. Métal de base, zone affectée thermiquement, soudure, source de chaleur, métal d'apport, zone de liaison | 23 |
| Figure 2.4. Structure d'un cordon de soudure | 24 |
| Figure 2.5.Couplages physiques impliqués lors du soudage | 24 |
| Figure 2.6.Evolution de la température en distances croissantes de l'origine du cordon | 26 |
| Figure2.7. Evolution de la température en fonction du temps au voisinage de la ligne de soudure | 26 |
| Figure2.8. Exemple de cycles thermiques rencontrés en soudage multi passe d'après (Radaj, 2003). 27 | |
| Figure 2.9.Joint bord à bord en I Figure 2.10. Géométries des joints bout à bout | 30 |
| Figure 2.11.Joint face frontale Figure 2.12. Joint à bords sertis | 30 |
| Figure 2.13.Joint d'angle à recouvrement Figure 2.14.Joint d'angle à recouvrement déporté | 31 |
| Figure 2.15.Soudure d'angle de coin Figure 2.16.. Soudure d'angle en T | 31 |
| Figure 3.1.Causes et moyens de prévention liés à la fissuration. | 33 |
| Figure 3.2.Fissure de cratère | 33 |
| Figure3.3. Préparation d'un joint pour la prévention de la fissuration à chaud | 34 |
| Figure 3.4.Types de fissures à froid | 34 |
| Figure3.5. Soufflures | 35 |
| Figure3.6. Inclusions | 36 |
| Figure3.7. Types d'inclusions | 36 |
| Figure3.8. Retassures | 37 |
| Figure3.9. Morsures et caniveaux | 37 |
| Figure3.10 Types d'effondrements | 38 |
| Figure3.11. Trou | 38 |
| Figure3.12.Convexité et concavité | 39 |
| Figure3.13. Surépaisseur | 39 |
| Figure 3.14.Mouillage d'un cordon de soudure | 39 |
| Figure3.15. Défauts d'un cordon de soudure | 40 |
| Figure3.16. Débordement. | 40 |
| Figure 3.17.Défauts de pénétration, causes et moyens de prévention | 41 |
| Figure3.18. Collage ou manque de fusion | 41 |
| Figure3.19. Projections. | 42 |

| | |
|---|-----------|
| Figure3.20. Défauts de soudage et correctifs..... | 42 |
| Figure3.21. Défauts communs par métal et moyens de prévention..... | 43 |
| Figure3.22. Défauts les plus fréquemment rencontrés en fonction du procédé utilisé..... | 44 |
| Figure4.1. Essais de traction dans le sens travers..... | 48 |
| Figure4.2. Localisation rupture après essai de traction sur un tube en soudure bout à bout..... | 48 |
| Figure4.3. Essais de traction dans le sens longitudinal..... | 49 |
| Figure4.4. Essais de pliage..... | 49 |
| Figure4.5. Filiations de dureté..... | 50 |
| Figure4.6. Examens macrographiques..... | 51 |
| Figure 4.7. Visualisation macrographique d'un cordon de soudure..... | 51 |
| Figure4.8. Quelques défauts fréquents en soudage..... | 53 |
| Figure4.9. Examen visuel..... | 54 |
| Figure4.10. Examen visuel..... | 54 |
| Figure4.11. Examen par ressuage..... | 55 |
| Figure4.12. Examen par ressuage..... | 56 |
| Figure4.13. Examen par ressuage (Étapes)..... | 56 |
| Figure4.14. Schéma de magnétoscopie..... | 57 |
| Figure4.15. Schéma de magnétoscopie..... | 58 |
| Figure4.16. Matériel de magnétoscopie. La magnétisation longitudinale..... | 59 |
| Figure4.17. Matériel de magnétoscopie. La magnétisation circulaire ou transversale..... | 60 |
| Figure4.18. Radiographie, anode cathode..... | 61 |
| Figure4.19. Défauts vus en radiographie..... | 62 |
| Figure4.20. Autre source en radiographie..... | 62 |
| Figure4.21. Source en radiographie..... | 63 |
| Figure4.22. Principe examen ultrasons..... | 64 |
| Figure4.23. Schémas pour Ultrasons..... | 66 |
| Figure 4.24. Le contrôle par méthode TOFD (Time Of Flight Diffraction)..... | 66 |
| Figure 4.25. Palpeur pour ultrasons..... | 67 |
| Figure5.1. Types de contraintes résiduelles (Radaj20..... | 69 |
| Figure 5.2. Les différents effets élémentaires du soudage pour (1) une plaque soudée (Saint-Germain2006) et (2) un tube soudé (Qureshi 2008)..... | 72 |
| Figure5.3. Evolution de la déformation thermique (a) et de la contrainte (b) en fonction de la température et des transformations de phases (Francis et al. 2007)..... | 72 |
| Figure5.4. Evolution schématique de la contrainte résiduelle longitudinale en fonction du cycle thermique du soudage mono passe sur plaque mince (Pilipenko2001)..... | 74 |
| Figure5.5. Représentation schématique de l'évolution de la température et des contraintes résiduelles (longitudinales et transversales) en cours du soudage mono passe d'une plaque (Pilipenko2001)..... | 75 |
| Figure5.6. Schéma des capacités de résolution spatiale des différentes techniques de mesures des contraintes résiduelles (Withers et al 2008)..... | 77 |
| Figure5.7. Exemples des systèmes optiques associés à la méthode du trou incrémental (Shajer2010b)..... | 79 |
| Figure5.8. Exemple d'évolutions des contraintes résiduelles transverses (a) et longitudinales (b) en fonction de l'épaisseur sur une maquette en acier austénitique(304L) remplie en 7 passes avec de l'inconel 82 (Broussard et Crooker2011)..... | 80 |
| Figure5.9. Champ de contraintes résiduelles circonférentielles évalué par la méthode du contour sur une maquette tubulaire bimétallique (Acer carbone/ Inconel 82/304L) (DeWald 2010)..... | 81 |
| Figure5.10. Principe de la méthode par diffraction des neutrons (a) (Francis et al 2010 ; Price et al. 2006) et sur une maquette en acier austénitique remplie en 7 passes (304L/Inco82) (b) (Broussard et Crooker2011)..... | 84 |

| | |
|---|-----|
| Figure5.11. Evolutions des contraintes résiduelles transverses et longitudinales en fonction de l'épaisseur sur une maquette en acier faiblement allier en 8 passes (A508Cl3/SD3) (a) (Francis et al2010) et sur une maquette en acier austénitique remplie en 7 passes (304L/Inco82) (b) (Broussard et Crooker2011) | 84 |
| Figure6.1. Cycle d'un traitement thermique | 88 |
| Figure6.2. Chauffage des pièces | 89 |
| Figure6.3. Diagramme Fer-Carbone | 91 |
| Figure6.4. Mécanisme de la relaxation des contraintes (d'après [26]) | 95 |
| Figure6.5. La variation de H en fonction de la température (d'après [26]) | 95 |
| Figure6.6. Recuits d'homogénéisation et de normalisation | 98 |
| Figure6.7. Recuit complet | 98 |
| Figure6.8. Recuit de régénération | 99 |
| Figure6.9. Recuit de globulisation | 100 |
| Figure6.10. Les étapes de globulisation | 100 |
| Figure6.11. Schéma de recristallisation primaire | 101 |
| Figure6.12. Cycles thermiques des différents recuits | 103 |
| Figure7.1. Epreuve soudée à clin | 107 |
| Figure7.3. Evolution des micro duretés Knoop dans l'épaisseur du MB | 109 |
| Figure7.4. Evolutions des contraintes résiduelles dans l'épaisseur d'une tôle de MB | 110 |
| Figure7.5. Vue macroscopique de la soudure à clin après attaque au Nital 2% | 110 |
| Figure7.6. Microstructures des ZAT aux points A, B, C et D | 111 |
| Figure7.7. Cartographies des microduretés Vickers d'éprouvettes soudées à clin non-sollicitée (a) et sollicitée (b) | 112 |
| Figure7.8. Figures de pôles {110}, {200}, {211} (a) MB à 55 µm de profondeur - (b) éprouvette brute de soudage à 5,5 mm du pied de cordon et 41 µm de profondeur | 113 |
| Figure7.9. Evolution des contraintes résiduelles longitudinales de soudage sur éprouvettes non-sollicitée (initial) et sollicitée (N = 5 x 10⁶) | 114 |
| Figure7.10. Evolution des contraintes résiduelles transverses de soudage sur éprouvettes non-sollicitée (initial) et sollicitée (N = 5 x 10⁶) | 114 |
| Figure7.11. Micrographie optique de la tôle et évolution de la proportion de phase martensitique dans la profondeur de tôle | 115 |
| Figure7.12. Diagramme TRC de l'acier DP780 [17] | 116 |
| Figure7.13. Largeurs intégrales à mi-hauteur des pics de diffraction dans la phase ferritique | 118 |

Tableaux

| | |
|--|---|
| Tableau1.1Soudage autogène et brasage | 4 |
|--|---|

| | |
|--|------------|
| Tableau1.2. Procédés de soudage..... | 4 |
| Tableau1.3.Principales caractéristiques des gaz de protection | 8 |
| Tableau 1.4.Applications du procédé GMAW en fonction du mode de transfert utilisé. | 9 |
| Tableau 1.5.Gazde protection en fonction du métal à souder pour le procédé GMAW | 10 |
| Tableau1.6.Avantages des procédés FCAW avec fil auto protégé et sous protection gazeuse. | 13 |
| Tableau4.1. Vitesse des ondes en fonction des matériaux..... | 64 |
| Tableau5 .1. Principales origines des contraintes (extrait de Magier. Monin 2007) | 69 |
| Tableau7.1. Caractéristiques mécaniques de l'acier DP780 | 106 |
| Tableau7.2. Composition chimique du MB..... | 106 |
| Tableau7.3. Paramètres des essais de micro dureté Knoop et Vickers..... | 107 |
| Tableau7.4. Paramètres de l'essai de fatigue mené sur éprouvette soudée à clin | 107 |
| Tableau7 .5. Paramètres des analyses de texture et de contraintes | 108 |

Les abréviations

ZAT : zone affectée thermiquement.

MB : Métal de base

ZF : Zone fondue

MF : Métal fondu

ZL : Zone de liaison

CND : CONTRÔLE NON DESTRUCTIF

IQI : indicateur de qualité d'image

FCAW: (Flux Cored Arc Welding)

MCAW: (Metal Cored Arc Welding)

SMAW: (Shielded Metal Arc Welding) **Soudage à électrode enrobée**

GTAW: (Gas Tungsten Arc Welding) ou TIG (Tungsten Inert Gas)

LASER: " Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation "

" Amplification de la lumière par émission simultanée de rayonnement "

TOFD : Time of Flight Diffraction

TTAS : traitement thermique après soudage

Q.M.O.S : qualification des Modes Opératoires de Soudage

D.M.O.S : Descriptifs de Mode Opérateur de Soudage.

MIG: (*Metal Inert Gas*).

MAG: (*Metal Active Gas*)

RW : soudage par résistance ou "Resistance Welding "

XRD : la diffraction des rayons X (*X-Rays Diffraction*),

ND : la diffraction des neutrons (*Neutron Diffraction*),

hard X-rays: le rayonnement synchrotron .

EDM : usinage par électroérosion (*Electrical Discharging Machining*)

%CE : pourcentage de carbone équivalent

RW : soudage par résistance ou "Resistance Welding "

VT : L'examen visuel

PT : Le ressuage

MT : La magnétoscopie

RT : La radiographie

UT : La technique des ultrasons

ET : Les courants de Foucault

AT : émission acoustique

IT : thermographie

LT : étanchéité.

RX : L'examen radiographique

MFL : examen Magnétique Flux Leakage

IQI : indicateur de qualité d'image

ϵ_i : la déformation à chaque incrément de perçage (sans unité),

σ^1_j et σ^2_j : les contraintes principales (en MPa),

β_i : l'angle entre les contraintes principales et les contraintes suivant 1 et 2 de la direction principale (en degré),

A_{ij} et B_{ij} : les coefficients de calibration (en MPa-1).

DHD : méthode du trou profond (– Deep Hole Drilling)

λ : la longueur d'onde supposée constante (en nm),

D_{hkl} : la distance inter-réticulaire correspondant au plan $\{hkl\}$ (en nm),

θ_{hkl} : l'angle de diffraction correspondant au plan $\{hkl\}$ (en degré).

d^0_{hkl} : la distance inter-réticulaire de référence (en nm)

θ_{hkl} : l'angle de diffraction de référence pour un plan $\{hkl\}$ (en degré).

C : le tenseur de raideur

δ_{ij} : l'indice de Kronecker (sans unité),

E : le module d'Young (en MPa)

ν : le coefficient de Poisson (sans unité).

T : est la température de traitement (en degrés K)

t : la durée du traitement (en heures)

H : paramètre dit de Hollomon

LAS ; liaison au sol

TRC : transformation en refroidissement continu.

Introduction générale.

La réalisation de cordons de soudure génère des contraintes résiduelles dans les structures. Dans bien des cas, ces contraintes résiduelles peuvent s'avérer nuisibles en affectant la résistance mécanique des pièces. Lors de la mise en service d'une pièce contenant des contraintes résiduelles, les contraintes générées par les efforts se superposent aux contraintes résiduelles et augmentent les risques de défaillance. Des études précédentes (Thomas et Champiaud, 2005) et (Charette, Champiaud et Thomas, 2007) ont montré que la présence de contraintes résiduelles dans une pièce modifie sa réponse vibratoire en variant ses fréquences naturelles. En fait, une augmentation de certaines fréquences naturelles a été observée pour des plaques minces suite aux traitements de relaxation, ces observations suggèrent donc une influence directe des contraintes résiduelles sur la rigidité des plaques.

Suite à ces résultats, l'analyse modale apparaît comme une méthode simple et envisageable afin de déterminer la qualité d'un traitement thermique et la présence de contraintes résiduelles.

Ce travail explore la possibilité d'utiliser l'analyse modale comme méthode de mesure des contraintes résiduelles engendrées par le soudage. Afin de valider le potentiel et les limitations de cette technique, une expérimentation est réalisée sur trois plaques minces afin de quantifier les variations des paramètres modaux des plaques. Ensuite, une modélisation par éléments finis est effectuée dans le but de mettre en évidence chacun des changements subis par la plaque lors du soudage et de déterminer l'impact de ceux-ci sur les paramètres modaux de la plaque.

Ce mémoire contient sept chapitres. Tout d'abord, le premier chapitre présente les types de soudure.

Le second chapitre présente l'étude thermique et la métallurgie de soudage.

Le troisième chapitre présente les différents défauts générés par le soudage.

Le quatrième chapitre présente en détail les méthodes de contrôles des soudages avant, pendant et après le soudage.

Le cinquième chapitre présente la définition, les sources et les différentes méthodes de mesures des contraintes résiduelles.

Le sixième chapitre présente les différents traitements thermiques nécessaires pour diminuer ou supprimer totalement les contraintes résiduelles de soudage.

Le septième chapitre traite de la portion expérimentale du travail. Celui-ci donne les détails de l'expérimentation menée afin de mesurer l'effet des traitements thermiques sur les contraintes résiduelles de soudage.

Chapitre1. Les différents types de soudage

1. Généralités et définitions.

De tous les procédés de base, le soudage est probablement le plus important, autant en grande série (carrosseries...) qu'en pièce unitaire (cuve de centrale...).

1.1. Définition.

Souder c'est assembler de façon permanente deux ou plusieurs pièces, tout en assurant entre elles la continuité de la matière.

1.2. Classification.

1.2.1. Soudage autogène.

Les pièces à assembler, de même nature ou de composition voisine, participent à la constitution du joint ou du cordon de soudure. L'assemblage est dit homogène, c'est-à-dire « fait du même métal ».

1.2.2. Brasage et soudobrasage.

L'assemblage est hétérogène ; la formation du joint ou cordon est assurée par la seule intervention du métal d'apport qui agit comme une colle. La température de fusion du métal d'apport est inférieure à celle des matériaux à souder qui peuvent être de natures différentes. (Figure1.1) [6].

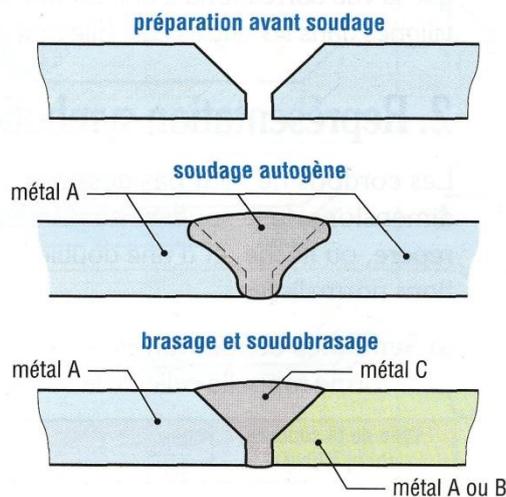


Figure 1.1. Soudage autogène et brasage.

1.3. Soudabilité.

La facilité de soudage dépend de plusieurs facteurs :

1.3.1. Conditions physiques.

La température de fusion, la dilatation, la conductibilité thermique et électrique des métaux à souder.

1.3.2. Conditions chimiques.

L'existence ou non d'une couche d'oxyde réfractaire ; oxydation plus au moins rapide à la température de soudage,etc.

1.3.3. Conditions métallurgiques.

Lerecuit des métaux à la température de soudage, par exemple.

2. Matériaux soudables.

2.1. Matériaux ferreux.

La soudabilité est d'autant meilleure que la teneur en carbone est plus faible ; la présence de soufre et de phosphore est gênante. [7].

- **Fonte** : Soudage difficile, utiliser de préférence la soudo-brasage.
- **Acier non alliés** : A34 à A50 ; avec garantie de soudage ; A345 à A505.
- **Aciers alliés à faible teneur en carbone C** : L'apport de Mn, Mo, Va, augmente l'aptitude de soudage. (Tableau 1.1). [8]

Calcul du pourcentage de carbone équivalent (%CE) :

Ce calcul est nécessaire pour les aciers dont la teneur en carbone est élevée.

$$\%CE = \%C + (\%Mn) /6 + (\%Cr + \%Mo + \%V) /5 + (\%Ni + \%Cu) /15$$

2.2. Cuivre et ses alliages.

Le soudage de cuivre difficile par suite de sa grande conductibilité thermique, de la présence d'oxyde dans le cuivre, de l'oxydation rapide du cuivre à haute température ; soudage possible seulement pour cuivre exempt d'oxygène ; soudage possible du laiton et du bronze.

2.3. Aluminium et ses alliages.

Le soudage est difficile par suite de la couche d'alumine qui recouvre le métal et qu'il faut l'éliminer.

Tableau1.1 Soudage autogène et brasage.

| Carbone équivalent, CE | Indice de soudabilité | Préchauffage |
|------------------------|-----------------------|----------------------------------|
| < 0,4 | Excellent | Aucun |
| 0,4 à 0,5 | Bon | Aucun De 100 à 300°C |
| 0,5 à 0,6 | Moyen | De 100 à 300°C De 200 à 400°C |
| 0,6 à 0,7 | Médiocre | De 300 à 400°C |
| > 0,7 | Mauvais | Non soudable |

Ils sont identifiés par un nombre normalisé (voir tableau1. 2). [6]

Tableau1.2. Procédés de soudage.

| Principaux procédés de soudage NF EN 4063, ISO 4063 (« 1998 ») – Détails NF EN 14610 | |
|--|--|
| 1 – Électrique à l'arc | 4 – Par pression |
| 101 – Avec électrode fusible 11 – Électrode fusible sans protection gazeuse 111 – Électrodes enrobées 114 – Avec fil fourré protecteur 12 – Sous flux solide 13 – Protection gazeuse et électrode fusible 131 – Protection gazeuse MIG 135 – Protection gazeuse MAG 136 – MAG avec fil fourré 137 – MIG avec fil fourré 14 – Protection gazeuse et électrode réfractaire 141 – TIG 142 – TAG 15 – Soudage au plasma 151 – Plasma-MIG 152 – Plasma avec poudre | 41 – Par ultrasons 42 – Par friction 43 – Par forgeage 44 – Par haute énergie mécanique 441 – Par explosion 45 – Par diffusion 47 – Aux gaz par pression 48 – À froid avec pression |
| | 5 – Par faisceau |
| | 51 – Par faisceau d'électrons 511 – Sous vide 512 – Atmosphère 52 – Par laser 521 – Avec laser solide 522 – Avec laser à gaz |
| 2 – Par résistance | 7 – Procédés divers |
| 21 – Par points 22 – À la molette 23 – Par bossages 24 – Par étincelage 25 – En bout par résistance pure 29 – Autre procédés 291 – Soudage par résistance HF | 71 – Aluminothermique 72 – Sous laitier 73 – Électrogaz 74 – Par induction 75 – Par rayonnement lumineux 753 – Par infrarouge 77 – Avec percussion 78 – Soudage des goujons |
| 3 – Aux gaz | 9 – Brasage |
| 31 – Soudage oxygaz 311 – Oxyacétylène 312 – Oxypropane 313 – Oxydrique 32 – Soudage aérogaz (ancienne norme) | 91 – Brasage fort 94 – Brasage tendre 97 – Soudobrasage 971 – Soudobrasage aux gaz 972 – Soudobrasage à l'arc |

2.4. Le soudage à l'arc.

Il existe plusieurs types (Tableau1.2). [6]

2.4.1. Électrodes fusible sans protection gazeuse.

2.4.1.1. Soudage à électrode enrobée : SMAW (Shielded Metal Arc Welding)

Le procédé de soudage à l'arc avec électrode enrobée est relativement simple. Un poste à souder, généralement à courant constant, est connecté à une électrode enrobée et à une pièce de métal à souder, ce qui provoque la création d'un arc électrique, libérant l'énergie nécessaire pour fondre le métal d'apport (contenu dans l'électrode) sur le métal à souder. Le flux recouvrant l'électrode sert à protéger le bain de fusion de la contamination atmosphérique. (Figure1.2) [8]

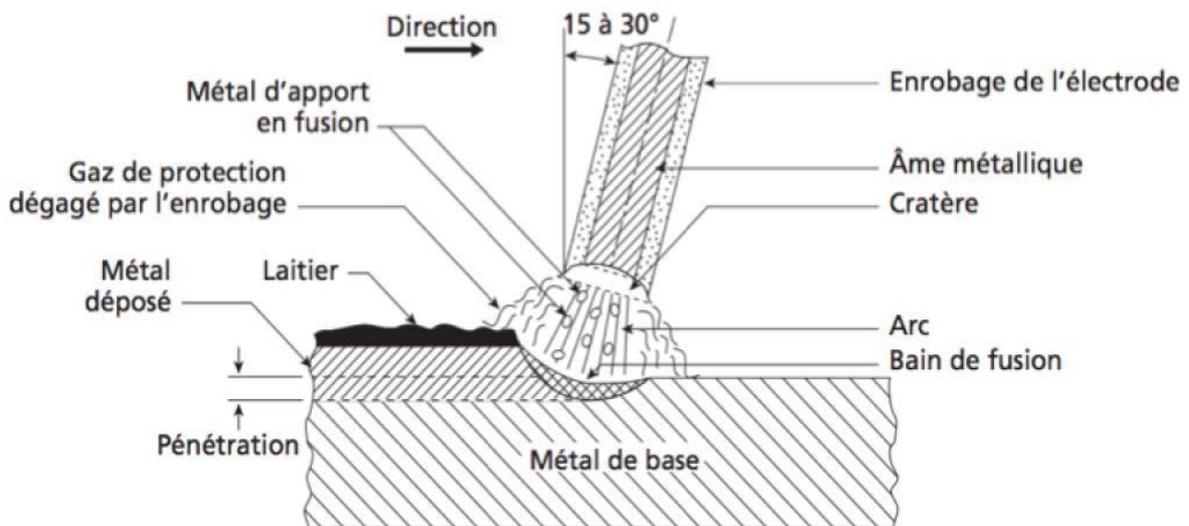


Figure1.2.Principe du soudage à électrode enrobée.

Avantages et inconvénients

Le soudage SMAW s'exécute dans toutes les positions, permet une grande autonomie et l'équipement requis est peu dispendieux.

Le coefficient de transmission thermique du procédé (c'est-à-dire la quantité de chaleur transmise à la pièce) varie entre 50 et 85 %. Comme la profondeur de pénétration de la soudure augmente en fonction de ce coefficient, le SMAW peut atteindre une bonne pénétration. Cependant, la chaleur au centre de l'arc est plus intense et cela peut causer une déformation angulaire. Pour l'amorçage de l'arc avec les procédés manuels (particulièrement avec les électrodes à enrobage basique pour le SMAW), il faut que la tension à vide soit assez élevée, généralement d'une valeur minimum de 70 V.

➤ Applications

Le procédé de soudage SMAW est très populaire, entre autres dans certaines tâches spécialisées telles que, par exemple, des récipients et des tuyaux sous pression, des réservoirs de stockage, des

ponts et des bâtiments ou des navires et des wagons. Il offre une bonne mobilité et la possibilité de souder à l'extérieur sans précaution particulière, notamment pour effectuer des réparations ou du travail sur un chantier.

2.4.1.2. GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) ou TIG (Tungsten Inert Gas)

Le procédé de soudage sous protection de gaz inerte avec électrode réfractaire de tungstène s'effectue avec une torche. Celle-ci comprend l'électrode de tungstène, maintenue sur un porte-électrode et placée à l'intérieur de la buse qui canalise le gaz de protection (figure 1.3) [8]. L'arc électrique se forme entre l'électrode de tungstène et le métal de base.

Le procédé GTAW peut se réaliser sans métal d'apport (ex. pour le soudage de plaques minces) ou en utilisant des baguettes de métal d'apport. La torche permet de maintenir l'électrode en place, de canaliser le gaz de protection et d'assurer la continuité du courant pendant le soudage. Lorsqu'on travaille avec des courants élevés (150 A et plus), on utilise une torche refroidie par du liquide, et une torche refroidie au gaz pour des courants allant jusqu'à 150 A.

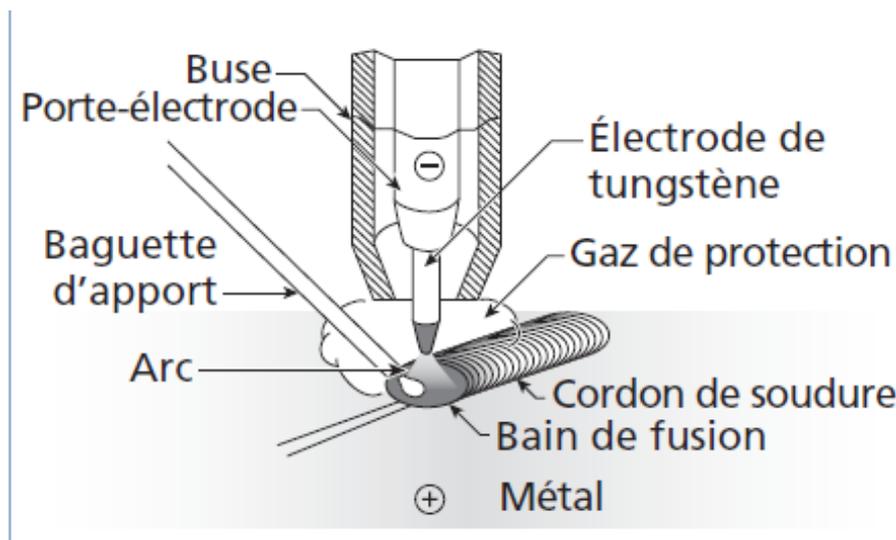


Figure 1.3. Principe du soudage à électrode enrobée.

Le GTAW pulsé implique que la soudeuse est munie d'un mode pulsé, ce qui permet au soudeur d'avoir un meilleur contrôle du bain de fusion. Cette propriété facilite le soudage position ou le soudage de tôles très minces.

Avantages et inconvénients.

- Soudage des métaux à faible soudabilité, incluant l'acier inoxydable et les métaux non-ferreux (dont l'aluminium, le magnésium, le cuivre, le titane, le nickel de même que leurs alliages).

- Ce procédé ne transfère qu'une faible quantité de chaleur au métal et le dépôt de métal d'apport se fait à l'extérieur de l'arc électrique. Par conséquent, le métal d'apport n'est pas surchauffé et cela donne à l'arc une plus grande stabilité, résultant en une soudure sans soufflures. De plus, le procédé ne cause pas de projections et la chaleur est bien dirigée. Le bain de fusion est étroit mais la vitesse de soudage est réduite.
- La soudure est précise, ce qui limite les déformations.
- Comme le taux de transfert de chaleur est assez faible comparé aux autres procédés, le procédé s'applique bien au soudage de plaques minces mais convient moins aux pièces épaisses, à moins qu'on ne veuille souder certains alliages particulièrement difficiles à souder, exigeant une grande qualité de soudure ou un cordon de pénétration dans un tuyau.
- On peut l'utiliser avec ou sans métal d'apport.

Le procédé GTAW est rarement utilisé pour souder l'acier au carbone. Lorsqu'il l'est, il faut utiliser des baguettes d'apport contenant un désoxydant pour éviter les soufflures.

➤ **Applications :**

. On l'utilise surtout dans les secteurs de la construction aéronautique, pour le matériel de restauration, les blocs-moteur, les citernes, les carrosseries, les téléphériques, dans les industries alimentaires et chimiques (échangeurs d'air), les décorations et pour la fabrication ou la réparation de petites pièces

➤ **Gaz de protection**

Le gaz de protection sert essentiellement à protéger le bain de fusion et l'électrode de tungstène contre l'oxydation. Les principales caractéristiques des gaz de protection couramment utilisés avec ce type de procédé sont présentées dans le tableau (1.3) [8].

Le soudage à l'arc sous protection gazeuse avec fil plein utilise un fil-électrode, continu et fusible, qui sert à créer l'arc de soudage avec le métal de base, ou est utilisé comme métal d'apport (Figure 1.4) [8].

2.4.1.3. GMAW (Gas Metal Arc Welding).

La chaleur dégagée par l'arc de soudage provoque la fusion de l'extrémité du fil-électrode et du métal de base. Le fil-électrode est continuellement amené à l'arc de soudage, à travers la torche, par un mécanisme de dévidage. Ce procédé est donc semi-automatisé. Comme pour le GTAW, le bain de fusion est protégé par un gaz de protection.

Le fil-électrode est alimenté dans la torche par un dévidoir. Il peut être poussé ou tiré. Les dévidoirs sont à vitesse fixe ou variable.

On distingue deux catégories de GMAW, en fonction de la nature du gaz de protection utilisé :

- **Le procédé MIG (*Metal Inert Gas*)** qui utilise un gaz de protection neutre ou inerte (par exemple, l'argon ou l'hélium) ;
- **Le procédé MAG (*Metal Active Gas*)** qui utilise un gaz actif ou un mélange de gaz incluant au moins un gaz actif.

Tableau 1.3. Principales caractéristiques des gaz de protection

| Gaz | Principales caractéristiques |
|---------------|--|
| Hélium | <ul style="list-style-type: none"> - Haute tension d'arc (donc plus de chaleur, ce qui permet le soudage de pièces plus épaisses) - ZTA plus petite (donc moins de déformations) - Le volume de gaz doit être élevé. - Très sensible aux courants d'air - Déconseillé avec du courant alternatif à cause de la difficulté d'amorçage de l'arc. |
| Argon | <ul style="list-style-type: none"> - Basse tension d'arc (soude surtout des pièces minces, soit moins de 6 mm) - Bonne action nettoyante (notamment pour les métaux qui s'oxydent en surface comme l'aluminium) - Amorçage de l'arc facile - Arc stable - Le volume de gaz est restreint. - Déconseillé pour le soudage automatique (à cause de la grande |

➤ **Avantages et inconvénients**

Le procédé de soudage GMAW soude aisément la plupart des types de métaux, incluant l'aluminium où il tend à remplacer de plus en plus le GTAW) et les aciers inoxydables. On l'emploie aussi de plus en plus pour le soudage d'aciers au carbone ou faiblement alliés.

Comme il s'utilise avec de fortes intensités de courant, il procure un taux de dépôt élevé.

Par ailleurs, il offre une grande rapidité d'exécution. Il n'exige pas de changement d'électrode, ce qui permet de souder de plus longues distances d'un seul coup.

Le nettoyage post-soudage des pièces est simple puisque le procédé n'utilise pas de laitier.

La pénétration obtenue peut être profonde ; ceci se traduit par une préparation des joints plus rapprochée (à angles plus étroits, soit moins d'ouverture), donc une économie en terme de quantité de métal déposée. La qualité des soudures est bonne et la teneur en hydrogène est faible.

Il faut s'assurer que la vitesse de dévidage soit appropriée à la procédure de soudage, sinon le fil-électrode risque de fondre dans le tube-contact ou de se figer dans le bain de fusion, ce qui occasionne des pertes de temps et d'énergie considérables.

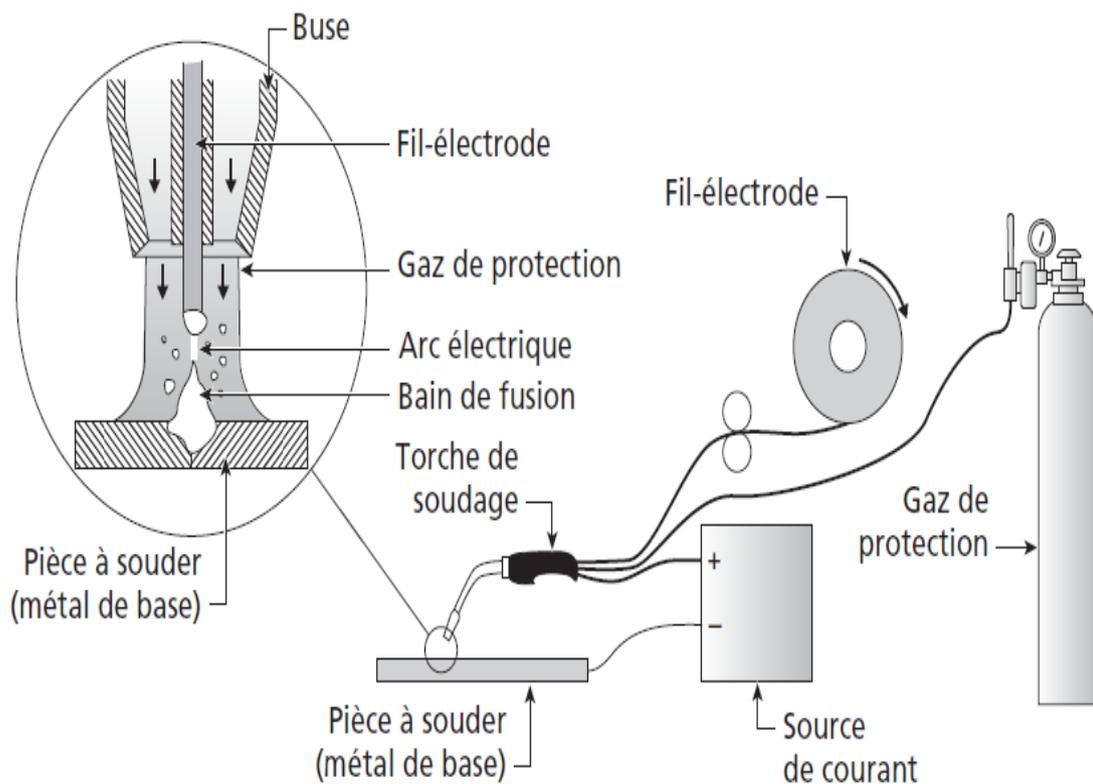


Figure 1.4. Principe de fonctionnement du procédé GMAW.

➤ **Applications**

Le soudage GMAW est très répandu dans pratiquement tous les domaines de la fabrication. Généralement, toutes les entreprises qui ont souvent recours au soudage possèdent un ou plusieurs postes permettant l'utilisation de ce procédé. Les applications spécifiques dépendent généralement du mode de transfert choisi (Tableau 1.4) [8].

Tableau 1.4. Applications du procédé GMAW en fonction du mode de transfert utilisé.

| Mode de transfert | Applications |
|--------------------------|--|
| Par court-circuit | <ul style="list-style-type: none"> – Soudage de tuyauterie - Soudage en position des aciers – Passe de fond sur plaques épaisses |
| Transfert globulaire | <ul style="list-style-type: none"> – Soudage avec CO₂ comme gaz de protection pour les aciers (le CO₂ est plus économique) – Grosses pièces épaisses comme, par exemple, des dents de pelles |
| Par pulvérisation axiale | <ul style="list-style-type: none"> – Soudage avec au moins 85 % d'argon comme gaz de protection – Soudage rapide à pénétration profonde – Soudage de tôles épaisses |
| GMAW | <ul style="list-style-type: none"> – Mode le plus polyvalent, peut souder à peu près tout. |
| Transfert à froid | <ul style="list-style-type: none"> – Plaques minces d'acier – Soudage de plaques minces d'acier avec de l'aluminium |

Gaz de protection.

Selon la nature du métal à souder, on peut utiliser le procédé MIG avec un gaz inerte, soit généralement l'argon (Ar), l'hélium (He) ou un mélange des deux (Ar-He).

Quant au procédé MAG, il emploie des gaz actifs, tels que le gaz carbonique (CO₂) ou encore un mélange d'argon associé au gaz carbonique (Ar-CO₂), à l'oxygène (Ar-O₂) ou des mélanges faits de trois gaz tels qu'hélium-argon-gaz carbonique (He-Ar-CO₂) ou argon-gaz carbonique-hydrogène (Ar-CO₂-H). Le choix des gaz dépend du métal à souder (Tableau 1.5) [8].

Tableau 1.5. Gaz de protection en fonction du métal à souder pour le procédé GMAW

| Gaz | Applications |
|---|--|
| Argon (Ar) | Soudage de la majorité des métaux non ferreux |
| Hélium (He) | Soudage de l'aluminium et du cuivre |
| CO ₂ | Soudage des aciers au carbone et des aciers faiblement alliés |
| Ar (75 %) et He (25 %) Ar (50 %) et He (50 %) Ar (25 %) et He (75 %) | Soudage de l'aluminium, du cuivre et de leurs alliages |
| Ar (98 %) et O ₂ (2 %) | Soudage des aciers alliés et inoxydables |
| Ar (90 %) et CO ₂ (10 %) Ar (85 %) et CO ₂ (15 %) Ar (75 %) et CO ₂ (25 %) Ar (98 %) et O ₂ (2 %) Ar (95 %) et O ₂ (5 %) | Soudage de la plupart des aciers Pour soudage en mode pulsé |
| He (90 %), Ar (7,5 %) et CO ₂ (2,5 %) Ar (98 %) et O ₂ (2 %) Ar (96,5 %) et CO ₂ (2,5 %) et H ₂ (1 %) | Soudage des aciers inoxydables |

La (figure1.5) illustre les effets des gaz de protection sur le dépôt du métal d'apport tandis que la (figure1.6) montre l'apparence du cordon, sur de l'acier, en fonction de différents gaz ou mélanges gazeux utilisés lors du procédé GMAW.

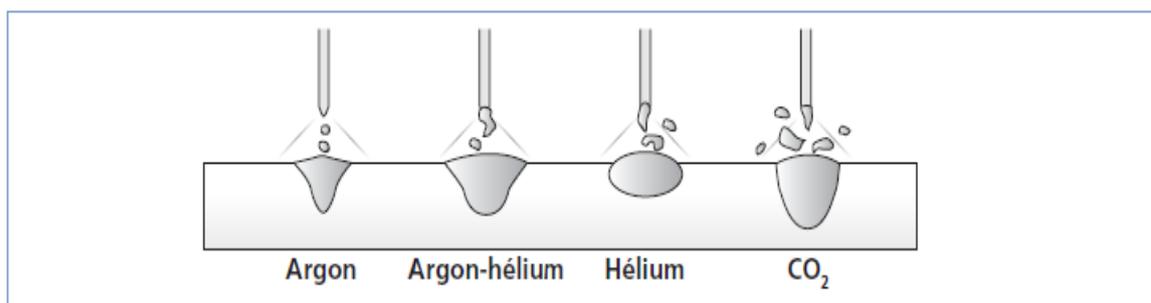


Figure 1.5. Influence des gaz de protection.

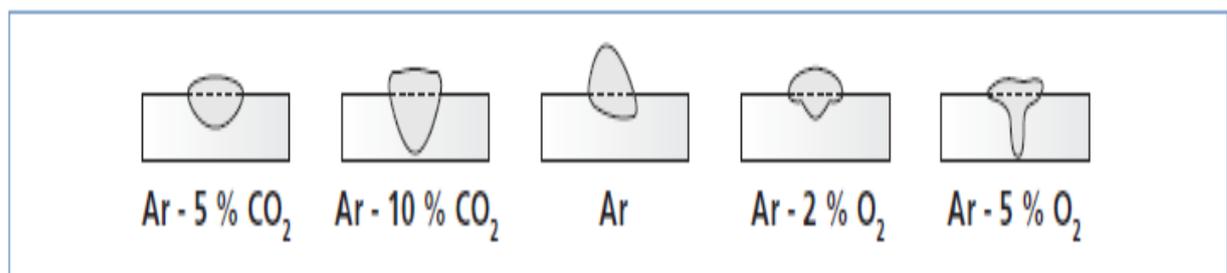


Figure 1.6. Cordons obtenus avec différents gaz de protection (en transfert pulsé sur de l'acier).

2.4.1.4. FCAW (Flux Cored Arc Welding) et MCAW (Metal Cored Arc Welding) .

Le soudage avec fil fourré utilise un fil-électrode fourré qui sert à créer l'arc de soudage avec le métal de base, ou est utilisé comme métal d'apport, procurant un flux de protection supplémentaire (FCAW).

Dans le cas du MCAW, c'est une poudre métallique qui remplit le fil-électrode. Le principe de base est le même que pour le GMAW, seul le fil-électrode diffère (figure1.7). [8]

La plupart du temps, ces deux procédés utilisent un gaz de protection, à l'exception de certains cas, lors de l'utilisation du procédé FCAW avec fil auto protégé (figure1.8). [8]

Il existe différents types de torches associées à ces procédés. On choisit généralement la torche en fonction de la soudeuse utilisée (par exemple, 300 A ou 450 A). Au-delà de 500 A, on doit utiliser une torche refroidie

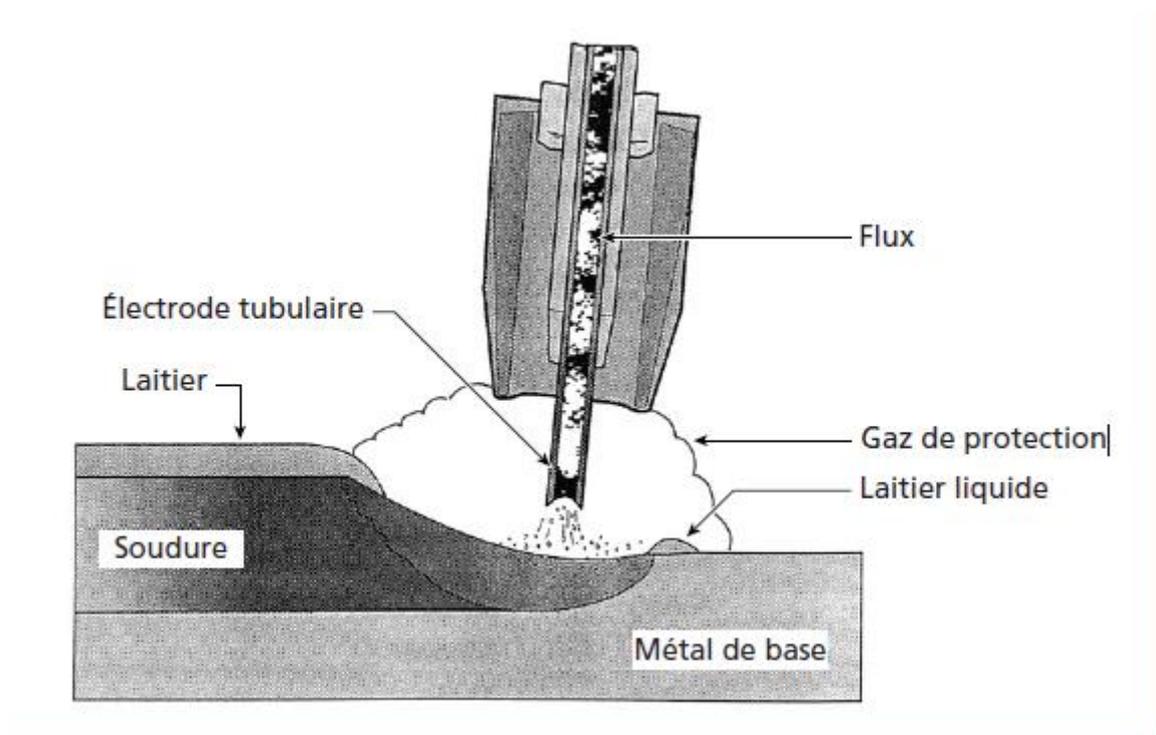


Figure1.7..Soudage avec fil fourré et gaz de protection.

Avantages et inconvénients

Ces procédés de soudage connaissent un essor certain, dû notamment à leur taux de dépôt supérieur aux autres procédés en fonction de l'intensité de courant utilisé (figure1.8) [8].

On emploie les procédés FCAW et MCAW pour le soudage de l'acier doux ou faiblement allié ainsi que pour l'acier inoxydable. Ces procédés procurent une pénétration profonde et sont appropriés pour le soudage de fortes épaisseurs de métal (variant le plus souvent entre 5 et 50 mm). Ils sont idéals pour réaliser des soudures d'angle en position à plat et en T horizontal à grande vitesse, ainsi que pour le remplissage de chanfreins profonds.

Plus encore que le GMAW, ces procédés tolèrent une certaine quantité de saleté ou de rouille sur le métal. Le laitier obtenu avec le procédé FCAW se détache facilement et est inexistant avec le procédé MCAW. À l'exception de quelques îlots de silicate un peu plus nombreux, ce dernier est similaire au procédé GMAW. Par contre, l'équipement à utiliser est complexe et le soudage doit se faire à l'abri de l'air (sauf si on utilise des fils auto protégés). Le procédé FCAW avec fil auto protégé présente des avantages particuliers par rapport au procédé sous protection gazeuse (Tableau 1.6).

