

Université Mohamed Khider – Biskra

Faculté des Sciences et de la technologie

Département : Génie Mécanique.....

Ref :.....



جامعة محمد خيضر بسكرة  
كلية العلوم و التكنولوجيا  
قسم: الهندسة الميكانيكية  
المرجع:.....

Thèse présentée en vue de l'obtention  
Du diplôme de  
**Doctorat en sciences en : Génie Mécanique**  
**Spécialité : Métallurgie**  
**Option : Matériaux et Matériaux Métalliques**

**L'effet du soudage par induction sur les aciers**

Présentée par :

**Lakhdar LAKHDARI**

Soutenue publiquement le 10/01/2019

**Devant le jury composé de :**

|                           |            |            |                         |
|---------------------------|------------|------------|-------------------------|
| Pr. Amrane Mohamed Nadhir | Professeur | Président  | U.Mohamed Khider-Biskra |
| Pr. Boumerzoug Zakaria    | Professeur | Rapporteur | U.Mohamed Khider-Biskra |
| Pr. Rouabah Farid         | Professeur | Examineur  | Université de Sétif     |
| Pr. Benatiallah Ali       | Professeur | Examineur  | Université d'Adrar      |
| Pr. Bradai Djamel         | Professeur | Examineur  | USTHB Alger             |
| Pr. Barkat Djamel         | Professeur | Examineur  | U.Mohamed Khider-Biskra |

# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail à ma très chère mère qui a été toujours un soutien et un effort pour moi.*

*A la mémoire de mon père qui a laissé un vide irremplaçable dans mes pensées.*

*A mon épouse et mes enfants*

*A mes frères*

*A mes sœurs et à toute ma famille*

*A tous les enseignants de tous les niveaux qui ont participé d'une manière ou d'une autre à ma formation.*

*à Toute la famille universitaire*

*A tous mes amis ; Maoui AEG , Borja E. , Bouyadjra .B ,  
Chouguer .D , Yahiaoui.F, Telli.M, Melaoui.H , Mezerdi.Y ,  
Nedjar. Z , Younsi.M , Boukemiche.L, Bensaïde .AEH,  
Nabti.M.*

# Remerciements

*Je remercie en premier lieu ALLAH le Tout Puissant de m'avoir donné la force, le courage et la volonté d'accomplir ce modeste travail.*

*J'adresse tout d'abord mes remerciements les plus sincères à Monsieur **BOUMERZOUG Zakaria** , professeur à l'université de Biskra, pour avoir accepté de diriger mon travail. Il m'a dirigé avec patience et enthousiasme. Je tiens à le remercier vivement pour son grand soutien, ses précieux conseils, son aide, sa disponibilité et sa patience tout au long de la période de réalisation de présent travail.*

*Je tiens à exprimer ma sincère reconnaissance à Monsieur **Amrane Mohamed Nadhir**, Professeur à l'Université de Biskra, pour m'avoir fait l'honneur de présider ce jury.*

*Je remercie chaleureusement Monsieur **Rouabah Farid**, Professeur à l'Université de Sétif, pour avoir accepté d'examiner ce travail.*

*Je tiens à adresser mes remerciements au Professeur **Benatiallah Ali** à l'Université d'Adrar, d'avoir accepté de faire partie du jury de thèse.*

*Je remercie également Monsieur **Bradai Djamel**, Professeur à l'université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene d'Alger, d'avoir accepté être membre du jury d'examination.*

*Mes remerciements vont également à Monsieur **Barkat Djamel**, Professeur à l'université de Biskra, pour avoir accepté de juger mon travail.*

*La majorité des travaux et analyses de cette thèse ont été réalisés au sein des laboratoires de l'université de Biskra , à L'ENTTPP de Tébessa, au CPG (Complexe des pelles et grues en Constantine), au laboratoire de physique de Tlemcen et au laboratoire de Génie Civil de l'université de Tébessa.*

*Je souhaite également exprimer ma reconnaissance à Mr. le DG et l'ensemble de personnel de L'unité Annabib-Tébessa, pour leurs coopérations particulièrement MM:*

*Chaabi. Toufik. Rachid. Zine , BRAHIMI.A, ANTAR, Degdag.D*

*Je remercie aussi monsieur le **Vice Recteur** Professeur Mezerdi.B , Vice Doyen de la post-graduation Brima.AEH ,le chef de département de GM de l'université de Biskra MR. MOUMI. AEH ainsi que son adjoint chargé de la post -graduation Mr **AOUES.K**,  
Je tiens également à remercier Mr. GUESMI.B responsable du laboratoire de (DRX et MEB) à l'université de Biskra.*

*J'associe à ces remerciements l'ensemble du personnel des laboratoires de Métallurgie, de l'université Mohamed Khideur-Biskra pour l'aide matérielle et moyens qu'ils ont mis à ma disposition, pour mener à bien ce travail de recherche notamment Mr Samir.*

*Sans omettre de remercier Mr **BSMAALI. El**, Ingénieur GC à l'université de Tébessa.*

*Enfin , je remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

# Table des matières

|                              |           |
|------------------------------|-----------|
| Symboles utilisés            | i         |
| Listes des figures           | ii        |
| Listes des Tableaux          | vii       |
| <b>Introduction générale</b> | <b>01</b> |

## *1<sup>ère</sup> Partie : Etude bibliographique*

### Chapitre I : Soudage des aciers

|   |    |
|---|----|
| Introduction  | 03 |
| I-1. Le fer   | 03 |
| I-2. Le carbone et durcissement du fer                          | 03 |
| I-3. Combinaisons chimiques                                     | 04 |
| I-4. Les aciers   | 05 |
| I-4.1. Définition des aciers                                    | 05 |
| I-4.2. Evolution historique                                     | 05 |
| I-4.3. Normalisation  | 06 |
| I-4.4. Classification des aciers au carbone                     | 07 |
| I-4.4.1. Aciers d'usage général                                 | 07 |
| I-4.4.1.1. Aciers pour constructions mécaniques                 | 07 |
| I-4.4.1.2. Acier pour construction métallique                   | 07 |
| I-4.4.2. Aciers alliés  | 07 |
| I-4.4.2.1.2. Aciers fortement alliés                            | 09 |
| I-5. Structure cristallin des métaux et alliages                | 09 |
| I-5.1. Influence de la température sur la structure cristalline | 10 |
| I-6. Aspects micrographiques des constituants d'aciers          | 11 |
| I-6.1. Les constituants d'équilibre                             | 11 |
| I-6.1.1. La ferrite   | 11 |
| I-6.1.2. Cémentite  | 11 |
| I-6.1.3. Perlite  | 11 |
| I-6.2. Constituants de transition                               | 12 |
| I-6.2.1. L'austénite  | 12 |
| I-6.3. Les constituants hors d'équilibre                        | 12 |
| I-6.3.1. La martensite  | 12 |
| I-6.3.2. La toroostite  | 12 |
| I-6.3.3. La Sorbite   | 12 |
| I-6.3.4. La bainite   | 12 |
| I-7. Transformations avec diffusion                             | 13 |
| I-7.1. Transformation ferritique                                | 13 |
| I-7.2. Transformation perlitique                                | 13 |

|  |    |
|--|----|
| I-7.3. Transformation bainitique                                       | 13 |
| I-7.4. Transformation martensitique (sans diffusion)                   | 14 |
| I-8. Rôle des éléments d'alliage                                       | 14 |
| I-9. Les diagrammes Fer-carbone  | 18 |
| I-10. Propriété des aciers   | 20 |
| I-11. Soudabilité des métaux et alliages                               | 20 |
| I-12. Soudage des aciers   | 22 |
| I-13. Types fondamentaux des joints soudés                             | 26 |
| I-14. Description du procédé de soudage par induction à haut fréquence | 27 |
| I-14.1. L'énergie de soudage   | 29 |
| I-14.2. Chauffage par induction magnétique                             | 31 |
| I-15. Le traitement thermique de recuit                                | 32 |
| I-15.1. Recuit de normalisation  | 32 |
| I-15.2. Cycle d'un traitement thermique                                | 32 |

## **Chapitre II : Soudage des aciers doux**

|  |    |
|--|----|
| Introduction   | 33 |
| II-1. Soudure de l'acier ferritique au Carbone-Manganèse                       |    |
| II-2. Transformation de l'acier dans la zone réchauffée                        | 34 |
| II-3. Analyses métallurgiques des cordons de soudure                           | 34 |
| II-3.1. Métal de base  | 35 |
| II-3.2. Zone affectée thermiquement  | 35 |
| II-3.3. Zone de liaison  | 35 |
| II-3.4. Zone fondue  | 35 |
| II-3.5. Les sous-zones de la ZAT d'un soudage mono-passe                       | 36 |
| II-4. Les principaux défauts de soudures                                       | 38 |
| II-4.1. Influence des gaz  | 38 |
| II-4.1.1. Absorption de l'hydrogène  | 38 |
| II-4.1.2. Absorption de l'oxygène  | 41 |
| II-4.1.3. Absorption de l'azote  | 41 |
| II-4.1.4. Les inclusions solides   | 41 |
| II-4.1.4.1. Les fissures   | 41 |
| II-4.1.4.1.1. Fissures à chaud   | 41 |
| II-4.1.4.1.2. Fissures à froid   | 42 |
| II-5. La macrographie et micrographie d'un joint soudé d'un aciers doux-écroui | 47 |
| II-6. Transformation en phase solide au cours du soudage (échauffement)        | 49 |
| II-7. Transformation en phase solide au cours du soudage (refroidissement)     | 50 |
| II-8. Caractères généraux de l'opération de soudage                            | 51 |
| II-9. Caractéristiques mécaniques en fonction de la composition métallurgique  | 54 |
| II-10. Notions sur les phénomènes thermiques et métallurgiques de soudage      | 54 |

## *2<sup>ème</sup> Partie : Etude expérimentale*

### *Chapitre III : Matériaux et techniques expérimentales*

|   |    |
|---|----|
| Introduction  | 55 |
| III-1. Matériau de base   |    |
| III-1.1. Composition chimique du matériau utilisé                         | 56 |
| III-1.2. Caractéristiques mécaniques de l'acier A37                       | 56 |
| III-2. Description des techniques d'analyse chimique                      | 57 |
| III-2.1. La carbométrie   | 57 |
| III-2.1.1. Description de l'appareil d'absorption du carbone (carbomètre) | 57 |
| III-2.1.2. Dosage du carbone  | 58 |
| III-2.1.3. Echelle cylindrique de Bourg                                   | 59 |
| III-2.1.4. Préparations des nuances                                       | 61 |
| III-2.1.5. Déroulement de l'analyse carbométriques ( procédé )            | 61 |
| III-2.2. La Spectrométrie   | 63 |
| III-2.2.1. Principe de l'analyse spectrale                                | 63 |
| III-2.2.2. Principe de fonctionnement d'un spectravist                    | 63 |
| III-2.2.3. Préparations des échantillons                                  | 66 |
| III-2.2.4. Déroulement de l'essai   | 66 |
| III-2.3. L'analyse par dispersion d'énergie EDS                           | 69 |
| III-3. Description des techniques de caractérisation                      | 70 |
| III-3.1. Techniques de caractérisation microstructurale                   | 70 |
| III-3.1.1. L'observation microstructurale                                 | 70 |
| III-3.1.1.1. Microscopie optique  | 70 |
| III-3.1.1.2. Microscopie électronique à balayage                          | 71 |
| III-3.1.2. Préparations des échantillons                                  | 72 |
| III-3.1.2.1. Découpage des échantillons                                   | 72 |
| III-3.1.2.2. Repérage des échantillons                                    | 73 |
| III-3.1.2.3. Traitements thermiques des échantillons                      | 73 |
| III-3.1.2.4. Polissage  | 73 |
| III-3.1.2.5. L'attaque chimique   | 74 |
| III-3.1.2.6. Rinçage et séchage   | 74 |
| III-3.2. Essais mécaniques  | 74 |
| III-3.2.1. Essais de micro dureté   | 75 |
| III-3.2.1.1. Dureté Vickers   | 75 |
| III-3.2.1.2. Préparation des échantillons                                 | 76 |
| III-3.2.1.3. Déroulement de l'essai                                       | 76 |
| III-3.2.1.4. Mesure d'une empreinte de Vickers                            | 77 |
| III-3.2.2. Essais de traction   | 79 |
| III-3.2.2.1. Préparation des échantillons                                 | 79 |
| III-3.2.2.2. Déroulement de l'essai                                       | 80 |
| III-3.2.3. Essais de pliage   | 81 |

|  |    |
|--|----|
| III-3.2.3.1. Préparation des échantillons    | 81 |
| III-3.2.3.2. Déroulement de l'essai          | 81 |
| III-3.2.4. Essais de résilience              | 84 |
| III-3.2.4.1. Préparation des échantillons    | 84 |
| III-3.2.4.2. Déroulement de l'essai          | 85 |
| III-3.2.5. Essais d'aplatissement            | 87 |
| III-3.2.5.2. Déroulement de l'essai          | 87 |
| III-3.2.6. Essais d'évasement                | 90 |
| III-3.2.6.1. Déroulement de l'essai          | 90 |
| III-3.3. Analyse par diffraction de rayons X | 93 |
| III-3.3.1. Préparations des échantillons     | 93 |
| III-3.3.1. La diffraction des rayons X       | 94 |
| III-3.3.1. Principe de mesure par RX         | 95 |
| III-3.4. Caractérisation des états déformés  | 96 |
| III-3.4.1. Essais de fractographie           | 96 |
| III-3.4.2. Préparation des échantillons      | 96 |

#### **Chapitre IV : Résultats et discussions**

|  |            |
|--|------------|
| Introduction   | 97         |
| IV-1. Résultats des analyses chimiques                 |            |
| IV-2. Caractérisation microstructurale                 | 98         |
| IV-2.1. Microscopie optique                            | 98         |
| IV-2.2. Microscopie électronique à balayage            | 102        |
| IV-3. Résultats d'analyses par diffraction de rayons X | 106        |
| IV-4. Résultats des essais mécaniques                  | 121        |
| IV-4.1. Résultats de micro dureté                      | 121        |
| IV-4.2. Résultats de résilience                        | 132        |
| IV-4.3. Résultats de pliage                            | 134        |
| IV-4.4. Résultats de Traction                          | 135        |
| IV-4.5. Résultats d'aplatissement                      | 136        |
| IV-4.6. Résultats d'évasement                          | 136        |
| IV-5. Résultats de faciès de rupture                   | 136        |
| <b>Conclusion générale</b>                             | <b>138</b> |
| <b>Références bibliographiques</b>                     |            |



## *Listes des symboles*

|                        |   |                   |
|------------------------|---|-------------------|
| <i>ENTTP</i>           | <i>L'entreprise nationale des transformations des tubes et produits plats</i> | -                 |
| <i>TGT</i>             | <i>Tubes gaz Tébessa</i>  | -                 |
| <i>CPG</i>             | <i>Complexe des pelles et de grues</i>  | -                 |
| <i>Fe<sub>3</sub>C</i> | <i>La cémentite</i>   | -                 |
| <i>Z</i>               | <i>Nombre atomique</i>  | -                 |
| <i>CC</i>              | <i>Cubique centrée</i>  | -                 |
| <i>CFC</i>             | <i>Cubique à faces centrées</i>   | -                 |
| <i>A</i>               | <i>L'allongement à la rupture</i>   | %                 |
| <i>R<sub>m</sub></i>   | <i>Résistance à la traction</i>   | MPa               |
| <i>K</i>               | <i>La résilience</i>  | J/cm <sup>2</sup> |
| <i>EDS</i>             | <i>Energie Dispersive des rayons X</i>  | -                 |
| <i>DRX</i>             | <i>Diffraction des rayons X</i>   | -                 |
| <i>MEB</i>             | <i>Microscope Electronique à balayage</i>                                     | -                 |
| <i>MO</i>              | <i>Microscopie Optique</i>  | -                 |
| <i>TIG</i>             | <i>Tungsten Inert Gas</i>   | -                 |
| <i>MIG</i>             | <i>Metal Inert Gas</i>  | -                 |
| <i>MAG</i>             | <i>Metal Active Gas.</i>  | -                 |
| <i>HB</i>              | <i>Dureté Brinell</i>   | -                 |
| <i>H<sub>v</sub></i>   | <i>Dureté Vickers</i>   | -                 |

# *Listes des figures*

|                    |  |    |
|--------------------|--|----|
| Figure I-1.        | Matériaux utilisés en constructions mécaniques                                     | 06 |
| Figure I-2.        | Maille cubique centrée   | 10 |
| Figure I-3.        | Maille cubique à faces centrées  | 10 |
| Figure I-4.        | Diagramme Fer-C  | 19 |
| Figure I-5.        | Types fondamentaux des joints soudés   | 26 |
| Figure I-6.        | Formage progressif d'un feuillard au moyen des galets                              | 28 |
| Figure I-7.        | Chauffage des tubes par induction  | 29 |
| Figure I-8.        | Chauffage des tubes par contact  | 29 |
| Figure I-9.(a ,b). | Tubes soudés par induction   | 30 |
| Figure I-10.       | Inducteurs Mono et Multi spires  | 31 |
| Figure I-11.       | Cycle d'un traitement thermique des soudures                                       | 32 |
| Figure II-1.       | Influence du carbone sur la courbe de résilience des aciers ferritiques au C-Mn    | 33 |
| Figure II-2.       | Schéma des changements microstructuraux se produisant dans la ZAT d'un acier 0,15% | 34 |
| Figure II-3.       | Représentation schématique des différentes zones dans un joint soudé               | 36 |
| Figure II-4.       | Les sous-zones de la ZAT d'un soudage mono-passe                                   | 36 |
| Figure II-5.       | Aspect macrographique de l'effet des gaz   | 38 |
| Figure II-6.       | La formation des « Fish eyes »   | 39 |
| Figure II-7.       | La formation des soufflures  | 39 |
| Figure II-8.       | Effet des gaz, soufflures vermiculaires  | 40 |
| Figure II-9.       | Ségrégation de l'hydrogène aux interfaces d'inclusions de sulfures de fer          | 40 |
| Figure II-10.      | Fissure à chaud  | 42 |
| Figure II-11.      | Fissures à froid   | 42 |
| Figure II-12.      | Manque de fusion entre passes  | 43 |
| Figure II-13.      | Fissure longitudinale  | 43 |
| Figure II-14.      | Fissure dans une soudure en V double   | 44 |
| Figure II-15.      | Porosité dans une soudure  | 44 |
| Figure II-16 .     | Manque de pénétration  | 45 |
| Figure II-17.      | Manque de liaison  | 45 |
| Figure II-18.      | Excès de pénétration   | 46 |
| Figure II-19.      | Scories dans une structure ferrito-perlitique                                      | 46 |

|                |   |    |
|----------------|---|----|
| Figure II-20.  | Les états d'aciers doux-écroui  | 47 |
| Figure II-21.  | Les modifications structurales au cours du chauffage                              | 49 |
| Figure II-22.  | Effet de la recristallisation et la surchauffe sur la structure d'un acier écroui | 50 |
| Figure II-23.  | Schéma des principales interactions thermiques, métallurgiques et mécaniques      | 54 |
| Figure III-1.  | Feuillards enroulés d'acier A37-2   | 55 |
| Figure III-2.  | Montage du Carbomètre   | 57 |
| Figure III-3.  | Modèle de carbomètre amélioré   | 58 |
| Figure III-4.  | Modèle de carbomètre normal   | 58 |
| Figure III-5.  | Echelle cylindrique de Bourg  | 59 |
| Figure III-6.  | Microbalance  | 61 |
| Figure III-7.  | Spectravist 88 d  | 63 |
| Figure III-8.  | Spectravist 88 d (Schéma optique)   | 64 |
| Figure III-9.  | Schéma du procédé de la photométrie   | 65 |
| Figure III-10. | Courbe d'étalonnage de Mn appartient à l'intervalle 0.12 à 1.5 %                  | 67 |
| Figure III-11. | Courbe d'étalonnage de Si appartient à l'intervalle 1.2 à 4 %                     | 68 |
| Figure III-12. | Analyse de la composition chimique par MEB  | 69 |
| Figure III-13. | Microscopie Optique HUND T100-WETZLAR   | 70 |
| Figure III-14. | Microscopie Optique LEITZ de type MM6   | 70 |
| Figure III-15. | Microscopie électronique à balayage conventionnel Jeol JSM-LV6390                 | 71 |
| Figure III-16. | Tubes d'un acier A37 rectangulaire  | 72 |
| Figure III-17. | Tronçonneuse et surfaceuse  | 72 |
| Figure III-18. | Machine de polisseuse   | 73 |
| Figure III-19. | Machine de polisseuse (feutre mouillé)  | 74 |
| Figure III-20. | Microduromètre  | 76 |
| Figure III-21. | Relevé de microdureté   | 77 |
| Figure III-22. | Mesure de l'empreinte de Vickers  | 77 |
| Figure III-23. | Machine d'essai de Traction universelle UMIB5005 SW                               | 79 |
| Figure III-24. | Eprouvettes de pliage avant essai   | 81 |
| Figure III-25. | Machine da pliage   | 82 |
| Figure III-26. | Essai de pliage   | 82 |
| Figure III-27. | Eprouvettes de pliage après l'essai   | 82 |
| Figure III-28. | Machine d'essai de résilience   | 84 |
| Figure III-29. | Nuances de résilience avant des essai   | 85 |

|                |   |     |
|----------------|---|-----|
| Figure III-30. | Nuances après résilience  | 85  |
| Figure III-31. | Échantillon ( tubes métallique)   | 88  |
| Figure III-32. | Début de l'essai d'aplatissement  | 88  |
| Figure III-33. | Au cours de l'essai d'aplatissement   | 88  |
| Figure III-34. | La fin de l'essai d'aplatissement   | 88  |
| Figure III-35. | Échantillons après l'essai d'aplatissement  | 88  |
| Figure III-36. | Échantillons pour l'essai d'évasement   | 91  |
| Figure III-37. | Début d'essai d'évasement   | 91  |
| Figure III-38. | Essai d'évasement ( au cours de l'essai )   | 91  |
| Figure III-39. | Échantillons après l'essai d'évasement  | 92  |
| Figure III-40  | Diffractomètre du rayon X   | 93  |
| Figure III-41. | Les rayons X dans l'échelle des longueurs d'ondes   | 94  |
| Figure III-42. | Diffraction des rayons X  | 95  |
| Figure IV-1.   | Spectre d'analyse de l'acier A37 par EDS  | 97  |
| Figure IV-2.   | Microstructure optique de l'acier 0.11% en carbone (échantillon A)  | 99  |
| Figure IV-3.   | Comparaison les microstructures optique des échantillons B  | 100 |
| Figure IV-4.   | Comparaison les microstructures optique des échantillons C  | 101 |
| Figure IV-5.   | Microstructure MEB de l'acier 0.11% en Carbone ( joint soudé ) ,G=1000X   | 103 |
| Figure IV-6.   | Comparaison les microstructures MEB de l'acier 0.11% en Carbone soudé et traité par recuit pendant 5mn ( Nuances B ). | 104 |
| Figure IV-7.   | Comparaison les microstructures MEB de l'acier 0.11% en Carbone soudé et traité par recuit pendant 30mn ( Nuances C ) | 105 |
| Figure IV-8.   | Diffractogramme de nuance A37 ( metal de base )   | 106 |
| Figure IV- 9.  | Diffractogramme de nuance A ( le joint soudé )  | 107 |
| Figure IV-10.  | Diffractogramme de nuance A après recuit à 200°C durant 5 min   | 108 |
| Figure IV- 11. | Diffractogramme de nuance A après recuit à 200°C durant 30 min  | 109 |
| Figure IV- 12. | Diffractogramme de nuance A après recuit à 400°C durant 5 min   | 110 |
| Figure IV- 13. | Diffractogramme de nuance A après recuit à 400°C durant 30 min  | 111 |
| Figure IV- 14. | Diffractogramme de nuance A après recuit à 600°C durant 5 min   | 112 |
| Figure IV- 15. | Diffractogramme de nuance A après recuit à 600°C durant 30 min  | 113 |
| Figure IV- 16. | Diffractogramme de nuance A après recuit à 800°C durant 30 min  | 114 |
| Figure IV- 17. | Diffractogramme de nuance A après recuit à 900°C durant 5 min   | 115 |
| Figure IV- 18. | Diffractogramme de nuance A après recuit à 900°C durant 30 min  | 116 |

|                        |   |     |
|------------------------|---|-----|
| Figure IV- 19.         | Diffractogramme de nuance A après recuit à 1000°C durant 5 min                        | 117 |
| Figure IV- 20.         | Diffractogramme de nuance A après recuit à 1000°C durant 30 min                       | 118 |
| Figure IV- 21.         | Diffractogramme de nuance A après recuit à 1200°C durant 5 min                        | 119 |
| Figure IV- 22.         | Diffractogramme de nuance A après recuit à 1200°C durant 30 min                       | 120 |
| Figure IV- 23.         | Profils de microdureté de la nuance A ( le joint soudé )                              | 122 |
| Figure IV- 24.         | Profils de microdureté de la nuance B <sub>200</sub>                                  | 123 |
| Figure IV- 25.         | Profils de microdureté de la nuance C <sub>200</sub>                                  | 123 |
| Figure IV- 26.         | Profils de microdureté de la nuance B <sub>400</sub>                                  | 124 |
| Figure IV- 27.         | Profils de microdureté de la nuance C <sub>400</sub>                                  | 124 |
| Figure IV- 28.         | Profils de microdureté de la nuance B <sub>600</sub>                                  | 125 |
| Figure IV- 29.         | Profils de microdureté de la nuance C <sub>600</sub>                                  | 125 |
| Figure IV- 30.         | Profils de microdureté de la nuance B <sub>900</sub>                                  | 126 |
| Figure IV- 31.         | Profils de microdureté de la nuance C <sub>900</sub>                                  | 126 |
| Figure IV- 32.         | Profils de microdureté de la nuance C <sub>800</sub>                                  | 127 |
| Figure IV- 33.         | Profils de microdureté de la nuance B <sub>1000</sub>                                 | 128 |
| Figure IV- 34.         | Profils de microdureté de la nuance C <sub>1000</sub>                                 | 128 |
| Figure IV- 35.         | Profils de microdureté de la nuance B <sub>1200</sub>                                 | 129 |
| Figure IV- 36.         | Profils de microdureté de la nuance C <sub>1200</sub>                                 | 129 |
| Figure IV- 37.         | Comparaison les profils de microdureté de joint soudé avant et après le recuit        | 130 |
| Figure IV- 38.         | Comparaison le profil de microdureté de nuance A avec quelque profils de C            | 131 |
| Figure IV- 39.         | Histogramme de l'évolution de la résilience en fonction de la température de recuit . | 132 |
| Figure IV- 40.         | Evolution de la résilience en fonction de la température de recuit                    | 133 |
| Figure IV- 41.         | Comparaison les résultats de pliage des nuances A37 avant et après le recuit          | 134 |
| Figure IV- 42.         | Evolution de la résistance à la rupture en fonction de la température de recuit       | 135 |
| Figure IV-43.(a et b). | Observation au MEB du faciès de rupture de l'éprouvette A37                           | 137 |

# Listes des Tableaux

|                 |   |    |
|-----------------|---|----|
| Tableau I-1 .   | Propriétés chimiques et cristallographique du fer                                 | 03 |
| Tableau I-2 .   | Les principaux éléments d'addition  | 08 |
| Tableau I-3 .   | Rôle des éléments d'alliages sur les propriétés des métaux                        | 17 |
| Tableau I-4 .   | Historique du soudage   | 23 |
| Tableau III-1.  | Composition chimique de l'acier A37 (en % massique)                               | 56 |
| Tableau III-2.  | Caractéristiques mécaniques de l'acier A37  | 56 |
| Tableau III-3.  | Les valeurs lues sont corrigées   | 58 |
| Tableau III-4.  | Les valeurs de facteur de correction F  | 60 |
| Tableau III-5.  | Les résultats des caractéristiques mécaniques des différentes éprouvettes testées | 80 |
| Tableau III-6.  | Résultats de l'essai de pliage  | 83 |
| Tableau III-7.  | Les résultats de l'essai de résilience  | 86 |
| Tableau III-8.  | Valeur de K et la limite inférieure de H du Matériau A37                          | 87 |
| Tableau III-9.  | Résultats d'aplatissement   | 89 |
| Tableau III-10. | Détermination de la longueur de l'éprouvette L                                    | 90 |
| Tableau III-11. | Détermination des diamètres évasés calculés avec le rapport e/D                   | 90 |
| Tableau III-12. | Résultats d'évasement   | 92 |
| Tableau IV-1.   | Composition chimique de l'acier A37 (en % massique)                               | 98 |

# *Introduction Générale*

## *Introduction générale*

Aujourd'hui les aciers sont des matériaux d'un grand intérêt industriel en raison de leur large gamme d'emploi. La métallurgie, l'industrie mécanique, l'industrie du bâtiment considèrent et utilisent différents aciers comme matériau de base. La sidérurgie fournit aux différentes branches industrielles des aciers de toutes nuances sous forme de produits plats ou longs adaptés aux besoins des utilisateurs qui leur feront subir des transformations mécaniques et des traitements thermiques divers .

Malgré un développement considérable des matériaux dits nouveaux (polymères, composites, céramiques ...), les aciers restent le matériau le plus répandu et développé dont la production et la consommation sont très larges [45].

Les aciers d'usage général sont actuellement les alliages les plus employés dans les opérations de soudage et les conceptions des tubes.

En Algérie, la production des tubes à différents diamètres par la Société ANABIB à Tébessa TGT est spécialisée dans la soudure des tubes par la technique de soudure à induction.

Le soudage par induction est un moyen d'assemblage sans l'utilisation du métal d'apport.

A présent, la demande de l'acier pour les tubes des gaz avec des qualités de plus en plus élevées, souvent contradictoires : bonne résistance mécanique et bonne plasticité. Ce fait se base essentiellement sur deux circonstances. La première est la nécessité de garantir la sécurité et la solidité nécessaire pour le transport de gaz par tubes. La deuxième est le facteur économique qui joue aussi un rôle : plus les tubes sont résistants, la consommation en aciers est faible.

Le problème fondamental des joints soudés est la compréhension de l'évolution de la microstructure et des propriétés mécaniques après soudage .

Ce travail qui nous a été proposé s'inscrit dans le cadre de recherche sur l'influence des traitements thermiques sur le soudage par induction de l'acier doux A37. Les propriétés mécaniques et la microstructure du joint soudé seront étudiées .

Cette thèse, réalisée en cotutelle entre l'université Mohamed Khider Biskra et L'ENTTPP Tébessa ( Entreprise nationale des transformations des tubes et produits plats), poursuit deux buts principaux ; Scientifique et Industriel.

La totalité des résultats de travail de cette thèse est présentée sous forme de deux grandes parties essentielles, théorique et expérimentale. Les deux premiers chapitres résument la partie théorique du sujet.



## **Introduction générale**

Le premier chapitre est consacré à la définition des alliages ferreux , le rôle des éléments d'alliages sur les propriétés mécaniques des aciers, soudage des aciers et les techniques industrielles les plus utilisées ainsi que la description du procédé de soudage par induction à haute fréquence . Dans le deuxième chapitre, on trouve une étude quasi-détaillée sur le soudage des aciers doux, ainsi qu'une étude bibliographique relative à la métallurgie de soudage, suivie d'une étude portant sur la caractérisation des défauts .

Quant à la deuxième partie , elle est scindée en deux chapitres III et IV.

Le troisième chapitre présente le matériau étudié et les différentes méthodes d'analyse chimique ainsi que les méthodes de préparation des éprouvettes pour la caractérisation des microstructures et pour réaliser les différents essais mécaniques ( traction, pliage résilience et dureté ). Nous avons appliqué aussi la technique d'aplatissement et d'évasement des tubes soudés afin de montrer la qualité et la fiabilité du joint soudé, la technique de diffraction des rayons X pour déterminer la structure des nuances et on termine par les faciès de rupture.

Dans le dernier chapitre, nous avons présenté les résultats obtenus et leur discussion .

Cette thèse s'achève par une conclusion générale. Et enfin on trouvera également les références bibliographiques .

*1<sup>ère</sup> Partie*  
*Etude bibliographique*

*Chapitre I*  
*Soudage des aciers*

## Soudage des aciers

### Introduction

Ce chapitre est consacré à une revue bibliographique sur les aciers et leurs soudages .

Les techniques de soudage les plus utilisées ont été citées et surtout le soudage par induction .

#### I-1. Le fer

Le tableau I-1 présente les propriétés chimiques et cristallographiques du fer

|  |
|--|
| Le fer est un métal blanc d'argent   |
| de masse atomique $M=55,85$ , nombre atomique $Z= 26$  |
| de rayon atomique $1,27 \text{ \AA}$   |
| Sa température de fusion $T_f = 1536 \text{ }^\circ\text{C}$   |
| Le fer possède trois formes polymorphes $\alpha$ , $\gamma$ et $\delta$  |
| Sa densité est de $7,68$   |
| Le fer le plus pur contient $99,999\%$ de Fe   |
| L'électronégativité du fer est de $1,83$   |
| L'atome de fer compte 26 électrons : $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^6$  |
| Le fer $\alpha$ existe aux températures inférieures à $910 \text{ }^\circ\text{C}$ et supérieures à $1392 \text{ }^\circ\text{C}$ , Le fer $\alpha$ à un réseau CC à distance réticulaire de $2,8606 \text{ \AA}$ .  |
| Le fer $\gamma$ existe entre $910 \text{ }^\circ\text{C}$ et $1392 \text{ }^\circ\text{C}$ , et a un réseau CFC dont l'équidistance vaut $3.6450 \text{ \AA}$ à $910 \text{ }^\circ\text{C}$ , et sa densité est supérieure à celle du fer et vaut $8 - 8,1$ |

Tableau I-1. Propriétés chimiques et cristallographique du fer [01]

Les produits industriels, même les plus performants sont toujours plus ou moins souillés d'éléments étrangers, notamment de carbone. Leur étude ne peut être séparée de celle des alliages Fer-carbone qui sont principalement les aciers et les fontes.

#### I-2. Le carbone et durcissement du fer

Le carbone est un élément non métallique de 2<sup>ème</sup> période du quatrième groupe dont

- Nombre atomique  $Z= 6$
- Densité  $=2,5$
- De masse =  $12,011 \text{ g/mol}$
- Sa température de fusion est de  $3500^\circ\text{C}$
- L'électronégativité du carbone dans l'échelle de Pauling est de  $\chi = 2.55$
- Son rayon atomique est de  $0,77 \text{ \AA}$  .

C'est un élément polymorphe dans les conditions ordinaires, il se trouve sous la forme d'une variété de graphite mais peut exister sous la forme d'une variété métastable du diamant [02] .

Le carbone est soluble dans le fer à l'état liquide et solide mais peut aussi former une combinaison chimique ; La cémentite ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) et dans les alliages à haut carbone .

Le graphite le carbone est le moins cher et le plus efficace élément pour durcir le fer. Les propriétés mécaniques des alliages obtenus Fe-C dépendent à la fois de la teneur du carbone, de celle des autres éléments d'alliage et du traitement thermique. A la lecture des valeurs des différentes propriétés physiques du fer pur et mécaniques du fer pratiquement pur ; il s'avère que le fer pratiquement pur n'est pas mécaniquement très performant. Ses caractéristiques de résistance (limite d'élasticité), résistance à la traction mais aussi sa dureté et sa ténacité sont faible, ses caractéristiques de plasticité sont très élevées. Cette remarque est d'ailleurs valable à tous les métaux purs ; le métallurgiste sait qu'il doit les durcir pour leur conférer des propriétés mécaniques intéressantes, pour les constructions qu'il devra simultanément tolérer une baisse concomitante de la ductilité [03]. Parmi les différents modes de durcissement, il y a l'addition d'éléments étrangers en solution solide en fer.

### **I-3. Combinaisons chimiques**

A la différence des solutions solides, les combinaisons chimiques se forment dans la majorité des cas entre les éléments dont les atomes où les réseaux cristallins ont des structures très différentes. Les combinaisons d'un métal avec un non-métal (carbures  $\text{M}_x\text{C}_y$ , nitrures  $\text{M}_x\text{N}_y$ , Borures  $\text{M}_x\text{B}_y$ , Hydrides ...) qui peuvent réaliser une liaison métallique sont souvent nommés combinaisons métalliques.

Des combinaisons intermétalliques lorsque la teneur en éléments d'alliage est élevée.

L'exemple en est fourni par  $\text{Fe}_7\text{Mo}_6$ ,  $\text{Fe}_7\text{W}_6$ ,  $\text{Fe}_3\text{Nb}_2$ ,  $\text{Fe}_3\text{Ti}$  ...etc.

Certaines de ces combinaisons se rapportent aux phases de laves ( $\text{Fe}_2\text{Nb}$ ,  $\text{Fe}_2\text{W}$ ,  $\text{Fe}_2\text{Mo}$ ,  $\text{Cr}_2\text{Ti}$  ...etc. Dans les alliages FeCr et FeV se forment des phases  $\delta$  dures et fragiles qui correspondent aux combinaisons Fe-Cr et Fe-V. Les alliages Fe-Cr-Mo peuvent former une phase  $\alpha$  fragile de composition Fe<sub>3</sub>-Cr-Mo ( $\text{Fe}_{36}\text{-Cr}_{12}\text{-Mo}_{10}$ ) le rôle des phases intermétallique est important surtout pour les alliages de fer à faible carbone où elles assurent le durcissement par dispersion. Les phases  $\delta$  et  $\alpha$  fragilisent l'alliage, leur présence est donc indésirable. En résumé, vu la capacité prononcée du Fer à dissoudre les autres métaux, cette propriété est exploitée pour son durcissement par l'addition d'autres éléments [04] .

## **I-4. Les aciers**

### **I-4.1. Définition des aciers**

Un Acier est un alliage constitué essentiellement du fer et du carbone, et contenant plusieurs autres inclusions ou impuretés (Mn, Si, Cr, S, O, M, H,... etc.) qui influent sur toutes ces propriétés. La concentration en carbone varie de 0,03% à 1,8% . Cet élément exerce l'effet le plus significatif sur la microstructure du matériau et sur ses propriétés [05] . L'acier est le métal le plus utilisé dans l'industrie, ce grand succès tient à quatre causes essentielles.

- ✓ Prix de revient peu élevé
- ✓ Facilité de mise en œuvre par des procédés variés
- ✓ Excellentes propriétés mécaniques
- ✓ Obtention facile des propriétés variées
  - En agissant sur la composition chimique
  - En réalisant des traitements thermiques et les deux ensembles.

### **I-4.2. Evolution historique**

Il ne nous est cependant pas possible de relater dans le faible nombre de pages deux Millénaires et demi concernant l'art d'extraire du métal de son minerai, de le transformer en produits semi-finis et de le mettre en forme pour son utilisation. Nous dresserons donc les faits techniques et scientifiques qui ont jalonné une certaine réalité sidérurgique d'aciers. La production industrielle d'acier n'a débuté qu'au milieu du XIX<sup>e</sup> siècle. Auparavant, la sidérurgie se limitait en Europe uniquement à des productions mineures de fonte et de fer puddlé. Il a fallu attendre l'invention du four au COKE par Darby au XVII<sup>e</sup> siècle et les grandes inventions en aciérie du XIX<sup>e</sup> siècle [fours Bessemer, Thomas et Martin]. La production mondiale était-elle bien modeste en 1870 limitée à 10 millions de tonnes et cantonnée en Europe surtout en Grande-Bretagne qui était alors le premier producteur d'acier dans le monde avec près de 4 millions de tonnes. La recherche sur les aciers à usage militaire eut lieu en France surtout dans les aciéries du centre qui travaillaient déjà en 1880 pour la marine et la guerre fournissant des projectiles en aciers, des blindages en Fer et des canons en aciers [06],[07] .

En regard de l'allègement de la construction, l'architecture en acier tend à devenir une architecture du vide, de l'espace et de la transparence. Avec ce nouveau matériau précisément, la matière s'efface et commence l'histoire des gratte-ciel américains.

**I-4.3. Normalisation**

Toutes les combinaisons d’alliages ne sont pas utilisées. Seuls certains nombres d’entre eux sont employés pratiquement. Il est nécessaire de les désigner de façon claire afin d’éviter les confusions, la désignation normalisée française des aciers se fait suivant plusieurs modes selon la catégorie d’acier. La désignation conventionnelle des aciers d’usage général ne nécessitant pas de traitement thermique et est fondée sur des caractéristiques mécaniques ou sur des caractéristiques particulières.

La Figure I-1 montre les matériaux utilisés en constructions mécaniques.

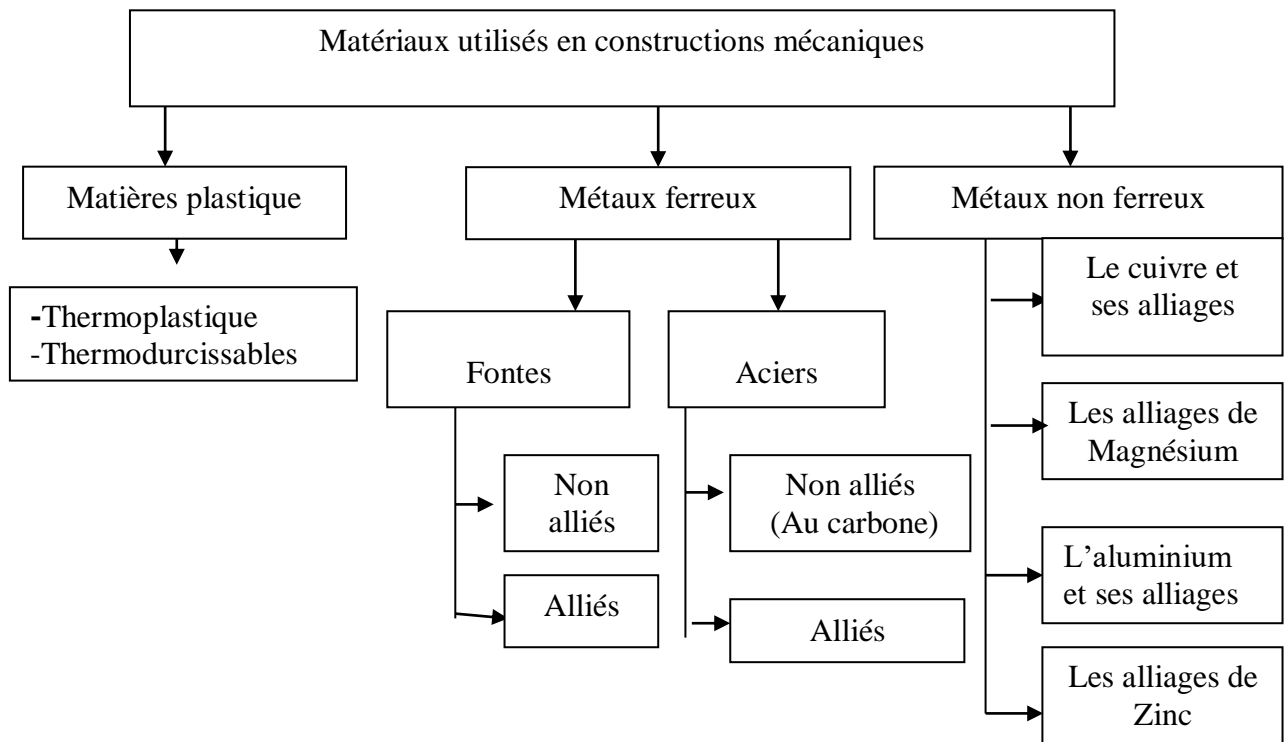


Figure I-1. Matériaux utilisés en constructions mécaniques [08]

**I-4.4. Classification des aciers au carbone**

On peut classer les aciers selon leur composition, en adoptant cette dernière en quatre familles :

- Les aciers au carbone d'usage général
- Les aciers des traitements thermiques, alliés ou non alliés
- Les aciers à outils
- Les aciers inoxydables.

**I-4.4.1. Aciers d'usage général****I-4.4.1.1. Aciers pour constructions mécaniques**

La désignation des aciers non alliés d'usage général destiné aux constructions mécaniques est comme suit :

- Lettre A ( Acier ).
- Résistance  $R_m$  en  $[\text{daN}/\text{mm}^2]$ , soit aussi en MPa.
- Indice de qualité de 1 à 4.
- Les indices d'utilisation soudable ( S ) ou moulable ( M ).

Exemple : A50-2

Nuances normalisées : A33, A34, A50, A60, A70.

**I-4.4.1.2. Acier pour construction métallique**

La désignation comprend dans l'ordre :

- Lettre E
- Limite élastique minimale  $R_e$  en  $\text{daN}/\text{mm}^2$ .
- Indice de qualité de 1 à 4.
- Les indices d'utilisation S ou M.

Exemple : E24-2

Nuances normalisées E24 , E26, E30, E36

Utilisation : charpente métallique ,... etc. [09] .

**I-4.4.2. Aciers alliés**

Les aciers alliés sont les aciers ordinaires  $C\% \leq 2\%$  avec les éléments d'addition, ces derniers sont ajoutés volontairement pour obtenir des propriétés spéciales. Les principaux éléments d'addition sont indiqués ci-dessous en même temps que leur symbole chimique et leur symbole normalisé souvent différent du précédant (Tableau I-2) .



| Élément   | Symbole chimique | Symbole normalisé |
|-----------|------------------|-------------------|
| Aluminium | Al               | A                 |
| Chrome    | Cr               | C                 |
| Cobalt    | Co               | K                 |
| Cuivre    | Cu               | U                 |
| Manganèse | Mn               | M                 |
| Molybdène | Mo               | D                 |
| Nickel    | Ni               | N                 |
| Niobium   | Nb               | NB                |
| Phosphore | P                | P                 |
| Plomb     | Pb               | PB                |
| Silicium  | Si               | S                 |
| Soufre    | S                | F                 |
| Titane    | Ti               | T                 |
| Tungstène | W                | W                 |
| Vanadium  | V                | V                 |

Tableau I-2. Les principaux éléments d'addition [09].

#### I-4.4.2.1. Désignation des aciers alliés

Elle est basée sur la composition chimique moyenne du métal .

##### I-4.4.2.1.1. Aciers faiblement alliés

Ce sont des aciers dont lesquels aucun des éléments alliés (d'addition) n'a une teneur supérieure à 5%. Ces aciers sont désignés par :

- Un nombre égal à la teneur moyenne en carbone, multiplié par 100%
- Une série de symboles normalisés, correspondant aux éléments alliés rangés par teneurs décroissantes
- Un ou deux nombres indiquant la teneur moyenne des éléments principaux et qui sont obtenus en multipliant la teneur en % par :

4 pour C, K, M, N et S

10 pour tous les autres éléments

exemple : 18 NCW- 16-08-10

Acier faiblement allié

- 0,18% de carbone
- N4 - 4/16 : % de Nickel
- C2 - 4/08 : % Chrome
- W1 - 10/10 : % tungstène

Utilisation : en arbres, axes, bielles, ...

#### **I-4.4.2.1.2. Aciers fortement alliés**

Ce sont des aciers dans lesquels au moins un des éléments d'alliage a une teneur supérieure ou égale à 5% ils sont désignés par :

- la lettre Z
- la teneur moyenne en carbone exprimée en centièmes pour cent.
- la série des symboles normalisés des éléments alliés rangés par teneurs décroissantes.
- teneurs en pourcentage des principaux éléments rangés dans le même ordre et sans coefficient multiplicateur.

Exemple 1 :

Z10CN-18-08

- Z : symbole « acier fortement allié »
- 0,10% de carbone
- 18% de chrome
- 08% de Nickel [09]

Utilisation en moulage, tôles, bagues d'usure, tubes rouleaux.

### **I-5. Structure cristalline des métaux et alliages**

Le caractère essentiel de la structure cristalline des métaux est le mode d'empilement des atomes qui offre une compacité optimale. Cette dernière est définie par la coordinence du réseau cristallin qui s'exprime par le nombre d'atomes tangents à un atome donné. Parmi L'ensemble des structures cristallines, seuls trois types de réseaux répondent à ce critère de compacité. Ce sont les réseaux cubiques centrés ( CC), cubique à faces centrées ( CFC ) et Hexagonal compact ( HC ).

### I-5.1. Influence de la température sur la structure cristalline

La structure cristalline de l'acier change quand sa température croît. Pour le fer pur, ce changement a lieu à 910°C. La structure cristalline cubique centrée (CC) de la ( Figure I-2 ). Se transforme en structure cubique à face centrée (CFC) telle qu'illustrée par la ( Figure I-3 ).

