

République algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'enseignement supérieur
et de la recherche scientifique
Université de M'sila
Faculté de Technologie



الشعبية الديمقراطية الجزائرية
العلمي والبحث العالي التعليم وزارة
المسيلة جامعة
كلية التكنولوجيا

Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

En Génie Mécanique

Option : Fabrication et productique.

Thème :

**Caractérisation d'un joint de soudure par la technique de
corrélation d'images numériques.**

Présenté par : SAADA Bachir

Soutenu devant le jury composé de :

Mr. Farsi

Mr. Zemmamouche.R

Mr. Latrache.M

Univ. MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

Univ. MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

Univ. MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

Président

Encadreur

Examinateur

Année Universitaire : 2018 / 1019.



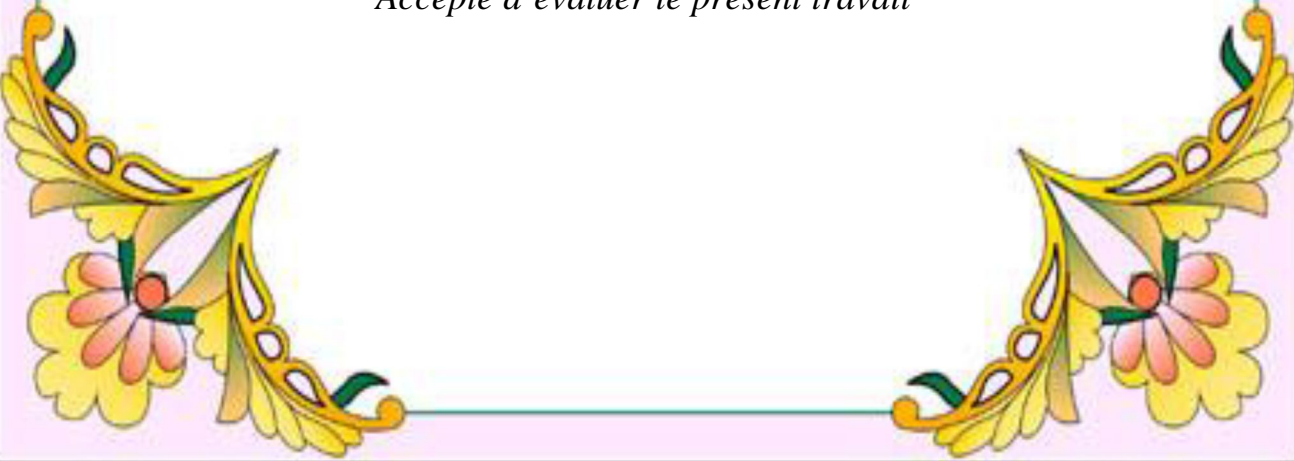


Remerciements

Tout d'abord, louange à « Allah » qui m'a guidé sur le droit chemin tout au long du travail et m'a inspiré les bons pas et les justes reflexes Sans sa miséricorde, ce travail n'aura pas abouti. Qu'il me soit permis ici de dire ma gratitude à ceux qui m'ont donné beaucoup de soin à l'élaboration de ce modeste travail et m'ont guidé sur le bon chemin, en espérant que ce mémoire soit le reflet de la bonne formation que j'ai reçue.

*Je tiens à remercier vivement mon encadreur **Zemmamouche R** pour le soutien et l'aide qu'il n'a jamais manqué de m'apporter, à mes attentes ; qu'elles trouvent ici l'expression de mon amitié et sympathie. Et tous les enseignants Département de génie mécanique*

*Enfin, je remercie les membres de jury pour avoir
Accepté d'évaluer le présent travail*



Dédicaces

Je dédie ce mémoire
A mes chers parents...
A mes frères et sœurs...
A toute la famille SAADA.
*A tous **mes amis** dans la faculté
de technologies
Bachir*





Sommaire

1 : Métallurgie des aciers	1
1.1 : Introduction.....	1
1.1.2: Définition de l'acier	1
1.1.3: Histories de l'acier.....	2
1.1.4: Fabrication de l'acier	3
1.2 : Classification des aciers	4
1.2.1: Classification selon leur composition chimique	4
1.2.2: Classification par le mode d'emploi	5
1.3: Diagrammes de phases fer – carbone.....	5
I.3.1: La principale phase de diagramme de Phase	7
I.4: Influence de la composition chimique	9
I.3.1: Influence des éléments de substitution	10
I.3.2: Influence des éléments formants de précipités.....	11
I.3.3: Influence de la perlite.....	13
I.4: Propriétés des aciers.....	14
Chapitre 2 : Métallurgie de soudage	15
2.1 : Généralité sur Soudage	16
2.1.1 : Introduction générale.....	16
2.1.2 : Définitions de base	17
2.1.3 : Histoire de Soudage.....	17
2.2 : procédés de soudage	18
2.2.1 : Soudage à l'arc	18
2.2.2 : Soudage MIG/MAG fil plein (GMAW).....	21
2.2.3 : Soudage MAG fil fourre (FCAW).....	23
2.2.4 : SOUDAGE TIG (GTAW).....	25
2.2.5 : Le Soudage par point (RSW).....	26

2.2.6 : Soudage oxygaz.....	30
2.2.7 : Autres procédés	31
2.3 : Cycles thermiques de soudage	35
2.4 : Conséquences métallurgiques des cycles thermiques de soudage	38
2.4.1 : Zone fondue (ZF)	37
2.4.2 : Zone affectée thermiquement (ZAT)	37
2.5.3 : Métal de base (MB).....	38
2.6 : Les défauts des soudages.....	39
2.6.1 : Les fissures.....	39
2.6.2 : Fissure à chaud (ou de solidification)	40
2.6.3 : Fissures à froid (fissures d'hydrogène)	43
Capitre 3 : Essai de traction	39
3.1 : Introduction.....	40
3.2 : La machine de traction	40
3.3 : Les éprouvettes	41
3.3.1 : Dimension des éprouvettes	42
3.4 : Principe de l'essai de traction.....	43
3.5 : Exploitations de l'essai.....	45
3.5.1: Interprétation qualitative.....	45
3.5.2 : Définitions.....	46
3.5.3 : Le Processus thermomécaniques	48
3.5.4 : Influence de la température	49
3.6: Constantes d'élasticité.....	50
3.6.1 : Définitions.....	50
3.6.2 : Quelques valeurs usuelles de E.....	51
3.7 : Limite d'élasticité	52
3.7.1 : Cas général.....	52
3.7.2 : Cas des aciers	53
3.7.3 : Limites conventionnelles	54

3.8 : Courbe rationnelle de traction	55
3.8.1 : Contrainte vraie	55
3.8.2 : Déformation rationnelle	55
4 : Méthodes d'analyses des déformations	57
4.1 : L'extensomètre	57
4.1.1 : Jauge de déformation	57
4.1.2 : Extensomètre à pinces	67
4.2 : Méthodes optiques indirectes	68
4.2.1 : Méthode de Moiré	68
4.2.2 : Interférométrie holographique	70
4.2.3 : Interférométrie speckle (granularité laser)	72
4.2.4 : Schearographie	73
4.3 : Méthodes optique directes	74
4.3.1 : Mesure des variations des caractéristiques géométrique d'un réseau	74
4.3.2 : Extensomètre optique « Apollor »	74
4.3.3 : Thermographie infrarouge	77
4.3.4 : Méthode de corrélation d'images	79
4.4. Analyse des déformations à l'aide de la méthode de corrélation d'images numériques	79
4.4.1. Présentation de la méthode de corrélation d'images	79
4.4.2. Outils de calculs	83
4.4.3. Champ de déformation	85
4.4.4. Méthode utilisée pour déterminer les champs de déplacement	86
4.5 : Conclusion	89
Chapitre 5 : Partie Expérimentale	81
5.1 : Présentation du matériel utilisée et méthodes d'analyse	81
5.1.1 : Présentation du matériel utilisé	81
5.1.2 : Essai de traction	82
5.1.3 : préparation des éprouvettes de traction	84

5.3.1 : Dimension de l'éprouvette de traction.....	85
5.4 : Montage expérimentale.....	86
5.4.1 : Calibration de la caméra.....	87
5 .2 : Résultat expérience	88
5 .2.1 : Courbe de traction	89
5 .2.1 : Champs de déplacement par la technique de corrélation d'image	90
5 .2.2 : Calcule de déplacement.....	96
5.3 : Conclusion	105