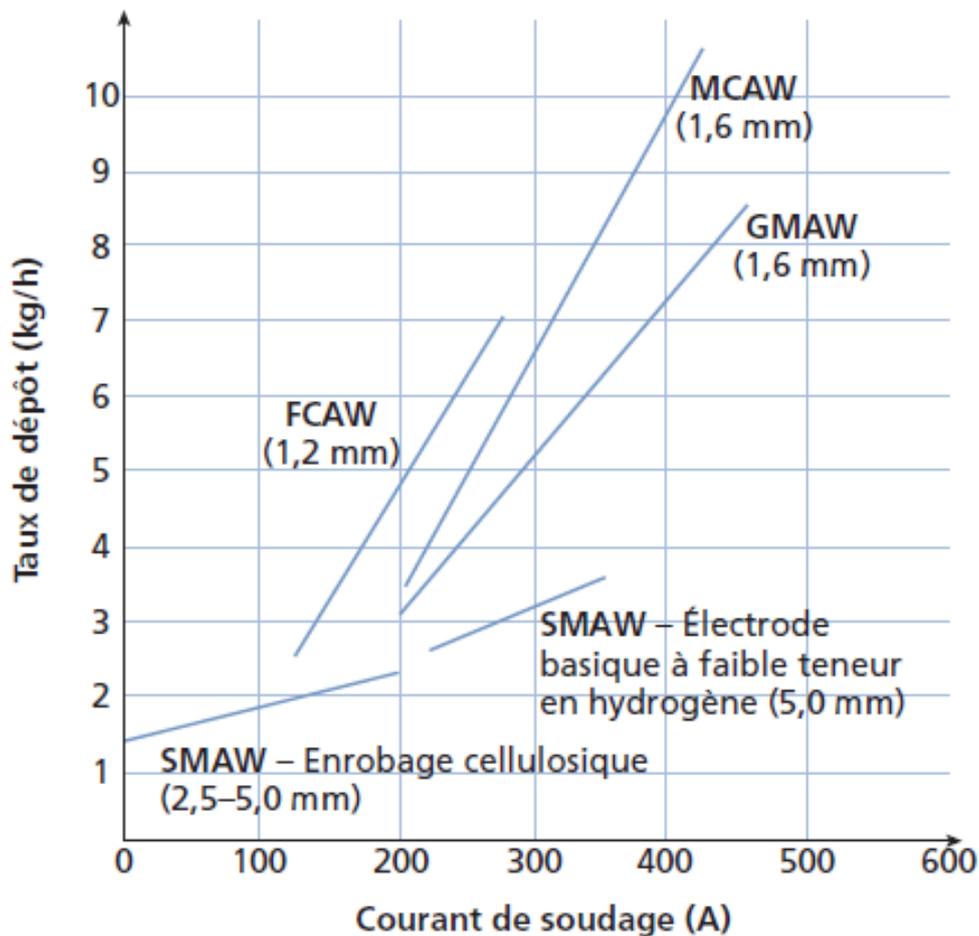


Figure 1.8. Comparaison des taux de dépôts obtenus pour différents procédés

Tableau 1.6. Avantages des procédés FCAW avec fil auto protégé et sous protection gazeuse.

| Procédés FCAW | Avantages |
|-----------------------|---|
| Avec fil auto protégé | <ul style="list-style-type: none"> - Moins sensible aux effets du vent ou des courants d'air - Nécessite moins d'équipements. - Peut utiliser le même équipement que le procédé SMAW si muni d'un dévidoir à vitesse |

| | |
|------------------------------|---|
| | variable asservi à la tension de l'arc. |
| Sous protection gazeu | <ul style="list-style-type: none"> – Meilleure qualité de soudure – Pénétration plus profonde – Temps de nettoyage moindre – Valeur de résilience plus élevée <li style="text-align: center;">– Rendement légèrement supérieur |

Applications

Ces procédés sont particulièrement utilisés dans l'industrie de la fabrication de ponts, de réservoirs, de turbines, de matériel agricole et de châssis de camions, de même que dans la construction navale, la chaudronnerie-tuyauterie, les travaux d'entretien, le rechargement, etc.

Le procédé avec fil auto protégé peut notamment être utilisé dans des endroits plus aérés et convient particulièrement à la soudure de joints mal ajustés, en réduisant les risques d'effondrement.

❖ Résumé :

- Le SMAW est le procédé de soudure à l'arc qui procure la plus grande liberté d'exécution, car il peut être utilisé pratiquement n'importe où et dans n'importe quelle condition. L'équipement est relativement simple, car la protection du bain de fusion est fournie par l'enrobage de l'électrode.
- Il peut servir à la fabrication d'items spécialisés (par exemple, en tuyauterie), pour le soudage de l'acier inoxydable ou pour la réparation de pièces. Cependant, le SMAW est surtout utilisé sur le chantier ou pour la réparation plutôt qu'en atelier.
- Le procédé GTAW permet d'obtenir des soudures précises, un dépôt dense et est particulièrement approprié pour le soudage des métaux non ferreux ou à faible soudabilité.
- Quant au procédé GMAW, il est très répandu, car selon le mode de transfert utilisé, il peut servir à souder tous les types de métal et toutes les épaisseurs de matériau. Le choix des fils-électrodes et des gaz de protection dépend du métal de base et du mode de transfert utilisés.
- Enfin, les procédés semi-automatiques à fils fourrés ou à fils à centre de poudre métallique sont aussi très répandus, notamment à cause de leur taux de dépôt particulièrement élevé. Ils permettent le soudage dans toutes les positions. L'utilisation de fils fourrés auto protégés permet aussi l'utilisation du procédé dans une grande variété de conditions.
- Les paramètres de soudage sont souvent inter reliés et il existe une variété presque infinie de combinaisons possibles. Le soudeur doit toujours s'assurer de bien connaître son procédé et de respecter les paramètres de soudage recommandés afin de réaliser une soudure sans faille.

2.5. Soudage par résistance.

2.5.1. Introduction.

Le soudage par résistance ou “ResistanceWelding => RW” est un procédé général regroupant quelque 20 procédés selon l’ISO 4063 tels que :

- Soudage par résistance par points ;
- Soudage à la molette ou au galet ;
- Soudage par bossage ;
- Soudage par étincelage ;
- Soudage en bout par résistance pure ;
- Soudage par résistance des goujons ;
- Soudage par résistance à haute fréquence ;
- Autres procédés de soudage.

2.5.2. Principe des procédés de soudage par points.

Ils permettent le soudage sans métal d’apport (soudage autogène) des pièces à assembler par recouvrement ou bout à bout, en utilisant les effets conjugués d’une pression mécanique et un courant électrique de forte intensité (1000 à 100000 A) pour une tension comprise entre 1 et 30 V, provoquant une forte élévation de température par ” Effet Joule ” dans la zone de positionnement des électrodes en cuivre ou en alliages de cuivre. Le cuivre étant un métal très bon conducteur de l’électricité et de la chaleur, ce qui permet de moins chauffer la zone de contact et ainsi d’éviter la fusion.

C’est un soudage par pression avec transformation de l’énergie électrique en énergie calorifique par effet Joule, puisque le métal présente une résistance lorsqu’il est parcouru par un courant électrique de forte intensité, qui crée un noyau fondu au niveau de l’interface tôle-tôle. En refroidissant, ce noyau fixe localement les deux tôles entre elles. La (Figure1.9) représente schématiquement le **principe du soudage par points** :

Les deux pièces sont placées et maintenues dans leur position respective d’assemblage, puis introduites dans les bras de la machine. L’action d’une pédale liée à la machine de soudage pour chacun des points à réaliser un cycle complet qui comprend les phases suivantes :(figure 1.10) [9].

- L’accostage : les électrodes viennent appuyer et comprimer les pièces à souder.
- Le soudage : Le passage de courant dû à la fermeture de circuit crée une zone fondue par l’effet de joule.
- Le forgeage et le maintien : effet de maintenir pour laisser le temps à l’assemblage de refroidir.
- La remonté : la fin du procédé, les électrodes s’écartent et reviennent au repos.

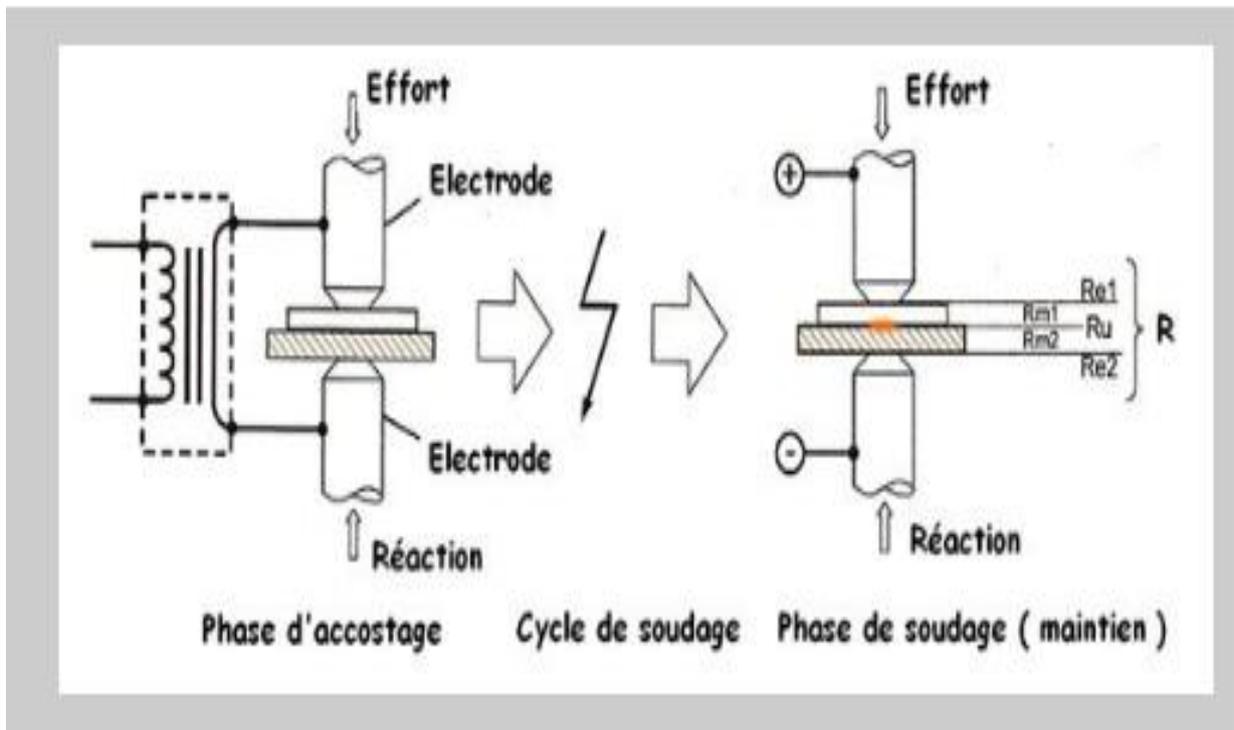


Figure 1.9. Schéma de soudage par point.

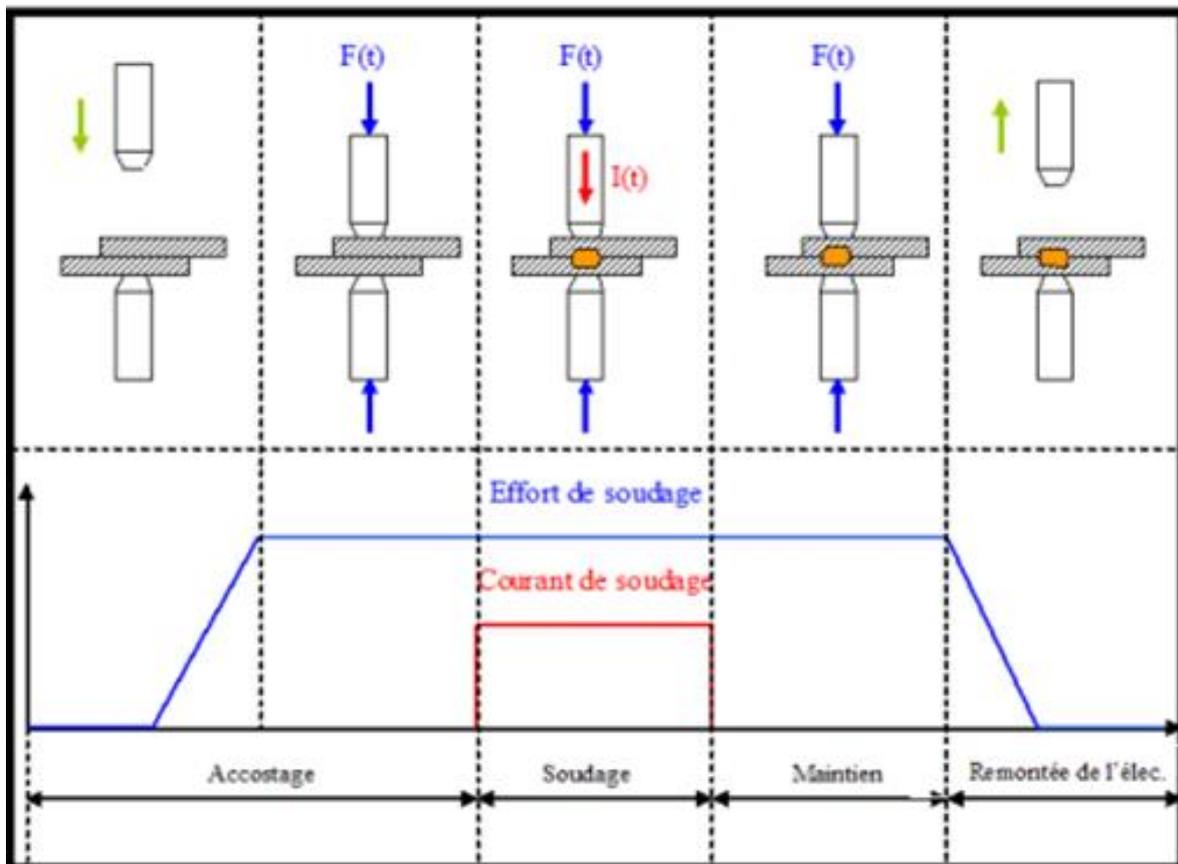


Figure 1.10. Représentation schématisée des phases du soudage par point.

2.5.2.1. Principe du procédé.

Le soudage à la molette est en fait, une version continue du soudage par points. Les électrodes sont, ici, remplacées par deux roues (disques en cuivre ou molette) tournant en sens opposé, qui via une force appliquée, permet le transport des pièces à souder (principalement des tôles) en permettant la réalisation de soudures continues. Dans ce cas, le courant passe à très courts intervalles, ces soudures étant étanches ou interrompues et le courant passe par certains intervalles (Fig1.11). Les applications sont l'assemblage de tôles, par recouvrement pour de faibles épaisseurs et la fabrication de tubes à partir d'une feuille métallique.

C'est un procédé offrant des vitesses de soudage élevées très intéressant pour l'assemblage de tôles profilées. Des vitesses de soudage de ϵ à 4 m/min sont atteintes, mais il est possible d'obtenir des vitesses de l'ordre de 15 m/min (sous haute fréquence). On peut même atteindre 50 m/min pour le soudage des boîtes de conserve par exemple. C'est un procédé très employé pour la fabrication des tuyauteries industrielles roulées-soudées (soudures longitudinales ou transversales (Fig1.11). Un mandrin fixe et une molette roulant en se déplaçant sur une génératrice du mandrin (Fig1.12a) ou encore deux galets d'entraînement du tube à souder et l'action de deux molettes de soudage (Fig1.13).

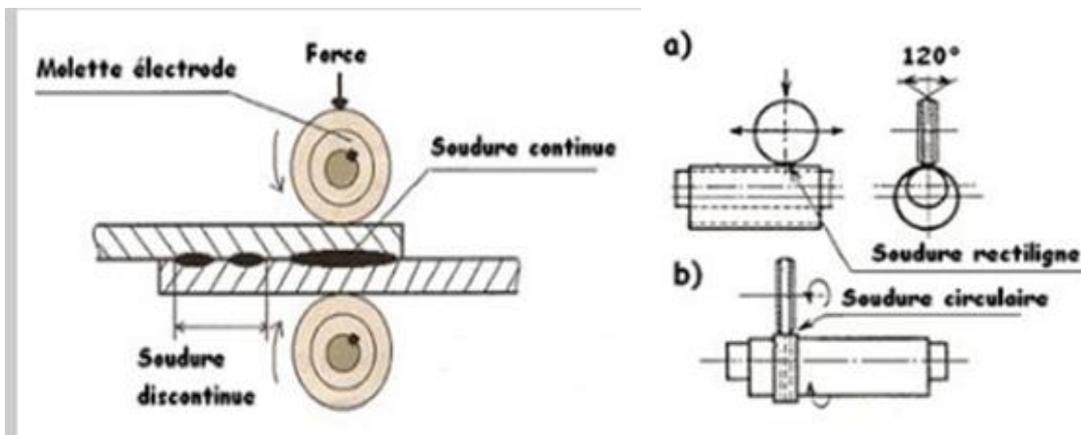


Figure1.11. Schéma de soudage à la molette**Figure1.12. Schéma de soudage à la molette**

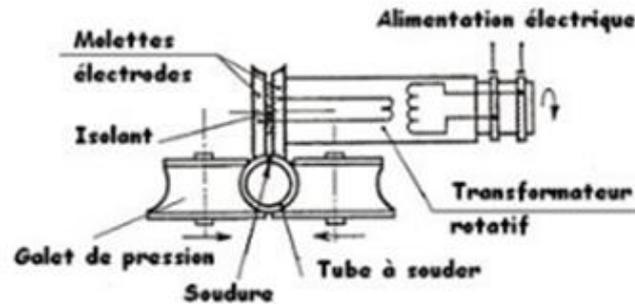


Figure1. 13.Schéma de soudage à la molette

2.6. Soudage par pression en phase solide.

Cette technologie consiste à appliquer une pression à deux surfaces de pièces qui sont donc déformées plastiquement pour le contact nécessaire à la réalisation du joint soudé. La condition fondamentale pour obtenir d'une telle jonction consiste dans l'action des forces interatomiques pour activer la diffusion mutuelle d'atomes des métaux à souder et, par conséquence, l'obtention de la continuité du réseau atomique. La déformation due à la pression concourt, dans certains cas, à satisfaire la condition de propreté du joint en brisant les pellicules superficielles. La liaison est obtenue par déformation à froid si le métal est suffisamment ductile, ou à chaud pour amollir le métal.

2.6.1. Principe du soudage par friction rotative.

C'est un procédé de soudage mécanique où l'apport de chaleur nécessaire au soudage est fourni par le frottement des pièces à assembler. L'une est fixe, l'autre est animée d'un mouvement, généralement de rotation. Lorsque la température est atteinte, on applique un effort supplémentaire de forgeage. (Figure1.14).

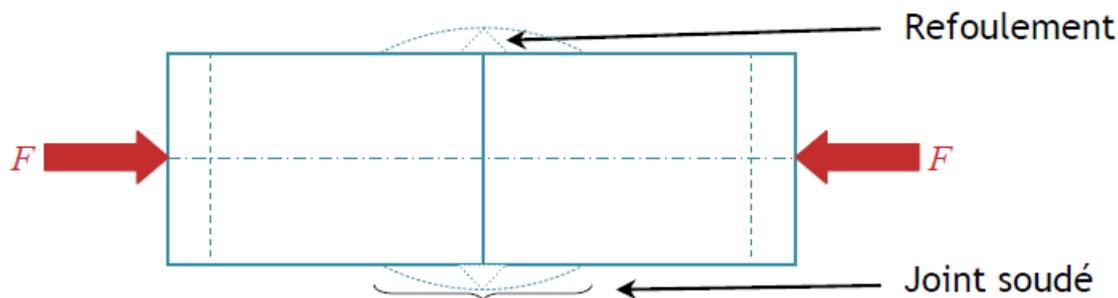


Figure1.14.Principe du soudage par friction rotative.

2.6.2. Principe du soudage par friction malaxage.

Dans ce procédé, un pion tournant à grande vitesse pénètre à l'intérieur des deux pièces à souder. La friction de l'outil sur les pièces provoque, par échauffement, un amollissement de la matière qui entre dans une phase pâteuse. Les bordures des pièces à souder se déforment plastiquement et sont

mélangées, d'où le nom de friction-malaxage. L'épaulement (figure 1.15) qui s'appuie avec une force importante sur les bords des plaques empêche le métal brassé de s'écarter de la zone de soudage. Ceci produit un effet de forgeage à l'arrière du matériel qui vient d'être déformé et mélangé.

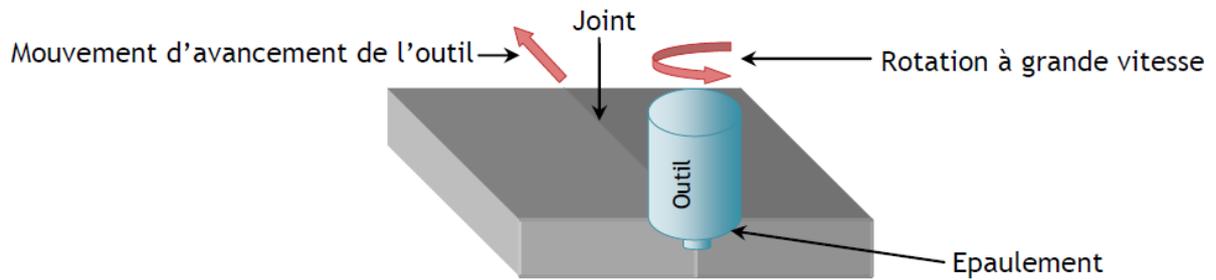


Figure1.15.: Principe du soudage par friction malaxage.

Chapitre2. Etude thermique et métallurgie de soudage

1. Introduction.

L'étude de la métallurgie nous apprend que les caractéristiques d'un acier sont fonction de sa structure (nature, dimension, morphologie, et répartition des constituants) et de sa composition chimique. La structure étant elle-même liée à la composition chimique et au traitement thermique que subit l'acier.

Les principaux généraux de la métallurgie (édifice cristallin, composition chimique, transformation d'état, de structure, modification chimique), s'appliquent aux caractéristiques mécaniques et chimiques, de la zone fondue des soudures.

Au cours de la soudure, une grande quantité de chaleur est apporté localement à la pièce soudée. Cet apport calorifique engendre une phase de chauffage très rapide (jusqu'à une température comprise entre la température initiale du métal et sa température de fusion, suivant la distance du point considéré à la zone fondue), à laquelle succède une phase de refroidissement dont la cinétique dépend essentiellement des conditions de soudage (procédé de soudage, rendement thermique du procédé, géométrie du joint soudé, paramètres de soudage...etc.). On peut considérer deux zones distinctes dans le joint soudé : la zone fondue et la zone affectée par la chaleur (ZAC), appelée aussi : zone affectée thermiquement (ZAT).

2. Rôle de la métallurgie.

En amont de toute fabrication, le concepteur fait le choix du matériau potentiellement le plus apte à supportés les conditions de service auxquelles sera soumis le produit fabriqué.

En pratique, ce sont principalement les propriétés mécaniques des matériaux, qui guident les concepteurs dans ce choix. Par exemple, on choisit un alliage de toute résistance à la traction pour fabriquer une charpente métallique soumis à des efforts de tractions élevées, ou un acier résistant au choc, pour fabriquer un essieu de camion. Or, les propriétés d'un matériau dépendent de sa structure métallique (arrangement interne de la matière).

Aussi, le rôle principal de la métallurgie est-il de comprendre le fonctionnement métallurgique d'un matériau, ou encore, plus simplement dit, de savoir comment façonner, ou faire évoluer sa structure métallurgique, afin de maîtriser ses propriétés.

2.1. La variation de la structure des matériaux.

La structure métallurgique (donc les propriétés) des matériaux évolue principalement avec :

La composition chimique (nature et qualité des éléments présents dans le matériau) ; Le traitement thermique (voire thermomécanique) que le matériau reçoit lors de sa fabrication ; c'est-à-dire de la façon précise avec laquelle il est chauffé puis refroidi au cours de sa mise en forme, ou après (citons par exemple le traitement thermique de trempe et de revenu) ;

La façon dont il est mis en forme ; on distinguera notamment les produits moulés (fabriqué par fusion / solidification) et les produits mis en forme par déformation à chaud (par exemple : laminage, forgeage.....).

3. Rôle de la métallurgie de soudage.

Lors d'une opération de soudage, en termes métallurgique, tout est remis en question ; les structures des pièces à assembler tendent à évaluer lors du soudage. En effet, dans la plupart des cas, chauffés puis refroidis par la source de chaleur de soudage, les matériaux assemblés subissent un nouveau traitement thermique. De plus, il s'agit de soudage par fusion :

D'une part les matériaux assemblés peuvent prendre une nouvelle composition chimique s'ils sont mélangés à une composition chimique différente, par exemple celle du métal d'apport et dans les cas nets ils quittent la structure du métal de base pour passer (au moins dans un premier temps) par une structure brute de solidification de type produit moulé (dans la région où ils sont fondus puis à nouveau solidifier).

Le rôle principal de la métallurgie du soudage est de connaître la façon dont évolue la structure métallurgique d'un matériau soudé dans les régions où il est modifié par le soudage (régions soudées), et ce de maîtriser les propriétés d'une soudure.

La figure 2.1 [32] structure d'un alliage, vue au microscope électronique et figure 2.2 [32] Morphologie d'une structure d'acier.

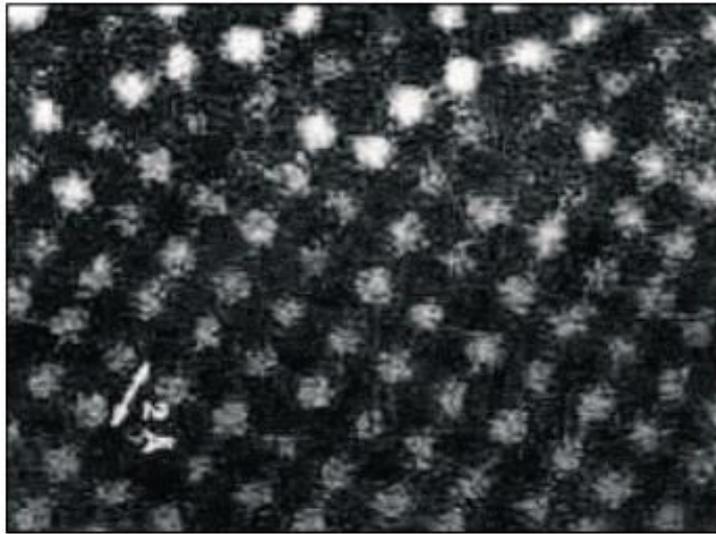


Figure2. 1.Structure d'un alliage métallique au microscope électronique

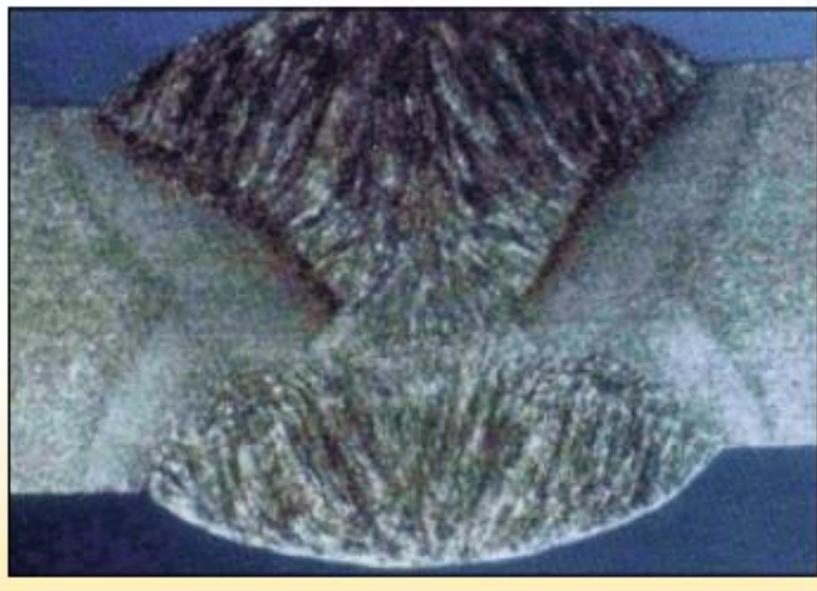


Figure 2.2.Macrographie d'une soudure d'acier

4. Comprendre le comportement métallurgique.

Pour comprendre le comportement d'un métal de base au soudage il faut connaitre et étudier (Figure2.3 et Figure2.4) [32] :

- Avant toute chose, le fonctionnement métallurgique du matériau qui va être soudé ; ce matériau est appelé par le métallurgiste du soudage **métal de base(MB)** ;
- La façon dont une soudure chauffe et refroidit dans le temps et dans l'espace (traitement thermique au soudage), ainsi que les facteurs d'influence (énergie, épaisseur soudée,), on parle d'aspect thermique de l'opération de soudage ;

Etude thermique et métallurgie du soudage

- Les modifications subies par le métal de base dans les régions où il a chauffé et refroidi sans fondre, cette région est appelée **zone affectée thermiquement (ZAT)**. Et il s'agit de soudage par fusion ;
- Les modifications subies par le métal de base dans les régions où il a chauffé, fondu, refroidi (après solidification) et éventuellement modifié chimiquement (s'il y a eu utilisation d'un métal d'apport). Cette région est appelée **zone fondue (ZF)** ;
- Les modifications particulières qui peuvent s'opérer à la frontière de la **ZF** et de la **ZAT** ; cette région est appelée **la zone de liaison (ZL)**.

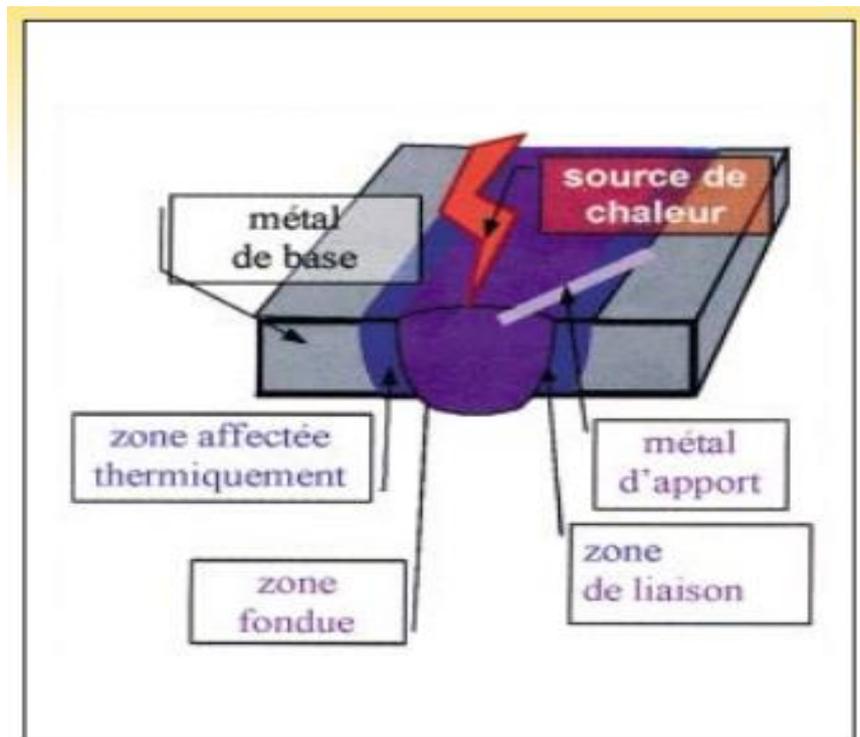


Figure2.3.Métal de base, zone affectée thermiquement, soudure, source de chaleur, métal d'apport, zone de liaison

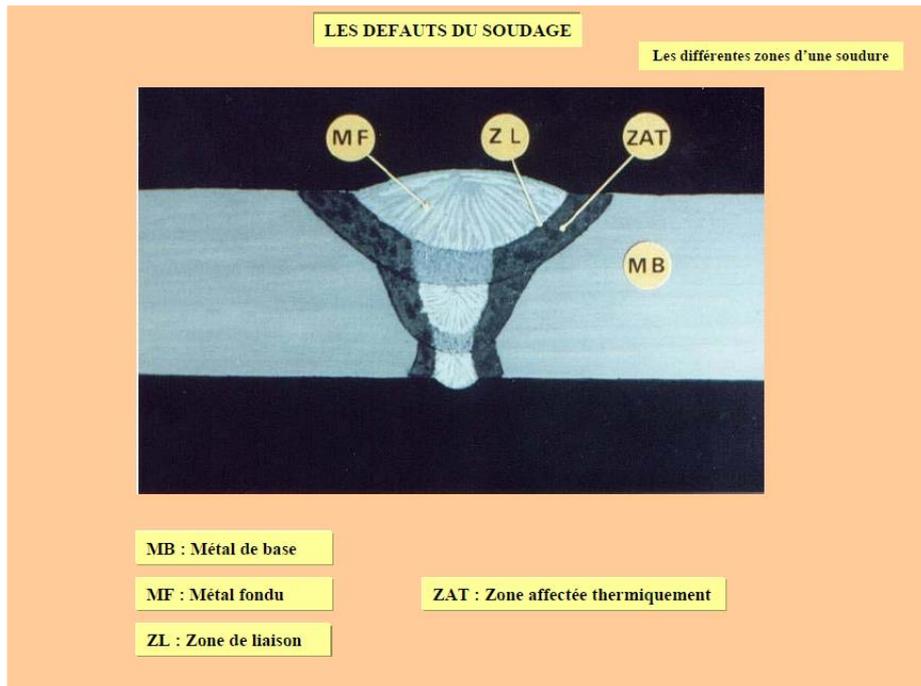


Figure 2.4. Structure d'un cordon de soudure

5. Caractères généraux de l'opération de soudage.

Le soudage est considéré comme une technique spéciale et multidisciplinaire. Le résultat de l'opération de soudage dépend étroitement d'un couplage entre les phénomènes thermiques, métallurgiques, mécaniques et électro-magnéto-hydrodynamiques(Figure2.5) [33]

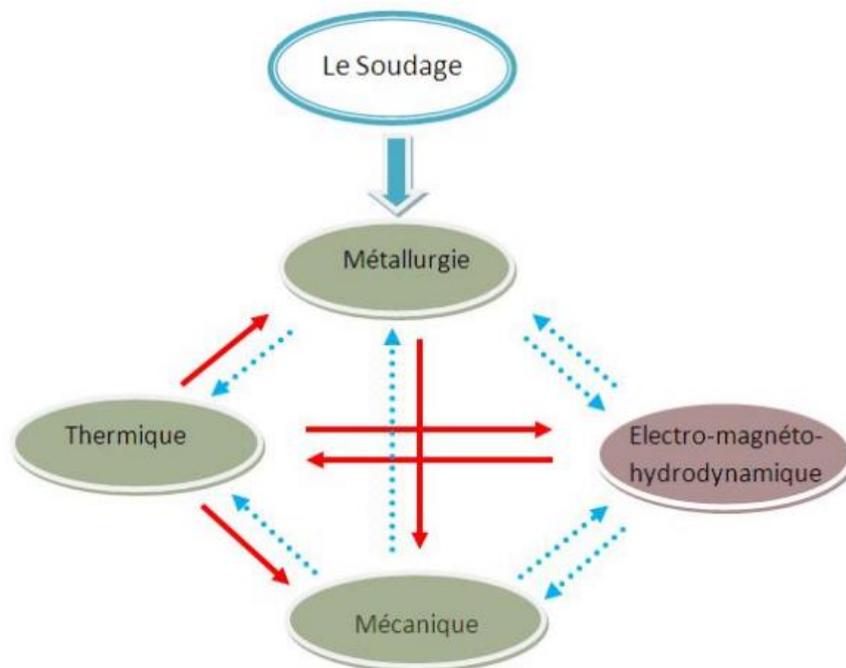


Figure 2.5. Couplages physiques impliqués lors du soudage

Les opérations de soudage engendrent des cycles thermiques qui conduisent à des transformations de phase à l'état solide dans la zone affectée thermiquement (ZAT) et à l'état liquide dans la zone fondue (ZF). Ces modifications métallurgiques dépendent de la composition chimique locale du matériau de base et des conditions de soudage telles que l'énergie de soudage, la vitesse de déplacement de la torche et les conditions de refroidissement. Réciproquement, ces transformations modifient les propriétés thermiques du matériau et s'accompagnent d'absorption ou de dégagement de chaleur, nommées chaleurs latentes de transformation. L'influence de l'histoire thermique sur la mécanique est caractérisée par la variation des propriétés mécaniques en fonction de la température et par la dilatation thermique du matériau. L'influence de l'état mécanique sur le champ de température est caractérisée par la dissipation intrinsèque générée par les déformations plastiques. Cependant, dans le cadre de la simulation d'une opération de soudage par fusion, la dissipation mécanique est négligeable devant la puissance énergétique du procédé de soudage (Bonaventure, 2012).

5.1. Phénomènes thermiques lors du soudage.

Pendant une opération de soudage, l'énergie générée par l'arc électrique produit localement un bain de fusion à l'intérieur duquel la chaleur se transmet par des mouvements de convection. Dans le reste de la structure, le transfert d'énergie se fait par conduction tandis que les échanges avec le milieu environnant mettent en jeu des phénomènes de convection et de rayonnement.

Pour étudier les phénomènes mis en jeu au cours du soudage, il faut connaître le cycle thermique de soudage qui correspond à la variation de la température T en fonction du temps t . Ce cycle thermique est caractérisé par un chauffage rapide suivi d'un bref passage à très haute température puis par un refroidissement plus lent (Figure 2. 6). Dans le cas des aciers cette courbe met en évidence trois grandeurs caractéristiques (Saint-Germain, 2006) :

- La température maximale atteinte T_m ,
- **la durée d'austénitisation** Δt_a au-dessus de la température d'austénitisation T_a (ou A_{c3}) et
- **la vitesse de refroidissement**, traduite habituellement par la durée de refroidissement $\Delta t_{500-800}$ entre 800 et 500 °C. Grâce à la connaissance du cycle thermique en un point de l'assemblage, il est alors possible d'analyser les évolutions des phénomènes métallurgiques apparaissant en ce point.

Si on analyse les thermo grammes obtenus en des points situés à la même distance par rapport au centre du cordon de soudure (Figure 2.7) [32], on constate alors que les cycles thermiques évoluent

en fonction de l'avancée de la torche jusqu'à une certaine distance d_{stat} où ils deviennent identiques. Le champ de température a alors atteint un régime dit stabilisé ou quasi-permanent.

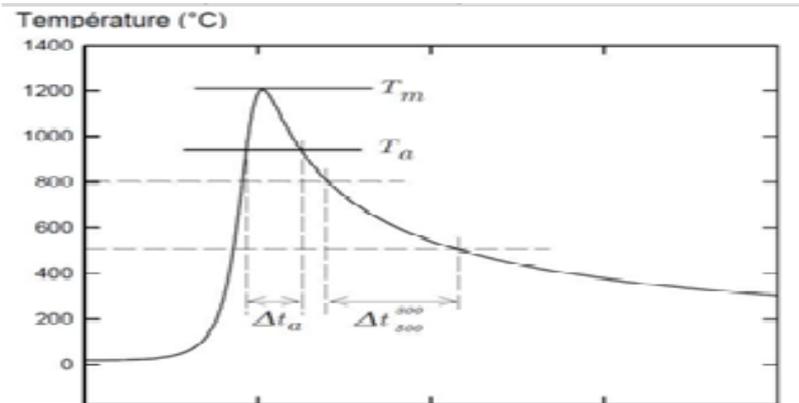


Figure 2.6. Evolution de la température en distances croissantes de l'origine du cordon d'après (Saint-Germain, 2006)

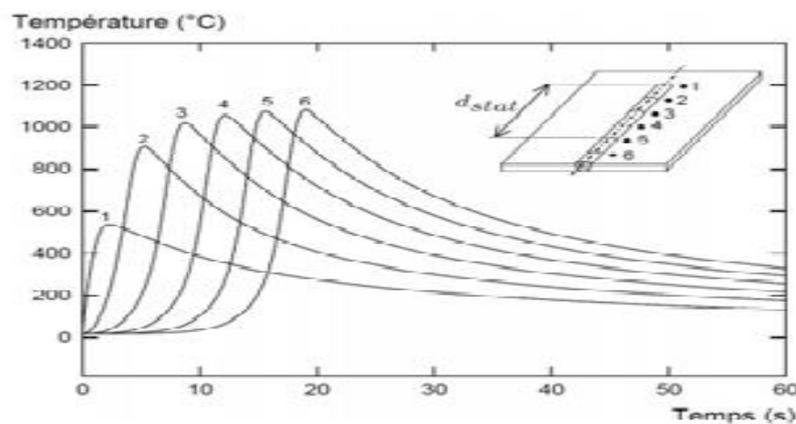


Figure 2.7. Evolution de la température en fonction du temps au voisinage de la ligne de soudure

D'après (Saint-Germain, 2006)

5.2. Cas du soudage multi passe.

L'évolution de la température dans le cas du soudage multi passe dépend de la température initiale mais aussi du nombre et de la disposition des passes ainsi que de l'intervalle de temps entre les passes. La (Figure 2. 8)[33], montre un exemple de cycles thermiques subis par différents points de la structure lors d'une opération de soudage comprenant quatre passes (Radaj, 2003).

Au cours de l'opération de soudage, tous les points de la ZAT subissent une succession plus ou moins complexe de cycles thermiques. Suivant la position d'un point donné dans la ZAT l'enchaînement des différentes passes conduit à une succession de pics d'amplitudes variées et dont la température maximale dépend de la distance du point considéré à la passe de soudage. Par ailleurs

toujours pour un point donné, l'éloignement progressif des passes suivantes rend leur influence négligeable.

Suivant la position du capteur, le cycle thermique se résume en fonction des températures atteintes, en une combinaison de plusieurs pics thermiques. La microstructure finale résulte donc d'une succession de cycles thermiques pouvant être relativement variés et conduisant ainsi à l'établissement d'une microstructure complexe sur l'ensemble de la ZAT

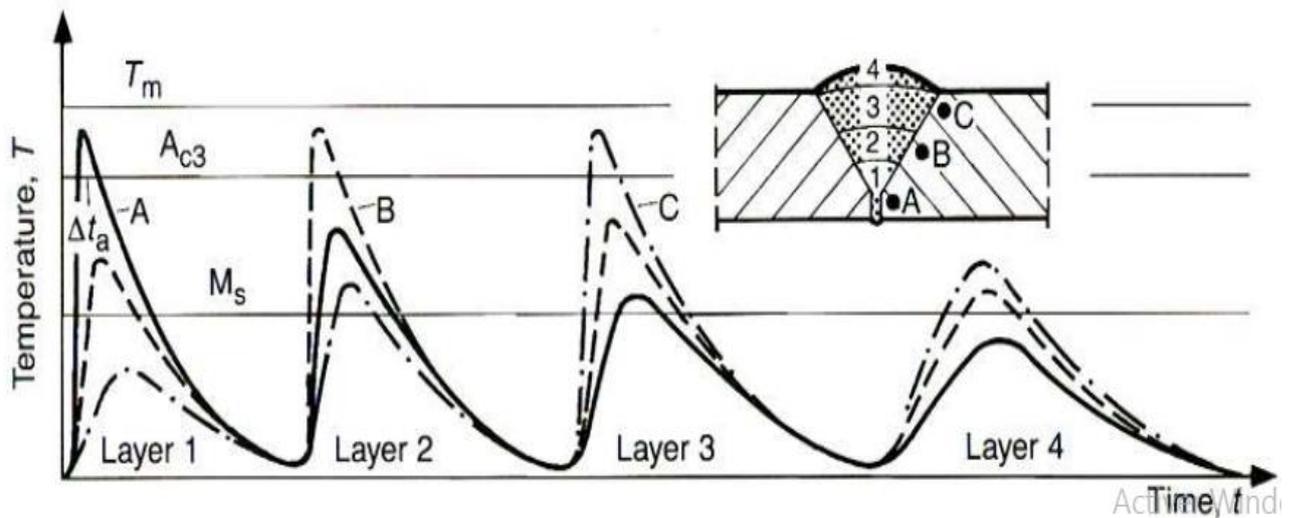


Figure 2.8. Exemple de cycles thermiques rencontrés en soudage multi passe d'après (Radaj, 2003)

5.3. Aspect chimique :

C'est à juste titre que, aux différences près dues à la brièveté de l'opération de soudage, à tout le moins le soudage par fusion, a pu être comparé à une opération d'élaboration, en raison de l'évolution qui se produit dans la composition chimique du métal fondu. On peut citer les causes d'évolution de la composition chimique du métal fondu soit par le comportement de ses éléments constitutifs soit au contact du milieu qui l'entoure (gazeux ou liquide) soit encore en présence du milieu solide constitué par le métal de base lui-même.

a) Au niveau du métal fondu proprement dit et de ses éléments constitutifs, la température élevée atteinte durant l'opération peut être à l'origine d'une perte en éléments par volatilisation, perte qui doit être compensée par les additions ou par un mode opératoire approprié. D'autre part, durant le séjour à l'état liquide, des réactions chimiques sont susceptibles de se produire entre éléments présents, qu'ils proviennent du métal de base lui-même ou du métal d'apport mis en œuvre. De telles réactions se traduisent par une évolution des propriétés, mécaniques ou autres et

éventuellement par une altération de la compacité, s'il y a formation de composés insolubles ou dégagement de gaz.

b) Dans le même temps le métal fondu est susceptible d'être chimiquement influencé par le milieu gazeux qui l'environne, si un tel milieu existe. C'est bien, à l'origine, le souci de protéger le métal fondu contre l'action néfaste de l'oxygène et de l'azote de l'air qui a conduit à l'élaboration des enrobages et des flux, qui produisent un laitier liquide qui sépare le métal fondu de l'atmosphère, puis à l'utilisation de gaz complètement protecteurs tels que l'argon, ou partiellement protecteurs, tels que l'anhydrite carbonique ou les mélanges de cette gaze avec de l'argon. En fait, les gaz énumérés ci-dessus ne sont les seuls à intervenir, et nous aurons en particulier à examiner, à d'autres points de vue, le rôle de l'hydrogène dans le soudage de l'acier ou d'autres alliages.

c) La recherche d'une protection de bain de fusion contre l'atmosphère environnante, ainsi que d'un moyen d'y incorporer des éléments susceptibles d'intervenir, a conduit à la mise au point, des enrobages d'électrodes et des flux qui, au moment de la fusion produisent une phase liquide nommé laitier qui réagit au contact du bain de fusion et en fait évoluer la composition. Il y a donc bien élaboration, mais comme on l'a dit, il s'agit d'une opération rapide, hors des conditions normales d'équilibre.

d) Enfin, on a déjà mentionné le fait qu'au contact du métal de base solide qui lui sert de support, une proportion plus ou moins importante de métal de base s'incorpore, par sa propre fusion, au métal fondu. Ainsi se trouve définie la dilution, dont la valeur dépend d'une part du procédé de soudage, par la pénétration qui lui est propre, d'autre part, pour chaque procédé, du mode opératoire.

5.4. Aspect thermomécanique :

Le caractère localisé de l'opération de soudage et le passage par l'état fondu suivi d'une solidification font intervenir deux comportements physiques importants à savoir le retrait à la solidification et la dilatation thermique qui agissent simultanément pour engendrer déformations et contraintes au niveau des joints soudés. La prévention des déformations globales provoquées par le soudage et qui sont associées au retrait à la solidification et au refroidissement, pose des problèmes technologiques, mais il faut noter que tout empêchement à la déformation se traduit par la naissance de contraintes résiduelles supplémentaires. Les remèdes à la déformation sont donc, chaque fois que cela est possible, à rechercher dans un mode opératoire qui en réduit l'amplitude, plutôt que dans un effet de bridage des pièces à assembler. Quant aux contraintes résiduelles, qui naissent au niveau des zones localement déformées à chaud, c'est-à-dire plastiquement, elles s'établissent au cours de refroidissement, affectent un métal redevenu élastique, ce qui leur assigne une valeur maximale

égale à la limite d'élasticité de ce métal. D'autre part, mais ceci concerne que certains aciers particulièrement trempant, il y a lieu de tenir compte des contraintes associées à la déformation martensitique [34].

5.5. Aspect constructif.

La question qui est posée ici, dans le cadre des caractères généraux du soudage, est de savoir si la continuité établie par les joints soudés entre les éléments assemblés pour constituer une construction implique une exigence particulière à l'égard du métal de base, indépendamment de celles qui résultent des effets métallurgiques et thermomécaniques directs du soudage. En effet, la continuité assurée par les soudures confère à la construction un caractère monolithique qui n'est pas sans risque ; on comprend aisément que, si en un point quelconque de la construction et pour une cause qui n'est pas forcément associée à la qualité des soudures, une rupture s'amorce, aucune discontinuité n'est susceptible de l'arrêter dans sa propagation, si le métal de base ou les soudures elles-mêmes ne s'y opposent pas. Il suffit, pour illustrer ce propos, d'évoquer les ruptures spectaculaires qui ont affecté dans le passé des constructions soudées telles que navires ou ponts et l'usage qui a été fait de lignes de rivets pour créer des obstacles à une telle propagation (appelés à l'époque « crack arrestors »).

6. Types de joints.

La technique employée pour souder dépend de la position des pièces à assembler. On distingue cinq assemblages fondamentaux suivant la façon dont les pièces sont disposées, chacun d'eux comportant des variantes.

Les principaux types de joints de soudure sont :

- Joint bout à bout.
- Joint en T.
- Joint d'angle.
- Bord ou joint parallèle.
- Joint de recouvrement.
- Articulation cruciforme.
- Joint à rainure évasée.