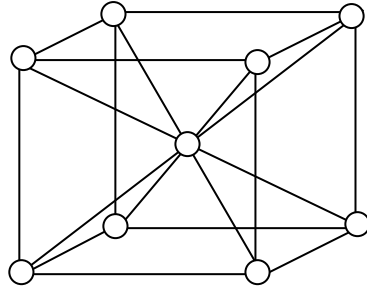


Figure I-2 . Maille cubique centrée

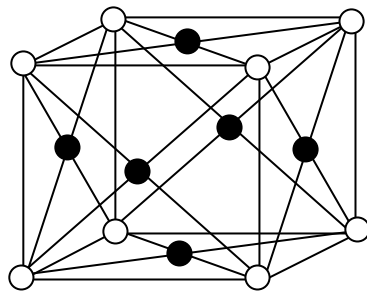


Figure I-3 . Maille Cubique à faces centrées

Le cristal CFC présente des atomes de fer aux sommets du cube et au centre de chaque face. La position située au centre du cube est vide. Un nombre donné d'atomes occupent légèrement moins de volume lorsqu'ils sont organisés en structure CC. Le changement de la structure cristalline s'accompagne donc par un changement de volume. Quand une pièce en fer est chauffée celle-ci se dilate normalement jusqu'à ce que la température de 910°C soit atteinte. A cette température, il y a une contraction brutale de l'ordre de 0.5 % en volume associée au passage de la structure CC à la structure CFC. Un chauffage supplémentaire donne une expansion thermique supplémentaire, à environ 1400°C la structure redevient CC s'accompagnant d'une expansion brutale restaurant le volume perdu à 910°C. Un chauffage supérieur à 1400°C donne une expansion thermique jusqu'à ce que la température de fusion

soit atteinte (1540°C). Cette courbe est réversible lors d'un refroidissement lent. Cette propriété du métal à présenter différentes structures en fonction des températures est appelée allotropie ( transformation allotropique ) [10].

## **I-6. Aspects micrographiques des constituants d'aciers**

### **I-6.1. Les constituants d'équilibre**

#### **I-6.1.1. La ferrite**

C'est une solution solide d'insertion de carbone dans le fer  $\alpha$  à un réseau cubique centrée (C.C ) à distance réticulaire de 2,8606 Å jusqu'à 768 °C le fer  $\alpha$  est magnétique les caractéristiques mécaniques de la ferrite sont :

- Dureté HB = 80
- Résistance à la rupture  $R_r \approx 30 \text{ daN/mm}^2$
- Résilience  $K \approx 30 \text{ j/cm}^2$
- Allongement  $A \approx 35\%$
- La masse volumique  $\rho \approx 7,86 \text{ Kg/dm}^3$

Les réactifs habituels ne le colorent pas mais révélant les joints de ses grains [11],[12] .

#### **I-6.1.2. Cémentite**

C'est une combinaison chimique du fer et du carbone ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) elle se forme pendant la cristallisation primaire des alliages fer-carbone sa composition correspond à une teneur de 6,67%C. Les caractéristiques mécaniques de la cémentite sont:

- Dureté HB = 800 très dure
- Fragile  $K = 0$
- Résistance à la rupture  $R_r = 200 \text{ daN/mm}^2$
- Allongement  $\approx 0\%$
- La masse volumique  $\rho = 7,82 \text{ kg/dm}^3$ , elle n'est colorée que le picrate de sodium à l'ébullition.

#### **I-6.1.3. Perlite**

C'est un mélange mécanique de deux phases (ferrite + cémentite) elle se cristallise de l'austénite à la teneur du carbone 0,85%.

Généralement sous forme lamellaire chaque grain est formé de lamelles alternées et de cémentite dont l'épaisseur et les écarts dépendent de la vitesse de refroidissement. La distance entre deux lamelles 0,28 et 0,35  $\mu\text{m}$ . La perlite est :

- Dure ( HB=200 environ )
- Résistance a la rupture ( R= 850 environ )

- Assez ductile (  $A=10$  )
- Elle est colorée par les réactifs habituels acides. La cémentite apparaît en gris clair et la perlite est uniformément en gris foncé, la perlite existe aussi sous forme globulaire, ou la cémentite apparaît en petits grains blancs de contour noir sur un fond de ferrite.

### **I-6.2. Constituants de transition**

#### **I-6.2.1. L'austénite**

C'est une solution solide de carbone dans le fer  $\gamma$  elle est stable à haute température. L'austénite est cubique à face centrée (CFC).

Les caractéristiques mécaniques de l'austénite sont :

- Dureté HB = 300
- Résistance à la rupture  $R_r = 50 \text{ daN/mm}^2$
- Resilience  $K = 30 \text{ j/cm}^2$
- Allongement  $A \approx 60 \%$

#### **I-6.3. Les constituants hors d'équilibre**

Les nombres de dureté donnés à titre indicatif correspondent à une teneur en carbone moyenne de 0,85% (teneur de l'eutectoïde).

##### **I-6.3.1. La martensite**

Elle est constituée par une solution saturée du carbone solide dans le Fer  $\gamma$ .

Elle est dure mais fragile  $HB \approx 750$  [13].

##### **I-6.3.2. La troostite**

S'obtient à partir de l'austénite par refroidissement à vitesse moyenne, c'est un agrégat ferrite + cémentite  $HB = 250$  à  $400$

##### **I-6.3.3. La Sorbite**

Sa constitution physico-chimique et sa structure sont analogues à celles de la troostite

Elle est obtenue par réchauffage d'un acier trempé martensitiquement (revenu)

$HB \approx 300$  à  $500$

##### **I-6.3.4. La bainite**

Constituant obtenu:

Soit par trempe isotherme bainitique.

Soit directement par refroidissement.

La bainite est un agrégat de carbure et de ferrite plus ou moins saturé en carbone.

$HB \approx 500 - 540$ . [13].

**I-7. Transformations avec diffusion**

Les transformations par diffusion se déroulent toujours en deux étapes : la germination et la croissance. Dans la première, les nouvelles phases apparaissent sous la forme de germes engendrant des interfaces avec le cristal mère. La réaction se poursuit par progression de l'interface dans l'étape de la croissance.

Pour les aciers faiblement alliés, dans le cas du soudage ou de la trempe, les transformations au chauffage (austénitisation) ou transformation au refroidissement de l'austénite en ferrite sont, par exemple, des transformations diffusionnelles [14] .

**I-7.1. Transformation ferritique**

La ferrite est une solution solide d'insertion de carbone dans du fer  $\alpha$  .C'est le premier produit de la transformation de l'austénite au cours d'un refroidissement lent à une température élevée. Pour des vitesses de refroidissement très petites et pour une teneur en carbone (ou solubilité) inférieure ou égale à 0.02%, toute l'austénite se transforme en ferrite, sinon une autre transformation s'initie, c'est la transformation perlitique.

**I-7.2. Transformation perlitique**

La perlite est un constituant métallurgique biphasé; le carbone en excès vient enrichir l'austénite non encore transformé. La transformation ferritique est interrompue lorsque l'enrichissement de l'austénite en carbone est suffisant pour permettre la germination de la perlite. La formation de la perlite commence par la germination de la cémentite. Plus la vitesse de refroidissement est élevée plus la proportion volumique de perlite est grande .

**I-7.3. Transformation bainitique**

Cette transformation se produit pour une vitesse de refroidissement relativement élevée et seulement pour des aciers alliés. Cette transformation met en jeu singulièrement deux types de mécanismes ;

Diffusion et cisaillement.

De premier à bord, il y a formation de ferrite par cisaillement du réseau cristallin, ensuite la transformation se poursuit par diffusion plus ou moins importante des atomes des éléments alliés. Selon la morphologie de la phase formée, on distingue :

La bainite supérieure, dont les conditions de transformation sont proches de celles de la transformation perlitique.

La bainite inférieure, dont les conditions sont proches de celles de la transformation martensitique.

#### **I-7.4. Transformation martensitique (sans diffusion)**

Dans le cas d'une transformation martensitique, la vitesse de refroidissement est si élevée que la diffusion, qui est un phénomène thermiquement activé, n'a plus le temps de se produire. Ainsi, les atomes de carbone se trouvent piégés au sein de la maille ferritique qui, sursaturée en carbone, se déforme pour devenir quadratique, afin de contenir le carbone en excès. On assiste alors au cisaillement du réseau cristallin. La martensite se développe sous forme de plaquettes (ou aiguilles, lattes) pour les teneurs en carbone inférieure à 0.06% .

#### **I-8. Rôle des éléments d'alliage**

Les éléments d'alliages, et leurs proportions, peuvent être regroupés en deux familles:

la première est la famille des éléments alphagène :

Ils favorisent la prépondérance à température ambiante d'une structure cristallographique cubique centrée. Ce sont notamment le chrome, le molybdène, le silicium, le titane, le niobium, le vanadium, le tungstène et l'aluminium .

La seconde est la famille des éléments gammagène :

Ils favorisent la prépondérance à température ambiante d'une structure cristallographique cubique à face centrée. Ce sont notamment le nickel, le carbone, l'azote, le cobalt et le manganèse [15] .

##### **I-8.1. Bore**

En fluage à haute température, amélioration significative de la durée de vie de la pièce pour une faible augmentation de la teneur en bore (durée de vie augmentée d'un ordre de grandeur pour une teneur en bore passant de 10 à 120 ppm .

Dans le cas de zones soudées présentant de fortes ségrégations en bore, il tend à rendre plus sensible à la liquéfaction la zone affectée thermiquement, donc à la propagation de fissure. Il tend aussi à augmenter le nombre de carbures. Transmutation possible du bore en hélium gazeux [16] .

##### **I-8.2. Phosphore**

Le phosphore, est une impureté soluble dans le fer ( $\alpha$  et  $\gamma$ ). Si sa teneur est assez grande, elle forme le phosphure de fer ( $Fe_3P$ ). Il augmente la limite élastique et la charge de rupture, tout en diminuant considérablement la plasticité et la ductilité. Sa teneur ne doit pas dépasser 0,045% dans les aciers [09] .

**I-8.3. Silicium**

Le silicium désoxyde aussi l'acier (impureté) sa teneur ne dépasse pas 0,4%. Le silicium se dissout dans la ferrite et augmente la résistance à la rupture et augmente aussi fortement la limite élastique, mais il diminue la plasticité, avec une teneur voisine de 0,3% en masse .

**I-8.4. Soufre**

Le soufre dans les aciers au carbone est une impureté néfaste. Il forme avec le fer une combinaison chimique Fe-S insoluble dans le fer. Fe-S forme avec le fer un eutectique facilement fusible (988°C). La teneur en soufre dans les aciers ne doit pas dépasser 0,035% .

**I-8.5. Le chrome**

Augmente la trempabilité de l'acier, diminue le grossissement du grain lors de l'austénitisation, retarde l'adoucissement lors du revenu et contribue à la réduction de l'oxydation à haute température. Il forme également des carbures qui contribuent à la résistance à l'abrasion [17] .

En effet, Fishmeister et al. ont mis en évidence la substitution du molybdène par le chrome dans des carbures  $M_2C$  dans des aciers à outils. Ces résultats sont en accord avec les travaux de Rong et al. qui ont également montré la présence de chrome dans les carbures MC. De nombreux travaux font également état de la forte substitution du fer par le chrome dans la solubilité du chrome dans la cémentite étant toutefois limitée, une sursaturation de la cémentite en chrome entraîne sa dissolution au cours du revenu [18] .

**I-8.6. Le molybdène**

Confère à l'acier une très bonne résistance à l'usure à chaud via la présence de carbures très durs de 1500 ( $M_6C$ ) à 2000 Hv ( $M_2C$ ), et ralentit l'adoucissement.

Il augmente la trempabilité à condition que la température d'austénitisation soit suffisante pour assurer la dissolution partielle ou totale des carbures primaires. Il contribue également au durcissement par solution solide.

Lors du revenu, le durcissement secondaire est attribué à la précipitation de carbures  $M_2C$  . Mébarki a montré que, dans l'acier X38CrMoV<sub>5</sub>, les carbures  $M_2C$  présents après recuit sont remis en solution lors de l'austénitisation à 980°C et ne sont pas reformés lors des revenus après trempe. De plus, Michaud [18] a montré que l'ajout de 2.7% de molybdène dans le même acier provoque la précipitation de carbures primaires et secondaires  $Fe_3Mo_3C$  .

**I-8.7. Le vanadium**

Est un élément important dans les aciers à outils pour l'obtention d'une bonne dureté à chaud et d'une bonne résistance à l'usure en raison de la présence de particules très dures de



carbures de vanadium. Les propriétés tribologiques de ces carbures sont par ailleurs très appréciées pour les applications outillages. De petites additions, voisines de 0.2% en masse [18], sont très efficaces pour éviter le grossissement de grains lors du traitement thermique .

#### **I-8.8. Le cobalt**

Il augmente la température du liquides, ce qui permet d'effectuer l'austénitisation à des températures plus élevées et par voie de conséquence de mettre une quantité plus importante d'éléments d'alliages en solution. En effet, le cobalt augmente l'activité du carbone dans la ferrite .Rong et al [18] ont montré que le cobalt diminue la vitesse de coalescence des carbures secondaires au cours du sur-revenu. En effet, le cobalt diminue la diffusivité du carbone et des éléments d'alliages dans la ferrite .

#### **I-8.9. Le nickel**

A une influence favorable sur la trempabilité et la résistance aux chocs. Le nickel contribue également au durcissement par solution solide . Cependant, son influence est défavorable sur la résistance au revenu, en liaison avec son incidence sur l'augmentation de la cinétique de diffusion du carbone . En effet, Yin et al. mis en évidence que le nickel diminue la solubilité du chrome en solution solide, permettant une distribution plus fine des précipités. De plus, le nickel diminue la solubilité du carbone dans la solution solide . Michaud a mis en évidence que le nickel accélère la coalescence des carbures secondaires. Il améliore la résistance à la rupture par clivage et diminue la température de transition fragile-ductile [18] .

#### **I-8.10. Carbone**

C'est l'élément essentiel pour durcir l'acier. Au-delà de 0,6% de carbone, on atteint la zone des aciers à outils caractérisée par de hauts niveaux de dureté et qui correspond au domaine des aciers de travail à froid et des aciers à coupe rapide. Il faut noter que l'augmentation progressive de la teneur en carbone conduit à un abaissement de la température de liquides et de solides et, par voie de conséquence, à une réduction des domaines de température correspondent à la transformation à chaud et au traitement thermique [19] .

#### **I-8.11. Manganèse**

Le manganèse est une impureté (désoxydant) dans les aciers, sa teneur ne dépasse pas 0,8% il forme avec le carbone : le carbure de manganèse ( $Mn_3C$ ) plus stable que  $Fe_3C$ . Le manganèse augmente la résistance à la rupture et la limite élastique sans diminuer la plasticité [19] .

Le rôle des éléments d'addition sur les propriétés mécaniques est indiqué au (Tableau I-3) .

| Eléments d'alliages | Symboles chimiques | Caractéristique du métal |    |     |    |   | Transformation de forme |              |             |
|---------------------|--------------------|--------------------------|----|-----|----|---|-------------------------|--------------|-------------|
|                     |                    | Rr                       | Re | A % | H  | K | usinabilité             | forgeabilité | Soudabilité |
| Carbone             | C                  | ++                       | +  | -   | ++ | - | -                       |              | -           |
| Chrome              | Cr                 | ++                       | +  | +   | ++ | - | -                       |              |             |
| Manganèse           | Mn                 | ++                       | +  | +   | ++ | + | -                       | +            | +           |
| Molybdène           | Mo                 | ++                       | +  | +   | +  | + | +                       | +            | +           |
| Silicium            | Si                 | +                        | ++ |     | +  |   | -                       |              | -           |
| Nickel              | Ni                 | +                        |    | ++  | +  |   |                         |              |             |
| Cobalt              | Co                 | +                        |    |     |    | + |                         |              |             |
| Vanadium            | V                  | +                        | +  | +   | +  | + |                         | +            | +           |
| Tungstène           | W                  | +                        |    | +   | +  | + |                         |              |             |
| Phosphore           | P                  | +                        |    | -   | +  |   | +                       |              |             |
| Soufre              | S                  | +                        |    | -   |    |   | +                       | -            | -           |

Tableau I-3 . Rôle des éléments d'alliages sur les propriétés des métaux [20].

- ++ Forte augmentation**
- + Augmentation**
- Diminution**

### I-9. Les diagrammes Fer-carbone

Les diagrammes fer-carbones se solidifient en donnant naissance aux solutions solides interstitielles (ferrite, austénite), d'une part, et à de la Cémentite ou du graphite d'autre part. Deux diagrammes peuvent être établit .

Un diagramme Fer-carbone à Cémentite ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) appelé diagramme métastable. Les atomes de carbone remplissent plus ou moins les interstices ou, les vides laissés entre les atomes de fer de chaque maille. Les caractéristiques de la structure de base sont modifiées, le fer devient acier ou fonte avec de meilleures propriétés. Sous certaines conditions d'équilibre, le carbone peut s'amalgamer, sans dissolution, au fer pour former du carbure  $\text{Fe}_3\text{C}$  ou cémentite qui contient 6,67%C, pourcentage maximal d'absorption.

Ce diagramme est très utile pour comprendre les aciers, les fontes et les traitements thermiques. Il est limité à droite par la cémentite (6,67%C, matériaux fragiles, cassant, très dure) et fait apparaître les deux grandes familles de métaux ferreux :

Les aciers (entre 0,008% et 1,7%) et les fontes (de 1,7% à 6,67%C).

Ligne **A<sub>1</sub>** (723°C) :

Elle marque la fin de la transformation de la perlite, mixture de fer contenant 0,83%C, en austénite, au dessus de 723°C la perlite n'existe plus.

Ligne **A<sub>3</sub>** :

Elle précise la fin de la transformation de la ferrite en austénite, la ferrite n'existe plus au-dessous de cette ligne.

Ligne **A<sub>cm</sub>** :

Elle indique la fin de la dissolution, après dissociation, de la cémentite dans l'austénite lorsque celle-ci existe.

Symboles **A**, **r** et **c**

Ils sont normalisés aux normes internationales, le symbole A est utilisé pour arrêt, r pour refroidissement et c pour chauffage [08].

Exemple :

**Ar<sub>1</sub>** signifie passage de la ligne A<sub>1</sub> lors d'un refroidissement

**Ac<sub>3</sub>** passage de A<sub>3</sub> lors d'un chauffage

**A<sub>1</sub>** : Transformation eutectoïde-perlitique

727°C

**A<sub>2</sub>** : Transformation magnétique

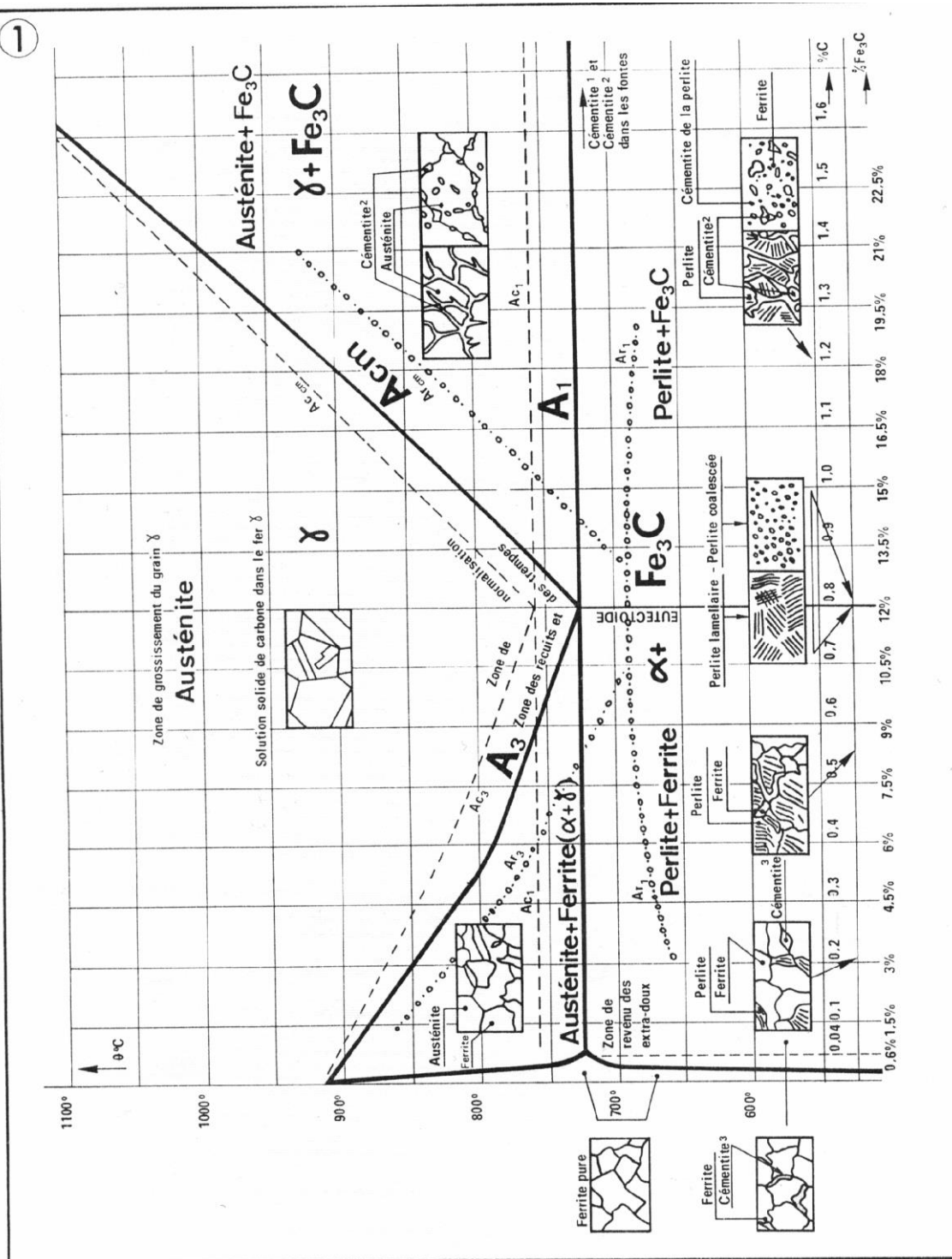
768°C

**A<sub>3</sub>** : Transformation alpha-gamma

906°C

**A<sub>4</sub>** : Transformation gamma-delta

1401°



ACIERS AU CARBONE

9.21.1. D'après Pokorny, La position des lignes  $A_1$ ,  $A_3$ ,  $Ac_m$  varie avec la teneur en Mn-Si-P. La position des lignes  $Ar$  et  $Ac$  varie de plus avec  $d\theta/dt$  et la propreté de l'acier.

Figure I-4. Diagramme Fer-C [08].

**I-10. Propriété des aciers**

Le point de fusion des aciers varie de 1350 °C à 1450°C et ce suivant la teneur en carbone.

Pour un acier contenant 0,83%C ;dans ce cas l'acier est constitué d'un seul constituant (perlite pure), il est dit eutectoïde.

Pour un acier contenant de 0,008% C à 0,83 % C , toute la cémentite avec une certaine masse de ferrite, forment de la perlite (la ferrite reste en excès). Ces aciers sont dits hypoeutectoïdes et sont constitués de deux constituants ( P+F libre ).

Pour des aciers contenant de 0,83 à 1.7 % C ; dans ces aciers, toute la ferrite avec une certaine masse de la cémentite, forment de la perlite ( la cémentite reste en excès ). Ces aciers sont dits hypereutectoïdes et sont formés de deux constituants ( perlite + cémentite libre ) [08] .

**I-11. Soudabilité des métaux et alliages****I-11.1. Définition**

Tout matériau métallique est dit soudable à un degré par un procédé et pour un type d'application donnée, lorsqu'il se prête moyennant les précautions correspondant à ce degré à la réalisation d'une construction entre les éléments dont il est possible d'assurer la continuité métallique par la constitution de joints soudés , qui par leurs caractéristiques locales de leur présence donnent satisfaction aux propriétés requises [21].

L'étude de la soudabilité d'un produit peut être envisagée sous trois aspects principaux :

- la soudabilité opératoire
- la soudabilité métallurgique ou locale
- la soudabilité constructive ou globale [22].

**I-11.2. Soudabilité opératoire**

Une première catégorie de problème se présente, au moment de l'exécution de la soudure, lorsque le comportement du métal, ou Alliage à souder fait obstacle à l'obtention de la continuité métallique, dans le sens où le problème est dans l'exécution même de la soudure, le problème évoqué concerne la soudabilité opératoire .

**I-11.3. Soudabilité métallurgique ou locale**

Si dans une soudure réalisée, l'une des zones qui la constituent (zone fondue ,zone de liaison et zone affectée thermiquement) se trouve altérée du fait de l'opération elle-même, au point de remettre en question le comportement de l'assemblage dans les conditions de services prévus, on parle alors de soudabilité locale .

**I-11.4. Soudabilité globale**

Si la continuité métallique entre les parties à assembler pose le problème du comportement d'ensemble de la construction soudée, il s'agit de la soudabilité globale .

Ce problème résulte généralement des méfaits dus aux contraintes résiduelles ainsi qu'aux effets locaux déjà mentionnés ; ces deux résultants de l'opération de soudage.

**I-11.5. Carbone équivalent métallurgique CEM**

Dans le cas des aciers un critère de soudabilité est donné par le facteur carbone fixé par l'institut international de soudure. et qui est donné par :

$$\text{Céq \%} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu\%}{15} \quad (\text{I.1})$$

Céq : le carbone équivalent métallurgique

Si  $CE \leq 0.40$  on peut souder sans précaution.

Si  $0.41 \leq CE \leq 0.60$  il faut donc effectuer un préchauffage avec la température entre 200 à 350 C°

Si  $CE \geq 0.6$  notre acier est difficile à souder.

Si  $CE > 0.7$  l'acier est non soudable [23] .

**I-11.6. Le Carbone équivalent compensé C.E.C**

La B.R.W.A (British research welding association) a superposé à la notion de carbone équivalent métallurgique ( C.E.M ) la notion de carbone équivalent compensé C.E.C.

Celui-ci tient compte de la géométrie du joint en particulier de l'épaisseur

$$\text{C.E.C} = \text{C.E.M} + 0.005 \times e \quad (\text{I.2})$$

e : épaisseur de la tôle .

**I-12. Soudage des aciers****I-12.1. Historique**

Comme toutes les techniques que connaît l'homme actuellement, le soudage a connu à travers le temps beaucoup de rebondissements et d'améliorations dont le but d'atteindre cette ère à assembler les métaux de manière rigide est continue. La plus ancienne des méthodes connues, consistait à marteler ou forger les pièces chauffées l'une par rapport aux autres sur une enclume. Au début du XX<sup>e</sup> siècle, un autre procédé qui s'apparente au soudage se développa ; il s'agit du rechargement des pièces moulées. Une pièce moulée est fabriquée en remplissant un moule de métal fondu ; puis en laissant un moule autour de la partie usée ou brisée. Du fer en fusion était ensuite versé dans le moule, jusqu'à ce que la surface de la pièce s'amollisse. Le moule était reformé et enlevé après le refroidissement. En fait, il s'agissait plus d'un moulage que d'un soudage. Cette manière d'assurer une jonction entre plusieurs parties d'un ensemble a connu à travers le temps des améliorations et des modifications considérables. Actuellement le développement des procédés de soudage est dirigé vers le perfectionnement des techniques d'utilisation (procédure, métallurgie, et équipement), vers l'apparition des robots industriels et la programmation, vers l'application de nouvelles sources d'énergies [25],[26] .

Voici quelques dates qui ont marqué l'histoire du soudage .

|              |  |
|--------------|--|
| 1900         | Le premier chalumeau oxyacétylénique fait son apparition en France par Charles Picort.   |
| 1900 et 1907 | L'électrode fusible nue est née en URSS par Slarianov.                                   |
| 1907         | Le brevet pour l'électrode enrobée fut donné au suédois Kjellberg.                       |
| 1908         | La première décharge électrique entre deux électrodes en graphite est réussie.           |
| 1924         | Le premier brevet du soudage TIG est donné aux américains Divers et Hobard.              |
| 1925         | L'apparition du fil fourré à U.S.A.  |
| 1935         | L'apparition du soudage tous flux pondéraux aux U.S.A.                                   |
| 1948         | L'apparition du procédé MIG aux U.S.A.   |
| 1955         | Le premier brevet du soudage plasma fut donné aux U.S.A.                                 |
| 1960         | Apparition du procédé MAG pour des raisons économiques.                                  |
| 1950 et 1960 | Apparitions du soudage par explosion et le soudage par bombardement électronique France. |
| 1965         | Apparition du soudage avec le laser  |

Tableau I-4. Historique du soudage [27] .



**I-12.3. Procèdes de soudage**

A l'heure actuelle, des dizaines de procédés existent, leur classement dans la majeure partie du temps est basé sur la source d'énergie utilisée, le sous classement se fait en se basant sur l'énergie directement utilisée et puis sur la modalité de leurs utilisations. Les principaux procédés de soudage sont :

**I-12.3.1.Soudage à l'arc électrique**

Ce soudage consiste à utiliser les méthodes suivantes:

- Electrode enrobée
- Electrode réfractaire (non fusible) TIG
- Fil électrode sous protection gazeuse MIG ou MAG
- Fil électrode sous flux poudreux

**I-12.3.2.Soudage par résistance électrique**

Cette méthode se présente sous plusieurs aspects :

- Par point
- Par étincelage
- A la molette
- Par brasage

**I-12.3.3.Soudage par Focalisation**

La localisation de la jonction de deux métaux est faite par :

- Faisceau d'électrons
- Laser
- Infra rouge

Comparativement aux procédés de soudage nommés ci-dessus, il en existe d'autres comme par exemple :

**I-12.3.4. Le soudage au plasma**

Le soudage mécanique dans ce dernier l'exploitation est faite par différentes méthodes :

- Explosion
- Ultrason
- Friction
- A Froid

Le soudage par fusion est l'ensemble des procédés qui consistent à assembler des pièces de métal par fusion des parties en contact.

le soudage sans fusion est l'ensemble des procédés qui consistent à assembler des pièces de métal sans fusion des parties en contact.

le boulonnage, le rivetage et tous les autres modes d'assemblage du même type ne font pas partie du soudage sans fusion [24],[25].

I-13. Types fondamentaux des joints soudés

Les figures suivantes présentent les différents types des joints soudés.

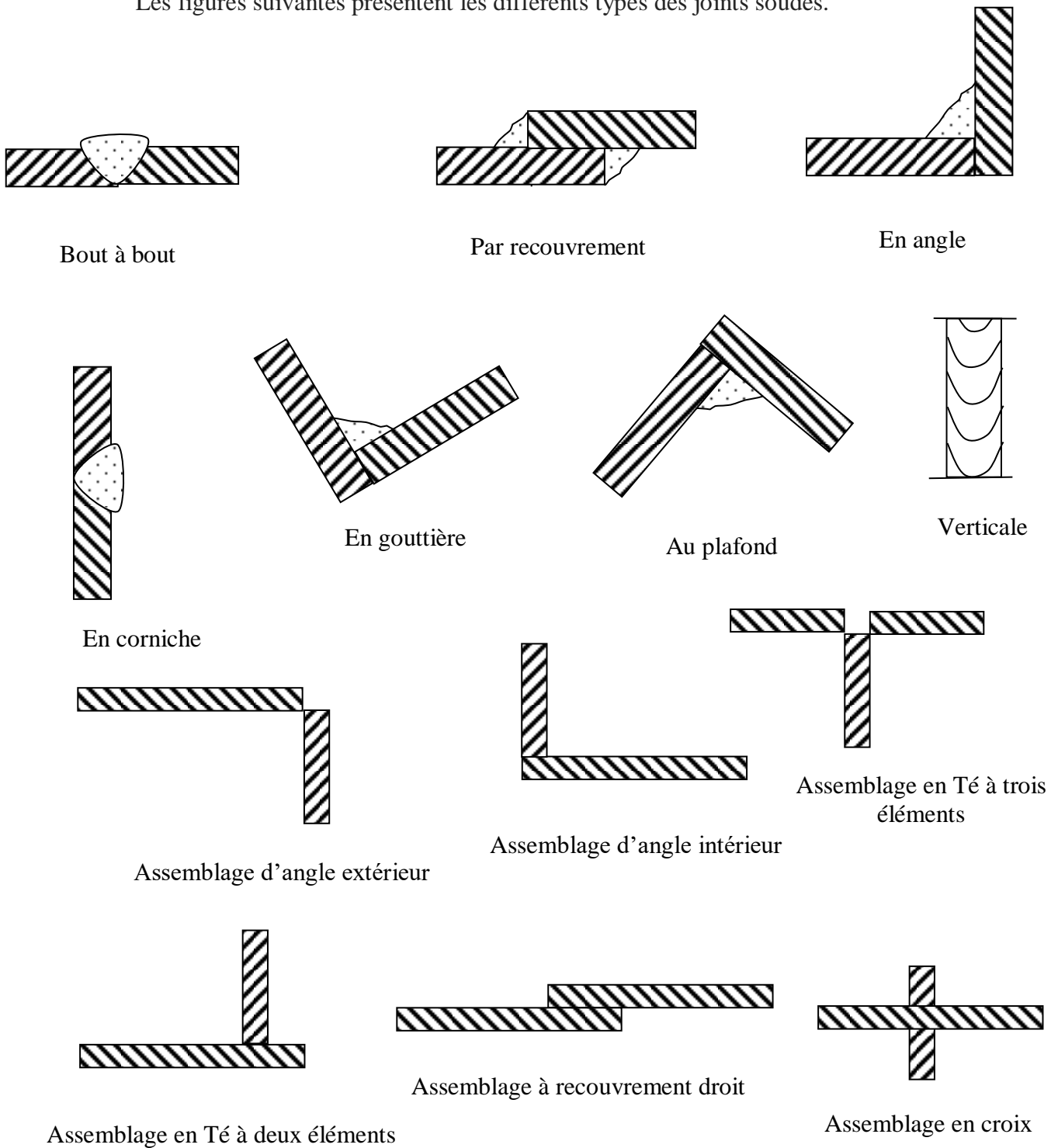


Figure I- 5.Types fondamentaux des joints soudés [23]

**I-14. Description du procédé de soudage par induction à haut fréquence**

Le chauffage HF est de plus en plus utilisé pour le soudage longitudinal des tubes métalliques et des profilés . Le chauffage par induction s'impose également pour des raisons de qualité et de technologie de fabrication .

La soudure à haute fréquence est un des procédés industriels les moins exigeants. Il est donc possible de produire des tubes de qualité acceptables pour la plupart des usages, même avec des installations très mal conçues .La raison principale motivante pour réaliser une installation correcte d'une soudeuse est la somme d'argent que l'on épargne sur le coût de l'énergie électrique.

Le matériau initial est le feuillard d'acier. La bobine de feuillard est d'abord déroulée sur une débobineuse et acheminée vers un accumulateur. La vitesse d'amenée est supérieure à la vitesse de la ligne de soudage si bien que l'accumulateur est toujours plein. La ligne est alimentée par l'accumulateur. Cela évite d'avoir à arrêter la ligne lors de la mise en place d'une nouvelle bobine et du soudage de l'extrémité de cette bobine avec celle de l'ancienne.

Après le passage dans l'accumulateur, les bords du feuillard sont façonnés afin d'obtenir le diamètre exact du tube ; les bords sont nettoyés, décapés et mis dans un état mécanique irréprochable.

Le feuillard est ensuite passé entre les galets de formage et courbé progressivement jusqu'à devenir un tube ouvert dans le sens longitudinal ( Figure I- 6 ) .

Avant soudage, la largeur de la fente est maintenue constante par un galet ou une lame afin de conserver des caractéristiques géométriques constantes lors du soudage.

Le soudage est réalisé par induction ou conduction. Dans la mesure du possible, des noyaux magnétiques refroidis par eau sont mis en œuvre à l'intérieur du tube. Ces noyaux guident le champ magnétique et le rendement s'en trouve augmenté.

En Europe, on utilise principalement le chauffage par induction [28] .

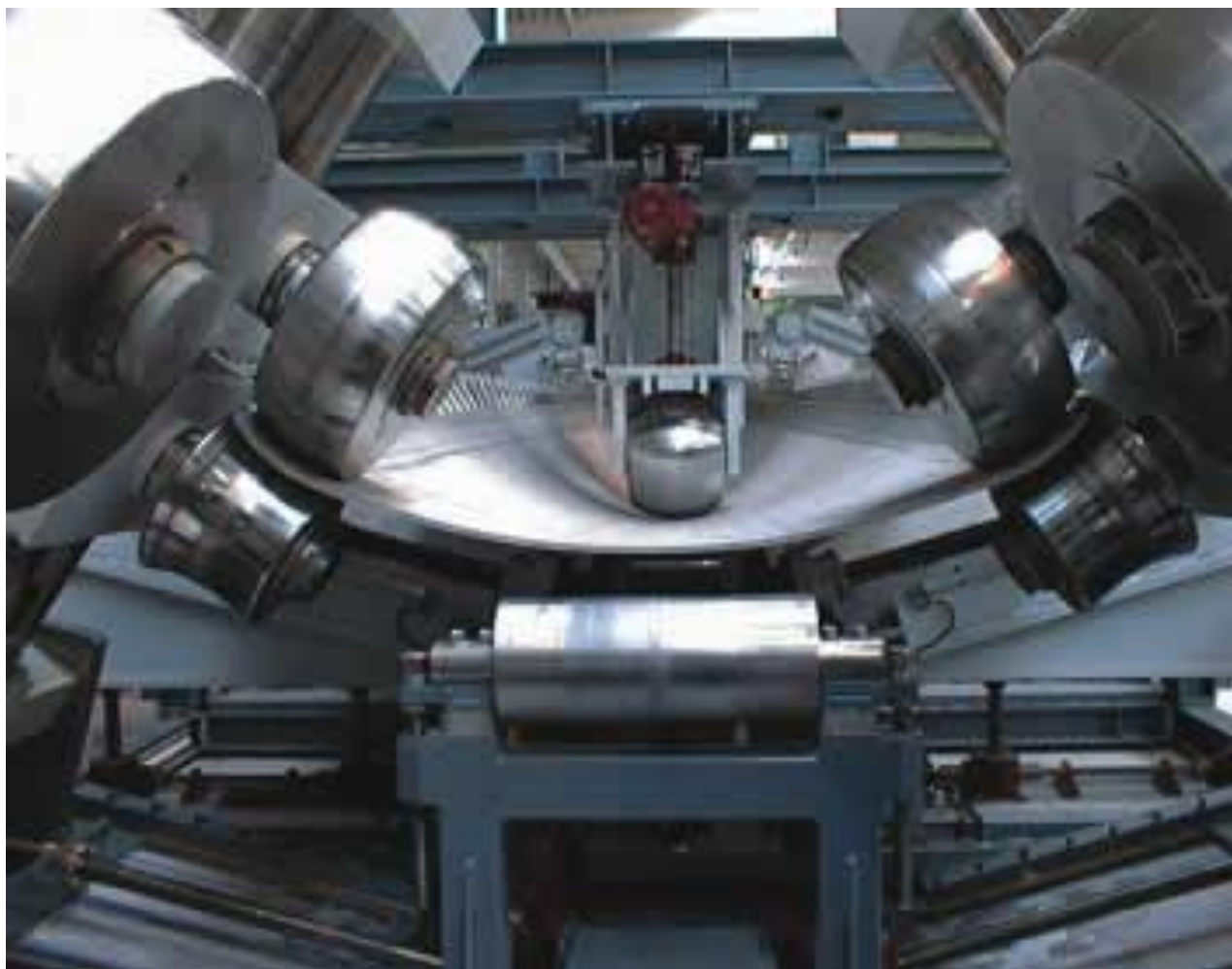


Figure I- 6. Formage progressif d'un feillard au moyen des galets [29] .

### I-14.1. L'énergie de soudage

L'énergie HF nécessaire au soudage est transmise au tube par une bobine (inducteur).

Cette transmission est effectuée par induction, sans contact avec le tube comme illustrent les ( Figures I-7 et I-8) .

L'inducteur est traversé par un courant élevé et doit être refroidi par eau. Et induit une tension HF dans le tube ouvert, qui donne naissance à la circulation d'un courant dont les lignes se renferment au point de contact des bords ( point de soudage).

Les filets de courant longeant les bords provoquent l'échauffement de ces derniers sur le tronçon entre l'inducteur et le point de soudage. Un échauffement supplémentaire au point de soudage amène spontanément le tube à la température de soudage. Cet échauffement est le produit, entre autre, par la sortie du champ magnétique, hors du tube, devant le point de soudage et par la concentration des lignes de courant au droit du point de soudage lui-même .

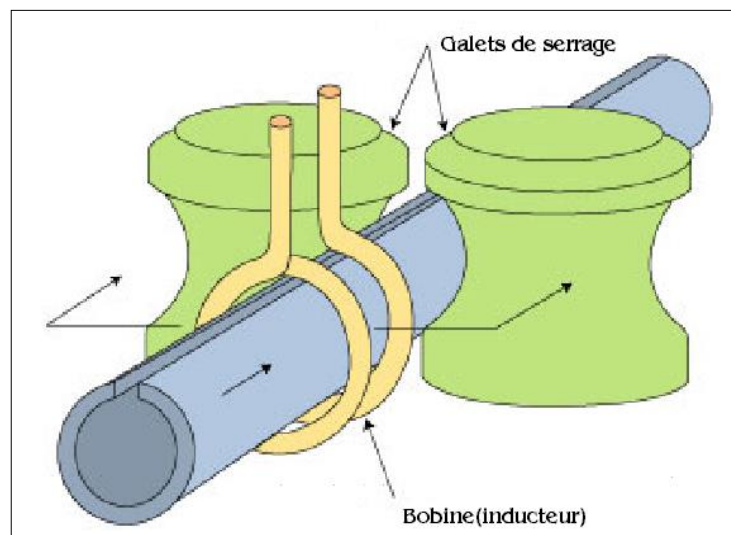


Figure I- 7. Chauffage des tubes par induction [29] .

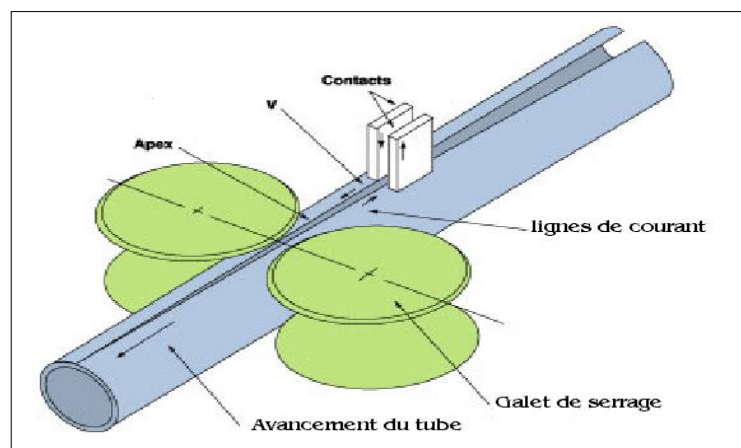


Figure I- 8. Chauffage des tubes par contact [29] .

Dans le cas du soudage par conduction, l'énergie HF est transmise au tube par des contacts appliqués par ressorts. Le procédé de soudage est semblable au procédé de soudage par induction. Cependant, l'usure des contacts et le risque d'échauffements non homogène constituent des problèmes à résoudre.

Au point de soudure (environ 1450°C), les bords du tube ouvert sont pressés l'un contre l'autre par des galets de serrage. Il s'ensuit un soudage par pression à chaud. Les bords du tube sont comprimés, cela crée un bourrelet qui est supprimés à l'extérieur, et éventuellement à l'intérieur, au moyen d'un racleur alors que le tube est encore chaud. Dans certains cas, le soudage est suivi d'un refroidissement.

Le tube est en suite calibré, un façonnage à froid lui donnant alors ces dimensions exactes, et enfin débité à la longueur voulue ( Figure I-9 ).



Figure I-9.( a ,b ). Tubes soudés par induction

### I-14.2. Chauffage par induction magnétique

Le chauffage par induction est une application directe de deux lois physiques: la loi de Lenz et l'effet Joule. Toute substance conductrice de l'électricité plongée dans un champ magnétique variable (créé par une bobine inductrice ou introducteur) est le siège de courants électriques induits ou courants de Foucault; ces derniers dissipent de la chaleur par effet joule dans la substance où ils ont pris naissance.

L'introducteur et le tube forment un transformateur avec l'inducteur jouant le rôle de bobinage primaire et le tube le secondaire à une seule spire, les fréquences dans ce cas varient souvent de 200 à 500kHz.

Afin de transmettre la plus grande partie de l'énergie à la pièce à traiter plusieurs paramètres sont à prendre en considération :

-La disposition respective des introducteurs et des pièces (couplage- longueurs respectives), la fréquence d'alimentation et l'effet de peau, qui caractérisent la répartition des courants induits dans la pièce, car plus la fréquence augmente plus les courants induits se concentrent en surface: cette notation fondamentale est déterminée par la profondeur de pénétration encore appelée épaisseur de peau,

-Les propriétés magnétiques électriques et thermiques des pièces à chauffer varient pour la plupart avec la température,

Le type d'inducteur ( géométrie du conducteur technologique ,Figure I-10 ) .

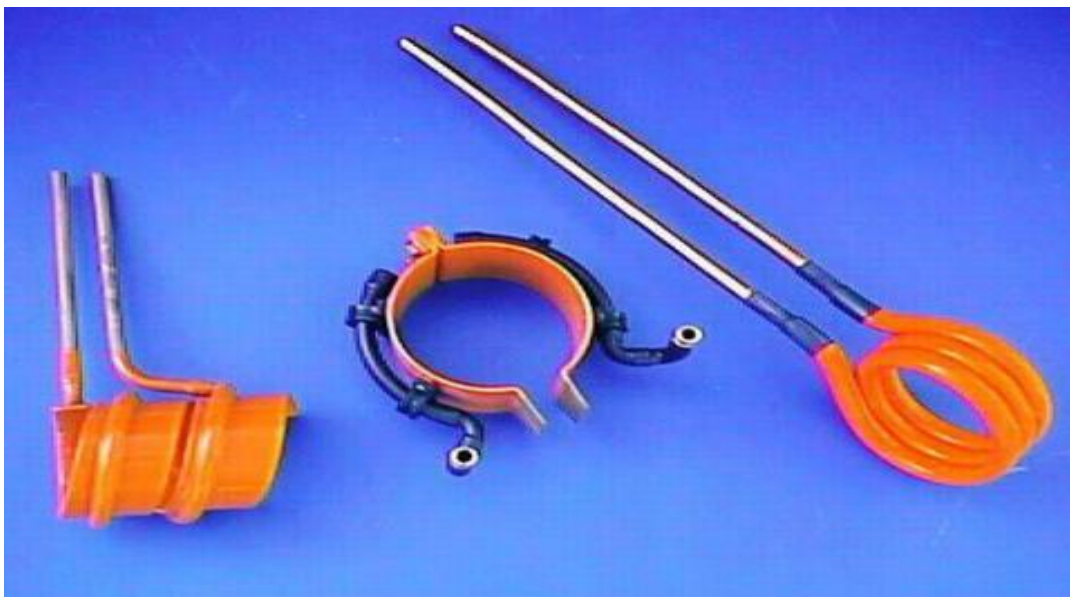


Figure I-10. Inducteurs Mono et Multi spires [30] .



### I-15. Le traitement thermique de recuit

Les traitements de recuit présentent une grande diversité, certains d'eux sont mis en œuvre pour éliminer les hétérogénéités structurales et chimiques dans les pièces brutes de fonderie ou de forge, et d'autres sont utilisés pour obtenir des structures dont les caractéristiques mécaniques répondent à la manière la plus satisfaisante à l'utilisation dans l'industrie .

#### I-15.1. Recuit de normalisation

En matière d'acier, le recuit ou la normalisation ont tous deux pour objet d'obtenir, au moyen d'un chauffage au dessus de point  $A_3$  provoquant l'austénitisation complète de la zone ou de la pièce traitée, suivi d'un refroidissement relativement lent, une structure affinée constituée de ferrite et de perlite qui remplace, quelle qu'elle aient été, la constitution et la structure à l'état brut de soudage.

#### I-15.2. Cycle d'un traitement thermique

En général le traitement thermique comprend 3 étapes :

- Un chauffage jusqu'à une température qui dépend du type de traitement voulu.
- Maintien isotherme à cette température de traitement.
- Un refroidissement dans un milieu préalablement défini ; ( Figure I-11 ).