LISTE DES FIGURES

Figure. I.1 : Mailles élémentaires des structures cristallines : CC et C.F.C.....	1
Figure. I.2 : Diagramme d'équilibre fer-carbone.	6
Figure. I.3 : Structure ferritique.....	8
Figure.I.4 : Structure austénitique (avec précipités de carbures).....	9
Figure.I.5 : Structure perlitique	9
Figure.I.6 : Évolution des domaines d'existence des variétés allotropiques du fer par addition.....	14
Figure I.7 : Sens longitudinale et transversale de tube.	15
Figure II.2 : Circuit électrique pour le soudage à l'arc.....	21
Figure II.3 : Principe de soudage à l'arc avec électrode enrobée (SMAW).....	22
Figure II.4 : Principe de fonctionnement du procédé (GMAW).	24
Figure II.5: Soudage avec fil fourré et gaz de protection.....	25
Figure II.6: Comparaison des taux de dépôts obtenus pour différents Procédés.....	27
Figure II.7 : Principe du procédé (GTAW).	28
Figure II.8 : Mécanisme du soudage par point.....	30
Figure II.9 : Principe du soudage par molette.	31
Figure II.11 : principe du soudage par faisceau d'électrons.....	33
Figure II.12 : principe du soudage laser.....	34
Figure II.13 : Soudage par friction-malaxage.....	35
Figure II.14 : Organigramme des procédés de soudage les plus répandus.	36
Figure II.15 : $\theta = f(t)$, Faisceau de courbes de cycle thermique.....	37
Figure II.16 : $\theta = f(x)$, répartition de la température dans Soudure.....	38
Figure II.17 : Cordon de soudure.....	41
Figure II.18 : Variation de la dureté dans un joint soudé.....	41
Figure II.19 : Fissure à chaud (ou de solidification).....	42
Figure II.20 : Evolution d'un joint soudé en une seule passe en cours de refroidissement.	43
Figure II.21 : Fissure à froid (fissure d'hydrogène).....	45
Figure III.1 : La machine de traction	48
Figure III.2: sur une éprouvette de traction la longueur initiale entre repères L0 est normalisée	48

Figure III.3: évaluation des caractéristiques d'un cordon de soudure	49
Figure III.4: Principe de l'essai de traction	50
Figure III.5: Eprouvette de traction a section circulaire	52
Figure III.6 : diagramme charge-allongement	53
Figure III.7 : Dimension d'éprouvette	55
Figure III.8 : Influence de la température les limites élastiques et de rupture dépendent	56
Figure III.9 : Module d'Young	57
Figure III.10 : Diagramme de l'essai de traction	59
Figure III.11 : courbes de traction des aciers	60
Figure III.12 : courbes de traction des aciers	62
Figure III.13 : courbes de limites conventionnelles.....	61
Figure IV.1. : (a) jauge collée sur l'éprouvette. (b) schéma du fonctionnement d'une jauge de déformation	66
Figure IV .2. : Extensomètres diamétral et longitudinal sur une Eprouvettes de traction	67
Figure IV.3. : Principe du phénomène de moiré. (a) Moiré de réseaux de pas voisins (b) Moiré de réseaux de même pas inclinés entre eux	68
Figure IV.4. : Utilisation du moiré en extensomètre : cas de la traction simple.	69
Figure IV.5 : Principe d'enregistrement d'un hologramme	71
Figure IV.6. Représentation schématique d'interférométrie speckle[.....	72
Figure IV.7 : Photographie de speckle (granularité laser)	72
Figure IV.8 : Description du principe Apollor	74
Figure IV.9 : Eprouvette avec deux taches	75
Figure IV.10 : Eprouvette avec 4 taches Figure IV.11 : Eprouvette avec 5 taches.	75
Figure IV.11 : Transformation d'un corps matériel a l'instant t	75
Figure IV.12- Eprouvette avec sept taches.....	76
Figure IV.13 : Schéma d'une matrice de capteur CCD	79
Figure IV.14 : (a) Échantillon embouti couvert de la grille de points permettant la mesure par corrélation d'image. (b) Champ de déformation reconstruit par corrélation d'images	80
Figure IV.15 : Image de gauche : cliché de microscopie Électronique à balayage lors d'essais in-situ et image de droite.....	80
IV.16 : Surface présentant des niveaux de gris aléatoires créés par pulvérisation de Peintures blanche (fond) puis noire (mouchetis).....	83
Figure IV.17 : Grille virtuelle appliquée sur l'échantillon.....	83
Figure II.18 : Processus itératif pour obtenir un champ de déplacement.....	87

Figure.IV.1 : Machine de traction	91
Figure.IV.2 : Découpage a disque modèle Discotom-2.....	93
Figure.IV.3 : opération d'coupage d'échantillent	94
Figure.IV.4 : Eprouvette de traction.....	94
Figure.IV.5 : Eprouvette de traction.....	95
Figure IIV.6 : Montage expérimentale de l'essai de traction par corrélation d'images numériques	96
Figure IIV.7 : courbe "contrainte-déformation σ "	98
Figure IIV.8 : courbe de contrainte-déformation σ (N/mm ²) en fonction de ϵ (%).....	99
Figure IIV.9 : positionner la caméra	100
Figure IIV.10 : a) Champ des vecteurs de déplacement b) Profil du balayage pour le calcul des déformations locales. c) Zone d'étude (Masque)	101
Figure IIV.11 : a) Image référence (initiale), b) Image déformée (actuelle)	101
Figure IIV.12 : champ de déplacement en début de l'expérience	102
Figure IIV.13 : amplitude de déplacement en début de l'expérience	102
Figure IIV.14 : champ de déplacement en milieu de l'expérience	103
Figure IIV.15 : amplitude de déplacement en milieu de l'expérience.....	103
Figure IIV.16 : champ de déplacement à la fin de l'expérience.....	104
Figure IIV.17 : amplitude de déplacement à la fin de l'expérience.....	104

INTRODUCTION GENERALE

L'acier de par ses propriétés physiques, chimiques et mécaniques occupe une place importante dans l'industrie des métaux ferreux

D'autre part, le soudage présente la méthode la plus utilisée pour l'assemblage des installations industrielles, l'opération de soudage est réalisée, soit par chauffage, soit par intervention de pression soit par l'un et l'autre, avec ou sans emploi d'un produit d'apport dont la température de fusion est du même ordre de grandeur que celle du matériau de base.

Donc l'objectif actuel du travail est de déterminer la carte des déplacements et des déformations en utilisant un logiciel approprié.

Dans cette optique, la détermination de champ de déplacements et de déformations par la technique de corrélation d'image lors de l'essai de traction sur l'acier usage générale.

Après introduction générale, le mémoire est composé de cinq chapitres et conclusion générale :

- Le premier chapitre est réservé aux généralités sur les aciers.
- Le deuxième chapitre traite les différents procédés de soudage.
- Le troisième chapitre est l'essai de traction.
- Le quatrième chapitre c'est les méthodes expérimentales utilisées.
- Le cinquième chapitre est partie expérimentale

A la fin de ce travail un conclusion général

Chapitre 1 : Métallurgie des aciers

1.1. Définition de l'acier

L'acier est un alliage de fer contenant moins de 2 % de carbone. Il peut être répertorié selon cette teneur en carbone qui fixe son niveau de dureté maximale à l'état trempé. Un acier de haute teneur en carbone sera employé pour sa grande dureté alors qu'un acier de teneur plus faible est moins dur et plus malléable. Il contient généralement de petites quantités d'autres éléments que le fer et le carbone, incorporés, volontairement ou non.

Au cours de son élaboration. On peut également y ajouter des quantités plus importantes d'éléments d'alliage il est considéré alors comme un acier allié. [2]

Structure cristalline du fer

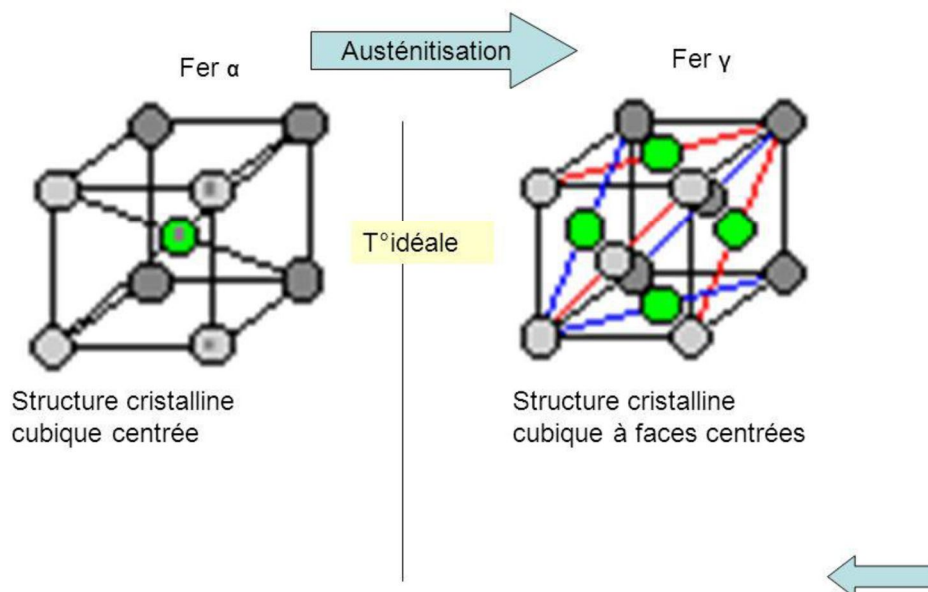


Figure.1.1. Mailles élémentaires des structures cristallines : CC et C.F.C. [2]

1.2. Fabrication de l'acier

L'acier s'élabore actuellement de deux manières :

- Dans un haut fourneau, à partir du minerai de fer et de coke avec réduction du carbone dans un convertisseur.
- Dans un four électrique, à partir d'acier de récupération. On parle d'acier de recyclage ou d'acier électrique. [4]

Le laminage à chaud est une technique puissante de mise en forme dont les applications sont très variées.