6.1. Les joints bout à bout.

Les soudures bout à bout sont des soudures où deux pièces de métal à assembler sont dans le même plan. Ces types de soudures ne nécessitent qu'un certain type de préparation et sont utilisés avec des tôles minces qui peuvent être soudées en un seul passage. Les problèmes courants qui peuvent affaiblir une soudure bout à bout sont le piégeage de scories, une porosité excessive ou des fissures.

Pour les soudures fortes, l'objectif est d'utiliser le moins de matériau de soudage possible. Les soudures bout à bout sont répandues dans les processus de soudage automatisés, tels que le soudage à l'arc submergé, en raison de leur relative facilité de préparation. Lorsque les métaux sont soudés sans assistance humaine, il n'y a pas d'opérateur pour faire des ajustements pour une préparation de joint non idéale. En raison de cette nécessité, les soudures bout à bout peuvent être utilisées pour leur conception simpliste pour être alimentées efficacement par des machines de soudage automatisées. (Figure 2.9 et 2.10).

6.2. Joint bout à bout avec bords relevés.

Ce type de joint est surtout utilisé pour assembler les tôles minces. Les bords relevés, jouant le rôle de métal d'apport, sont fondus. Le joint soudé a le même aspect que le joint bout à bout (figure 2.11 et 2.12)

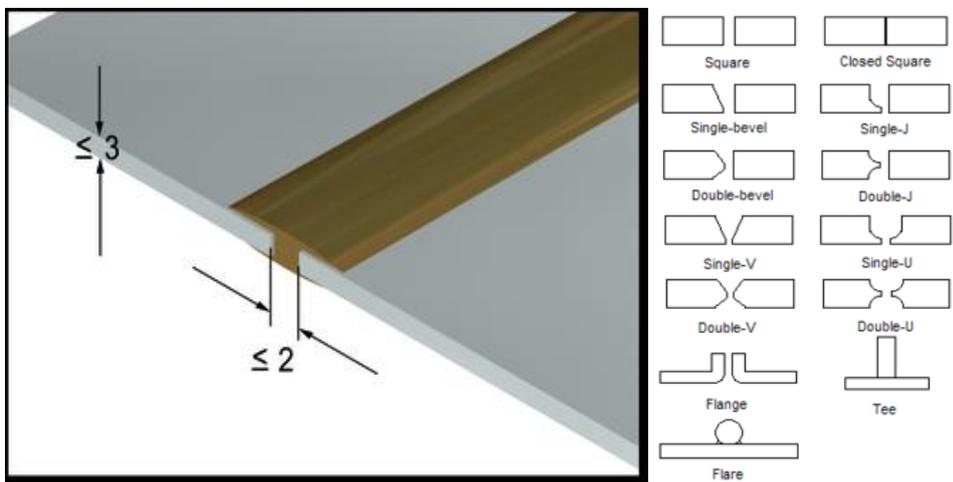


Figure 2.9. Joint bord à bord en I **Figure 2.10. Géométries des joints bout à bout**

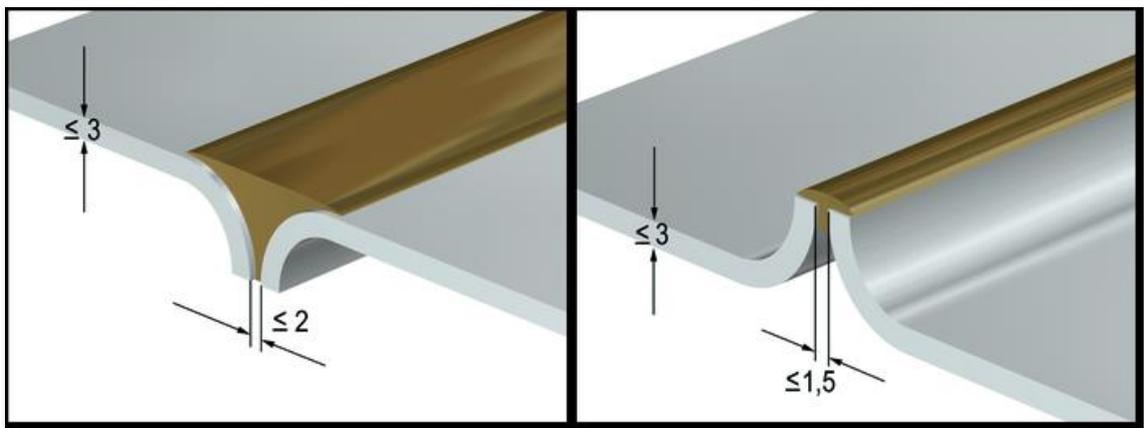


Figure 2.11. Joint face frontale **Figure 2.12. Joint à bords sertis**

6.3. Le joint à recouvrement.

On préfère parfois employer des assemblages à recouvrement plutôt que des assemblages bout à bout. C'est par exemple le cas de la construction des citernes. Le joint à recouvrement est toujours soudé avec métal d'apport. (Figure 2.13 et 2.14)

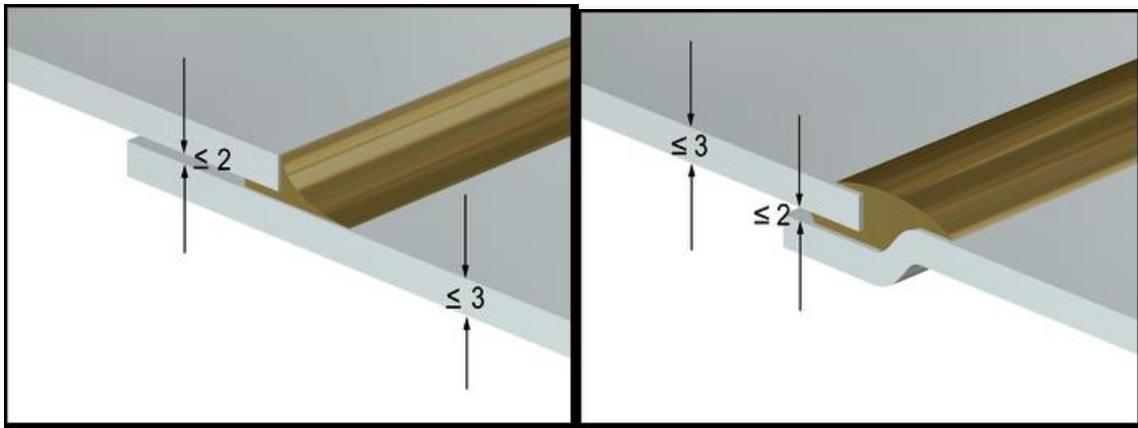


Figure 2. 13..Joint d'angle à recouvrement
Figure 2. 14..Joint d'angle à recouvrement déporté

6.4. Joint en T.

Ce joint avec métal d'apport et est très souvent rencontré dans l'industrie à cause de sa forme (Figure 2. 15).

6.5. Le joint en angle.

Les pièces à assemblées d'un joint en angle forment un L. Le soudage se fait sans ou avec métal d'apport. Dans l'industrie ce type d'assemblage est soudé, car l'exécution de la soudure est très facile. La zone fondue ZF doit pénétrer le métal sur toute son épaisseur et la soudure doit être lisse et d'espace régulier (figure 2.16).

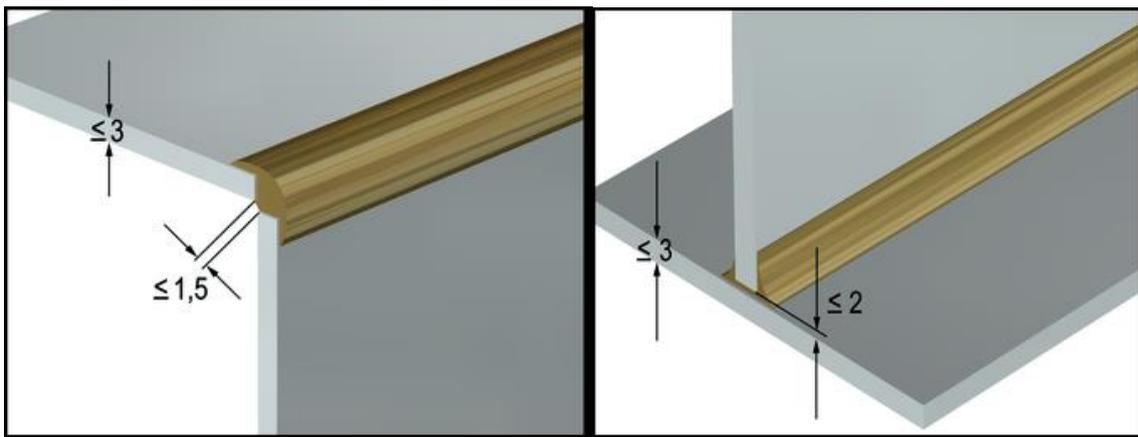


Figure 2.15. Soudure d'angle de coin
Figure 2. 16..Soudure d'angle en T

Chapitre3. Les défauts de soudure

1. Introduction :

Il existe plusieurs types de défauts de soudure ainsi que différentes méthodes pour les prévenir et les corriger. Ce chapitre vise à identifier et à décrire les défauts les plus courants en fonction du métal travaillé ou du procédé de soudage utilisé. Commençons d'abord par les fissurations.

2. Fissurations :

Les fissurations constituent l'un des défauts de soudure les plus fréquents. Elles sont causées par la présence de tensions internes trop importantes à l'intérieur du métal soudé. L'utilisation d'un métal d'apport incompatible avec le métal de base, un cordon trop petit ou des tensions internes créées par le retrait peuvent être à l'origine des fissures. Le bon choix du métal d'apport, un préchauffage approprié, une bonne préparation des joints et la formation d'un cordon respectant les dimensions exigées peuvent donc prévenir les fissures.

Les fissures dans un métal sont divisées en deux catégories selon l'endroit où elles apparaissent :

- Les fissures peuvent être localisées dans le métal fondu ; elles dépendent alors de la nature du métal d'apport et des conditions d'exécution de la soudure.
- Les fissures peuvent aussi se retrouver dans le métal de base, dans la zone de liaison ; ces dernières sont généralement reliées à une plus faible soudabilité du métal.

On peut aussi distinguer deux types de fissurations selon le moment où elles surviennent à la suite d'une soudure : la fissuration à chaud et la fissuration à froid.

Le tableau de la (figure 3. 1), présente les causes les plus fréquentes de fissurations à chaud et à froid, et les moyens de les prévenir.

2.1. Fissuration à chaud :

La fissuration à chaud survient au moment de la solidification du bain de fusion. Elle est plus susceptible d'apparaître en présence d'impuretés dans le métal de base (comme le soufre ou le phosphore). Si on doit souder un métal à risque, il est recommandé d'utiliser des électrodes à flux basique. Par ailleurs, le métal d'apport doit être compatible avec le métal de base et le cordon de soudure doit être suffisamment large.

Dans d'autres cas, si on relève trop brusquement l'électrode à la fin de la soudure, on peut provoquer l'apparition d'un cratère formant une cavité interne provoquant une fissure (figure3. 2). On peut prévenir ces fissures en effectuant un léger retour en arrière avec l'électrode, mais aussi en

préchauffant le métal, en diminuant l'écartement entre les pièces ou en nourrissant le cratère par un apport plus important de métal.

| | Causes | Moyens de prévention |
|----------------------------|---|---|
| Fissuration à chaud | <ul style="list-style-type: none"> - Joints trop étroits - Présence d'impuretés dans la soudure (soufre, phosphore) - Métal d'apport incompatible avec le métal de base - Cordon trop petit - Trop de retrait durant ou après le soudage | <ul style="list-style-type: none"> - Bonne mesure des angles des chanfreins - Préchauffage et chauffage en cours de soudure - Bon choix du métal d'apport - Refroidissement lent - Traitement thermique après soudage (normalisation, recuit) - Cordon suffisamment large, réduction de la vitesse au besoin - En cas de retrait, léger retour en arrière et ajustement de la procédure de soudage |
| Fissuration à froid | <ul style="list-style-type: none"> - Hydrogène coincé dans la soudure - Tensions internes résiduelles importantes | <ul style="list-style-type: none"> - Préchauffage et chauffage en cours de soudure - Refroidissement lent - Utilisation d'électrodes basiques - Entreposage des électrodes dans un four, au chaud - Traitement thermique après soudage (normalisation, recuit) |

Figure 3.1. Causes et moyens de prévention liés à la fissuration

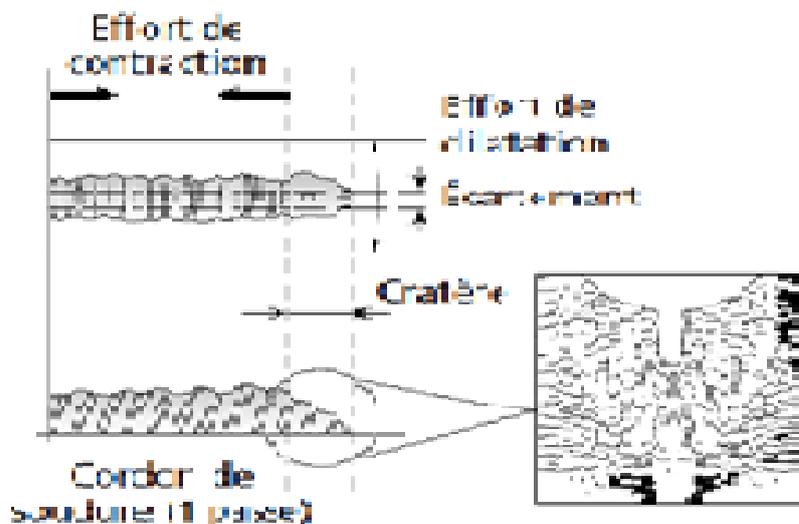


Figure 3. 2..Fissure de cratère

La préparation des joints joue un rôle majeur dans la prévention de la fissuration à chaud, car des joints trop étroits et plus profonds favorisent son apparition, tandis que des joints plus larges et de moindre profondeur en diminuent les risques (figure3. 3).



Figure 3.3. Préparation d'un joint pour la prévention de la fissuration à chaud

2.2. Fissuration à froid :

La fissuration à froid peut apparaître des heures, voire des jours après le soudage. Elle survient dans la zone de soudage ou dans la ZTA (figure 3.4) et est causée par l'hydrogène coincé dans la soudure ou par des tensions internes résiduelles importantes. Les aciers à forte teneur en carbone de même que les aciers faiblement alliés sont plus susceptibles de subir la fissuration à froid.

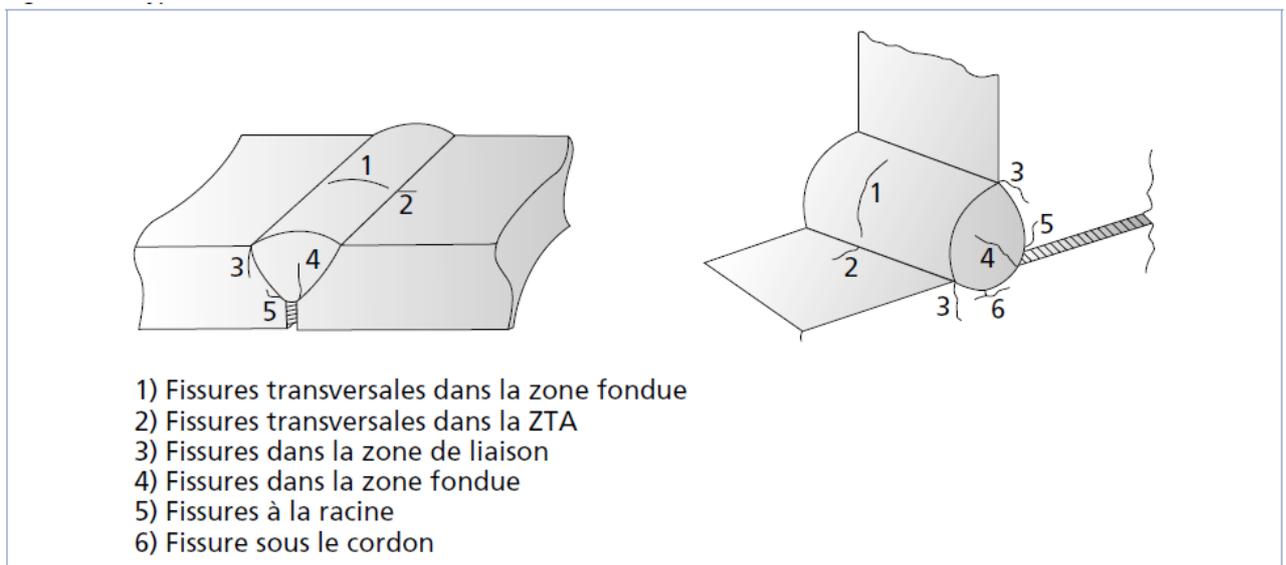


Figure 3.4. Types de fissures à froid

Plusieurs facteurs influent sur la vulnérabilité d'une pièce à la fissuration à froid, dont les suivants :

- La trempabilité liée au carbone équivalent ;
- La présence d'hydrogène due à l'humidité sur l'enrobage ou sur la pièce ou à certains composés comme la rouille et la calamine ;
- L'humidité dans l'air ;
- Le refroidissement rapide de la pièce ;
- La présence de défauts à la surface de la pièce (inclusions, soufflures, trop grande épaisseur de la soudure, caniveau, etc.).

La meilleure prévention de la fissuration à froid est un préchauffage approprié des pièces à souder afin d'évaporer l'hydrogène contenu dans l'humidité présente sur la pièce (le préchauffage doit atteindre au moins 100 °C, soit la température d'ébullition de l'eau). On peut aussi choisir des électrodes préchauffées à basse teneur en hydrogène (basiques). On prend soin de refroidir les pièces susceptibles de fissuration à froid très lentement pour éviter l'apparition de tensions internes favorisant l'apparition de fissures.

3. Défauts communs et causes.

Cette section présente les défauts de soudure les plus courants, ce qui les cause et comment on peut les prévenir.

3.1. Soufflures.

Les soufflures sont des défauts creux, généralement sphériques, formés par la présence de gaz (figure 3.5). Quant aux piqûres, ce sont plus précisément des soufflures débouchantes (en surface).

Les soufflures peuvent être causées par la présence de courants d'air, un manque de gaz de protection, la présence d'une substance grasseuse sur le métal de base ou le métal d'apport, l'obstruction de la buse, un mauvais angle de soudage, un arc trop long, de l'eau ou des impuretés dans le joint à souder.

Pour prévenir les soufflures, on doit s'assurer que la surface du métal de base est propre de même que l'équipement utilisé. Il est également important de bien protéger le bain de fusion. Une intensité de courant trop faible ainsi qu'une vitesse de soudage trop élevée peuvent aussi être responsables de la formation de soufflures. Enfin, les piqûres sont généralement causées par le contact entre l'électrode et le métal de base.

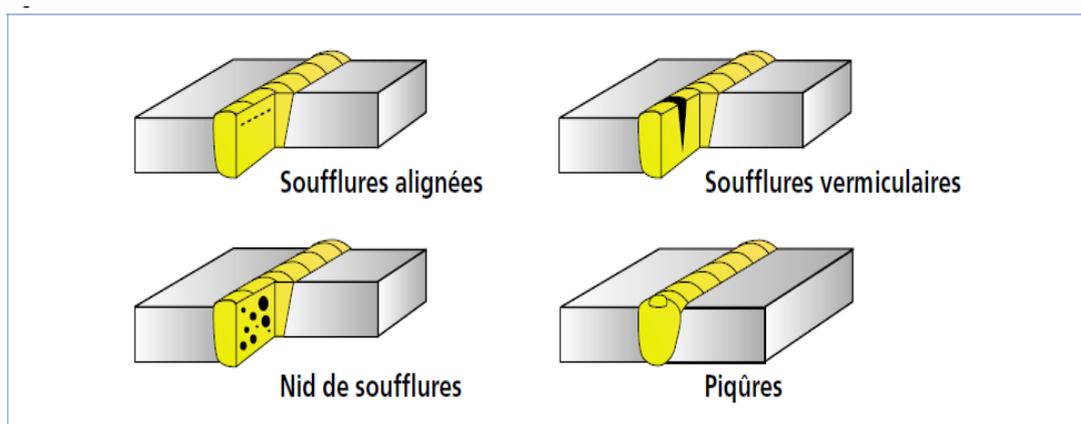


Figure 3.5. Soufflures

4. Pollution ferreuse.

La pollution ferreuse est une corrosion des aciers inoxydables causée par la destruction de la couche superficielle. Elle résulte généralement de l'utilisation d'outils qui ne sont pas en acier inoxydable (brosse ou autres) pendant l'usinage, la mise en forme ou le nettoyage. Dans d'autres cas, elle survient en conséquence des projections de métal fondu lors des opérations de soudage.

4.1. Inclusions.

Les inclusions désignent l'incorporation, dans le cordon de soudure, d'un composé étranger (figure3.6)[8]. On distingue différents types d'inclusions à la (figure3.7) [8].

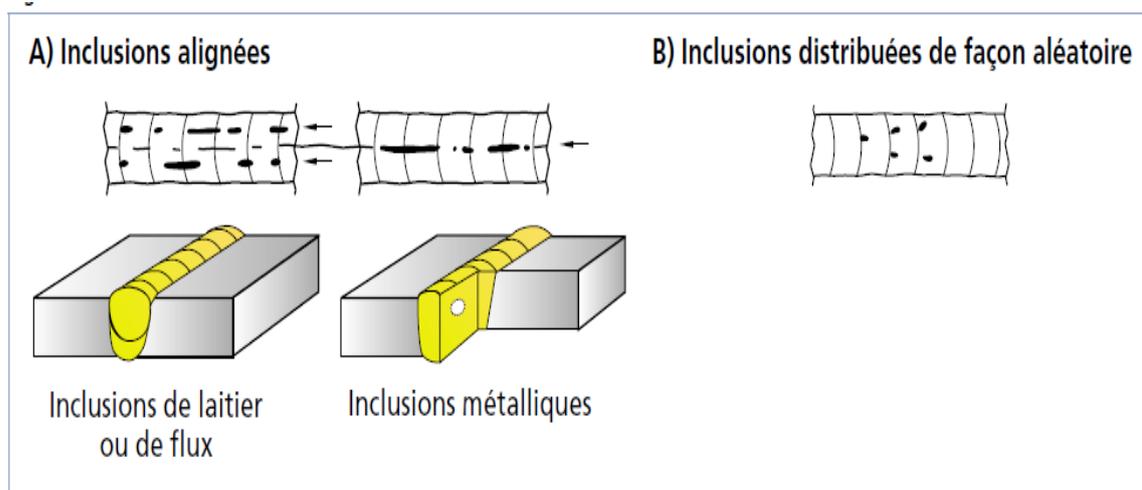


Figure3.6. Inclusions

| Type d'inclusion | Description |
|----------------------|--|
| Inclusion solide | Corps solide étranger emprisonné dans la masse de métal fondu (ex. : poussières) |
| Inclusion de laitier | Résidu de laitier emprisonné dans le métal fondu Les inclusions de laitier peuvent être alignées (ou en chapelet), isolées ou distribuées de façon aléatoire. |
| Inclusion de flux | Résidu de flux emprisonné dans la soudure Les inclusions de flux peuvent être alignées (ou en chapelet), isolées ou distribuées de façon aléatoire. |
| Inclusion d'oxyde | Oxyde métallique emprisonné dans le métal fondu au cours de la solidification |
| Inclusion métallique | Particule de métal étranger emprisonnée dans la masse du métal fondu (ex. : le tungstène lors du soudage GTAW, le cuivre et tout autre métal étranger) |

Figure3.7. Types d'inclusions

5. Retassures et criques de solidification :

À la suite d'un retrait du métal lors de son refroidissement, un espace vide se forme et apparaît visuellement à la surface ainsi qu'à l'intérieur du cordon (figure3.8). Certaines retassures ne sont visibles qu'au microscope. Les criques de solidification sont, quant à elles, des retassures non apparentes. Une retassure à la racine apparaît sous la soudure au moment de la solidification, tandis qu'une retassure de cratère est une cavité dans une reprise non corrigée avant l'exécution de la passe suivante.

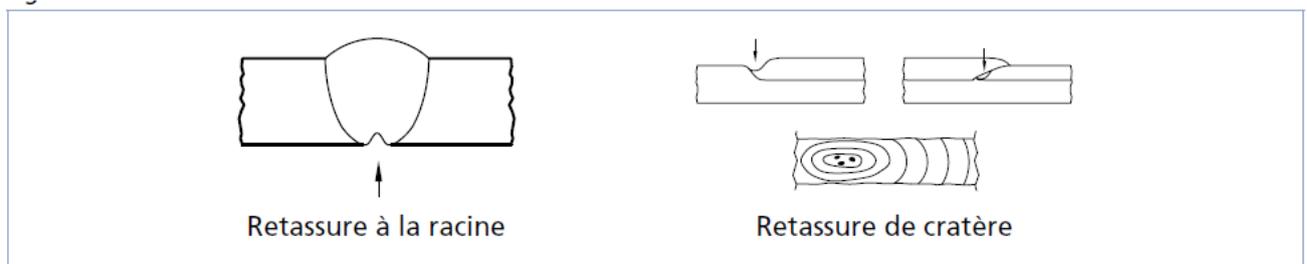


Figure3.8. Retassures

6. Morsures et caniveaux :

Une morsure est un défaut caractérisé par le creusage ou une insuffisance du métal de base sur une partie du cordon. Un caniveau traverse une grande part du métal de base en raison d'une trop grande chaleur du métal d'apport par rapport à l'épaisseur ou à la densité du métal de base (figure3.9). Un courant trop fort ou une vitesse d'avance trop élevée favorise l'apparition de caniveaux. Un mauvais angle de soudage de même qu'une longueur d'arc incorrecte peuvent aussi être à l'origine de ce type de défaut.

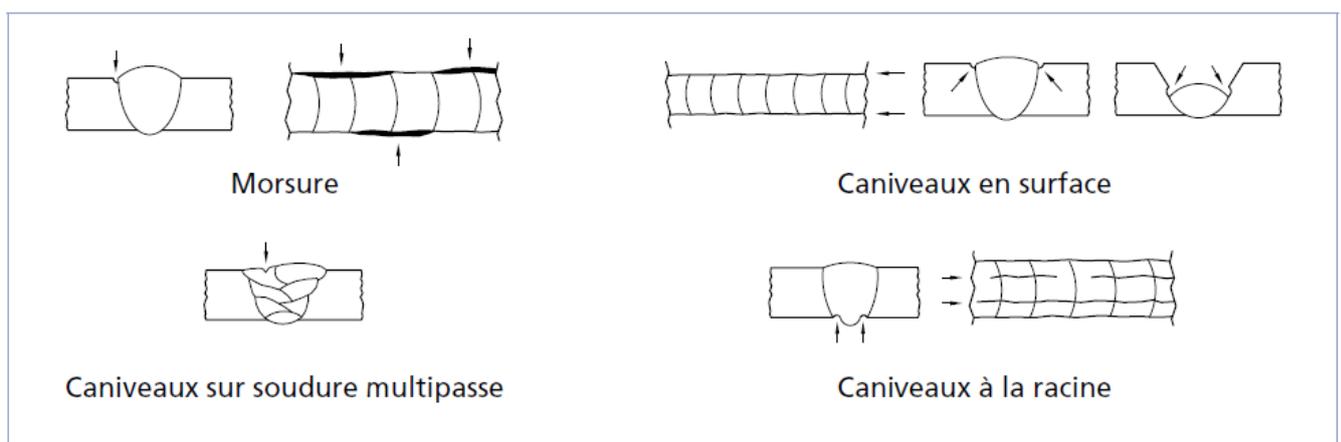


Figure3.9. Morsures et caniveaux

7. Effondrements et trous.

L'effondrement est le résultat de l'affaissement du métal déposé dû à une fusion excessive. On distingue différents types d'effondrements (figure 3.10).

Lorsque l'effondrement du bain de fusion entraîne la perforation de la soudure, on parle alors de trou (figure 3.11). Une soudure effectuée trop lentement (vitesse d'avance trop faible) risque de causer un effondrement. Si on travaille avec des plaques minces, le courant ne doit pas être trop fort.

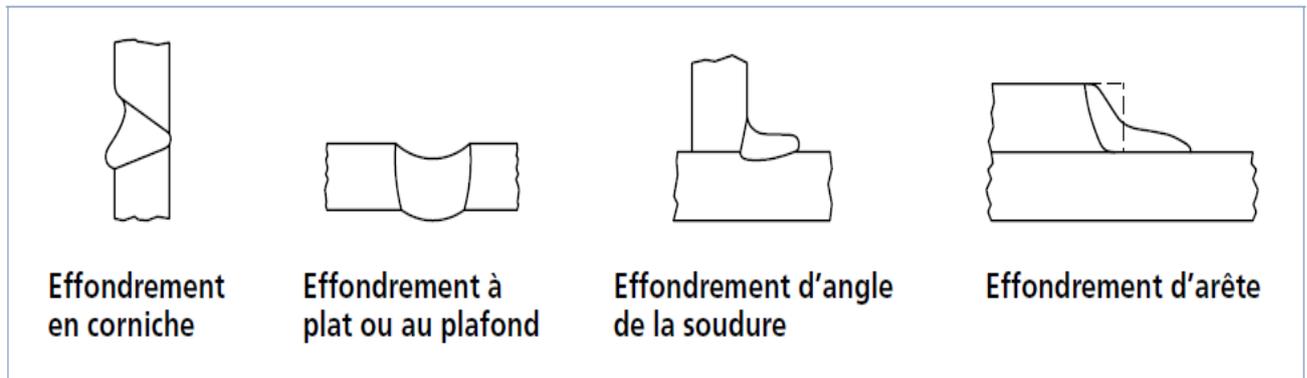


Figure 3.10 Types d'effondrements

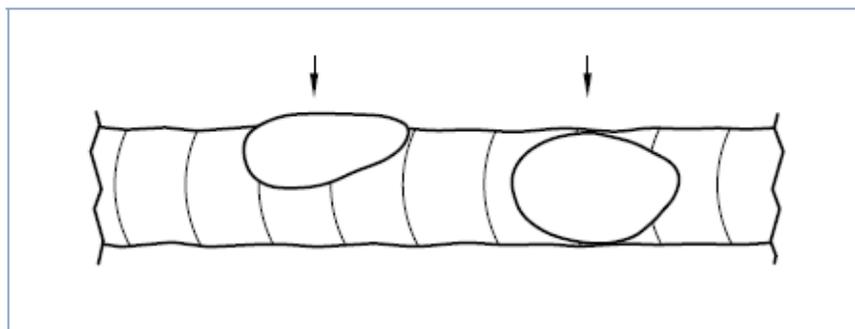


Figure 3.11. Trou

8. Défauts géométriques du cordon

Ce sont des défauts associés à une mauvaise forme de la surface du cordon. Le cordon peut être trop convexe ou trop concave (figure 3.12).

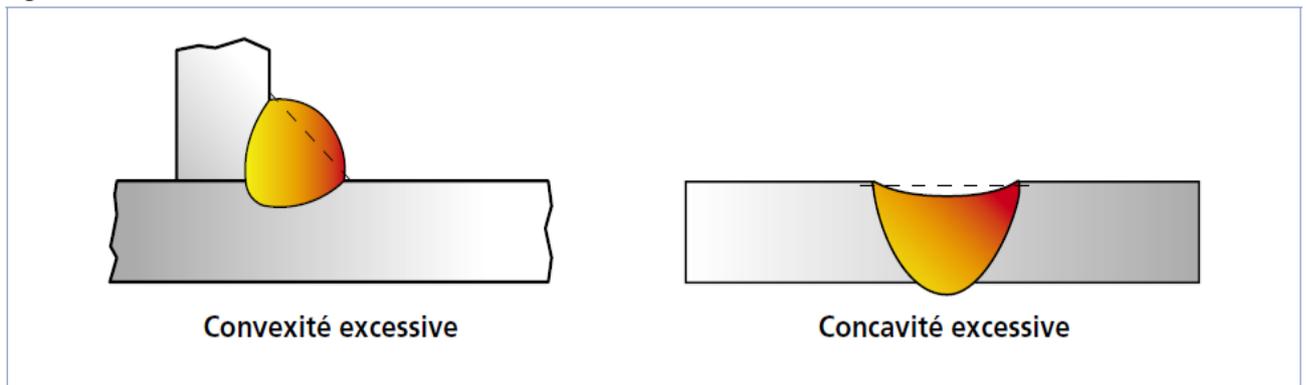


Figure 3.12. Convexité et concavité

Aussi, une surépaisseur excessive du cordon survient lorsqu'il y a trop de métal déposé sur le cordon au cours des dernières passes et que l'épaisseur du cordon dépasse les normes tolérées (partie A de la figure 3.13). Dans d'autres cas, il manque de métal à la surface du cordon ; ce manque peut être localisé (partie B) ou continu.

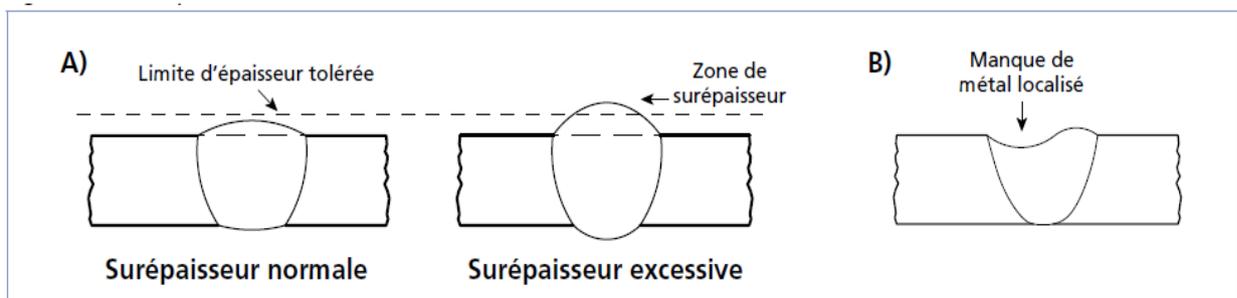


Figure 3.13. Surépaisseur

L'angle du raccordement du cordon, pour les cordons convexes, ne doit jamais excéder 30° (figure 3.14). Un manque de mouillage du cordon peut entraîner un angle de raccordement trop élevé.

Le tableau de la (figure 3.15) résume les causes associées aux défauts d'un cordon de soudure ainsi que les moyens de les prévenir.

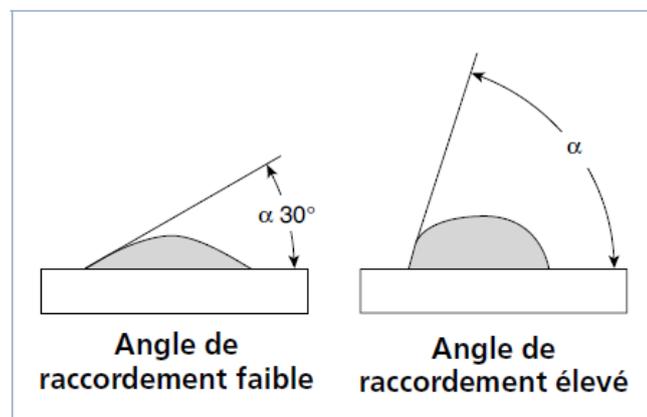


Figure 3.14. Mouillage d'un cordon de soudure

| Aspect du cordon | Causes possibles | Moyens de prévention |
|------------------|---|---|
| Trop large | <ul style="list-style-type: none"> - Vitesse d'avance trop lente - Mauvais angle de soudure - Arc trop long | <ul style="list-style-type: none"> - Augmenter la vitesse. - Corriger l'angle. - Rapprocher la torche (ou l'électrode). |
| Trop étroit | <ul style="list-style-type: none"> - Vitesse d'avance trop rapide | <ul style="list-style-type: none"> - Diminuer la vitesse. |
| Irrégulier | <ul style="list-style-type: none"> - Intensité du courant trop faible - Mauvais angle de soudure - Arc irrégulier - Mouvements du soudeur non stables | <ul style="list-style-type: none"> - Augmenter l'intensité. - Corriger l'angle. - Vérifier que le métal de base et l'électrode sont propres, que l'électrode est appropriée, que le courant est constant, que la haute fréquence fonctionne et qu'il n'y a pas de matériel magnétique près de l'arc. - S'assurer que la vitesse d'avance et la longueur d'arc sont stables et ne varient pas. |

Figure3.15. Défauts d'un cordon de soudure

9. Débordements du cordon :

Il s'agit d'un excès de métal déposé à la surface du métal de base, mais qui ne se lie pas avec ce dernier (figure3.16).

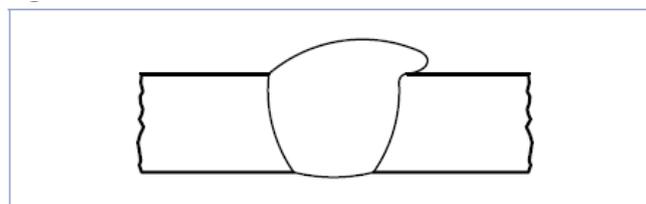


Figure3.16. Débordement

10. Défauts de pénétration.

Un excès de pénétration est un excès de métal à la racine. Pour une soudure multi passe, il s'agit d'un excès de métal à travers le cordon déjà déposé (figure3.17).

Un manque de pénétration constitue une absence partielle de fusion des bords à souder qui laisse un espace entre ceux-ci (figure3.17). Le manque de pénétration constitue souvent une conséquence d'un courant trop faible ou d'une vitesse d'avance trop élevée. Il est aussi possible que le chanfrein soit trop étroit ou absent, ou que l'arc soit trop long. Dans le cas de pièces épaisses, un préchauffage insuffisant peut aussi être à l'origine d'un manque de pénétration de la soudure.

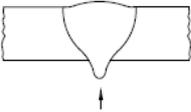
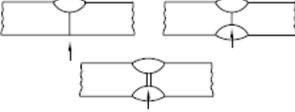
| Défaut de pénétration | Causes possibles | Moyens de prévention |
|--|---|---|
| <p>Excès de pénétration</p>  | <ul style="list-style-type: none"> - Vitesse d'avance trop lente - Intensité du courant trop forte - Mauvaise préparation des bords - Trop de distance entre les pièces - Arc trop court | <ul style="list-style-type: none"> - Augmenter la vitesse. - Diminuer l'intensité. - Utiliser le joint approprié. - Rapprocher les pièces. - Éloigner la torche. |
| <p>Manque de pénétration</p>  | <ul style="list-style-type: none"> - Vitesse d'avance trop élevée - Intensité du courant trop faible - Chanfrein trop étroit ou absent - Métal de base trop épais et froid | <ul style="list-style-type: none"> - Diminuer la vitesse. - Augmenter l'intensité. - Élargir le chanfrein ou modifier l'écartement des pièces. - S'assurer que le métal de base est préchauffé de façon appropriée. |

Figure 3.17. Défauts de pénétration, causes et moyens de prévention

11. Collage ou manque de fusion

Dans ce cas, le métal de base est non fondu, ce qui crée un manque de liaison entre le métal déposé et le métal de base. Le manque de fusion diminue la section efficace de la soudure. Le collage peut être latéral, entre passes ou à la racine de la soudure (figure 3.18). Ce type de problème risque de survenir si le courant de soudage est trop faible ou si la vitesse est trop grande. Un bon préchauffage des pièces **épaisses permet** de prévenir ce défaut. Aussi, il peut être très difficile à repérer même avec les rayons X puisqu'il n'a que deux dimensions. On le retrouve plus fréquemment avec le procédé GMAW. Pour éviter ce problème, on doit s'assurer de la bonne procédure de soudage et effectuer des tests destructifs.

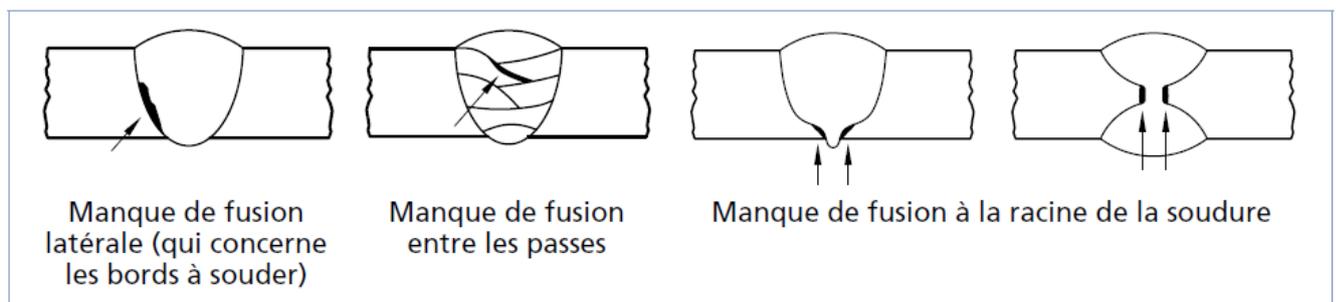


Figure 3.18. Collage ou manque de fusion

12. Projections :

Une projection est une éclaboussure de métal en fusion projeté pendant le soudage et qui adhère au métal de base (figure 3.19) ou au cordon déjà solidifié. Les projections peuvent être causées par un courant trop fort, un arc trop long ou le soufflage de l'arc. Un mauvais débit et certains gaz de protection peuvent aussi favoriser l'apparition de projections.

Les défauts de soudage peuvent être causés par de nombreux facteurs. Cependant, la plupart d'entre eux peuvent être évités si on modifie les paramètres appropriés en cours de soudage (figure 3. 20).

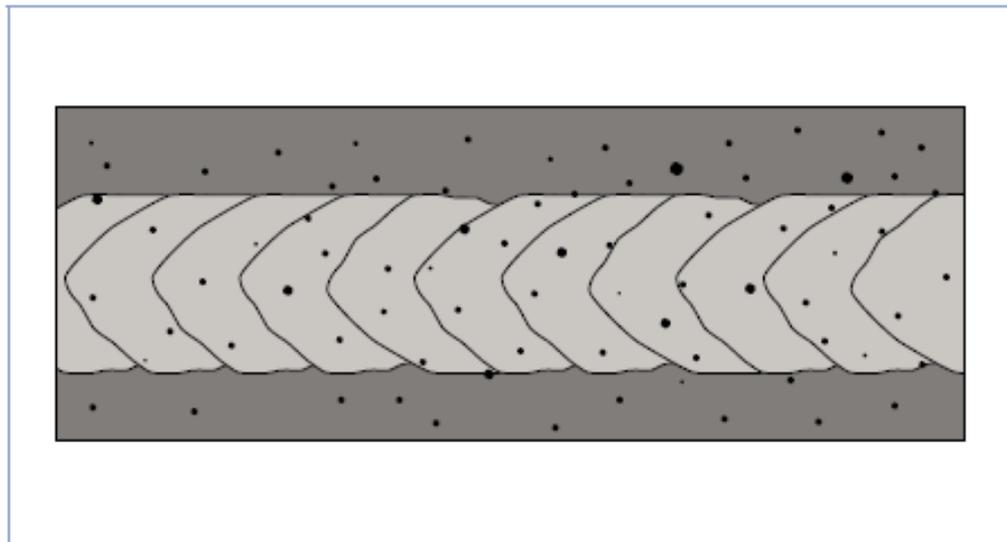


Figure3.19. Projections

| Défauts | Correctifs | | | | |
|------------------------------|------------|---------|------------------|--------------------|------------------|
| | Intensité | Tension | Vitesse d'avance | Longueur terminale | Angle de traînée |
| Soufflures | 5 ↑ | 1 ↓ | 4 ↓ | 2 ↑ | 3 ↑ |
| Projections | 4 ↓* | 1 ↑ | 5 ↓ | 3 ↓ | 2 ↓ |
| Convexité | 4 ↓ | 1 ↑ | 5 ↓ | 2 ↓ | 3 ↓ |
| Soufflage | 4 ↓ | 3 ↓ | 5 ↓ | 2 ↑ | 1 ↑ |
| Pénétration insuffisante | 2 ↑ | 3 ↓ | 4 ↑ | 1 ↓ | 5 ↓ |
| Manque de continuité du bain | 4 ↑ | 1 ↓ | 5 ↓ | 2 ↑ | 3 ↓ |
| Collage de l'électrode | 4 ↓ | 1 ↑ | 5 ↓ | 3 ↓ | 2 ↑ |

Figure3.20.Défauts de soudage et correctifs

Note : Les chiffres indiquent l'ordre dans lequel on devrait envisager les correctifs énumérés.

↑ : Augmenter

↓ : Diminuer

* Avec certains fils-électrodes, la taille des gouttelettes diminue quand le courant augmente, ce qui diminue les projections.

Le tableau de la (figure3. 21) présente les défauts communs en fonction du métal soudé de même que les principaux moyens de les prévenir. Quant au tableau de la (figure3. 22), il présente les principaux défauts en fonction du procédé de soudage utilisé.

| Métal | Défauts communs | Moyens de prévention |
|------------------|---|--|
| Acier | <ul style="list-style-type: none"> - Fissuration à chaud (inclusion de contaminant dans le bain de fusion) - Fissuration à froid (hydrogène coincé dans la soudure) - Soufflures | <ul style="list-style-type: none"> - Technique de soudage : éliminer la présence d'impuretés à la surface du métal de base (soufre, phosphore). - Composition de l'acier : bien assécher en préchauffant. |
| Acier inoxydable | <ul style="list-style-type: none"> - Précipitations de carbure de chrome | <ul style="list-style-type: none"> - Utiliser un alliage à faible taux de carbone ou contenant des agents stabilisants (ex. : titane). - Utiliser un alliage à forte teneur en chrome ou en nickel, ou les deux. - Éviter de maintenir la pièce à des températures variant entre 425 et 814 °C. |
| Fonte | <ul style="list-style-type: none"> - Fissures à chaud | <ul style="list-style-type: none"> - Préchauffer et procéder à un refroidissement lent. |
| Aluminium | <ul style="list-style-type: none"> - Soufflures - Fissuration - Imperfection de la soudure (irrégulière ou peu profonde) | <ul style="list-style-type: none"> - Nettoyer pour éliminer la couche d'alumine en surface. - Effectuer un préchauffage et un postchauffage. |
| Titane | <ul style="list-style-type: none"> - Contamination du bain de fusion : <ul style="list-style-type: none"> • soufflures (contamination par des produits lubrifiants) • fragilité (contamination par de l'oxygène ou de l'hydrogène) • fissuration (contamination par des saletés) | <ul style="list-style-type: none"> - Utiliser un procédé avec protection gazeuse. |

Figure3.21. Défauts communs par métal et moyens de prévention:

| Procédé | Défauts communs |
|-----------|---|
| SMAW | <ul style="list-style-type: none"> - Aspect du cordon - Mauvaise reprise (cratère de reprise) - Défauts de pénétration (manque de pénétration surtout) - Inclusions de laitier |
| GTAW | <ul style="list-style-type: none"> - Fissures - Cavités - Inclusions de tungstène - Manque de fusion ou de pénétration - Défauts de formes du cordon - Oxydation en surface |
| GMAW | <ul style="list-style-type: none"> - Soufflures - Collage - Manque de pénétration - Projections - Joints irréguliers - Convexité excessive |
| FCAW/MCAW | <ul style="list-style-type: none"> - Soufflures - Projections - Caniveaux - Inclusions de laitier |

Figure3.22. Défauts les plus fréquemment rencontrés en fonction du procédé utilisé

Chapitre4. Contrôles des soudures

1. Introduction :

Une soudure normalement exécutée doit être au moins plus solide que les pièces de métaux qu'elle unit, elle doit pouvoir résister aux sollicitations auxquelles elle a été calculée dans les conditions de service prévues. Cela suppose qu'elle est exempte de défauts graves, qui rendraient la structure dont elle fait partie, impropre à l'usage pour lequel elle est destinée. Certaines soudures ne peuvent pas être mises en service prévu, car elles comportent des défauts plus au moins graves provenant de leur exécution. Il est donc important de définir ces différents défauts ainsi que leurs principales causes d'apparition et les moyens à mettre en œuvre pour les éviter. Il y a lieu de distinguer entre contrôles à la fabrication et contrôles en service. Les premiers ont pour objet de rejeter ou d'accepter (après éventuelles réparations) les pièces contrôlées. Les seconds visent à s'assurer que la structure reste apte à fonctionner après un certain temps de service. La réalisation d'une telle soudure, demande différentes sortes de contrôles, avant, pendant et après l'opération de soudage.