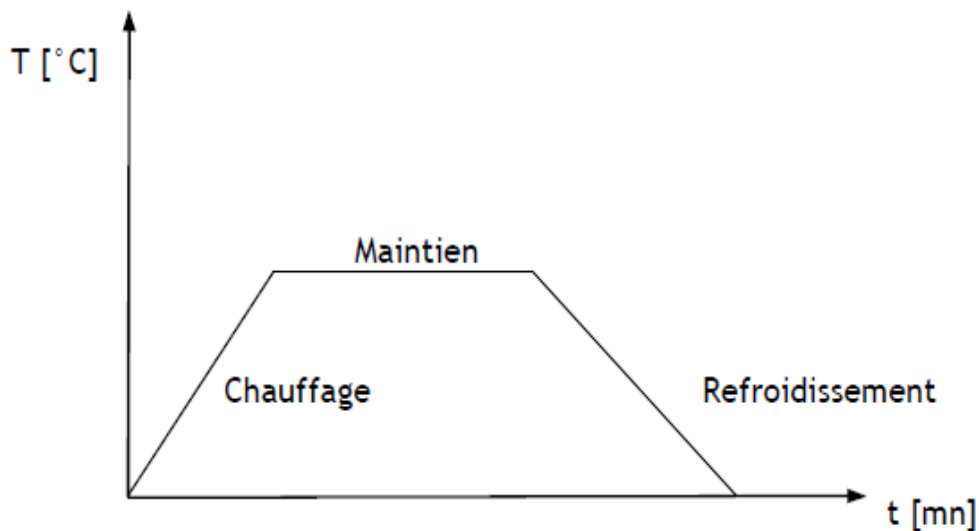


Figure I-11. Cycle d'un traitement thermique des soudures .

*Chapitre II*  
*Soudage des aciers doux*

## Soudage des aciers doux

### Introduction

Ce présent chapitre est réservé à l'aspect métallurgique du joint soudé dans les aciers .De plus les défauts principaux rencontrés dans un joint de soudure ont été présentés .

#### II-1. Soudure de l'acier ferritique au Carbone-Manganèse :

Les aciers C-Mn sont caractérisés par leur structure ferritique cubique centrée, c'est-à-dire qu'ils ne subissent pas de transformation  $\alpha \leftrightarrow \gamma$ . Les propriétés mécaniques de ces aciers faiblement alliés sont modérées, avec une limite conventionnelle d'élasticité  $R_{p0,2}$  de l'ordre de 300 MPa, et une résistance à la rupture  $R_m$  de l'ordre 500 MPa . La résistance mécanique des aciers ferritiques au carbone-manganèse est gouvernée par la taille de grain ferritique, les teneurs en manganèse et azote en solution solide, les proportions relatives de ferrite et de perlite, et par l'espacement inter-lamellaire de la perlite. Le manganèse apporte un durcissement par soluté substitutionnel, sa teneur est limitée à 1,7% afin d'éviter d'éventuels phénomènes de ségrégation. La teneur en carbone de ces aciers est généralement limitée à 0,2%, d'une part parce que la perlite a une influence néfaste sur la résistance à la rupture (Figure II-1),et d'autre part pour des impératifs de soudabilité [31] .

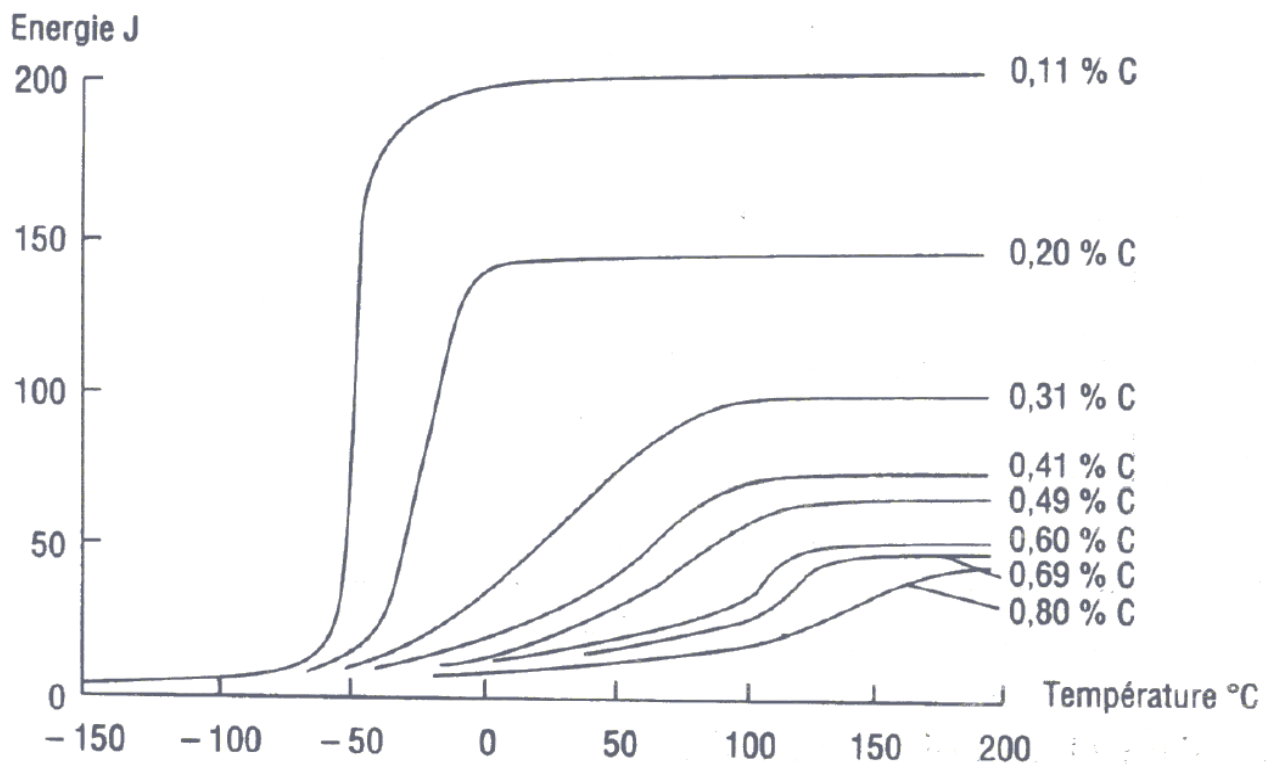


Figure II-1. Influence du carbone sur la courbe de résilience des aciers ferritiques au C-Mn [31] .

## II-2. Transformation de l'acier dans la zone réchauffée :

Béranger et al [31] établissent un schéma représentant les changements microstructuraux et la variation de la taille de grains se produisant dans la ZAT d'un acier à basse teneur en carbone 0,15% poids (Figure II-2) .

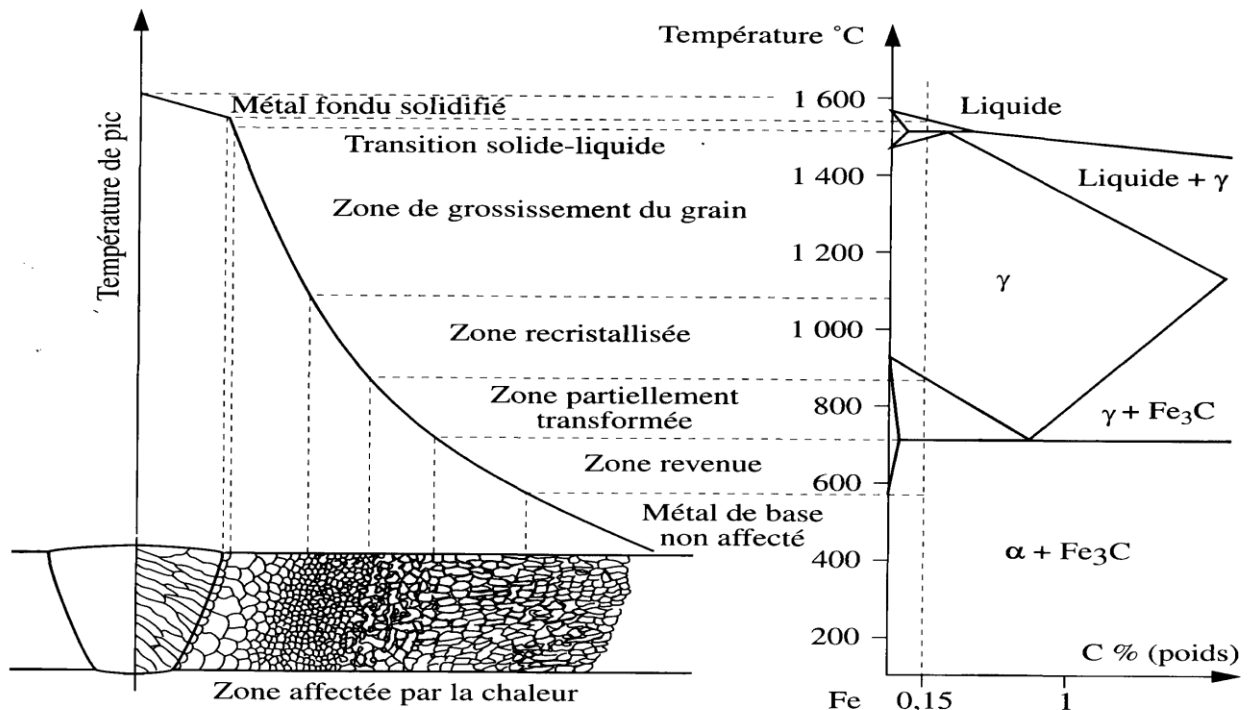


Figure II-2. Schéma des changements microstructuraux se produisant dans la ZAT d'un acier 0,15% [32].

L'énergie apportée au métal de base lors du soudage induit des cycles thermiques caractérisés par un chauffage très rapide immédiatement suivi d'un refroidissement dont la cinétique est contrôlée par les conditions de soudage. Le volume de métal de base dont la microstructure est altérée par ces cycles thermiques est dénommé zone affectée thermiquement (ZAT). Cette zone mesure quelques millimètres d'épaisseur de part et d'autre du cordon de soudure [31].

## II-3. Analyses métallurgiques des cordons de soudure

Les modifications de structures dans la zone thermiquement affectée, la zone affectée par la chaleur (ZAT) est comprise entre l'isotherme limitant le métal fondu et l'isotherme correspondant à la disparition de tout effet du chauffage sur la structure métallurgique du métal de base, ( Figure II-3) .

L'analyse métallurgique montre que la soudure peut être divisée en trois domaines :

Le métal de base, le métal déposé MF et la zone affectée thermiquement par le soudage ZAT

**II-3.1.Métal de base**

C'est la partie de la structure soudée qui est suffisamment loin de la source de chaleur pour qu'il n'y ait pas eu de transformation métallurgique significative lors de l'opération de soudage ; où la température maximale atteinte resta inférieure à environs 600°C , Il est constitué des deux tronçons de tube à assembler. [31] [29] .

**II-3.2 Zone affectée thermiquement**

La zone affectée thermiquement ou zone affectée par la chaleur ;est la partie du métal de base qui n'a pas été fondue mais dont les propriétés mécaniques ou la micro structure ont été modifiées à un degré quelconque par la chaleur de soudage. Dans cette zone on distingue, dans le cas soudures exécutées sur des métaux ayant un point de transformation d'une zone de transformation contiguë à la soudure et dans laquelle la température à été suffisante pour entraîner une transformation dite allotropique de la structure et, dans une modification des propriétés physique du métal, sans qu'il y ait un changement de sa composition chimique, dans l'autre partie de la zone thermiquement affectée, il n'y a pas en transformation allotropique, mais seulement des modifications, comme par exemple, de la grosseur et / ou la forme des grains du métal [23] .

**II-3.3.Zone de liaison**

Zone marquant la frontière entre la zone fondue et la zone thermiquement affectée ; en quelque sorte, c'est la limite entre le métal qui à été fondu et s'est solidifié et le métal qui est resté à l'état solide au cours de l'opération de soudage [23] .

**II-3.4. Zone fondue**

Au centre du joint se trouve la zone fondue . L'état fondu est transitoire et la solidification est obtenue soit par cessation de la source de chaleur (soudage par points) soit Par éloignement de la source de chaleur (soudage par fusion) [33] .

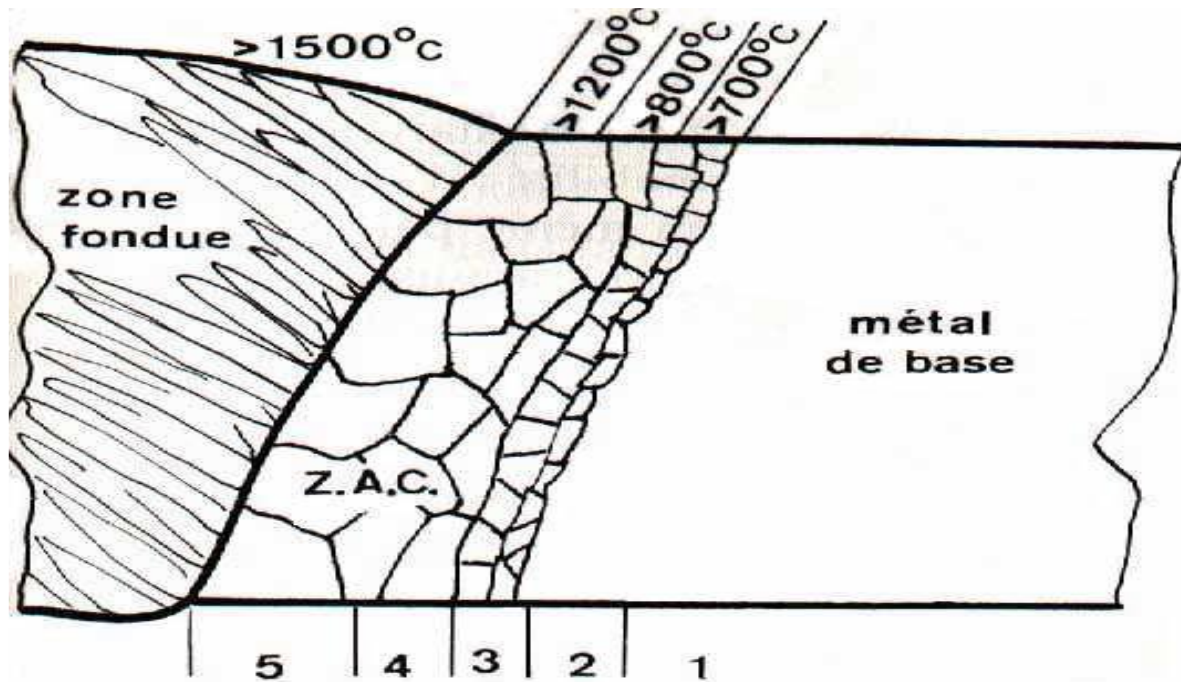


Figure II-3. Représentation schématique des différentes zones dans un joint soudé [34].

### II-3.5. Les sous-zones de la ZAT d'un soudage mono-passe

Pour un soudage mono-passe, on a généralement quatre sous zones (Figure II-4) respectivement rencontrées au contact du métal déposé, jusqu'au métal de base :

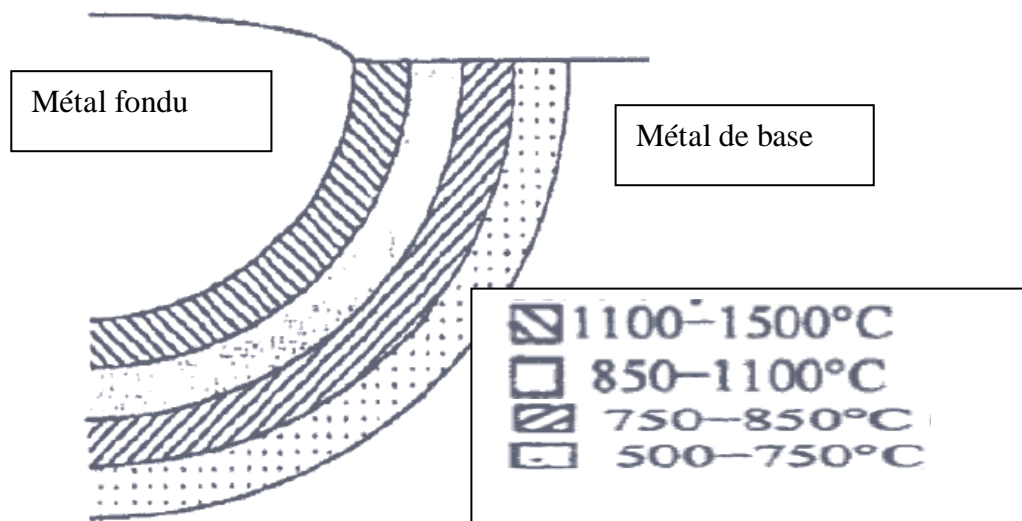


Figure II-4. Les sous-zones de la ZAT d'un soudage mono-passe [31]

les différentes catégories de microstructures observées dans la ZAT d'un acier ferritique faiblement allié.

- Zone affectée thermiquement à gros grains: la température maximale atteinte y est élevée, comprise entre 1100°C et 1500°C, ce qui entraîne une austénitisation puis un grossissement du grain .
- Zone affectée thermiquement à petits grains: le métal de base est porté à des températures comprises entre 850°C et 1100°C, il en résulte un bref passage seulement dans le domaine austénitique et une microstructure recristallisée .
- Zone affectée thermiquement chauffée dans le domaine intercritique : la température maximale atteinte est comprise entre 750°C et 850°C, ce qui entraîne une austénitisation partielle du matériau .
- la zone sub critique : cette zone est chauffée en dessous de la température de début de transformation austénitique (500°C -750°C), le métal ne subit qu'un revenu (restauration, précipitation) [31] .

## II-4. Les principaux défauts de soudures

La majeure partie des discontinuités se produisent dans les joints ou dans la ZAT. Généralement les soudures comportent des porosités, des inclusions, scories d'impuretés ou des fissures.

### II- 4.1. Influence des gaz

Elles sont causées par la présence de gaz résultant des réactions chimiques dans le métal d'apport et dans les enrobages, par l'humidité des pièces ou des électrodes.

#### II- 4.1.1. Absorption de l'hydrogène

L'hydrogène se dissout dans les aciers généralement sous forme atomique. Il exerce une forte action fragilisante sur l'acier. L'hydrogène absorbé favorise la formation des « fish eyes » ; taches claires appelées aussi œil de poisson apparaissant dans les faciès de cassure des pièces soudées ( Figure II-6 ). On a aussi la formation des soufflures ( Figure II- 7et 8 ) . Pour cela la teneur en hydrogène ne doit pas dépasser 0,001% dans les aciers [09] .

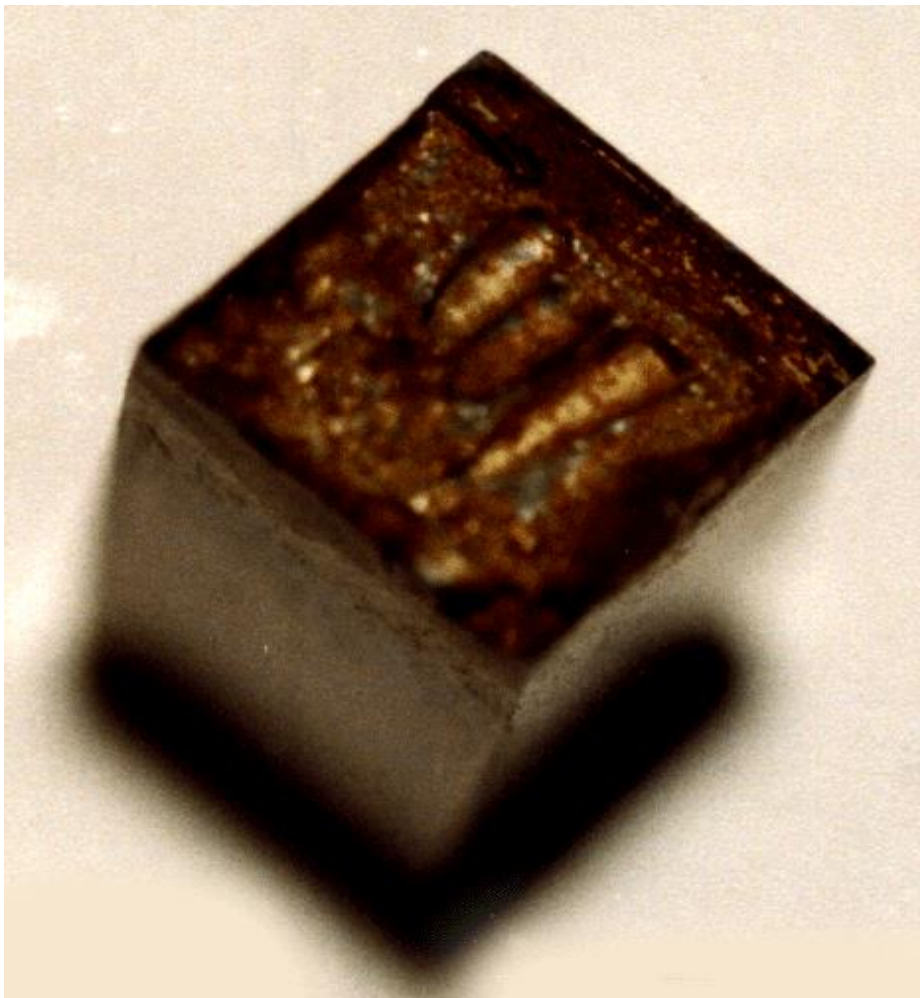


Figure II- 5. Aspect macrographique d'effet des gaz [35] .



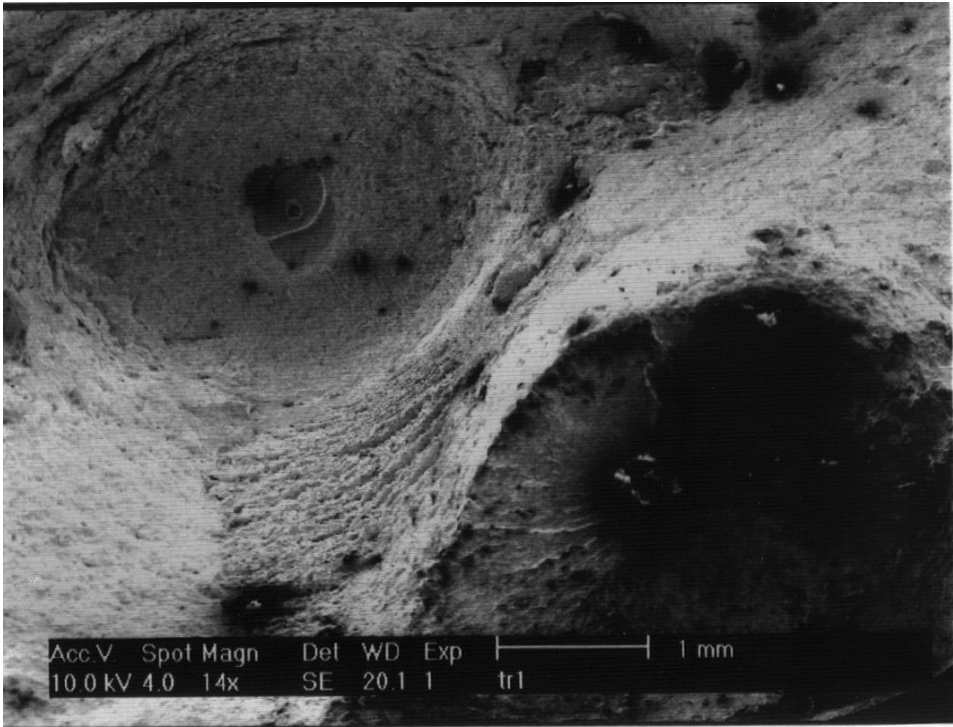


Figure II- 6. La formation des « Fish eyes » [35] .

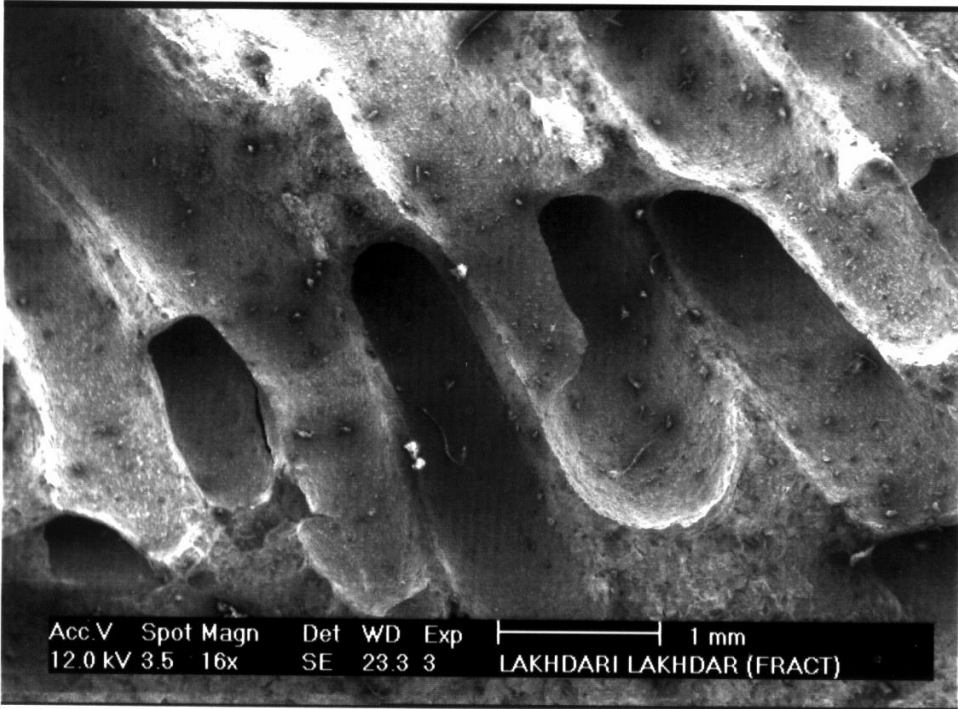


Figure II- 7. La formation des soufflures [35]

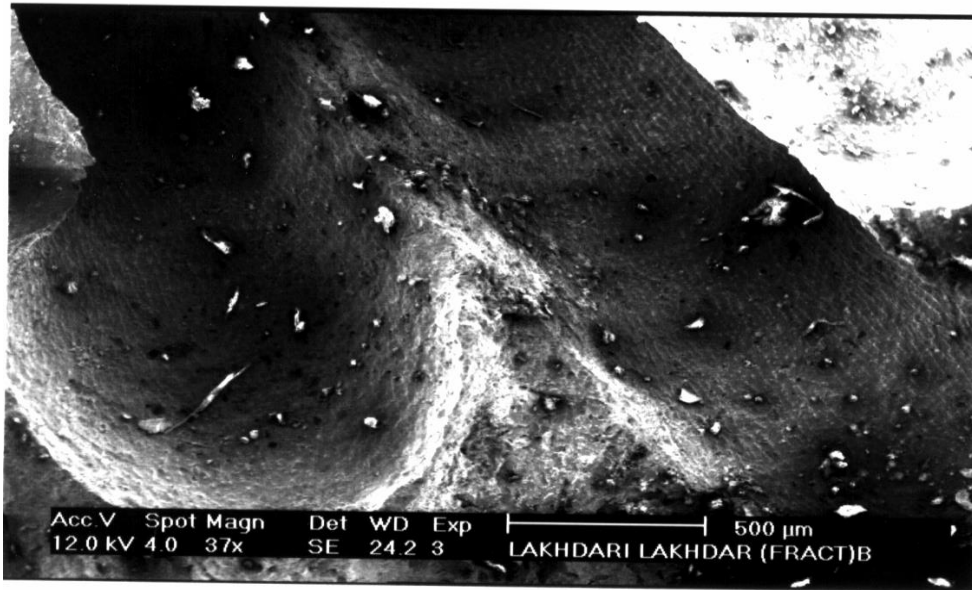


Figure II- 8. Effet des gaz, soufflures vermiculaires [35] .

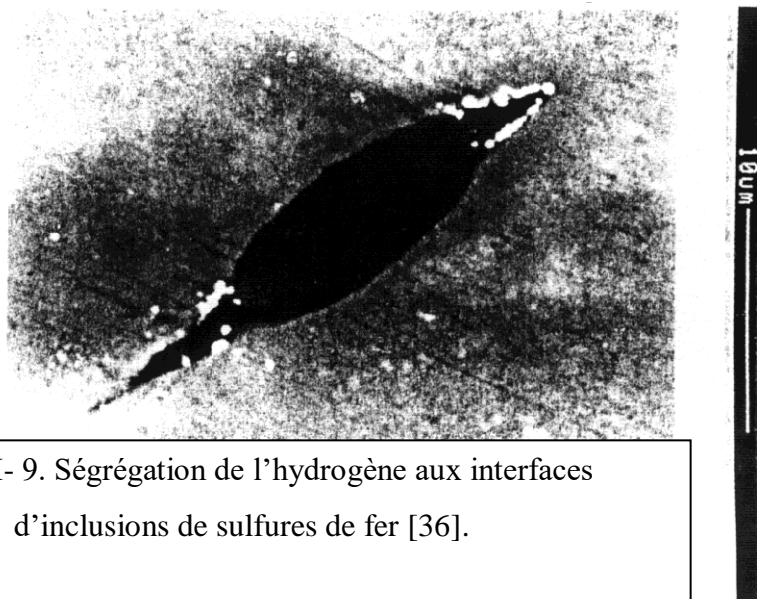


Figure II- 9. Ségrégation de l'hydrogène aux interfaces  
d'inclusions de sulfures de fer [36].

Pour éviter l'absorption de l'hydrogène, un préchauffage est appliqué pour réduire la vitesse de refroidissement ou un post chauffage pour faciliter le dégagement de ce gaz .

**II- 4.1.2. Absorption de l'oxygène**

L'oxygène est une impureté qui forme les oxydes avec le Mn, Si, Fe, Al,...etc. (inclusions non métallique). Ces derniers en se concentrant aux joints des grains, augmentent la dureté et la fragilité. C'est pourquoi la teneur en oxygène doit être diminuée pendant la production des aciers. L'oxygène se présente sous forme d'oxydes type FeO [18].

**II- 4.1.3. Absorption de l'azote**

L'azote forme aussi avec le fer et les autres éléments des inclusions non métalliques (nitrures) comme Fe<sub>2</sub>N, Fe<sub>4</sub>N, ...etc. Les nitrures se cristallisent à l'état dispersé comme aux joints et dans le volume de grains. L'azote augmente la résistance à la rupture, la limite élastique et aussi la résilience. Donc il faut introduire spécialement l'azote dans les aciers [18].

**II- 4.1.4. Les inclusions solides**

Ce sont les restes de laitier ou d'autres matières étrangères au joint, disposantes entre les passes ou au croisement de deux ou plusieurs soudures .

**II- 4.1.4.1. Les fissures**

Les fissures sont des ruptures qui sont provoqués en générale au cours de refroidissement, par des contraintes exercées sur les structures au cours de solidification ou de refroidissement, éventuellement fragilisées, notamment par la présence d'hydrogène. L'orientation de la localisation des fissures dépend de leur origine. Elles entrent toutefois, d'une manière systématique dans la famille des défauts plans c'est-à-dire des défauts dont l'une des dimensions est très petite devant les deux autres et dont le pourtour constitue, par conséquent, une entaille particulièrement aigue .

**II- 4.1.4.1.1. Fissures à chaud**

Ce type de défaut se caractérise par des fissures larges, ouvertes, perpendiculaires aux vagues de solidification et généralement oxydées à l'intérieur. La( Figure II-10) présente ce type de défauts de fissuration à chaud [37].

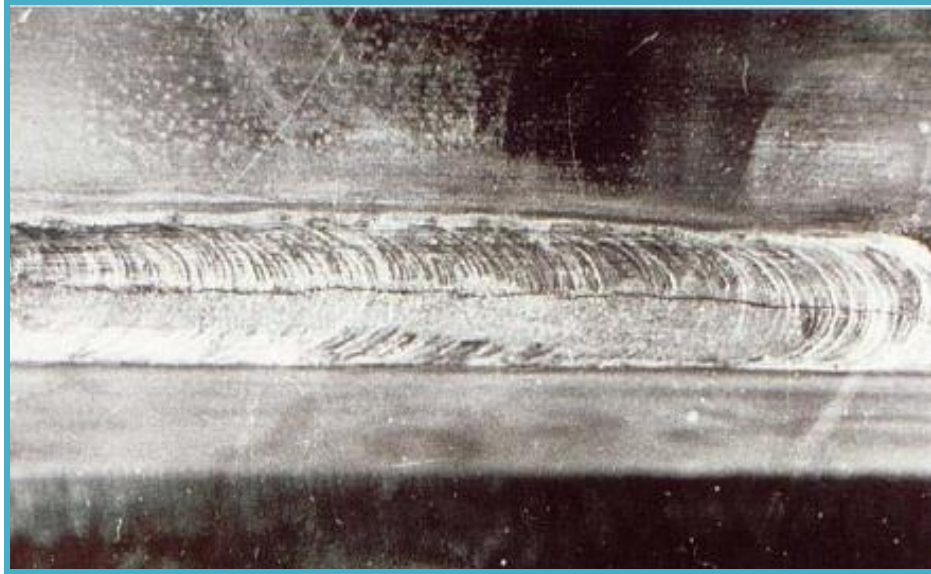


Figure II- 10. Fissure à chaud [37] .

#### II- 4.1.4.1.2. Fissures à froid

La fissuration à froid causée par des contraintes mécaniques résiduelles importantes, une présence d'hydrogène dissous et une phase fragile, ( Figure II- 11 ) , [38] .



Figure II- 11. Fissures à froid [38] .



Figure II- 12. Manque de fusion entre passes [32].



Figure II- 13. Fissure longitudinale [39] .

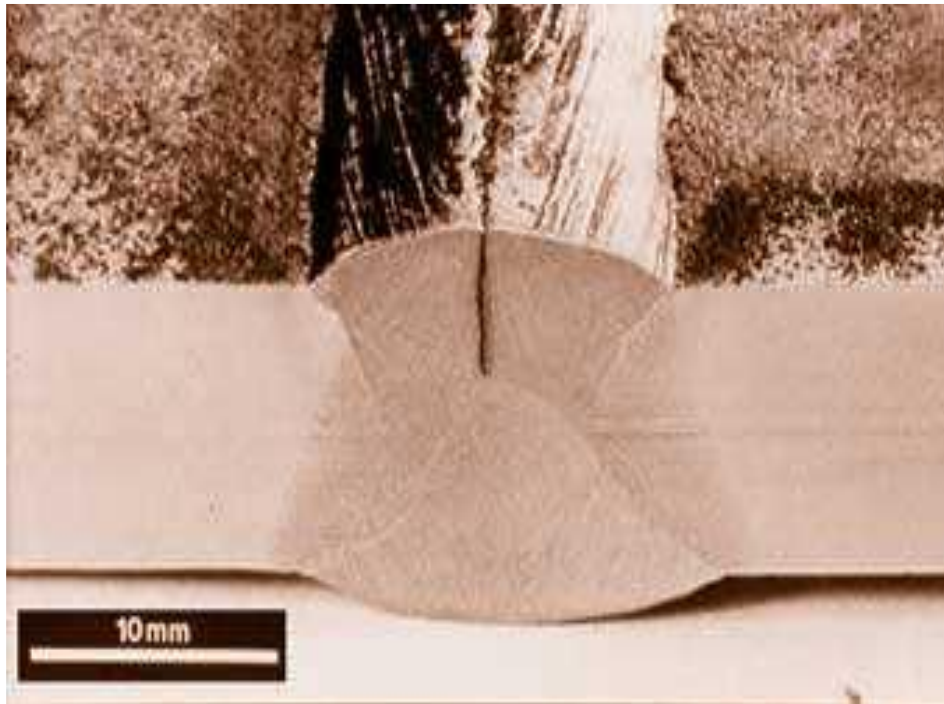


Figure II- 14. Fissure dans une soudure en V double [38] .



Figure II- 15. Porosité dans une soudure [35] .



Figure II- 16 . Manque de pénétration [35] .



Figure II- 17. Manque de liaison [29] .

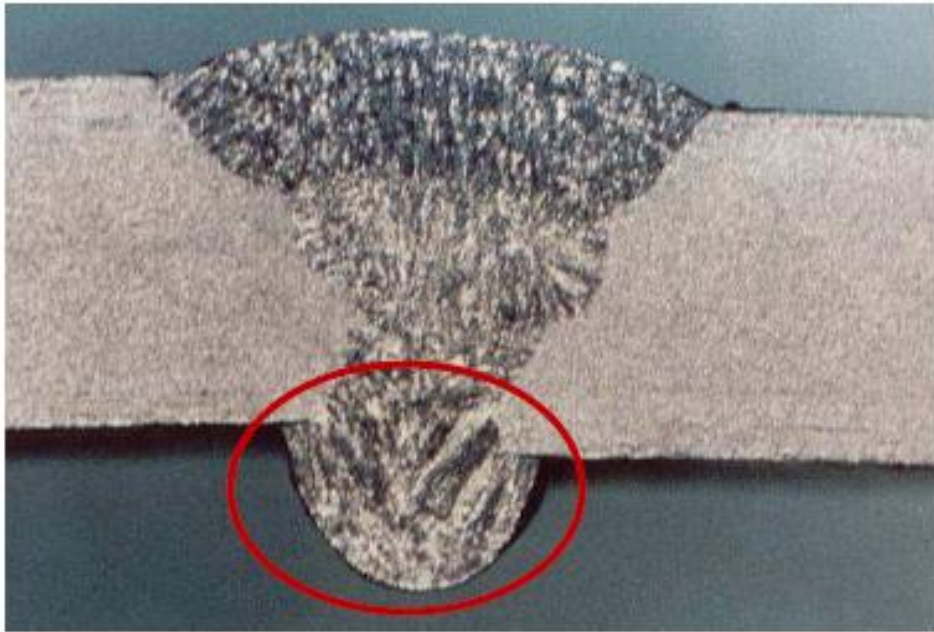


Figure II- 18. Excès de pénétration [38] .

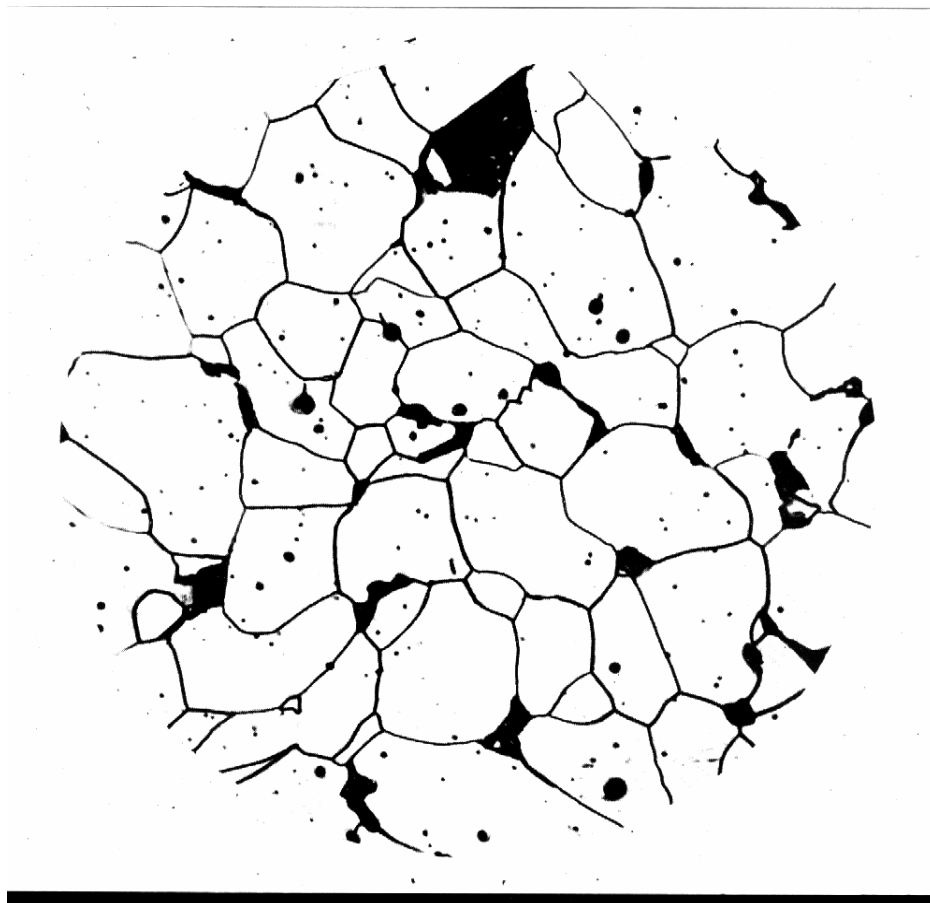


Figure II- 19. Scories dans une structure ferrito-perlitique [24] .



### II-5. La macrographie et micrographie d'un joint soudé d'un acier doux-écroui

La figure II- 20 ; montre les différentes microstructures dans un joint soudé d'un acier doux - écroui.

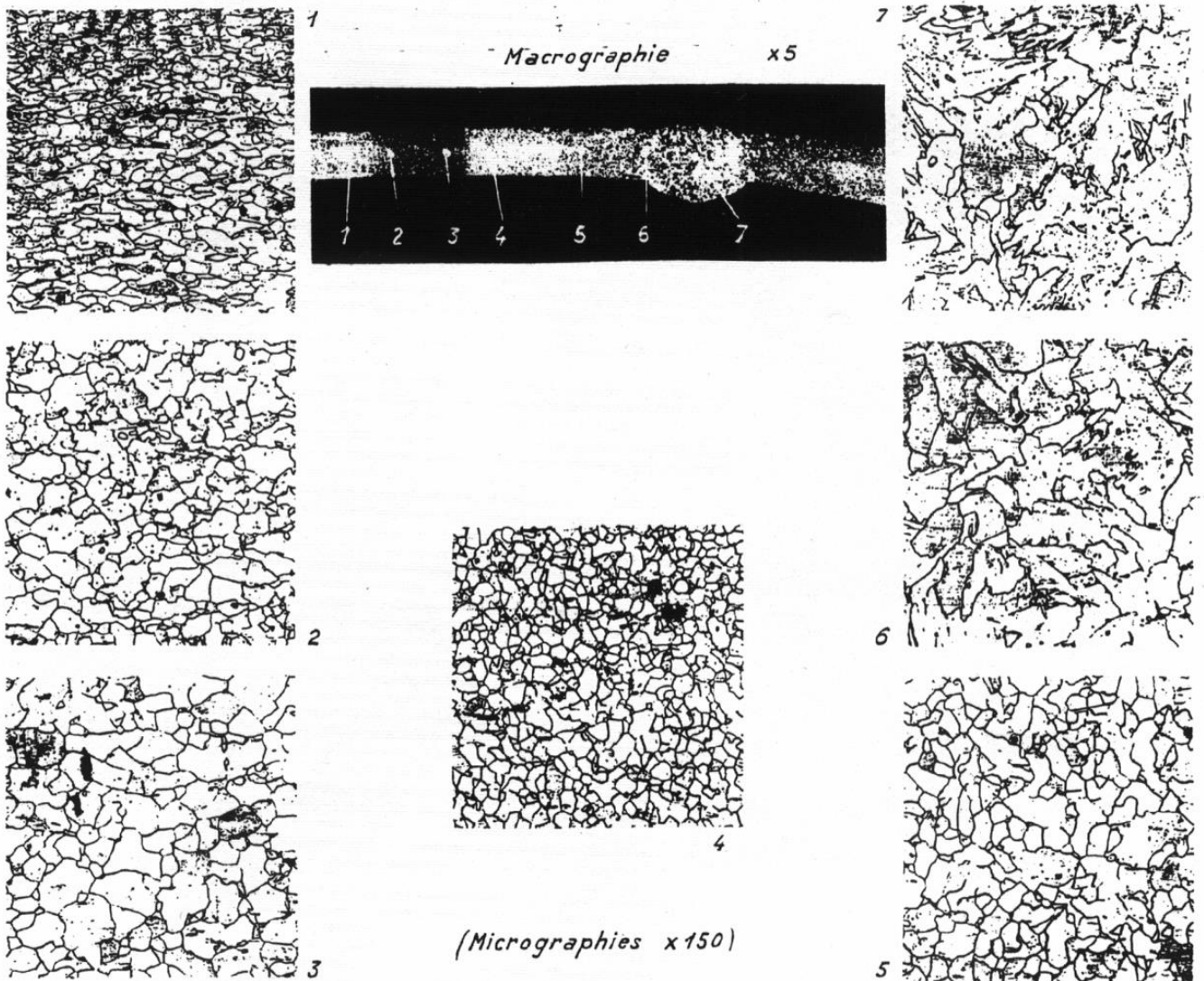


Figure II- 20 . Les états d'aciers doux-écroui [24] .

On peut dire que sur le plan macrographique on a les différentes sous - zones :

- métal de base
- recristallisation et surchauffe de la ferrite
- régénération thermique
- zone de surchauffe
- zone fondue

Par contre sur le plan micrographique on a les différentes microstructures :

- grains de ferrite orientés par écrouissage-effet du laminage.
- ferrite recristallisée-disparition de grains écrouis.
- grossissement du grain ferritique après recristallisation
- régénération thermique par transformation de la ferrite en austénite à l'échauffement et transformation inverse au refroidissement
- grossissement banal de l'austénite à l'échauffement
- structure de surchauffe
- structure brute de solidification de la zone fondue

II-6. Transformation en phase solide au cours du soudage (échauffement)

D'après la (Figure II.21), si un métal à l'état écroui **1** est soumis à un chauffage, on assiste à une recristallisation. On voit apparaître au voisinage de la température de recristallisation  $\theta_R$ , des germes **2** qui se développent en une structure équiaxe **3** dont les grains sont d'autant plus fins que le degré d'écrouissage initial est élevé. Cette structure est dite recristallisation primaire, se stabilise avec un léger grossissement du grain jusqu'à  $\theta_s$  à  $\bar{\theta}_s$  commence la surchauffe (recristallisation secondaire), les propriétés mécaniques évoluent en sens inverse des effets de l'écrouissage à savoir, le métal retrouve sa capacité d'allongement et la résistance que lui avait conféré l'écrouissage diminue. Dans le cas d'un acier non ou faiblement allié, à cause de l'intervention de la transformation  $\alpha/\gamma$ , qui à lieu à la température du point  $A_3$ , légèrement au dessus de  $\theta_{R\alpha}$  de recristallisation de la ferrite est limitée entre  $\theta_{R\alpha}$  et  $A_3$ , car à partir de cette dernière température, la réaction  $\alpha/\gamma$  produit un autre mécanisme, l'effet de normalisation qui limite la largeur de la zone adoucie .

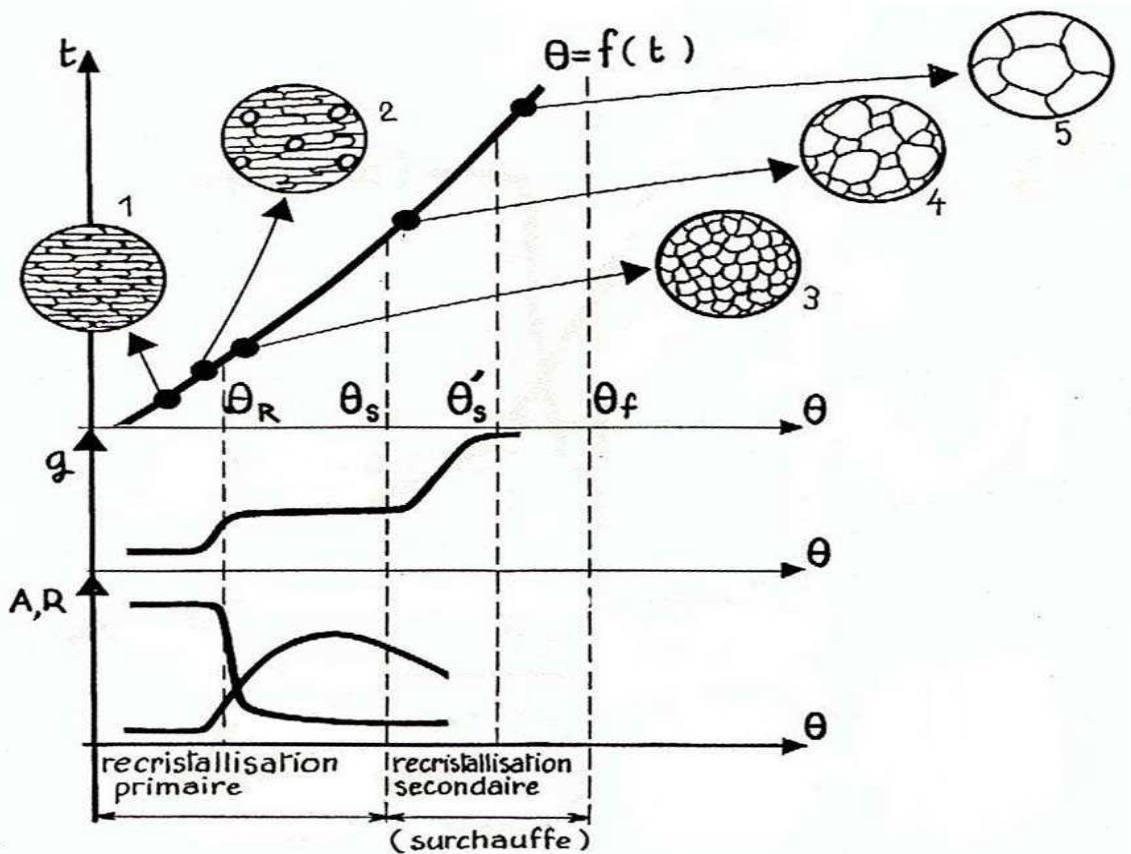


Figure II- 21. Les modifications structurales au cours du chauffage [40] .