Une grande majorité des matériaux métalliques est soumise à un formage par laminage au cours de son cycle de fabrication. Bien que le mot laminage évoque plus spécifiquement les produits plats, de nombreux autres procédés de laminage sont utilisés pour obtenir d'autres géométries (fils, ronds, barres, tubes, rails, etc.). [5]

Le laminage à chaud a donc une position importante parmi les diverses techniques de mise en forme et ne cède le pas que pour des applications particulières qui révèlent d'autres techniques telles que le forgeage, le filage,

1.3. Classification des aciers

Plusieurs classifications des aciers se font sur la base de la composition chimique, le procédé d'élaboration et le mode d'emploi. On s'intéresse à quelques classifications :

1.3.1. Classification selon leur composition chimique

On a désigné des alliages de fer et de carbone sous le nom aciers non alliés ou aciers au carbone, des alliages de fer plus ou moins carburés et d'autres éléments, en générale métalliques sous le nom d'acier alliés.

- ❖ **Acier au carbone** : Contiennent du carbone en proportion croissante, du magnésium en proportion supérieure au carbone et des traces de phosphore de silicium et de soufre [4].

Qualité	C (%)	Mn (%)	P (%)	Si (%)	S (%)	Allong (%)
Extra-doux	0.15	0.4	0.04	0.03	0.02	30
Doux	0.25	0.4	0.04 0.06	0.03 0.10	0.02 0.03	25
mi-doux	0.35	0.4	0.06	0.15	0.03	20
mi-dur	0.45	0.5	0.06	0.20	0.03	15
Dur	0.55	0.6	0.06	0.25	0.03	10
Extra-dur	0.65	0.7	0.06	0.3	0.03	5

Tableau 1.1. Classification des aciers suivant la composition chimique

- ❖ **Aciers alliés :** Composition variable suivant l'emploi, les éléments alliés sont en proportion variant généralement entre 0 et 5% [4].

Element allié	Ratio (%)	Observations
Carbone	0.2÷0.7	
Silicium	0.1÷0.7 2÷4 (aciers spéciaux)	Ressortstôles de transf.
Magnesium	0.3÷0.8 12÷14(aciers très durs)	Voisferrées
S,P,Cu,Ni,Cr,V,M olybdène	< 0.1	—

Tableau 1.2 : Composition variable suivant l'emploi

1.3.2. Classification par le mode d'emploi

On distingue les types suivants :

- ❖ **Les aciers de construction** : Ils sont utilisés pour la construction,
- ❖ **Les aciers à propriétés physiques et chimiques spéciales** : ils contiennent les aciers Inoxydables, les aciers à propriétés magnétiques spéciales, les aciers à propriétés de dilatation, etc...
- ❖ **Les aciers à outils** : ils sont utilisés dans la fabrication d'instruments (permettant de façonner les matériaux). Les nuances d'aciers à outils sont rangées selon le mode de travail de l'outil, en quatre classes comme le montre le tableau (1.2)

1.4. Diagrammes de phases fer – carbone

Le plus important de tous les systèmes d'alliages binaires est probablement celui du fer et du carbone. Les aciers et les fontes, matériaux structuraux essentiels dans toute société technologiquement avancée, sont essentiellement des alliages fer-carbone.

La figure. 1.2 présente les températures importantes pour l'acier et la fonte. Ce diagramme est très important pour les opérations de production, formage, soudage, et traitement thermique des aciers et des fontes. Avant de l'utiliser, il est nécessaire d'en comprendre parfaitement chaque région.

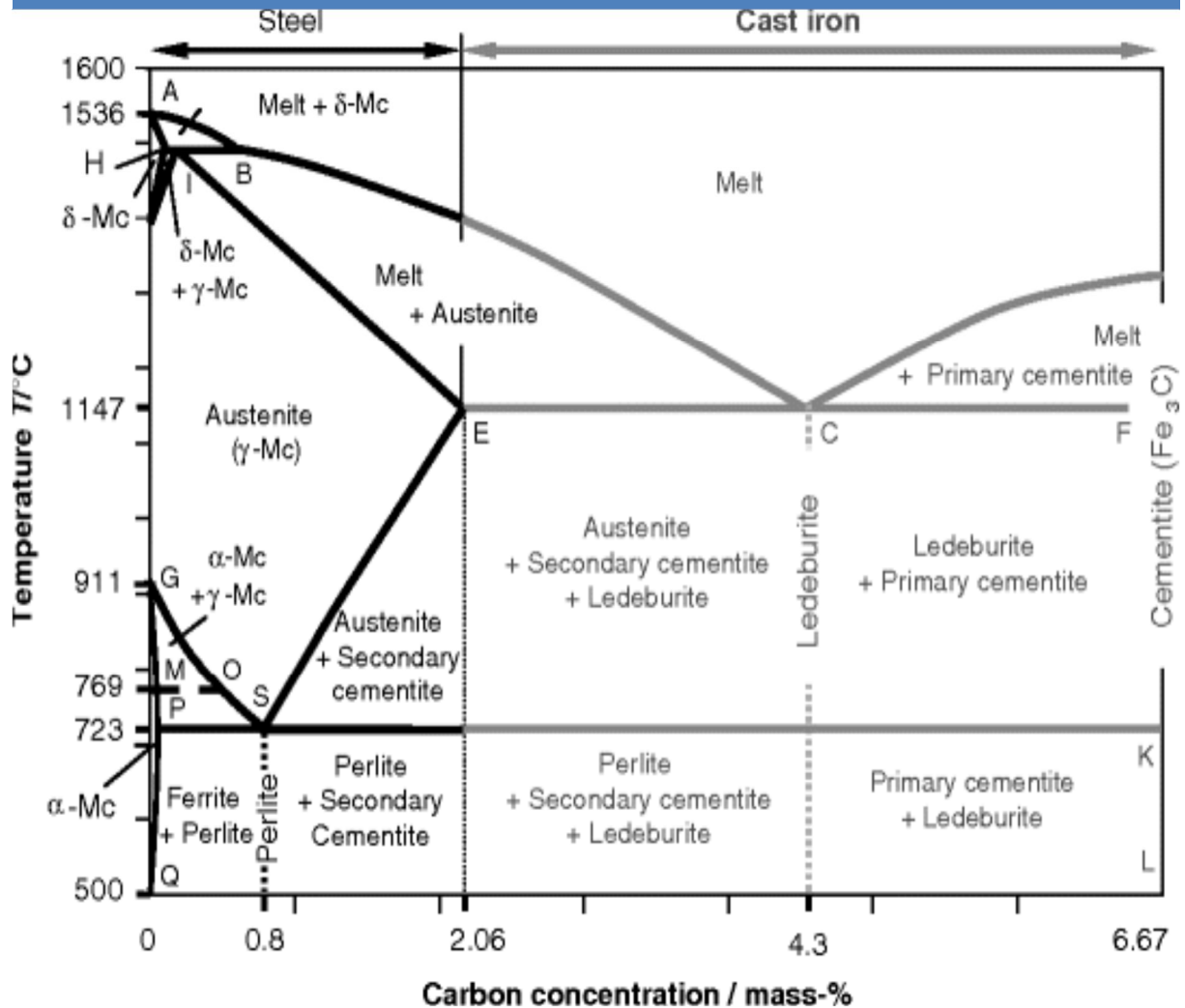


Figure.1.2 : Diagramme d'équilibre fer-carbone. [13]

1.4.1. Les principales phases de diagramme de Phase

1.4.1.1. La ferrite

Région marquée α , contient une très petite quantité de carbone. La ferrite est aussi connue sous le terme de ferrite alpha ou fer alpha. Cette phase contient un maximum de 0.02% de carbone à 727°C (1341°F). Lorsque la température augmente jusqu'à 912°C (1674°F), la teneur en carbone dans la ferrite tend vers zéro. Aussi, lorsque la ferrite est refroidie à température ambiante, la quantité de carbone diminue. (figure 1.3)

Tous les aciers et fontes contiennent de la ferrite. Cette phase comporte la même quantité de carbone, quelle que soit la teneur en carbone de l'acier ou de la fonte. La ferrite se forme seule dans les régions α et δ . elle se forme conjointement à de la cémentite.

La formation de la ferrite commence dès qu'un acier ou une fonte est refroidie en dessous de 727°C (1341°F). La structure ferritique est cubique centrée et est à la fois ductile et tenace.