1.1. Contrôles avant le soudage.

Il a pour but de prévenir les défauts. Il portera sur :

- La soudabilité métallurgique du métal de base (analyse chimique du matériau, contrôle macrographique, propriétés mécaniques, etc ...) ;
- La qualité du métal d'apport (compatibilité avec le métal de base, état de surface, propriétés mécaniques, nature et dimension) ;
- La préparation des pièces (ouverture des chanfreins, écartement des bords et dénivellation, montage et fixation, positionnement, etc) ;
- Les gabarits (d'assemblage, de vérification des cordons) ;
- Les séquences de soudage (ordre des diverses soudures, sens de réalisation) ;
- Les traitements thermiques (préchauffage, maintien en température) ;
- Le matériel de soudage (état, puissance, les réglages, etc) ;
- La qualification du soudeur (habileté manuelle, niveau technologique, essais dans les conditions de soudage du type d'assemblage) ;
- L'examen de la condition physique du soudeur (travaux dangereux, positions pénibles, travaux délicats) ;
- La qualification des Modes Opératoires de Soudage (Q.M.O.S) ;
- La vérification des documents de suivi et des enregistrements qualité ;
- La qualification des contrôleurs.

1.2. Contrôles pendant le soudage.

Il a pour but de s'assurer que les règles d'une bonne exécution du joint sont respectées. Il portera sur :

- La qualité du soudage
- La nature et dimension du métal d'apport (soudabilité, état de surface, propreté)
- Le réglage de l'appareil de soudage (correspondance entre le réglage indiqué et le résultat obtenu, maintien du réglage)
- L'état du joint réalisé (aspect conforme du cordon, dimensions des gorges, pénétration, propreté, écartement des bords)
- La disposition des passes (leur nombre, le sens de réalisation)
 - Les cadences de soudage (vitesse, interruptions entre passes)
 - Les déformations (décalage des pièces)
 - La température du traitement thermique (maintien en température)
 - Le respect des Descriptifs de Mode Opérateur de Soudage (D.M.O.S).

1.3. Contrôles après soudage.

Il a pour but de vérifier que le joint exécuté soit bien conforme aux exigences de la construction. Il portera sur :

- La mise en œuvre des contrôles appropriés en conformité avec la réglementation ;
- L'analyse des résultats des divers contrôles effectués ;
- L'instruction des dossiers " constructeurs " ou qualité attestant de la bonne réalisation des fabrications.

On distingue essentiellement trois méthodes de contrôle pour les soudures telles que :

- **Le contrôle destructif** dans lequel on découpe la pièce pour réaliser des éprouvettes qui seront utilisées pour les essais imposés.
- **Le contrôle semi-destructif** pour lequel on pratique une entaille, un perçage dans le joint soudé ou on prélève un petit échantillon du joint et que l'on rebouche par soudage.
- **Le contrôle non destructif** qui ne modifie pas l'état de la pièce.

Chacun de ces contrôles peut être imposé par le bureau d'études ou de méthodes, mais revêt un caractère important aussi bien dans les qualifications du soudeur que pour la qualification de la procédure de soudage.

Remarque : Si un traitement thermique après soudage (TTAS) est imposé, seront vérifiés : Le temps de montée en température, la température atteinte, la durée du maintien et la durée de refroidissement.

2. Contrôles destructifs.

Principalement utilisé pour des productions en séries. Il consiste à prélever certaines pièces sur un lot de pièces soudées, sur lesquelles seront prélevées des éprouvettes qui subiront des essais destructifs tels que :

- L'essai de traction
- L'essai de dureté
- L'essai de résilience Charpy
- L'essai de fatigue
- L'essai d'éclatement
- L'essai de déboutonnage
- L'examen micrographique
- L'examen macrographique

Etc....

2.1. Essais de traction.

2.1.1. Essais de traction dans le sens travers.

Ces essais de traction dans le sens travers sont le plus souvent réalisés suivant la norme NF EN ISO 4136. Les éprouvettes sont prélevées dans le sens transversal de l'assemblage soudé, de manière qu'après usinage, l'axe de la soudure demeure à mi-longueur de la partie calibrée de l'éprouvette. Les éprouvettes peuvent être prélevées dans des tôles (éprouvettes prismatiques) ou bien dans des tubes, voir essai directement sur tube. Dans le cas des assemblages de tôles « bout à bout », l'éprouvette est égale à l'épaisseur du métal de base situé à proximité du joint soudé. Pour les épaisseurs supérieures à 25 mm, il convient de faire des éprouvettes multiples de manière à couvrir la totalité de l'épaisseur de l'assemblage soudé. (Figure4.1). [12].

Après rupture, il est essentiel de localiser la cassure (en zone de liaison, dans le métal de base, dans le métal fondu, en ZAT). Des examens macrographiques du faciès de rupture peuvent être réalisés afin de s'affranchir de l'existence de défauts. (Figure4.2). [12]



Figure4.1. Essais de traction dans le sens travers



Figure4.2. Localisation rupture après essai de traction sur un tube en soudure bout à bout

2.1.2. Essais de traction dans le sens longitudinal.

Ces essais de traction dans le sens longitudinal sont généralement réalisés suivant la norme NF EN ISO 5178. Les éprouvettes sont prélevées dans le sens longitudinal de l'assemblage soudé, de manière qu'après usinage la totalité de l'éprouvette soit située dans le métal fondu. Dans le cas des assemblages de forte épaisseur ou avec reprise envers (soudage des 2 côtés), il conviendra de prélever plusieurs éprouvettes. Les éprouvettes sont cylindriques et leur diamètre varie de 4 à 10 mm. Ces essais peuvent parfois être réalisés à haute température. Après rupture, il conviendra de localiser la rupture. (Figure4.3) [12]

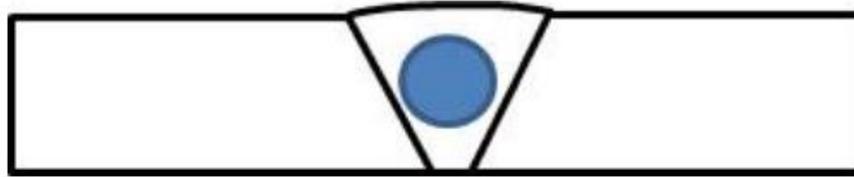


Figure4.3. Essais de traction dans le sens longitudinal

2.2. Essais de flexion par choc.

Pour les essais de flexion, les normes NF EN 9016-1 et NF EN ISO 148-1 sont le plus souvent suivies. La position de l'entaille (généralement de type V2m) est essentielle suivant la « liaison » ou le métal à caractériser, à savoir : Métal de base (MB), Zone Affectée Thermiquement (ZAT), Métal Fondu (MF). La difficulté de ces essais réside donc dans le positionnement du prélèvement afin de bien placer/localiser l'entaille. Dans le cas des éprouvettes prélevées dans la ZAT, il faut que le bout d'entaille soit situé entre 1 et 2 mm de la Zone de Liaison (ZL).

La localisation de l'entaille joue un rôle primordial dans la fiabilité du résultat de la zone à caractériser. En effet, de par sa définition, la ZAT correspond à du métal de base dont la structure a évolué en raison du traitement thermique imposé par l'opération de soudage. La résilience sera d'autant plus élevée que les grains seront fins (les joints des grains forment des obstacles pour la propagation des déformations ou la propagation des ruptures fragiles).

2.3. Essais de pliage.

Les essais de pliage sont généralement réalisés suivant la norme NF EN ISO 5173. Ces essais peuvent être de différentes catégories : pliage transversal, endroit, envers ou de côté, pliage longitudinal, endroit ou envers et enfin pliage endroit ou de côté sur soudure sans / avec bout à bout. L'objectif de ces essais est de s'assurer qu'il n'y a pas de rupture ou de fissuration pour un angle de pliage spécifié. (Figure4.4) [12].



Figure4.4.Essais de pliage

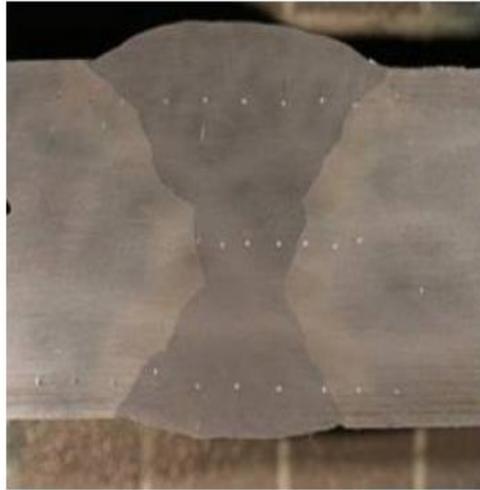


Figure4.5. Filiations de dureté

2.4. Filiations de dureté.

Les filiations de dureté sur coupe dans les assemblages soudés sont le plus souvent réalisées suivant la norme NF EN ISO 9015-1. Elles sont généralement de type Vickers (alliage ferreux hors aciers austénitiques) ou bien de type Vickers, ou encore Brinell (cas des alliages d'aluminium et des alliages de cuivre). En fonction de la configuration du coupon (géométrie, épaisseur, nombre de passes) il convient de réaliser une ou plusieurs filiations avec des empreintes situées dans des zones bien précises. L'objectif est de s'assurer qu'il n'y a pas de valeurs de dureté dépassant les exigences admissibles. (Figure4.5) [12]

Examens macrographiques.

Les examens macrographiques sont généralement effectués suivant la norme ISO 17639. Les éventuels défauts observables peuvent être des défauts visibles en surface du coupon (fissures, porosités ouvertes, projections de métal fondu, coup de meulage abusif ...), internes (fissures, soufflures, inclusions d'oxydes ou métalliques, manque de fusion ou de pénétration) ou enfin géométriques (excès de pénétration, débordement, effondrement, asymétrie...). (Figure4.6) [12]

Il faut noter que des « niveaux de critères d'acceptation » concernant les défauts peuvent être autorisés. Ces examens permettent également de remonter à la cause de la défaillance – non qualité. (Figure4.7) [12].

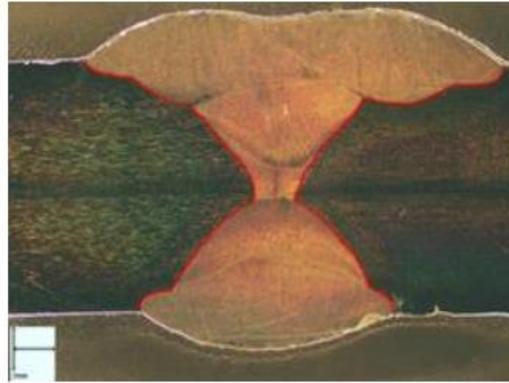


Figure 4.6. Examens macrographiques



Figure 4.7. Visualisation macrographique d'un cordon de soudure

3. Contrôle semi-destructif.

Il se pratique en perçant ou en fraisant localement le joint soudé en vue d'examiner les parois méthode permet d'apprécier :

- La pénétration de la soudure,
- La liaison des bords,
- Les défauts physiques du joint au droit de la cavité.

Le contrôle semi-destructif est rarement réalisé, mais est parfois imposé par le commanditaire.

4. Le contrôle non destructif (CND).

4.1. Généralités.

Le contrôle non destructif des soudures (CND) porte sur la mise en œuvre de divers examens et essais ne mettant pas en péril la soudure ou l'assemblage réalisé. Le choix de la méthode de contrôle à appliquer dépendra du type d'assemblage, de la nature des matériaux et du type d'équipement. La norme EN 473 définit un certain nombre de symboles pour les méthodes usuelles ci-dessous. Ces symboles correspondent généralement à l'abréviation de la désignation anglaise de la méthode.

Les principales méthodes couramment utilisées sont :

- L'examen visuel (VT)
- Le ressuage (PT)
- La magnétoscopie (MT)
- La radiographie (RT)
- La technique des ultrasons (UT)
- Les courants de Foucault (ET)
- Les autres techniques récentes (émission acoustique (AT), thermographie (IT), étanchéité(LT)).

La question qui se pose, c'est de savoir quel type d'essais est le mieux indiqué pour chaque type de défaut.

Généralement on peut dire que :

Les défauts de surface sont les mieux décelables par l'examen visuel, le ressuage ou l'examen magnétique, à condition toutefois que la surface soit accessible.

Les défauts internes sont les mieux décelables par radiographie ou par ultrasons. Pour les défauts internes à 3 dimensions, la radiographie est la plus indiquée (porosités et inclusions par exemple), tandis que les ultrasons sont plus indiqués pour les défauts à 2 dimensions (manque de fusion par exemple). La radiographie et les ultrasons sont deux techniques complémentaires dans la recherche des défauts internes.

Notons encore que : – L'examen magnétique pour les défauts de surface n'est applicable que pour les matériaux magnétiques, à l'exclusion des aciers inoxydables austénitiques par exemple.

Contrairement à l'examen par ressuage, cet examen permet de déceler les défauts internes proches de la surface (1 à 2 mm).

Les ultrasons sont indiqués pour des pièces de faibles épaisseurs (< 5 à 6 mm).

L'examen radiographique (RX) n'est généralement pas utilisé pour la recherche des défauts internes sur des pièces de très fortes épaisseurs (absorption trop importante), mais on peut lui substituer des sources de CO (cobalt).

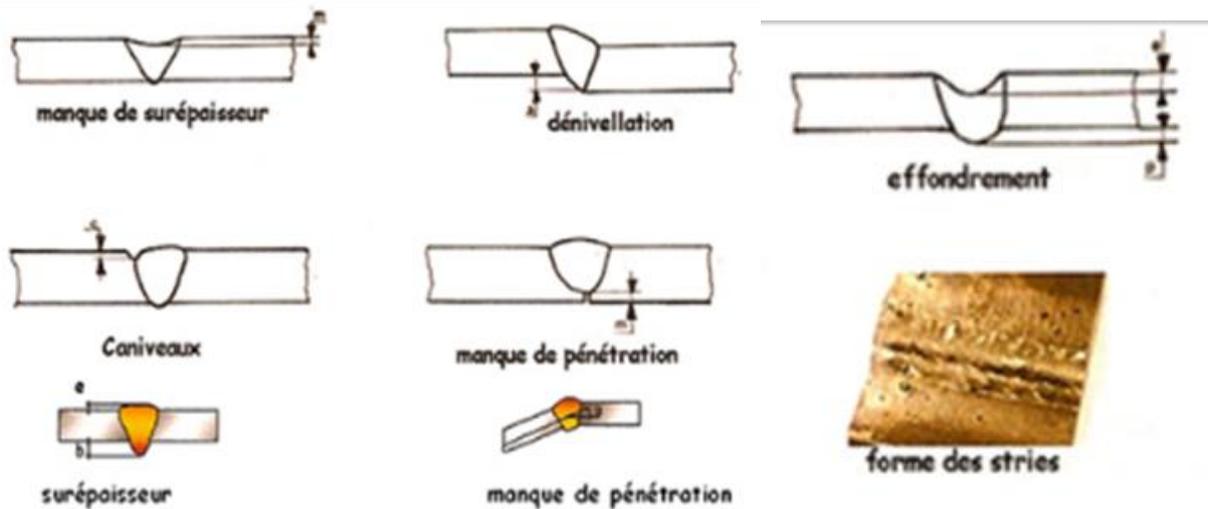


Figure 4.8. Quelques défauts fréquents en soudage

4.2. Examen visuel (VT) EN 970.

4.2.1. Principe

L'examen visuel de l'endroit et de l'envers des soudures peut fournir des renseignements précieux tels que : la régularité d'aspect du métal déposé, la pénétration, le manque de métal, la position et l'aspect des reprises, les piqures, le rochage, les fissures... etc (Fig4.8).

Mais il faut que les surfaces de l'échantillon soient nettoyées avant l'examen visuel. On peut être conduit à utiliser des aides optiques à la vision, pour déceler certains défauts peu visibles à l'œil nu, tels que des loupes simples ou binoculaires munies ou non de dispositifs éclairant. L'éclairage doit être suffisant et bien orienté (Fig4.9).

Pour l'examen intérieur des corps creux, on utilise des endoscopes (Fig4.10). Ces appareils possèdent des jeux de miroirs avec oculaire d'observation ou mini caméra électronique et sont munis d'une source lumineuse.

Lorsque les dimensions et tolérance de dimensions doivent être respectées (ex. surépaisseurs, gorge des soudures d'angle, ...), on fera appel à des instruments tels que :

- La règle droite graduée et le mètre ruban ;
- Le jeu de jauges et de cales, calibre de soudure.

L'essai visuel doit précéder impérativement tous les autres essais ou examens. Ainsi, une soudure doit être considérée comme acceptable suivant les normes après un examen visuel avant de procéder à un examen radiographique par exemple. Après cet essai, il sera réalisé un PV d'examen visuel.

Un seuil noir le regard

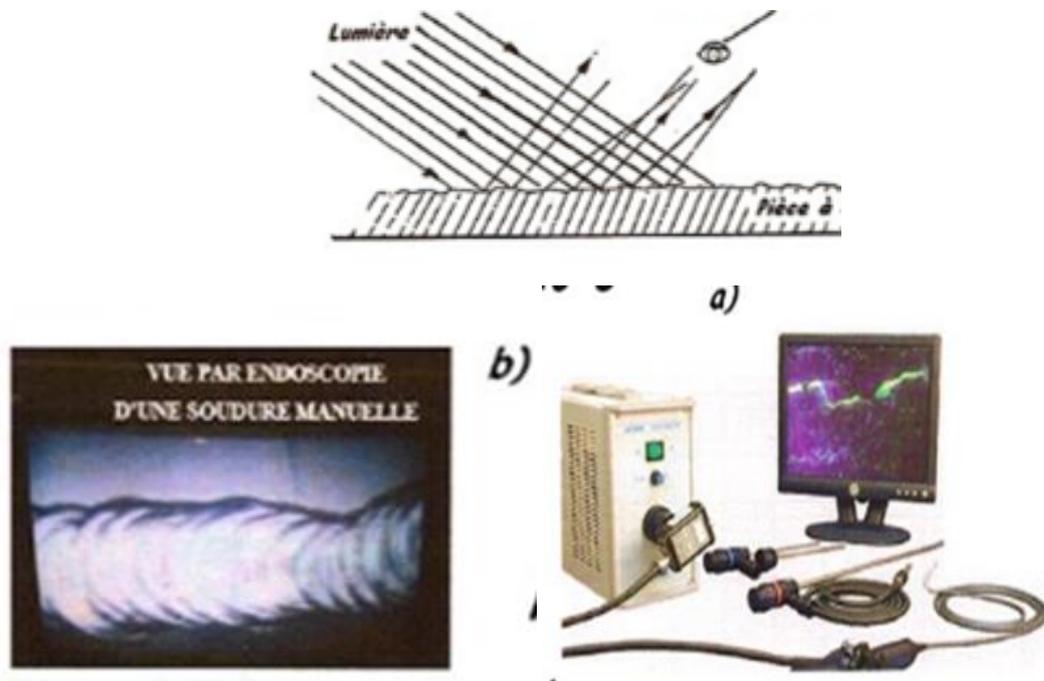


Figure 4.9. Examen visuel

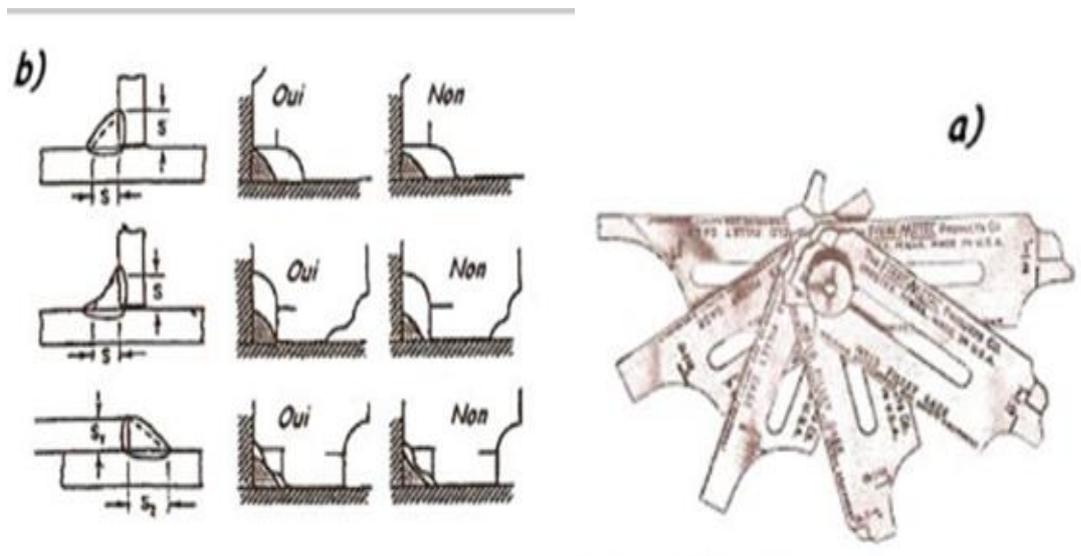


Figure 4.10. Examen visuel

4.3. Le ressuage (PT) EN 571-1 et EN 1289.

4.3.1. Définition.

C'est un procédé permettant de détecter les défauts de compacité débouchant en surface qui sont suffisamment fins pour échapper à l'examen visuel. C'est l'examen le plus fréquemment utilisé pour la recherche des défauts superficiels. (Figure 4.11)

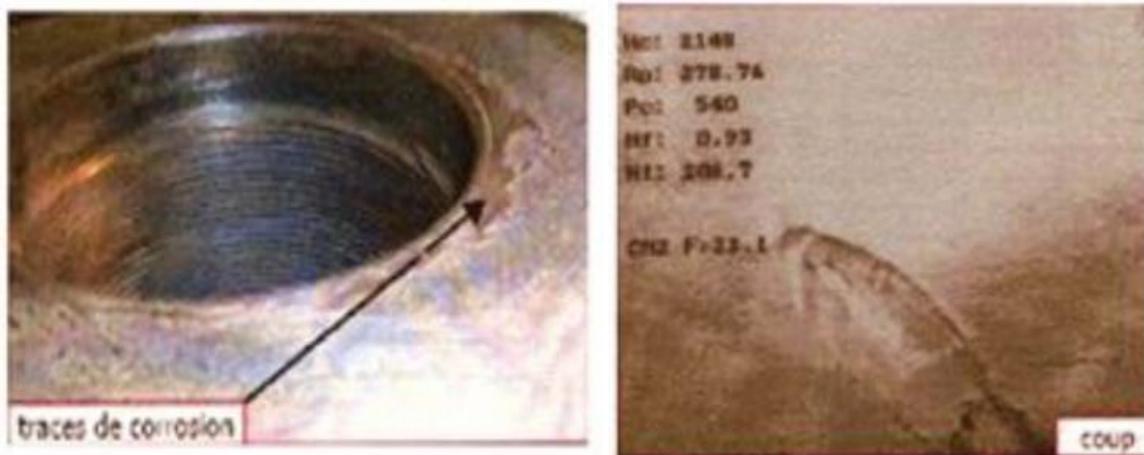


Figure 4.11 Examen par ressuage

4.3.2. Principe

Les produits liquides à faible tension superficielle ont la propriété de s'étendre très facilement sur les surfaces sur lesquelles ils sont disposés et de pénétrer dans les plus fins défauts de compacité qu'elles comportent. Le pétrole ou le gas-oil, par exemple, ont cette propriété. Mais, pour rendre l'indication plus visible, le pénétrant contient un colorant (Tétraline : 12 volumes ; Xylène : 12 " Rouge organale : 1 g/l de liquide ; Alkali isopropylique : 1 volume) Essuyer et recouvrir de talc, les défauts apparaîtront en rouge ou un produit fluorescent où l'examen sera réalisé en lumière ultra-violette (lumière de Wood). (Fig4.12).

Sous l'effet de la lumière de Wood, les défauts apparaîtront en traces jaunes sur fond noir. Après l'application du pénétrant, qui s'est infiltré dans les moindres défauts, en quantité variable selon le temps d'imprégnation (de 15 à 40 min), on procède à l'enlèvement de ce pénétrant de la surface de la pièce et il restera le liquide contenu dans les petites cavités et invisible à l'œil.

Après recouvrement de la surface à examiner d'une fine couche de poudre et provoque localement une tâche marquant chaque emplacement de défaut débouchant, c'est le phénomène de ressuage (Fig4.13).

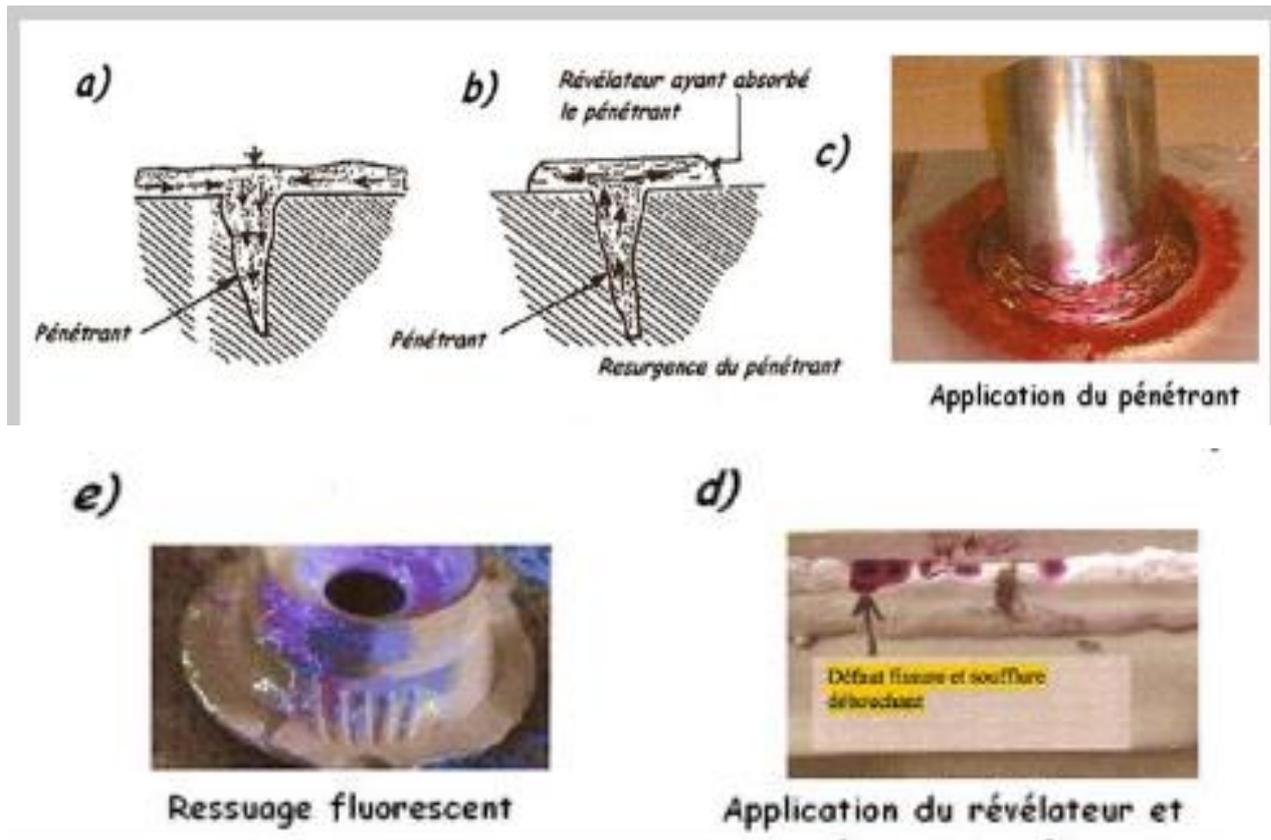


Figure4.12.Examen par ressuage

4.3.3. Applications.

- **Avant le soudage** : Contrôle de qualité des matériaux de construction ;
- **Pendant le soudage** : Contrôle sur un gougeage ou meulage pour une reprise et contrôle entre les passes.
- **Après le soudage** : Recherche des défauts superficiels sur la soudure et ses abords et vérification de l'étanchéité sur une soudure mono passe.

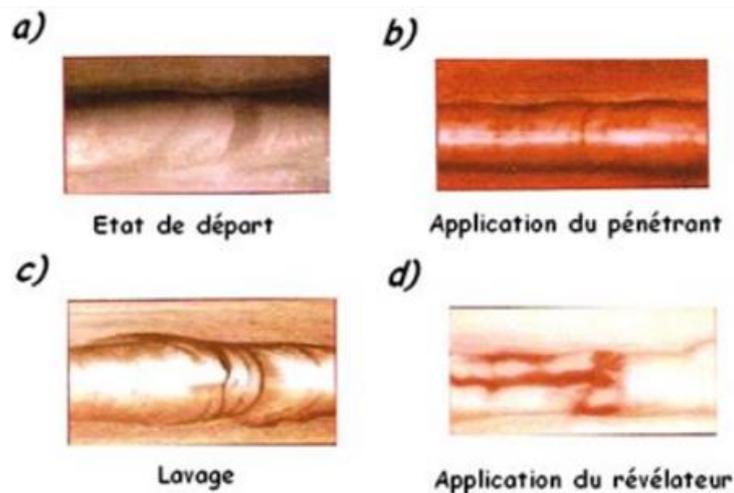


Figure4.13.Examen par ressuage (Etapes).

4.4. L'examen magnétoscopique.

Ce procédé permet de mettre en évidence les défauts débouchant ou se situant à faible profondeur.

4.4.1. Principe.

Ce procédé de contrôle est basé sur la déformation des spectres magnétiques à la surface des pièces aimantées et provoquées par des hétérogénéités de structure. La déformation des lignes de champ magnétique est mise en évidence par des particules ferromagnétiques jouant le rôle de révélateur.

Seuls, les matériaux ferromagnétiques peuvent être investigués avec ce procédé. Les défauts, pour être décelés doivent déboucher en surface, ce qui conduit à la perturbation maximale du spectre, soit être assez proche de la surface. De toute façon, ils doivent être perpendiculaires aux lignes du champ magnétique. (Les défauts au-delà de 5 mm sont difficilement décelables). Les pièces devront être démagnétisées à l'issue de l'examen.

La magnétisation requiert généralement des intensités de courant très élevées (jusqu'à 10 000 A). Différents types de témoins permettent de vérifier qu'elle est satisfaisante. Il est plus facile de détecter le défaut, si la plus grande dimension est perpendiculaire aux lignes de force. (Fig4.14)

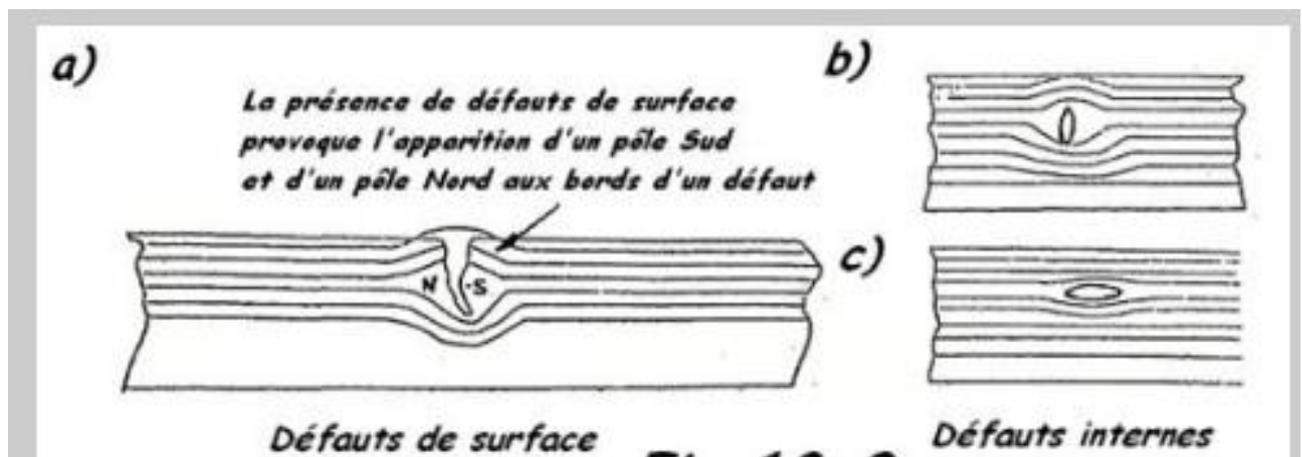


Figure4.14.Schéma de magnétoscopie

4.4.2. Visualisation du champ de fuite.

La mise en évidence des lignes de force et leurs déformations est réalisée en répandant sur la zone à contrôler, qui est soumise au champ magnétique, des fines particules (1 à 100 μ) d'oxyde de fer ($Fe_3 O_4$ – $Fe_3 O_3$). Les révélateurs peuvent être appliqués tels quels (révélateur à sec), ou en suspension dans un liquide (Fig4.15).

-Révélateur à sec : Les particules magnétiques, avec éventuellement un enrobage de couleur pour faciliter la détection, sont projetés à faible vitesse sur la zone à examiner (nuage de poudre). La

couleur de la poudre sera choisie en fonction de la couleur de pièce afin d'obtenir le meilleur contraste possible.

-Révélateur humide : Constitué par une suspension de poudre magnétique dans un liquide tel que l'eau, l'huile ou le pétrole. L'application peut se faire par arrosage ou via un pinceau. La teneur en poudre magnétique varie selon le procédé d'application (5 à 20 g/l). Il faut souvent agiter le liquide pour obtenir l'homogénéité afin de ne pas l'appauvrir en poudre de fer.

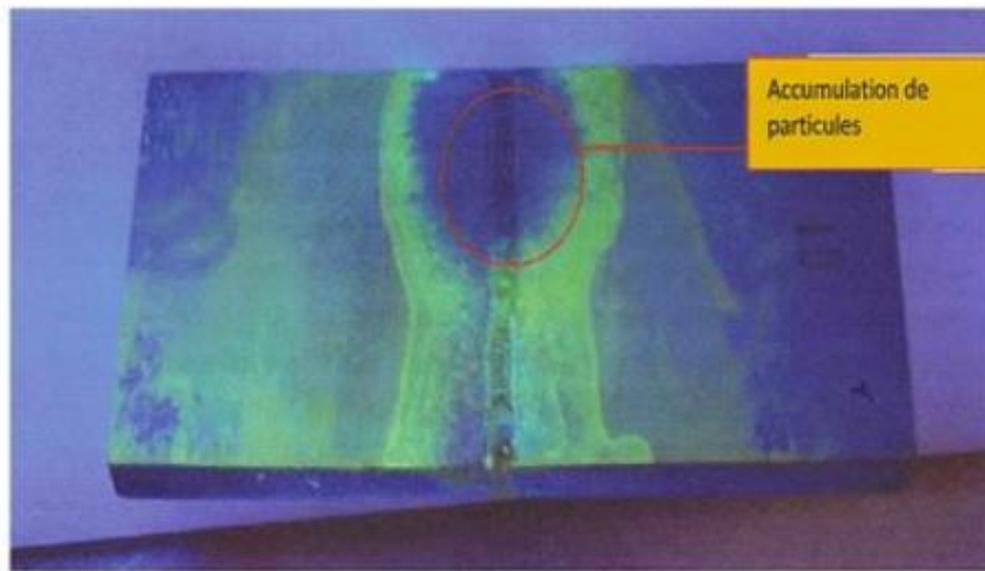


Figure4.15.Schéma de magnétoscopie

4.4.3. Techniques de magnétisation des pièces à examiner.

Il y a deux grands types de magnétisation :

4.4.3.1. La magnétisation longitudinale.

Un champ magnétique longitudinal est provoqué dans la pièce pour rechercher les défauts transversaux. Le champ magnétique peut être créé de différentes façons telles que :

-L'induction par solénoïde (Fig4.16a).

-L'induction par électro-aimant (Fig4.16b) => examen Magnétique Flux Leakage (MFL). Un capteur détecte la perturbation du flux créé par l'électro-aimant, la mesure est continue et applicable sur de grandes étendues.

-Procédure de magnétisation avec le système " YOKE " (Fig4.16 c, d).

4.4.3.2. La magnétisation circulaire ou transversale.

Un champ magnétique circulaire est provoqué dans la pièce, pour rechercher des défauts longitudinaux. Le champ magnétique peut être créé de diverses façons :

- Circulation directe de courant d'une extrémité à l'autre de la pièce (Fig4.16a),
- Circulation directe du courant localisé par touches de contact (Fig4.17c),

- Introduction d'un champ magnétique dans les pièces annulaires dont il est nécessaire de contrôler tant leur surface intérieure qu'extérieure (Fig4.17b).

4.4.4. Mise en œuvre du contrôle.

La surface à contrôler doit être brossée. On peut améliorer la visibilité en blanchissant la surface avec une solution de silice fossile dans l'alcool. Une surface rugueuse réduit cependant la sensibilité du contrôle. Dans le cas d'une soudure, un cordon brossé, non meulé, peut être acceptable, surtout si l'on recherche des défauts perpendiculaires aux "vagues". L'examen des spectres s'effectue en lumière visible ou en lumière de Wood dans le cas de poudre fluorescente. Après chaque contrôle, il est nécessaire d'éliminer l'aimantation rémanente soit par chauffage des pièces à une température supérieure au point de Curie (775 °C pour le Fe ; 350 °C pour le Ni et 1000 °C pour le Co), soit par effet de cycles d'aimantation d'intensité maximale décroissante.

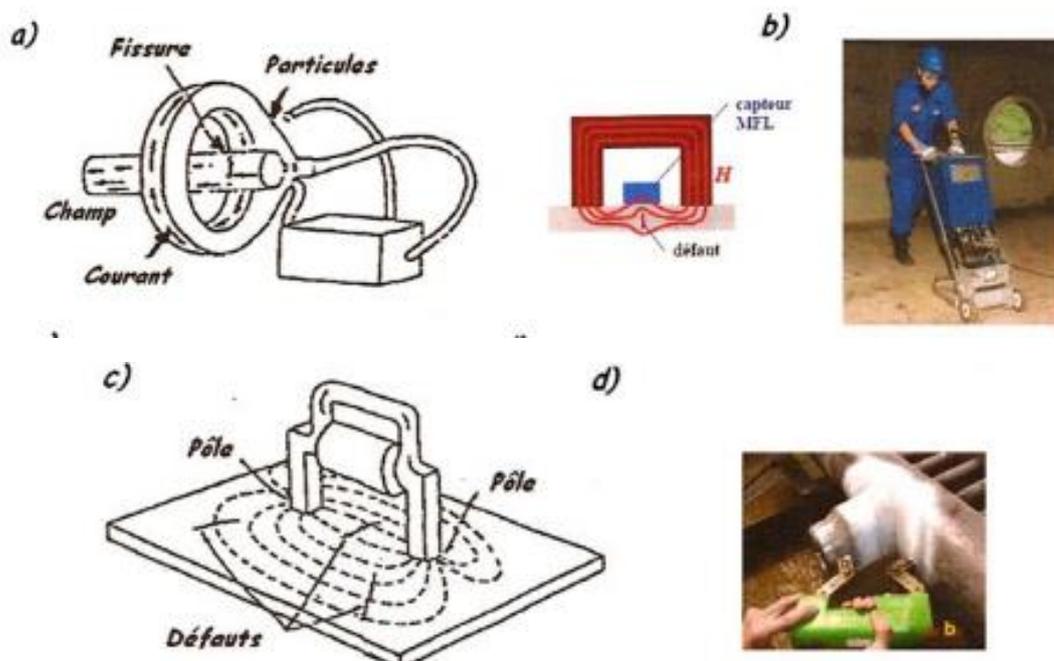


Figure4.16.Matériel de magnétoscopie. La magnétisation longitudinale

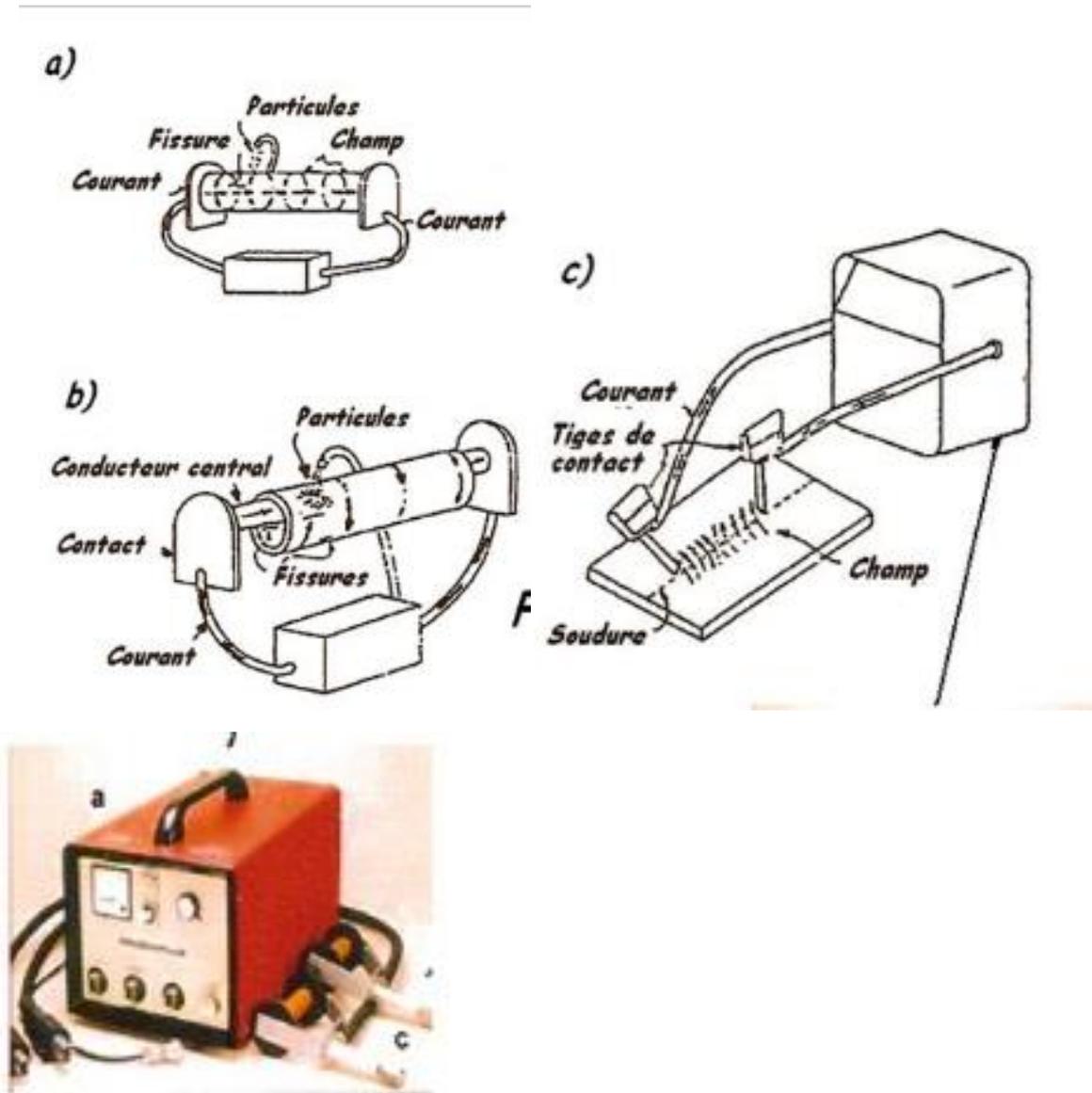


Figure 4.17. Matériel de magnétoscopie. La magnétisation circulaire ou transversale

4.5. L'examen radiographique.

4.5.1. Principe de la méthode.

La radiographie est une méthode non destructive d'examen des matériaux par "transparence" basée sur l'inégalité d'absorption des radiations ionisantes (X ou γ). Les rayons X et γ sont des ondes électromagnétiques de même nature que les ondes hertziennes, la lumière visible et les ultraviolets, dont elles ne diffèrent que par leurs longueurs d'ondes plus courtes. De là d'ailleurs leur pouvoir de pénétration. Les rayons émis qui ont à traverser une certaine épaisseur subissent un affaiblissement plus grand que ceux qui traversent une épaisseur moindre ou la même épaisseur d'un matériau moins absorbant. Dès lors, l'intensité du rayonnement émergent varie en fonction de ces paramètres.

4.5.2. Sources utilisées.

a) Sources à rayons X:

Elles émettent les rayons qu'après (Fig4.18) application d'une haute tension à un circuit générateur.

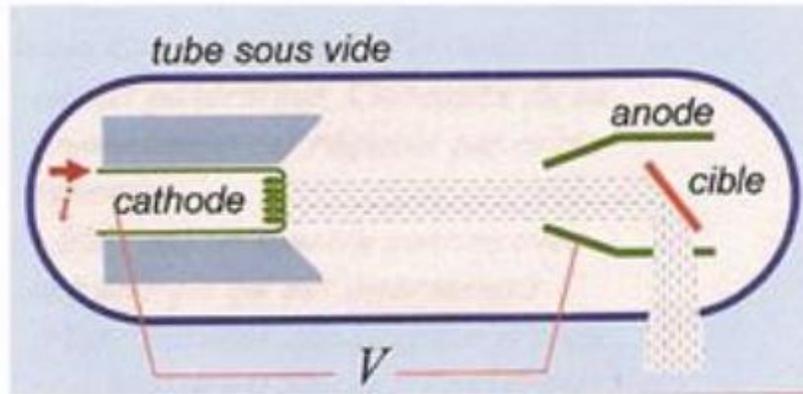


Figure4.18.Radiographie, anode cathode

L'intensité de ce rayonnement est réglable par cette tension. Elles ont un spectre continu avec une énergie qui est inversement proportionnelle à la longueur d'onde. La source est placée à l'extérieur d'une tuyauterie (Fig4.19).Le rayonnement est plus orienté donc moins dangereux pour l'opérateur et les personnes situées aux alentours. La qualité du film est meilleure que pour une source γ .

b) Sources à rayons γ (Ytterbium)

Ce sont des isotopes (Ir 192, Co 60, ...), qui émettent continuellement des rayons. L'intensité de ce rayonnement est propre à la source et non réglable (hors service, elles sont stockées dans un container spécial blindé).

Le mécanisme d'éjection permet de positionner la source à l'endroit requis pour l'exposition.Elles sont utilisées pour des tubes de forte épaisseur, la source étant centrée dans le tube.Elles ont un spectre discontinu avec une énergie constante.Elles sont beaucoup plus maniables que les sources à rayon X.

La source peut être placée à l'intérieur ou à l'extérieur du tube (Fig4.20 ou 4.21) [13].