On montre dans la (Figure II.22), que à cause de l'évolution du grain qui se trouve interrompue par la transformation  $\alpha/\gamma$ , on trouve une structure à grains fins encadrée par deux structures grossières, l'une résultant de la recristallisation et le début de la surchauffe de la ferrite, l'autre de la surchauffe de l'austénite qui engendre héréditairement un gros grain de ferrite au refroidissement.

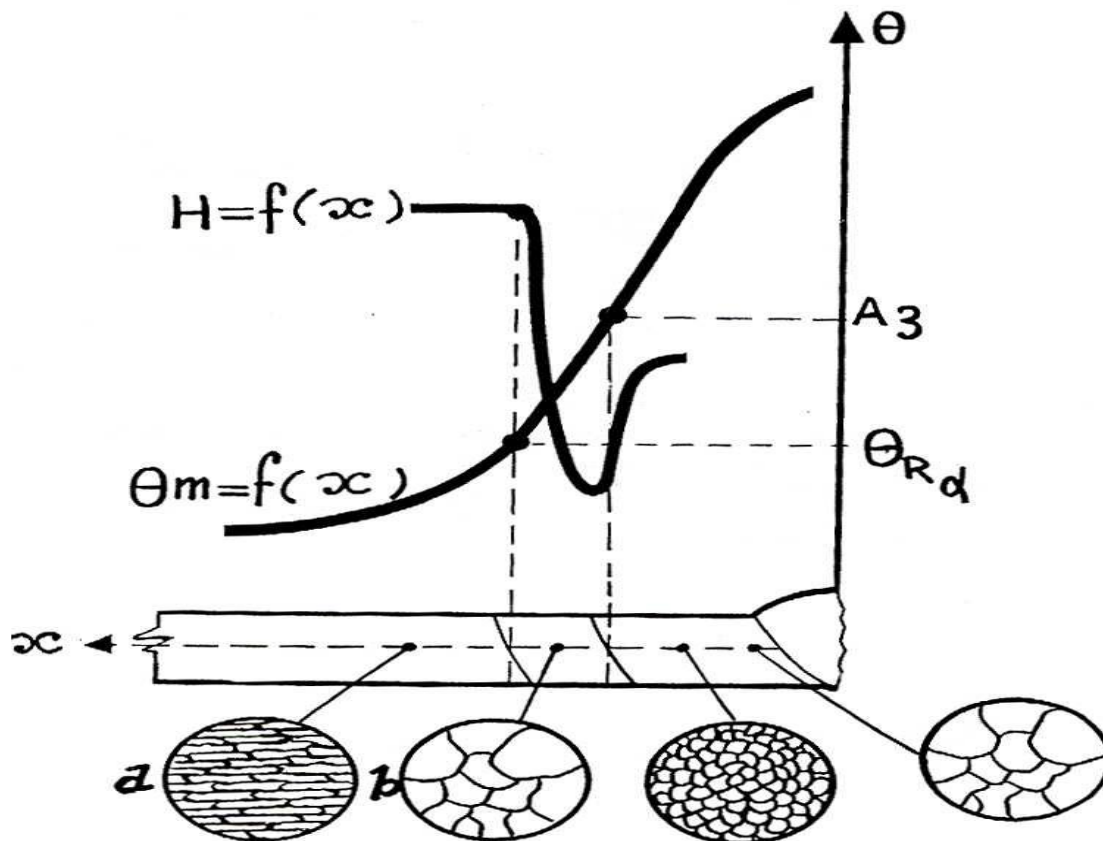


Figure II- 22. Effet de la recristallisation et la surchauffe sur la structure d'un acier écroui [40] .

### II-7. Transformation en phase solide au cours du soudage (refroidissement)

à la température de  $A_1$ , à la quelle elle donne naissance à un ensemble ferrite perlite constitué de ferrite pro-eutectoïde et de la perlite à 0.85%. Ces constituants et leurs proportions ne sont conformes aux indications du diagramme Fe-C qu'en condition d'équilibre c'est à dire refroidissement lent, tout changement de ces conditions se traduit par des écarts par rapport aux indications du diagramme Fe-C, écarts qui peuvent affecter la proportion ou la nature des constituants ainsi que leur structure. Pour rendre compte de l'influence de la loi de refroidissement à partir de l'état austénitique à une température donnée [ 40] .

## **II-8. Caractères généraux de l'opération de soudage**

Pour présenter les caractères généraux de l'opération de soudage, il faut en examiner trois aspects, à savoir :

- l'aspect thermique.
- l'aspect chimique.
- l'aspect thermomécanique [41] .

### **II-8.1. Aspect thermique**

La grande majorité des procédés de soudage est caractérisée par l'intervention d'une source de chaleur le plus souvent en mouvement parfois immobile (par exemple le soudage par points), dont la nature et la puissance spécifique qu'elle peut atteindre déterminent les possibilités pratique d'utilisation.

Quoiqu'il en soit, la localisation qui caractérise l'ensemble des procédés des soudage et dont résultent à des degrés divers, les conséquences suivante :

Le soudage comporte, là ou il interviennent, des échauffements rapides, dans de nombreux cas plus rapides que ceux qui correspondent à l'état d'équilibre en phase solide des alliages concernés. Si on veut prévoir ou interpréter l'effet métallurgique de soudage il est donc nécessaire de tenir compte de la vitesse d'échauffement, en particulier lorsqu'on cherche à simuler le cycle thermique de soudage pour reproduire les structures qui en résultent.

L'effet d'un échauffement rapide est accusé par la brièveté du séjour à la température maximale, température qui avoisine la température de fusion. Il en résulte que du point de vue métallurgique une certaine compensation intervient entre l'élévation de la température atteinte, d'une part, et la brièveté du séjour à cette température, d'autre part. Ainsi s'explique, à composition chimique identique, la différence que l'on peut constater entre les structures caractéristiques de soudures obtenues par des procédés de soudage différents, selon la brièveté relative du séjour à haute température qui les caractérise. Cet effet de compensation peut aussi être en phase liquide par exemple à propos des pertes par volatilisation dans la zone fondue.

Enfin, le gradient de température qui résulte de la localisation de l'échauffement entraîne une vitesse de refroidissement en générale élevée, elle même fonction, pour chaque matériau, non seulement du procédé de soudage utilisé, mais aussi du mode opératoire pour l'application de ce procédé [41] .

**II-8.2. 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.

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.

Dans le même temps le métal fondu est susceptible d'être chimiquement influencé par le milieu gazeux qui l'entoure, 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'anhydride carbonique ou les mélanges de ce gaz 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.

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 nommée 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.

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 .

### **II-8.3. 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 ne concerne que certains aciers particulièrement trempant, il y a lieu de tenir compte des contraintes associées à la déformation martensitique .

### II-9. Caractéristiques mécaniques en fonction de la composition métallurgique

Les caractéristiques mécaniques changent suivant la composition métallurgique, notamment les caractéristiques plastiques (Limite d'élasticité en particulier). Le coefficient de Poisson et le module d'Young quand à eux, demeurent peu influencés par la structure métallurgique

### II-10. Notions sur les phénomènes thermiques et métallurgiques de soudage

La (Figure II-23), présente les principales interactions thermiques, métallurgiques et mécaniques. La plupart des procédés de soudage entraînent le réchauffement puis le refroidissement du métal. Ces variations de température ont un impact sur la structure de la zone soudée du métal. Cette structure peut déterminer la dureté, la résistance, la résilience et la ductilité du métal [29].

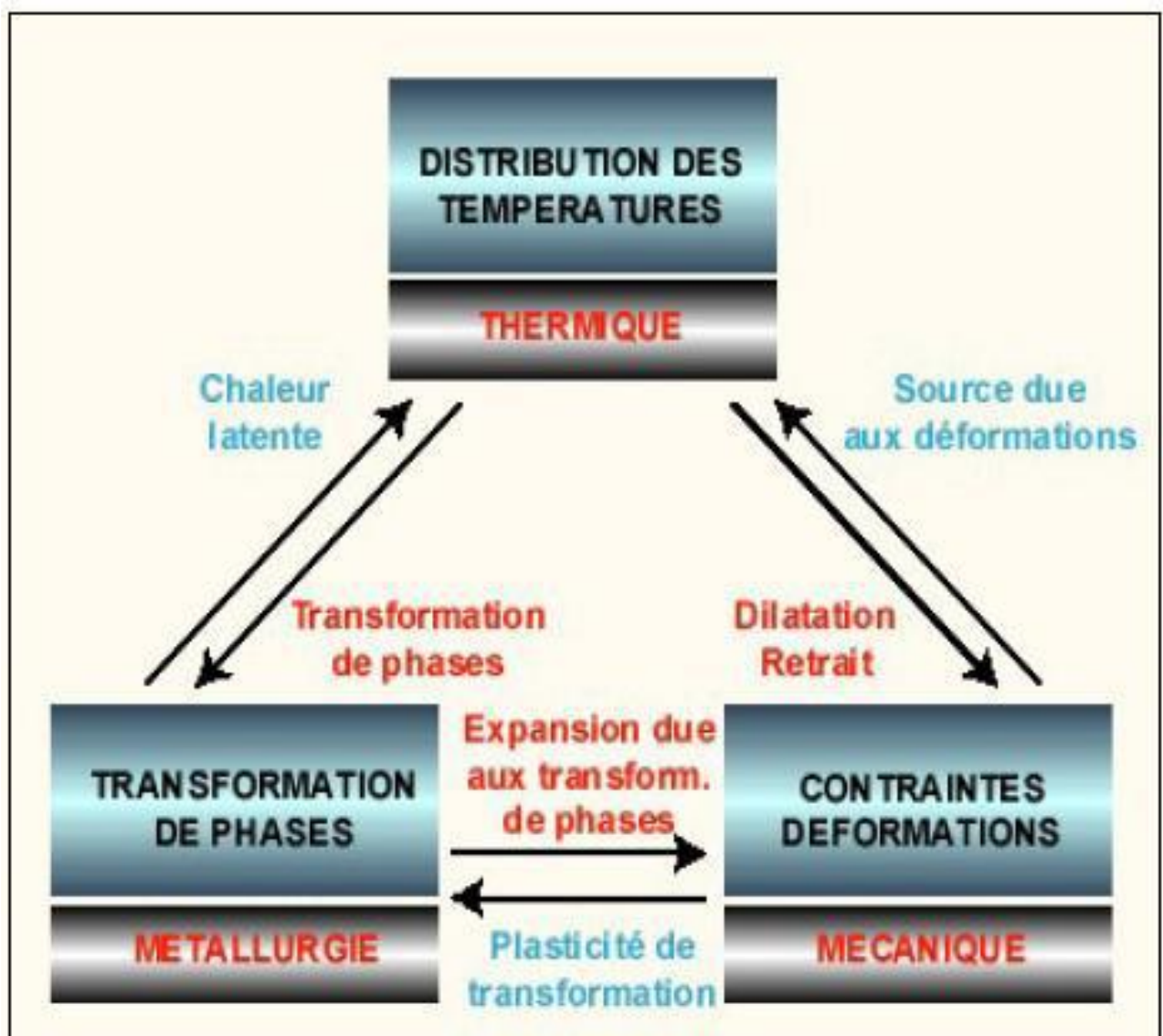


Figure II- 23 . Schéma des principales interactions thermiques, métallurgiques et mécaniques [29].



## *2<sup>ème</sup> Partie*

# *Etude expérimentale*

# *Chapitre III*

*Matériaux et techniques expérimentales*

## Matériaux et techniques expérimentales

### Introduction

Dans ce chapitre ,le matériau étudié et les différentes techniques de caractérisation ont été détaillées et qui sont nécessaires pour la mise en évidence de la microstructure au niveau du joint soudé . De même ,les essais mécaniques sont aussi présentés et qui évaluent l'aspect mécanique du joint soudé et traité à différentes températures .

### III -1. Matériau de base

Le présent chapitre est consacré à la présentation du matériau utilisé dans notre étude et les différentes méthodes d'analyse chimique pour l'identification des pourcentages de carbone et les éléments d'alliages réels dans notre acier.

Nous décrivons les techniques de caractérisation qui leur ont été appliquées sur des échantillons et des éprouvettes d'acier prélevées sur des tubes soudés par induction à haute fréquence. La technique de microscopie optique , microscopie électronique à balayage utilisée pour la caractérisation des microstructures et la technique de diffraction des rayons X pour déterminer la structure des nuances .On a fait subir aux différentes éprouvettes des tubes soudés , tubes soudés et traités au contrôle destructif comme la traction, pliage résilience et dureté. Nous avons appliqué aussi la technique d'aplatissement et d'évasement des tubes soudés afin de montrer la qualité et la fiabilité du joint soudé.

On termine par la fractographie pour identifier les mécanismes conduisant à la rupture par l'analyse des surfaces rompues; les faciès de rupture.

Le produit de base étudié est des feuillards d'acier A37 ( Figure III-1 ); utilisés dans la construction métallique par la Société Anabib à Tébessa ( TGT ) pour la fabrication des tubes de différents diamètres par la technique de soudure à induction. En conséquence, notre matériau choisi présente une bonne soudabilité et disponible sur le marché ( offert par ISPAT El-Hadjar-Annaba ) . Le soudage par induction à haute fréquence est largement utilisé pour le soudage longitudinale des pipes ,car il est relativement rapide et efficace [42] .



Figure III-1. Feuillards enroulés d'acier A37-2

### III -1.1.Composition chimique du matériau utilisé

Après la préparation des nuances, fournis par l'entreprise nationale des transformations des tubes et produits plats ( ENTTPP ) Tébessa, on a confirmé la composition chimique de l'acier par l'analyse chimique de Carbométrie et de Spectrométrie au niveau du Laboratoires du Complexe des pelles et de grues CPG se situant à Constantine et complété par la technique de dispersion d'énergie EDS à l'Université de Biskra. Cette analyse a donné la composition suivante ( Tableau III-1 ).

| Nuance A <sub>37</sub>     | C        | Mn   | P     | Si    | S     | Al    | N     |
|----------------------------|----------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Valeur réelle (analysée)   | 0.11     | 0.45 | 0.02  | 0.011 | 0.006 | 0.06  | 0.47  |
| Valeur selon la norme [07] | Max 0.19 | -    | 0.055 | -     | 0.055 | -     | 0.008 |
| Valeur donnée par TGT      | 0.11     | 0.38 | 0.009 | 0.010 | 0.007 | 0.043 | 0.011 |

Tableau III-1. Composition chimique de l'acier A37 (en % massique).

### III -1.2. Caractéristiques mécaniques de l'acier A37

Les essais de traction ont été réalisés au laboratoire de Génie civil de l'université de Tébessa sur une machine de traction universelle UMIB5005 SW dont la capacité de la cellule de force est de 500Kn. La moyenne des résultats obtenue est mentionnée dans le (Tableau III-2) .

| Nuance A37                  | Re (MPa) | Rm (MPa)  | A (%) |
|-----------------------------|----------|-----------|-------|
| Valeur Réelle (analysée)    | 423.1    | 462.4     | 31.15 |
| Valeur Selon la norme [ 07] | 235      | 340-460   | 26    |
| Valeur donnée par TGT       | 295-305  | 382.7-406 | 28-35 |

Tableau III-2. Caractéristiques mécaniques de l'acier A37

## III -2. Description des techniques d'analyse chimique

### III -2 .1. La Carbométrie

Le carbone contenu dans le fer ou l'acier est l'élément d'alliage le plus important vu sa grande influence sur les caractéristiques chimiques et mécaniques des pièces métalliques.

La limite de 06.67% en masse, marque la limite extrême à laquelle les alliages Fer Carbone sont utilisables. D'ailleurs, la majorité de ces alliages ne peuvent contenir plus de 05% en masse, car au-delà de cette valeur le matériau devient trop fragile Résilience  $K=0 \text{ j/cm}^2$  pour être utilisé. Ainsi, lorsque le pourcentage de carbone dépasse 0.25% en masse, il devient nécessaire de prendre des précautions particulières dans le procédé de soudage, car les structures trempées de l'acier sont très sensibles à la fissuration et à la rupture fragile [43]. Dans ce cas, l'amélioration de certaines propriétés de l'acier nécessite l'ajout de faibles proportions d'éléments tel Mn, Si, P, ...L'effet durcissant du carbone dans l'acier étant capital ; il s'avère donc nécessaire d'évaluer la quantité de cet élément dans notre métal de base. L'analyse du carbone a été faite par la carbométrie .

#### III -2 .1.1. Description de l'appareil d'absorption du carbone (carbomètre)

Le carbomètre est un appareil d'absorption de C, destiné à mesurer avec précision la teneur réelle en C ; contenue dans l'acier ( Figure III-2 ) .



Figure III-2. Montage du Carbomètre

### III -2 .1.2 . Dosage du carbone

Nous avons utilisé le modèle amélioré avec deux vases d'absorption ( Figure III-3 ). Dans ce cas ; Il n'est pas nécessaire d'introduire deux fois les gaz dans la burette. ( Dans le cas du modèle normal ; l'introduction des gaz à deux reprises est nécessaire pour garantir une complète absorption du dioxyde de carbone ) ( Figure III-4 ) .

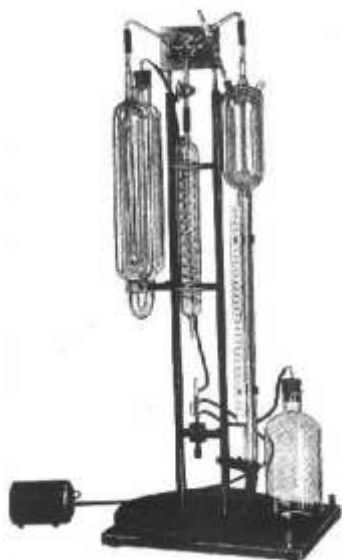


Figure III-3. Modèle de Carbomètre amélioré

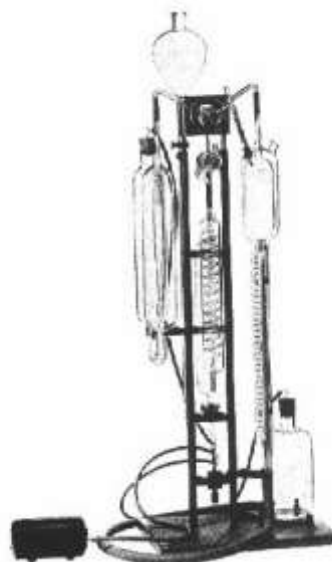


Figure III-4. Modèle de Carbomètre normal

Pour l'adaptation de la gamme de mesure à la teneur en carbone de nos nuances, les montages expérimentaux utilisés sont équipés des burettes suivantes ( Tableau III-3 ) .

| Portée de mesure | Précision de lecture |
|------------------|----------------------|
| De 0 à 0.25%     | 0.001                |
| De 0 à 0.50%     | 0.002                |
| De 0 à 1.50%     | 0.005                |
| De 0 à 4.50%     | 0.010                |

Tableau III-3. Les valeurs lues sont corrigées [43].

Les valeurs lues sont corrigées à l'aide d'un ( Tableau III-4 ) qui permet de faire correspondre, aux mesures effectuées, l'effet de la température et de la pression régnante dans la salle de mesure.

### III -2 .1.3. Echelle cylindrique de Bourg

L'emploi de l'échelle de bourg rend inutile la correction des valeurs par un tableau dépendant de la pression atmosphérique et de la température. Elle se compose simplement d'un cylindre en Plexiglas avec une échelle graduée. A l'extrémité supérieure se trouvent deux bagues réglables avec une échelle pour la pression atmosphérique et pour la température (Figure III-5).

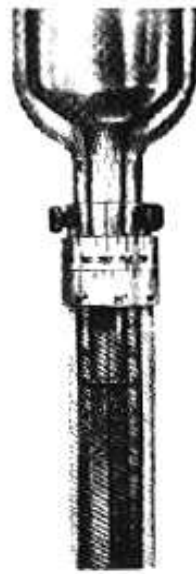


Figure III-5. Echelle cylindrique de Bourg [43].

Les valeurs en carbone lues à l'échelle graduée sont corrigées directement par rotation des deux bagues;

T : température [°C] et P : pression atmosphérique [Torr]

Avec  $1 \text{ torr} = 133.32 \text{ Pa} = 1.333 \cdot 10^{-3} \text{ Bar} = 1 \text{ mm Hg}$  à ( 0°C ).

La pression atmosphérique indiquée sur le baromètre au sein du laboratoire d'essai :

- 1 à 12°C (-1)
- 13 à 20°C (-2)
- 21 à 29°C (-3)
- 30 à 35°C (-4)

Le tableau III-4 ; montre Les valeurs de facteur de correction F

| T<br>P | 18°C   | 19°C   | 20°C   | 21°C    | 22°C   | 23°C   | 24°C   | 25°C   | 26°C   | 27°C   | 28°C   |
|--------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 700    | 0.9112 | 0.9066 | 0.9022 | 0.89789 | 0.8932 | 0.8886 | 0.8808 | 0.8790 | 0.8742 | 0.8694 | 0.8644 |
| 701    | 0.9125 | 0.9079 | 0.9035 | 0.8991  | 0.8949 | 0.8899 | 0.8851 | 0.8803 | 0.8755 | 0.8707 | 0.8657 |
| 702    | 0.9138 | 0.9093 | 0.9048 | 0.9004  | 0.8958 | 0.8912 | 0.8864 | 0.8816 | 0.8768 | 0.8720 | 0.8670 |
| 703    | 0.9151 | 0.9106 | 0.9061 | 0.9017  | 0.8921 | 0.8925 | 0.8872 | 0.8829 | 0.8781 | 0.8733 | 0.8683 |
| 704    | 0.9169 | 0.9120 | 0.9048 | 0.9030  | 0.8984 | 0.8983 | 0.8890 | 0.8842 | 0.8794 | 0.8745 | 0.8696 |
| 705    | 0.9178 | 0.9133 | 0.9087 | 0.9043  | 0.8997 | 0.8951 | 0.8903 | 0.8855 | 0.8807 | 0.8758 | 0.8709 |
| 706    | 0.9191 | 0.9146 | 0.9101 | 0.9056  | 0.9010 | 0.8964 | 0.8516 | 0.8868 | 0.8820 | 0.8771 | 0.8720 |
| 707    | 0.9204 | 0.9159 | 0.9116 | 0.9069  | 0.9023 | 0.8577 | 0.8929 | 0.8881 | 0.8833 | 0.8784 | 0.8735 |
| 708    | 0.9218 | 0.8173 | 0.9127 | 0.9082  | 0.9036 | 0.8900 | 0.8342 | 0.8884 | 0.8846 | 0.8796 | 0.8740 |
| 709    | 0.9231 | 0.9186 | 0.9140 | 0.9095  | 0.9049 | 0.9003 | 0.9955 | 0.8907 | 0.8859 | 0.8809 | 0.8761 |
| 710    | 0.9244 | 0.9200 | 0.9154 | 0.9108  | 0.9062 | 0.9016 | 0.8968 | 0.8920 | 0.8872 | 0.8822 | 0.8774 |
| 711    | 0.9257 | 0.9213 | 0.9167 | 0.9121  | 0.9075 | 0.9029 | 0.8981 | 0.8933 | 0.8886 | 0.8835 | 0.8787 |
| 712    | 0.9271 | 0.9226 | 0.9180 | 0.9134  | 0.9088 | 0.9042 | 0.8994 | 0.8946 | 0.8858 | 0.8848 | 0.8800 |
| 713    | 0.9284 | 0.9239 | 0.9193 | 0.9147  | 0.9101 | 0.9055 | 0.9007 | 0.8559 | 0.8911 | 0.8860 | 0.8813 |
| 714    | 0.9298 | 0.9853 | 0.9207 | 0.9161  | 0.9114 | 0.9068 | 0.9020 | 0.8972 | 0.8924 | 0.8874 | 0.8825 |
| 715    | 0.9311 | 0.9266 | 0.9220 | 0.9174  | 0.9127 | 0.9081 | 0.9033 | 0.8985 | 0.8932 | 0.8887 | 0.8838 |
| 716    | 0.9324 | 0.9279 | 0.8233 | 0.9187  | 0.9140 | 0.9094 | 0.9046 | 0.8998 | 0.8950 | 0.9900 | 0.8851 |
| 717    | 0.9387 | 0.9272 | 0.9246 | 0.9200  | 0.9153 | 0.9107 | 0.9059 | 0.9011 | 0.8963 | 0.8913 | 0.8894 |
| 718    | 0.9351 | 0.9306 | 0.9260 | 0.9214  | 0.9166 | 0.9120 | 0.9072 | 0.9024 | 0.8976 | 0.8926 | 0.8876 |
| 719    | 0.9364 | 0.9319 | 0.9273 | 0.9227  | 0.9180 | 0.9133 | 0.9085 | 0.9037 | 0.8985 | 0.8939 | 0.8889 |
| 720    | 0.9378 | 0.9332 | 0.9286 | 0.9240  | 0.9196 | 0.9146 | 0.9098 | 0.9050 | 0.9002 | 0.8952 | 0.8502 |
| 721    | 0.9391 | 0.9345 | 0.9289 | 0.9253  | 0.9207 | 0.9181 | 0.9111 | 0.9163 | 0.9015 | 0.8965 | 0.8815 |
| 722    | 0.9404 | 0.9358 | 0.9312 | 0.9266  | 0.9220 | 0.9172 | 0.9124 | 0.9076 | 0.9028 | 0.8978 | 0.8928 |
| 723    | 0.9417 | 0.9371 | 0.9325 | 0.9279  | 0.9233 | 0.9185 | 0.9137 | 0.9089 | 0.9041 | 0.8991 | 0.8941 |
| 724    | 0.9431 | 0.9385 | 0.9339 | 0.9253  | 0.9246 | 0.9199 | 0.9151 | 0.9102 | 0.9054 | 0.9004 | 0.8953 |
| 725    | 0.9444 | 0.9398 | 0.9352 | 0.9306  | 0.9259 | 0.9212 | 0.9164 | 0.9115 | 0.9067 | 0.9017 | 0.8966 |
| 726    | 0.9457 | 0.9411 | 0.9365 | 0.9319  | 0.9272 | 0.9225 | 0.9177 | 0.9128 | 0.9080 | 0.9030 | 0.8979 |
| 727    | 0.9470 | 0.9424 | 0.9378 | 0.9332  | 0.9285 | 0.9238 | 0.9190 | 0.9141 | 0.9093 | 0.9043 | 0.8992 |
| 728    | 0.9484 | 0.9438 | 0.9392 | 0.9346  | 0.9298 | 0.9252 | 0.9204 | 0.9154 | 0.9106 | 0.9056 | 0.9004 |
| 729    | 0.9497 | 0.9451 | 0.9405 | 0.9359  | 0.9311 | 0.9265 | 0.9217 | 0.9167 | 0.9119 | 0.9069 | 0.9017 |
| 730    | 0.9510 | 0.9464 | 0.9415 | 0.9372  | 0.9324 | 0.9278 | 0.9230 | 0.9180 | 0.9312 | 0.9082 | 0.9030 |

Tableau III-4. Les valeurs de facteur de correction F [43].



### III -2 .1.4. Préparations des nuances

Avec une machine de Perceuse, nous avons prélevé des copeaux sur la tôle d'acier qu'on a étudié . Ensuite, on a pesé ces copeaux dans une microbalance ( Figure III-6 ) .



Figure III-6. Microbalance

### III -2 .1.5. Déroulement de l'analyse carbométriques ( procédé )

L'analyse est effectuée suivant les séquences citées ci-dessous :

- Placement des copeaux des nuances mis dans une nacelle céramique dans un four à tube, dont la chambre de combustion est en céramique (copeaux préalablement pesés) .
- Passage d'un courant d'oxygène, pour brûler les nuances et ce afin de former le dioxyde de carbone (température dans le four 1250 °C) oxygène soigneusement séché et purifié dans deux flacons laveurs ; l'un contient de l'acide sulfurique  $H_2SO_4$  à 96% et l'autre contenant de la potasse KOH à 50% .
- Gaz de combustion ainsi que l'oxygène en excès recueillis et mesurés dans une burette à gaz sur laquelle est fixée une réglette graduée (de 0 à 4.5) , ainsi après avoir atteint le zéro de l'échelle graduée, le gaz est refoulé à (2) deux reprises dans une lessive d'absorption remplie de potasse en solution. Le dioxyde de carbone est ainsi absorbé.

le reste du gaz est ramené dans la burette.

- Sur l'échelle graduée en %, on relève la diminution par rapport au volume initial ce qui permet de déterminer la teneur réelle en carbone de l'échantillon analysé.
- Le titre réel contenu dans la nuance est obtenu suivant la relation :

$$\% \text{ carbone} = F \times V$$

F: Le facteur de correction qui tient compte des conditions de l'essai ( pression atmosphérique P en unité torr ainsi que la température T en °C ).

V : La valeur lue sur la colonne et qui représente la différence  $V_2 - V_1$  sur la réglette graduée ;

Avant de procéder à la manipulation directe, l'étalonnage de l'appareil est nécessaire.

On fait un essai sur cette dernière en utilisant un échantillon-Etalon dont la teneur en carbone est de 1.21 %.

A titre d'exemple après cet essai  $\%C = 1.20\%$  montre que ce dernier est calibré à 0.01 près.

Donc on ajoute 0.01 aux résultats obtenus et on aura :

$$\%C = F \times V + \text{Facteur correctif de la précision de l'appareil.}$$

Les conditions communes pour toutes nos expériences sont fixées à :

$$P = 721 \text{ Torr et } T = 19 \text{ °C (} F = 0.9319 \text{).}$$

La masse de la prise d'essai est égale toujours à 1 gramme.

Les résultats sont regroupés dans le tableau III-1 précédent.

### III – 2.2. La Spectrométrie

De nos jours, le contrôle des matériaux à utiliser lors de l'entrée en magasin et avant transformation s'avère souvent nécessaire. A coté des autres méthodes chimiques et mécaniques classiques, l'analyse spectrale prend un intérêt très important. En effet, en peu de temps, cette analyse peut livrer plusieurs informations fiables concernant la composition des échantillons en déterminant avec précision les concentrations importantes en éléments d'alliage [44] .

#### III - 2 .2.1. Principe de l'analyse spectrale

Nous savons que chaque élément chimique lorsqu'il subit une excitation émet un rayonnement spécifique d'une couleur ou d'une longueur d'onde bien déterminée.

De cette manière, une fois émis, le faisceau lumineux passe par un prisme qui le repartit suivant ses composantes, ce qui permet de caractériser et faire apparaître sous forme de raies spectrales de différentes couleurs des raies émises de l'alliage à analyser. L'intensité lumineuse des raies spectrales correspond à la teneur de l'élément considéré dans l'échantillon objet d'analyse.

#### III -2 .2.2. Principe de fonctionnement d'un spectravist

Dans un spectravist, la reconnaissance des raies de spectres complexes ; riche en raies, ne présente pas de difficulté, la sensibilité est d'une puissance de 10 par rapport à un spectroscope à métaux ordinaire, on peut faire des analyses sur des minéraux, des minerais et des liquides .

Il est possible d'étendre l'analyse jusqu'à 3900 Å et ce proche des rayonnements U.V. Les figures ( III - 7 et 8 ) représentent une vue d'ensemble d'un spectravist 88 d avec ses composantes les plus utilisées.



Figure III-7. Spectravist 88 d.

Un arc d'excitation à courant alternatif initié entre l'échantillon posé sur la table d'analyse et la contre électrode (électrode disque en métal pur) lors de la décharge, la lumière émise caractérise la composition de l'échantillon et elle est utilisée d'une manière complexe au cours de l'examen ( Figure III-8 ).

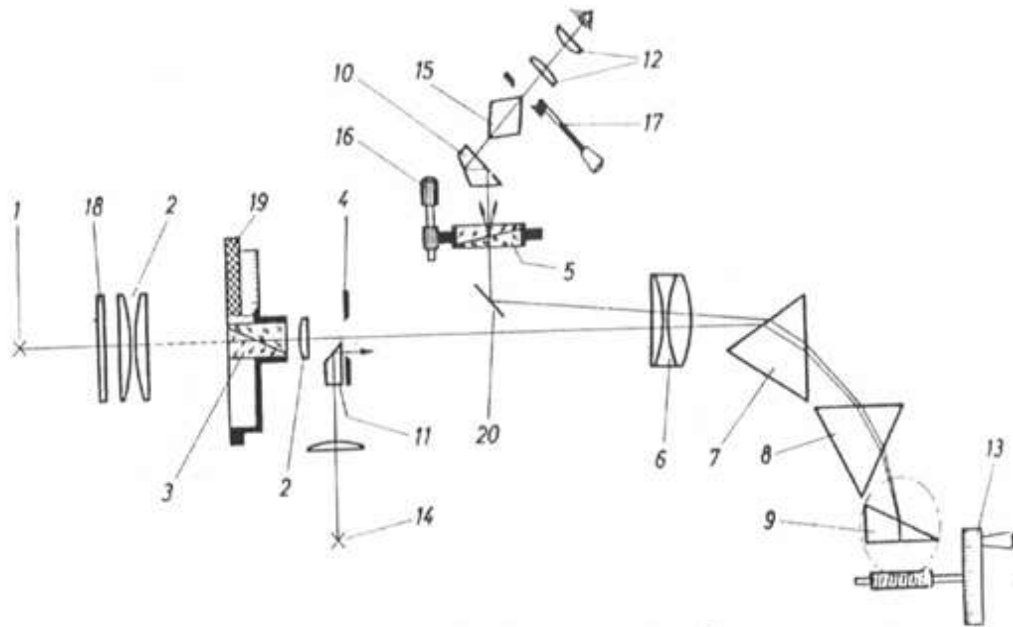


Figure III-8. Spectravist 88 d (Schéma optique) [44].

- 1- Echantillon
- 2- Lentilles d'illumination
- 3- Prisme de polarisation relatif pour la mesure des concentrations
- 4- Fente spectroscopique
- 5- Prisme de Wollaston
- 6- Objectif
- 7, 8 et 9- Prismes de dispersion
- 10,11 - Prismes de déviation
- 12 –Oculaire
- 13- Tambour pour le réglage des longueurs d'onde
- 14- Echantillon auxiliaire
- 15- Prismes rhomboïdal de Huefner
- 16- Bouton de réglage pour le déplacement relatif des spectres partiels I et II
- 17- Diaphragme de champ visuel
- 18- Filtre gris
- 19- Tambour de mesure avec échelle de concentration
- 20- Mémoire de déviation

Pour suite du double passage de la lumière par 2 ½ prismes, on obtient la dispersion effective équivalente à 5 prismes et de ce fait le pouvoir de résolution correspondant.

Par rotation de la manivelle 13, le spectre se déplace dans l'oculaire 12 sous l'œil de l'observation. Le réglage d'une gamme de longueur d'onde désirée est obtenu grâce au tombeur de longueur d'onde 13. Dans ce stade ; on peut marquer certains éléments correspondant à des raies d'analyse rencontrées fréquemment dans des matériaux analysés tels que le chrome (Cr), Le manganèse (Mn) et le titane (Ti) sur la table auxiliaire, on peut placer un échantillon auxiliaire 14 qui constitue une aide remarquable dans le processus d'analyse. Généralement, on utilise l'élément pur du métal de base de l'alliage comme échantillon auxiliaire. Le rayonnement de l'échantillon auxiliaire entre dans le spectroscopie à travers un prisme de réflexion 11 de manière que les spectres d'analyses I, II et le spectre auxiliaire III apparaissent simultanément dans le champ visuel, adjacents l'un à l'autre. Alors que les raies communes de l'élément de base existent dans tous les trois spectres et en sens verticale, les raies des éléments à doses n'apparaissent que dans les deux spectres I et II en haut. Pour l'analyse qualitative, qui est la détermination des constituants de l'échantillon, des instructions détaillées de travail avec figures de spectres sont fournies avec l'appareil. Pour l'analyse quantitative ; le rapport d'intensité entre une raie d'analyse A et une raie de référence B est déterminé par mesure photométrique. Si l'on fait tourner le prisme 5 à l'aide du bouton de réglage 16, les deux spectres I et II de l'échantillon se déplacent l'un vers l'autre. On tourne le bouton jusqu'à ce que les raies A et B se trouvent exactement en ligne (Figure III-9 ). Quant les raies d'analyse et de références sont disposées avec précision, l'un au dessus de l'autre et sont séparées par une ligne très fine. Pour exécuter la mesure, il suffit de tourner le prisme de polarisation 3 à l'aide du tambour de mesure 19 jusqu'à ce que les raies apparaissent dans la même luminosité. La position angulaire du prisme de polarisation est lue directement sur l'échelle du tambour, avec cet angle on obtient la concentration (V%) de l'élément à doser et cela à l'aide d'une courbe spéciale de calibration fournie avec l'appareil Figures ( III-10 et 11 ).

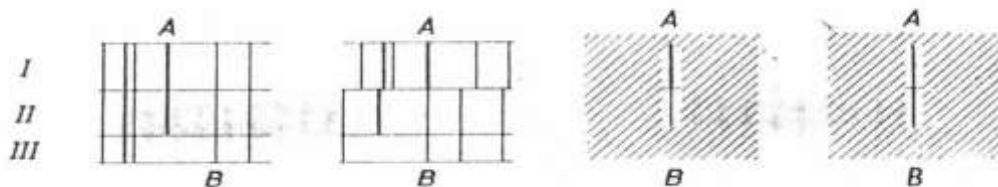


Figure III-9.Schéma du procédé de la photométrie [44].

On note finalement que chaque mesure est entachée d'une erreur.

L'analyse moyenne du spectravist est d'environ  $\pm 3$  à 10% pour l'examen de l'Acier,  $\pm 10$  à 15% pour la fonte et environ  $\pm 15$  à 20% pour les Alliages d'aluminium.

### **III -2 .2.3. Préparations des échantillons**

Sur une chute de tôle de feuillards de 3.1mm d'épaisseur, on a découpé à froid deux échantillons bruts de dimension ( 80x40 ) mm<sup>2</sup>.Après décapage mécanique et nettoyage chimique, les deux échantillons ont subi une analyse spectrométrique au laboratoire de CPG, de Constantine. Cette analyse à donné la composition chimique réelle Tableau III-1.

### **III-2 .2.4. Déroulement de l'essai**

Dans ce cas, l'expérience est rapportée sur 2 échantillons où le métal de base est inconnu et chaque fois on refait 2 essais pour vérification. On utilise pour la détermination de tous les éléments une contre électrode en Fer (Fe) sous forme de disque. La distance de l'électrode est toujours réglée à 2mm. Le temps de pré-étincelage sur nos échantillons de 8cm de longueurs, 4cm de largeurs et 0.31cm d'épaisseur respectivement est fixé toujours à 20 secondes.

Pour des analyses précises et exemptes d'erreurs, une condition primaire doit être prise en considération, qui est le pré étincelage, car pour certaines analyses, les résultats ne peuvent avoir lieu qu'après un temps important de pré étincelage et surtout dans le cas des composantes facilement volatiles. Si par exemple, on commence avec une analyse de manganèse (Mn), les conditions suivantes doivent être respectées:

1-Temps de chauffage de l'appareil > 1 minute.

2-Allumation d'Arc et repération des lignes d'analyse.

3-Allumation d'étincelle et réchauffements de l'excitateur et la contre électrode avec un échantillon quelconque pendant au moins 10 minutes et à 5.8 Ampères, après ces précautions l'analyse des autres éléments (Si, P, ...) ne demande que quelques minutes

( le temps d'échange, d'électrode). La table d'éprouvettes sur laquelle on fait étinceler du Fer forme une aide précieuse.

On procède aux analyses selon les tables :

-X 512.3-88d-111 où la concentration du manganèse est incluse dans l'intervalle 0.12 à 1.5 %.

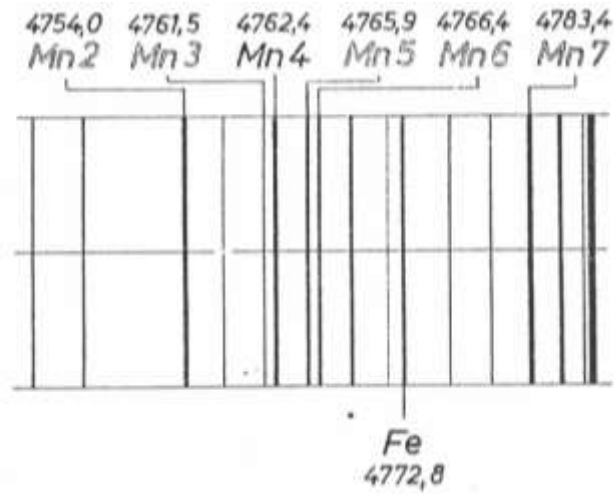
-X512.3-88d-112 où la concentration du manganèse appartient à l'intervalle 1 à 4 %.

-X512.3-88d-208 pour l'identification du silicium (Si) dans l'intervalle 1.2 à 4 %.

Les chiffres encadrés au-dessus de la ligne montrent la valeur affichée au tambour de longueur d'onde.

Notons que certains éléments tels ( Al , N... ) , l'appareil spectravist ne peut les identifier. Par conséquent, on doit utiliser l'EDS pour les déterminer.

0.12 -1.5 % Mn dans l'acier



Ampérage 5A

Fente 30 μ

pré-étincelage 20 sec

Sans diaphragme d'oculaire

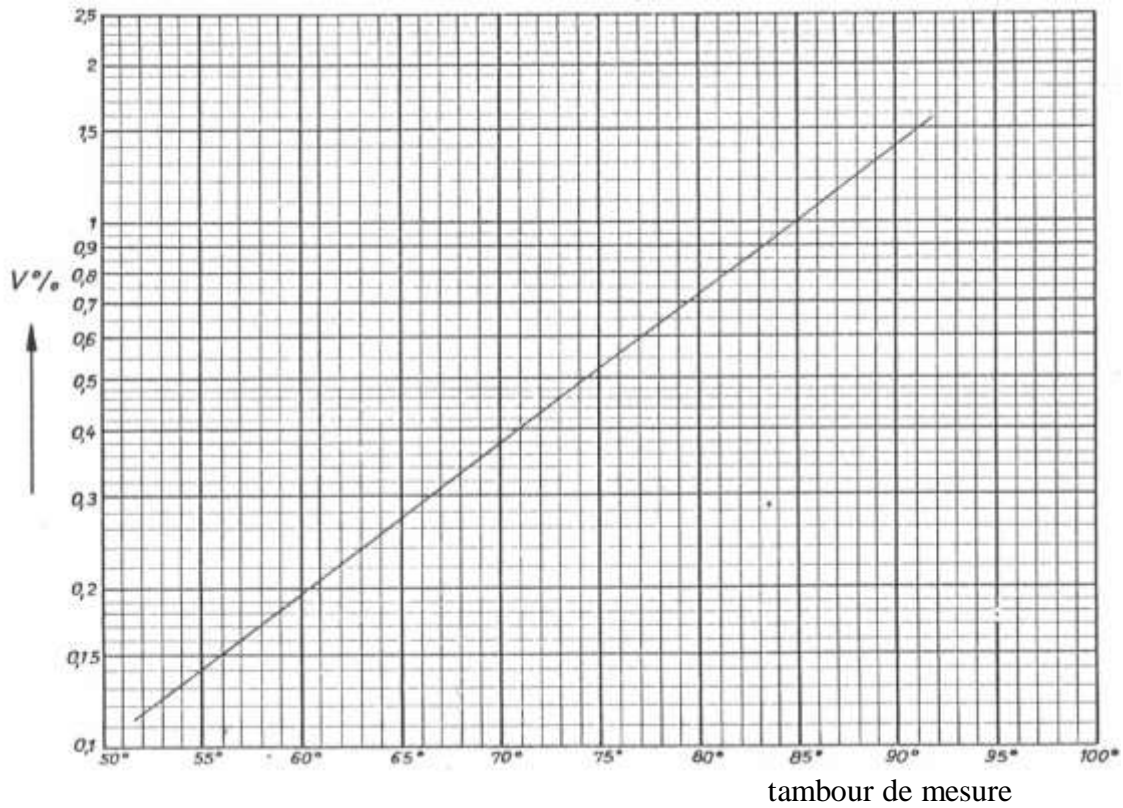
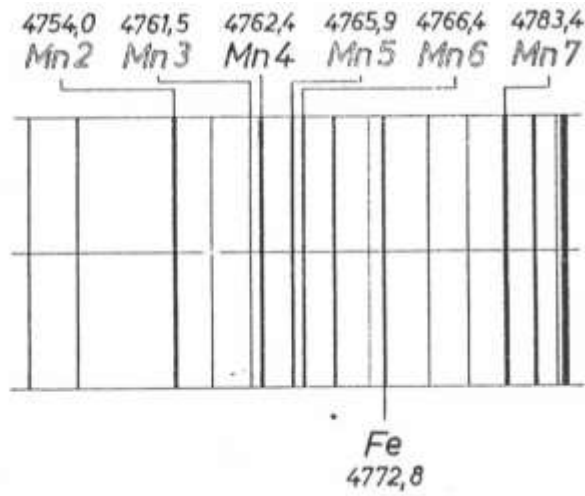


Figure III-10. Courbe d'étalonnage de Mn [44].

1.2 -4 % Si dans l'acier

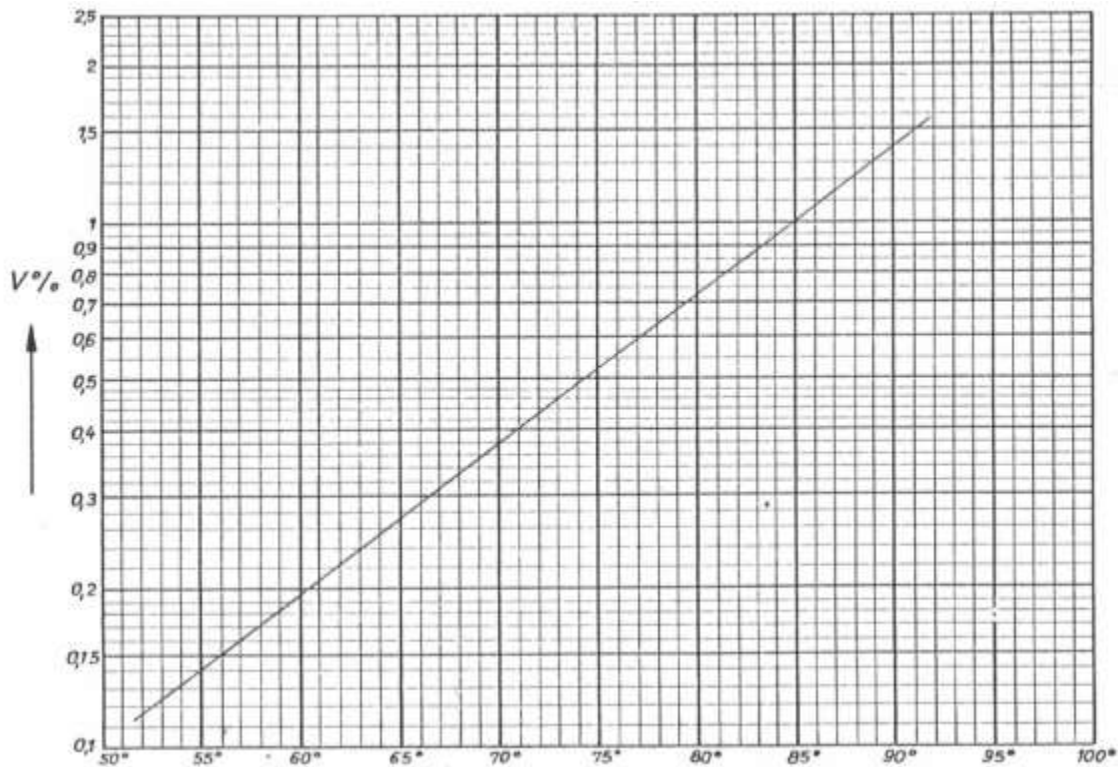


Ampérage 6A

Fente 30 μ

pré-étincelage 40 sec

Sans diaphragme d'oculaire



tambour de mesure

Figure III-11. Courbe d'étalonnage de Si [44] .