1.4.1.2. L'austénite

L'austénite région γ , c'est la dernière zone importante sur le diagramme fer-carbone. Cette phase est stable au-dessus de 727°C (1341°F) et en dessous de 1538°C (2800°F). L'austénite peut contenir 1.86% de carbone. Même si elle ne se forme pas à température ambiante, c'est une région importante pour le traitement thermique des aciers. C'est une structure cubique faces centrées, qui est différente de la structure cubique centrée de la ferrite. L'austénite est également appelée fer gamma. (Figure 1.4)

1.4.1.3. La cémentite

La cémentite pure a la formule moléculaire Fe_3C . Elle contient 6.69% de carbone. A cause de cette haute teneur en carbone, la cémentite pure n'est pas indiquée sur la courbe comme mentionné auparavant, une concentration forte en carbone s'accompagne d'une augmentation de la dureté et de la fragilité. La cémentite, avec sa forte teneur en carbone, est dure et fragile.

Cette phase est aussi connue sous le terme carbure de fer. Quel que soit l'endroit où la cémentite est présente dans le diagramme fer-carbone, elle contient toujours 6.69% de carbone. Dans la région K, entre les températures 1152°C (2106°F) et 727°C (1341°F), la cémentite est mélangée à de l'austénite. En dessous de 727°C (1341°F) on peut trouver de la cémentite seule, ou combinée à de la ferrite sous forme de perlite. Par conséquent, la cémentite se forme dans tous les aciers et fontes.

1.4.1.4. La perlite

La perlite est une combinaison de ferrite et de cémentite. Ces deux phases se trouvent en couches alternées dans la microstructure. Cette microstructure est illustrée à la figure 1.5. La perlite pure se forme à 727°C (1341°F), et contient 0.77% de carbone. Cette phase comporte toujours 0.77% de carbone, on trouve de perlite et de la ferrite, comme dans la pour un acier ou de la fonte contenant plus de 0.77% de carbone, la perlite se forme avec de la cémentite.

4.1.5. Le point eutectoïde

Le point eutectoïde S, est un point important sur le diagramme fer-carbone. Il se situe à 0.77% de carbone et 727°C (1341°F). Lorsque le refroidissement d'un acier passe par ce point, de la perlite se forme.

Très peu d'aciers ont une composition eutectoïde exacte. La plupart d'entre eux contiennent moins de carbone que le mélange eutectoïde et sont désignés par aciers hypoeutectoïdes. La microstructure de ces aciers est une combinaison de ferrite et de perlite.

Ceux ayant une teneur en carbone supérieure à celle de l'eutectoïde sont appelés aciers hypereutectoïdes .

La microstructure d'un acier hypereutectoïdes est une combinaison de cémentite et de perlite.
[13]

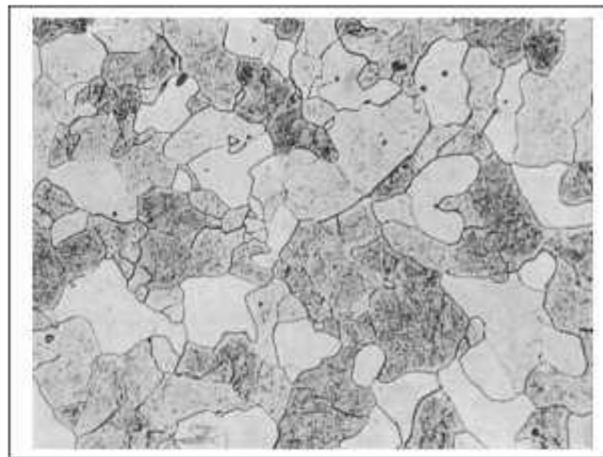


Figure 1.3. Structure ferritique

(Fer Armco. Traitement : 950 °C (30 min) - four. Attaque Nital (3 %). Grossissement : 180)

[13]

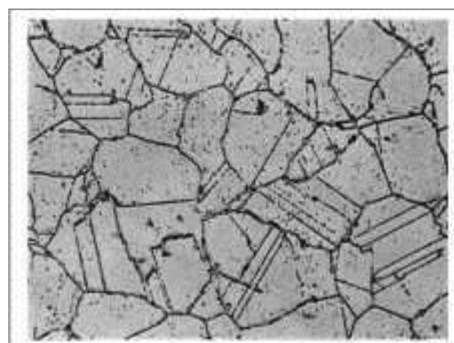


Figure 1.4 : Structure austénitique (avec précipités de carbures)

Acier à 0.12 %C- 25 %Cr -20% Ni- 1.5%Mn- 1. %Si Traitement : I 125 °C (1 h) -eau - 800 K

(30 min) Attaque électrolytique (acide oxalique 10 %) Grossissement : 900. [13]

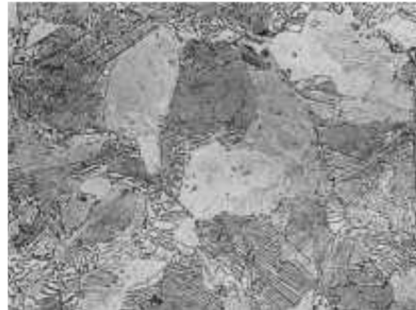


Figure 1.5 : Structure Perlitique

Acier à 0,8 % C - 0,21 % Mn - 0,22 % Si Traitement : 800 °C (30 min) – four Attaque Nital (3 %) Grossissement : 900. [13]

1.5. Influence de la composition chimique

Les aciers à haute limite d'élasticité (HLE) sont des aciers micro alliés au niobium, au vanadium, et au titane. Les autres éléments principaux entrant dans la composition chimique de ces aciers sont : le Carbone, le Manganèse, l'Aluminium, le Silicium, et le Molybdène.

Ils sont également communément connus sous le nom des aciers à dispersives relativement aux éléments formant des phases d'insertion stable (Nb, V, Ti). Les principaux constituants structuraux de ces aciers sont : la ferrite, la perlite, et les phases secondaires qui des carbures, des nitrures et des carbonitrures des éléments dispersifs.

Les HLE sont généralement laminés à chaud et s'emploient à l'état brut de laminage ou à l'état amélioré pour les constructions soudées et les pipelines. Selon la norme américaine API ils sont classés en plusieurs grades : X52, X60, X70,

1.5.1. Influence des éléments de substitution

❖ Le manganèse :

En raison de ces propriétés, le manganèse se trouve, en plus au moins grande qualité, dans presque tous les aciers, il joue un rôle déterminant lors de l'élaboration de l'acier.

Il participe à la désoxydation, réagit avec le soufre (donc désulfurant), évitant ainsi la fissuration à chaud, pendant la fusion de l'acier, il absorbe les gaz, détruit les oxydes se trouvent dans le bain en fusion en forte dose et contribue ainsi à la formation d'un métal dense et sans soufflures et régissant l'état inclusion aère du métal. Il intervient sous multiples formes:

- Il abaisse la teneur en carbone à l'eutectoïde.
- Il durcit la ferrite en solution solide et modifie la solubilité du carbone et de l'azote dans cette phase.
- Il empêche la formation des carbures inter granulaires fragilisant.
- Il élargit le domaine de métastabilité de l'austénite et retarde donc le début de la transformation en conditions isothermes aussi bien dans le domaine ferritique que dans le domaine bainitique.

C'est un élément efficace pour la trempabilité, surtout si on veut éviter un grossissement du grain ou un accroissement du taux d'austénite résiduelle.

- Il a un effet favorable sur la résistance à la rupture.
- Il diminue la susceptibilité au vieillissement après écrouissage car il abaisse les températures auxquelles se produit la transformation.

Dans le cas des aciers à haute limite d'élasticité (acier au Nb, V), sa teneur est de l'ordre de 1.5%, sous forme de MnS insoluble dès la solidification.

❖ Silicium :

Il se rencontre à faible teneur dans les aciers, il est alors utilisé comme désoxydant.

A plus forte teneur, il augmente la résistance à l'oxydation et confère certaines propriétés particulières (perméabilité meilleure). Il durcit l'acier, mais l'empêche de souder. Les aciers contenant le Si et le Mn sont appelés mangano-siliceux, ils ont la faculté de présenter après traitement thermique un taux élevé d'allongement élastique.

Leur résilience est bien meilleure que celle des aciers au carbone, ils supportent une trempe énergétique sans risque d'éclatement moléculaire. L'effet durcissant du silicium en solution solide est aussi fort que celui du manganèse, de

plus le silicium augmente la trempabilité que l'on doit contrôler pour améliorer la soudabilité (la teneur limite dans le cas des aciers à dispersoïdes au Nb-V est de l'ordre de 0.3%.

❖ **Molybdène :**

C'est un élément alpha gène qui tend à former des carbures et qui augmente largement la capacité de trempe des aciers. Il repousse vers la droite le domaine perlitique en affectant peu la position du domaine bainitique, le molybdène est donc particulièrement favorable à l'obtention des structures bainitique. A teneur équivalente, sa contribution est supérieure à celle du chrome.

1.5.2 Influence des éléments formants des précipités

❖ **L'aluminium :**

C'est surtout un désoxydant, le rôle du nitrure d'aluminium, qui inhibe le grossissement du grain austénitique, est bien connu. L'aluminium comme le chrome, augmente la résistance à l'oxydation des aciers, il peut intervenir dans certains processus de durcissement (effet durcissant).