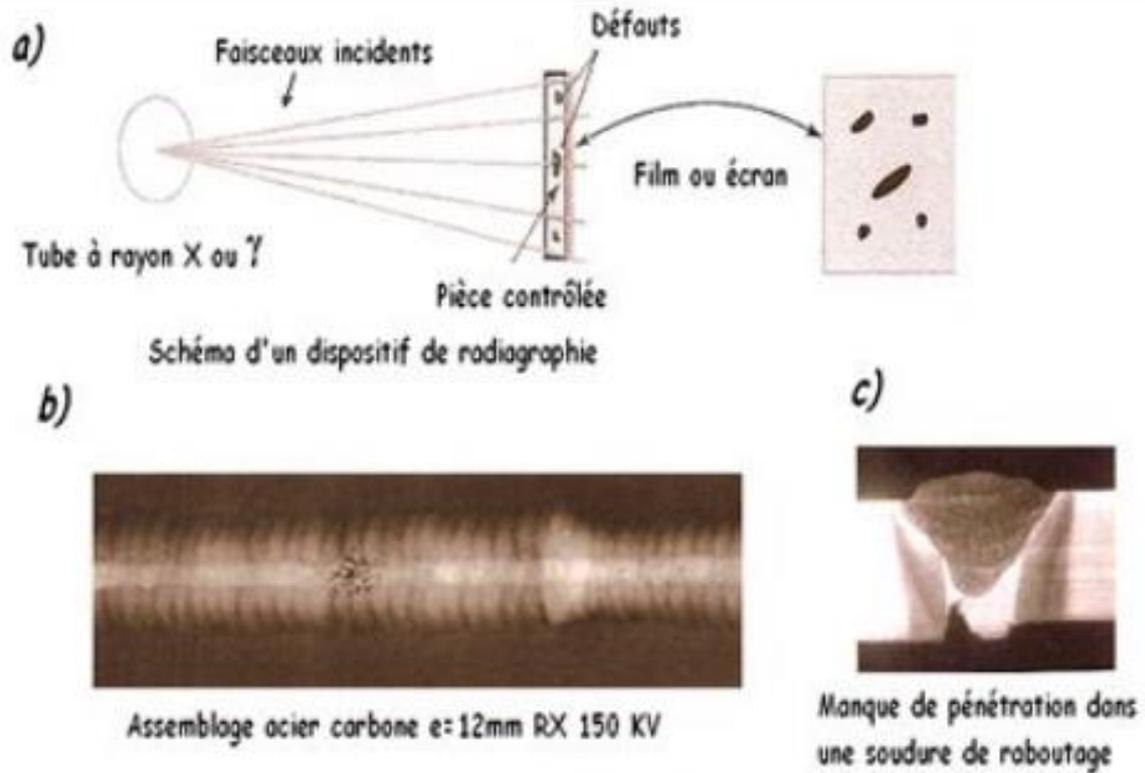


Figure4.19.Défauts vus en radiographie

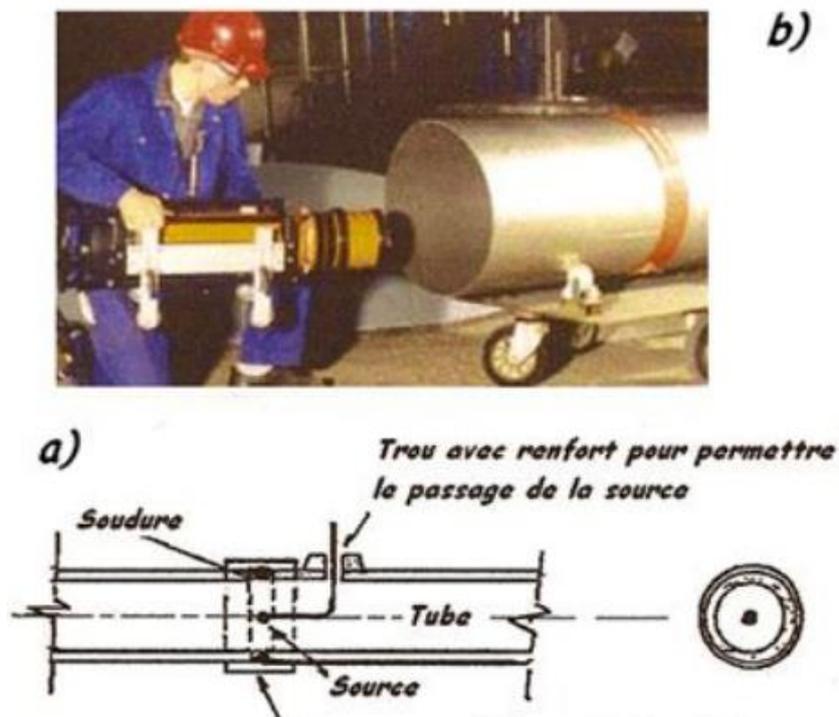


Figure4.20.Autre source en radiographie

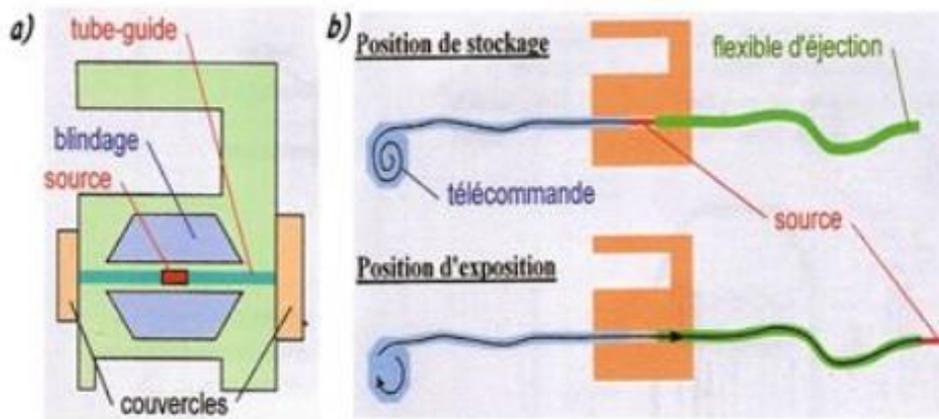


Figure 4.21. Source en radiographie

4.5.3. Définition de la qualité d'un cliché.

Pour contrôler la "sensibilité" de la méthode, on place généralement un indicateur de qualité d'image (IQI) du côté de la source, de sorte que la pièce et l'IQI soient radiographiés en même temps. Deux grands types d'IQI sont disponibles sur le marché :

- L'IQI avec fils est placé à travers la soudure.
- L'IQI avec trous est placé à côté de la soudure avec une tôle de compensation, afin de tenir compte de son épaisseur. Les détails de l'IQI, visibles sur le cliché développé forment un des 3 éléments de base de l'évaluation de la qualité d'une prise de radiographie.

Les deux autres éléments à contrôler avant l'examen des clichés sont :

- La densité ou le noircissement d'un film
- Le flou géométrique qui peut provoquer une précision insuffisante à cause des dimensions de la source X ou γ .
- L'interprétation des films doit être faite par des agents qualifiés et expérimentés.

4.6. Examen par ultrasons (UT) EN 1714-10.

La méthode repose sur la propagation d'une onde vibratoire engendrée par un palpeur piézo-électrique. Elle est réfléchiée dès lors qu'elle rencontre un milieu différent de la nature du milieu de propagation.

4.6.1. Principe.

Les ultrasons sont des ondes élastiques, tout comme les sons audibles ; ils ne diffèrent de ceux-ci que par leur domaine de fréquence. Si ces ondes ultrasonores sont envoyées perpendiculairement à la surface d'une pièce à faces parallèles, ces ondes vont se réfléchir sur la paroi opposée et revenir vers le cristal qui va transmettre le signal à l'appareil à ultrasons.

Un défaut se signale par l'apparition d'un écho intermédiaire et/ou par une atténuation de l'écho de fond. (Figure4.22). [13].

Applications classiques :

Vérification de l'épaisseur d'une tôle, recherche de doublures et ségrégations. Le temps nécessaire à l'onde pour parcourir le trajet aller-retour dans la pièce est le même que pour détecter un défaut. Connaissant le temps du parcours, on sait facilement trouver la position du défaut ou le fond de la pièce, si on connaît la vitesse de propagation des ondes dans ce matériau.

Le temps (t) est représenté sur un tube cathodique, c'est la distance entre l'impulsion de départ et l'écho ou la distance entre 2 échos qui se suivent (Tableau4.1) [13]. Si on règle l'équipement afin que la valeur (en mm) corresponde à un certain écartement, lu en mm, sur le tube à rayon cathodique soit $t/2$, il ne reste qu'à lire directement la valeur de la position du défaut ou du fond de la pièce sur l'appareil.

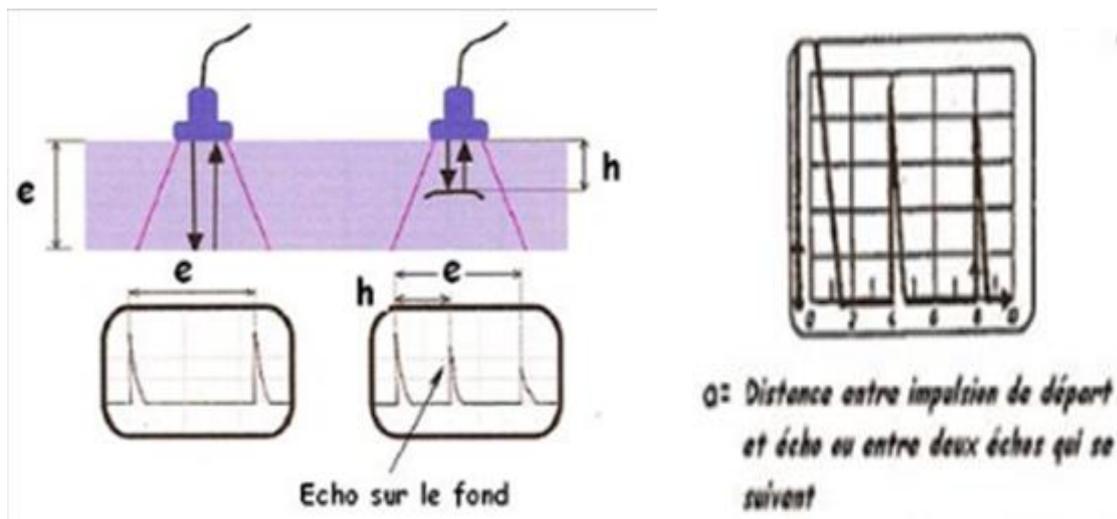


Figure4.22.Principe examen ultrasons

Tableau4.1.Vitesse des ondes en fonction des matériaux

| Matériau | vitesse m/sec. | |
|------------------|----------------|---------|
| | ondes L | ondes T |
| Acier doux | 5960 | 3240 |
| Aluminium | 6250 | 3100 |
| Cuivre | 4630 | 2140 |
| Nickel | 6040 | 3010 |
| Acier inox (347) | 5750 | 3100 |
| Air | 330 | - |
| Eau | 1500 | - |

4.6.2. Vitesse de propagation

Les ondes sonores et US se déplacent grâce à un support, qu'il soit gazeux, liquide, ou solide. Lorsque la direction du déplacement des particules de ce support est la même que celle de la propagation des ondes, on a des ondes longitudinales (ou de compression). Si les particules se déplacent perpendiculairement à la direction de propagation des ondes, on a des ondes transversales (ou de cisaillement).

Notons que ces ondes transversales n'existent pas dans les milieux gazeux et liquide. Les vitesses de propagation dans les métaux sont fonction du module d'élasticité longitudinale (E) pour les ondes longitudinales (L) et (G) pour les ondes transversales (T), ainsi que leur masse volumique. Le tableau donne la vitesse de propagation dans les milieux les plus usuels. Toute onde est un phénomène périodique ayant une certaine fréquence ($f > 20$ kHz), c'est-à-dire un nombre de cycles par seconde et une certaine longueur d'onde (λ) qui est la distance pour parcourir une onde. La vitesse de propagation d'une onde est dès lors : $v = \lambda \times f$
Les US en milieu homogène se propagent en ligne droite et à vitesse constante, qui ne dépendra que du milieu de propagation et du type d'onde employé.

Exemple : Une onde longitudinale a, dans l'acier, une vitesse de 5960 m/s (Tableau 4.1). Si nous utilisons une fréquence de 4 Mhz, la longueur d'onde est égale à $\lambda = 1,49$ mm

Le pouvoir de détection d'une onde US est lié à la longueur de l'onde. Plus celle-ci est petite, plus le pouvoir de détection est élevé. On utilise donc des ondes à hautes fréquences (0,25 à 25 Mhz). Pour les contrôles les plus courants, les fréquences varient entre 1 et 4 Mhz.

4.6.3. Mise en œuvre.

a) Ensemble du système :

L'ensemble de contrôle US comporte :

Un générateur de signal électrique, Une unité émettrice d'ondes (ex. cristal piézoélectrique), Un couplant pour le palpeur émetteur, L'échantillon à tester Un couplant pour le palpeur récepteur, Une unité réceptrice des ondes (ex. cristal piézoélectrique) et Un indicateur électrique type oscillographe cathodique, accompagné parfois d'un enregistreur analogique ou numérique (Fig 4.23). [13]

4.6.4. Variantes.

a) Le contrôle par méthode TOFD (Time Of Flight Diffraction) :

Il consiste à contrôler une soudure en utilisant deux palpeurs positionnés de part et d'autre de la soudure, fonctionnant en transmission. Les palpeurs sont choisis de telle manière que le faisceau

soit très divergent et qu'il " Insomnie " le plus grand volume possible de la soudure, si ce n'est la totalité de celle-ci. Si une discontinuité est présente dans cette soudure, celle-ci va diffracter une partie de l'énergie suivant les lois habituelles de l'acoustique. C'est cette énergie diffractée qui va être récupérée par le palpeur de réception et qui va servir à localiser la discontinuité (Fig4.24). [13]

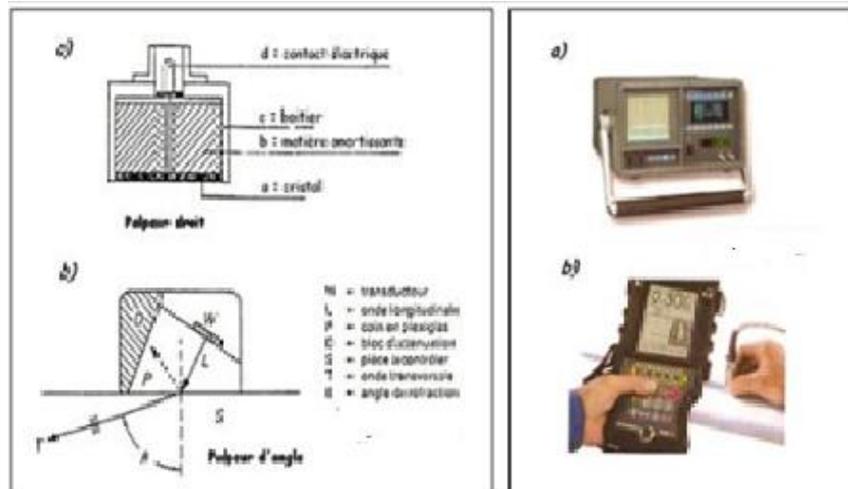


Figure 4.23. Schémas pour Ultrasons

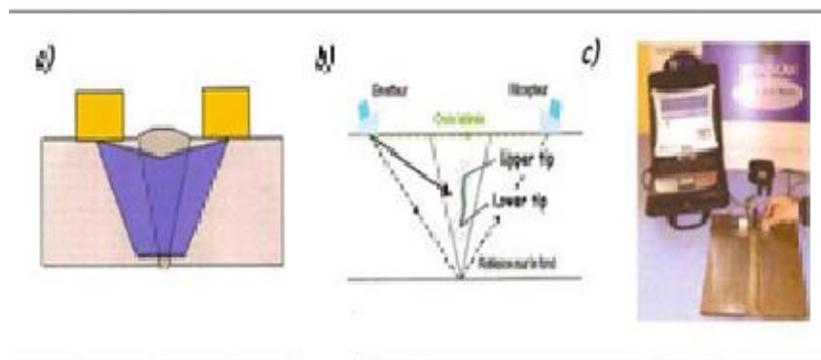


Figure 4.24. Le contrôle par méthode TOFD (Time Of Flight Diffraction)

b) La technologie multiéléments (PhasedArray) :

Elle consiste à utiliser des palpeurs divisés en plusieurs petits palpeurs élémentaires et à exciter chacun de ces transducteurs élémentaires avec un écart de temps (retard) qui va permettre de créer un faisceau par interférence constructives. On peut ainsi créer des faisceaux inclinés ou focalisés avec des palpeurs au contact sur des surfaces droites. En modifiant d'un tir à l'autre ces retards, le faisceau pourra être soit déplacé, soit modifié dans sa direction. On crée ainsi un phénomène de " balayage " qui est soit un balayage linéaire, soit un balayage sectoriel. De plus, on peut superposer à cela une focalisation électronique sans déplacer le palpeur ou sans adapter sa surface d'entrée. Ces technologies sont directement issues des technologies médicales et ont été adaptées aux problèmes industriels et aux matériaux industriels. Dans le contrôle des soudures, le contrôle par technique " PhasedArray " présente l'avantage de supprimer le mouvement de va vient traditionnel

du palpeur. En effet, celui-ci est remplacé par un balayage électronique en utilisant des palpeurs comportant quelques 64 éléments qui vont couvrir la totalité de la soudure. Un autre élément intéressant peut-être de remplacer le contrôle sous plusieurs incidences successives (45°, 60°, 70°) par un seul passage avec balayage sectoriel qui couvrira l'ensemble des angles entre 45 et 70° par exemple.

Mise en œuvre :

L'opérateur déplace le palpeur sur la surface de la pièce à contrôler (préalablement enduite d'un produit de couplage) selon un mode opératoire appelé plan de sondage qui permet d'assurer l'exploration de tout ou partie de la pièce à contrôler. (Fig4.25) [13]. Pendant cette exploration, l'opérateur doit surveiller l'apparition d'échos sur l'écran de contrôle (par ex : écran d'oscilloscope) dont la position (qui permet de localiser le réflecteur) et l'amplitude (qui permet d'estimer l'importance du défaut) sont révélateurs d'anomalies. Lorsque le seuil de prise en compte est atteint, il est alors nécessaire de caractériser l'anomalie à l'aide d'une pièce de référence (témoin) afin d'identifier la nature du défaut. Après cet essai, il sera réalisé un PV d'examen – contrôle magnétoscopique).

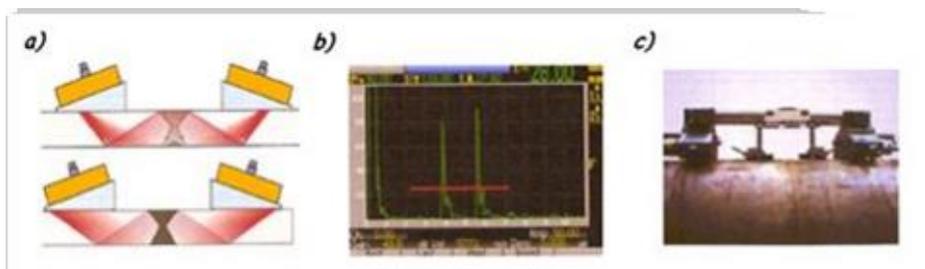


Figure 4.25. Palpeur pour ultrasons

4.6.5. Domaine d'application.

Le contrôle par ultrasons est applicable à de nombreux matériaux pourvu qu'ils ne présentent ni une trop forte atténuation ni une anisotropie importante. Les matériaux métalliques, thermoplastiques composites, céramiques peuvent être contrôlés par ce procédé. Les ultrasons permettent la détection de tous défauts engendrant une variation locale des propriétés ultrasonores de la pièce. Le contrôle des soudures peut être effectué entre -20 et 150 °C. Il existe des solutions en dehors de cette gamme mais plus complexe à mettre en œuvre.

Le contrôle ultrasonore est notamment utilisé pour le contrôle des soudures avant et après traitement thermique. Le contrôle par ultrasons peut être appliqué avec profit aux soudures

Contrôles des soudures

réalisées sur les aciers non alliés et faiblement alliés de nuance ferritique ainsi que sur les alliages légers.

Le contrôle des soudures sur aciers austénitiques est réalisable, mais nécessite la mise au point d'une procédure particulière.

Avant soudage, il est nécessaire d'effectuer pour les tôles et produits forgés, un contrôle par ultrasons pour détecter des défauts pouvant gêner le contrôle après soudage (délaminage, ségrégation, anisotropie, dans le cas des tôles; retassures, criques, repli de forges pour les produits forgés).

Pendant le soudage, le contrôle ultrasonore peut être effectué, mais difficile de mettre car le remplissage partiel de la soudure peut gêner le contrôle. Après soudage, le contrôle ultrasonore est bien adapté pour le contrôle des épaisseurs d'assemblages soudés comprises entre 8 et 100 mm, mais est adaptable en dehors de cette fourchette. Grâce aux techniques d'examen mise en œuvre, tous les types de soudure peuvent être examinées (bout à bout, d'angle et à recouvrement

Chapitre 5. Les contraintes résiduelles

1. Définition et types de contraintes.

Les contraintes résiduelles sont les contraintes multiaxiales statiques en équilibre mécanique dans une pièce à température uniforme et sans application d'effort extérieur.

Si le matériau est soumis à des sollicitations extérieures, ces contraintes internes viennent se superposer aux contraintes appliquées au matériau (contraintes de service) (Hanninen et al. 2006 ; Montay 2001 ; Withers 2007).

On distingue trois types de contraintes suivant l'échelle d'observation dont une représentation schématique est donnée (Figure 5.1) (Hanninen et al. 2006 ; Kandil et al. 2001 ; Magnier-Monin 2007 ; Montay 2001 ; Radaj 2003 ; Withers 2007) :

- **Les contraintes d'ordre I** : ou macro-contraintes sont définies à l'échelle de la structure. Elles représentent, sur plusieurs grains, le niveau moyen de contrainte issu des deux autres ordres.
- **Les contraintes d'ordre II** : ou micro-contraintes sont définies à l'échelle du grain. L'orientation différente des grains dans les matériaux poly cristallins induit des propriétés élastiques et mécaniques différentes et sont par conséquent le siège de contraintes de type II. Il en est de même pour les matériaux polyphasés et à transformations de phases.
- **Les contraintes d'ordre III** : agissent au niveau du réseau cristallin. Les différents types de défauts cristallins comme les lacunes, les atomes en insertion, les dislocations et les joints de grain, sont à l'origine de ce type de contrainte. (Figure 5.2).

2. Origine des contraintes résiduelles de soudage.

La plupart des procédés de fabrication génèrent des contraintes résiduelles. Elles peuvent être d'origine mécanique, thermique et/ou métallurgique. Withers renseigne sur ces différentes origines à travers plusieurs exemples (Withers 2007).

On résume dans le Tableau 5.1, les différentes origines des contraintes résiduelles pour plusieurs procédés couramment utilisés. On s'intéressera par la suite aux contraintes résiduelles formées au cours du soudage. Elles proviennent des trois origines, à savoir mécanique par le bridage de la pièce, thermique par la source de chaleur de soudage et métallurgique par les modifications structurales induites par les variations de température.

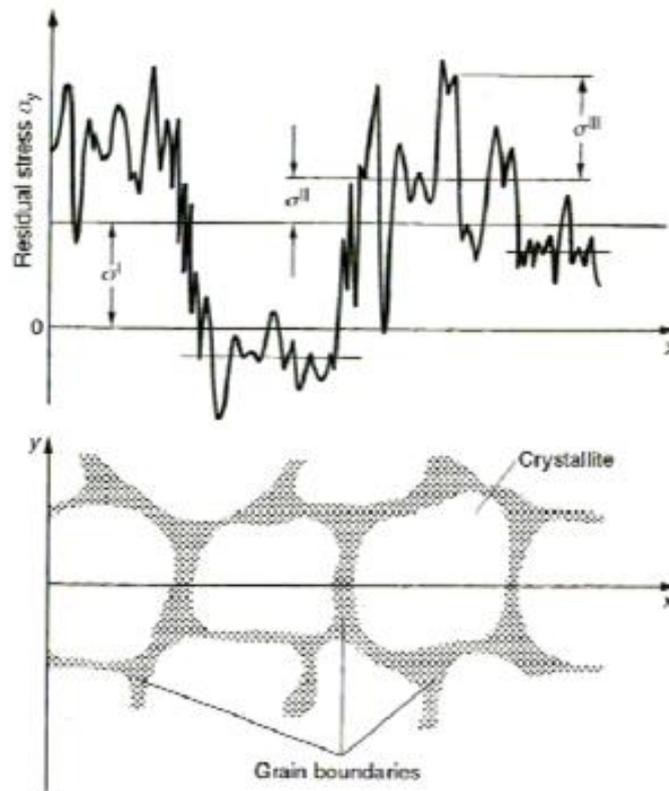


Figure 5.1. Types de contraintes résiduelles (Radaj20)

Tableau 5.1. Principales origines des contraintes (extrait de Magier, Monin 2007)

| Procédés | Origine mécanique | Origine thermique | Origine métallurgique |
|--|--|---|---|
| Fonderie Moulage | | Gradient de température pendant le refroidissement | Transformations de phases |
| Grenaillage Martelage Choc laser Forgeage | Déformation plastique hétérogène entre le cœur et la surface de la pièce | | |
| Rectification Tournage Fraisage Perçage | Déformation plastique due à l'enlèvement de matière | Gradient de température dû à l'échauffement pendant l'usinage | Transformation de phases (si le matériau est à transformation de phases et si la température est suffisamment élevée) |
| Trempe | | Gradient de température | Transformation de phases (si le matériau est à transformation de phases) |
| Soudage | Bridage | Gradient thermique | Modification structurale |

L'intensité et la distribution des contraintes résiduelles induites par une opération de soudage relèvent de trois mécanismes : le retrait, la trempe, et les transformations de phases.

2.1. Le retrait.

Le mécanisme du retrait est très important dans la formation des contraintes résiduelles de soudage. Le phénomène de retrait a lieu pour des forts gradients de température mis en jeu dans les cycles thermiques de soudage. A cause de ces gradients, le métal se dilate et se contracte de manière inhomogène dans la pièce. De plus, le cordon de soudure atteint des températures plus élevées que dans le métal environnant. Il a par conséquent une limite d'élasticité plus faible. Ainsi, les effets du retrait sont difficiles à prévoir à cause du caractère aléatoire induit par les dilatations différentielles et la chute de la limite d'élasticité. On peut tout de même préciser que des contraintes de traction sont généralement formées dans la zone soudée après refroidissement et que l'intensité de ces contraintes diminue quand on s'éloigne du cordon de soudure (Hanninen et al. 2006 ; Totten et al. 2002).

Pour étudier les effets du retrait, les déformations générées (appelées aussi Distorsions) sont communément décomposées en trois effets de translation et trois effets de rotation (Figure 5.2) [1] (Gerbaux et al. 1988 ; Magnier-Monin 2007) :

- Le retrait longitudinal est parallèle à la ligne de soudage. Il est induit par le bridage des zones restant froides situées de part et d'autres de la soudure (auto bridage).
- Le retrait transversal est perpendiculaire à la ligne de soudage. Comme pour le retrait longitudinal, il dépend de l'auto-bridage mais son effet varie également en fonction de la géométrie et du bridage de la pièce.
 - Le retrait dans l'épaisseur, généralement faible, n'a pas d'effet sur la structure soudée sauf dans le cas de soudures étroites sur des pièces épaisses (soudage par faisceau d'électrons).
 - L'effet de pliage est dû à la variation du retrait transversal dans l'épaisseur de la soudure. Il y a alors rotation des éléments assembles autour de l'axe de soudage.

Cet effet est accentué sur les soudures en multi passe si on ne prend pas garde à la séquence de passes pour équilibrer les déformations.

- L'effet de serrage provient du décalage dans le temps du retrait transversal. Il se caractérise par une succession de rotations élémentaires qui provoque un resserrement ou desserrement des pièces à assembler, selon la vitesse et l'énergie du procédé de soudage. Le phénomène est plus marqué pour le soudage mono passe de pièces minces.

- L'effet de cintrage est dû à la variation du retrait longitudinal dans l'épaisseur de la soudure. Comme le pliage, il y a rotation des éléments assemblés suivant l'axe perpendiculaire à l'axe de soudage.

Les effets élémentaires sont représentés ci-après pour une plaque et un tube soudés (Figure 5.2). La distribution des contraintes résiduelles et la forme des distorsions sont plus complexes dans le cas du soudage tubulaire car le retrait circonférentiel induit plusieurs efforts (forces circonférentielles, forces de cisaillement et moments de flexion) qui impactent les contraintes à la fois dans la direction axiale et la direction circonférentielle.

2.2. La trempe.

Le mécanisme de trempe est associé au soudage de structures épaisses pour lesquelles le refroidissement est inhomogène sur l'épaisseur. La surface du cordon de soudure et la zone affectée par le soudage vont refroidir plus rapidement que la section interne du cordon provoquant des variations de contraintes sur l'épaisseur de la pièce. Ainsi, si l'on considère uniquement le processus de trempe, des contraintes de compression se forment en surface et des contraintes de traction sont attendues au cœur de la pièce. Cependant ce type de processus intervient rarement seul. Il est associé dans la plupart des cas aux effets de retrait et de transformations de phases quand ces dernières ont lieu (Hanninen et al. 2006 ; Totten et al. 2002).

2.3. Transformations de phase.

Le dernier mécanisme concerne les transformations de phases. La transformation de phase entre l'austénite (γ) et la ferrite (α) s'accompagne d'une variation de volume (Figure 5.3 (a)). Cette variation de volume est à l'origine de contraintes résiduelles (Francis et al. 2007 ; Hanninen et al. 2006 ; Totten et al. 2002). Des contraintes de compression sont générées au refroidissement par l'augmentation de volume comme le montre la Figure 5.3 (b). Toutefois l'état de contrainte final dépend fortement de la température de début de transformation et des propriétés mécaniques de la phase formée comme l'illustre la Figure 5.3 (b) (Francis et al. 2007 ; Hanninen et al. 2006 ; Totten et al. 2002).

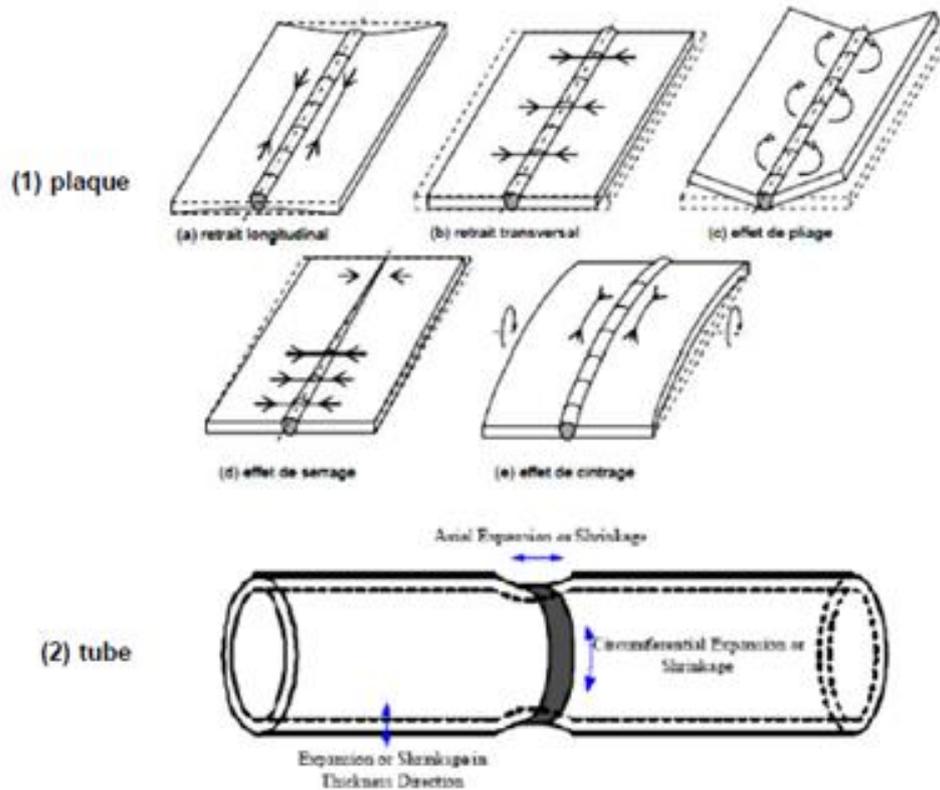


Figure 5.2. Les différents effets élémentaires du soudage pour (1) une plaque soudée (Saint- Germain2006) et (2) un tube soudé (Qureshi 2008)

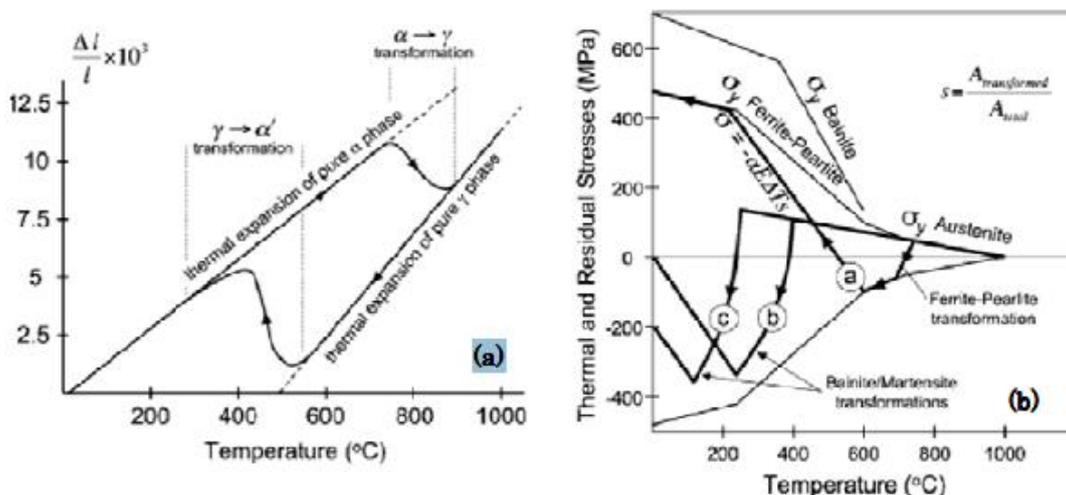


Figure5.3..Evolution de la déformation thermique (a) et de la contrainte (b) en fonction de la température et des transformations de phases (Francis et al. 2007)

3. Formation des contraintes résiduelles au cours du soudage.

Comment se forment les contraintes résiduelles au cours du soudage ? Il est difficile de décrire leur évolution pendant le soudage a cause des nombreuses variables qui affectent le processus telles que par exemple le bridage de la pièce ou encore les transformations de phases. Il existe néanmoins quelques travaux dans lesquels les auteurs ont suivi expérimentalement les contraintes

résiduelles durant le soudage. Des jauges de déformation ont été utilisées dans les travaux de Castrataro pour évaluer les contraintes résiduelles en cours de soudage d'une aube de turbine hydroélectrique en acier inoxydable martensitique (Castrataro 2006). Une équipe américaine a également suivi les contraintes résiduelles pendant une ligne de fusion sur une plaque en alliage d'aluminium grâce à des mesures in-situ par diffraction des neutrons (Woo et al. 2006).

Pour mieux comprendre le processus d'apparition et de développement des contraintes résiduelles au cours du soudage, nous proposons d'exposer ci-dessous l'approche simplifiée décrite par Pilipenko (Pilipenko 2001).

La (Figure 5.4) résume le processus d'apparition et de formation de contraintes résiduelles dans la direction parallèle à l'axe de soudage pour un volume élémentaire (dimensions dx , dy , h) proche du cordon de soudure. Les déformations longitudinales sont négligeables devant les déformations thermiques du fait de la rigidité de la structure et de la proximité de l'élément d'étude avec la zone fondue. On se place de plus dans le cas d'une soudure plane de faible épaisseur (pas de variation de température sur l'épaisseur de la pièce). On suppose également pour simplifier le problème que le volume élémentaire ne se déforme que dans la direction transversale, les contraintes transversales (σ_y) sont alors nulles. Pour résumer, nous avons dans la direction transversale $\varepsilon_y \neq 0$, $\sigma_y = 0$ et dans la direction longitudinale $\varepsilon_x = 0$, $\sigma_x \neq 0$. On suit le cycle d'évolution des contraintes à travers une courbe de dilatomètre et de contraintes déformations pour lesquelles on considère un coefficient de dilatation thermique constant et une courbe de contrainte-déformation idéale.

Pour un élément étudié, on associe une déformation thermique de la courbe de dilatomètre à chaque température du cycle thermique (représenté en bas à droite de la figure). On étend ce résultat à la courbe de contrainte fonction des déformations. Enfin, le point obtenu est reporté sur la courbe de contraintes en fonction du temps en croisant l'échelle de temps du cycle thermique.

Ainsi, pendant le chauffage sont générées des contraintes de compression jusqu'à ce que la limite d'élasticité soit atteinte (point 1). Le maximum de température du cycle correspond quant à lui au maximum de déformation plastique compressive (point 2). Les points suivants correspondent au refroidissement de l'élément pendant lequel la contrainte et la déformation varient élastiquement. La contrainte thermique augmente en passant par un état de contrainte nul (point 3) jusqu'à sa limite d'élasticité (point 4).

L'évolution de la contrainte résiduelle présentée (Figure 5.4) n'est valable que pour un volume élémentaire proche du cordon de soudure. Afin de rendre compte de l'évolution des contraintes

résiduelles spatiales et temporelles, dans les mêmes conditions de soudage (plaque mince, une passe), une représentation en trois dimensions est choisie.

Le champ de température de la liaison plane soudée est représenté au centre de la (Figure5.5) encadré par les champs de contraintes longitudinales à gauche et transversales à droite. Pour information, la position de l'arc de soudage sur la pièce est repérée par une flèche.

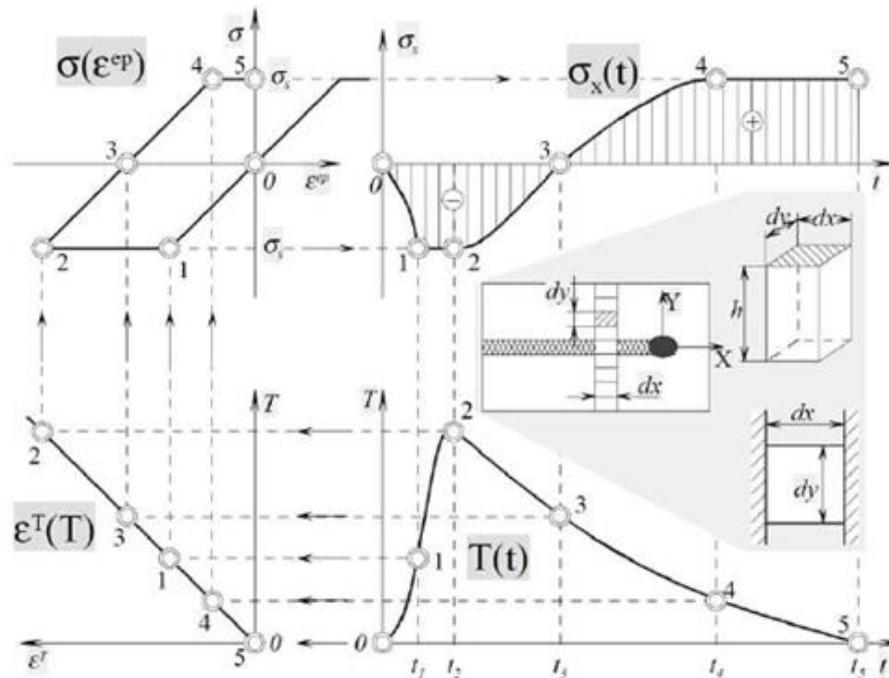


Figure 5.4. Evolution schématique de la contrainte résiduelle longitudinale en fonction du cycle thermique du soudage mono passe sur plaque mince (Pilipenko 2001)

Tout d'abord, les contraintes parallèles à l'axe de soudage (Figure 5.5 (a)) sont nulles dans le bain fondu (zone verte) à cause des propriétés mécaniques faibles du matériau à haute température. Elles sont par contre négatives dans la zone affectée par la chaleur ainsi qu'à l'avant du bain liquide (zone bleue) car la dilation thermique de ces régions est entravée par les parties froides environnantes. Ces parties froides sont quant à elles en faible traction (zone orange), ce qui équilibre l'état de contraintes de la pièce. A l'arrière de la source de chaleur, la zone soudée et le métal environnant se contractent en se refroidissant. Des contraintes de traction sont alors induites dans la soudure (zone rouge) et des contraintes de compression en son voisinage (zone bleue) (Pilipenko 2001 ; Weisman & Kearns 1976).

En ce qui concerne les contraintes perpendiculaires à l'axe de soudage (Figure 5.5 (c)), on retrouve à l'avant de la source de chaleur une zone de compression (zone bleue) qui s'annule dans la zone de fusion (zone verte). Toutefois cette zone de compression est beaucoup plus abrupte et atteint la limite d'élasticité pour des températures assez élevées. Cette zone est précédée par une zone de

traction (zone orange) bien que l'arc de soudage n'affecte pas encore cette partie. Ces contraintes de traction résultent en fait de l'auto-équilibrage des contraintes dans la pièce. Elles compensent donc les contraintes de compression décrites précédemment. Après le passage de la torche, le matériau se contracte pour former des contraintes de traction (zone rouge) mais de moindre intensité par rapport aux contraintes longitudinales (Pilipenko 2001).

Il faut toutefois préciser que la distribution des contraintes peut fortement varier en fonction de la vitesse de soudage, de l'état de bridage, de la nature du matériau soudé ou encore de la géométrie de la pièce (Radaj 1992). Debiccari montre, par exemple, que les contraintes générées sur tube diffèrent de celles d'une géométrie plaque à cause de déplacements radiaux des tubes qui induisent des moments de flexion au niveau du joint soudé. Ils influencent fortement l'évolution des contraintes dans la structure tubulaire (Debiccari 1986 ; Leggatt 2008).

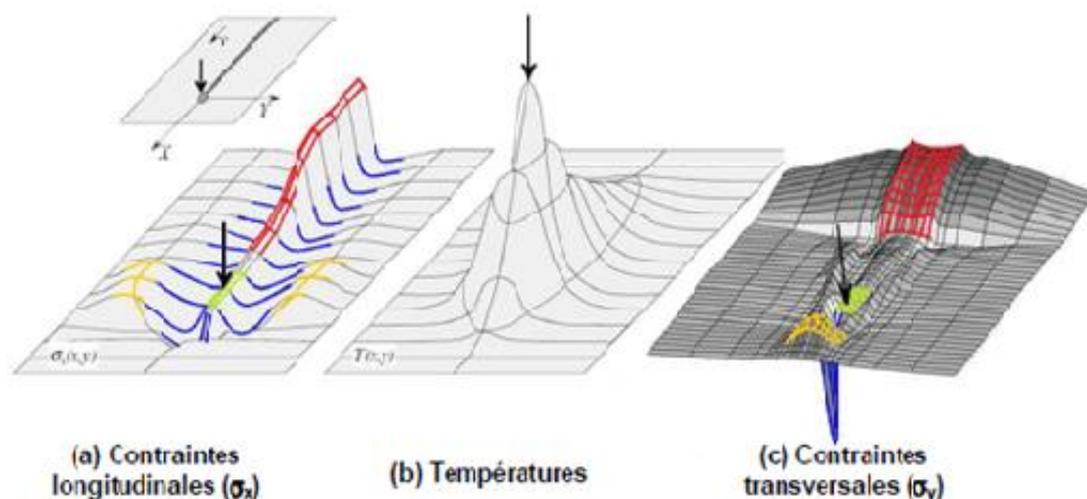


Figure 5.5. Représentation schématique de l'évolution de la température et des contraintes résiduelles (longitudinales et transversales) en cours du soudage mono passe d'une plaque (Pilipenko 2001)

4. Effets des contraintes résiduelles de soudage.

Le champ de contraintes résiduelles génère dans la structure par l'opération de soudage va affecter son comportement en service. L'intensité et la localisation de ces contraintes auront alors un impact sur la durée de vie en fatigue, la propagation des fissures ou encore sur la tenue à la corrosion et plus particulièrement la corrosion sous contrainte (Kearns 1982 ; Siddique 2005 ; Withers 2007). Les effets sur la tenue en fatigue des joints soudés sont amplement étudiés. Les mécanismes sont détaillés dans les références (Bousseau 2006 ; Magnier-Monin 2007 ; Thibault 2010 ; Zahouane 1988). De même une étude de VTT (Technical Research Centre of Finland) décrit

les mécanismes et les facteurs influençant la corrosion sous contrainte à partir du retour d'expérience sur des liaisons bimétalliques de centrales nucléaires comme par exemple avec le cas de la fissure sur la centrale de V.C. Summer (Hanninen et al. 2006). Enfin Nevasmaa montre l'influence des contraintes générées pendant le soudage sur la fissuration par l'hydrogène. Il établit que ce phénomène est plus significatif dans le cas de soudage multi passe (Nevasmaa 2003).

5. Méthodes d'évaluation des contraintes résiduelles.

5.1. Types de méthodes.

Il existe plusieurs méthodes d'évaluation des contraintes résiduelles (Kandil et al. 2001 ; Lu & Society for Experimental Mechanics 1996 ; Withers 2007 ; Withers & Bhadeshia 2001 ; Withers et al. 2008). Cependant on n'accède à la grandeur que par voie indirecte. Seul un calcul ultérieur permet de déterminer les contraintes résiduelles dans la pièce. Chaque technique possède sa spécificité mais on peut classer les différentes méthodes suivant deux catégories : les méthodes destructives et non-destructives.

Les méthodes destructives ou semi-destructives reposent sur le principe de relaxation des contraintes en découpant ou en enlevant de la matière. Les déformations élastiques qui résultent de ces opérations d'usinage sont mesurées. On remonte ensuite à l'état de contraintes grâce à une approche analytique ou numérique de la théorie des déformations dans le domaine élastique. Ces méthodes ne permettent d'accéder qu'aux contraintes macroscopiques (type I). Sous ce label sont réunies les techniques suivantes :

- La méthode du trou (hole-drilling method),
- La méthode de la rainure (slitting method),
- La méthode de la flèche ou par enlèvement de matière (bending deflection method),
- La méthode de découpage (sectioning).

Les méthodes non-destructives utilisent les paramètres physiques et cristallographiques du matériau pour remonter ensuite aux contraintes résiduelles sans affecter l'intégrité de la pièce étudiée. Les techniques principales sont les suivantes :

- Les méthodes de diffraction avec les rayons X (XRD – X-Rays Diffraction), les neutrons (ND – Neutron Diffraction) et les synchrotrons (hard X-rays),
- La méthode par ultrasons (ultrasonic method),
- La méthode magnétique (magnetic method).

Le choix de la méthode dépend de la nature des contraintes examinées, des matériaux, de la géométrie de la pièce, du coût et du type destructif ou non de la méthode. Withers et Kandil ont croisés les différentes caractéristiques des méthodes de mesures pour montrer les avantages et les limites de chaque technique (Kandil et al. 2001). Par exemple on trouve dans la (Figure 5.6) les

domaines d'analyse autorisés par chaque méthode de mesures. On distingue les méthodes destructives des non-destructives par des domaines grisés.

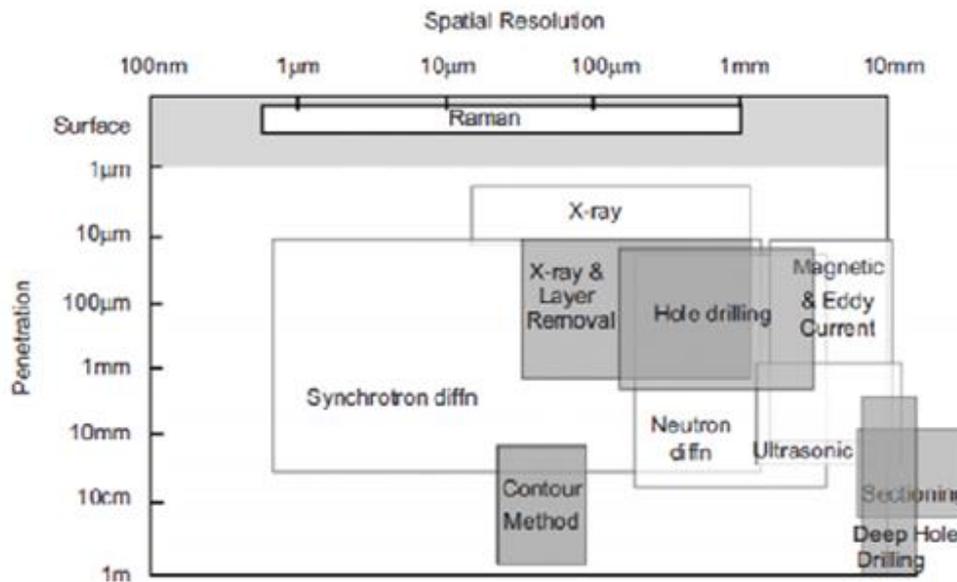


Figure 5.6. Schéma des capacités de résolution spatiale des différentes techniques de mesures des contraintes résiduelles (Withers et al 2008)

5.2. Les méthodes destructives.

5.2.1. La méthode du trou incrémental.

La méthode du trou incrémental est une méthode semi-destructive. Un trou est usiné à la surface de l'échantillon au centre d'une rosette de jauges de déformation. Une autre variante de la méthode consiste à usiner un anneau dans la matière et de mesurer les déformations à l'aide de jauges placées au centre de l'anneau (méthode du trépan – ringcoremethod) (Lambda Technologies 2005). Dans les deux cas, les déformations qui sont générées par relaxation des contraintes lors de l'usinage sont mesurées en surface de l'échantillon au voisinage du trou (Focht & Schiffner 2003 ; Lu & Society for Experimental Mechanics 1996 ; Niku-Lari et al. 1985 ; Schajer 1988a ; b ; 2010a ; Withers 2007 ; Withers & Bhadeshia 2001).