### III -2.3. L'analyse par dispersion d'énergie EDS

Le mode spectroscopie des rayons X qui autorise la détermination de la composition chimique locale.

L'émission des rayons x dans le mode EDS est le fait de l'interaction inélastique entre les électrons primaires et les atomes de l'objet. Elle se traduit par l'excitation de leurs niveaux électroniques suivie d'une désexcitation radiative dont l'énergie ( égale à la différence entre deux niveaux électroniques ) est spécifique de chaque espèce atomique présente dans l'échantillon. Cela permet l'identification et le dosage des espèces.

La détection des photons X se fait individuellement .Elle consiste à transformer chaque photon en paires électron / trou dans un semi-conducteur et à les collecter à travers une jonction polarisée en inverse [45].

Le courant produit est proportionnel à l'énergie du photon absorbé , sa mesure détermine la hauteur des signaux constitutifs du spectre EDS ( Figure III-12) .

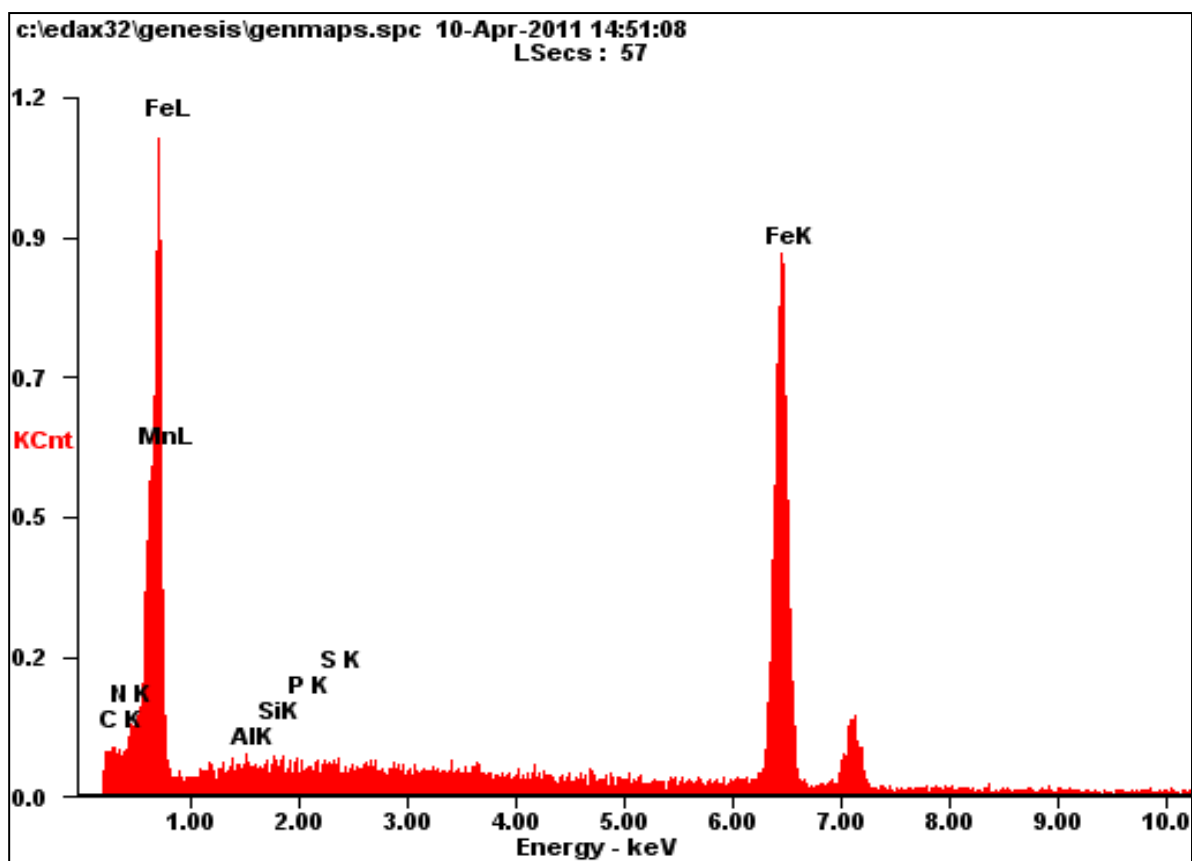


Figure III-12. Analyse de la composition chimique par MEB

### III -3. Description des techniques de caractérisation

#### III-3 -1. Techniques de caractérisation microstructurale

L'examen métallographique associé aux techniques d'investigation qui complètent les informations, est à la base de l'étude métallurgique des soudures. La macrographie et la micrographie sont appliquées à l'examen des soudures.

##### III-3 .1.1. L'observation microstructurale

Les observations ont été réalisées à l'aide d'une microscopie optique et d'une microscopie électronique à balayage.

##### III-3 .1.1.1. Microscopie Optique

Les observations en microscope optique sont réalisées sur deux types d'appareils, un appareil de microscopie optique de type de marque Hund, contenant 4 objectifs x4, x16, x40, x 100 et équipé d'un appareil photo numérique à faible agrandissement (jusqu'à 160X) .Cet appareil se trouve au niveau du Laboratoire de métallurgie de la faculté des sciences et de la technologie de l'Université de Biskra( Figure III-13) .

L'autre appareil métallographique LEITZ de type MM6 est équipé de 5 objectifs allant de 100 à 1000 fois pour les observations à moyen agrandissement, il existe au laboratoire de métallurgie au CPG de Constantine ( Figure III-14 ) .



Figure III-13. Microscopie Optique HUND T100-WETZLAR( Univ. de Biskra). Figure III-14. Microscopie Optique ( CPG)

En microscope optique on peut obtenir des informations sur la morphologie de microstructure et la taille des grains.

### III-3 .1.1.2. Microscopie Electronique à Balayage

Ce type de microscope permet d'atteindre de très fort grandissement grâce à une très haute résolution. Dans un MEB, les électrons émis par la source arrachent des électrons de l'échantillon observé sans que les atomes qui le composent ne subissent de modifications notables. Ces électrons (secondaires) fournissent ainsi une information sur la topographie et la structure du matériau au point d'impact du faisceau d'électrons primaires .

Un balayage sur l'objet à examiner permet d'obtenir une image globale de la surface.

Les observations se font jusqu'à un grandissement de 4000 fois, venant compléter les observations réalisées préalablement au microscope optique. Dans notre cas, elles ont été réalisées à l'aide d'un MEB conventionnel Jeol JSM-LV6390 permettant de travailler avec des tensions de 1 à 30 kV( Figure III-15) .

Nous avons utilisé la tension de 15 kV. Cet appareil est situé au niveau du Laboratoire de métallurgie de la faculté des sciences et de la technologie de l'Université de Biskra ( Figure III-15) .



Figure III-15. Microscopie électronique à balayage conventionnel Jeol JSM-LV6390 .

### III -3.1.2. Préparations des échantillons

Toutes les caractérisations en microscopie optique et électronique à balayage sont réalisées sur des échantillons ayant subis la préparation suivante :

#### III -3.1.2.1. Découpage des échantillons

Sur un tube soudé rectangulaire (Figure III-16), nous avons prélevé 14 échantillons de dimension  $(15 \times 10 \times 3.1)$  mm<sup>3</sup> contenant le joint soudé à l'aide d'une coupe transversale à froid. Pour cela, on fait un découpage par une tronçonneuse à disque lubrifié (Figure III-17) . Puis on les fait passer sur une surfaceuse à bonde lubrifiée pour obtenir une surface plane et horizontale.



Figure III-16. Tubes d'un acier A37 rectangulaires



Figure III-17. Tronçonneuse et surfaceuse

### III-3.1. 2.2. Repérage des échantillons

Les 14 échantillons de joint soudé sont repérés par la lettre A. Après traitements thermiques de 13 échantillons de A à différentes températures de recuit, nous avons repéré à l'aide de la lettre B les échantillons ayant subis la même durée de maintien (5mn) et par la lettre C les échantillons de 30mn de durée de maintien.

### III-3.1. 2.3. Traitements thermiques des échantillons

Les 13 échantillons prélevés sur le cordon de soudure du tube rectangulaire ont subit des traitements thermiques de recuit dans l'intervalle de température compris entre ( 200 et 1200 ) °C. Pour notre cas, nous avons utilisé un four dont la température maximale est 1250°C. Nous disposons donc de 6 nuances désignées comme suit: B<sub>200</sub>, B<sub>400</sub>, B<sub>600</sub>, B<sub>900</sub>, B<sub>1000</sub>, B<sub>1200</sub> et 7 nuances désignées à C<sub>200</sub>, C<sub>400</sub>, C<sub>600</sub>, C<sub>800</sub>, C<sub>900</sub>, C<sub>1000</sub>, C<sub>1200</sub>.

Les chiffres 200, 400, 600, 800, 900, 1000,1200 indiquent les différentes températures de recuit. Les trois zones; le métal de base (MB), la zone fondue (ZF) et la zone affectée thermiquement (ZAT) des 14 nuances seront étudiées successivement.

### III -3.1.2.4. Polissage

Pour effectuer des observations micrographiques, il est nécessaire d'avoir un état de surface très propre, donc une très bonne préparation. La préparation débute par un polissage mécanique avec des papiers abrasifs de granulométrie de grade croissant (80, 320, 600, 800, 1000,1200, 2000) à l'aide d'une machine polisseuse ( Figure III-18 ) . Le polissage se fait sous eau à une vitesse de 120 tours / min. Nous terminons par un polissage de finition sur disque rotatif recouvert d'un papier feutre ( Figure III-19 ) en présence de la pâte diamantée de 3  $\mu$  m, à une vitesse de 300 trs/min jusqu'à disparition des rayures.



Figure III-18. Machine polisseuse



Figure III-19. Machine polisseuse (feutre mouillé)

### III -3.1.2.5. L'attaque chimique

Une fois que le polissage est réalisé, on peut effectuer une attaque chimique à l'aide d'une solution dite le Nital (4ml d'acide nitrique et 96ml d'alcool éthylique) par immersion pendant 20 secondes. On réalise cette opération pour localiser les différentes zones de l'échantillon.

### III -3.1. 2.6. Rinçage et séchage

Après polissage et l'attaque chimique ces échantillons seront nettoyés dans un bain d'eau distillée et un séchage par un séchoir pendant 20 secondes.

## III-3. 2. Essais mécaniques

Les différents essais mécaniques réalisés pour caractériser nos soudures sont:

- Essais de microdureté
- Essais de traction
- Essais de pliage
- Essais de résilience
- Essais d'aplatissement
- Essais d'évasement

### III -3.2.1. Essais de microdureté

La dureté d'un métal est son aptitude à résister à la pénétration. La mesure de cette grandeur est très importante car elle nous permet de déterminer le comportement physico-chimique et mécanique d'un alliage. Il faut préciser qu'en grande partie, c'est le taux de carbone dans l'acier, qui gère ce comportement, on dira alors que :

Si  $\% C < 0.40$  l'acier est dur

$0.60 < \% C < 0.70$  l'acier est très dur

$\% C > 0.70$  l'acier est extra dur

La dureté Vickers (Hv) est souvent mesurée en couches superficielles des échantillons avec de faibles charges appliquées. Les duretés des couches superficielles peuvent différer des duretés (Hv) à cœur, c'est pourquoi des duretés mesurées (Hv) ne coïncident pas avec celles qui sont mesurées sous fortes charges. Il sera donc très utile d'indiquer sous quelle charge, la dureté (Hv) a été mesurée. En réalité, pour obtenir des empreintes mesurables, il est inévitable de polir la surface de l'échantillon. [46]

Dans notre étude, nous allons évaluer cette caractéristique qualitative mais très estimative de façon simplifiée d'un métal de base, une zone affectée par la chaleur et une zone fondue pour les différentes nuances.

#### III -3.2.1.1. Dureté Vickers

On utilise pour un tel essai un diamant en forme pyramidale à base carrée, L'angle au sommet entre les faces opposées est égale à  $136^\circ$ , la profondeur de pénétration est égale à  $1/7$  de diagonale de l'empreinte.

$$\text{Dureté Vickers } H_v = 0,189 \frac{P}{d^2} \quad (\text{III - 1})$$

Où : P : charge appliquée (p).

D : moyenne des deux diagonales de l'empreinte ( $\mu\text{m}$ ).

Le microduromètre pour dureté Vickers Knoop et à la rayure ( type Leitz Durimet-2 ), c'est une machine pour la mesure de dureté Vickers Knoop et à la rayure avec des charges de 5P ( $\approx 0.05\text{N}$ ) à 2000 p ( $\approx 20\text{N}$ ). Pour l'exploration de l'objet et la recherche des détails sur lesquels on veut effectuer les mesures ; on utilise une table de mesure 25mm x 25mm.

L'éclairage applique le principe de Köhler signifie que l'éclairement du champ-objet est optimal.

Le dispositif de pénétration est fixé à demeure sur le tube de microscope et monté sur un dispositif de rotation avec les objectifs 10x et 50x.

Le microduromètre a un dispositif de signaux permettant de suivre avec précision les opérations de l'essai :

- Le signal lumineux vert indique que l'appareil est prêt à fonctionner.
- Le signal rouge s'allume lorsque le pénétrateur descend et le diamant imprime son empreinte pendant un temps de repos (30 secondes), le diamant applique sa pression de pénétration.
- Le signal lumineux jaune s'allume, cela indique que le pénétrateur peut être relevé.

Pour constituer une documentation sur les empreintes avec leurs mesures, l'appareil est équipé d'un dispositif photographique de mise au point de l'image avec une chambre de réflexion VISO flux à verre dépoli.

Une vue d'ensemble de l'appareil avec ces constituants les plus utilisés est représentée par la (Figure III-20) .

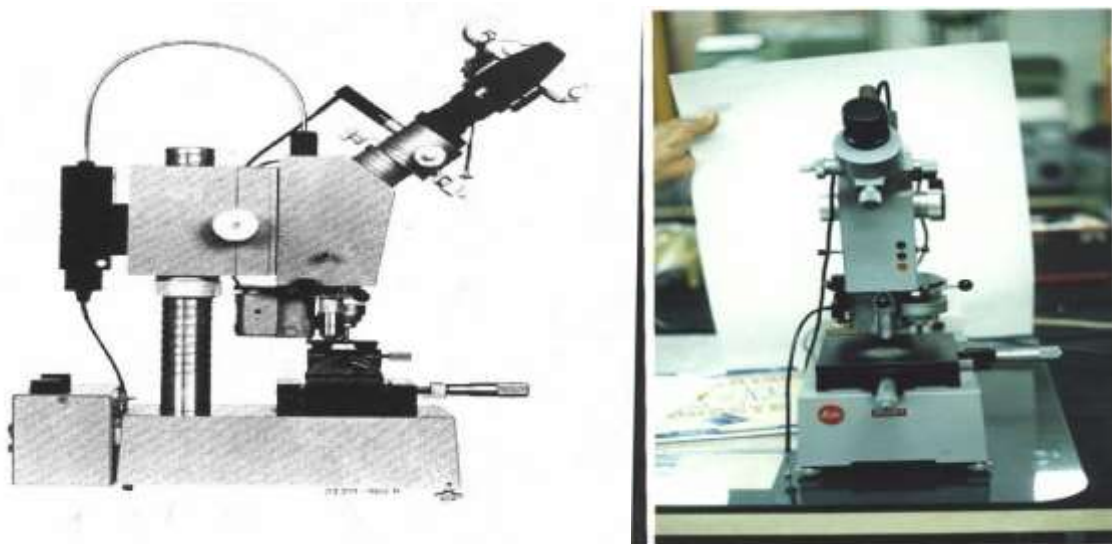


Figure III-20. Le microduromètre

#### III -3.2.1.2. Préparation des échantillons

On prend les mêmes 14 échantillons avec les mêmes dimensions que dans l'analyse de l'observation microstructurale.

#### III -3.2.1.3. Déroulement de l'essai

Maintenant les différentes zones des échantillons sont déterminées. On applique une charge  $F = 4,903 \text{ N}$  sur la surface de l'échantillon avec une vitesse constante jusqu'à ce qu'on voit un signal sur le microduromètre indiquant que l'essai est terminé (genres de lampes d'allumage vert, rouge et jaune).



A l'aide des microscopes associés, on observe les traces sur la surface sous forme d'empreinte et on détermine la dureté Vickers selon la relation présente:

$$Hv = \frac{189.10^3 P}{d^2} \quad (\text{III - 2})$$

et

$$Rm = 3.375 \times 0.95 Hv \quad , \quad (\text{III - 3})$$

Rm: c'est la résistance à la rupture .

Au court de cet essai, ont fait un balayage total de la surface de l'échantillon ( polis et attaqués) de droite à gauche avec un pas de 0,5 mm comme il est représenté par la ( Figure III-21 ) .

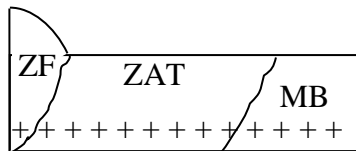
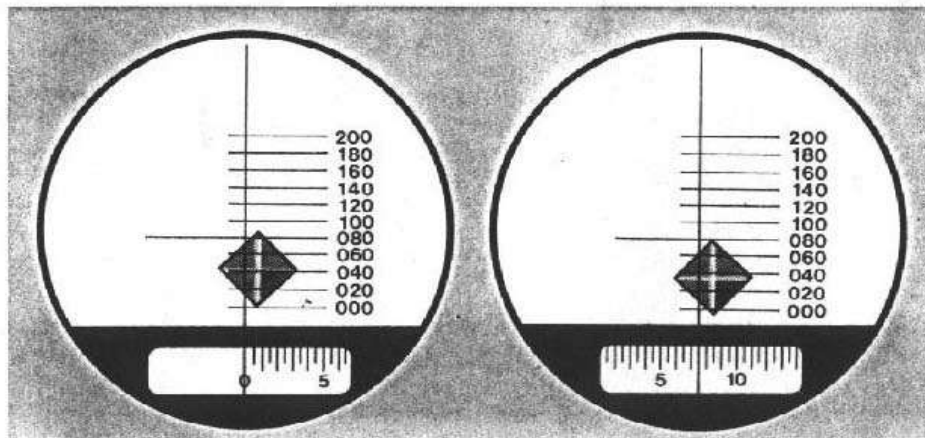


Figure III-21. Relevé de microdureté

#### III -3.2.1.4. Mesure d'une empreinte de Vickers

Lorsque le pénétrateur de duromètre descend et le diamant imprime son empreinte, on l'obtient comme suit ( Figure III-22 ) .



29 262-860 R

Figure III-22. Mesure de l'empreinte de Vickers [46].

- 1<sup>er</sup> Réglage à zéro.
- 2<sup>ème</sup> Réglage: rotation de la broche micro métrique de l'oculaire qui provoque le décalage de la graduation du réticule et on fait coïncider le 5<sup>ème</sup> trait avec le point opposé de l'empreinte.
- 4 intervalles du réticule  $4 \times 20 \mu\text{m} = 80 \mu\text{m}$ .
- Lecture de l'échelle inférieure  $7,5 \mu\text{m}$
- Longueur de l'empreinte  $87,5 \mu\text{m}$

Les résultats de tous les essais de dureté Vickers seront présentés dans le chapitre IV du présent travail.

### III -3.2.2. Essais de traction

Les essais de traction ont été réalisés sur des éprouvettes plates au sens longitudinal, au laboratoire de Génie civil de l'université de Tébessa sur une machine de traction universelle UMIB5005 SW dont la capacité de la cellule de force est de 500KN Figure III-23. Les essais sont toujours effectués à température ambiante avec une vitesse constante jusqu'à la rupture.



Figure III-23. Machine d'essai de Traction universelle UMIB5005 SW .

#### III -3 .2.2.1. Préparation des échantillons

Sur une chute de tôle d'acier A<sub>37</sub> on a découpé à froid trois éprouvettes de MB de dimension (500x35x3.1) mm<sup>3</sup>. vingt et une éprouvettes à la même dimension prélevées sur le cordon de soudure des tubes rectangulaires . Ces éprouvettes ont été ensuite usinées par fraisage jusqu'à obtention des dimensions fixées par la norme (NF EN 10002 – 1 (Octobre1990).

Dans le cadre de cette étude, tous les essais ont été réalisés jusqu'à rupture complète.

Nous avons utilisé 03 essais de traction sur le joint soudé et 03 essais de traction sur le cordon de soudure des éprouvettes traitées par recuit à 200°C /5mn , 200°C /30mn ,600°C /5mn,

600°C /30mn, 800°C /5mn et 800°C /30mn pour chaque échantillon , ajouté au 03 essais du MB.

### III-3.2.2.2. Déroulement de l'essai

Les éprouvettes sont prêtes à l'essai, on prépare le post de commande de la machine pour sa mise en marche, on prend les mesures de l'éprouvette avant l'essai, puis on la fixe dans un dispositif démarrage, on vérifie la bonne fixation de l'éprouvette et on fait démarrer l'essai.

La appareil de traction relié à un micro-ordinateur, permet la mesure automatique des caractéristiques mécaniques des différentes éprouvettes testées grâce à un logiciel approprié. Au cours de l'opération on peut lire la limite d'élasticité, la résistance à la rupture et l'allongement.

Après la rupture des éprouvettes, on obtient la moyenne des résultats qui sont représentés dans le (Tableau III- 5) .

| Eprouvettes  | Rm<br>(N/ mm <sup>2</sup> ) | Re<br>(N/ mm <sup>2</sup> ) | A<br>(%) |
|--------------|-----------------------------|-----------------------------|----------|
| MB           | 462.4                       | 423.1                       | 31.15    |
| Joint soudée | 617                         | 437.6                       | 11       |
| 200°C /5mn   | 539.1                       | 319.1                       | 33       |
| 200°C /30mn  | 522                         | 338.3                       | 35       |
| 600°C /5mn   | 444.1                       | 392.9                       | 31.9     |
| 600°C /30mn  | 461                         | 387.2                       | 35.6     |
| 800°C /5mn   | 490                         | 366.3                       | 34.1     |
| 800°C /30mn  | 482                         | 394.8                       | 33.2     |

Tableau III- 5. Résultats des caractéristiques mécaniques des différentes éprouvettes testées

### III -3.2.3. Essais de pliage

L'essai de pliage est un essai qualitatif qui peut être utilisé pour déterminer tant la flexibilité que la résistance d'un assemblage soudé bout à bout par fusion (vérifier la ductilité et l'absence de défauts internes du joint lui-même). Durant l'essai, la face externe de l'éprouvette doit demeurer observable.

#### III-3.2.3 .1. Préparation des échantillons

Les essais de pliage sont réalisés sur des éprouvettes normalisées, selon la NF A 03-161 , de dimensions 250 x 30 x 3.1 mm. L'usinage des entailles a été réalisé aux niveaux du cordon de soudure avant et après le recuit et sur le métal de base (Figure III-24) .



Figure III-24. Epreuves de pliage avant essai

#### III -3.2.3.2. Déroulement de l'essai

L'essai de pliage se fait sur une presse mécanique ( Figure III-25 ) .

On pose l'éprouvette sur deux appuis parallèles et est fléchié en son milieu à l'aide d'un mandrin. Les appuis parallèles sont de diamètre 50 mm et sont distants de 165 mm ( Figure III-26 ) .

Après avoir déposer l'éprouvette, on applique sur elle une force de pliage par l'intermédiaire du mandrin. on continue l'essai jusqu'à la première apparition des macro fissures. Ensuite on mesure l'angle de pliage à l'aide d'un rapporteur et on obtient les résultats qui sont représentés dans le Tableau III- 6 .



Figure III-25. Machine de pliage

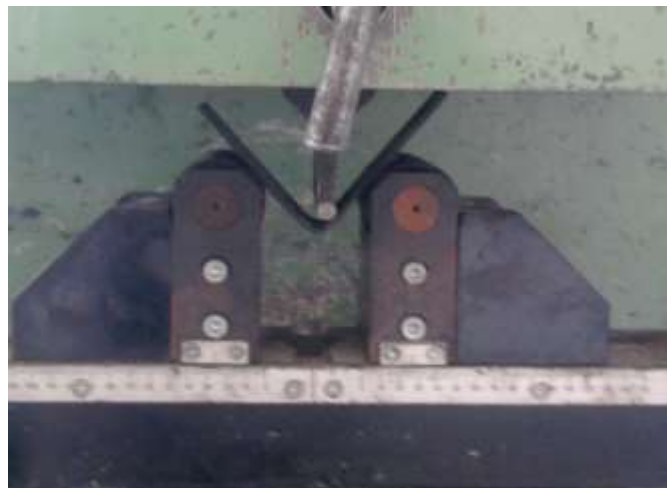


Figure III-26 . Essai de pliage



Figure III-27. Eprouvettes de pliage après essai

Les résultats obtenus au cours de chaque essai sont mentionnés dans le ( Tableau III- 6 ).

| Eprouvettes  | Angle de pliage en ° |
|--------------|----------------------|
| MB           | 63                   |
|              | 84                   |
|              | 77                   |
| Joint soudée | 75                   |
|              | 53                   |
|              | 66                   |
| 200°C /5mn   | 62                   |
|              | 72                   |
|              | 87                   |
| 200°C /30mn  | 112                  |
|              | 122                  |
|              | 64                   |
| 600°C /5mn   | 60                   |
|              | 72                   |
|              | 79                   |
| 600°C /30mn  | 85                   |
|              | 133                  |
|              | 55                   |
| 800°C /5mn   | 56                   |
|              | 79                   |
|              | 116                  |
| 800°C /30mn  | 74                   |
|              | 58                   |
|              | 126                  |

Tableau III- 6 . Résultats de l'essai de pliage

### III -3.2.4. Essais de résilience

L'essai de résilience caractérise l'énergie absorbée par la rupture d'une éprouvette entaillée.

L'essai qui demeure le plus utilisé pour évaluer la sensibilité à la rupture fragile au niveau des joints soudés est l'essai de résilience .Il est fréquemment appelé essai de résilience Charpy voire même essai Charpy. Il porte le nom de l'ingénieur français Georges Charpy ( 1865-1945 ) qui en fut un des principaux théoriciens et promoteurs [47].

Il mit en particulier au point la machine qui permet de réaliser l'essai et qui est appelée Mouton Charpy ( Figure III-28 ), Cet essai a été réalisé au laboratoire de contrôle technique à l'unité L'ENTTPP, Annabib de Tébessa .



Figure III-28. Machine d'essai de résilience

#### III-3.2.4.1. Préparation des échantillons

On a prélevé sur le cordon de soudure des tubes rectangulaires des éprouvettes dont les dimensions sont 55x10x3.1mm. Après le découpage des éprouvettes avec une scie mécanique, on effectue le surfacage et l'entaille en V de 45° d'ouverture et de 2mm de profondeur ( Figure III-29 ) . L'usinage des entailles a été réalisé aux niveaux de cordon de soudure avant et après le recuit et sur le métal de base.





Figure III-29 . Nuances de résilience avant essai

### III -3.2.4.2. Déroulement de l'essai

Dans le procédé Charpy, l'éprouvette est placée suivant ses deux cotés sur appuis du mouton Charpy, de telle façon que le couteau du marteau coïncide exactement avec l'entaille. Le pendule est levé jusqu'à la hauteur correspondante aux conditions d'essai.

l'arête du mouton vient la frapper en chute libre dans le plan de symétrie de l'entaille et sur la face opposée à celle-ci . La lecture de l'énergie d'impact consommé par l'éprouvette est effectuée directement sur le cadran en joule; le poids du pendule est de 20 Kg. Le mouton pendule à une puissance de travail égale à 300 joules. Cette énergie dans notre machine est donnée directement sur un écran gradué.



Figure III-30. Nuances après résilience

Les résultats des essais de résilience sont présentés dans le ( Tableau III-7 ).

| Eprouvettes  | Résilience K en J/cm <sup>2</sup> |
|--------------|-----------------------------------|
| MB           | 45                                |
|              | 62.5                              |
|              | 50                                |
| Joint soudée | 35                                |
|              | 43.8                              |
|              | 33                                |
| 200°C /5mn   | 37.5                              |
|              | 60                                |
|              | 46.6                              |
| 200°C /30mn  | 39                                |
|              | 51.1                              |
|              | 67.3                              |
| 600°C /5mn   | 57                                |
|              | 44.3                              |
|              | 70.2                              |
| 600°C /30mn  | 50                                |
|              | 48.3                              |
|              | 44.9                              |
| 800°C /5mn   | 35                                |
|              | 57.2                              |
|              | 65.2                              |
| 800°C /30mn  | 42                                |
|              | 49.5                              |
|              | 54                                |

Tableau III- 7 . Résultats de l'essai de résilience

### III -3.2.5. Essais d'aplatissement

L'essai d'aplatissement est une étape intéressante dans le domaine des contrôles des profilés tubulaires. Cet essai a pour but de détecter les défauts dans le cordon de soudure qui se trouve sous forme de fissure, piqure.

L'aplatissement est conduit jusqu'à ce que la distance entre plateaux H, mesurée sous charge atteigne la valeur limite supérieure [29] .

$$H = \left[ \frac{1+K}{K+\frac{e}{D}} \right] \cdot e \quad (\text{III - 4})$$

H: Distance entre plateaux mesurée sous charge

e : Epaisseur de paroi du tube

D : diamètre extérieur du tube

K : constante en fonction des matériaux

La valeur de K et la limite inférieure H sont indiquées au ( Tableau III-8 ) .

| Nuance | Valeurs de K | Limites inférieures de H |
|--------|--------------|--------------------------|
| A37-2  | 0.09         | 4e                       |

Tableau III- 8 .Valeur de K et la limite inférieure de H du Matériau A37 [29]

Cet essai est effectué conformément à la norme d'essai NF A 49-853, à une extrémité du tube ou sur virole de longueur minimale 30 mm prélevée à une extrémité du tube. La soudure étant placée à 90° de la direction de la force appliquée .

#### III -3.2.5.2. Déroulement de l'essai

L'aplatissement entre les plateaux d'une machine d'une éprouvette prélevée à l'extrémité d'un tube ou découpée dans un tube dans le sens perpendiculaire à l'axe longitudinal de ce tube jusqu'à ce que la distance entre les plateaux, mesurée sous charge dans la direction de l'aplatissement, atteigne la valeur spécifiée dans la norme de produit concernée.



Figure III-31: Échantillon ( tube métallique)



Figure III-32. Début de l'essai d'aplatissement



Figure III-33. Au cours de l'essai



Figure III-34 . Fin de l'essai



Figure III-35. Echantillons après l'essai d'aplatissement

après les essais d'aplatissement nous avons trouvé les résultats suivante (Tableau III-9).

| Eprouvette   | e<br>(mm) | D<br>(mm) | H <sub>minimal</sub><br>(mm) | H <sub>calculé</sub><br>(mm) | H <sub>mesuré</sub><br>(mm) |
|--------------|-----------|-----------|------------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| Tube ébauche | 3.10      | 118.5     | 12.4                         | 29,08919                     | 29.6                        |
|              | 3.10      | 70.7      | 12.4                         | 25.24466                     | 26.3                        |
| 200°C /30mn  | 3.10      | 118.5     | 12.4                         | 29,08919                     | 28.9                        |
|              | 3.10      | 70.7      | 12.4                         | 25.24466                     | 24.6                        |
| 600°C /30mn  | 3.10      | 118.5     | 12.4                         | 29,08919                     | 27.7                        |
|              | 3.10      | 70.7      | 12.4                         | 25.24466                     | 23.4                        |

Tableau III-9. Résultats d'aplatissement

### III -3.2.6. Essais d'évasement

L'essai d'évasement est une méthode de contrôle destructif et permettant de montrer les causes possibles qui favorise l'apparition des défauts, et aussi les précautions.

#### III -3.2.6. 1. Déroulement de l'essai

L'évasement à l'aide d'un mandrin tronconique de l'extrémité d'une éprouvette découpée dans un tube, jusqu'à ce que le diamètre extérieur maximal du tube ainsi évasé atteigne la valeur spécifiée dans la norme de produit concernée .

La norme européenne NF A 49-856 spécifie une méthode de détermination de l'aptitude à la déformation plastique par évasement de tubes métalliques, de section circulaire, elle est applicable aux tubes de diamètre extérieur au plus égal à 150 mm ( 100 mm pour les métaux légers) et d'épaisseur de paroi ne dépassant pas 10 mm [29].

L'essai est effectué sur l'extrémité du tube ou sur une virole au moyen d'un mandrin conique d'angle au sommet  $30^\circ$  .

Nous avons respectivement indiqué les dimensions des éprouvettes pour lesquelles des angles  $\beta$  ont été choisis, et des diamètres références pour lesquels les diamètres mesurés après essais doivent être supérieurs (Tableau III-10) .

|                                  |            |            |            |
|----------------------------------|------------|------------|------------|
| Longueur de l'éprouvette (mm)    | 2D         | 1.5D       | 1.5D       |
| Angle du cône de mandrin $\beta$ | $30^\circ$ | $45^\circ$ | $60^\circ$ |

Tableau III-10 .Détermination de la longueur de l'éprouvette [29].

Le ( Tableau III-11 ) présente les diamètres évasés calculés avec le rapport e/D

|                |             |              |              |              |
|----------------|-------------|--------------|--------------|--------------|
| e /D           | $\leq 0.08$ | 0.081 à 0.12 | 0.121 à 0.15 | $\leq 0.151$ |
| D calculé (mm) | 1.13D       | 1.12D        | 1.10D        | 1.08D        |

Tableau III-11 . Détermination des diamètres évasés calculés avec le rapport e/D [29].



Figure III-36. Échantillon pour l'essai d'évasement



Figure III-37. Début de l'essai d'évasement.



Figure III-38. Essai d'évasement (au cours de l'essai ).



Figure III-39 . Echantillons après l'essai d'évasement .

Les résultats d'évasement sont regroupés dans le ( Tableau III-12 ) .

| Eprouvette   | D<br>(mm) | e<br>(mm) | Ø calculé<br>(mm) | [Ø ] évasé<br>(mm) | Observation                              |
|--------------|-----------|-----------|-------------------|--------------------|--|
| Tube ébauche | 118.5     | 3.10      | 133.905           | 129.2              | Fissure profonde                         |
|              | 70.7      | 3.10      | 79.891            | 79.1               | Rupture sur le cordon de soudure de tube |
| 200°C /30mn  | 118.5     | 3.10      | 133.905           | 153.2              | Bonne soudure                            |
|              | 70.7      | 3.10      | 79.891            | 95.3               | Bonne soudure                            |
| 600°C /30mn  | 118.5     | 3.10      | 133.905           | 146.9              | Bonne soudure                            |
|              | 70.7      | 3.10      | 79.891            | 98.7               | Bonne soudure                            |

Tableau III- 12. Résultats d'évasement



### III -3.3. Analyse par diffraction de rayons X

#### III -3.3.1. Préparations des échantillons

On prend les mêmes échantillons avec les mêmes dimensions que dans l'analyse de micro dureté. Nous avons effectué cette étude au sein du laboratoire de recherche de l'Université de Biskra .Pour la mise en évidence des phases présentes dans notre alliage, nous avons examiné la réflexion de ces échantillons de petites dimensions(15x10x3.1) mm<sup>3</sup>. L'appareil utilisé est un diffractomètre de type Bruker D8 Advance; il est équipé d'une anticathode en cuivre, d'un monochromateur pour s'affranchir de la fluorescence du fer et d'un détecteur

( Figure III-40) .



Figure III-40. Diffractomètre des rayon X ( l'université de Biskra).

Les conditions expérimentales utilisées:

Lors des analyses par rayons X : Appareillage : D8 Advance de paramètres :

- $\lambda_{Cu} = 1,5406\text{\AA}$
- Tension V = 40kV
- Intensité appliquée I = 30 mA

- Angle de démarrage :  $2\theta = 10^\circ$
- Angle final :  $2\theta = 120^\circ$

Les rayons X sont des vibrations électromagnétiques analogues aux vibrations lumineuses, mais de longueur d'ondes environ  $10^3$  fois plus petites, elle est pratiquement comprise entre 0.02 et 100Å environ. On retrouve les rayons X dans le large domaine des radiations ( Figure III-41 ).

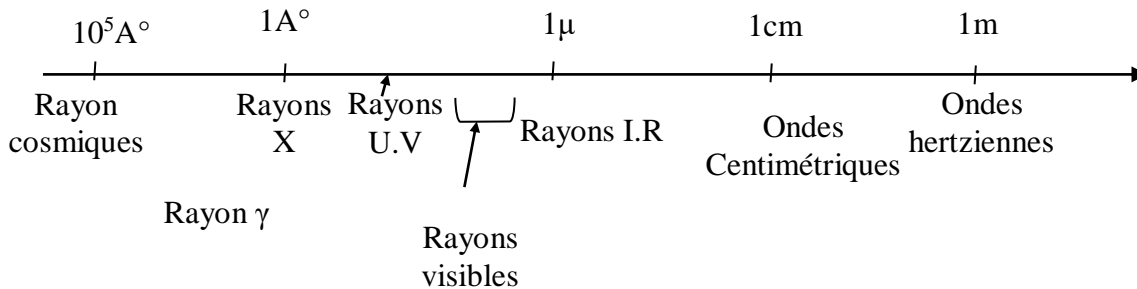


Figure III-41. Les rayons X dans l'échelle des longueurs d'ondes [48].

### III -3.3.2. La diffraction des rayons X

C'est une méthode universellement utilisée pour identifier la structure des produits cristallisés. Cette méthode ne s'applique, jusqu'à récemment, qu'à des milieux cristallins tels que : roche, cristaux, minéraux, pigments, argiles, etc. Ces derniers présentent, en effet, les caractéristiques de l'état cristallin, c'est à dire un arrangement périodique ordonné d'atomes dans des plans réticulaires (hkl).

La méthode permet aussi clairement de distinguer les produits amorphes ( verres...) des produits cristallisés.

La méthode des poudres est basée sur la mesure de l'intensité diffractée par un échantillon en fonction de l'angle  $2\theta$  entre le faisceau incident et le faisceau diffracté. Après un balayage angulaire en  $2\theta$ , un ensemble de raies de diffraction est observé, chaque raie étant caractéristique d'un plan cristallographique de l'espace diffractant [17] .

La détermination d'une structure se fait à partir des angles de diffraction, par le calcul des distances Inter-réticulaires. Ainsi, on peut déduire la structure cristalline, la nature des phases et calculer les paramètres de la maille .

### III -3.3.3. Principe de mesure par RX

Un faisceau incident monochromatique est dirigé sur l'échantillon polycristallin . Il est réfléchi pour un angle d'incidence  $hkl$  qui est défini par les conditions de diffraction du rayonnement utilisé sur les plans du type  $\{ hkl \}$  , ( Figure III-42 ) [49] .

Si l'on considère un ensemble de plans réticulaires  $(hkl)$  équidistants de  $\mathbf{d}$ , il y a diffraction lorsque de loi BRAGG est satisfaite, à savoir:

$$n \lambda = 2d \sin\theta$$

$\lambda$  : Longueur d'onde incidente

$n$  : Ordre de la diffraction

$2\theta$ : l'angle entre le faisceau incident et le faisceau diffracté

$\mathbf{d}$ : la distance inter-réticulaire .

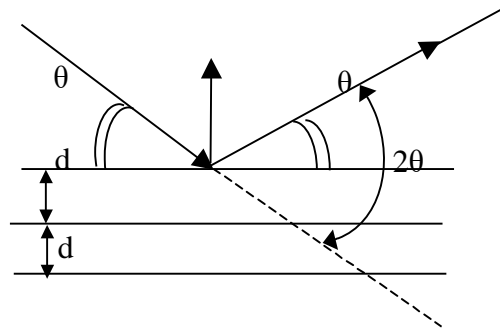


Figure III-42. Diffraction des rayons X [48] .

Cette relation signifie que la diffraction ne s'effectue que dans certaines directions repérées par les angles  $\theta$ ; de plus, il faut noter que la longueur d'onde  $\lambda$  étant connu la mesure de  $\theta$  permet de calculer la valeur de  $\mathbf{d}$ .

Les spectres obtenus ont été enregistrés dans le chapitre IV du présent travail.

**III -3.4. Caractérisation des états déformés****III -3.4.1. Essais de fractographie**

La fractographie est l'étude qui vise à comprendre les mécanismes conduisant à la rupture par l'analyse des surfaces rompues: les faciès de rupture. L'imagerie se réalise au microscope électronique à balayage car cette technique présente plusieurs avantages. Tout d'abord elle permet d'accéder à des échelles très différentes du faciès, depuis le millimètre jusqu'à quelques microns, donc le but de cet essai est de mettre en évidence les propriétés de ténacité du métal. On désigne par ténacité la propriété que présente un métal difficile à rompre au choc, par opposition à la fragilité qui est la propriété de la rupture fragile, avec ou pas de déformation plastique. Il est à noter que, une rupture peut se caractériser par toute absence de déformation permanente avant rupture, la rupture est dite rupture fragile, au contraire, une certaine déformation permanente peut précéder la rupture, on a donc une rupture ductile, comme elle peut être une rupture mixte.

**III-3.4 .2. Préparation des échantillons**

Pour la fractographie, on a pris des échantillons de nuances qui ont subi d'emblée les essais de résilience. Les observations fractographiques ont été faites sur des faciès de rupture et ce après essais mécaniques de résilience au laboratoire de physique -université de Tlemcen-. Pour nos observations nous avons travaillé sous 20 kV. Les faciès de rupture seront présentés dans le chapitre IV du présent travail.

*Chapitre IV*  
*Résultats et discussion*

## Résultats et discussions

### Introduction

Les résultats de l'étude microstructurale et mécanique du joint soudé et traité sont présentés successivement. Chaque résultat a été interprété pour mieux mettre en valeur l'effet du traitement thermique sur le joint soudé .

### IV-1. Résultats des analyses chimiques

Au vu des résultats obtenus suite à notre étude menée sur la chimie du soudage et ceci concernant les aciers de constructions mécaniques ; nous pouvons avancer dans ce qui suit une analyse comparative de nos résultats avec celles données dans quelques références bibliographiques ou travaux réalisés au l'entreprise nationale des transformations des tubes et produits plats (ENTTPP) Tébessa.

Les résultats d'analyses chimiques de carbométrie ,de spectrométrie et de la technique de dispersion d'énergie EDS ,des diverses nuances étudiées montrent que les pourcentages en éléments Carbone , Manganèse , Silicium,... sont en respects des normes requises.

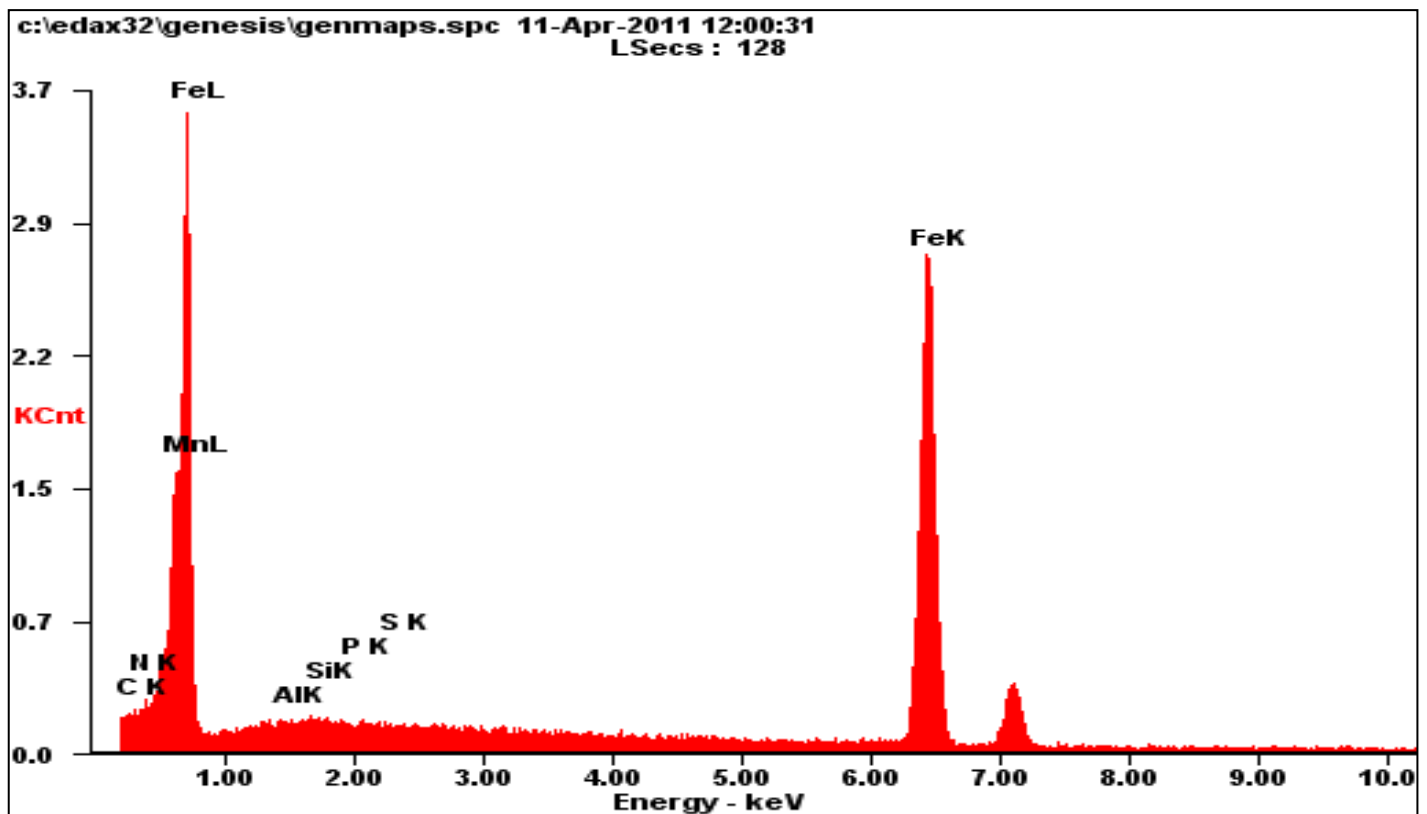


Figure IV-1. Spectre d'analyse de l'acier A37 par EDS

| Elément  | Wt%           | Norme    |
|----------|---------------|----------|
| C        | 0.11          | Max 0.19 |
| N        | 0.47          | 0.008    |
| Mn       | 0.45          | -        |
| Al       | 0.06          | ≥ 0.02   |
| Si       | 0.011         | -        |
| P        | 0.02          | 0.055    |
| S        | 0.006         | 0.055    |
| Fe       | 98.81         | -        |
| Matériau | Métal de base |          |

Tableau IV-1 .Composition chimique de l'acier A37 (en % massique)

## IV-2. Caractérisation microstructurale

### IV-2.1. Microscopie optique

Les échantillons étudiés dans tous les états A, B et C ont été observés au microscope optique après polissage et attaque chimique au Nital 4 ( % ), avec des mêmes grossissements.

La structure de notre produit de soudage à l'état A ( le joint soudé ), est essentiellement ferrito-perlitique avec une grande proportion volumique de la ferrite. La perlite présente aux joints de grains de la ferrite ( figure IV-2 ). le taux de perlite est plus grand dans la zone fondue par rapport au métal de base et la zone affectée thermiquement.

Cette observation montre que le joint soudé est constitué de trois zones (MB, ZAT et ZF).

les grains de la zone fondée sont fins, par contre la zone affectée thermiquement est constituée des gros grains de ferrite .Ces observations correspondent aux précédents travaux effectués par Digheche et Derfouf [50], [51] .