❖ **Le vanadium :**

En faible proportion, cet élément augmente la dureté des aciers sans diminuer leur allongement ni leur résilience, c'est un désoxydant énergétique qui améliore la qualité de l'acier. Une teneur en vanadium de 0.5 à 0.7% suffit pour transformer les propriétés d'un acier.

La résistance à la traction et à la fatigue est sensiblement augmentée et l'acier est moins sujet aux tapures de trempe. Cet élément élève la température, pour éviter des plages douces après traitement.

Les carbonitrides du vanadium sont mis en solution à une température proche de 1000°C et ne peuvent donc pas empêcher le grossissement du grain austénitique. Leur précipitation a lieu en partie dans l'austénite et en partie en ferrite.

❖ **Le niobium :**

Ce métal résiste à la plupart des aciers, il est ajouté sous forme d'alliages ferreux appelés

Ferro-niobium, plus faciles à introduire à la fusion. Il a été révélé qu'en ajoutant dans des aciers à bas taux de carbone une faible proportion (0.1%) de niobium, on élève avantageusement la limite d'élasticité, cette amélioration est due au fait que la métal présente un grain plus fin que l'acier de carbone de même nuance, et que ce résultat a été obtenu, dans des produits laminés beaucoup plus économiquement avec le niobium que tout autre méthode. La résistance de ces produits permet une réduction du poids et une économie de 20 à 30%. Ils sont livrés sous forme des tôles, barres et peuvent être améliorés davantage par traitement thermique et ils présentent une bonne soudabilité.

Il est utilisé pour :

- Freiner la recristallisation de l'austénite en solution solide.
- Former des précipités lors de la transformation austénite-ferrite.

Cette précipitation a un effet durcissant mais également fragilisant. La présence des carbonitrides (carbures) du niobium non dissout freinent le grossissement du grain austénitique avant écrouissage.

❖ **Le titane :**

Il forme des carbonitrides (carbures), il permet de fixer l'azote. Il se combine avec le soufre en donnant naissance des sulfures non déformés. L'emploi de cet élément demande des Précautions car il a tendance à former gros précipités de nitrides qui ne se dissolvent pas, d'où la difficulté d'éviter la fragilisation. Il a un effet durcissant à l'état brut de laminage ; il freine la recristallisation dans l'austénite ou dans la ferrite ; il sert à affiner les grains lors d'une normalisation.

1.5.3 Influence de la perlite

La présence du carbone confère aux aciers leurs propriétés. Le carbone n'a pas besoin d'être ajouté comme addition, mais il doit être réglé à la valeur désirée. Le carbone en solution a un effet durcissant important :

- La quantité de perlite est proportionnelles à la teneur en carbone et dépend des éléments d'alliage en solution solide ; elle augmente fortement la résistance de l'acier, mais son effet est bien moindre sur la limite d'élasticité, environ deux à trois fois moins.

- Le rôle du carbone sur la résistance à la rupture fragile est très important car les lamelles de cémentite servent à la fois de défauts d'amorçage et pour la propagation des clivages.

Le fer métallique existe sous deux formes cristallines :

- La variété cubique centrée, stable au-dessous de 910°C (fer α) et au-dessus de 1400°C (fer δ).

Les solutions solides dans le fer α sont appelées ferrites.

- La variété cubique à face centrée, stable entre 910°C et 1400°C (fer γ). Les solutions solides dans le fer γ sont appelées austénites.

Les éléments d'addition ont des solubilités très différentes dans ces deux variétés. Ce fait entraîne l'existence de domaine de transformations très différentes en présence d'éléments d'addition. Dans le fer pour le passage de fer α au fer γ se produit à une température définie.

La présence d'un élément d'addition entraîne l'apparition d'un domaine plus au moins étroit dans lequel les deux variétés allotropiques peuvent coexister en équilibre.

Les diagrammes permettent de classer les éléments d'addition en deux types :

- Les éléments gammagènes qui abaissent cette température (parce qu'ils augmentent la stabilité du fer γ et de ce fait abaissent les limites du domaine d'existence de l'austénite) ; ce sont essentiellement le nickel et le manganèse auxquels on peut ajouter le cuivre (peu utilisé comme élément d'alliage).

- Les éléments alphagènes qui relèvent cette température (parce qu'ils augmentent la stabilité du fer α et de ce fait élèvent les limites du domaine d'existence de la ferrite) ; ce sont les plus nombreux des éléments d'alliage tels chrome, silicium, molybdène, vanadium, tungstène, titane. [14]

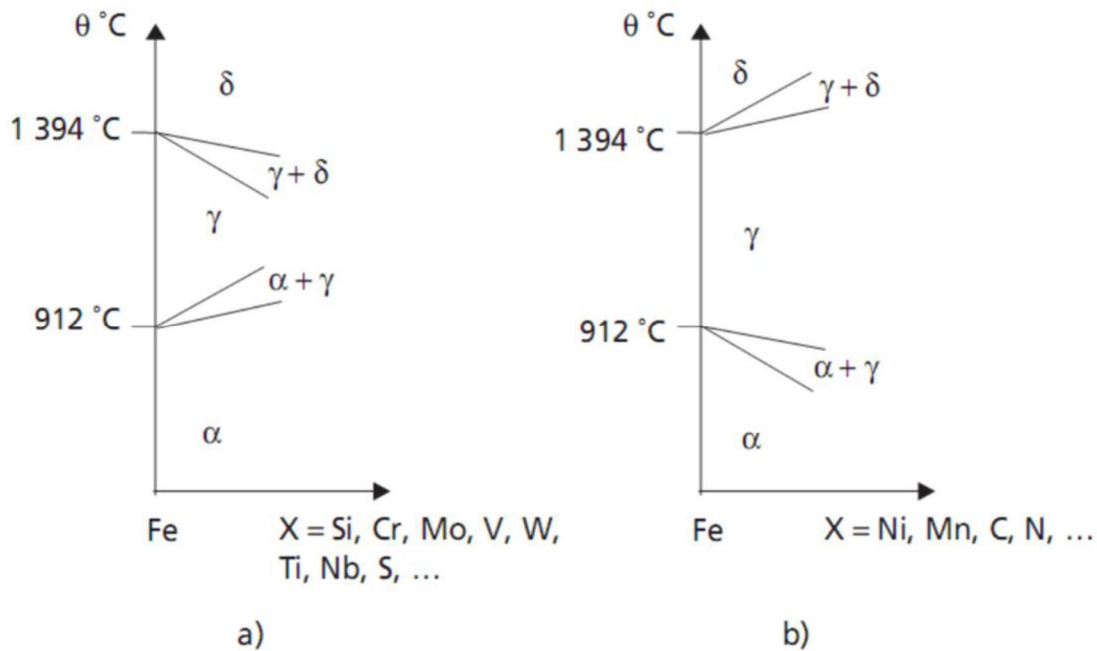


Figure.I.6 : Évolution des domaines d'existence des variétés allotropiques du fer par addition. [14]

1.6 : Propriétés des aciers

L'acier est un alliage essentiellement composé de fer, sa densité varie donc autour de celle du fer (7,32 à 7,86), suivant sa composition chimique et ses traitements thermiques.

La densité d'un acier inox austénitique est typiquement un peu supérieure à 8, en raison de la structure cristalline.

Ils ont un module de Young d'environ 210 000 MPa, indépendamment de leur composition. Les autres propriétés varient énormément en fonction de leur composition, du traitement thermomécanique et des traitements de surface auxquels ils ont été soumis.

Le traitement thermomécanique est l'association :

- D'un traitement thermique, sous la forme d'un cycle chauffage- refroidissement (trempe, revenu...);
- D'un traitement mécanique, une déformation provoquant de l'écroutissage (laminage, forgeage, tréfilage...).

1. Introduction générale

Le soudage est dit autogène lorsque les bords adjacents des pièces sont portés à fusion et participent à la formation du joint. Il est souvent nécessaire, pour former le joint soudé, d'ajouter au métal de base (celui qui constitue la matière des pièces) un métal d'apport, identique au précédent ou différent, mais de toute façon étranger au métal de base. Métal d'apport et métal de base doivent pouvoir former un alliage.

Lorsque le métal de base n'est pas porté à fusion et que le métal d'apport constitue seul le joint, on est en présence d'une brasure.

En soudage autogène, la continuité de la matière est obtenue par fusion, par pression ou par ces deux moyens combinés. Le soudage fait donc appel à une source d'énergie qui, selon le procédé considéré peut-être de nature :

- Thermo-chimique (soudage au chalumeau, soudage par aluminothermie)
- Electro-thermique (soudage à l'arc et ses nombreuses variantes, soudage par résistance, soudage par bombardement électronique),
- Mécanique (soudages par pression à froid, par explosion, par friction, par ultrasons),
- Lumineuse (laser).