Un modèle mathématique est ensuite utilisé pour calculer les contraintes résiduelles à partir des déformations mesurées en surface. On détermine pour cela des coefficients de calibration, le plus couramment par voie numérique, puisqu'il n'existe pas de solution analytique pour relier contraintes et déformations (Maras 2010 ; Montay 2001 ; Niku-Lari et al. 1985). On obtient alors par un calcul élastique, une contrainte uniforme sur le volume de matière retiré (Eq. A2.1).

$$\varepsilon_i = A_{ij}(\sigma_j^1 + \sigma_j^2) + B_{ij}(\sigma_j^1 - \sigma_j^2)\cos 2\beta_i$$

Eq. A2.1

Où :

ε_i est la déformation à chaque incrément de perçage (sans unité),

σ_j^1 et σ_j^2 sont les contraintes principales (en MPa),

β_i est l'angle entre les contraintes principales et les contraintes suivant 1 et 2 de la direction principale (en degré),

A_{ij} et B_{ij} sont les coefficients de calibration (en MPa⁻¹).

Plusieurs hypothèses doivent être considérées pour effectuer ce calcul, à savoir :

- Le matériau est élastique, isotrope et linéaire,
- La contrainte calculée est homogène sur tout le volume de matière enlevé lors d'un perçage,
- La contrainte normale en surface est négligeable,
- Le cisaillement entre deux perçages est nul,
- Les contraintes résiduelles évaluées sont inférieures à la limite d'élasticité du matériau,
- La géométrie du trou est parfaite.

Dans la pratique, cette analyse peut conduire à des erreurs non négligeables sur le calcul des contraintes si les contraintes mesurées équivalent à plus de 60-70% de la limite d'élasticité du matériau (Grant et al. 2002 ; Moharami&Sattari-Far 2008 ; Vangi&Tellini 2010). Dans ce cas, les contraintes calculées peuvent être surestimées par rapport à la valeur réelle à cause des effets plastiques introduits aux abords du trou (Beghiniet al. 1994 ; Gibmeier et al. 1999 ; Vangi&Tellini 2010). Plusieurs auteurs ont cherché à corriger l'effet de la plasticité pour la méthode du trou classique (norme E837).

Connaissant la direction principale des contraintes, Moharami et Sattari-Far proposent une méthodologie de correction des mesures (Moharami&Sattari-Far 2008). Une autre méthode récente étend son application au perçage incrémental mais son utilisation est limitée à des champs de contraintes uniformes dans l'épaisseur (Vangi&Tellini 2010).

Pour des distributions non-uniformes de contraintes sur l'épaisseur du trou, on effectue plusieurs incréments de perçage afin d'obtenir le gradient de contraintes en fonction de la profondeur usinée (Flaman & Boag 1990 ; Flaman & Manning 1985 ; Grant et al. 2002 ; Maras 2010 ; Montay 2001 ; Niku-Lari et al. 1985 ; Schajer 2010a). Les coefficients de calibration sont calculés en conséquence car il faut prendre en compte la contribution du perçage des incréments précédents.

À l'instar des jauges de déformation, des méthodes sans contact basées sur des systèmes optiques ont été développées (Nelson et al. 2006 ; Schajer 2010a). Les champs de déplacements sont mesurés en surface par corrélation d'image (DIC – Digital Image Corrélation), interférométrie de moiré, de Speckle ou par méthode holographique, dont on donne une représentation (Figure 5.7).

On se référera aux documents (Nelson et al. 2006), (Schajer 2010a), (Montay 2001), (Maras 2010) pour plus de détail sur ces méthodes optiques.

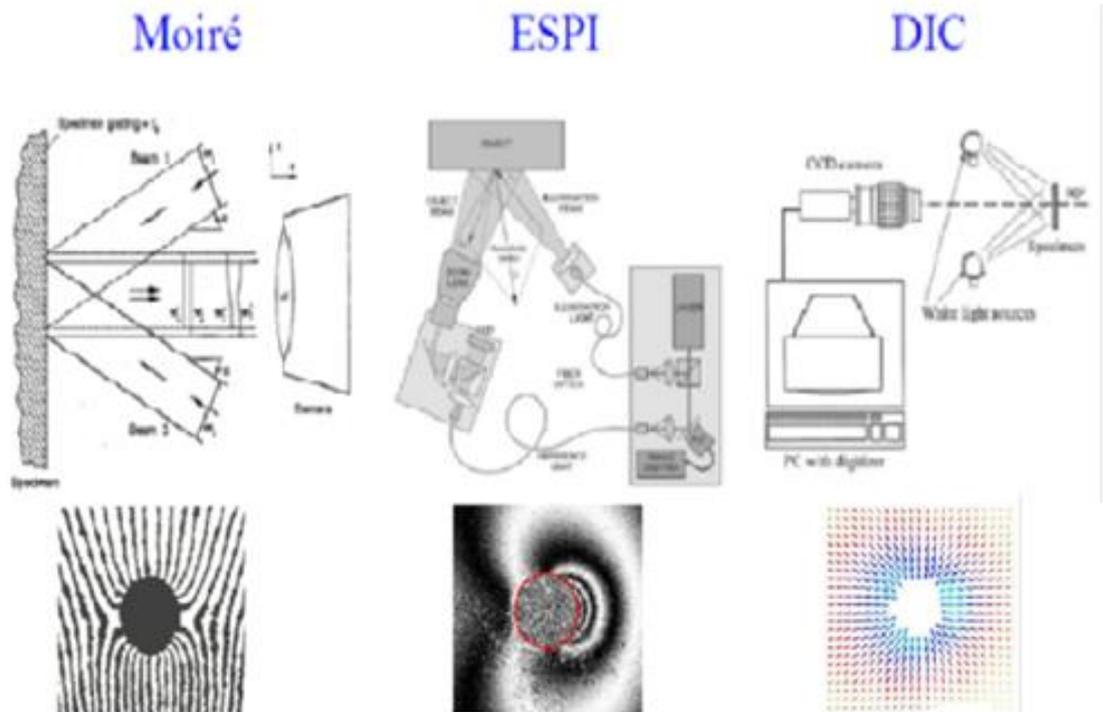


Figure 5.7. Exemples des systèmes optiques associés à la méthode du trou incrémental (Shajer 2010b)

Depuis les années 70, une variante de la méthode du trou a été développée. Elle est appelée la méthode du trou profond (DHD – Deep Hole Drilling). Cette méthode est particulièrement bien adaptée pour des mesures sur des pièces épaisses (jusqu'à plus de 750 mm), cependant son coût en limite l'utilisation (Kandil et al. 2001 ; Kingston 2008 ; Withers 2007). Une amélioration récente est effectuée par Mahmoudi et al. (Mahmoudi et al. 2009). Cette nouvelle procédure permet de corriger de manière satisfaisante les erreurs induites par l'usinage de l'anneau lorsque les contraintes sont proches de la limite d'élasticité et fortement triaxiales (Goudar et al. 2011 ; Mahmoudi et al. 2009).

La méthode du trou incrémental est très fréquemment utilisée pour évaluer les contraintes résiduelles dans les liaisons soudées multiplage bien que l'analyse ne soit pas très profonde (en moyenne 1-2 mm) (Akbari & Sattari-Far 2009 ; Broussard & Crooker 2011 ; Hilson et al. 2009 ; Hanninen et al. 2006 ; Liu et al. 2011 ; Sattari-Far & Farahani 2009 ; Thibault et al. 2009). Elle est alors couplée à d'autres méthodes d'analyse comme la méthode du trou profond, de diffraction (Broussard & Crooker 2011 ; Faïdy et al. 2008 ; Ficquet et al. 2009 ; Hilson et al. 2009 ;

Hanninen et al. 2006 ; Miteva & Taylor 2006) ou de simulation numérique (Broussard & Crooker 2011 ; Faigy et al. 2008) (Figure5.8).

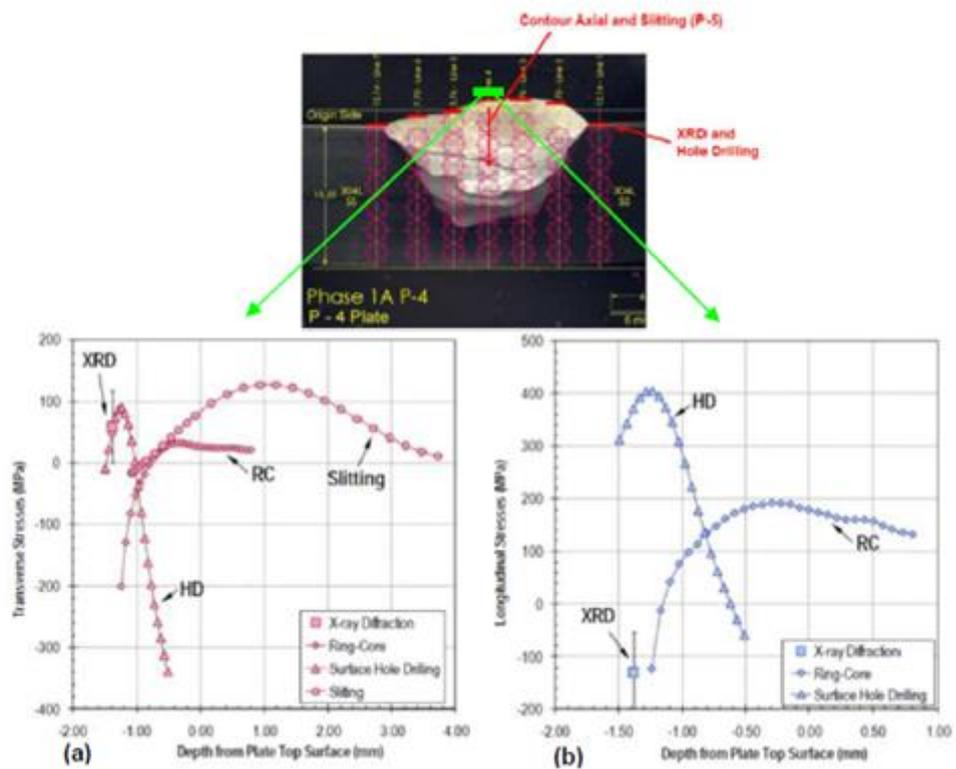


Figure5.8.Exemple d'évolutions des contraintes résiduelles transverses (a) et longitudinales (b) en fonction de l'épaisseur sur une maquette en acier austénitique(304L) remplie en 7 passes avec de l'inconel 82 (Broussard et Crooker2011)

5.2.2. La méthode de la rainure.

Elle est basée sur le même principe que la méthode du trou. Une fente de faible épaisseur est usinée dans la matière ce qui perturbe l'état d'équilibre des contraintes dans le matériau. Les déformations résultant de ce déséquilibre sont mesurées à l'aide de jauges de déformations situées à proximité de la fente usinée. Grace à ces déformations, on calcule les contraintes résiduelles qui sont perpendiculaires à la fente (Cheng & Finnie 2007 ; Prime 2003 ; Withers & Bhadeshia 2001). Tout comme pour la méthode du trou, on peut réaliser des incréments sur l'épaisseur pour estimer un profil de contraintes non-uniforme sur l'épaisseur analysée. Maras et An ont d'ailleurs développé une procédure de calcul des contraintes dans le cas de mesures de champs par interférométrie de Speckle pour un usinage incrémental sous forme de rainure (Maras 2010 ; Montay et al. 2009) ou de croix (An 2008).

Cette méthode est utilisée dans quelques travaux pour analyser les contraintes résiduelles dans des structures soudées multi passe (Broussard & Crooker 2011 ; Taylor et al. 2006).

5.2.3. Le découpage.

Tout comme les deux méthodes précédentes, les déformations générées par la relaxation des contraintes résiduelles lors d'une découpe de la pièce sont mesurées via des jauges de déformations (Totten et al. 2002 ; Withers 2007). Les découpes multiples font de cette technique une méthode totalement destructive. Chaque volume élémentaire à découper dispose d'une jauge de déformation et constitue la résolution spatiale de la technique.

Une variante de la méthode, développée par Prime, consiste à mesurer le profil déformé de la face découpée. La déviation du contour engendrée par l'usinage par rapport à la surface plane de référence permet de remonter aux contraintes résiduelles (Prime 2001 ; Prime et al. 2002).

Malgré l'aspect destructif de la méthode, elle est beaucoup utilisée pour estimer les contraintes résiduelles dans les liaisons soudées épaisses (Broussard & Crooker 2011 ; Deng et al. 2011 ; DeWald et al. 2011 ; Ellingson&Shack 1979 ; Francis et al. 2010 ; Kerret et al. 2011 ; Ogawa et al. 2009 ; Prime et al. 2002). En effet, elle permet d'avoir, sur la section découpée, le champ total de la contrainte perpendiculaire au plan de coupe. Un exemple d'application sur une liaison bimétallique tubulaire est présenté (Figure5.9) (DeWald& Hill 2001).

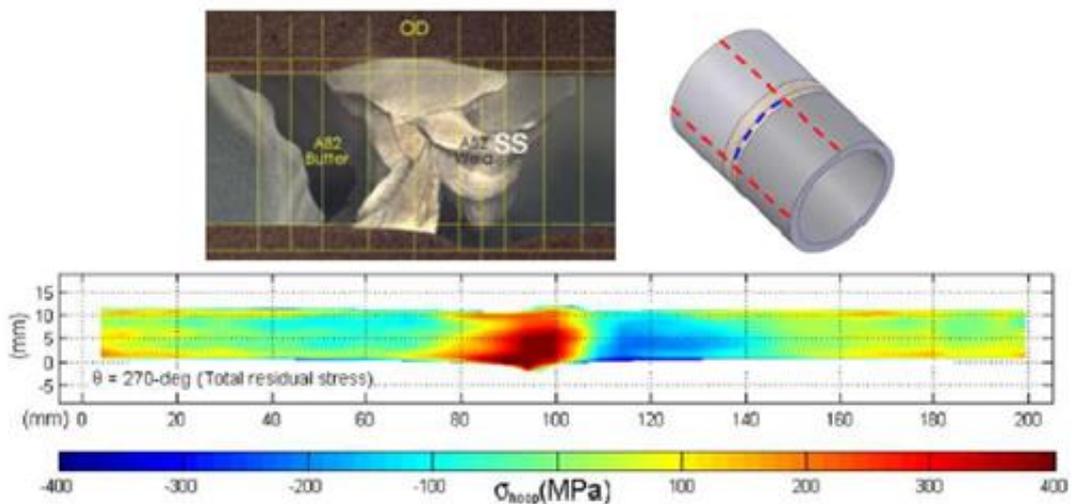


Figure5.9.Champ de contraintes résiduelles circonférentielles évalué par la méthode du contour sur une maquette tubulaire bimétallique (Acer carbone/ Inconel 82/304L) (DeWald 2010)

5.3. Les méthodes non-destructives.

5.3.1. La diffraction (X, des neutrons et synchrotron).

Les méthodes de diffraction sont les techniques les plus employées dans l'évaluation des contraintes résiduelles de structures. Elles sont au nombre de trois, à savoir : la diffraction des rayons X, la diffraction des neutrons et la diffraction synchrotron. Basées sur le même principe, ces méthodes se différencient par leur coût et la profondeur à laquelle les contraintes sont analysées (Noyan & Cohen 1987 ; Withers 2007 ; Withers & Bhadeshia 2001). En effet, le faisceau de rayons X pénètre faiblement dans la matière (quelques microns) tandis que la méthode des neutrons autorise des analyses sur plusieurs millimètres, voire plusieurs centimètres dans certains matériaux comme les alliages d'aluminium (voir Figure 5.6). L'analyse des contraintes résiduelles dans les alliages base nickel est toutefois limitée par diffraction des neutrons à cause de la forte absorption du faisceau par les éléments nickel et chrome. Enfin, la technique par synchrotron est particulièrement bien adaptée pour l'analyse des contraintes résiduelles dans les alliages d'aluminium mais seules les déformations sont accessibles dans les liaisons soudées.

La méthode est basée sur la mesure de la distance inter-réticulaire d_{hkl} d'une famille de plans de diffraction $\{hkl\}$ agissant comme une jauge de déformation (Ceretti 2004 ; Noyan & Cohen 1987 ; Withers 2007). Seule la composante élastique du tenseur des déformations est mesurée par diffraction. Ces déformations sont mesurées suivant une direction cristallographique $\langle hkl \rangle$ particulière.

Pour ce faire, un faisceau neutronique incident est projeté sur la zone à analyser de l'échantillon, puis le faisceau diffracté est récolté. La fenêtre de ces faisceaux constitue le volume de jauge dans lequel un certain nombre de grains de la direction $\langle hkl \rangle$ particulière vont diffracter comme l'illustre-la (Figure 5.10 (a)) (Ceretti 2004). Les grains de l'illustration sont volontairement grossiers pour la compréhension de la technique. La mesure s'effectue en réalité sur une statistique de grains plus grande pour être représentatif des contraintes macroscopiques de l'échantillon. L'analyse par diffraction des neutrons peut toutefois se complexifier si les grains sont gros car l'intensité mesurée en sortie peut être nulle si la mesure s'effectue dans une direction qui n'est pas diffractante. Elle sera par ailleurs représentative d'une contrainte à l'échelle d'un grain, à savoir des contraintes d'ordre II. Cette difficulté se rencontre facilement dans l'évaluation des contraintes résiduelles des liaisons soudées. Ces gros grains présents dans la zone fondue et environnante peuvent également posséder une texture qui exacerbe les difficultés de mesures dans la soudure.

En présence de contraintes résiduelles et pour une famille de plans cristallographiques $\{hkl\}$, la distance inter-réticulaire d_{hkl} varie. Cette variation est quantifiée par le déplacement de la position

angulaire (2θ) de la raie de diffraction par rapport à sa position de référence sans contrainte ($2\theta_0$) (Figure 5.10 (b)) (Noyan & Cohen 1987 ; Withers 2007 ; Withers & Bhadeshia 2001). La relation entre la distance inter-réticulaire et la position angulaire est établie à travers la loi de Bragg :

$$\lambda = 2d_{hkl} \sin \theta_{hkl} \quad \text{Eq. A2.2}$$

Où :

λ est la longueur d'onde supposée constante (en nm),

D_{hkl} est la distance inter-réticulaire correspondant au plan $\{hkl\}$ (en nm),

θ_{hkl} est l'angle de diffraction correspondant au plan $\{hkl\}$ (en degré).

La déformation qui dépend de la variation des distances inter-réticulaires Δd_{hkl} est ensuite déduite de l'équation précédente, pour une longueur d'onde donnée :

$$\varepsilon_{hkl} = \frac{\Delta d_{hkl}}{d_{hkl}^0} = \frac{d_{hkl} - d_{hkl}^0}{d_{hkl}^0} = \frac{\sin \theta_{hkl}^0}{\sin \theta_{hkl}} - 1 \quad \text{Eq. A2.3}$$

Avec d_{hkl}^0 la distance inter-réticulaire de référence (en nm) et θ_{hkl} l'angle de diffraction de référence pour un plan $\{hkl\}$ (en degré).

A partir des mesures de déformation dans plusieurs directions, le tenseur des contraintes résiduelles macroscopiques ou de premier ordre peut être calculé grâce à la loi de Hooke généralisée. On suppose pour le calcul que les matériaux sont élastiques, homogènes et isotropes (Noyan & Cohen 1987 ; Withers 2007 ; Withers & Bhadeshia 2001).

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl} = \frac{E_{hkl}}{1 + \nu_{hkl}} \left(\varepsilon_{ij} + \frac{\nu_{hkl}}{1 - 2\nu_{hkl}} \varepsilon_{kk} \delta_{ij} \right) \quad \text{Eq. A2.4}$$

Où C est le tenseur de raideur, δ_{ij} l'indice de Kronecker (sans unité), E est le module d'Young (en MPa) et ν le coefficient de Poisson (sans unité).

L'échantillon de référence peut prendre plusieurs formes selon les auteurs, à savoir des copeaux, des petits cubes ou encore de peigne (Ganguly et al. 2011 ; Hughes et al. 2003 ; Paradowska et al. 2006 ; Wang et al. 1999 ; Zhang et al. 2011).

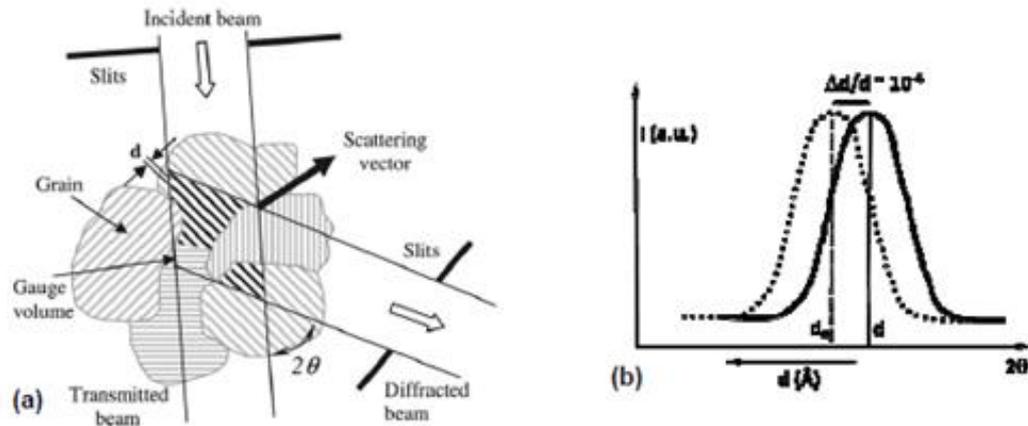


Figure 5.10. Principe de la méthode par diffraction des neutrons (a) (Francis et al 2010 ; Price et al. 2006) et sur une maquette en acier austénitique remplie en 7 passes (304L/Inco82) (b) (Broussard et Crooker 2011)

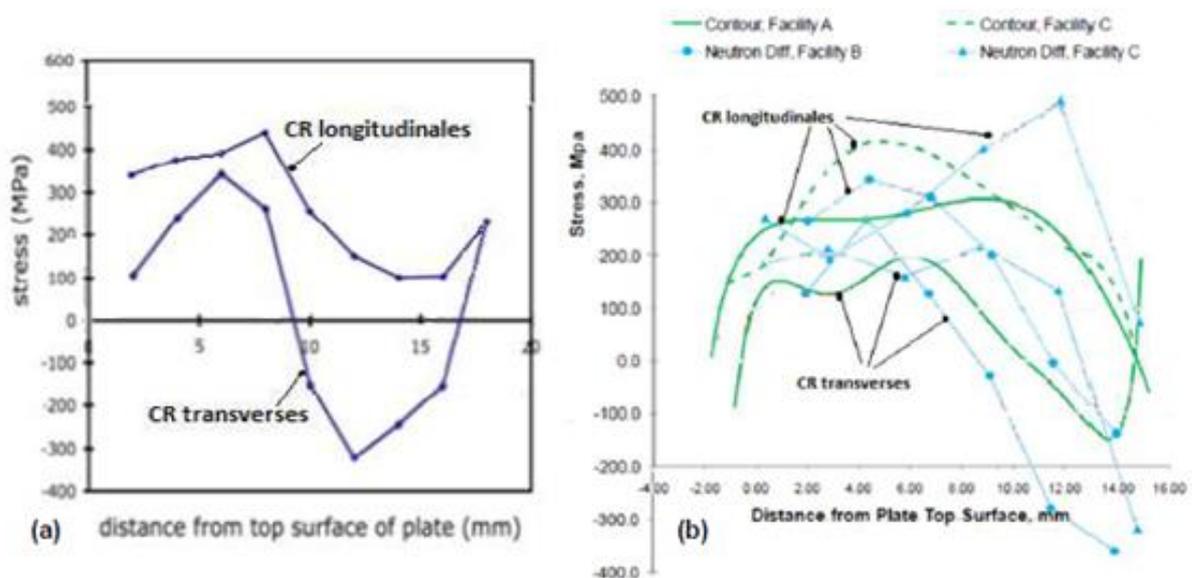


Figure 5.11. Evolutions des contraintes résiduelles transverses et longitudinales en fonction de l'épaisseur sur une maquette en acier faiblement allié en 8 passes (A508C13/SD3) (a) (Francis et al 2010) et sur une maquette en acier austénitique remplie en 7 passes (304L/Inco82) (b) (Broussard et Crooker 2011)

5.3.2. Autres méthodes.

Ces méthodes utilisent certaines propriétés physiques du matériau pour les relier aux contraintes résiduelles (Kandil et al. 2001 ; Lu & Society for Experimental Mechanics 1996 ; Withers 2007 ; Withers & Bhadeshia 2001). On peut citer entre autres les techniques qui utilisent les propriétés magnétiques et acoustiques du matériau.

Dans la première méthode, un état de contraintes internes provoque des effets magnéto-élastiques dus aux déformations magnétiques (ou striction magnétique) (Buttle et al. 2006

; Kandil et al. 2001 ; Lu & Society for Experimental Mechanics 1996 ; Maras2010 ; Montay 2001 ; Withers 2007 ; Withers & Bhadeshia 2001 ; Withers et al. 2008). Elle permet d'analyser rapidement des échantillons sur 6-10 mm de profondeur. Cependant, elle est sensible à une variété d'éléments microstructuraux comme la texture et la microstructure du matériau ce qui peut parasiter la mesure des contraintes. Les paramètres magnétiques sont également sensibles à la texture et la microstructure.

Enfin, la condition que le matériau soit ferromagnétique limite les applications de cette méthode. Un exemple d'application sur un tube soude est donné dans la référence (Withers et al. 2008).

L'autre méthode citée utilise la sensibilité de la vitesse des ondes ultrasonores propagées dans le matériau à l'état de contraintes (Kandil et al. 2001 ; Lu & Society for Experimental Mechanics 1996 ; Maras 2010 ; Montay 2001 ; Withers 2007 ; Withers & Bhadeshia 2001). Tout comme la précédente technique, elle permet d'analyser rapidement sur l'épaisseur de l'échantillon. Si la technique est prometteuse pour des applications de soudage, il faut toutefois prêter attention aux perturbations du signal dues à la texture et à la microstructure du matériau. De plus il est nécessaire de caractériser la constante acousto élastique du matériau pour pouvoir remonter aux contraintes résiduelles. Quelques applications pour du soudage sont données dans les références (Bellachonne 2003 ; Kudryavtsev et al. 2000 ; Kudryavtsev et al. 2004 ; Palanichamy et al. 2009 ; Vasudevan 2009).

6. Conclusion du chapitre 5.

Le soudage induit des contraintes résiduelles qui peuvent être néfastes à la tenue mécanique de la liaison. Les phénomènes mis en jeu sont multiples mais se décomposent suivant trois origines : thermique, mécanique et métallurgique. Le soudage multi passe complique la compréhension des mécanismes pour former et distribuer les contraintes résiduelles dans la liaison. En effet, à chaque passe, il relaxe une partie des contraintes formées à la passe antérieure mais en introduit également de nouvelles. Les effets sont différents suivant le mode opératoire adopté (vitesse de soudage, température entre passe...).

Les méthodes d'évaluation des contraintes résiduelles sont nombreuses et se résument en deux catégories, les méthodes destructives et non-destructives. Chaque technique donne accès à une information du champ de contraintes avec par exemple la méthode du trou incrémental qui permet d'évaluer les contraintes résiduelles plus en surface tandis que la méthode par diffraction des

neutrons informe de l'état de contrainte sur l'épaisseur de l'échantillon Une technique d'analyse est ainsi rarement utilisée seule.

Les méthodes les plus couramment utilisées pour évaluer les contraintes résiduelles sur des liaisons soudées sont la diffraction des rayons X et des neutrons ainsi que la méthode du trou (Bousseau 2006 ; Weisman& Kearns 1976) et plus récemment la méthode du trou profond (Broussard & Crooker 2011 ; Gommez et al. 2011 ; Kingston 2010 ; Smith et al. 2000 ; Yaghi et al. 2010).

7. Origine des contraintes résiduelles de soudage.

La plupart des procédés de fabrication génèrent des contraintes résiduelles. Elles peuvent être d'origine mécanique, thermique et/ou métallurgique. Withers renseigne sur ces différentes origines à travers plusieurs exemples (Withers 2007).

On résume dans le Tableau 5.1, les différentes origines des contraintes résiduelles pour plusieurs procédés couramment utilisés. On s'intéressera par la suite aux contraintes résiduelles formées au cours du soudage. Elles proviennent des trois origines, à savoir mécanique par le bridage de la pièce, thermique par la source de chaleur de soudage et métallurgique par les modifications structurales induites par les variations de température.

Chapitre6.Les traitements thermiques des soudures

1. Introduction

Les traitements thermiques sont constitués par un certain nombre d'opérations combinées de chauffage et de refroidissement ayant pour but :

- D'améliorer les caractéristiques des matériaux et rendre ceux-ci plus favorables à un emploi donné, à partir des modifications suivantes :
 - Augmentation de la résistance à la rupture et de la limite élastique R_m , R_e , A % en donnant une meilleure tenue de l'élément.
 - Augmentation de la dureté, permettant à des pièces de mieux résister à l'usure ou aux chocs.
- De régénérer un métal qui présente un grain grossier (affiner les grains, homogénéiser la structure) cas des matériaux ayant subi le forgeage.
- De supprimer les tensions internes (écrouissage) des matériaux avant subit une déformation plastique à froid (emboutissage, fluotournage).

2. Cycle d'un traitement thermique :

Effectuer un traitement thermique sur une pièce, c'est faire subir à celle-ci une variation de la température en fonction du temps. Le procédé de traitement thermique se compose de (Figure6.1) :

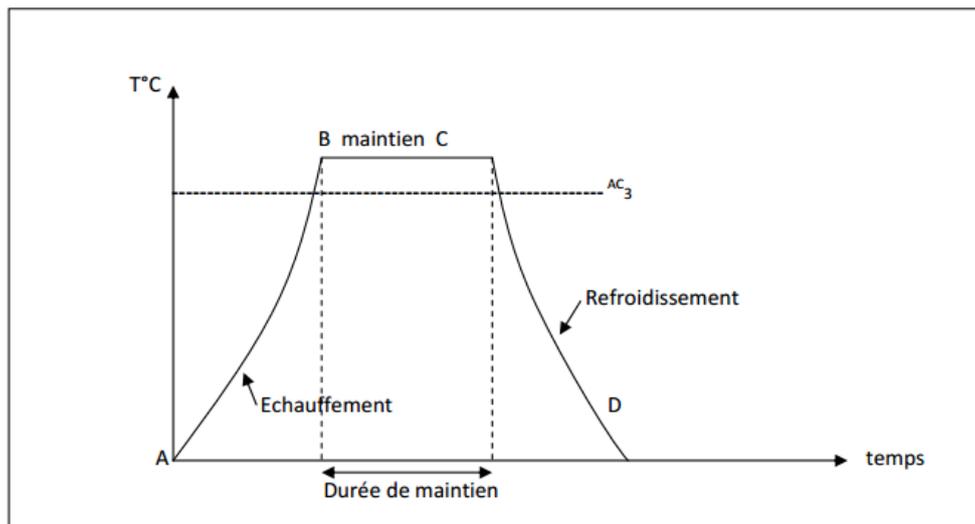


Figure6.1.Cycle d'un traitement thermique

Les traitements thermiques des soudures

- AB : L'échauffement à des températures supérieures aux températures de transformation (par exemple : AC3).
- BC : Maintient à une température définie.
- CD : Refroidissement avec une vitesse donnée :
 - Lente (dans le four, à l'air).
 - Assez rapide (dans l'huile).
 - Très rapide (dans l'eau) [27].

2.1. Chauffage des pièces

La première étape de chaque traitement thermique est le chauffage de la pièce à la température exigée. Le chauffage doit s'effectuer très rapidement pour avoir une faible consommation d'énergie et une grande productivité. La (figure6.2) représente la courbe de pour le contour de la pièce, la courbe est simplifiée comme une droite. Durant le chauffage, on distingue trois étapes :

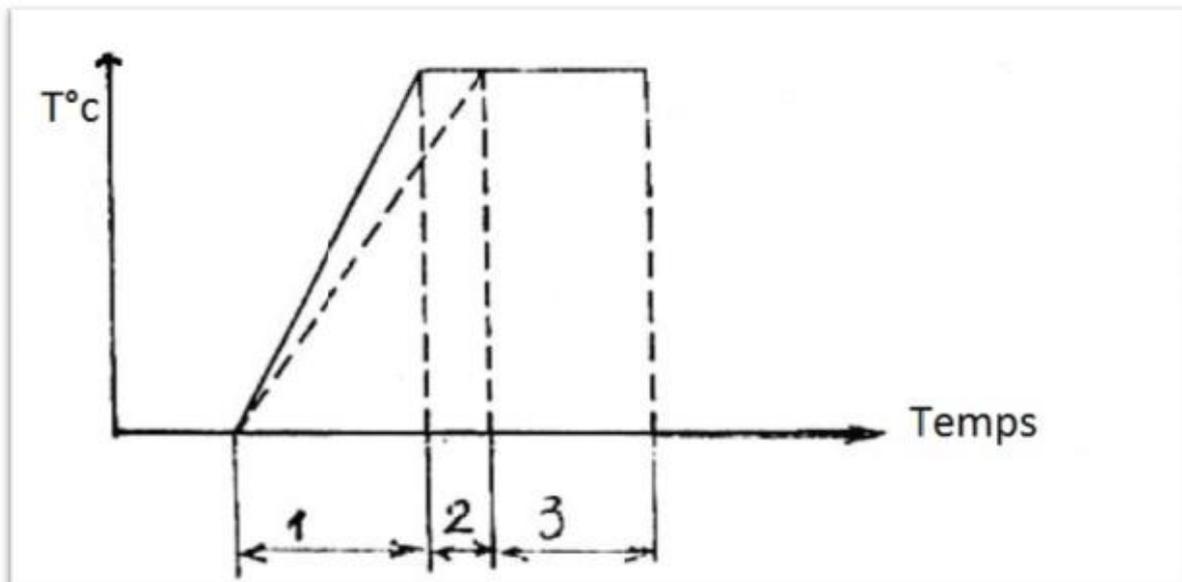


Figure6.2. Chauffage des pièces

1. Durée de préchauffage :

C'est le temps de début de chauffage jusqu'à ce que la température nominale soit atteinte à la surface de la pièce.

2. Durée de chauffage de pénétration ou d'égalisation :

C'est le temps nécessaire pour atteindre la température nominale à la surface de la pièce et au cœur de la pièce.

3. Durée de maintien :

Les traitements thermiques des soudures

C'est le temps nécessaire pour maintenir la pièce à une température, et à partir de la température atteinte dans le cœur.

Les facteurs principaux qui influent sur le chauffage de la pièce sont le diamètre (épaisseur), conductibilité, température du four, ...ect, En général, le régime de chauffage pour les aciers selon le diamètre de la pièce et les caractéristiques qui sont définies par le carbone équivalent.

$$\text{C équivalent} = C + M_n/5 + C_r/4 + M_o/3 + N_i/10 + V + (S_i - 0,5) /5 + W /10 + T_i/5 + Al /10$$

Toutefois le choix du traitement thermique le plus approprié est en lui-même d'une grande difficulté plus particulièrement dans le choix de ces paramètres, et ce en fonction des structures et des propriétés physiques et mécaniques souhaitées.

3. Diagramme d'équilibre.

3.1. Diagramme fer-carbone métastable.

Le diagramme d'équilibre est une représentation graphique indiquant la composition des phases et la structure d'alliage Fe-C, élaboré sous la pression ordinaire supposant des vitesses de chauffage et de refroidissement extrêmement faibles.

Les domaines de solubilité du carbone sont désignés par γ et α respectivement, la solubilité étant très faible à l'état α contrairement à l'état γ qui est plus grande, ce qui explique l'étendue du domaine γ par rapport au domaine α qui est extrêmement réduit (Fig6.3).

3.2. Les constituants d'équilibres des alliages Fer- Carbone.

- La solution solide δ :

C'est une solution solide d'insertion du carbone dans le fer δ la solubilité limite du carbone dans le fer δ est de 0.1 %.

- La solution solide α (ferrite) :

C'est une solution solide d'insertion du carbone dans le fer α , la solubilité limite du carbone dans le fer α est de 0.022 %.

- La solution solide γ (austénite) :

C'est une solution solide d'insertion du carbone dans le fer γ la solubilité limite du carbone dans le fer γ est de 2.11 %.

- La cémentite :

Les traitements thermiques des soudures

De composition chimique Fe_3C , elle constitue l'un des composés de la perlite. Elle peut apparaître sous forme lamellaire ou globulaire selon le mode de refroidissement.

➤ La perlite :

C'est un agrégat eutectoïde obtenu par transformation isotherme de l'austénite, chaque grain est formé de lamelles alternées de ferrite et de cémentite, quand le refroidissement est lent elle peut exister sous forme globulaire.

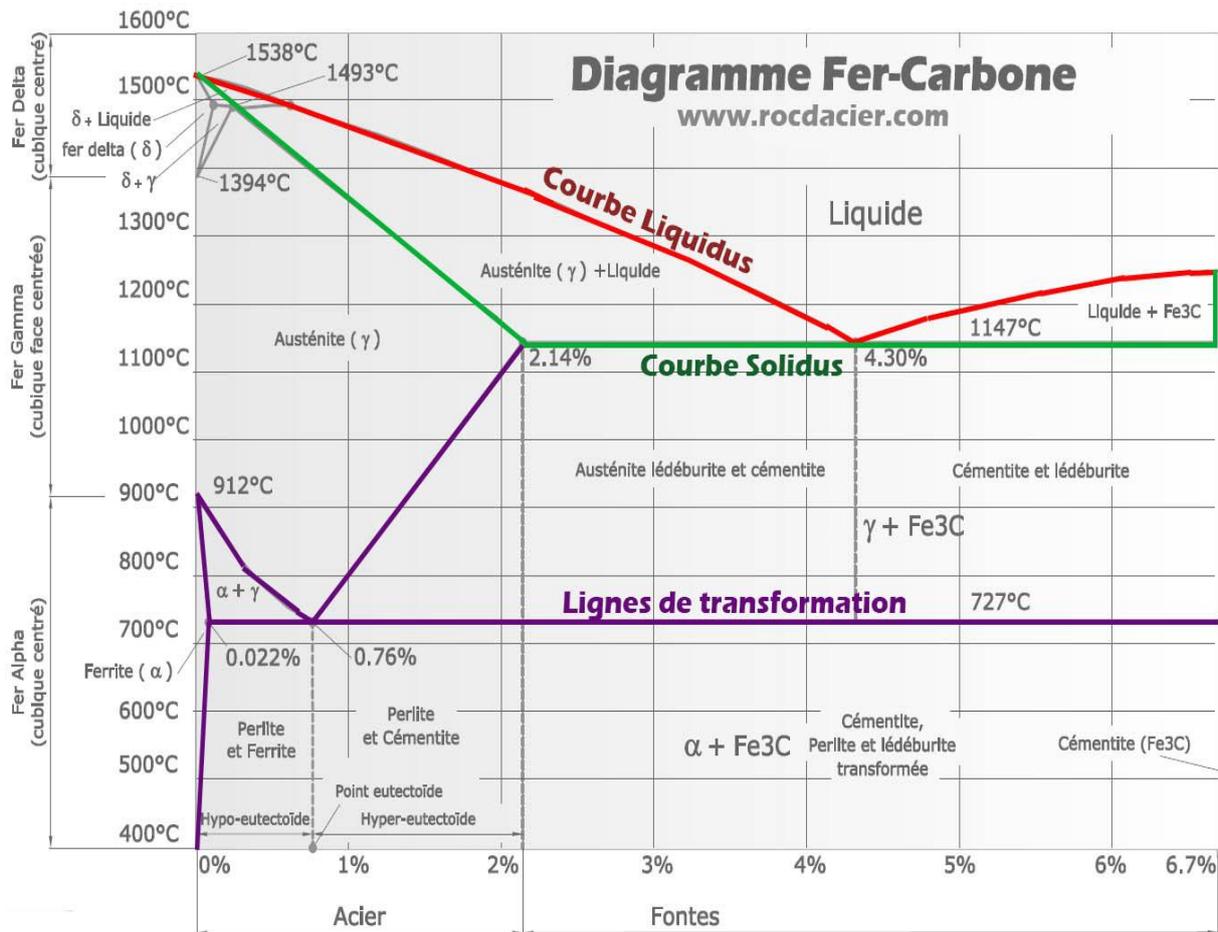


Figure 6.3. Diagramme Fer-Carbone

4. Traitements thermiques des soudures.

4.1. Objet et mise en œuvre des traitements thermiques.

4.1.1. Classification selon l'objet :

L'opération de soudage se traduit par des modifications métallurgiques locales de métal de base et, selon les procédés les modes opératoires, par la création d'une zone fondue dont la structure et les propriétés sont plus ou moins différentes de celles de métal de base. D'autre part, l'opération de soudage établit un état de contraintes résiduelles dont la répartition et l'amplitude sont, elles aussi, fonctions de procédés et des modes opératoires.

Les traitements thermiques des soudures

Qu'elles soient à caractère métallurgique et thermomécanique, ces modifications sont souvent tolérables vis-à-vis du comportement de service et les ensembles soudés sont utilisés à l'état brut de soudage. Dans certains cas, cependant, il est jugé préférable ou nécessaire, ou bien encore il est obligatoire d'intervenir par un traitement thermique après soudage, dont l'objet principal peut être d'améliorer ou d'obtenir les propriétés jugées importantes vis-à-vis des conditions de service, ou d'éliminer ou simplement de réduire les contraintes résiduelles. En réalité, compte tenu des rôles multiples que joue tout cycle d'échauffement et de refroidissement, le premier type de traitement destiné à jouer un rôle métallurgique, agit aussi sur l'état de contraintes. Le second à finalité mécanique, a cependant des conséquences métallurgiques. C'est donc en gardant à l'esprit cette interaction que l'on étudiera successivement, ci-dessous, dans le cas des aciers, les types de traitement suivants, sans entrer dans le détail de la nature des sources d'énergie mise en œuvre :

- Traitement de relaxation (ou de détente) et de revenu.
- Traitement de normalisation.
- Traitement de trempe et revenu.

4.1.2. Modes de mise en œuvre :

On peut classer et décrire comme suit la façon dont les traitements thermiques concernant de soudures ou des ensembles soudés sont pratiqués.

a) Le traitement peut être global, c'est à dire affecter la ou les soudures constitutives de l'ensemble, en même temps que la totalité du métal de base. Une telle action peut être simultanée, c'est – à dire que tout l'ensemble soudé est soumis en même temps, au même cycle de traitement ; ou bien le traitement à lieu de proche en proche, mais pour chaque position qu'elle occupe, la source de chaleur agit simultanément et selon le même cycle sur la soudure et le métal de base non affecté. Le traitement global de proche en proche est illustré par un schéma emprunté à la fabrication des tubes soudés par résistance ou par induction, la source de chaleur, immobile, traite une source entière du tube qui défile, aussi bien le métal de base que la soudure qui vient d'être faite.

Dans la pratique, le traitement global simultané peut être appliqué à tous les objectifs de traitement mentionnés plus haut et à toutes les formes et encombrement d'ensembles soudés compatibles avec les capacités des sources de chaleur mise en œuvre. Le traitement global de proche en proche, qui requiert un profil constant du produit à traiter, est essentiellement pratiqué pour la fabrication des tubes, pour la normalisation ou l'hypertrempe, selon qu'il s'agit d'acier « noir » ou d'acier inoxydable.

Les traitements thermiques des soudures

b) Le traitement local simultané consiste à opérer en même temps sur la totalité d'une soudure et des abords et donc sur une partie seulement de métal de base encadrant la zone affectée. Le traitement se distingue du traitement local de proche en proche en ce sens que ce dernier est pratiqué au moyen d'une source de chaleur se déplaçant par rapport à la soudure ou l'inverse (l'une immobile, l'autre mobile), pour assurer ce proche en proche l'effet recherché dans le métal fondu est une partie de métal de base incluant la zone affectée.

Le traitement local simultané est essentiellement destiné à des soudures circulaires, pour lesquelles il assure un effet métallurgique (normalisation ou revenu), ainsi que de relaxation, en raison de symétrie qu'il assure. Tel n'est pas le cas de traitement local de proche en proche qui, s'il assure une action métallurgique (essentiellement de normalisation), n'est pas à conseiller pour obtenir la relaxation, car qu'il ne fait que remplacer un état de contrainte du au soudage, par un autre, du au traitement lui-même.

En ce qui concerne les traitements thermiques locaux, qu'ils soient simultanés au de proche en proche, ils ne peuvent être pratiqués sans inconvénient que moyennant deux conditions, toutes deux relatives au métal de base.

Lors des traitements thermiques de normalisation, la vitesse de refroidissement, donc l'éloignement de la source de chaleur, doit être réglée de sorte que la zone traitée, qui est momentanément austénitisée, ne prenne pas la trempe.

Tout traitement thermique local crée sa propre zone affectée qui remplace la ZAT de la soudure que l'on traite. Du fait de l'inévitable gradient de température qui y règne, cette zone comporte sur ses bords. Une bande où le traitement appliqué n'a pas complètement été réalisé, mais où il a créé une modification du métal de base par rapport à son état initial, en particulier un adoucissement si le métal de base est lui-même à l'état initial trempé et revenu.

4.2. Traitement de relaxation.

4.2.1. Objet.

Le traitement thermique de relaxation, ou encore de détente a pour objet d'annuler ou d'atténuer les contraintes résiduelles présentes dans un ensemble soudé après son achèvement, ou en cours de construction s'il apparaît nécessaire d'intervenir sur l'état des contraintes avant de poursuivre les opérations de soudage en toute sécurité. Compte tenu de domaine de température, en tous cas inférieurs à celle du point (A1), dans lequel se pratique le traitement de relaxation, il entraîne aussi un effet de revenu, lorsque les soudures contiennent des constituants de trempe, dans la zone fondue comme dans la zone affectée. Cet effet est parfois l'objet principal du traitement qui reste

Les traitements thermiques des soudures

alors pratiqué selon les mêmes techniques. Malheureusement, ce rôle métallurgique supplémentaire n'est pas toujours bénéfique, car des effets défavorables peuvent intervenir, en affectent les propriétés mécaniques ou en provoquant le phénomène de fissuration dit " au réchauffage".

4.2.2. Mécanisme de la relaxation.

On a déjà indiqué, à propos de l'étude thermique et thermomécanique du soudage, que la relaxation thermique des contraintes résiduelles est obtenue grâce à la diminution de la limite d'élasticité provoquée par l'élévation de la température il résulte de cette diminution que toute région d'une pièce ainsi réchauffée qui était le siège d'une contrainte résiduelle à l'ambiante (contrainte évidemment élastique) se plastifie au fur et à mesure de l'échauffement, ce qui fournit l'allongement nécessaire à l'obtention d'un taux de relaxation croissant avec la température du traitement.

Une représentation simplifiée de ce mécanisme peut être obtenue en confrontant sur un même graphique (Figur6.4) le cycle thermique $\theta = f(t)$ du traitement, la variation $R_e = f(\theta)$ de la limite d'élasticité en fonction de la température et en fin la courbe $\sigma = f(t)$ donnant la variation de la contrainte résiduelle durant le cycle du traitement.