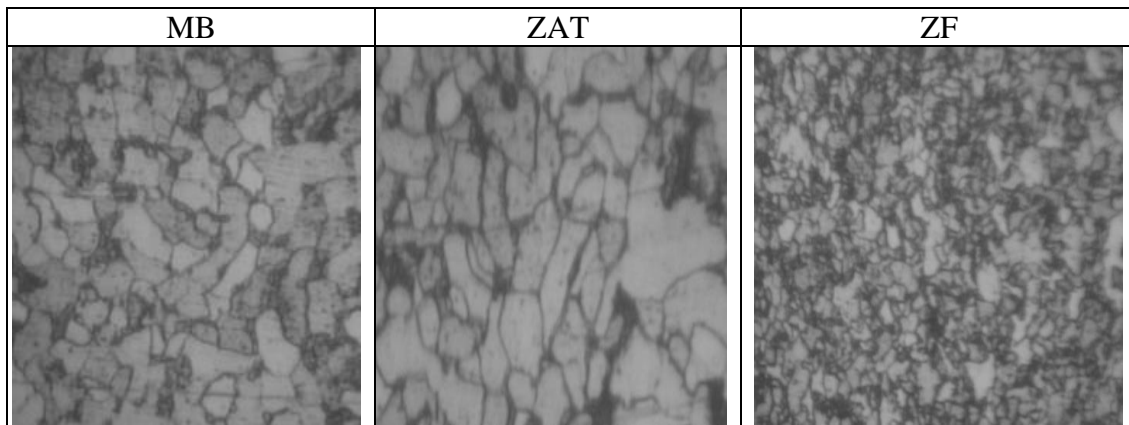


Figure IV-2. Microstructure optique de l'acier 0.11% en Carbone (échantillon A) .

Il est connu que le traitement thermique après le soudage par induction diminue la fragilité du joint [52] . D'après les travaux antérieurs ,le cycle thermique provoqué par le soudage induit un grand changement microstructural au niveau de la zone affectée thermiquement (ZAT) [53] [54]. D'après les travaux de Yan et al. [55], le joint de soudure obtenu par le soudage par induction est très étroit , presque 2mm de largeur , mais il représente une source de faiblesse mécanique. Les figures ( IV. 3 et 4 ) présentent la micrographie des nuances B et C (après le traitement thermique isothermes), avec des différents grossissements. Généralement, la métallurgie du joint soudé peut être divisé en deux régions la zone de fusion (ZF) et la zone affectée thermiquement .il est connu que la microstructure formée au niveau du joint soudé est due au gradient de température et de la différence chimique que se développent lors de soudage [56] [57] .

Les traitements thermiques réalisés sur ( les nuances A) aux températures inférieures à 800°C, Ont modifié la structure de joint soudé ; l'augmentation du taux de perlite varie proportionnellement en fonction de la température de recuit .

A la température entre 800 et 1200C° environ, la structure des nuances B et C deviendra plus grosse vue l'augmentation de la taille des grains. Ce qui correspondra à une structure plus grossière. Les taux de ferrite les plus élevés sont enregistrés au niveau de la zone affectée Thermiquement ZAT et ZF.



|                      | MB | ZAT | ZF |
|----------------------|----|-----|----|
| T=200°C et t =05mn   |    |     |    |
| T=400°C et t =05mn   |    |     |    |
| T=600°C et t =05mn   |    |     |    |
| T=900°C et t =05mn   |    |     |    |
| T=1000°C et t =05mn  |    |     |    |
| T= 1200°C et t =05mn |    |     |    |

Figure IV-3. Comparaison les microstructures optique des échantillons B .

|                     | MB | ZAT | ZF |
|---------------------|----|-----|----|
| T=200°C et t =30mn  |    |     |    |
| T=400°C et t =30mn  |    |     |    |
| T=600°C et t =30mn  |    |     |    |
| T=800°C et t =30mn  |    |     |    |
| T=900°C et t =30mn  |    |     |    |
| T=1000°C et t =30mn |    |     |    |
| T=1200°C et t =30mn |    |     |    |

Figure IV-4. Comparaison les microstructures optique des échantillons C .

### IV-2.2. Microscopie électronique à balayage

La technique de microscopie électronique à balayage permet d'estimer plus précisément l'état de surface ( l'évolution microstructurale) des échantillons étudiés avec la meilleure résolution.

La taille du grain ferritique est le paramètre essentiel qui joue sur les propriétés des aciers a structure ferrite-perlite suivant les propriétés désirées. Le contrôle du grain est donc un objectif essentiel lors de la fabrication des tubes de distribution du gaz naturel.

L'observation micrographique a été faite sous un microscope électronique à balayage conventionnel Jeol JSM-LV6390. La microstructure du joint soudé par induction à HF de l'acier doux 0.11% de carbone est formé de ferrite ( grains noirs) et de perlite (particules blanche) (figure IV-5). Les grains de ferrite sont de taille très variable, Le grossissement des grains dans le joint soudé varie du métal de base (MB) jusqu'à la zone fondue ( ZF ) passant par la zone affecté thermiquement ( ZAT ).

Les micrographies de notre acier après recuit pendant 5mn montrent que la structure générale est composée essentiellement de ferrite figure (IV- 6). Les microstructures de cette figure sont homogène avec une taille du grain pratiquement identique ( pour les nuances ayant subies les traitements thermiques inférieur ou égal à 900°C ),

Les traitements thermiques réalisés aux températures supérieures à 900°C, ont modifié la structure de l'acier A37, à partir de 1000°C ,la structure dans les trois zones est totalement différente.

La figure ( IV- 7 ) montre les microstructures du joint soudé pendant 30mn à différentes températures .On peut dire avec l'augmentation de température et du temps de recuit, les observations MEB montrent clairement la nouvelle redistribution des colonies perlitiques ( en blanc ) dans la matrice ferritique ( en noir) .

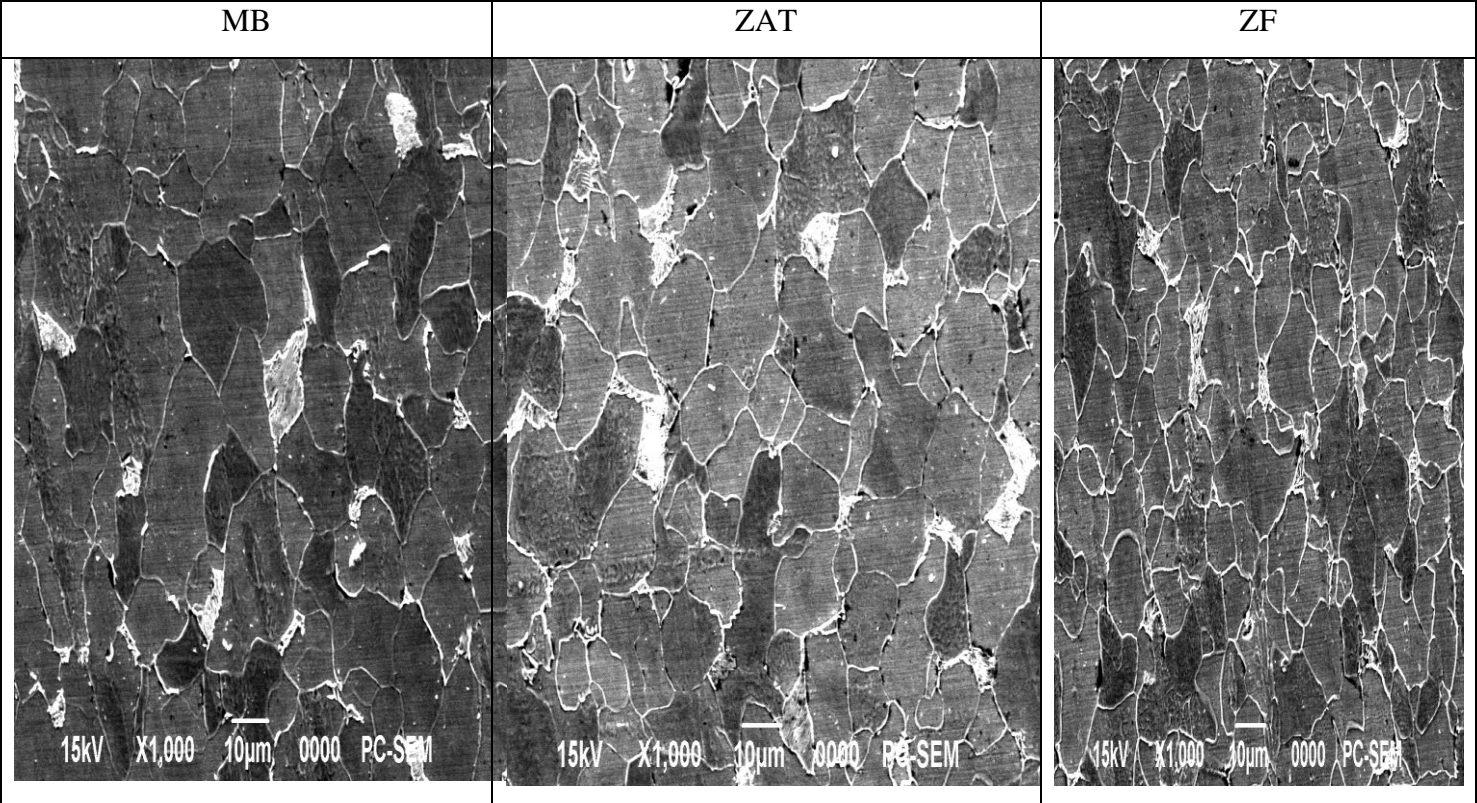


Figure IV-5. Microstructure MEB de l'acier 0.11% en Carbone ( joint soudé ), G=1000X

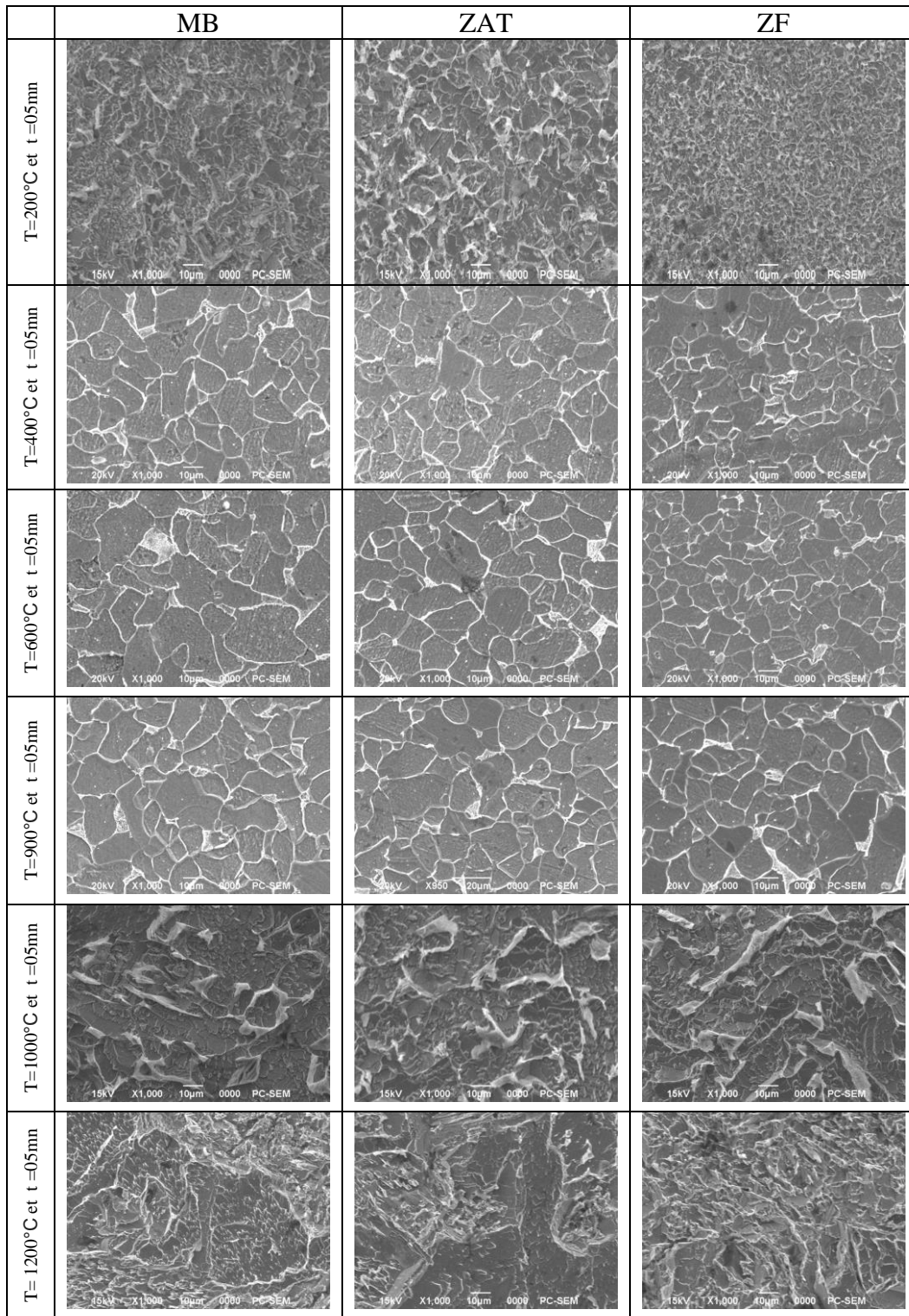


Figure IV-6. Comparaison les microstructures MEB de l'acier 0.11% en Carbone soudé et traité par recuit pendant 5mn (Nuances B), G=1000X.

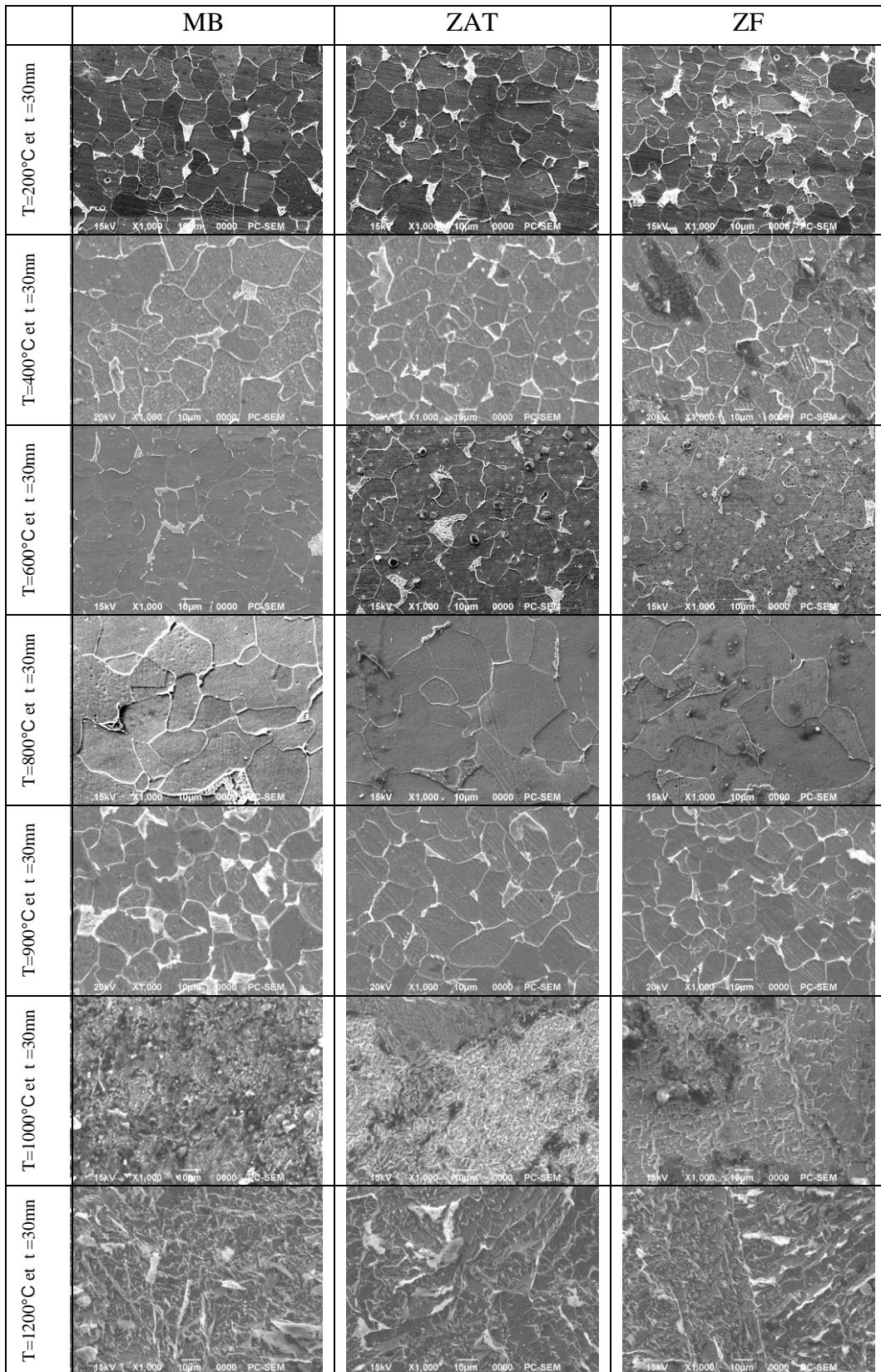


Figure IV-7. Comparaison les microstructures MEB de l'acier 0.11% en Carbone soudé et traité par recuit pendant 30mn ( Nuances C ), G=1000X.

### IV-3. Résultats d'analyses par diffraction de rayons X

Les diffractogrammes des échantillons recuits au dessous de 1000°C montrent que nous avons dans tous les cas une prédominance de phases ferritique caractérisée par ces pics diffractant; relatifs à la structure cubique centrée

(110) du  $Fe_{\alpha}$  à  $2\theta = 45^{\circ}$

(200) du  $Fe_{\alpha}$  à  $2\theta = 65^{\circ}$

(211) du  $Fe_{\alpha}$  à  $2\theta = 83^{\circ}$

Ce qui confirme toujours les résultats obtenus préalablement par microscopie optique et microscopie électronique à balayage .

Cependant, les échantillons recuits à 1200°C présentent des pics supplémentaires, ce qui confirme les observations microscopiques . Ces pics peuvent être attribués à la formation de nouvelles phases ( carbures ou autres ) .

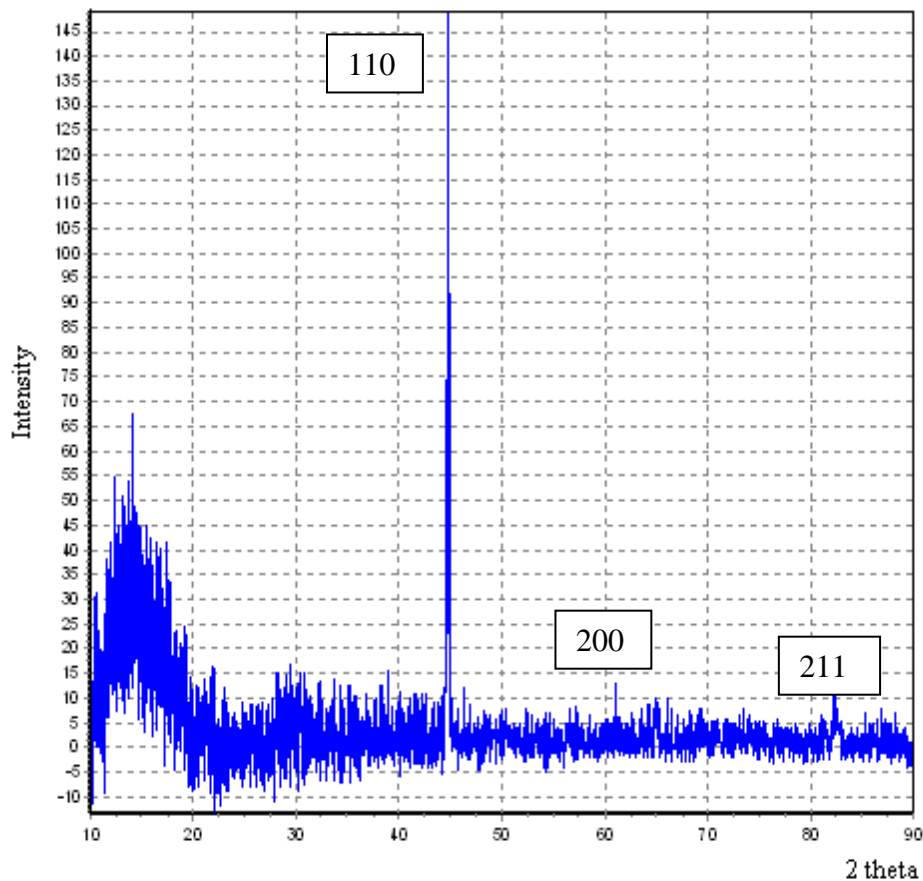


Figure IV- 8. Diffractogramme de nuance A37 ( Metal de base ).

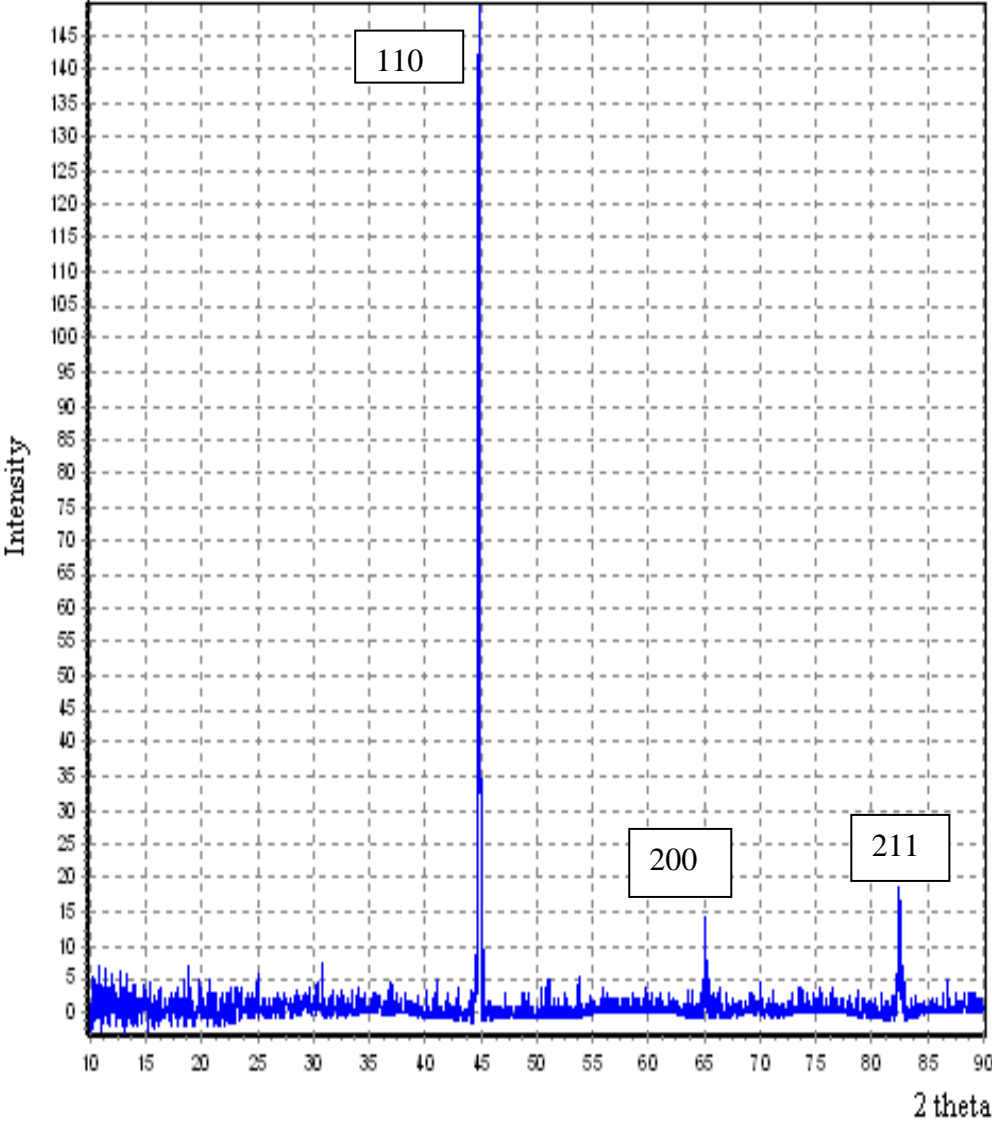


Figure IV- 9. Diffractogramme de nuance A ( le joint soudé ).



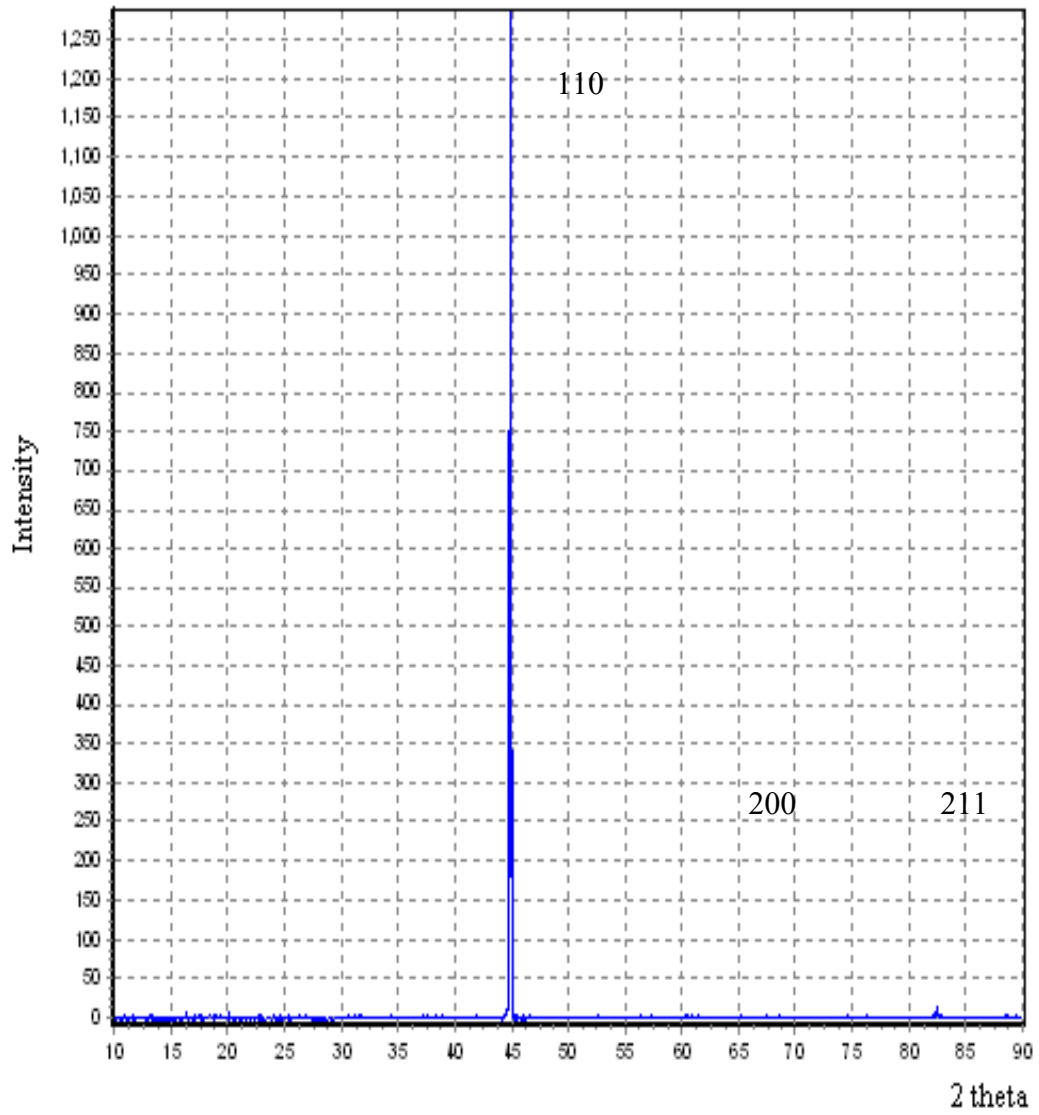


Figure IV-10. Diffractogramme de nuance A après recuit à 200 °C durant 5 min.

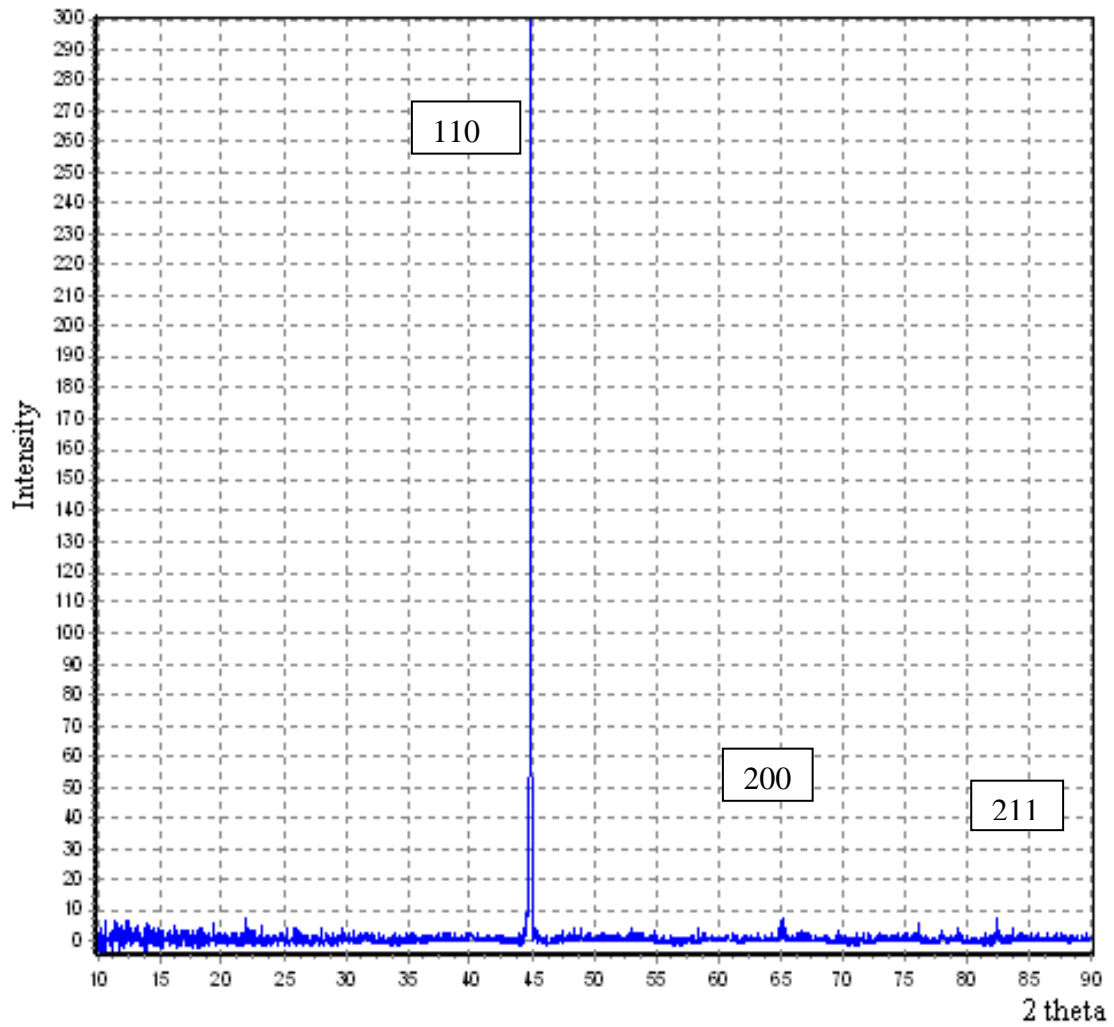


Figure IV-11. Diffractogramme de nuance A après recuit à 200 °C durant 30 min.

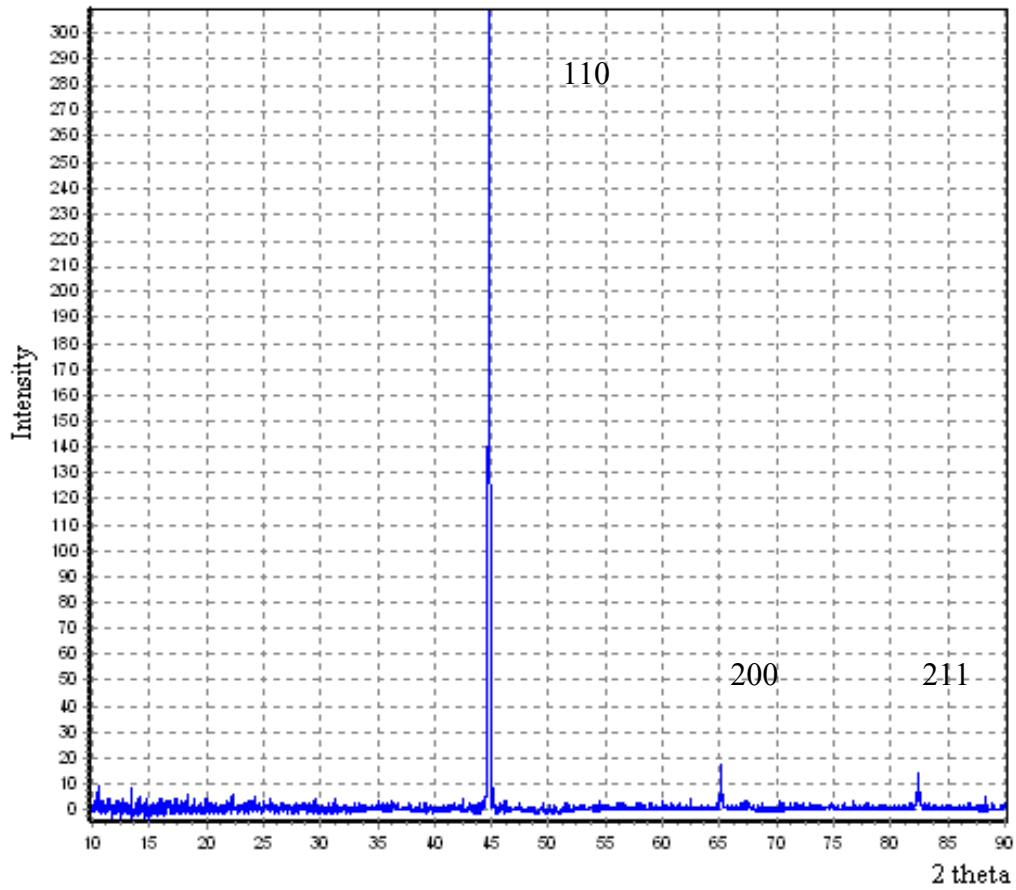


Figure IV- 12. Diffractogramme de nuance A après recuit à 400 °C durant 5 min.

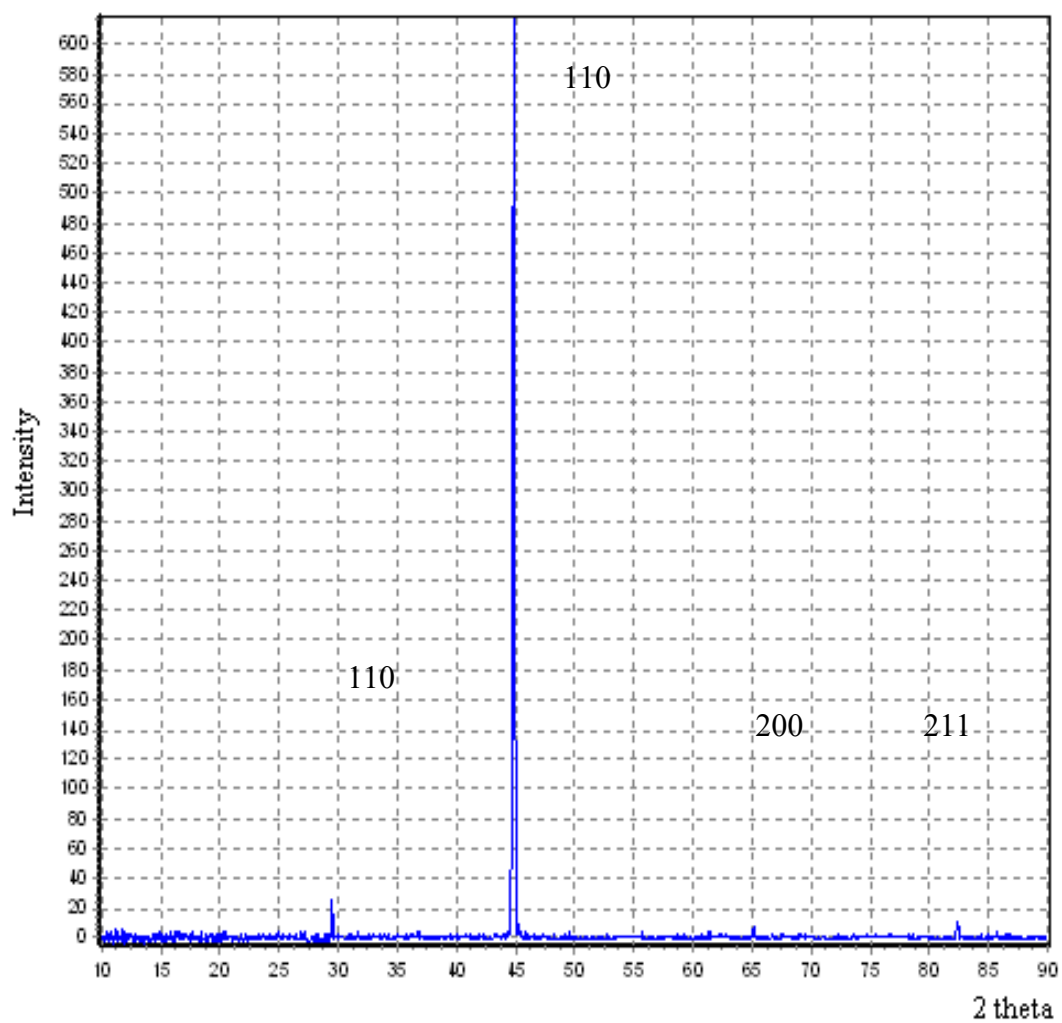


Figure IV- 13. Diffractogramme de nuance A après recuit à 400 °C durant 30 min.

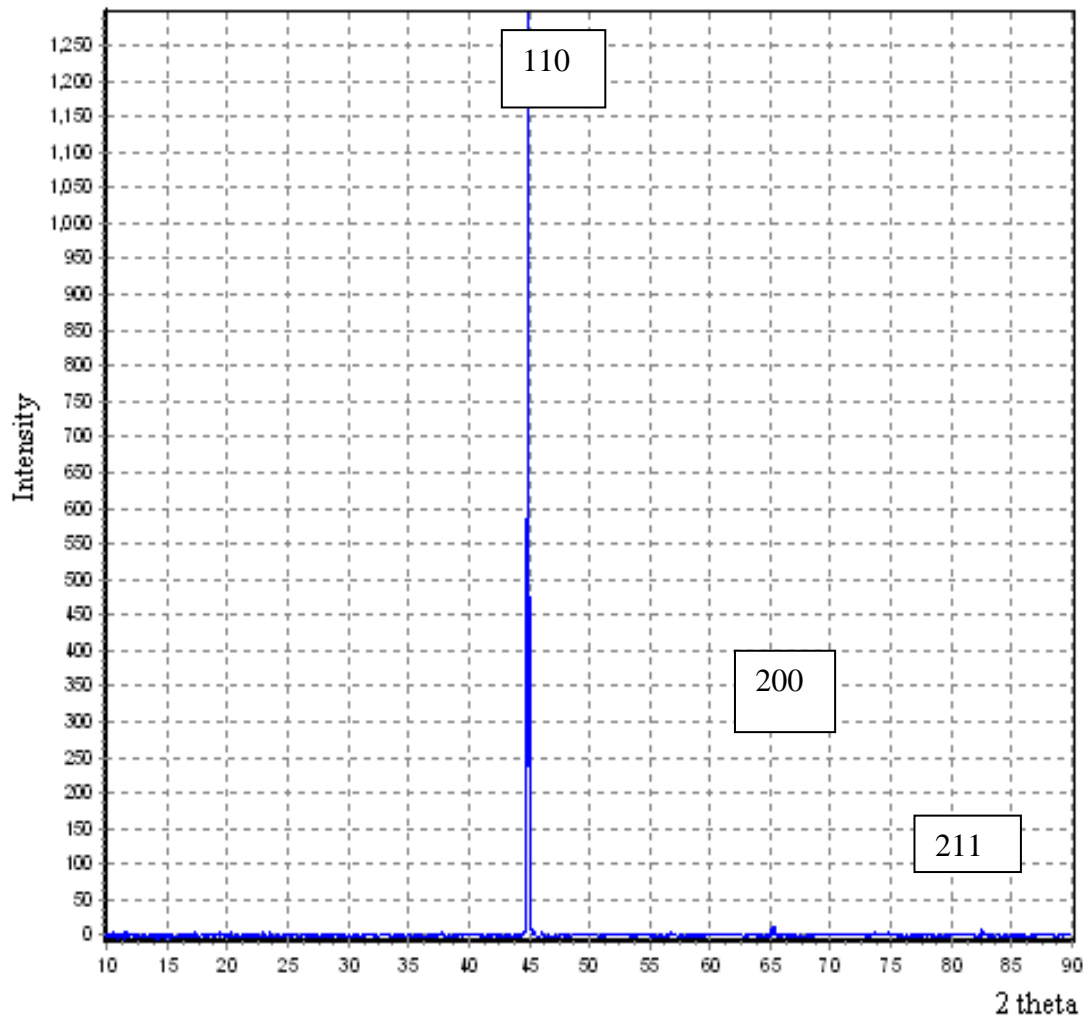


Figure IV- 14 .Diffractogramme de nuance A après recuit à 600°C durant 5 min.

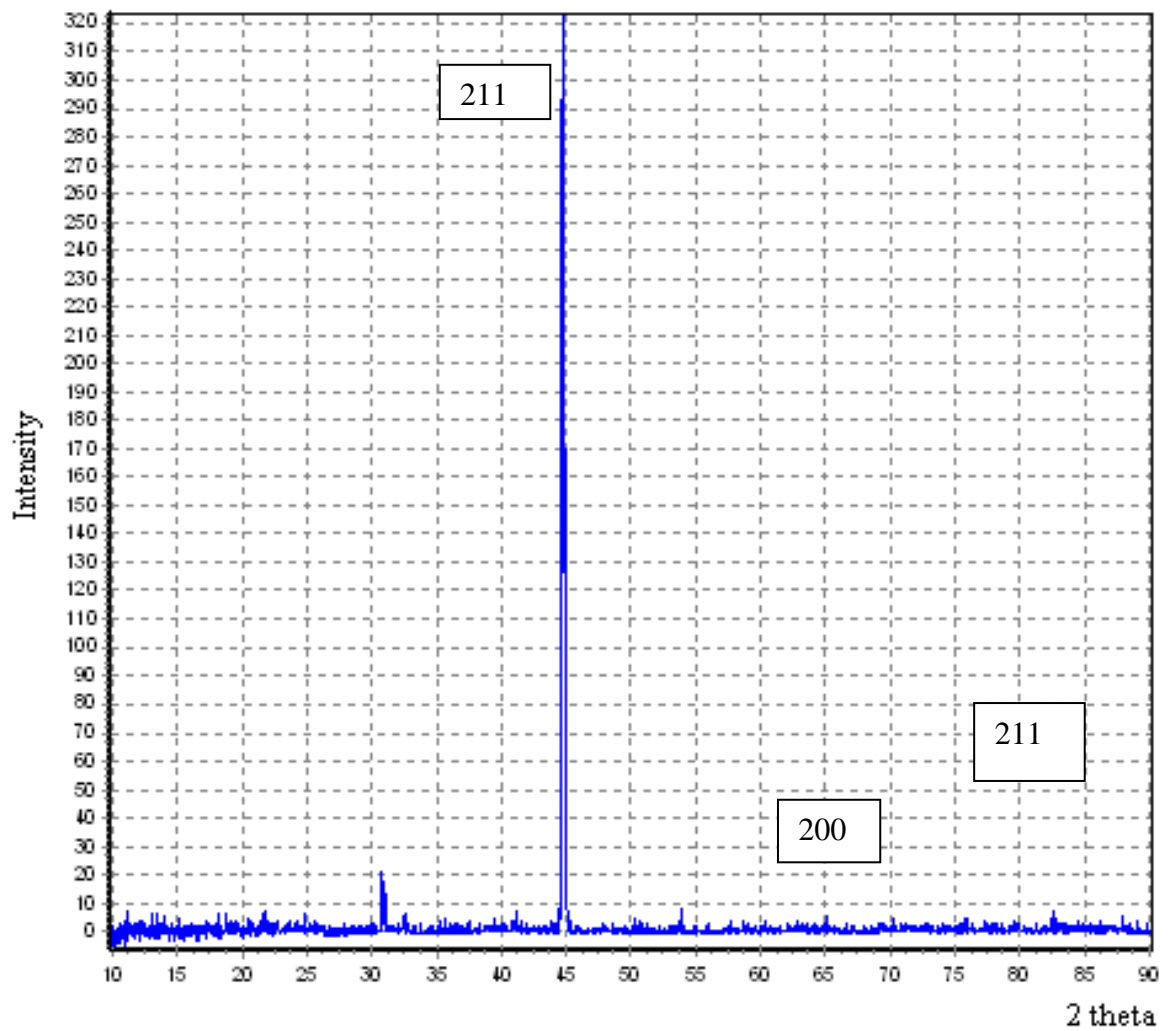


Figure IV- 15. Diffractogramme de nuance A après recuit à 600°C durant 30 min.

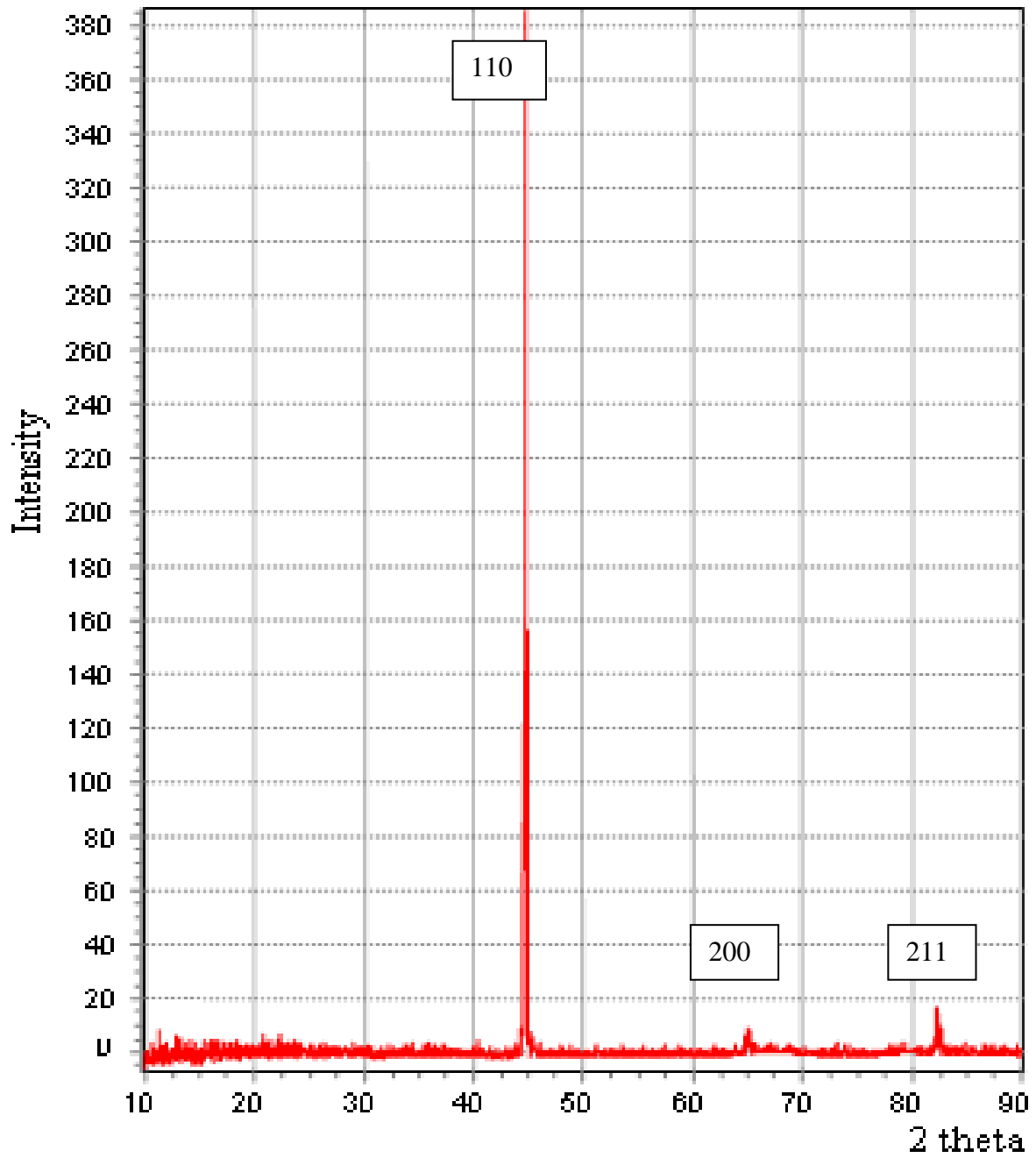


Figure IV-16. Diffractogramme de nuance A après recuit à 800°C durant 30 min.