Certains procédés de soudage ont donné naissance à des techniques connexes fort importantes telles que le coupage thermique (coupage aux gaz ou oxycoupage, coupage à l'arc au plasma), le soudobrasage et la métallisation (aux gaz, à l'arc, au plasma). Ces techniques utilisent les mêmes sources d'énergie que le procédé de soudage dont elles dérivent et nécessitent l'usage de matériels analogues.

2. Définitions de base

Soudage : C'est l'opération de réunir de façon permanente deux ou plusieurs parties constitutives d'un assemblage soit par chauffage, soit par pression, soit par la combinaison de l'un et l'autre, avec ou sans emploi d'un produit d'apport.

Soudure : C'est le résultat de l'opération de soudage.

- **Soudage homogène :** les deux parties à assembler sont de même constitution physico-chimique ou lorsque le métal d'apport est de constitution physico-chimique semblable à celle du matériau de base.

- **Soudage hétérogène** : le métal d'apport présente une constitution physico-chimique différente de celle du matériau de base ou les métaux assemblés sans métal d'apport sont de nature différente.
- **Soudage autogène** : signifie la participation des bords des pièces assemblées à la composition du joint.

3. Procédés de soudage

Les procédés de soudage présentés dans ce chapitre sont des procédés de soudage à l'arc manuels ou semi-automatiques. Un procédé de soudage implique un ensemble de paramètres qui doivent s'adapter à chacun des travaux de soudage effectués. Chaque procédé de soudage comporte différents avantages et inconvénients qui déterminent le choix du procédé à utiliser pour un travail donné. Ainsi, après avoir identifié le bon procédé de soudage à utiliser, il reste plusieurs paramètres à déterminer tels que le choix du métal d'apport, l'intensité du courant ou de la tension, le type de courant et de polarité (pour le courant continu – CC (DC)), le choix d'un gaz protecteur (s'il y a lieu), la vitesse de dévidage du fil-électrode (s'il y a lieu), l'élaboration de la séquence de soudage et, enfin, la technique de soudage (mouvement oscillatoire, angle de l'électrode, etc.).

3.1. Soudage à l'arc

C'est un procédé de soudure par fusion où la chaleur est produite par un arc électrique, formé entre le métal de base et l'électrode, ou entre deux ou plusieurs électrodes. Le contact puis le léger éloignement de l'électrode par rapport aux pièces provoque l'arc électrique. L'électrode est constituée d'un métal dont les caractéristiques mécaniques, chimiques et physiques sont très proches du métal des deux pièces à souder.

Le soudage à l'arc électrique comprend plusieurs techniques :

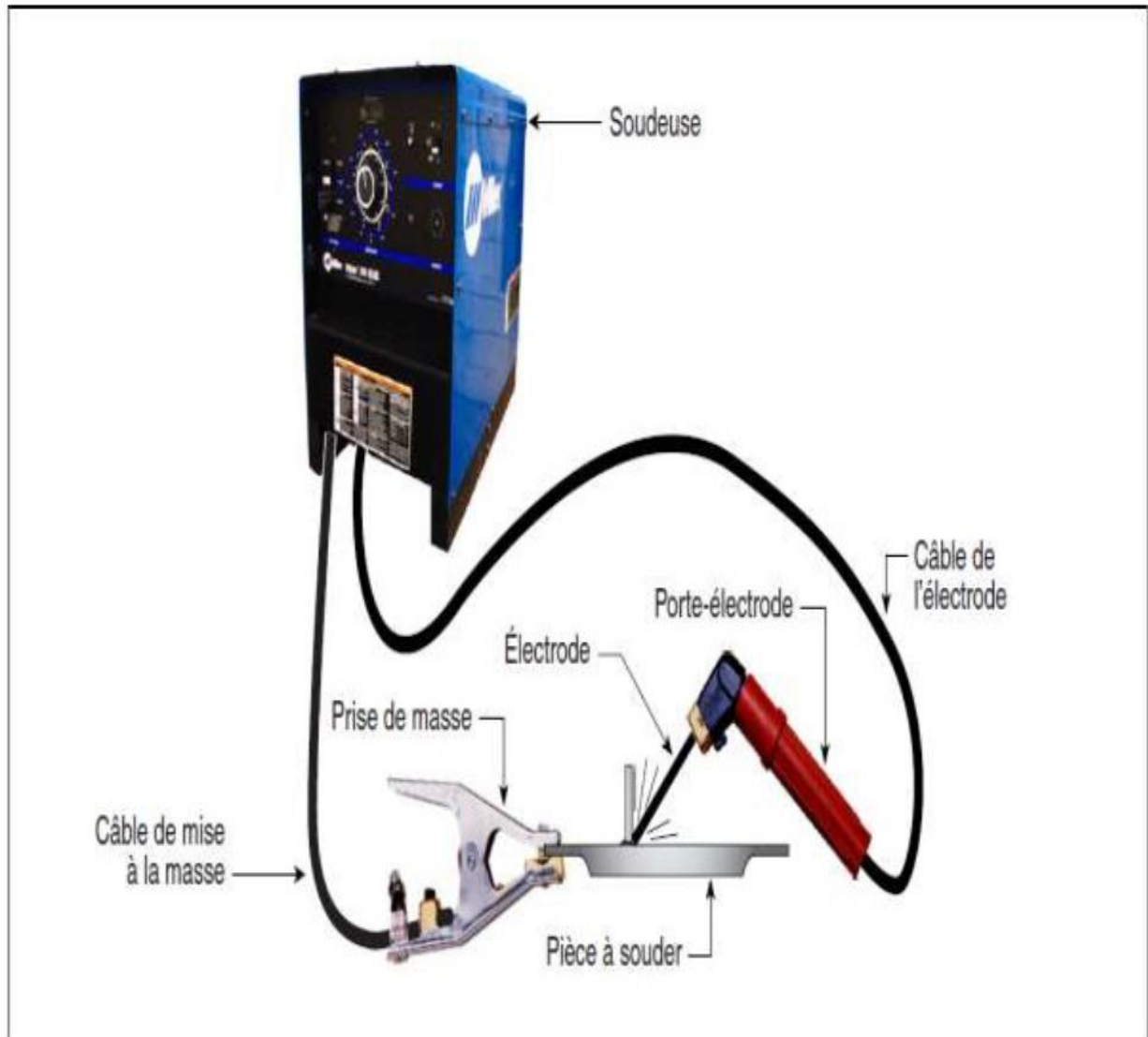


Figure 1.1. Circuit électrique pour le soudage à l'arc.

Définition

Le soudage à l'arc avec électrode enrobée est le procédé de soudage le plus couramment employé pour les travaux d'entretien et de réparation. Dans ce procédé, on fait jaillir un arc électrique entre le bout de l'électrode et le métal à souder. L'électrode est constituée d'une âme métallique,

recouverte de flux ou d'un revêtement (enrobage). L'électrode fond au fur et à mesure de l'opération de soudage.

Le flux protège de l'air ambiant les ions métalliques de l'arc et assure ainsi la stabilité de l'arc. A mesure que le flux fond, il dégage des fumées et dépose un laitier protecteur sur le métal en fusion. Ce type de soudage est utilisé pour les travaux d'entretien et de réparation effectués sur l'acier doux, l'acier inoxydable, l'aluminium et les métaux non ferreux. Dans les ateliers de soudage, ce type de soudage est peu utilisé.

Le soudage à l'arc avec électrode enrobée tend à être remplacé par le soudage MIG MAG.

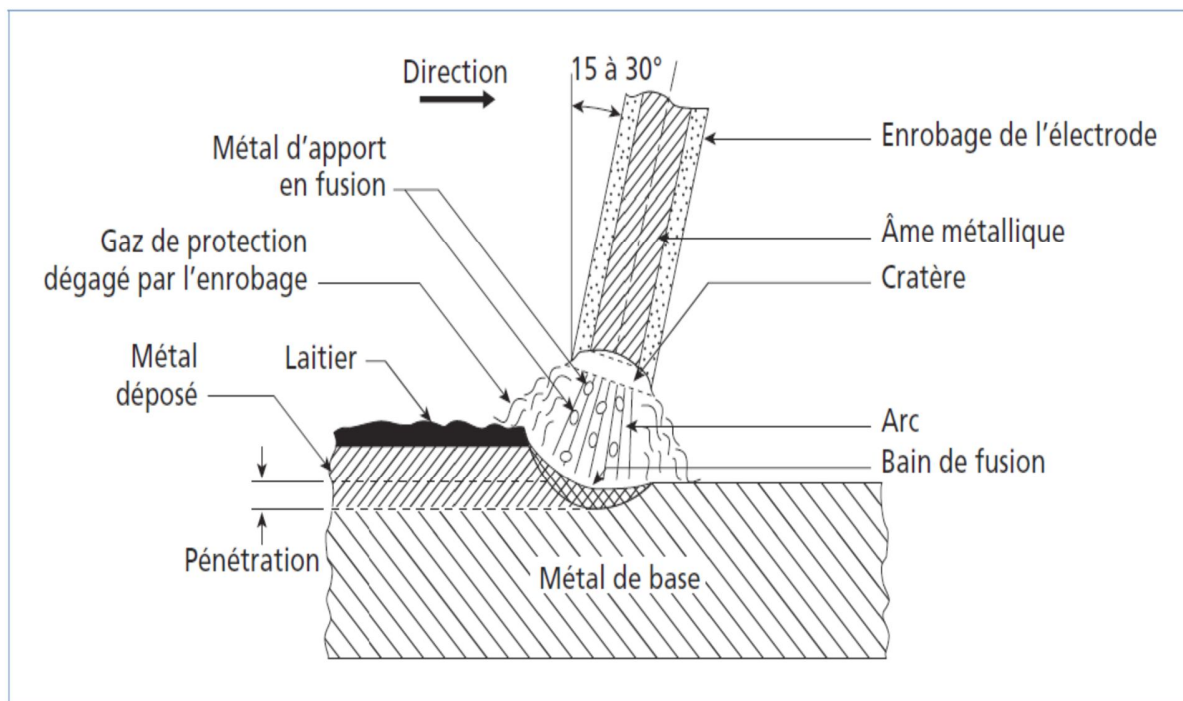


Figure 2.2. Principe de soudage à l'arc avec électrode enrobée (SMAW). [16]