Le taux de relaxation, en première approximation fonction de la seule température de traitement est très faible jusqu'à 200 °c, atteint 50 à 60 % à 500 °c, 70 à 85 % à 575 °c, et 90 à 95 % pour une température de 625 °c, le résultat étant obtenu dès que la température maximale est atteinte. Il n'en reste pas moins que tout traitement thermique doit être spécifié non seulement en termes de température, mais aussi en terme de durée, pour tenir compte, en fonction de l'énergie disponible pour assurer le traitement, de la masse du produit traité et de la nécessité d'homogénéiser la température pour éviter la création de nouvelles contraintes au refroidissement. D'autre part, un certain temps de maintien de la température fixée pour le traitement assure un pourcentage complémentaire de relaxation dans les régions où existent initialement des points de contraintes [28],

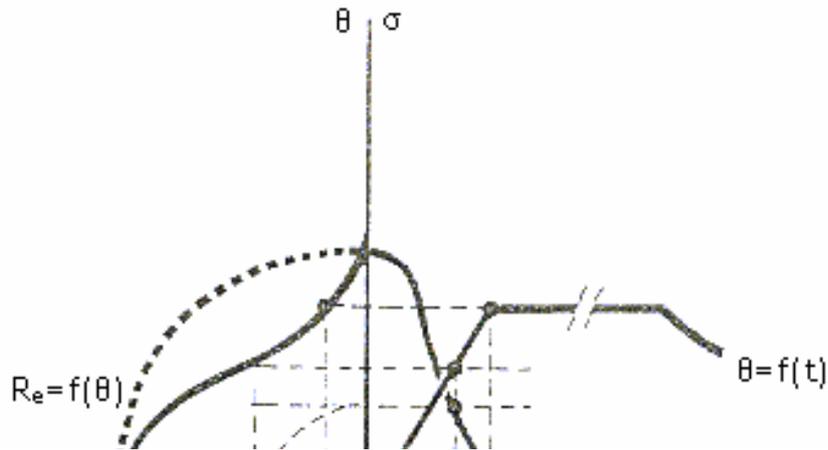


Figure 6.4. Mécanisme de la relaxation des contraintes (d'après [26])

Finale

ment

pour définir un

traitement thermique en fonction de la température et du temps, et pour en évaluer les effets, du point de vue des contraintes ou Surtout de celui des propriétés mécaniques, on fait appel à un paramètre dit de Hollomon [26].

$$H = T (20 + \log t) 103$$

Où T est la température de traitement (en degrés K) et t la durée du traitement (en heures). Ce paramètre est utilisé dans la norme précitée pour rendre compte de l'effet du traitement sur les propriétés mécaniques, dont il est fait état dans le paragraphe suivant. La norme indique à cette effet les valeurs de H (Figure 6.5) correspondant aux diverses combinaisons température / temps.

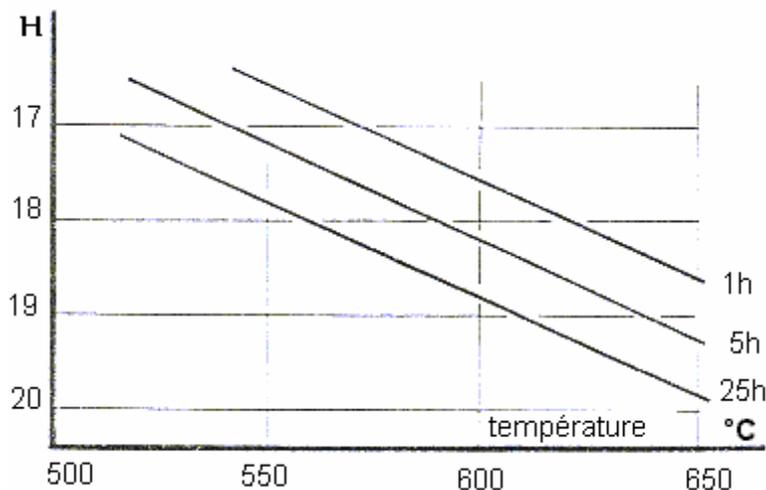


Figure 6.5. La variation de H en fonction de la température (d'après [26])

4.2.3. Effets métallurgiques du traitement.

Le cycle thermique d'un traitement de relaxation étant assimilable à celui d'un traitement de revenu, il n'y a dans l'ensemble pas d'effet sur le métal de base lorsque ce dernier est lui-même mise en œuvre à l'état normalisé et revenu et trempé et revenu, sauf si le traitement a lieu à une température supérieure à celle de revenu initial ; à cet effet on se tient à une température inférieure d'une trentaine de degrés au-dessous. Il faut cependant signaler que certains aciers alliés (au Mn-Mo, au Mn-Ni-Mo, ou encore au Cr-Mo) peuvent être sensible au phénomène dit de fragilité de revenu, qui se produit au cours d'un traitement à 450 – 550 °C ou durant le refroidissement au cours d'une traversée trop lente de cet intervalle de température ce phénomène, qui semble être associé à l'effet des impuretés, est moins sensible en présence de vanadium [31,30].

Par contre pour les aciers utilisés à l'état normalisé, le traitement thermique de relaxation a une action à la fois sur les caractéristiques de traction (à l'ambiante ou à chaud) et sur la température de transition de résilience ; cette action est fonction de paramètre H du traitement, défini comme indiqué ci-dessus. Ce comportement se produit par les aciers au C, au Mn, au C-Mn additionnés de Ni et pour les aciers a haut limite d'élasticité [30].

En ce qui concerne l'effet de traitement de relaxation sur les propriétés mécaniques du métal fondu, il est bénéfique en ce qui concerne la restauration à partir de l'état vieilli par l'effet thermo-thermique que l'on peut rencontrer dans les soudures multi passes surproduits épais. Il peut par contre avoir un effet fragilisant pour certaines compositions sensibles à la fragilité de revenu, essentiellement au cours d'un refroidissement trop lent ; la température maximale atteinte et la durée du séjour ne sont pas en cause dans ce phénomène [27].

En conclusion, il apparaît en toute état de cause, on doit, au moment du calcul d'une construction devant être soumise à un traitement thermique de relaxation, tenir compte des propriétés mécaniques réelles, telles qu'elles résultent de l'effet métallurgique de ce traitement [29].

Pour ce faire, la valeur H du paramètre de ce traitement doit être fixée au minimum compatible d'une part avec les conditions technologiques indiquées plus haut, d'autre part avec le taux de relaxation recherché ou imposé, cependant que la vitesse de refroidissement doit être réglée au maximum possible, tout en maintenant l'homogénéité thermique des pièces traitées [27].

4.3. Traitements comportant une austénitisation

4.3.1. Recuit

4.3.1.1. Définition

Le recuit est l'ensemble de traitements variés dont le but est de conduire à des états proches de l'équilibre tant au point de vue métallurgique que mécanique :

- Microstructure homogène ;
- Amélioration de la ductilité et de l'usinabilité ;
- Réduction des contraintes résiduelles.

Maintiens en température relativement longs et vitesses de refroidissement faibles, conduisant à des microstructures à base de ferrite et cémentite (ou carbures).

1) Cycle thermique :

- Chauffage jusqu'à la température de traitement,
- Maintien isotherme ou oscillations autour,
- Refroidissement à l'air calme ou au four coupé.

Il y'a plusieurs types de recuit, selon le but qu'en veut atteindre.

4.3.1.2. Les types de recuit.

❖ Si la température est en dessous de A_{c1} :

a) Recuit d'homogénéisation :

Élimination des hétérogénéités chimiques dues à la ségrégation mineure (après la coulée, avant laminage à chaud ou forgeage). (Figure 6.6) [3].

- Maintien de métal dans le domaine austénitique ;
- Diffusion d'autant plus grande que la température est élevée ;
- Risque de surchauffe provoquant le grossissement des grains ;
- Risque de fusion partielle conduisant à l'altération des joints de grain.

b) Traitement de normalisation.

Structures ferrito-perlitiques avec des grains ferritiques fins (germination de nouveaux grains γ dans l'intervalle A_{c1} - A_{c3} ou A_{c1} - A_{cm}) et de faibles espacements inter lamellaires (perlite refroidissement lent). (Figure 6.6) [3].

- Vitesse de refroidissement plus rapide (air calme) que le recuit complet ;
- Microstructure très homogène à bonne résistance mécanique ;

➤ Bon état initial pour le une austénitisation avant trempe.

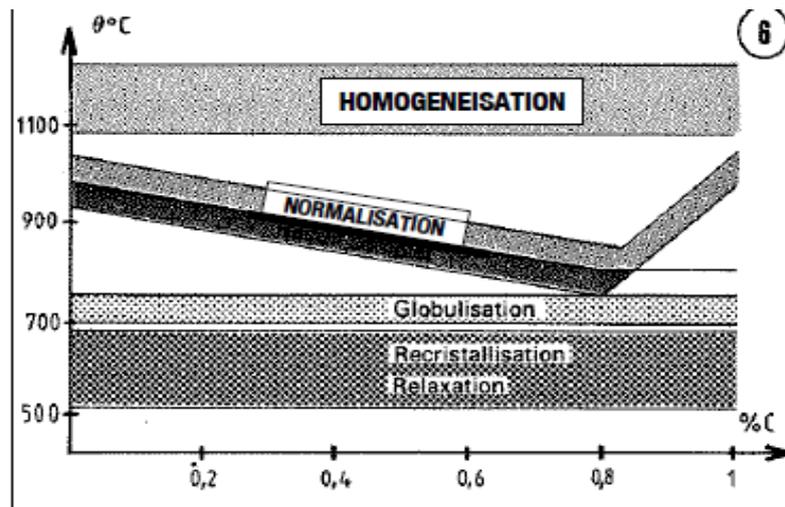


Figure6.6. Recuits d'homogénéisation et de normalisation

c) Recuit complet (ou recuit).

Permet d'éviter la fragilité liée à la présence de carbures en réseau inter granulaire. (Figure6.7) [3].

- Austénitisation complète pour les aciers hypo (température de maintien vers $A_{c3} + 50^\circ\text{C}$).
- Austénitisation partielle pour les aciers hyper ($A_{c1} + 50^\circ\text{C}$) : globulisation partielle de la cémentite proeutectoïde Ferrite et perlite grossières : résistance et dureté faibles mais ductilité élevée.

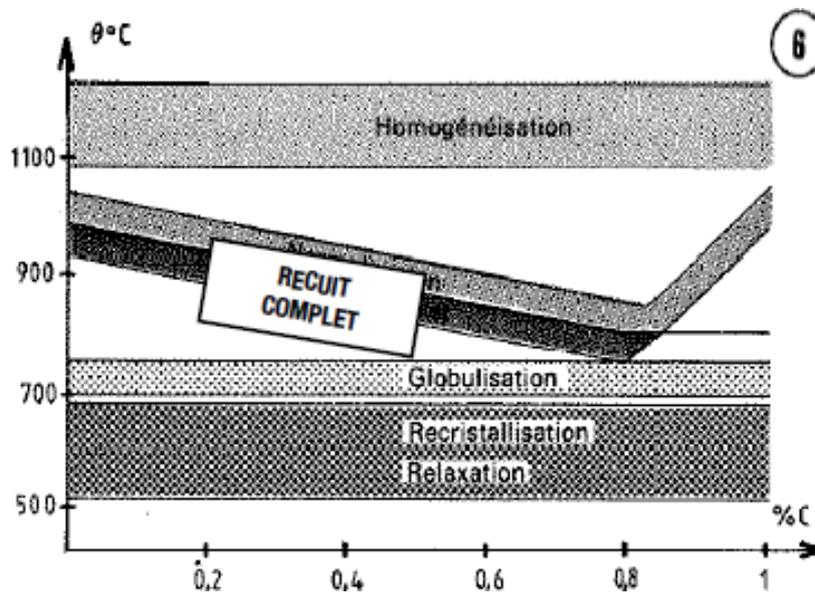


Figure6.7. Recuit complet

d). Recuit de régénération.

Permet l'affinement du grain des pièces forgées à haute température, des pièces moulées, des zones voisines des joints soudés, des pièces ayant subi un traitement d'homogénéisation ou une austénitisation trop élevée. (Figure6.8). [3]

Le cycle de régénération :

- Chauffage sans maintien prolongé à une température légèrement supérieure à A_{c3} (hypo) ou A_{c1} (hyper) ;
- Refroidissement pas trop lent aux alentours de $750-600^{\circ}\text{C}$ car le grain de ferrite peut regrossir (acier avec faible %C).

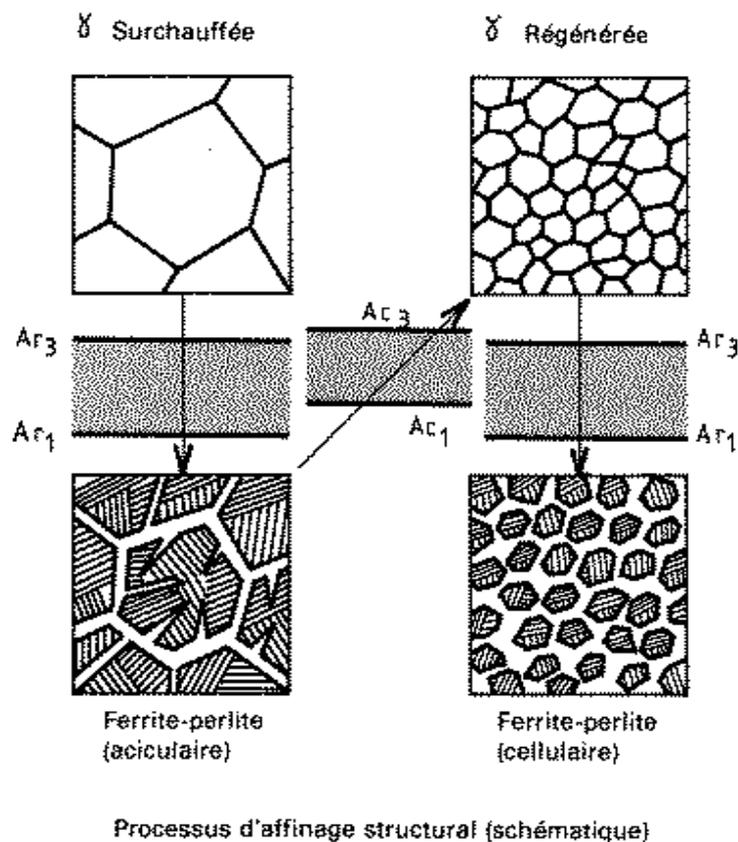


Figure6.8. Recuit de régénération

- ❖ Température en dessous de A_{c1} ;

e) Recuit de globulisation.

Permet l'augmentation de la capacité de déformation (tréfilage des aciers perlitiques) :(Figure6.9)[3]

Chauffage juste en dessous d' A_{c1} ;

- Maintien prolongé à cette température (ou oscillation) ;

Les traitements thermiques des soudures

- Refroidissement lent de manière à obtenir une coalescence poussée de la cémentite.

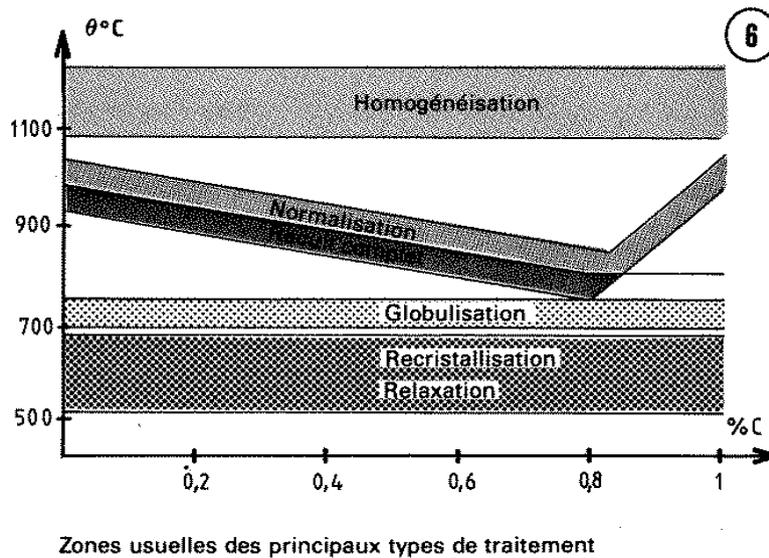


Figure 6.9. Recuit de globulisation

Les étapes de recuit de globulisation : (Figure 6.10). [3]

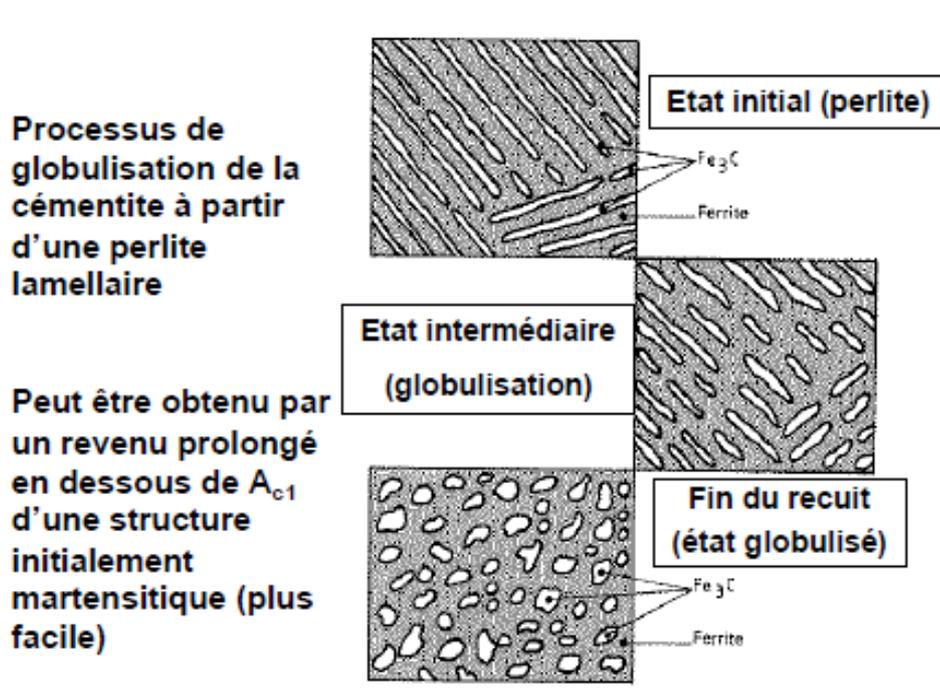


Figure 6.10. Les étapes de globulisation

f). Recuit de restauration et recristallisation.

Le travail à froid d'un métal par déformation (laminage, filage) conduit à une structure écrouie, caractérisée par une forte déformation orientée des grains, associée à de très fortes densités de défauts (lacunes et dislocations). De plus, un métal écroui devient fragile.

Les traitements thermiques des soudures

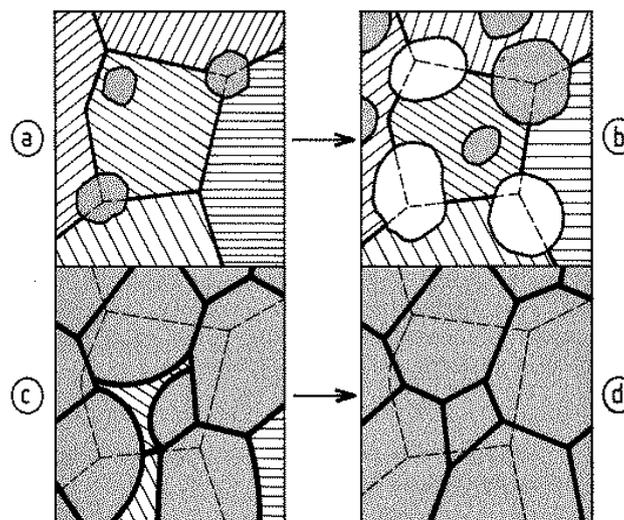
Pour un acier à 0.3%C et un taux d'écrouissage de 70%, Rm peut passer de 600 à 1000 MPa, alors que A passe de 30 à 2%. (Figure6.11) [3]

✓ Recristallisation :

- Structure écrouie est remplacée par une nouvelle structure à grains reformés ;
- Traitement à une température de recristallisation (fonction du taux d'écrouissage) conduisant à la germination et croissance jusqu'à contact mutuel de nouveaux grains.

✓ Restauration ;

- Restaurer en partie les propriétés physiques et mécaniques, sans modification apparente de la structure ;
- Annihilation partielle des lacunes et dislocations ;
- Réarrangement en parois de certaines dislocations (polygonisation).



- (a) : Début de recristallisation
(b) - (c) : Progression de la recristallisation
(d) : Structure finale recristallisée

Schéma de la recristallisation primaire

④

Figure6.11.Schéma de recristallisation primaire

g)Recuit de détente.

-Réduction ou élimination des contraintes résiduelles dues :

- À des refroidissements rapides de grosses pièces,
- À la trempe,
- À des opérations de soudage,

Les traitements thermiques des soudures

- À des opérations d'usinage,
- À des opérations de travail à froid.

-Traitement à une température inférieure à celle de la recristallisation ;

-Vitesses de chauffage et de refroidissement faibles pour ne pas introduire de nouvelles contraintes ;

-Contrairement à la recristallisation, pas de modification des propriétés mécaniques (maintien de la dureté liée à un écrouissage initial).

h). Recuit d'adoucissement.

Ce type de recuit consiste en un chauffage juste au-dessous d' A_{c1} , un maintien à cette température, suivi d'un refroidissement lent pour obtenir un état suffisamment adouci et aussi exempt de contraintes que possible.

Le recuit : résumé ;

Ensemble de traitements variés dont le but est de conduire à des états proches de l'équilibre tant au point de vue métallurgique que mécanique. Maintiens en température relativement longs et vitesses de refroidissement faibles, conduisant à des microstructures à base de ferrite et cémentite (ou carbures) ;

- Recuit d'homogénéisation : réduit ou élimine l'hétérogénéité chimique,
- Recuit de normalisation : état initial idéal avant austénitisation et trempe,
- Recuit complet : en vue de faciliter l'usinage ou la déformation à froid,
- Recuit de régénération : affine le grain,
- Recuit de recristallisation : sur produits écrouis,
- Recuit de détente : fait disparaître les contraintes résiduelles.

Cycles thermiques des différents recuits : (Figure6.12).

Les traitements thermiques des soudures

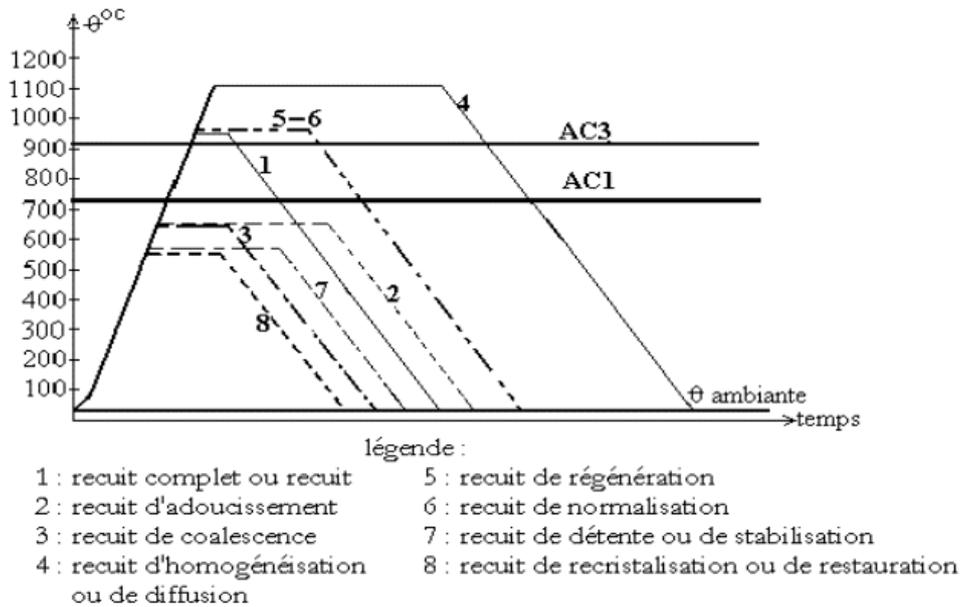


Figure6.12.Cycles thermiques des différents recuits

4.3.2. Traitement inter critique

On qualifie d'inter critique un traitement pratiqué à une température située entre les points A1 et A3 de l'acier considéré. D'après la diagramme fer- carbone, l'acier est constitué dans ce domaine de température, par une partie de la ferrite initiale, c'est à dire celle qui existait avant le traitement, et une austénite résultant de la transformation de l'agrégat lamellaire perlitique initial. Si on part d'un état hors d'équilibre, c'est aussi vers cette constitution que le traitement inter critique fait évoluer l'acier.

4.3.3. Trempe et revenu des ensembles soudés

Bien que son application soit relativement rare, le traitement de trempe et revenu de pièces soudées, qui intervient surtout en construction aéronautique ou mécanique, mérite d'être signalé ici en raison des particularités qu'il présente. Le but du traitement est d'effacer les effets du soudage et d'obtenir, par trempe et revenu, les qualités optimales des pièces soudées, tant dans le métal de base (qui peut être soudé à l'état initial recuit ou déjà trempé et revenu) que dans le métal fondu.

S'agissant d'un acier destiné à ce type de traitement, sa composition (carbone et élément d'alliage), est nécessairement celle d'un acier trempant ou même autotrempant, ce qui crée une première difficulté, au cours même du soudage, du point de vue de la fragilité engendrée par la trempe due au cycle thermique ainsi que de celui du risque de fissuration à froid, ces deux risques étant accentués par une teneur en carbone, nécessaire à l'obtention des caractéristiques élevées à l'état traité. En particulier, la fissuration à froid intervient même pour des teneurs en hydrogène très faible, telles que celle qu'on trouve dans le métal fondu en soudage TIG ou MIG avec fil nu.

Les traitements thermiques des soudures

D'autre part, dans la mesure où ces difficultés peuvent être résolues par les précautions indiquées à propos de la trempe et de la fissuration à froid, le succès du traitement requiert, au niveau du métal fondu, une " réponse" à ce traitement identique ou comparable à celle de métal de base, de telle sorte qu'il n'y ait pas de discontinuité au niveau du ou des joints. Il est évident que ce souci conduit à élever la teneur en carbone et en élément d'alliages dans le métal fondu à un niveau comparable à celui de métal de base, mais cette solution accentue les risques de fragilité et de fissuration déjà mentionnés. Il s'agit donc d'un problème difficile, qui requiert pour chaque cas une expérimentation préalable, comportant des essais directs sur joints soudés, ou bien des essais de comparaison de la trempabilité du métal de base et du métal fondu.

Chapitre 7.

Analyses de contraintes résiduelles de soudage dans des études précédentes.

1. Introduction.

Les aciers « dual-phase » sont employés dans la réalisation d'organes de liaison au sol (LAS) dans le domaine automobile du fait de leur haut niveau de résistance combiné à une ductilité élevée. Les tôles utilisées dans la réalisation des assemblages soudés de LAS peuvent être issues d'un procédé de laminage à froid suivi d'un traitement thermique dit inter critique. L'objectif de ce type de traitement est de réaliser une austénitisation partielle de l'acier dans le domaine biphasé austéno-ferritique ($\alpha + \gamma$) afin de contrôler finement la microstructure, puis de le tremper. Cette trempe a pour but de générer une microstructure complexe avec la présence d'une phase ferritique (α), d'une phase martensitique, issue de la transformation displacive de la phase austénitique (γ) sous chargement thermomécanique et éventuellement d'une phase austénitique résiduelle (γ), non transformée [35].

Le soudage MAG (Métal Active Gaz) est un procédé de soudage par fusion à l'arc sous protection gazeuse active via une électrode fusible composé du métal d'apport. Lors d'une passe de soudure, d'importants gradients thermiques sont générés. Ces flux thermiques sont assimilables à des traitements thermiques localisés qui vont engendrer des dilatations locales du matériau combiné à des transformations de phase du métal de base (MB), fonctions des vitesses de refroidissement. Les régions du MB ayant subi des évolutions métallurgiques sont appelées zones affectées thermiquement (ZAT). Lors du soudage, les pièces sont généralement bridées afin de limiter les distorsions. Des phénomènes d'auto bridages des pièces liées à leurs géométries peuvent également se produire pouvant générer des déformations plastiques locales. La combinaison de ces différents facteurs est à l'origine de déformations libres de contraintes, c'est-à-dire, des déformations générées au sein de la matière sans contrainte externe appliquée [36]. Des incompatibilités naissent de l'hétérogénéité de ces déformations et sont à l'origine des contraintes résiduelles. En effet, le champ de déformations libres de contraintes s'accompagne d'une accommodation élastique afin d'assurer la compatibilité de la déformation totale.

Ces contraintes, triaxiales et auto-équilibrées, sont généralement de compression au pied de cordon et de traction dans la zone fondue (ZF) dans le cas d'une soudure à clin sur ce type d'acier [37].

Lors de chargements thermomécaniques, les contraintes résiduelles influent sur les propriétés mécaniques des assemblages soudés. Les contraintes résiduelles de traction sont généralement considérées comme non bénéfiques pour la tenue en service de structures mécano soudées car elles

favorisent l'initiation et la propagation de fissures, à l'inverse des contraintes résiduelles de compression. La réalité est souvent bien plus complexe, le type de sollicitation mécanique et les propriétés locales ayant également des influences non négligeables sur la tenue en service.

Dans la littérature, la relaxation des contraintes résiduelles de soudage est attribuée à l'adaptation plastique des assemblages soudés [38] [39]. Dans le cas d'un chargement cyclique de traction, le phénomène de relaxation apparaîtrait lorsque la valeur de contrainte résultante de la somme des contraintes résiduelles et de la charge appliquée dépasse la limite d'élasticité locale du matériau (au moins une fois durant la sollicitation cyclique) introduisant de nouvelles incompatibilités modifiant ainsi le champ de contraintes. Au cours d'un chargement cyclique, les niveaux de contraintes évoluent donc jusqu'à se stabiliser à l'instant où la somme des contraintes résiduelles et de chargement passe sous le seuil de plasticité local, ce dernier pouvant évoluer suivant le taux d'érouissage subit. Dans plusieurs études menées par Farajian et *al*, le phénomène de relaxation est observable de manière marquée pendant les premiers cycles de chargements puis se stabilise [39] [40].

La diffraction des rayons X est une technique non-destructive qui peut notamment être employée pour le dosage de phase, la détermination de la texture et l'analyse des contraintes résiduelles de soudage.

L'intensité des pics de diffraction est proportionnelle au volume de la phase diffractante. Ainsi, le dosage de phase repose sur la comparaison des intensités diffractées par les phases présentes afin d'en déterminer leurs proportions [41].

La texture d'un matériau poly cristallin est définie par une orientation préférentielle des grains. Ce phénomène est issu des différents procédés de fabrication employés dans la mise en forme de la matière et génère une anisotropie du matériau. L'évaluation des intensités diffractées permet de déterminer d'éventuelles textures cristallines et cela pour différents plans $\{hkl\}$ donnés. La projection stéréographique de ces variations d'intensités diffractées permet de construire des figures de pôles caractérisant cette anisotropie [42]. L'analyse de contraintes résiduelles, généralement basée sur la mesure de déformation, nécessite la connaissance des constantes d'élasticité du matériau qui, s'il est texturé, passe par le calcul des fonctions de distribution des orientations [42].

L'analyse des contraintes résiduelles par diffraction des rayons X repose sur la mesure des variations de distances inter réticulaires de familles de plans cristallins données. Ces variations de distances sont obtenues à partir de la position des pics de diffraction par la loi de Bragg. Moyennant des hypothèses de surface libre de contrainte, les déformations associées peuvent être calculées par la méthode des $\sin^2 \Psi$ [2]. Il est alors possible de calculer les pseudo-macros contraintes présentes dans une phase en déterminant les constantes d'élasticité radio cristallographique [42].

Des éprouvettes ont été réalisées dans le cadre d'une étude réalisée chez PSA, portant sur la caractérisation en fatigue d'assemblages soudés soumis à des chargements à amplitude variable [9].

Celles-ci sont issues du soudage MAG à clin de plaques d'épaisseur 3,07 mm pour un jeu de paramètres donné (vitesse d'avance, angle de buse, courant, conditions de bridage, ...). Des éprouvettes, usinées dans des plaques, ont été sollicitées afin d'étudier le comportement en fatigue de ce type de joint soudé. L'objectif de ce travail est de réaliser une étude expérimentale sur la relaxation des contraintes résiduelles de soudage des joints soudés d'une de ces plaques sollicitées mécaniquement.

Expérimentations.

L'acier utilisé dans cette étude est un DP780 dont les caractéristiques mécaniques sont présentées dans le Tableau7. 1. La composition chimique de l'acier déterminée par spectrométrie d'émission optique est donnée dans le Tableau7. 2.

Tableau7.1.Caractéristiques mécaniques de l'acier DP780

| | | |
|-----------------------------|-----|---------|
| Module d'Young <i>E</i> | | 210 000 |
| Limite élastique <i>Re</i> | MPa | 380 |
| Contrainte ultime <i>Rm</i> | | 780 |

La microstructure du MB a été observée après polissage mécanique et attaque au Nital 2% avec un microscope optique LeitzAristo plan.

Parallèlement, des filiations de micro dureté Knoop ont été réalisées sur les tôles laminées à froid et ayant subi un traitement inter critique. Ces essais de micro dureté ont été menés sur les surfaces inférieure et supérieure d'une tôle à différentes profondeurs à l'aide d'un micro uromètre Qness Q10+. Les paramètres d'essais sont regroupés dans le Tableau7. 3. L'objectif de ce travail sur le MB est de pouvoir évaluer les effets des procédés employés dans la fabrication des tôles qui ont servi à la réalisation des éprouvettes de l'étude.

Tableau7.2.Composition chimique du MB

| | | | | | | | |
|------|------|------|------|------|------|------|------|
| C | Si | Mn | P | Ni | Cr | Nb | Al |
| 0,11 | 0,30 | 0,89 | 0,04 | 0,02 | 0,65 | 0,05 | 0,03 |

Des dosages de phase, des analyses de la texture ainsi que des analyses de contraintes ont été réalisés par diffraction des rayons X. Les paramètres utilisés pour ces analyses sont donnés Tableau7. 5. Les figures de pôles ont été réalisées sous le logiciel Labo Tex. L'analyse de contraintes a été effectuée en surface et leur évolution jusqu'à une profondeur de 1,5 mm a été observée. L'enlèvement de matière a été fait par polissage électrolytique à base de chlorure d'ammonium afin de ne pas introduire des contraintes durant l'enlèvement de matière.

Les microstructures de la ZAT et de la ZF d'une éprouvette brute de soudage, dont la géométrie est présentée Figure7. 1, ont été observées par microscope optique via la même méthode que pour le MB.

Des cartographies de micro dureté Vickers du MB, de la ZAT et de la ZF des éprouvettes non-sollicitée et sollicitée ont été réalisées avec le micro uromètre et seront mises en regard avec la microstructure héritée de l'opération de soudage. Les paramètres d'essai sont regroupés dans le Tableau7.3. L'objectif est d'identifier les différentes zones affectées par le soudage.

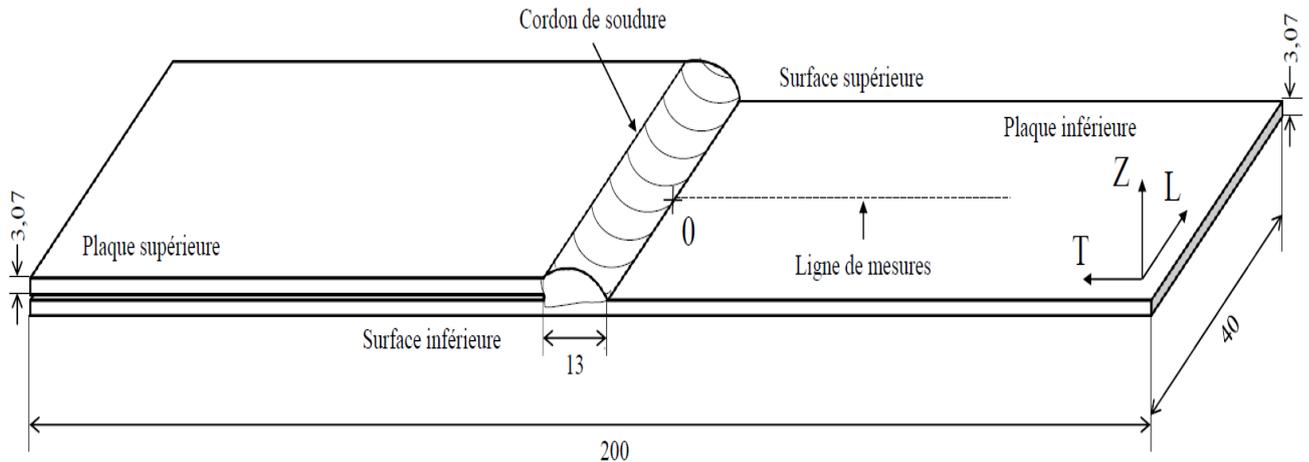


Figure7.1.Eprouvette soudée à clin

Tableau7.3.Paramètres des essais de micro dureté Knoop et Vickers

| Type d'essai | Symbole de dureté | Force d'essai (N) | Temps de maintien (s) | Distance centre empreintes (mm) |
|--------------|-------------------|-------------------|-----------------------|---------------------------------|
| Knoop | HK 0,05 | 0,4903 | 10 | 0,1 |
| Vickers | HV 0,1 | 0,9807 | 10 | 0,1 |

Un essai de fatigue polycyclique a été mené au cours de l'étude précédente sur un lot d'éprouvettes soudées à clin [56]. Une éprouvette de cette étude ayant subi un grand nombre de cycles a été étudiée afin d'évaluer l'influence de la sollicitation cyclique sur les propriétés du joint soudé. Les paramètres de sollicitation de cette éprouvette sont présentés Tableau 7.4.

Tableau7.4.Paramètres de l'essai de fatigue mené sur éprouvette soudée à clin

| | | |
|--|-----|----------|
| Rapport de charge | | 0,1 |
| Effort maximal appliqué | MPa | 228 |
| Fréquence | Hz | 10 |
| Nombre de cycle avant arrêt de l'essai | | 5.10^6 |

Ce jeu de paramètre a été choisi dans le cadre de l'étude menée chez PSA et n'a donc pas été sélectionné spécifiquement pour notre étude. Néanmoins, cet essai à grand nombre de cycles est une première approche permettant d'étudier le phénomène de relaxation des contraintes résiduelles de soudage.

Des analyses de contraintes résiduelles issues du soudage à clin des plaques ont été effectuées sur éprouvettes non-sollicitée et sollicitée. Elles ont été réalisées avec un diffractomètre Seifert C3000 et

un montage Ψ suivant les paramètres du Tableau 7.5. Ces analyses ont été conduites sur la tôle inférieure de l'assemblage suivant la ligne décrite en Figure 7. 1, le pied de cordon étant pris comme origine. Un polissage électrolytique à base de chlorure d'ammonium d'environ 40 μm a été effectué afin d'éliminer les effets de surface issus des procédés de fabrication employés dans la mise en forme des tôles.

Tableau 7.5. Paramètres des analyses de texture et de contraintes

| | |
|--|--|
| Tension/Intensité | 40kV/30mA |
| Anode | Chrome $K\alpha_1 = 0,22897$; $K\alpha_2 = 0,22937$ |
| Filtre $K\beta$ | Vanadium |
| Famille de plans | {211} de la ferrite |
| Surface analysée | $\approx 4 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ |
| Constantes d'élasticité radiocristallographique ¹ | $S_1 = -1,2773 \times 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$; $\frac{1}{2} S_2 = 5,8320 \times 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$ |

2. Résultats.

2.1. Matériau de base

La microstructure du métal de base est présentée Figure 7. 2. Des îlots de martensite sont disséminés au sein de la matrice ferritique. Les grains sont de forme allongée et orientés dans le sens du laminage. Une concentration de martensite est observable au centre des tôles sous forme de bandes, orientées dans le sens de laminage en Figure 7. 2 (b). Ce phénomène est fréquent lors du laminage des aciers dual-phase [43].

Les évolutions de micro dureté Knoop dans la profondeur d'une tôle de MB sont représentées Figure 7.3. Ces essais montrent que les micro duretés moyennes sont plus faibles en surface de tôle qu'en profondeur, jusqu'à environ 30 μm où la dureté se stabilise. Cet effet de peau est vraisemblablement dû aux procédés de fabrications employés dans la mise en forme des tôles (décarburation éventuelle à vérifier par spectrométrie SDL) et il en sera tenu compte dans les analyses de contraintes sur tôles soudées.

Le dosage de phase par diffractométrie des rayons X a révélé un taux d'austénite résiduelle inférieur à 2%. Ce taux peut atteindre jusqu'à 10% pour les aciers dual-phase commerciaux [44].

Les figures de pôles {110}, {200} et {211} de la pseudo-phase ferritique / martensitique ($\alpha + \alpha'$) du MB, sont présentées Figure 7.8 (a). Ces analyses ont été conduites à environ 50 μm de la surface de tôle. Elles révèlent une légère texturation dans le sens du laminage avec des indices de texture allant de 0,6 jusqu'à 1,4. Ces faibles taux ont permis de considérer le matériau comme isotrope dans l'analyse des contraintes par diffraction des rayons X. Ceci a été confirmé par un rapport des intensités de pics de diffraction toujours inférieur à 3 conformément à la norme [45].

L'analyse des contraintes résiduelles conduite sur le MB révèle un gradient dans l'épaisseur de la tôle. L'allure du profil est présentée (Figure7. 4). Les contraintes suivant le sens du laminage, notées σ_{RT} , sont de traction et augmentent en fonction de la profondeur. Dans le sens transverse au laminage, les contraintes résiduelles, notées σ_{RL} , sont majoritairement de compression en bord de tôle et de traction au centre.

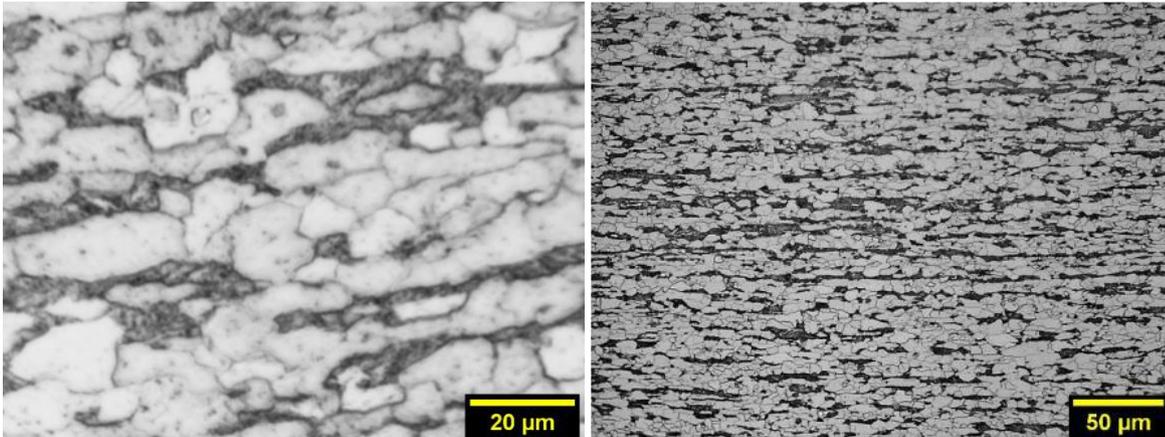


Figure7.2. Microstructure du MB.

(a) microstructure ferrito-martensitique - (b) concentration de martensite au centre de la tôle

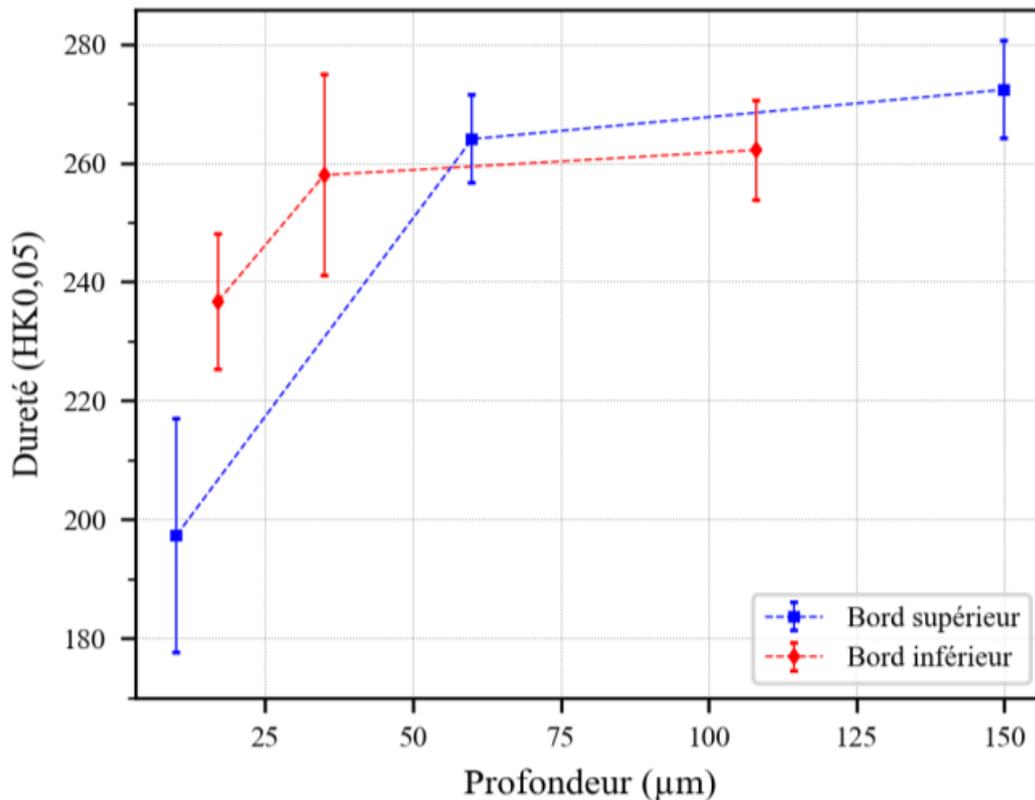


Figure7.3.Evolution des micro duretés Knoop dans l'épaisseur du MB

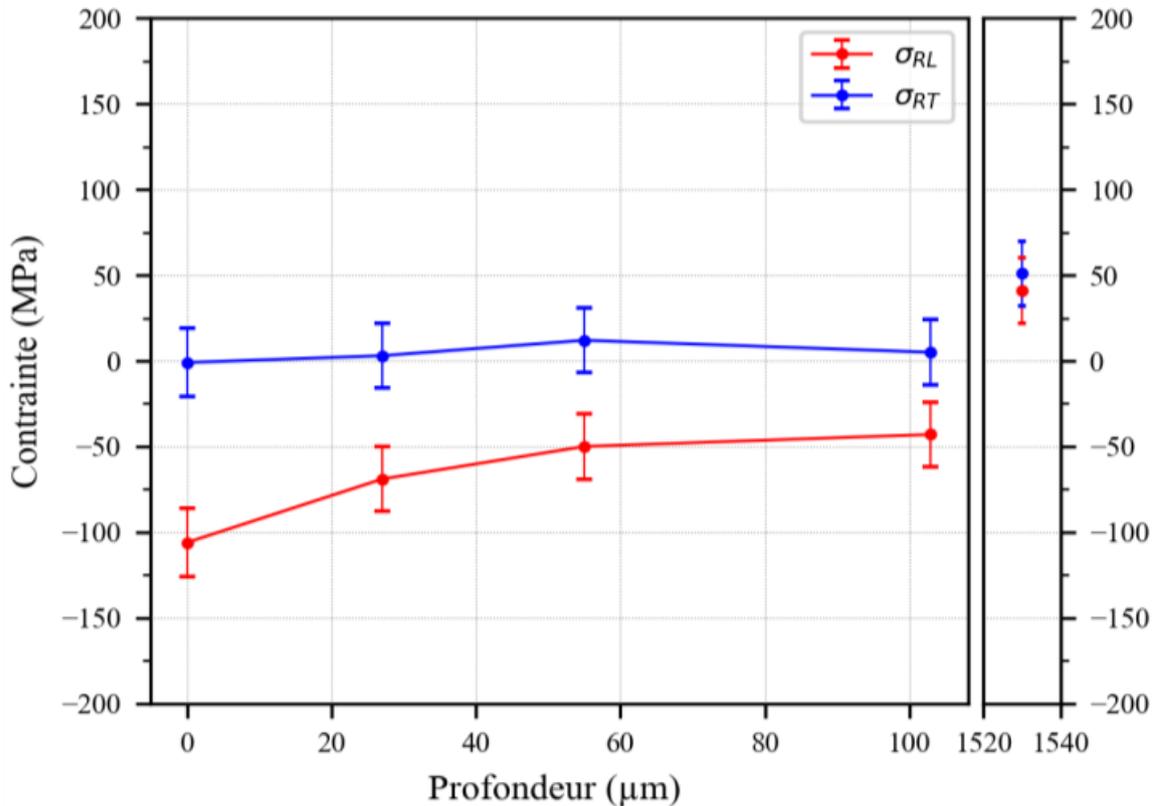


Figure 7.4. Evolutions des contraintes résiduelles dans l'épaisseur d'une tôle de MB

2.2. Etude des effets métallurgiques et mécaniques du soudage MAG à clin des éprouvettes

Les éprouvettes, issues du soudage à clin de tôles laminées, ont été observées par microscope optique. Les résultats révèlent des évolutions de microstructure au sein du MB jusqu'à la ZF, constituée de métal d'apport et présentant une microstructure bien différente de celle des ZAT et MB. La Figure 7.5 est une vue macroscopique de l'échantillon observé. Des micrographies ont été effectuées à différentes zones de la ZAT, marqués par les lettres A, B, C et D.