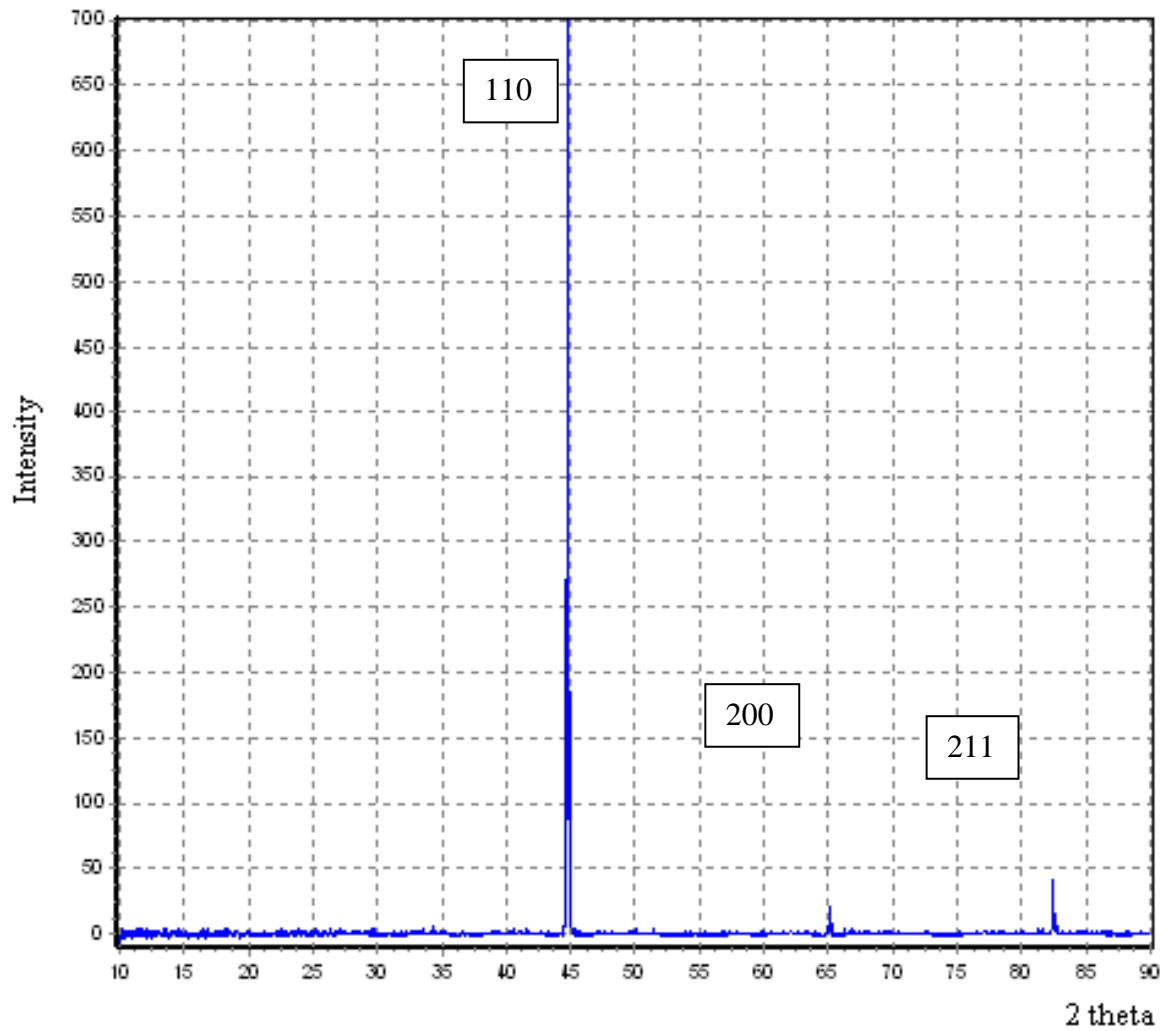


Figure IV- 17. Diffractogramme de nuance A après recuit à 900°C durant 5 min.



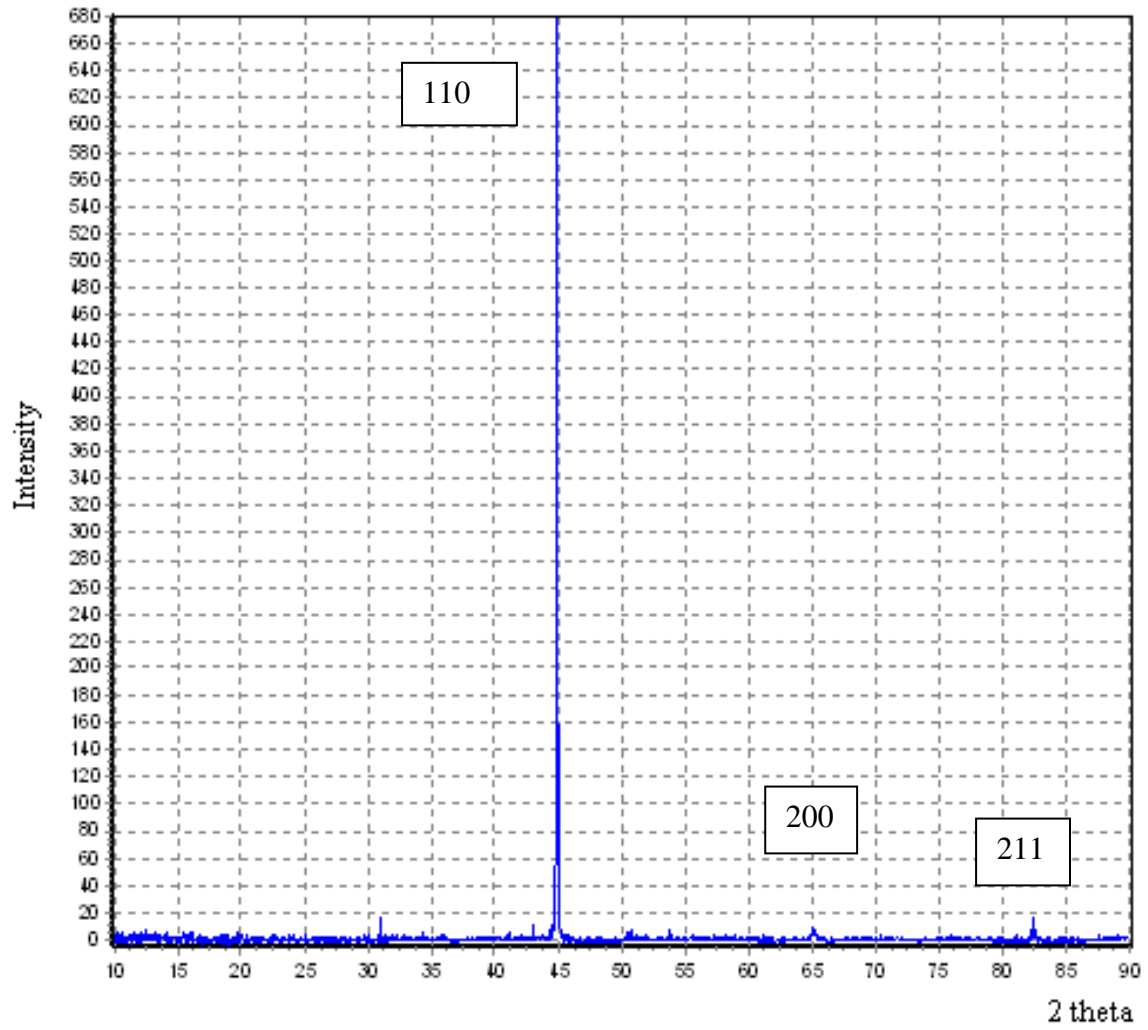


Figure IV- 18. Diffractogramme de nuance A après recuit à 900°C durant 30 min.

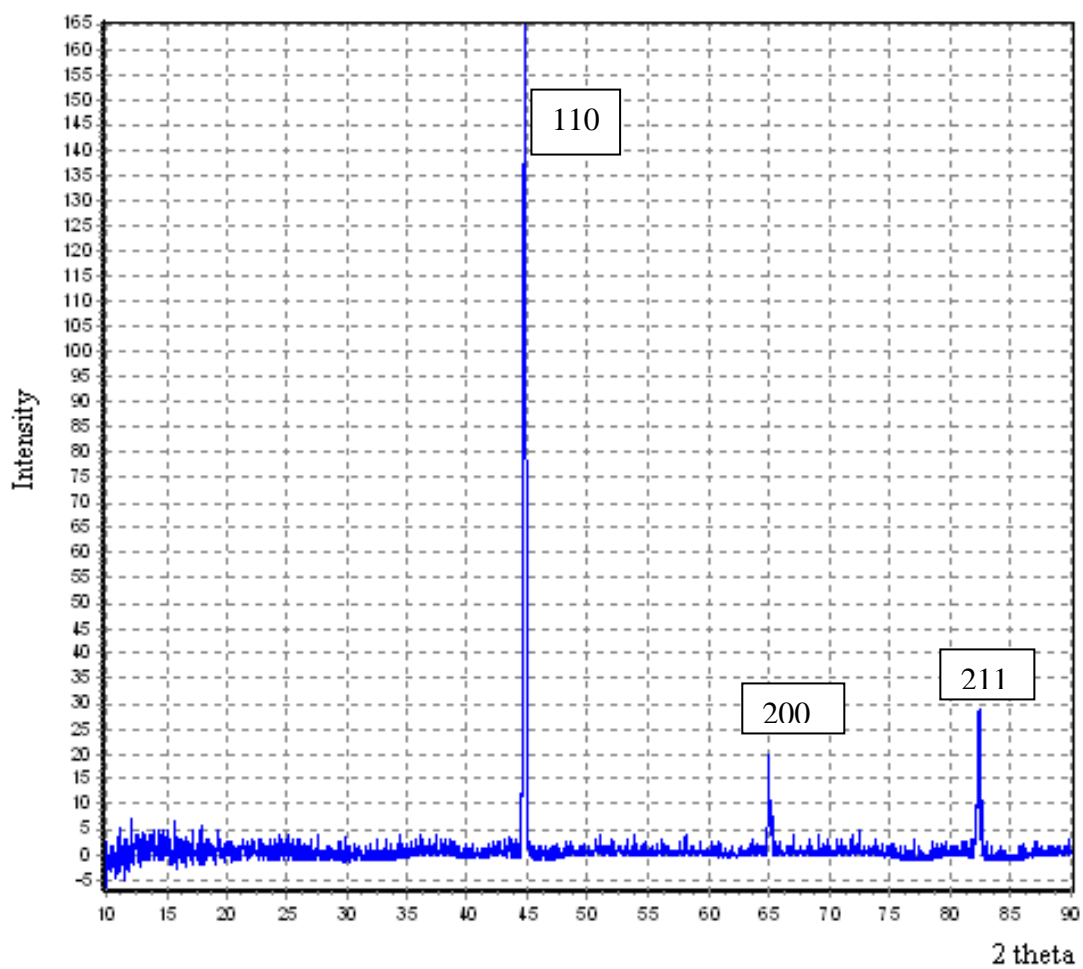


Figure IV- 19. Diffractogramme de nuance A après recuit à 1000°C durant 5 min.

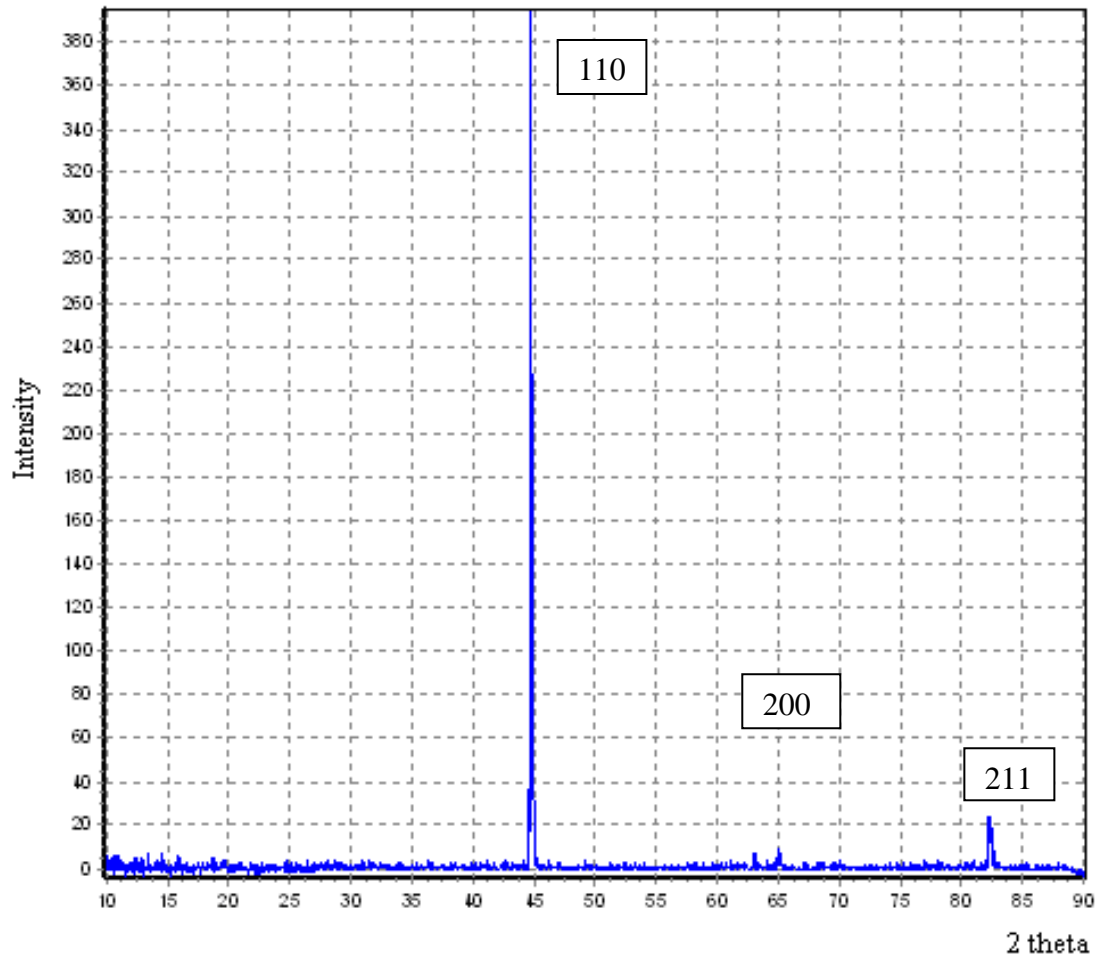


Figure IV- 20. Diffractogramme de nuance A après recuit à 1000°C durant 30 min.

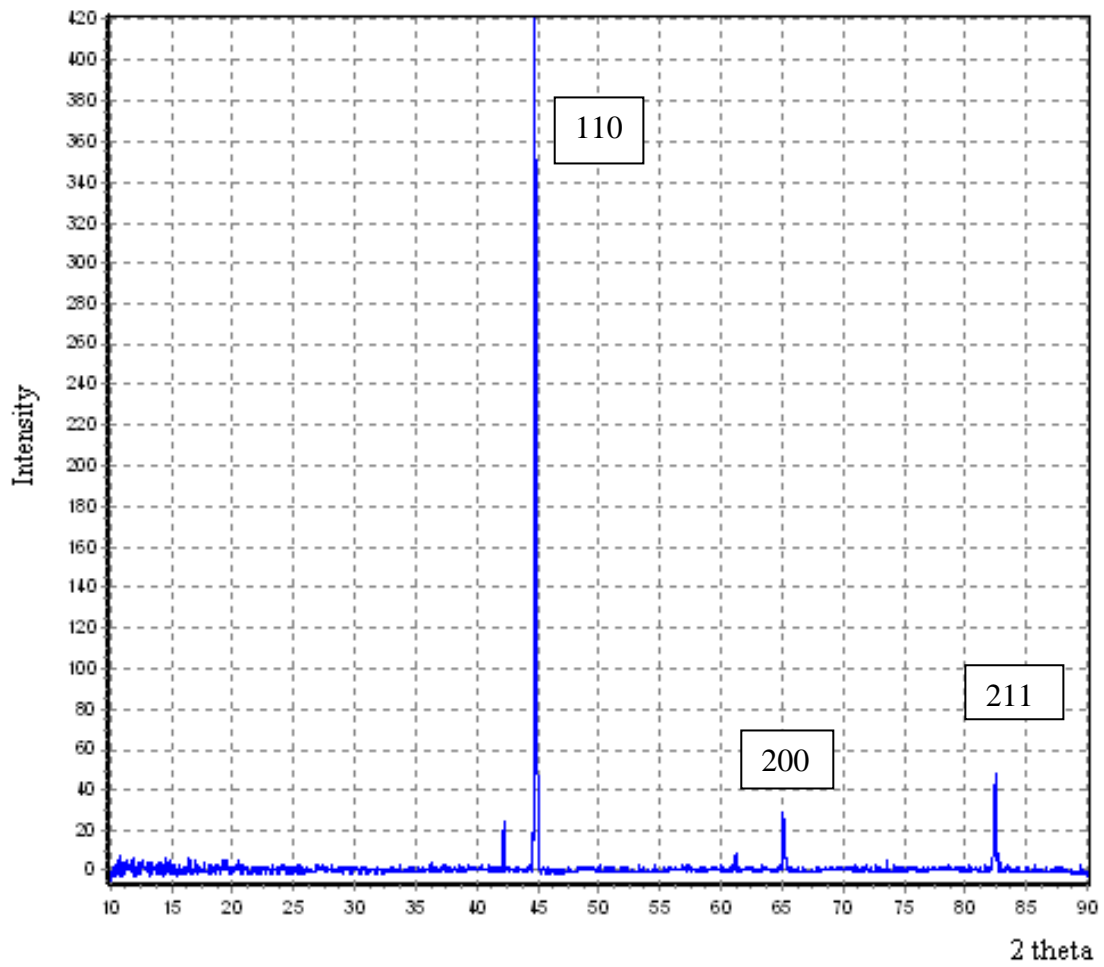


Figure IV- 21. Diffractogramme de nuance A après recuit à 1200°C durant 5 min.

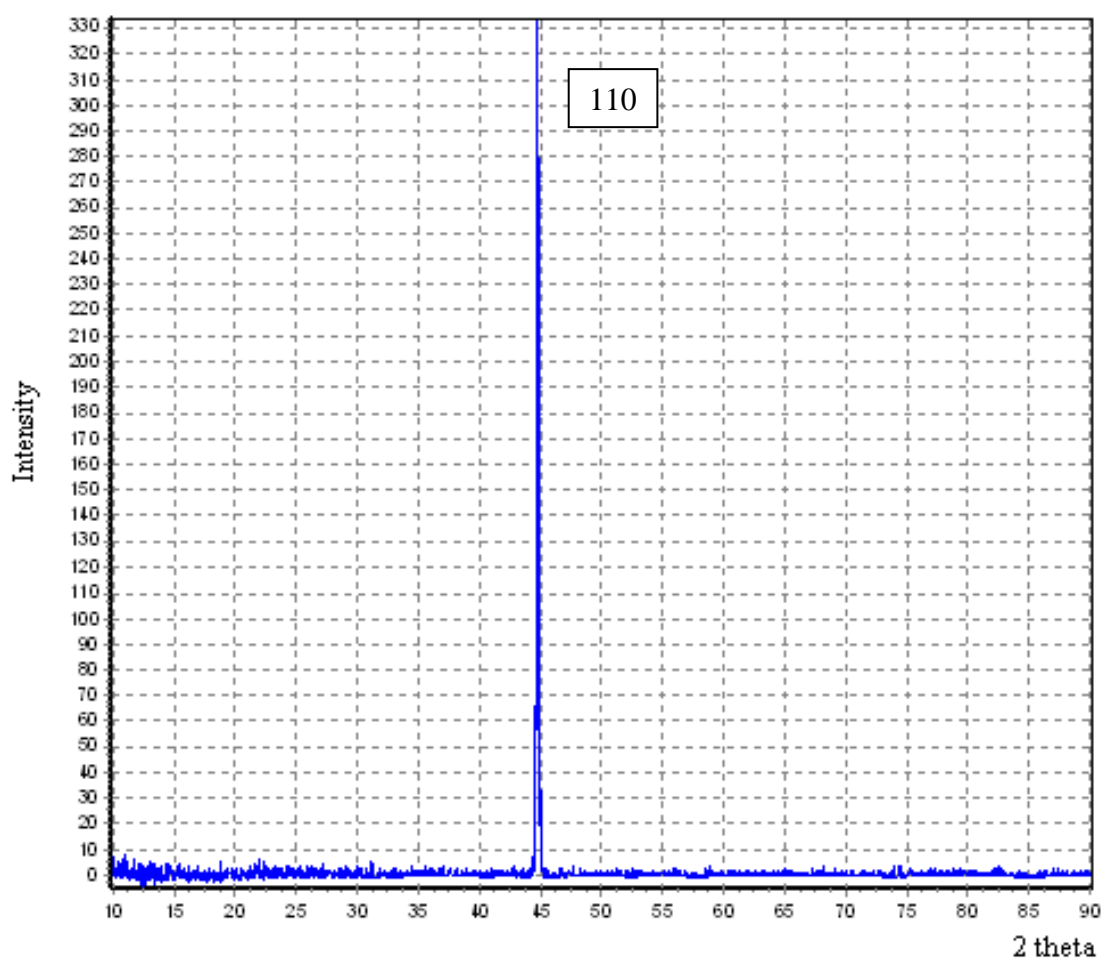


Figure IV- 22. Diffractogramme de nuance A après recuit à 1200°C durant 30 min.

### III-4. Résultats des essais mécaniques

#### IV-4.1. Résultats de micro dureté

L'essai de micro dureté est la méthode la plus simple pour obtenir les renseignements sur les zones les plus dures. Certains chercheurs, la méthode la plus simple de déduire plus d'information sur le joint soudé, l'utilisation de la microdureté est d'un grand intérêt [58].

Les profils de micro dureté ont été réalisés avec un pas de 0.5mm en balayant les 03 zones des nuances A, B et C. Les valeurs moyennes de dureté Vickers, déterminées avec une charge appliquée égale à 500g.

L'analyse du graphe du micro duretés met en évidence l'influence du phénomène thermique du soudage sur le joint et son voisinage, nous constatons la différence entre les duretés respectivement du métal de base et de celle du joint soudé.

La figure ( IV- 23 ) montre l'évolution de la microdureté en fonction de la distance d dans le joint soudé ( nuances A ); les micro duretés les plus importantes ont été observées dans la zone affecté thermiquement 188Hv vers le métal fondue 198Hv. L'accroissement de dureté au niveau de la ZAT et ZF peut être rendu aux changements structuraux. Gul et al. [59], ont trouvé que la dureté maximale est obtenue au centre du joint soudé.

Les microduretés mesurées dans le MB sont comprises entre 141 et 154 Hv,

Les figures ( IV. 24- 36 ) ; montrent que les résultats expérimentaux de mesure de la dureté Vickers après le traitement thermique de recuit sont diminués les structures deviennent plus homogènes. Elle est semblable pour tous les nuances ( B et C), La petites différences justifiée par l'hétérogénéité du métal de base.

Entre ( 200 et 600 )°C, on note une certaine stabilité de la courbe à des valeurs assez élevée de la microdureté. Le graphe montre clairement que les plus grandes valeurs de microdureté sont obtenues après les traitements thermiques entre 1000 et 1200°C. Cela est du au phénomène de précipitation qui se produit dans cet intervalle de températures. Donc ce résultat est en accord avec les résultats de la microscopie.

Les résultats de microdureté donnent des profils en total accord à ceux relatifs aux joints soudés ; en effet on remarque que la dureté est élevée dans la zone de liaison ce qui vulgarise l'effet de la surchauffe dans la zone affectée thermiquement, si l'on considère que la rupture fragile est favorisée par une dureté élevée et par une grande taille de grain.

Cette analyse des mesures de microduretés Vickers montre que les microduretés les plus élevées se situent dans le métal fondu. On constate que les valeurs de microdureté après le traitement thermique sont diminués par rapport au joint soudé.

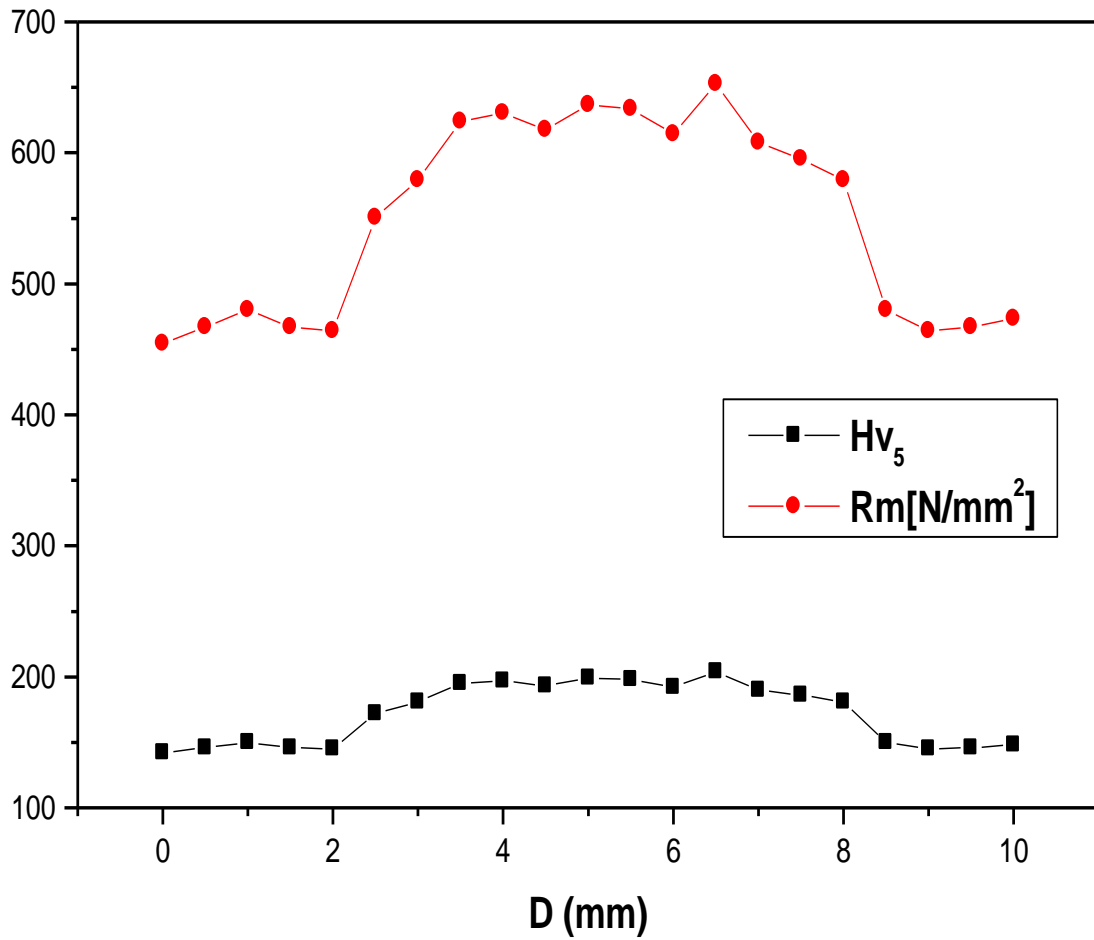


Figure IV-23. Profils de microdureté de la nuance A ( le joint soudé ).

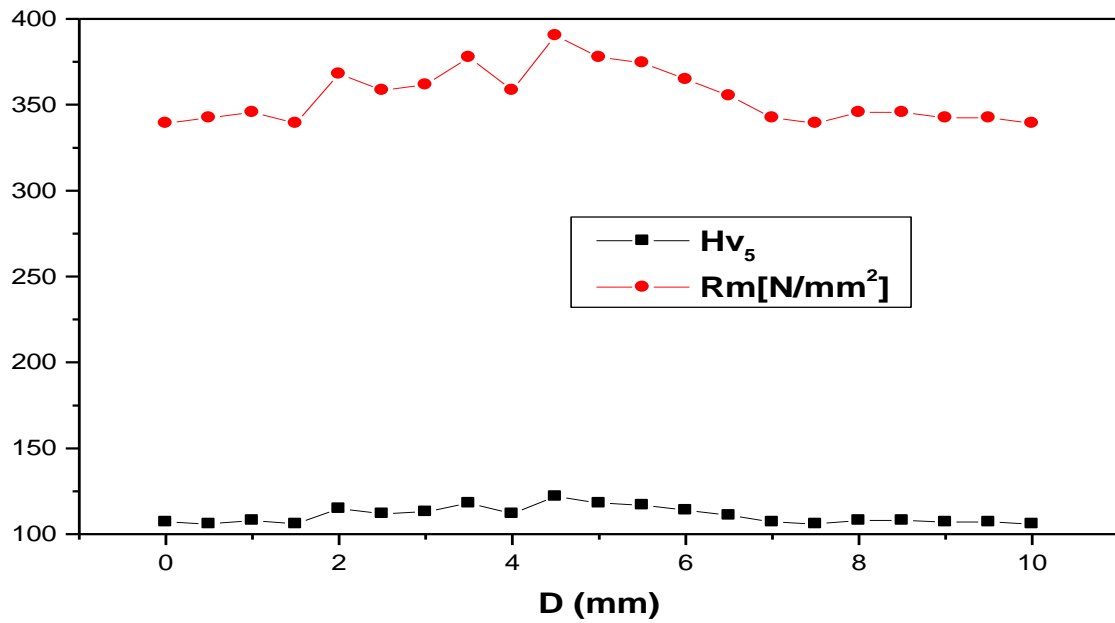


Figure IV-24. Profils de microdureté de la nuance B<sub>200</sub>

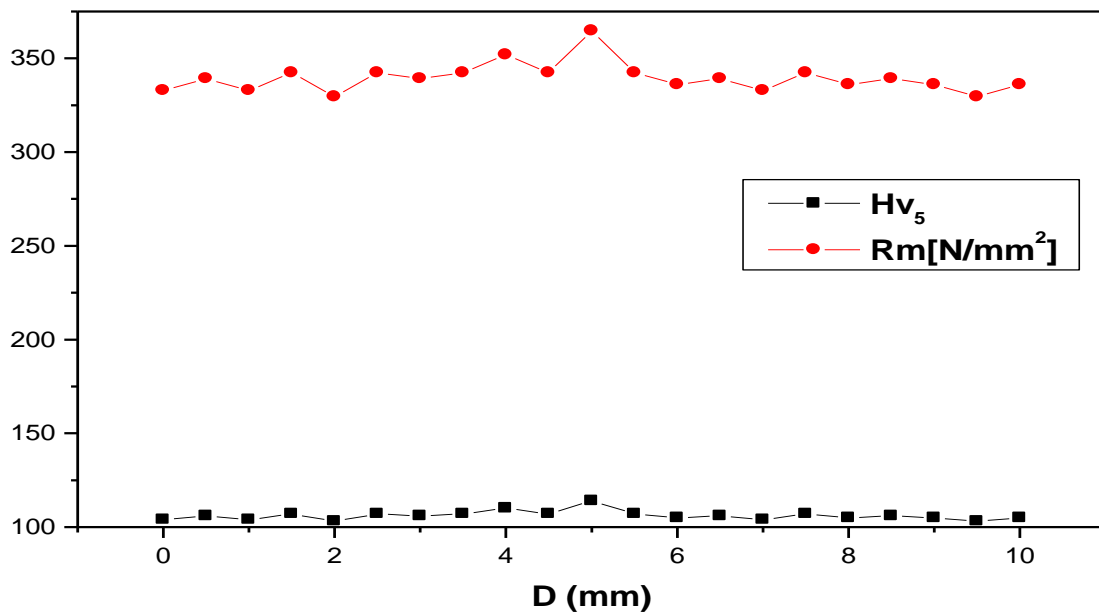


Figure IV-25. Profils de microdureté de la nuance C<sub>200</sub>



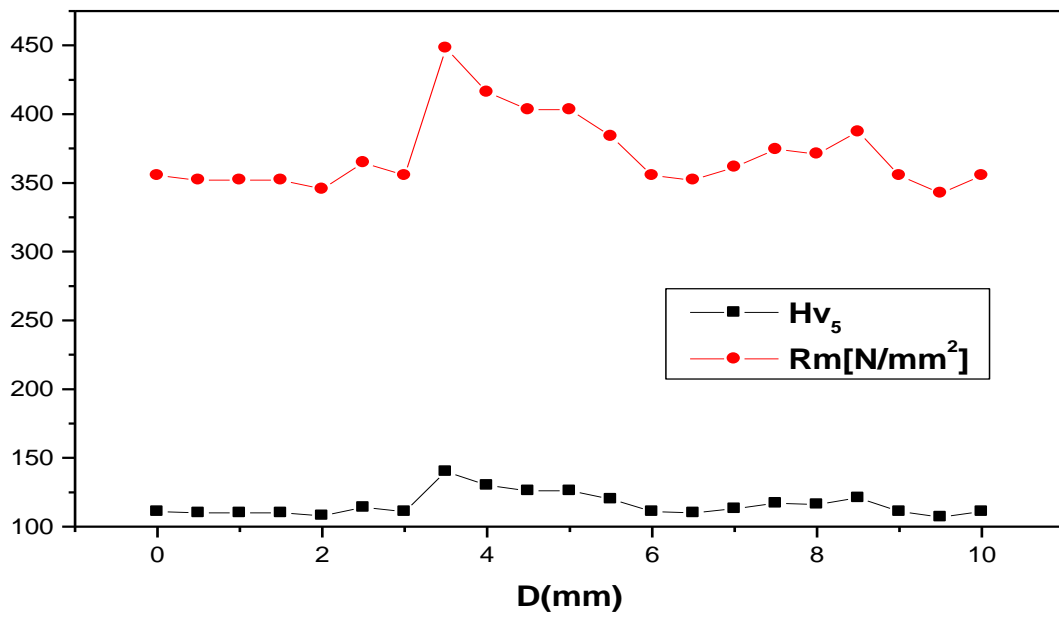


Figure IV-26. Profils de microdureté de la nuance B<sub>400</sub> .

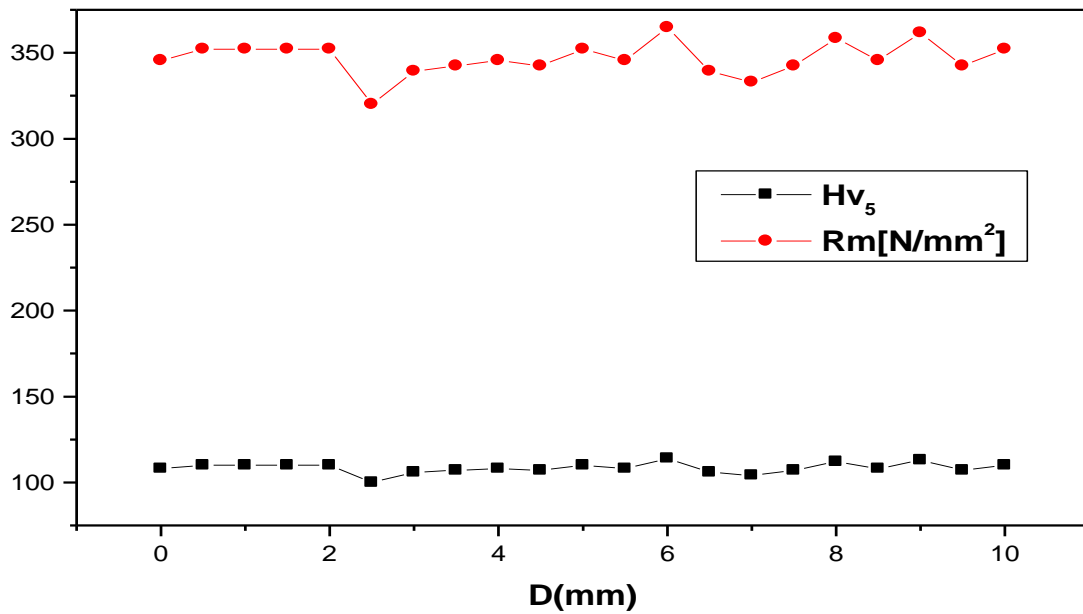


Figure IV-27. Profils de microdureté de la nuance C<sub>400</sub> .

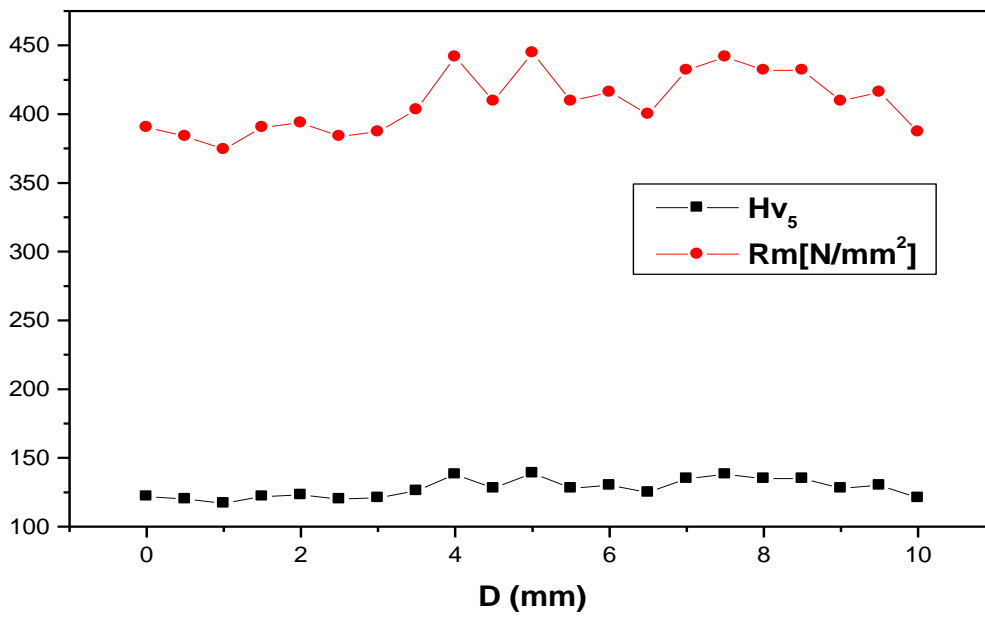


Figure IV-28. Profils de microdureté de la nuance B<sub>600</sub> .

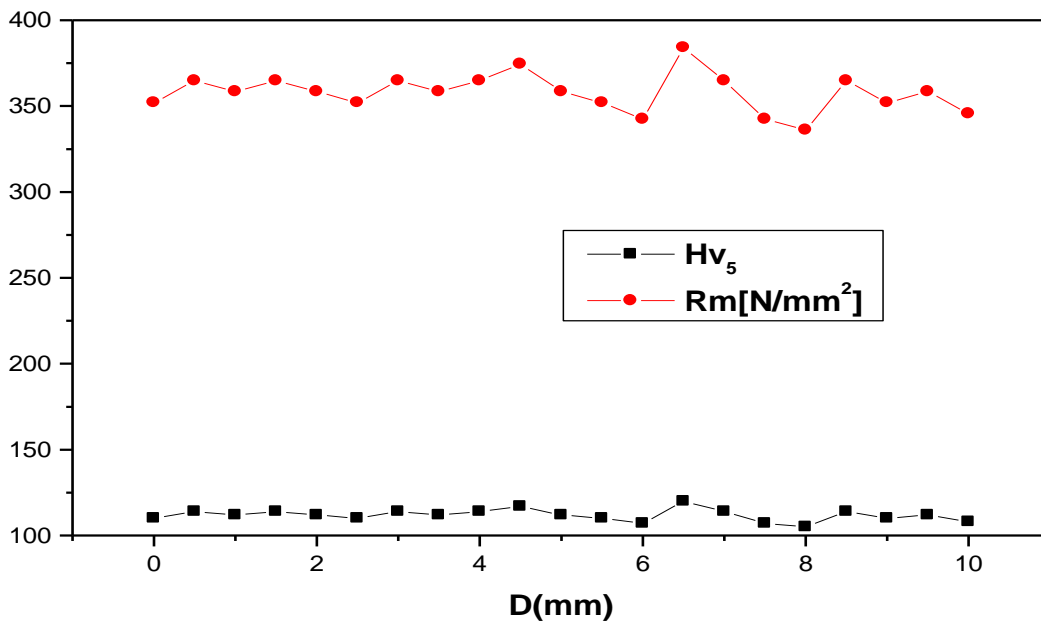


Figure IV-29. Profils de microdureté de la nuance C<sub>600</sub> .

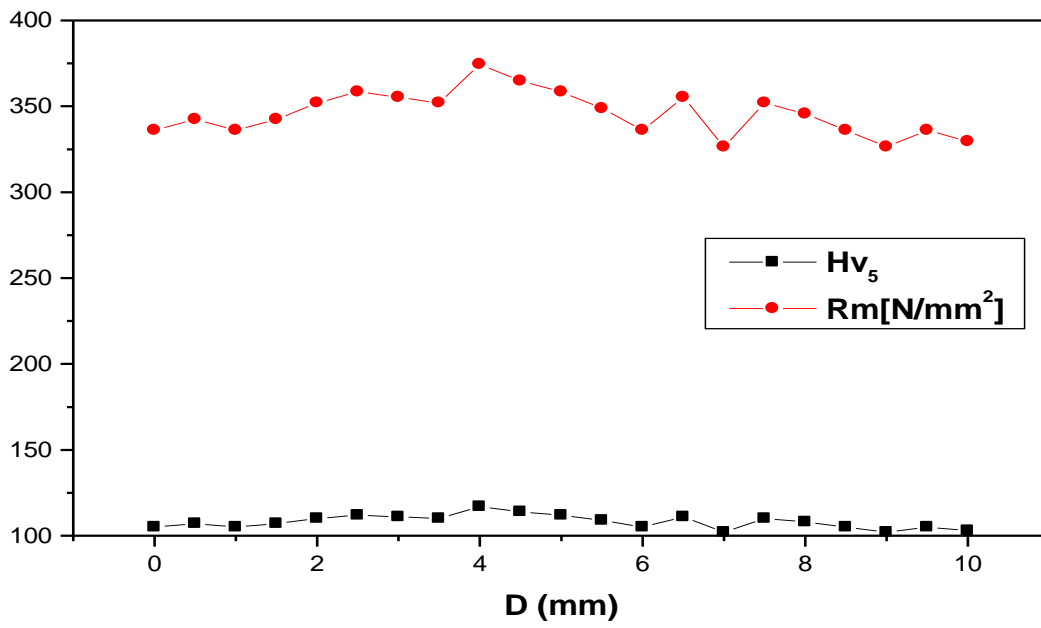


Figure IV-30. Profils de microdureté de la nuance B<sub>900</sub>.

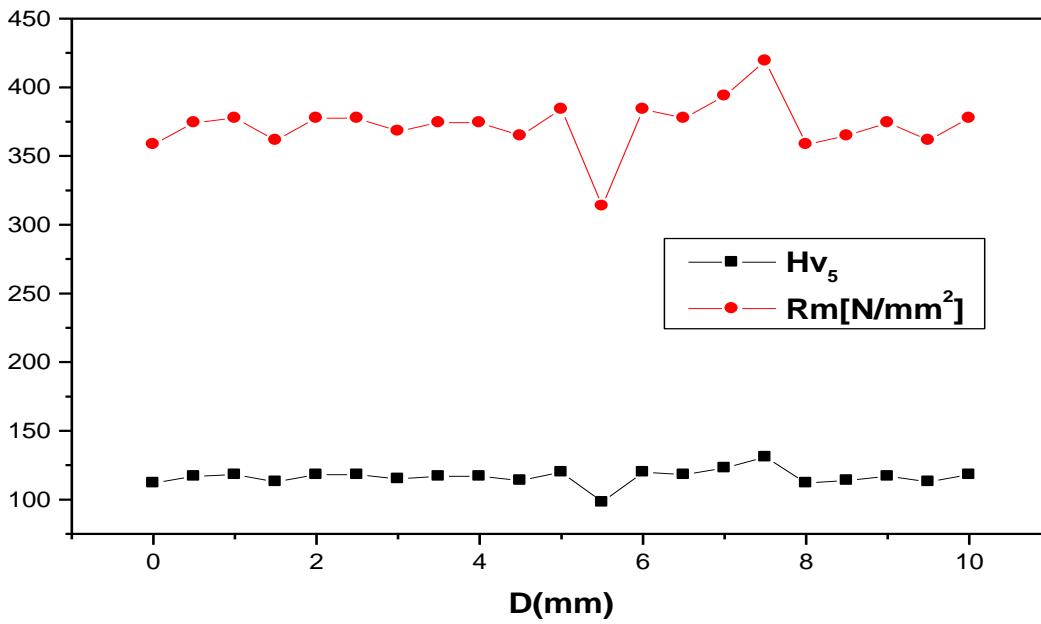


Figure IV-31. Profils de microdureté de la nuance C<sub>900</sub>.

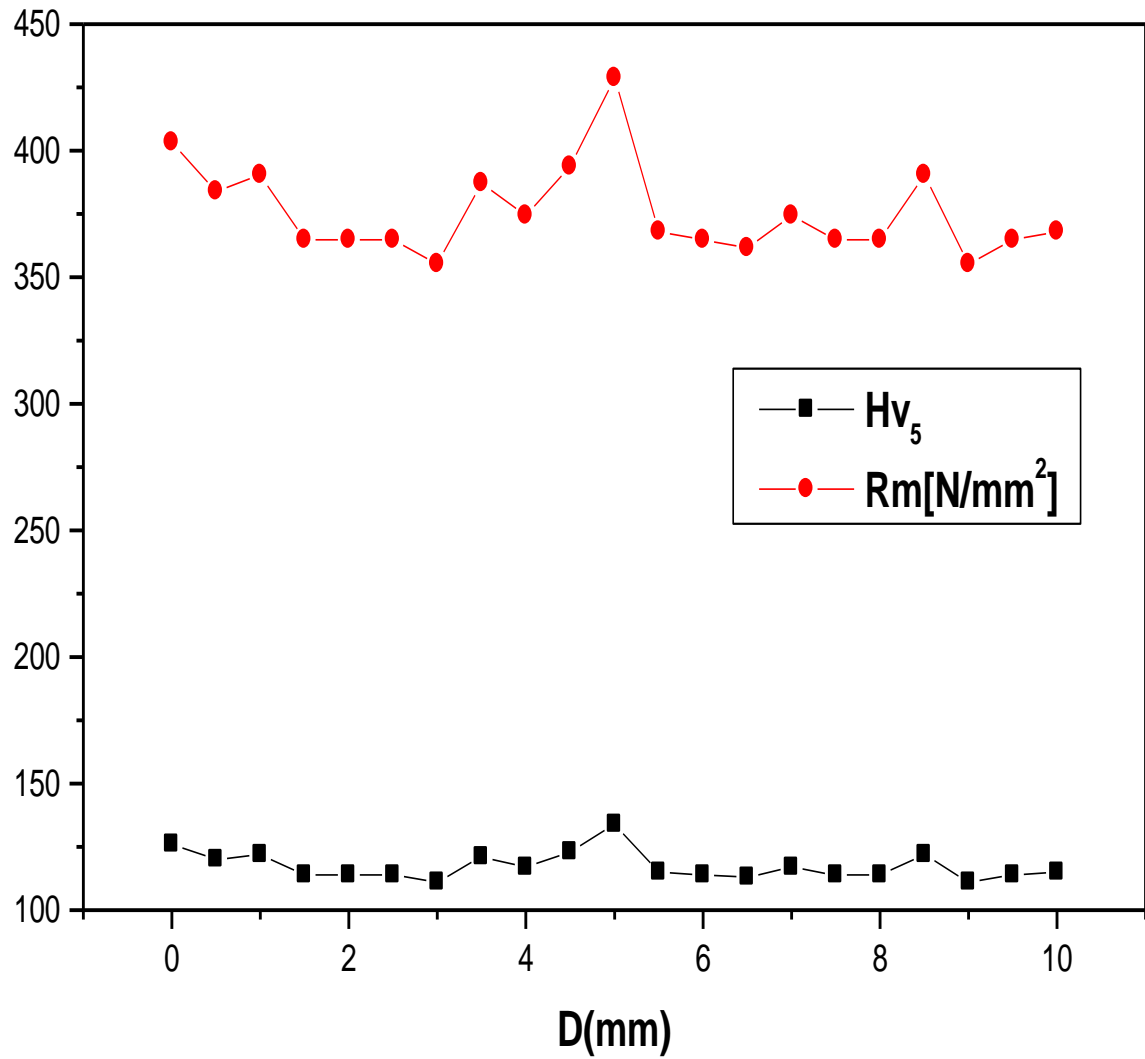


Figure IV-32. Profils de microdureté de la nuance C<sub>800</sub> .