Avantages et inconvénients

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

Le coefficient de transmission thermique du procédé (c'est-à-dire la quantité de chaleur transmise à la pièce) varie entre 50 et 85 %. Comme la profondeur de pénétration de la soudure augmente en

fonction de ce coefficient, le SMAW peut atteindre une bonne pénétration. Cependant, la chaleur au centre de l'arc est plus intense et cela peut causer une déformation angulaire.

Pour l'amorçage de l'arc avec les procédés manuels (particulièrement avec les électrodes à enrobage basique pour le SMAW), il faut que la tension à vide soit assez élevée, généralement d'une valeur minimum de 70 V.

Applications

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

Il offre une bonne mobilité et la possibilité de souder à l'extérieur sans précaution particulière, notamment pour effectuer des réparations ou du travail sur un chantier. [4]

3.2. Soudage MIG/MAG fil plein (GMAW)

Définition

Le soudage à l'arc sous protection gazeuse avec fil plein utilise un fil-électrode, continu et fusible, qui sert à créer l'arc de soudage avec le métal de base, ou est utilisé comme métal d'apport (Figure 2.3).

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

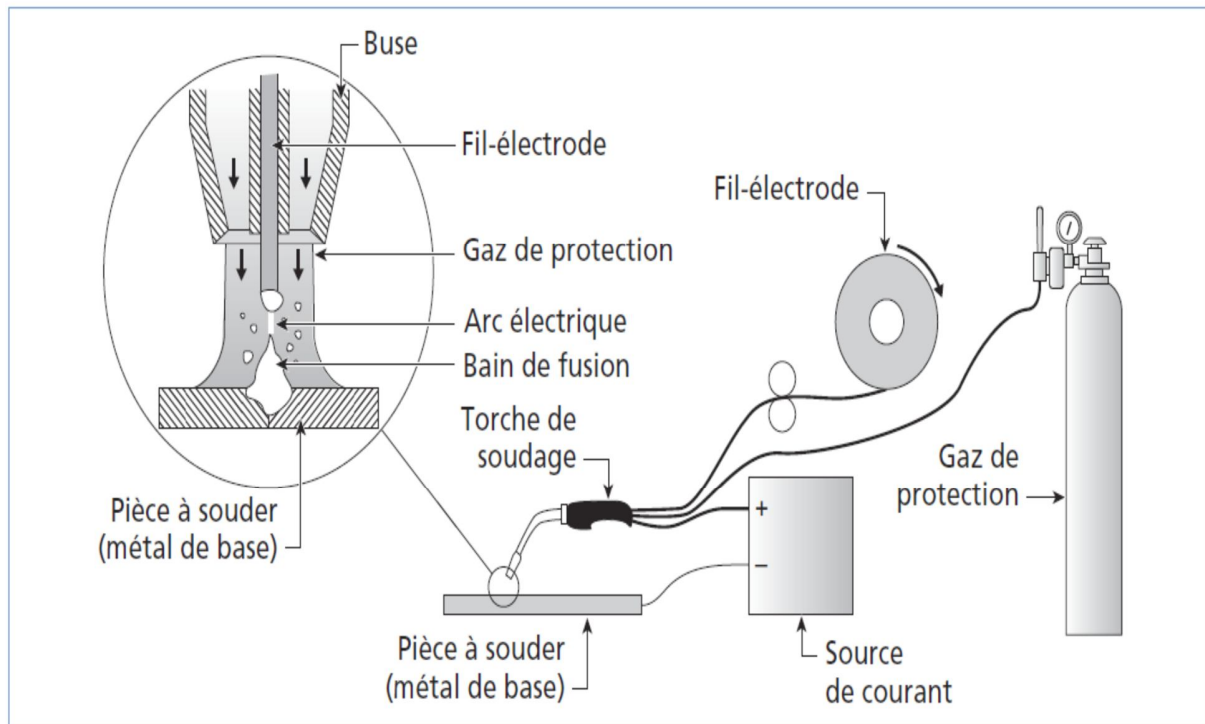


Figure 2.3. Principe de fonctionnement du procédé (GMAW). [6]

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

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

Le procédé MIG (Métal Inert Gas) qui utilise un gaz de protection neutre ou inerte (par exemple, l'argon ou l'hélium) ;

Avantages et inconvénients

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

Comme il s'utilise avec de fortes intensités de courant, il procure un taux de dépôt élevé. Par ailleurs, il offre une grande rapidité d'exécution. Il n'exige pas de changement d'électrode, ce qui permet de souder de plus longues distances d'un seul coup.

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

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

Il faut s'assurer que la vitesse de dévidage soit appropriée à la procédure de soudage, sinon le fil-électrode risque de fondre dans le tube-contact ou de se figer dans le bain de fusion, ce qui occasionne des pertes de temps et d'énergie considérables. [17]

Applications

Le soudage GMAW est très répandu dans pratiquement tous les domaines de la fabrication. Généralement, toutes les entreprises qui ont souvent recours au soudage possèdent un ou plusieurs postes permettant l'utilisation de ce procédé. [4]

3.3. Soudage MAG fil fourré (FCAW)

Définition

Le soudage à l'arc avec fil fourré de flux (MAG fil fourré) est appelé également soudage FCAW. Dans ce procédé, la tête de soudage d'un pistolet à souder déroule à vitesse constante un fil constitué d'un tube en métal fourré de flux. (figure 2.4)

Le flux aide à amorcer l'arc, forme un laitier et comprend des adjuvants destinés à renforcer la soudure. Le gaz de protection (CO_2 , mélange Argon – CO_2) dépend du fil fourré utilisé (possibilité d'une autoprotection par dégagement du gaz protecteur suite à la décomposition du flux) Ce type de soudage est utilisé surtout pour les travaux d'assemblage mécanique (charpente) ou de maintenance générale. Ce procédé est principalement utilisé pour les aciers au carbone et aciers inoxydables. [17]

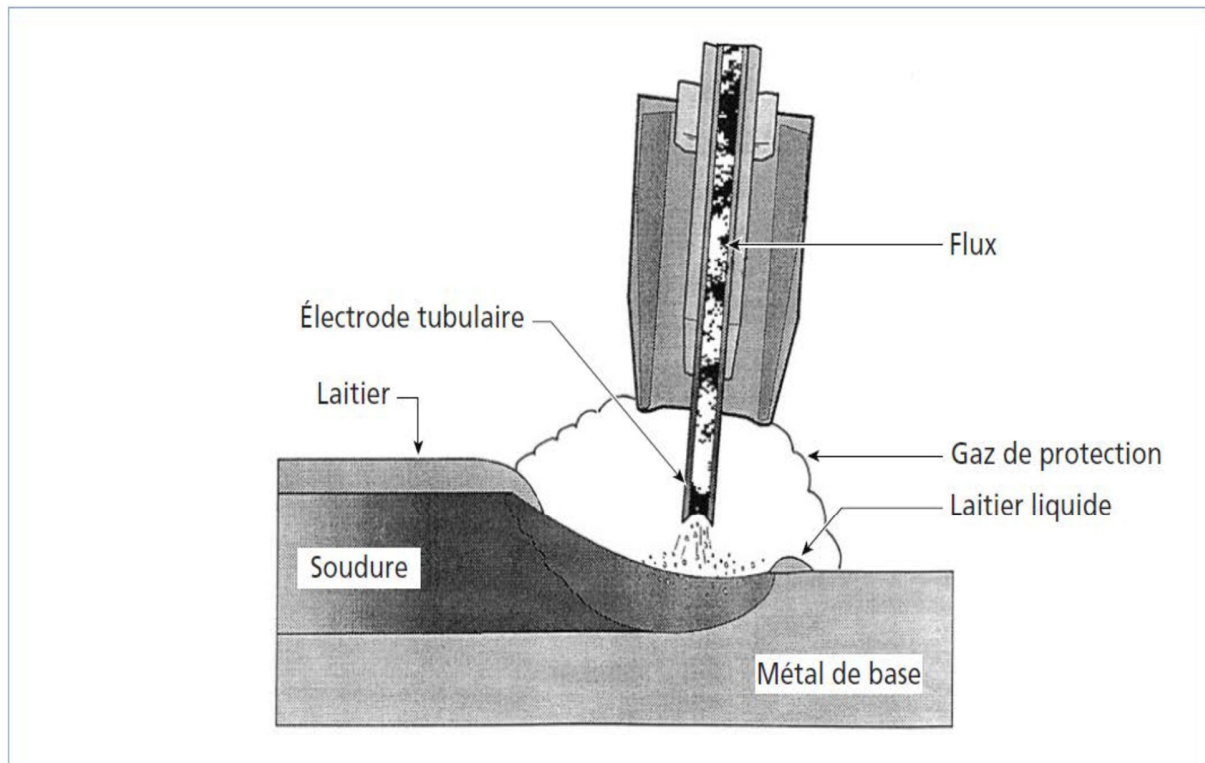


Figure 2.4. Soudage avec fil fourré et gaz de protection. [16]