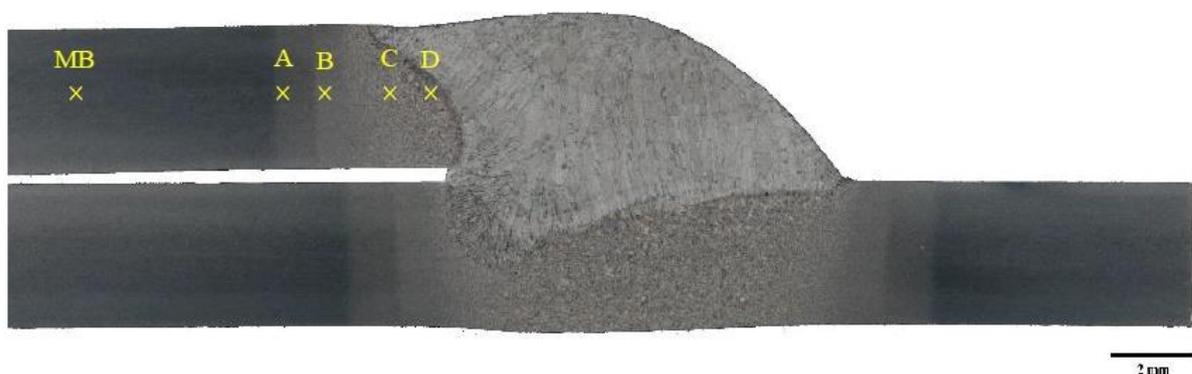


Figure 7.5. Vue macroscopique de la soudure à clin après attaque au Nital 2%

La micrographie A de la Figure 7.6 montre une matrice ferritique semblable à celle du MB. Cependant, les îlots de martensite, initialement présents dans le MB, ont évolués en îlots de martensite revenue. La part de ferrite est ici plus élevée que dans le MB. La micrographie B est dans la continuité de la micrographie A avec une proportion de martensite revenue moins élevée. Les micrographies C et D

montrent quant à elles des microstructures composées principalement d'une phase bainitique et d'une phase ferritique. L'obtention de ce type de composés s'explique par des températures élevées suivies par des vitesses de refroidissement plus ou moins élevées lors de la passe de soudage

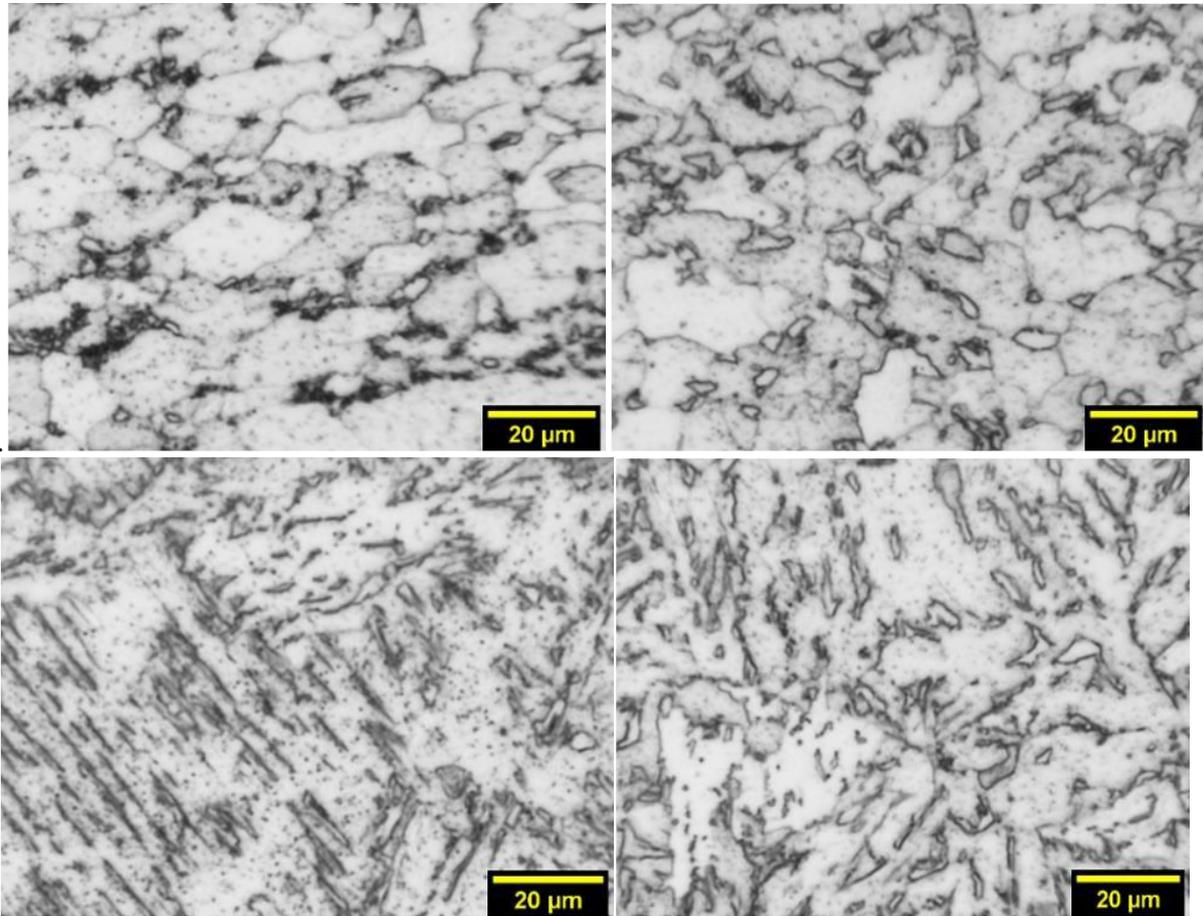


Figure 7.6. Microstructures des ZAT aux points A, B, C et D

Les cartographies de micro dureté Vickers sont présentées (Figure 7.7). La dureté moyenne relevée dans le MB est de 225 ± 8 HV_{0,1}. Un adoucissement est observable dans les ZAT lointaines des plaques inférieure et supérieure correspondant à une dureté moyenne de 189 ± 4 HV_{0,1} sur l'éprouvette brute de soudage (a) et sollicitée (b). Cette observation peut être mise en parallèle avec la micrographie A de la Figure 7.4, où l'on observe une détérioration de la phase martensitique qui, dans le MB, contribue à ses caractéristiques de dureté. Les micro duretés les plus élevées se localisent à proximité de la ligne de fusion (LF) qui sépare le MB de la ZF. Cette zone de micro duretés élevées est plus étendue sur la plaque inférieure de l'assemblage. Les micro duretés moyennes dans ces zones sont de 239 ± 9 HV_{0,1} pour l'éprouvette (a) et de 259 ± 8 HV_{0,1} pour l'éprouvette sollicitée (b).

Cette augmentation de la micro dureté est vraisemblablement due à la diminution de la proportion de phase ferritique au profit d'une phase bainitique dont la dureté est généralement plus élevée [46]. Les niveaux de micro dureté dans la ZF de l'éprouvette sollicitée sont en moyenne de 242 ± 7 HV_{0,1} contre 229 ± 8 HV_{0,1} dans la ZF de l'éprouvette brute de soudage.

A 5,5 mm du cordon, hors de la ZAT, les taux d'austénite résiduelle déterminés au sein des éprouvettes bruts de soudage et sollicitée sont inférieurs à 1%, de l'ordre du taux déterminé dans le MB (Figure 7.8 (b)). Elles révèlent une orientation préférentielle des plans {110} dans la direction de laminage avec un indice de texture maximum de 8,7.

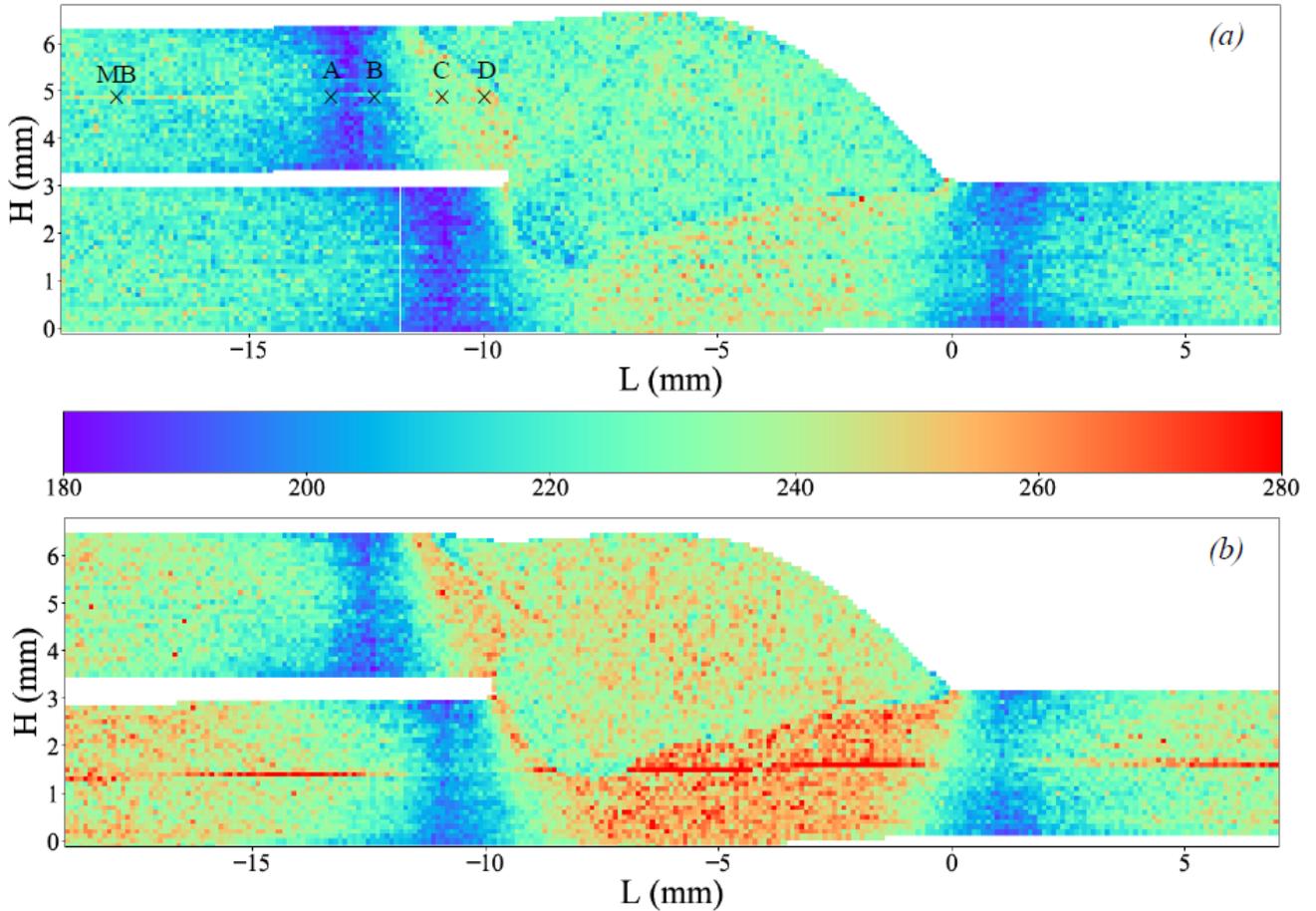


Figure 7.7. Cartographies des microduretés Vickers d'éprouvettes soudées à clin non-sollicitée (a) et sollicitée (b)

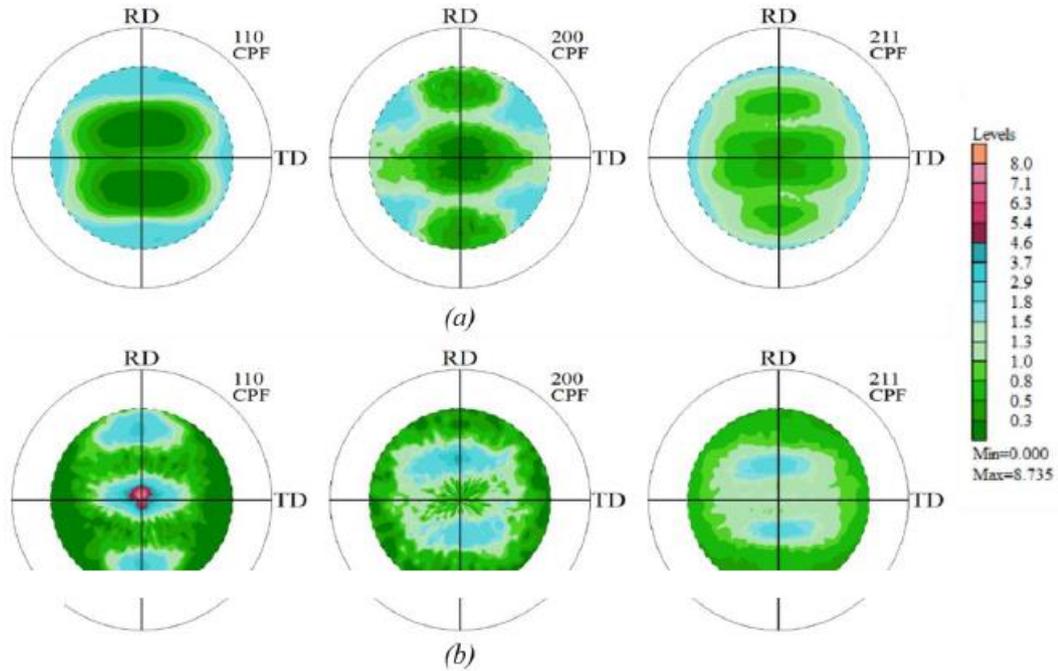


Figure 7.8. Figures de pôles $\{110\}$, $\{200\}$, $\{211\}$ (a) MB à 55 μm de profondeur - (b) éprouvette brute de soudage à 5,5 mm du pied de cordon et 41 μm de profondeur

2.3. Analyses de contraintes résiduelles de soudage sur éprouvettes soudées à clin non-sollicitée et sollicitée

Les profils de contraintes résiduelles de soudage des éprouvettes non-sollicitée et sollicitée sont présentés Figure 7.9 (longitudinal au cordon) et Figure 7.10 (transverse au cordon).

Les profils de contraintes résiduelles longitudinales et transverses au cordon des deux éprouvettes sont caractéristiques des assemblages soudés avec des variations très importantes dans la ZAT proche du cordon. On distingue une zone de compression en pied de cordon et une zone de contraintes résiduelles de traction dans la ZAT lointaine avant de rejoindre progressivement le niveau de contraintes du MB.

Aux points d'analyses compris entre 1,5 mm et 5,5 mm de distance par rapport au pied de cordon, les niveaux de contraintes résiduelles de soudage longitudinales de traction ou de compression sont moins élevés dans l'éprouvette sollicitée que dans l'éprouvette brute de soudage. Ce phénomène est également observable à 20 mm du pied. De même, dans le sens de la sollicitation cyclique, les contraintes résiduelles observées sur l'éprouvette sollicitée semblent inférieures aux contraintes résiduelles de l'éprouvette brute de soudage.

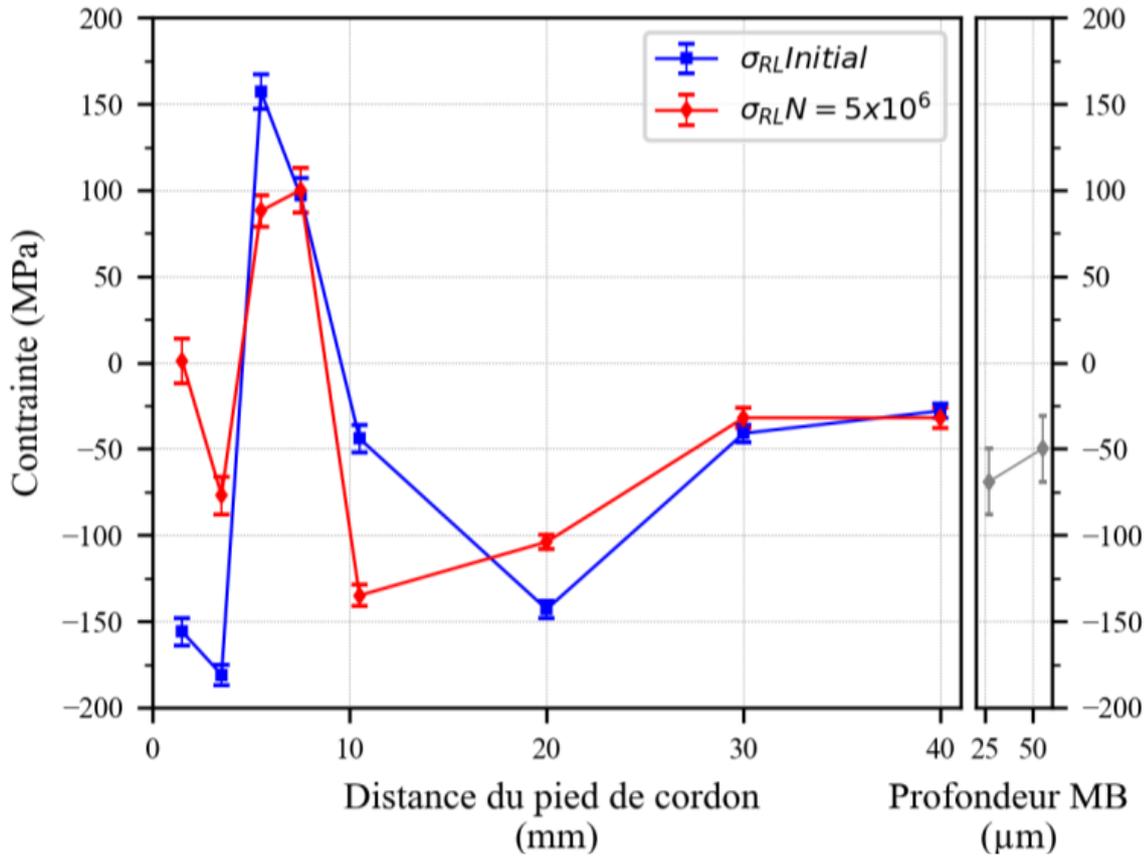


Figure 7.9. Evolution des contraintes résiduelles longitudinales de soudage sur éprouvettes non-sollicitée (initial) et sollicitée ($N = 5 \times 10^6$)

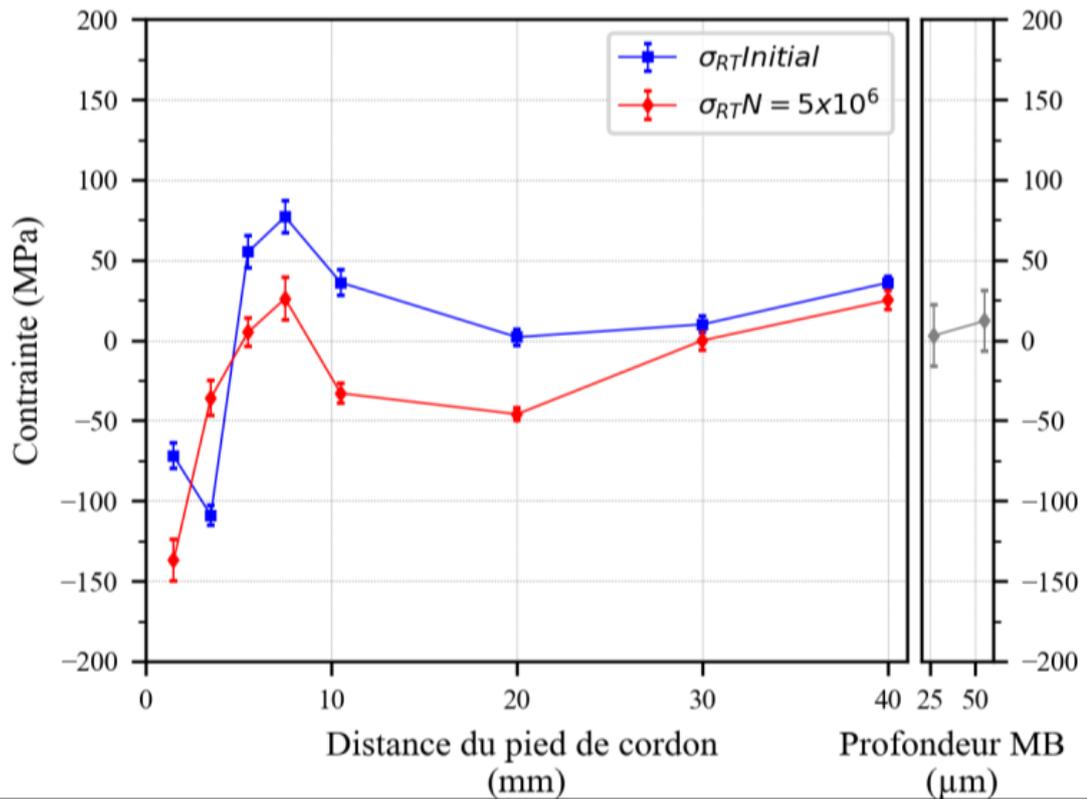


Figure 7.10. Evolution des contraintes résiduelles transverses de soudage sur éprouvettes non-sollicitée (initial) et sollicitée ($N = 5 \times 10^6$)

3. Discussion

Les études menées sur le MB ont permis de caractériser l'état initial de la matière avant l'assemblage à clin des tôles. Dans un premier temps, les résultats de micro dureté Knoop ont révélés des effets de peau jusqu'à une profondeur d'environ 30 μm dans l'épaisseur de tôle avec des niveaux de micro dureté moins élevés qu'en profondeur. Ces résultats sont concordant avec l'observation au microscope optique présentée (Figure7.11) qui montre que la phase martensitique est en proportion moindre en surface que pour des profondeurs supérieures à 30 μm . Ceci est très certainement dû à une légère décarburation superficielle de la tôle lors de son élaboration qu'il faudra confirmer par analyse SDL. La (Figure7. 11) présente l'évolution de la proportion de phase martensitique dans la profondeur de tôle. Elle est de l'ordre de 25% pour une profondeur inférieure à 30 μm . Au-delà, ce taux passe à environ 32%. Cette observation permet d'expliquer l'évolution de micro dureté, la phase martensitique contribuant à augmenter la dureté de l'acier.

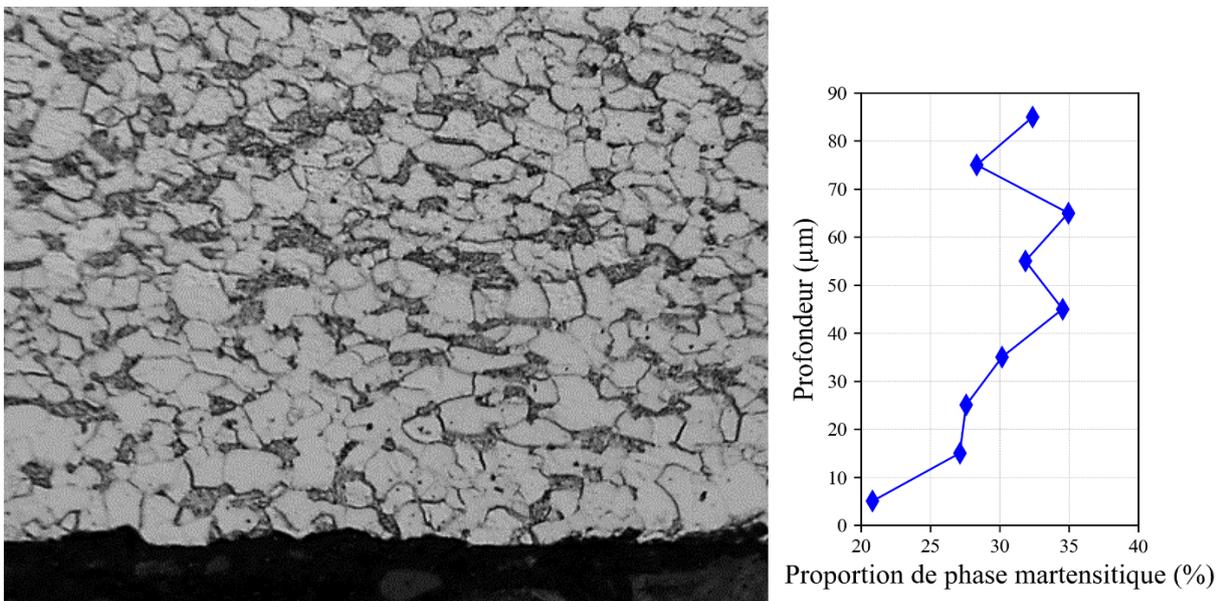


Figure7.11.Micrographie optique de la tôle et évolution de la proportion de phase martensitique dans la profondeur de tôle

L'analyse de la texture du MB a montré que le matériau était légèrement texturé comme le montrent les figures de pôles en Figure7. 8. Les constantes d'élasticité radio cristallographiques ont été calculées à partir des constantes d'élasticité du monocristal, de la FDO issue des figures de pôles déterminées à 55 μm , d'un calcul d'homogénéisation utilisant une approche de type Kröner-Eshelby et d'un pseudo matériau avec une symétrie orthotrope conforme à celle d'une tôle laminée [47]. Le calcul montre que le matériau est quasiment isotrope, l'analyse des contraintes résiduelles a donc été menée en considérant le MB isotrope. La Figure7. 4 montre que l'état de contraintes dans la tôle laminée n'est pas nul. En effet, on observe un effet de peau jusque 100 μm . Un équilibrage mécanique a lieu entre les contraintes de compression dans le sens de laminage et les contraintes de traction dans le sens transverse. A cœur, les contraintes sont de traction. Ce type de profil de contraintes résiduelles est

typique des aciers de cette famille d'aciers HSLA (High StrengthLowAlloy) laminés, il a été par exemple observé sur un acier faiblement allié à haute résistance [48].

Les cartographies de micro dureté Vickers réalisées sur les éprouvettes soudées à clin, brute de soudage et sollicitée, permettent d'identifier clairement la ZF, les ZAT et le MB. Les valeurs de micro dureté les plus élevées sont localisées en proche de la ligne de fusion (LF) et un adoucissement est observable dans les ZAT les plus éloignées de la ZF. Ces observations peuvent être mises en parallèle des microstructures observées au microscope optique et présentées Figure7.6.

Les micro duretés dans la ZF sont hétérogènes. Les niveaux les moins élevés sont situés le long de la LF. La solidification du métal d'apport, différent du MB, se fait alors selon une direction préférentielle engendrant une forte texture du matériau dans le cordon [49]. Les phases obtenues dans les ZAT de l'assemblage sont fonctions des cinétiques de refroidissement suivies. Dans le cadre de l'étude, nous n'avons pas accès aux valeurs de ces vitesses de refroidissement car il n'y a pas eu de relevés de températures par thermocouple lors du soudage des tôles. Cependant, il est possible, via le diagramme TRC, de retracer le chemin thermique éventuel suivi par la matière et ainsi comprendre l'obtention des différentes phases observées. La Figure7.12 présente le diagramme de transformation en refroidissement continu (TRC) [50].

L'observation des ZAT et le diagramme TRC permettent ainsi de retracer l'histoire thermique du MB lors du soudage.

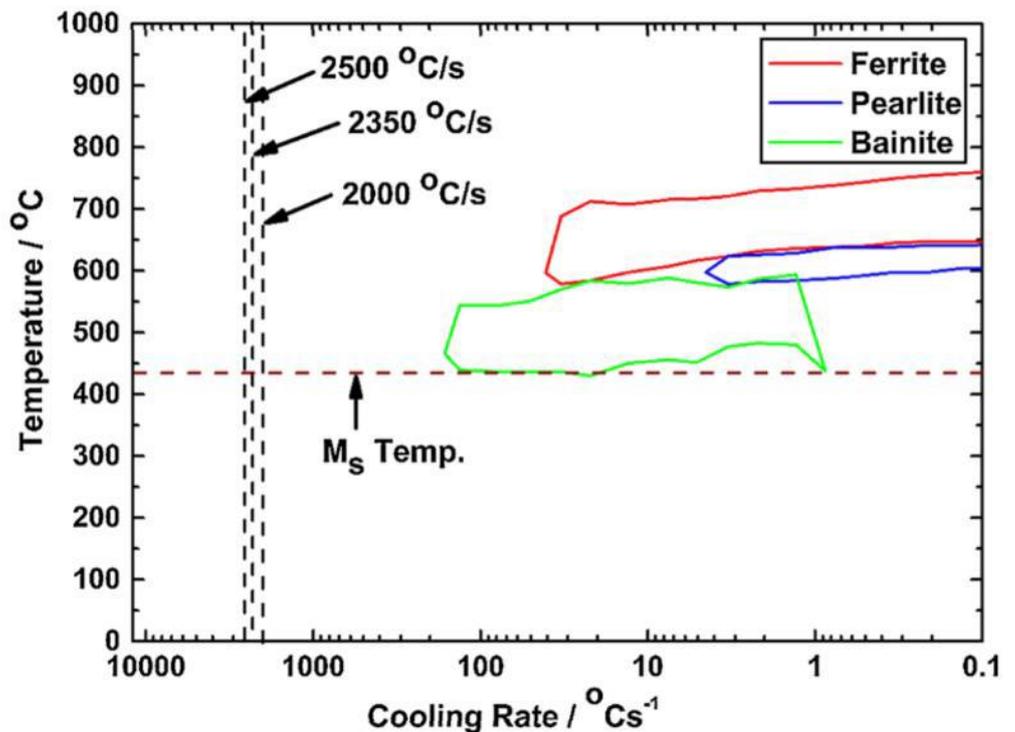


Figure7.12. Diagramme TRC de l'acier DP780 [17]

Au point D, au proche de la LF, les températures atteintes sont supérieures à A_{c3} , le matériau subit alors une austénitisation. Les vitesses de refroidissement mises en jeu sont élevées, jusqu'à environ $40\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$, et suivent une courbe qui passerait par le domaine bainitique menant à la formation d'un mélange ferrito-bainitique comme observé sur la micrographie D de la Figure 7.6. Les tailles de grains dans cette zone sont élevées. Au point C, les températures atteintes sont également supérieures à A_{c3} . Néanmoins, les vitesses de refroidissement sont moindres qu'au point D, la LF étant plus distante. Une plus grande part de l'austénite générée lors de la montée en température est transformée en ferrite, abaissant ainsi le niveau de dureté dans la zone.

Les ZAT lointaines, aux points A et B, sont des zones où les températures atteintes sont inférieures à A_{c1} combinées à des vitesses de refroidissement lentes de l'ordre de $5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$. Cela génère un revenu de la martensite engendrant un abaissement des niveaux de micro dureté. A cause de l'historique thermomécanique des différentes ZAT, les tailles de grain varient fortement suivant leur proximité avec la LF. Ainsi, à distribution de phases proches, la limite d'élasticité locale du MB peut être diminuée dans les zones ayant subi un grossissement du grain (loi de Hall-Petch).

Les dilatations du MB générées à proximité de la source de chaleur peuvent être limitées par les zones subissant une variation de température moindre (effet d'auto bridage) ou par le bridage des tôles en supposant des déformations plastiques associées. La combinaison de ces phénomènes contribue à la génération de contraintes résiduelles dans les éprouvettes de l'étude [51] [52].

Des déformations viscoplastiques génèrent des contraintes résiduelles de compression au pied de cordon qui atteignent $-181\pm 6\text{ MPa}$ dans le sens longitudinal et $-109\pm 6\text{ MPa}$ dans le sens transverse, à 3,5 mm du pied de cordon (Figure 7.9 et Figure 7.10). Pour rappel, l'observation des microstructures a montré que la ZAT, à l'endroit où les analyses de contraintes ont été menées, présentait des évolutions de microstructures sur environ 2,3 mm. Au refroidissement, le retrait empêché du MB par le bridage des tôles engendre des contraintes résiduelles de traction dans les sens longitudinal et transversal au cordon, atteignant respectivement $157\pm 10\text{ MPa}$ et $97\pm 10\text{ MPa}$, à 5,5 mm et 7,5 mm du pied de cordon. A 30 mm du pied de cordon, les niveaux de contraintes sont équivalents à ceux déterminés dans l'étude du MB. L'équilibrage mécanique des contraintes résiduelles explique les évolutions observées au-delà de la zone déformée plastiquement. Kong et al montrent des profils de contraintes résiduelles similaires pour une soudure bout à bout et un procédé de soudage différent [53]. J. Lin et al montrent, pour un soudage à clin de tôles en acier TS590 plus épaisses, des profils de contraintes résiduelles transverses au cordon exclusivement en compression [37]. Ces différences s'expliquent par les différences de géométries d'éprouvettes et de cordon mis en jeu ainsi que des procédés de soudage employés.

La Figure 7.13 décrit l'évolution des largeurs intégrales des pics de diffraction dans la phase ferritique au pied de cordon. Ce paramètre peut décrire, dans le cas de matériau quasiment monophasé sans transformation de phases, une évolution microstructurale liée à des déformations plastiques (augmentation de la densité de dislocation par exemple) [36].

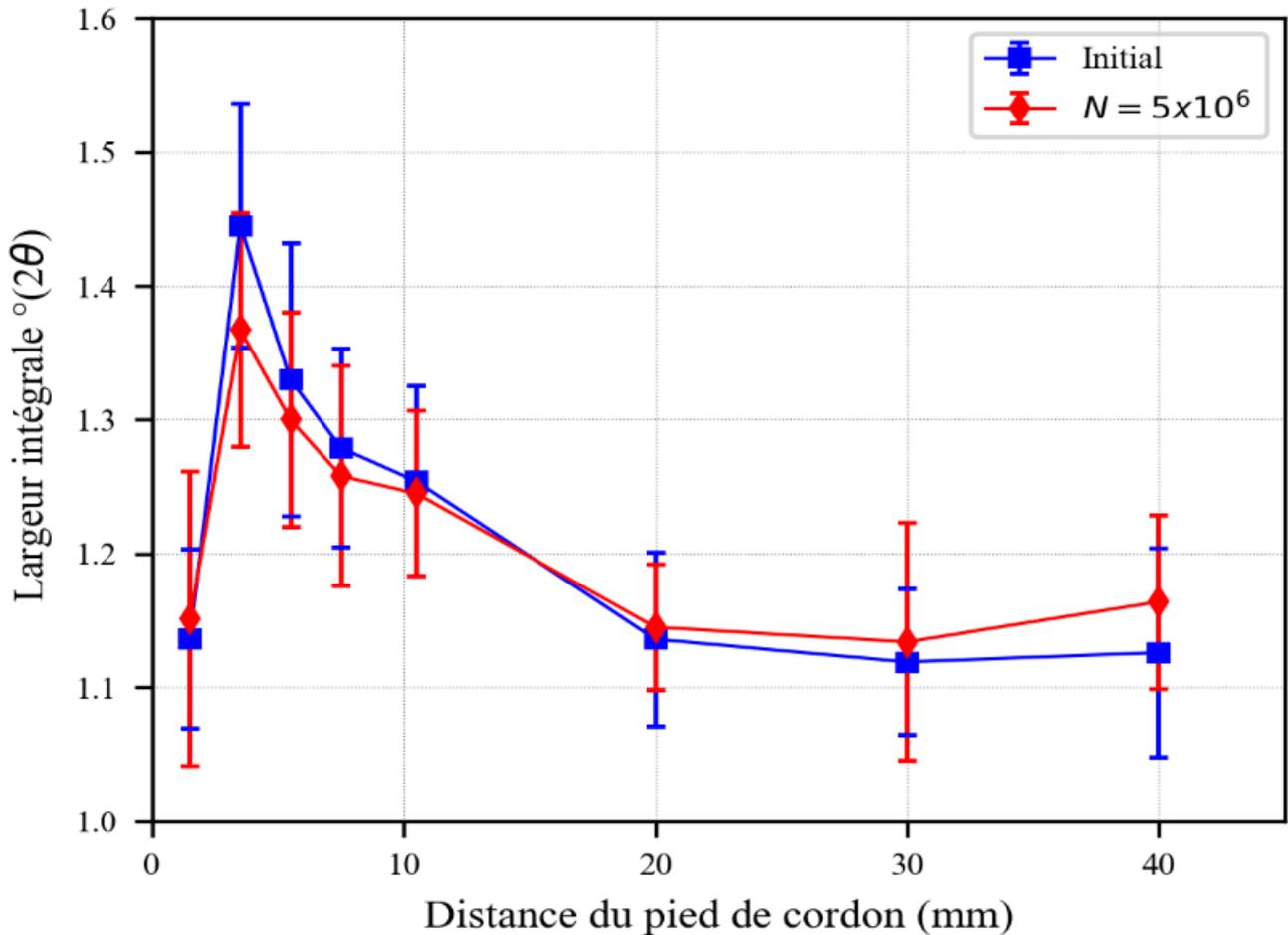


Figure 7.13. Largeurs intégrales à mi-hauteur des pics de diffraction dans la phase ferritique

Dans le cas de l'éprouvette non-sollicitée, les pics de diffraction sont plus larges de 3,5 à 10 mm du cordon : la largeur est de 1,1° à 1,5 mm du pied contre 1,4° 2 mm plus loin. Au-delà de 10 mm, les pics s'affinent et tendent vers une valeur proche de 1,1°. Lors du soudage, des cales de bridage ont été placées à 15 mm du cordon. L'augmentation des largeurs de pics peut alors être reliée à une plastification du MB dans la zone entre le cordon et le bridage. Dans cette zone, les niveaux de contraintes résiduelles sont relativement importants (traction ou compression) et sont à rapprocher des contraintes appliquées et d'une éventuelle plastification locale du matériau lors de sollicitations.

Les analyses de contraintes menées sur l'éprouvette ayant subi un essai de fatigue polycyclique pour une contrainte appliquée maximale de 228 MPa sont présentées Figure 7.9 et Figure 7.10. Une légère évolution des profils est observable. Néanmoins, ces résultats ne permettent pas de mettre en évidence la relaxation sous chargement cyclique compte tenu des écarts types sur les valeurs expérimentales. En effet, l'état initial des éprouvettes, non-sollicitée et sollicitée, est une donnée essentielle pour l'étude

du phénomène de relaxation. Dans le cadre de notre étude, nous ne connaissons pas les niveaux de contraintes initiaux au sein de l'éprouvette sollicitée. Les deux éprouvettes de l'étude ont été réalisées dans les mêmes conditions et avec le même jeu de paramètres de soudage. Néanmoins, il existe des variations inhérentes aux procédés ou aux matériaux employés qui peuvent engendrer des dispersions sur les caractéristiques finales de la pièce. Les cartographies de micro dureté présentées Figure 7.7 mettent cela en évidence. Les niveaux de micro dureté de l'éprouvette sollicitée sont plus élevés que ceux de l'éprouvette brute de soudage, et plus particulièrement dans la ZF où pourtant le métal d'apport est déposé selon les mêmes paramètres de soudage. Une augmentation de la micro dureté pourrait aussi être due à un éventuel écrouissage local de la zone voisine du pied de cordon, cela ne suffisant toutefois pas à expliquer les différences importantes observées entre les deux éprouvettes.

Au-delà de 30 mm, aucune évolution de contrainte résiduelle entre les deux états n'est observable.

Dans la littérature, le phénomène de relaxation des contraintes résiduelles de soudage est observé dans le sens du chargement et a lieu majoritairement lors des premiers cycles de sollicitation [40] [54] [55]. Le mécanisme de relaxation est décrit comme une plastification locale due à une superposition des contraintes appliquées et des contraintes résiduelles [39].

La relaxation des contraintes résiduelles de soudage lors de sollicitations mécaniques cycliques ne sont pas toujours importantes, comme le montre ce résultat partiel. Une analyse plus complète permettra de faire la relation entre les évolutions microstructurales observées et l'amplitude des relaxations observées tout en essayant de proposer une modélisation pertinente et prédictive .

4. Conclusion et perspective.

Dans cette étude, différentes analyses expérimentales ont été menées afin d'étudier le phénomène de relaxation des contraintes résiduelles d'un assemblage soudé à clin. Les conclusions sont les suivantes :

- lors du soudage MAG à clin de tôles d'acier DP780, des évolutions métallurgiques et mécaniques ont lieu dans les différentes ZAT de l'assemblage et sont fonctions des géométries mises en jeu ainsi que des paramètres technologiques du procédé de soudage ;
- les gradients des contraintes résiduelles sont très sensibles aux gradients de microstructure et aux incompatibilités de déformation générées par le procédé. Leur analyse demande des précautions importantes, une connaissance approfondie du matériau (texture éventuelle, propriétés mécaniques...) et des conditions expérimentales bien définies (taille du volume sonde / gradients analysé, ...)
- il est nécessaire d'adopter une stratégie expérimentale basée sur des essais de fatigue interrompue afin de suivre les évolutions des contraintes résiduelles (même point d'analyse avec les mêmes paramètres d'analyse). La caractérisation devra être faite sur des éprouvettes représentatives, dans leur état initial à l'issue du soudage et dans les mêmes conditions après des sollicitations cycliques ;
- l'objectif final est de pouvoir identifier clairement les mécanismes de relaxation des contraintes résiduelles de soudage, d'en tirer un modèle et de l'intégrer à des calculs de tenue en fatigue d'assemblages soudés de liaison au sol automobile.

Référence :

- [1] : Technologie de construction mécanique. Tome1 M.NORBERT -R. PHILIPPE
- [2] : Evaluation expérimentale et numérique des contraintes résiduelles dans des structures Soudées en multi passe. Alix BONAVENTURE
- [3] : Les essais destructifs sur assemblages soudés. By Julien Tomas TM *Publié le 30 septembre 2019*
- [4] : C. LEYMONIE, R. BOUVEROT. Contribution à l'étude des traitements thermiques après soudage d'aciers faiblement alliés. Soudage et techniques connexes N°1/2 1970
- [5] : Thèse : zaoui moussa- influence des traitements thermiques sur la rupture fragile des constructions soudees, cas des soudures epaisses.
- [6]: NITSCHKE-PAGEL, T. and H. WOHLFAHRT. *Residual stresses in welded joints-sources and consequences*. 2002. Coimbra, Portugal : Trans Tech Publications
- [7] : Etude de la soudabilité et du comportement mécanique des alliages de titane.
Mémoire de Magister : Présenté par : HADJI IDIR.
- [8] : TIMET Savoie, *Guide de conception et de réalisation d'équipements en Titane*, 1996
- [9] : HUGUES (D.S.) et KELLY (J.L.). *Second-order elastic deformation of solid*, Physical Review, vol. 92, no 5, p. 1145 à 1149 (1953).
- [10] H.GRANJON. Bases métallurgiques de soudage, publications de soudage et de ses applications 1995.
- [11] A.COMPA, Technologie professionnelle générale pour les mécaniciens, FOCHER 1971.
- [12] B.CHASSIGNOLE, Influence de la structure métallographique des soudures en acier inoxydable sur le contrôle non destructif par ultrasons, thèse de doctorat, INSA, Lyon. Décembre 2000
- [13] (Document SAF) Installation de soudage MIG/MAG à technologie onduleur (Document SAF)
- [14] J.LIGNON , R.MAILLEBUAU, Métaux ferreux, Fascicule 9,DELAGRAVE
- [15] L.LAICHE, Etude mécanique et métallurgique dans les joints de soudure sur le monobloc des pelles 9210 et 9211, thèse de magister, Université de BATNA, Juillet 1998
- [16] C.CHAUSSIN, Manuel pratique des aciers et de leurs traitements thermiques Dunod 1981
- [17] I.LAKHTINE, Métallographie et traitements thermiques des métaux edition MIR 1978)
- [18]: CORINNE CHARLES, *Finite Element Modelling of Microstructure on GTAW Metal Deposition of Ti-6Al-4V*
- [19]: K. C. YUNG, B. RALPH, *an investigation into welding parameters affecting the tensile properties of titanium welds*, Journal of Materials Processing technology 63(1997), p.759-764.
- [20]: L.J. BARTLO, Titanium alloys, Lesson 7: *Metallography of titanium alloys*, Metals Engineering Institute, American Society for Metals, Ed. H.D. KESSLER, 1968.
- [21] : Y. COMBRES, *Métallurgie et recyclage du titane et de ses alliages*, Techniques de l'Ingénieur, ME3 M2355, 06/1997.

- [22]: M. FUJITA, Y. KAWABE, Mechanical properties of electron beam welded joints in solution treated and aged TA6V alloys, *Journal of Iron and Steel Institute*, Japan, pp.678-684, 1986
- [23]: J. H. DEVLATION, W. E. WOOD, *Principles of joining Metallurgy*, Metals Handbook Ninth Edition, vol. 6 (1983), p.21-49.
- [24] : J. HOBLOS, *Evaluation des contraintes résiduelles par méthode ultrasonore avec prise en compte des effets de la microstructure : application au cas de soudage*, Thèse de doctorat, Université de Lille 1, France (2004)
- [25]: NIKHIL KAROGAL et MARY JUHASPOU: *Study of Deformation Mechanisms and Residual Stresses in Titanium Alloy Welds the Ohio State University*
- [26] : H. GRANJON. Bases métallurgiques de soudage, publications de soudage et de ses applications 1995.
- [27] : C. BOUHELIER, Traitements thermiques des constructions chaudronnées
Note technique de CETIM N°21, Décembre 1981
- [28] : [29] : B. CHASSIGNOLE, Influence de la structure métallographique des soudures en acier inoxydable sur le contrôle non destructif par ultrasons, thèse de doctorat, INSA, Lyon.
Décembre 2000.
- [29] : C. Bouhelier, J. Lu, Mesures de contraintes résiduelles dans les soudures, Méthodes disponibles, exemples d'applications, CETIM (Ed.), Les contraintes résiduelles dans les constructions soudées, Senlis, France, 1987, pp. 23–43
- [30] : M. Farajian, T.N. Nitschke-Pagel, K. Dilger, Relaxation of Welding residual stresses - Part II: Under cyclic loading, *International Journal of Microstructure and Materials Properties*. 7, (2012) 16-26
- [31] : C. CHAUSSIN, Manuel pratique des aciers et de leurs traitements thermiques Dunod 1981
- [32] : [34] : H. Granjon, "Bases métallurgiques de soudage", publications de soudage et de ses applications 1995.
- [33]: Z. Qian, S. Chumbley, T. Karakulak, E. Johnson, The residual stress relaxation behavior of weldments during cyclic loading, *Metallurgical and Materials Transactions A.*, vol. 44, (2013) 3147-3156
- [34]: S.J. Maddox, Chapter 2 - Significant features of welds in relation to fatigue, *Fatigue Strength of Welded Structures (Second Edition)*, Woodhead Publishing, 2002, 19-29
- [35]: M. Farajian, D. Siegele, Chapter: Welding: Residual Stresses, *Encyclopedia of Iron, Steel, and Their Alloys*, Taylor & Francis, 2015