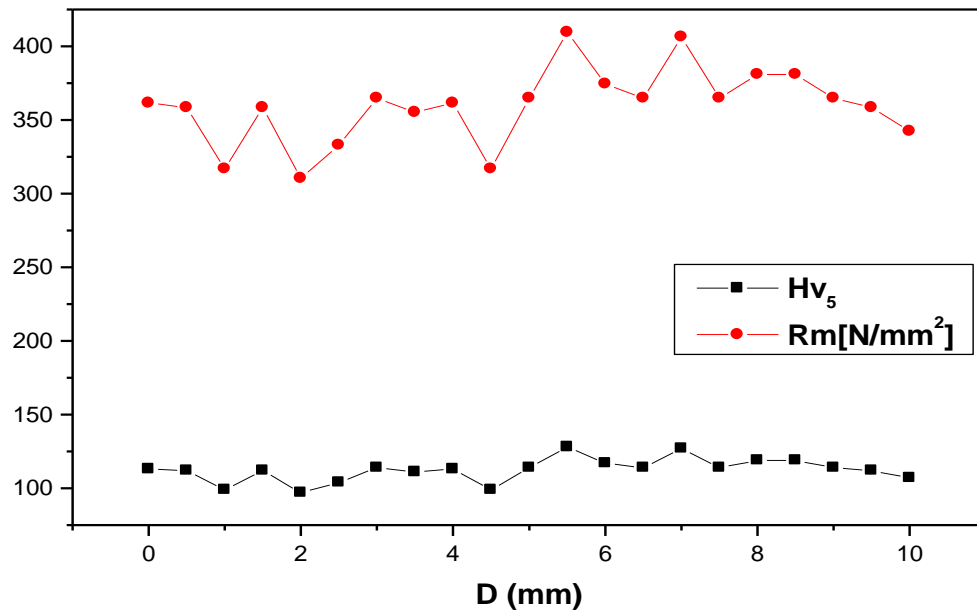


Figure IV-33. Profils de microdureté de la nuance B<sub>1000</sub> .

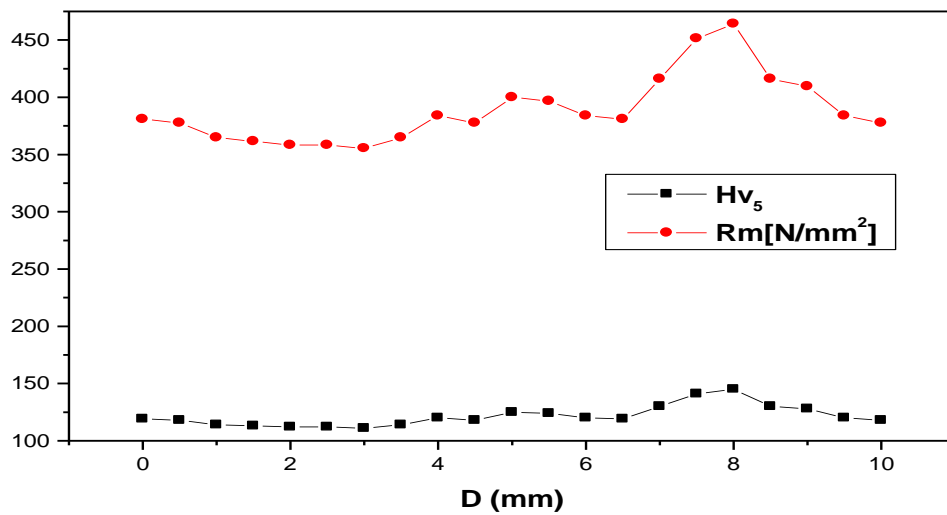


Figure IV-34. Profils de microdureté de la nuance C<sub>1000</sub> .

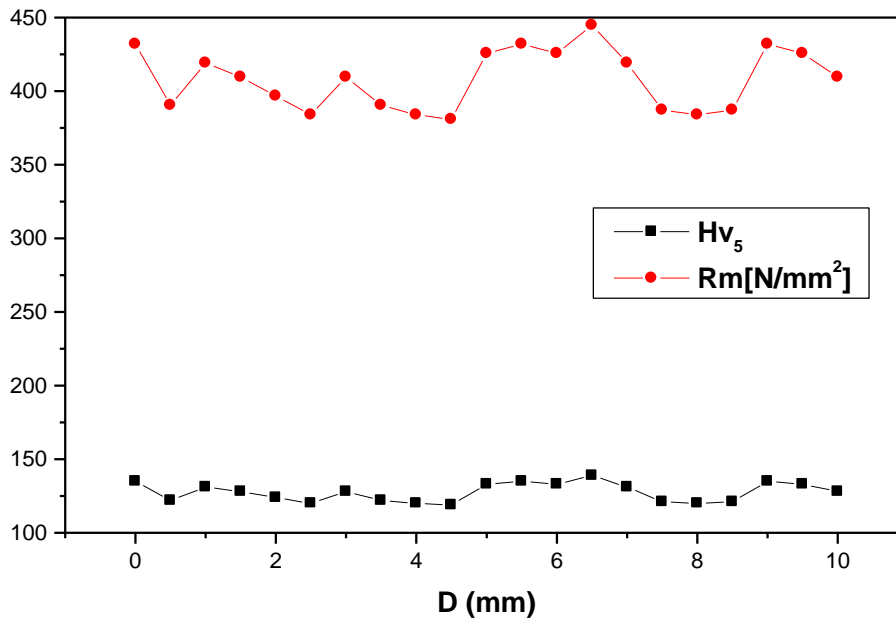


Figure IV-35. Profils de microdureté de la nuance B<sub>1200</sub>.

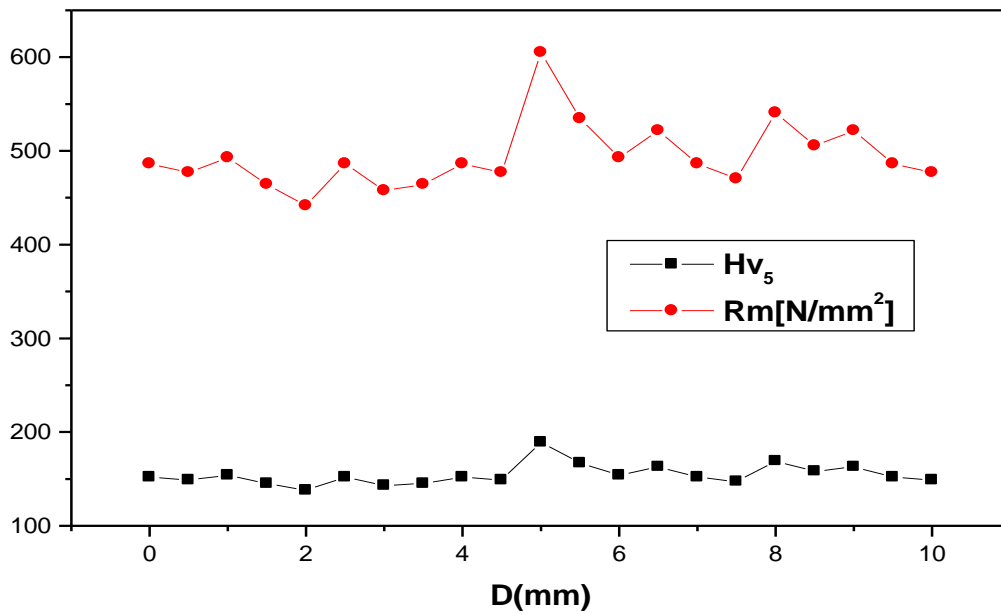


Figure IV-36. Profils de microdureté de la nuance C<sub>1200</sub>.

Après les différents traitements thermiques, la dureté globale du joint soudé diminue et devient presque homogène entre les trois zones ( MB, ZAT et ZF ). Ce qu'on cherche généralement à travers ces traitements thermiques après soudage ,figure IV-37

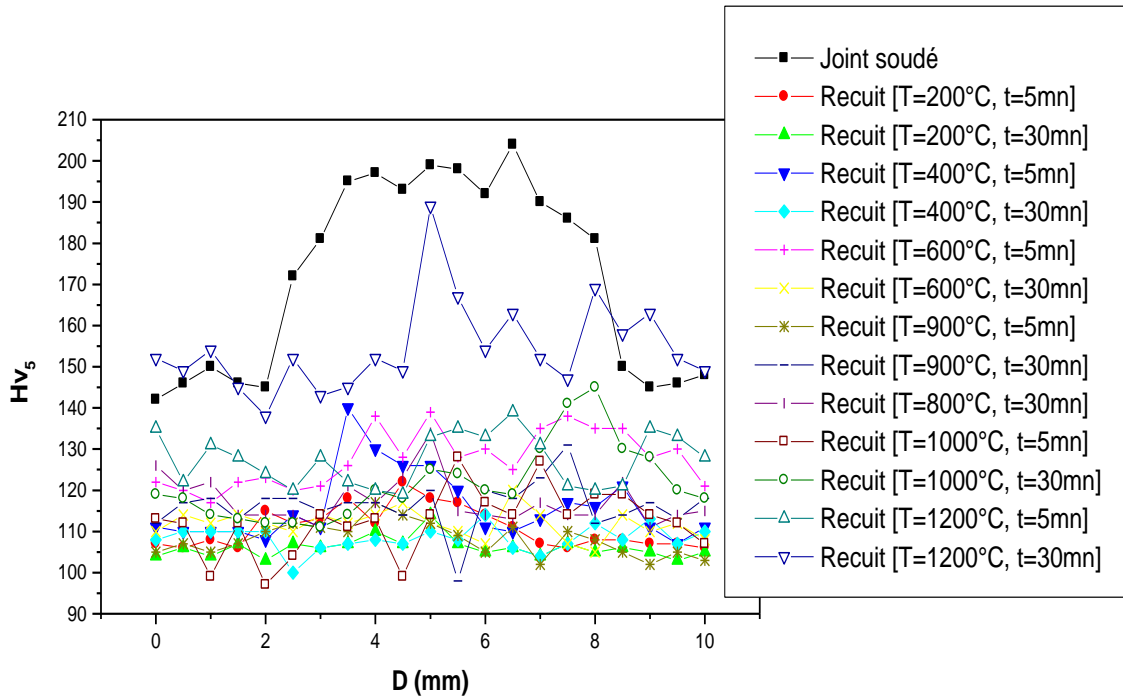


Figure IV-37 : Comparaison les profils de microdureté de joint soudé avant et après le recuit.

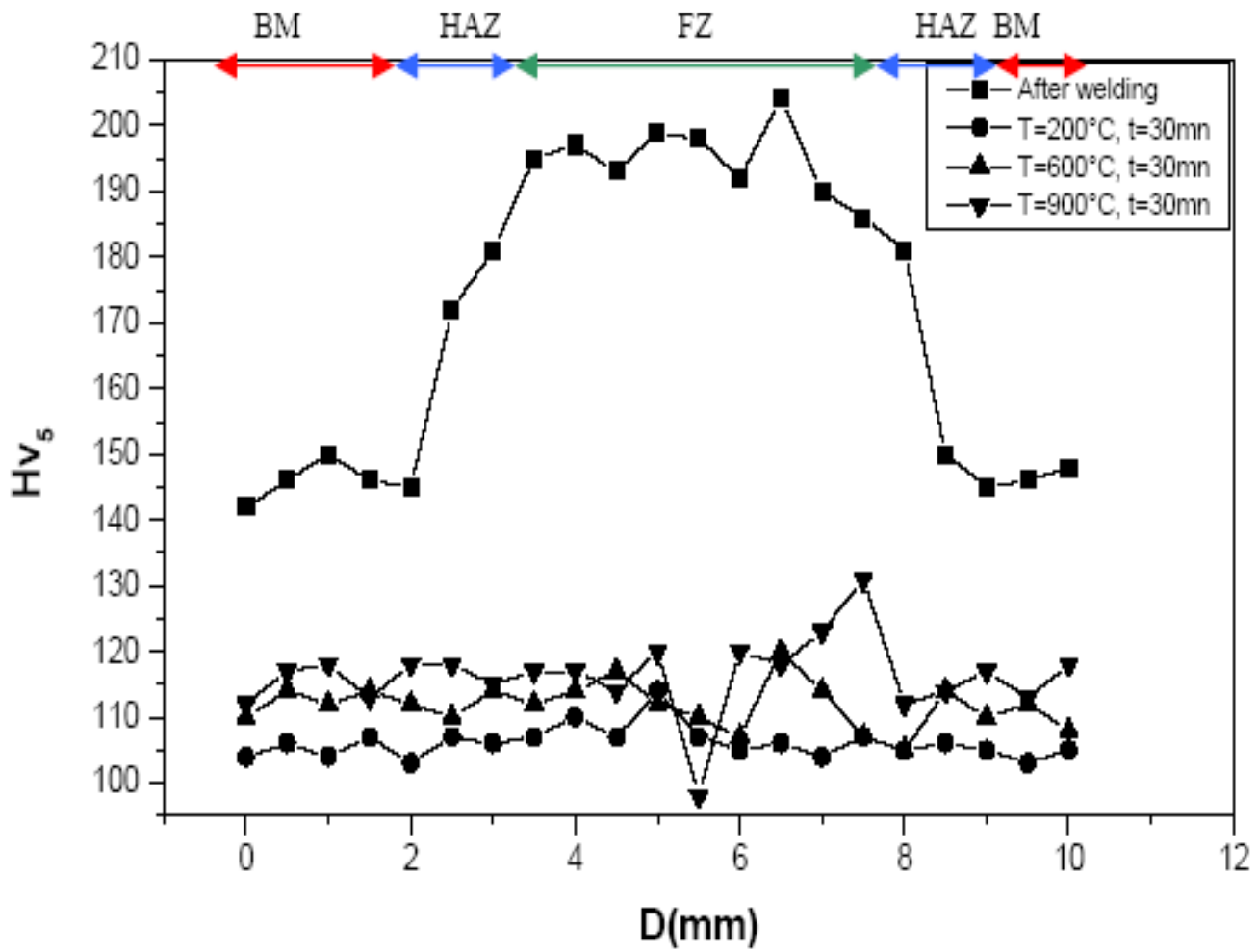


Figure IV- 38. Comparaison le profil de microdureté de nuance A avec quelques profils de C



IV-4.2. Résultats de résilience

La ( figure IV- 39 ) montre que dans le cas des nuances après traitement thermique on constate que les valeurs de résilience ont été nettement augmentées par rapport au joint soudé. Cette augmentation est le résultats du traitement thermique ,qui est dû à l'absence des contraintes résiduelle

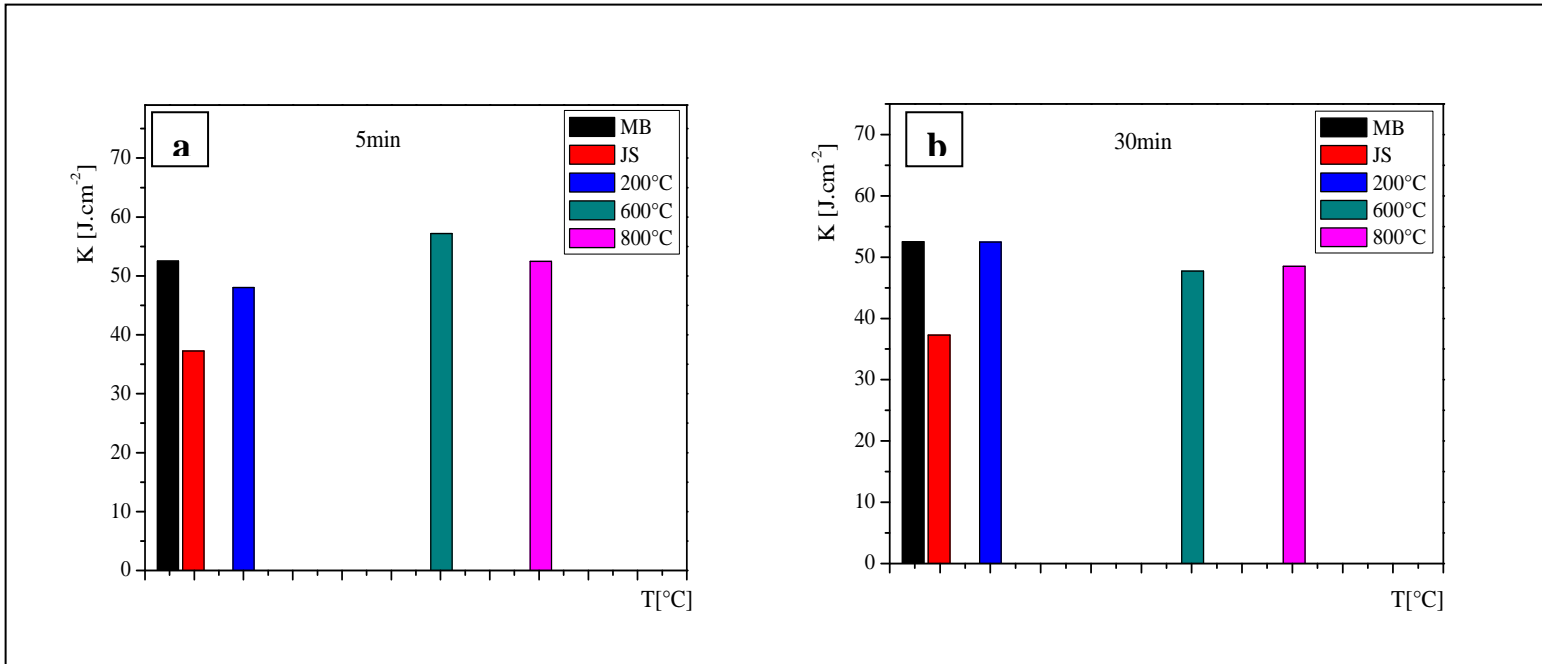


Figure IV- 39( a et b ) . Histogramme de l'évolution de la résilience en fonction de la température de recuit .

Pour la ( figure IV- 40 ) la résilience augmente avec la température de recuit dans l'intervalle de 200 à 600 °C. Puis le graphe montre une légère diminution de la résilience après le traitement de 600 °C à cause de l'augmentation de la fraction volumique de la ferrite et la présence des inclusions .

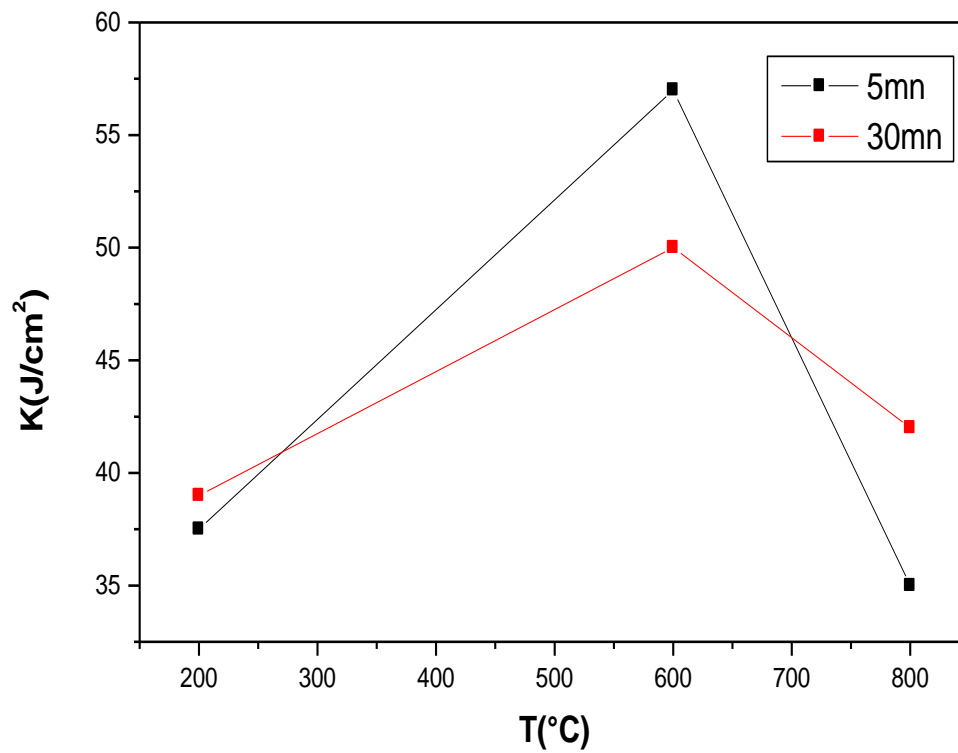


Figure IV- 40. Evolution de la résilience en fonction de la température de recuit.

### IV-4.3. Résultats de pliage

Pour pouvoir commenter nos résultats concernant le pliage, nous devons présenter les différentes zones montrant les niveaux de la qualité des soudures en fonction de l'angle de pliage et ce, selon la normalisation allemande DIN 02.120.

0 -55 : Mauvaise qualités des soudures

55-140: Médiocre .

140 : Bonne qualités des soudures.

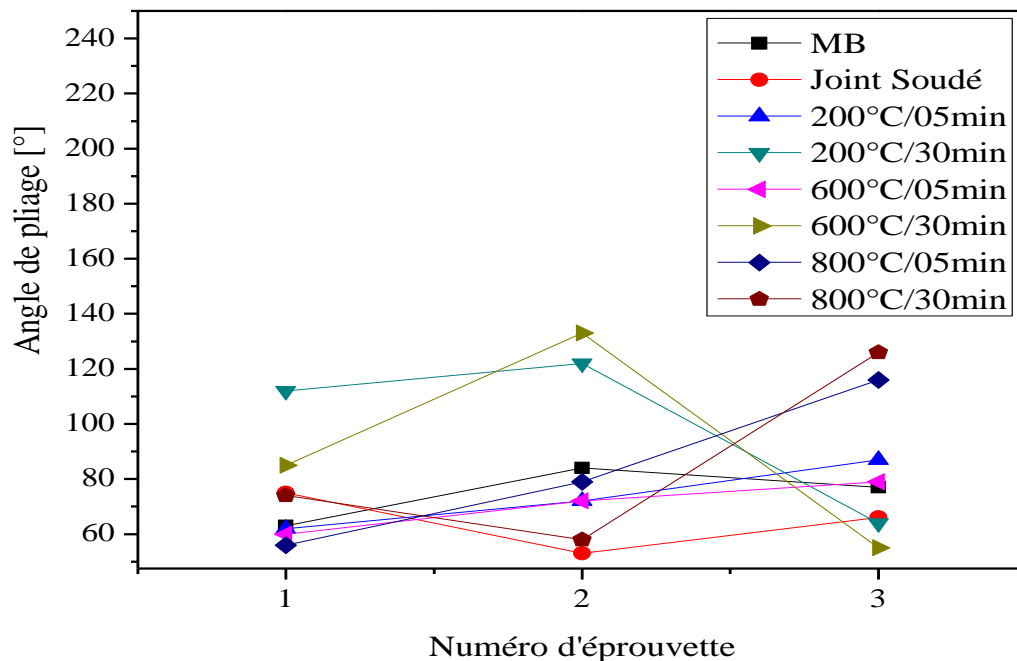


Figure IV- 41. Comparaison les résultats de pliage des nuances A avant et après le recuit

Après l'essai de pliage on remarque qu'il ya une continuité entre le métal de base et le métal d'apport aucune déchirure sur les éprouvettes de recuit, donc la liaison entre ces deux parties cordon, métal de base et très bonne qualités .Ces résultats prouvent que ces éprouvette présentent une bonne ductilité.

#### IV-4.4. Résultats de Traction

La ( figure IV- 42 ) présente la variation de la résistance maximale à la traction  $R_m$  en fonction de la température de recuit, dans le cas d un acier doux ( 0.11% de carbone ) , après traitements thermiques à 200 , 600 et 800 C° pendant 5 et 30 mn . La valeur maximal de  $R_m$  est obtenue à la température de 200C°, parce que la résistance mécanique des aciers ferritiques est gouvernée par la taille de grain ferritique , les teneurs en manganèse et azote en solution solide, les proportions relatives de ferrite et de perlite [31] .

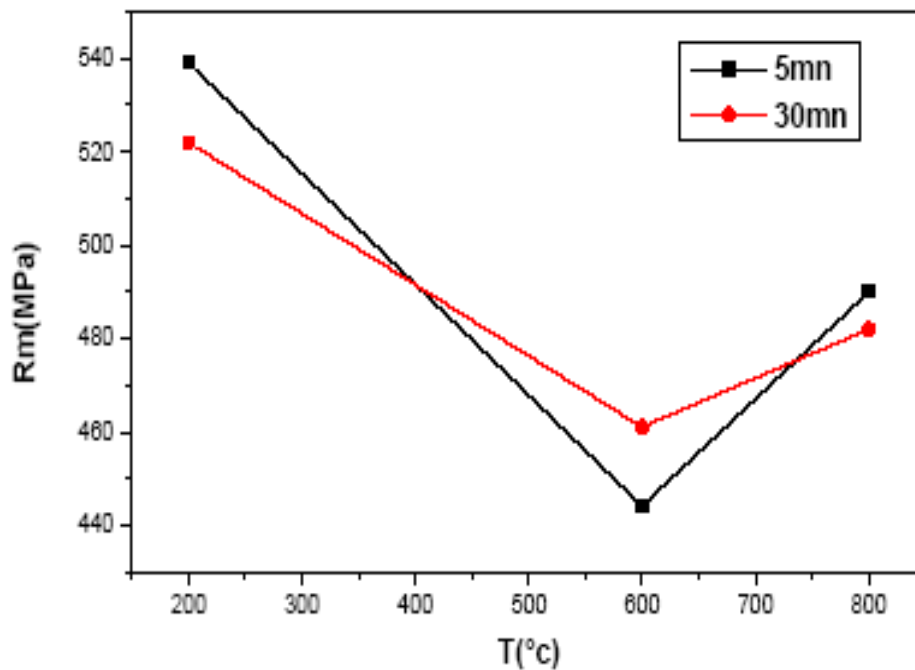


Figure IV- 42. Evolution de la résistance à la rupture en fonction de la température de recuit

#### **IV- 4.5. Résultats d'aplatissement**

Le tableau III-9 illustre que la majorité des défauts sont apparus dans le joint soudé (ébauche mère), puisque les contraintes sont généralement concentrées dans le joint de soudure. Le déplacement des contraintes s'effectue à partir de la zone d'application de la charge vers le cordon de soudure, dont les valeurs maximales de la déformation sont indiquées au niveau de cette zone.

Les résultats d'aplatissement présentent des caractéristiques mécaniques de joint soudé sont inférieures au métal de base.

#### **IV- 4.6. Résultats d'évasement**

À partir du tableau III- 12, on déduit que la majorité des ruptures apparaissent dans le joint soudé contrairement au tube ayant subi les traitements thermiques ; étant donné que la plus grande déformation est indiquée au niveau de joint de soudure.

#### **IV-5. Résultats de faciès de rupture**

Les observations ont été faites sur des faciès de rupture figure IV-43 (a et b), et ce après essais mécaniques de résilience. Nous constatons un faciès de rupture mixte.

La fragilité constatée correspond à la structure ferrite-perlite que l'on retrouve sous différentes formes ; Ce résultat confirme que la zone à gros grains est la plus favorable au clivage. D'après Yajiang et al.[60], la rupture apparaît par la rupture par clivage dans la zone de formation des inclusions.

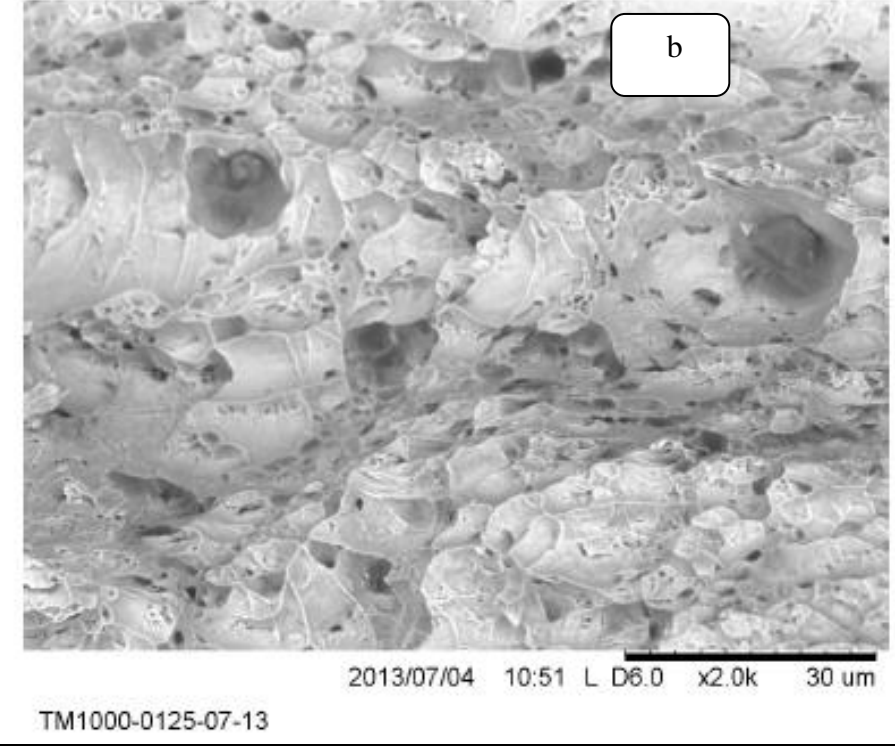
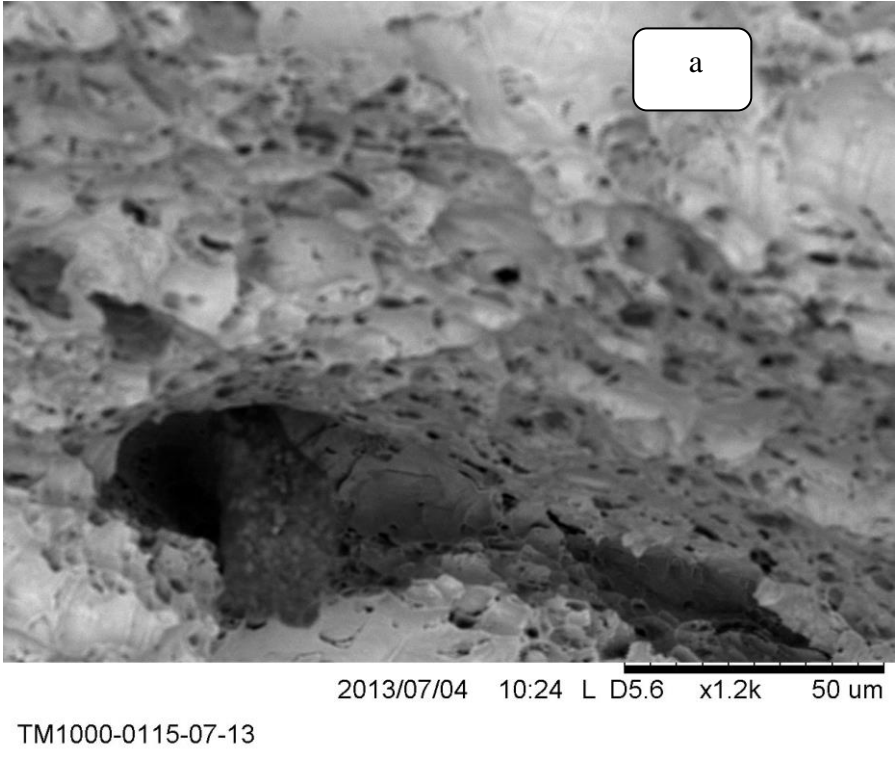


Figure IV- 43 ( a et b ). Observation au MEB du faciès de rupture de l'éprouvette A37 .

# *Conclusion Générale*

## *Conclusion générale*

L'objectif de cette thèse était d'étudier l'effet des traitements thermiques sur l'acier A37 soudé par induction .

Notre étude du joint soudé d'un acier A<sub>37</sub> basée sur :

Les analyses chimiques, les observations métallographiques des nuances soudées avant et après le traitements thermiques de recuit, diffraction des rayons x, la caractérisation par microdureté , la traction, le pliage, l'aplatissement, l'évasement, la résilience et la caractérisation des faciès de rupture.

Elle nous a permis de clarifier les points essentiels :

- Le joint soudé est divisé en trois zones principales : le MB, la ZAT et la ZF. Ces zones elles présentent des microstructures très variées.
  - un métal de base de structure ferrito-perlitique.
  - une zone affectée thermiquement de structure ferrite à gros grains
  - une zone fondue de structure ferrite fine .
- Les traitements thermiques de recuit ont favorisé l'homogénéisation de la microstructure du joint soudé avec le métal de base.
- Les résultats de microdureté ont donné des profils en total accord à ceux relatifs aux joints soudés ; en effet on remarque que la dureté est élevée dans la zone de liaison ce qui vulgarise l'effet de la surchauffe dans la zone affectée thermiquement.

La diminution de microdureté est minime pour les nuances B et C ce qui justifié l'effet du traitement thermique de recuit.

- L'essai de traction a montré que le traitement à 200C a donné la meilleur valeur de résistance à la traction .
- La DRX a montré que la structure des nuances avant et après le traitement thermique est ferritique .
- Après le traitement thermique de recuit , on a constaté une augmentation des valeurs des résiliences et l'allongement à la rupture A% par contre on remarque une diminution des valeurs des résistances à la rupture et la limite élastique Re .
- Les essais de faciès de rupture du joint soudé obtenus ; ont montré que notre acier présente une rupture mixte .
- Pour les essais d'aplatissement et d'évasement on a trouvé que les tubes soudé et traité sont de bonne qualité.



# *REFERENCES*

## REFERENCES

- [01] O. KENNARD . " Molecular structures and dimensions , interatomic , distances , organic and organo metallic , Cristal structures " , Edition N.V.A.O sthocks, Utrecht , ( 1972) .
- [02]R.J. BORG and G. J.DIENES. " the physical chemistry of solids " . Academic Press, Inc, ( 1992 ) .
- [03] F. ASHBY, M , JONES D.R.H , " Matériaux " Tome II , Dunod ,( 1991).
- [04] A. GERSHER , Liaisons intermoléculaires . Inter éditions /CNRS, 1995.
- [05] Encyclopédie de sciences industrielles " Mécaniques Générales, Applications, volume M1.
- [06] G.BERANGER , G.HENRY et G.LABBE , Les aciers spéciaux, Lavoisier Tec. et DOC , (1999 ) .
- [07] ENCYCLOPEDIE Universalise, Volume 1; 1989.
- [08] J.L.FANCHON, Guide des sciences et technologies industrielles, AFNOR Nathan,( 1998).
- [09] G. BERANGER , G. HENRY et G. SANZ , le livre de l'acier. Editions Tec et DOC (1994) .
- [10] E.C. ROLLASSON. Metallurgy for Engineers, fourth Edition, Arnold, (1973).
- [11] C.CHAUSSIN et G.HILLY ,« Métallurgie , : Alliages métalliques » ,Tome I 2ème Edition Dunod ; (1976 ) .
- [12] I. LAKHTINE, Métallographie et Traitements thermiques des métaux , 3ème Edition Mir, Moscou (1986).
- [13] G.LIGNON et R. MAILLEBEAU ." Etude des matériaux I , métaux ferreux", Delagrave (1983 ) .
- [14] N. T. TRINH , Thèse de doctorat, Sur la modélisation du comportement thermomécanique et métallurgique des aciers. Application au procédé de soudage et de traitements thermiques, Ecole polytechnique de Palaiseau ( 2008).

- [15] M. Guy, Transformation dans les aciers, In : Techniques de l'Ingénieur, traité matériaux métalliques, Vol M, dossier M1115 (1998).
- [16] J. DELEUME, Thèse de doctorat, Facteurs Métallurgiques et Mécaniques contrôlant l'amorçage de défauts de corrosion sous contrainte dans l'alliage 718 en milieu primaire des réacteurs à eau sous pression . INP Toulouse (2007) .
- [17] O.BARRAU, Thèse de doctorat, Etude du frottement et de l'usure d'acier à outils de travail à chaud. Université de Toulouse (2004) .
- [18] S.MAURIES, Thèse de doctorat, Caractérisation et modélisation de la séquence de précipitation de carbures au cours du traitement thermique d'aciers martensitiques alliés. Université de Toulouse (2008) .
- [19] G . PAMEY , Techniques de l'ingénieur , propriétés des alliages (1996) , vol. M2 .
- [20] J.BARALIS, G.MAEDER , Précis de Métallurgie, (élaboration, structures-propriétés et normalisation), 5ème édition, Nathan, 1990.
- [21] S. DEBIEZ , Détermination des conditions de soudage des aciers soudage et technique Connexe, paris (1984) .
- [22] Cetim : documentation pratique sur la soudabilité des aciers, soudage et technique Connexe, ( 1976 ) .
- [23] R.GOUIC ." Précis de soudage ; Brasage " , Eyralles 3ème Edition , (1982).
- [24] Guide Technique de C.P.G et document de l'institut de soudure (I.S).
- [25] J.A PENDRE, Le soudage , Edition française, (1977) .
- [26] S. BANISSAD , Le soudage Tec 34, OPU, (1992) .
- [27] J.M. BERGHEAU , Ecole d'ingénieurs de Saint-Étienne , Traité de génie mécanique, BM 7 758.
- [28] Document technique, Procédé du soudage par induction, B1, Brochure propre à l'ENTTPP , Tébessa.
- [29] M.T.HANNACHI, Thèse de doctorat , Etude du Comportement Mécanique des Joints Soudés lors du Soudage des Tubes par Induction à Haute Fréquence (HF). Université Hadj Lakhdar de Batna (2010/2011) .

- [30] J. Wright , Optimisation du rendement des procédés de soudage à HF de tubes , Edition de la Technologie de Tube et pipe, ( 1999) .
- [31] T. H. NGUYEN. Thèse de doctorat, Prédiction de la non-rupture fragile dans un joint soude en acier C-Mn dans le domaine de la transition fragile/ductile. Ecole centrale de Lille (2009).
- [32] A .KECHAOU. Thèse de doctorat, Etude du soufflage magnétique de l'arc électrique de soudage . université de liège . (2013)
- [33] R.YANNIC, Thèse doctorat , Simulation numérique du soudage du Ta6v par laser yag impulsif : Caractérisation expérimentale et Modélisation des aspects thermomécanique associées à ce procédé. Ecole des Mines de Paris ( 2007) .
- [34] R.VARISELLAZ, Soudage :éléments de conception et de réalisation, Dunod, (1982).
- [35] L. LAKHDARI, Mémoire de magistère, Analyse par rayons X et par microscopie électronique à balayage des phases constitutives des joints de soudure en acier au carbone-manganèse. Centre Universitaire de Oum El Bouaghi ( 2003) .
- [36] J. PHILIBERT , A.VIGNES ,Y. BRECHET , P.COMBRADE , Métallurgie du minerai au matériaux . Edition MASSON . PARIS ( 1998 ) .
- [37] A. JAMES PENDRE , Le soudage , Edition Métrique (1977).
- [38] A. ZALT , Thèse de doctorat , Endommagement par fatigue et prédiction de la durée de vie des joints soudés de type caisson . Université de Lorraine ( 2012)
- [39] F. DOMINIQUE, P. ANDRE , A. ZAOUI , Comportement mécanique des matériaux , Edition Hermès ,Paris (1991) .
- [40] H. GRANJON. Bases métallurgiques du soudage. (Institut de soudure, Paris 1995) .
- [41] M. ZAOUI. Thèse de doctorat, Influence des traitements thermiques sur la rupture fragile des constructions soudées, cas des soudures épaisses. Université de Constantine ( 2009).

- [42] H. J. Kim, S. K. Youn ,Three dimensional analysis of high frequency induction welding of steel pipes with impeder, J. Manuf. Sci. Eng.,130,3,(2008).
- [43] Document technique, la Carbométrie, Brochure propre à CPG, Constantine.
- [44] Document technique, la Spéctravist Brochure propre à CPG, Constantine.
- [45] K.TABALAIEV. Thèse doctorat , Etude de la Structure et des propriétés de l'acier à Béton après déformation à froid . Cotutelle International entre l'école centrale de Lyon (France ) et l'académie national de l Ukraine ( Ukraine ) (2010).
- [46] Document technique, Essais de dureté, Brochure propre à CPG, Constantine.
- [47] G. BOUTEILLER, le livre de la pratique des traitements thermiques des métaux industriels Edition DUNOD, Paris ( 1972) .
- [48] J. BARRALIS et G. MOIDER ." Précis de Métallurgie : structures – propriétés et normalisation " AFNOR et NATHAN , 5ème édition 2005.
- [49] A.BOUMAIZA.,Thèse doctorat , Influence de l'anisotropie structurale sur le comportement plastique au cours de la déformation par emboutissage. Université de Constantine ( 2008).
- [50] K. Digheche, Z. Boumerzoug, M. Diafi, and K. Saadi, “Influence of heat treatment on the microstructure of the welded API X70 pipeline steel” , Acta Metallurgica Slovaca, Vol 23, No 1 (2017) .
- [51] Z. Boumerzoug, C. Derfouf and T. Baudin, “ Effect of welding on microstructure and mechanical properties of an industrial low carbon steel” Journal of Engineering, 2, 502-506, 2010.
- [52] G.R. Stewart, A.M. Elwazri, R. Varano, N. Pokutylowicz, S. Yue, J.J. Jonas, Shear Punch Testing of Welded Pipeline Steel. Materials Science and Engineering A420 ( 2006) 115-121.
- [53] K.E. Easterling, Introduction to the Physical Metallurgy of Welding, Butterworth-Hermann Ltd , Oxford, 1992.

- [54] G. Spanos, R.W. Fonda, R.A. Vandermeer, A. Matuszeski, Microstructural changes in HSLA-100 steel thermally cycled to simulate the heat-affected zone during welding, *Metall. Mater. Trans.*26A ( 1995 ) 3277-3293.
- [55] P. Yan, Ö. E. Güngör, P. Thibaux, Harshad K.D.H. Bhadeshia, Crystallographic Texture of Induction-Welded and Heat-Treated Pipeline Steel, *Adv. Mat. Research*, 651 (2010) 89-91.
- [56] O.Grong, *Metallurgical Modelling of Welding*, London, The Institute of Materials, England, 1994, ISBN 0-901716-37-5.
- [57] S. Kou, *Welding Metallurgy*, John Wiley e Sons, 2nd ed. New Jersey, USA, 2003.
- [58] S. Lars-Eric, *Control of Microstructures and Properties in Steel Arc Welds*, Library of Congress Cataloging-in Published Data. (1994).
- [59] A. Güral, B. Bostan, A.T. Özdemir, Heat treatment in two phase region and its effect on microstructure and mechanical strength after welding of a low carbon steel, *Materials and Design* 28 (2007) 897-903.
- [60] L. Yajiang, Z. Yonglan, S. Bin and W. Juang, TEM observation and fracture morphology in the CGHAZ of a new 0Cr18Mo2Ti ferritic stainless steel ,*Bull. Mater. Sci.*, 25,5,(2002). 361–366.

## المخلص

الهدف من هذه الدراسة هو معرفة مدى تأثير التلحيم بواسطة التحريض على البنية المجهرية و الخصائص الميكانيكية للوصلة الملحمة من الفولاذ ذو نسبة كربون 0.11 % المستعمل في صناعة أنابيب نقل الغاز. إن الدراسة بواسطة الأشعة السينية و المجهز الإلكتروني الماسح و كذلك الضوئي المدعمة بالتحاليل الكيميائية الكاربوميترية و الطيفية بالإضافة إلى التحاليل بواسطة صلابة فيكرس تعتبر الحجر الأساس في البحث في مجال المعدنة و كيميائ الوصل الملح.

هذه الطرق المختلفة من الملاحظات و التحاليل تسمح لنا بالتعرف على العناصر الكيميائية المتواجدة في الوصل كما يمكننا التعرف على مختلف الأطوار المتواجدة والتي تدخل في تركيب مختلف المناطق للجملة المتكونة أساسا من معدن الأساس ثم المنطقة المتأثرة بالحرارة بالإضافة إلى معدن السند. نضيف إلى كل ذلك الشوائب المتواجدة في الجملة. من جهة أخرى قمنا بإجراء مجموعة من التجارب الميكانيكية على الوصلة الملحمة كالشد، الثني و تجربة الصدمة. من خلال دراستنا هذه تطرقنا إلى ما يلي

- التأكد من نسب العناصر الكيميائية المتواجدة في العينة.

- التعرف على مختلف الأطوار المكونة للوصل الملح.

- دراسة مدى مقاومة الجملة الملحمة للتشويه.

يبدو جليا بأن تقنية اللحام تخضع إلى عوامل كثيرة ومعقدة. أهمها تأثر الجملة حراريا- كيميائيا وميكانيكيا. كما وأن الحصول على وصل أكثر مقاومة يتطلب الأخذ بعين الاعتبار كل هذه العوامل التي هي في بعض الأحيان متناقضة مما يجعل الحصول على وصل ملح عالي المقاومة شيئا صعبا.

ولتحسين الخصائص البنوية والميكانيكية قمنا بإجراء بعض المعالجات الحرارية للوصلة الملحمة .

الكلمات المفتاحية: التلحيم بالتحريض المعالجات الحرارية , مراقبة دون التد مير.

## Abstract

The objective of this study is to investigate the effect of welding of the tubes by induction on the microstructure and mechanical properties in the junction (of the welding) of (steel 0.11%) used in gazoil transportation.

Analysis by X- rays and metallographic tests (electronics and optics) associated with the chemical analysis, as well as measurements of micro-hardness are the base of the metallurgical-chemical study of the welding .

These various techniques of investigation underline the size and the shape of the grains, the various elements of alloy, the structure or the various structures of the zones constitutive of the welded, as well as the inclusion defects and micro-joint cracks existing in this junction.

In the same way, the mechanical effects are put experimentally in evidence tests of traction, folding, and resilience.

Our study was devoted to:

- Analysis of the elements which play a determining part in the junction,
- Recognition of the different phases existing in the joint and this on the basis of the zone melted to the base metal,
- The characterization of the joint by its resistance to the deformation.

In fact, welding results in a thermics-chemical treatment and mechanics which modifies the properties of steel locally. It results the need from it for controlling all the parameters governing this technique in order to optimize the joint and for carrying out a structure able to resist to the requests of service which they are mechanical or different (chemical aggressiveness and thermal fluctuations).

In order to optimize the characteristics of the metal, we have applicated heat isothermal treatments.

**Mots-clefs** : welding by induction , thermal treatments , nondestructive testing .

## Résumé

L'objectif de cette étude est de connaitre l'effet de soudage par induction sur la microstructure et les propriétés mécaniques d'un joint soudé en acier doux ( 0.11% de carbone ). L'utilisation principale de cet acier est la fabrication des tubes employés pour le transport de gaz.

Les analyses par rayons X et les examens métallographiques (électronique et optique) associés aux analyses chimiques ainsi que les mesures de micro dureté sont la base de l'étude métallurgique chimique des soudures.

Ces diverses techniques d'investigation mettent en évidence la grandeur et la forme des grains, les divers éléments de l'alliage , la structure ou les structures diverses des zones constitutives du joint soudé ainsi que les défauts inclusionnaires et micro fissures existants dans cette jonction.

Parallèlement on a exécuté une série d'essais mécaniques ( traction, pliage et de résilience ) sur le joint soudé pour déterminer les caractéristiques mécaniques de cet acier.

Notre étude est consacrée à :

- L'analyse des éléments qui jouent un rôle déterminant dans la jonction,
- la reconnaissance des différentes phases existantes dans le joint et ce en partant de la zone fondue jusqu'au métal de base,
- La caractérisation du joint par sa résistance à la déformation.

En fait, le soudage se traduit par un traitement thermique, chimique et mécanique qui modifie localement les propriétés de l'acier. Il en résulte la nécessité de maîtriser tous les paramètres régissant cette technique afin d'optimiser le joint et de réaliser une structure capable de résister aux sollicitations de service qu'elles soient mécaniques ou autres (agressivité chimique et fluctuations thermiques).

Afin d'améliorer le comportement de l'acier soudé , nous avons appliqué des traitements thermiques isothermes.

**Mots-clefs** : Soudage par induction, traitements thermiques, contrôle non destructif.