Avantages et inconvénients

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

On emploie les procédés FCAW pour le soudage de l'acier doux ou faiblement allié ainsi que pour l'acier inoxydable. Ces procédés procurent une pénétration profonde et sont appropriés pour le soudage de fortes épaisseurs de métal (variant le plus souvent entre 5 et 50 mm).

Applications

Ces procédés sont particulièrement utilisés dans l'industrie de la fabrication de ponts, de réservoirs, de turbines, de matériel agricole et de châssis de camions, de même que dans la construction navale, la chaudronnerie-tuyauterie, les travaux d'entretien, le rechargement, etc. [4]

3.4. Soudage TIG (GTAW)

Définition

Pour le soudage à l'électrode de tungstène (TIG), un arc électrique est amorcé entre la pièce à souder et l'électrode de tungstène. L'électrode demeure réfractaire à la fusion. La protection de l'arc est assurée par un débit continu de gaz, habituellement de l'Argon (ou aussi de l'Hélium ou encore un mélange Argon – Hélium). Cette protection empêche les gaz atmosphériques de pénétrer dans la zone de soudage. L'arc peut fusionner deux pièces de métal sans métal d'apport. En cas d'apport de métal, celui-ci est introduit sous forme de baguette. (figure 2.5)

Le soudage TIG sert couramment dans les travaux de soudage d'aluminium (soudage métaux nobles). Il peut également servir à souder les pièces en acier doux ou en acier inoxydable.

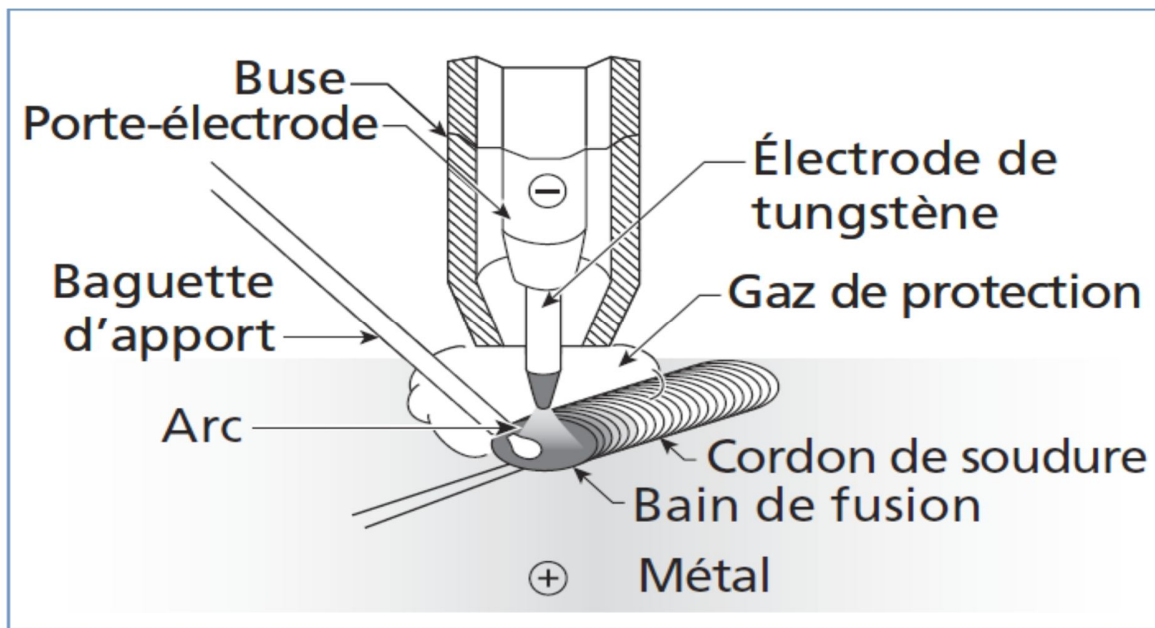


Figure 2.5. Principe du procédé (GTAW). [18]

Avantages et inconvénients

Ce procédé de soudage est particulièrement approprié pour souder les métaux à faible soudabilité, incluant l'acier inoxydable et les métaux non-ferreux (dont l'aluminium, le magnésium, le cuivre, le titane, le nickel de même que leurs alliages).

Ce procédé ne transfère qu'une faible quantité de chaleur au métal et le dépôt de métal d'apport se fait à l'extérieur de l'arc électrique. Par conséquent, le métal d'apport n'est pas surchauffé et cela donne à l'arc une plus grande stabilité, résultant en une soudure sans soufflures. De plus, le procédé ne cause pas de projections et la chaleur est bien dirigée. Le bain de fusion est étroit mais la vitesse de soudage est réduite.

La soudure est précise, ce qui limite les déformations. Le dépôt de soudure est dense et procure une soudure de grande qualité. Le soudage s'exécute dans toutes les positions et n'emploie pas de laitier, ce qui rend le nettoyage aisé.

Comme le taux de transfert de chaleur est assez faible comparé aux autres procédés, le procédé s'applique bien au soudage de plaques minces mais convient moins aux pièces épaisses, à moins qu'on ne veuille souder certains alliages particulièrement difficiles à souder, exigeant une grande qualité de soudure ou un cordon de pénétration dans un tuyau.

Applications

On l'utilise surtout dans les secteurs de la construction aéronautique, pour le matériel de restauration, les blocs-moteur, les citernes, les carrosseries, les téléphériques, dans les industries alimentaires et chimiques (échangeurs d'air), les décorations et pour la fabrication ou la réparation de petites pièces. [17]

3.5. Le Soudage par point (RSW)

Définition

Dans ce procédé, la soudure résulte à la fois de la chaleur générée par le passage d'un courant électrique (effet Joule) et de la pression exercée aux points de contact des électrodes. Ces électrodes sont en général constituées de cuivre ou d'un alliage de cuivre et de béryllium. Aucun métal d'apport ou flux n'est utilisé. (Figure 2.6)

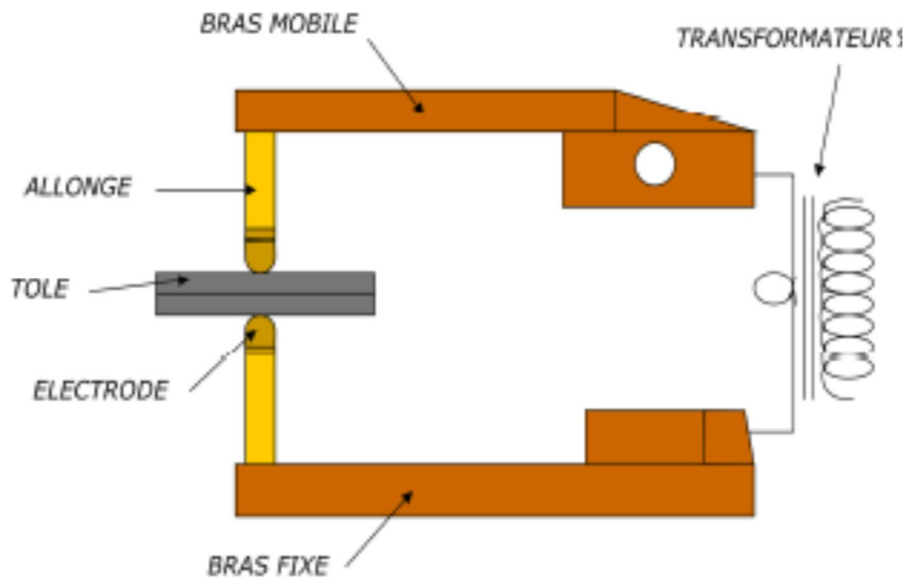


Figure 2.6. Mécanisme du soudage par point. [19]

Il existe de nombreuses variantes à cette technique de soudage tel que le soudage par molette qui est une variante du précédent, ici les électrodes sont remplacées par des molettes tournantes ce qui permet un soudage continu ou discontinu très rapide. (figure 2.7)

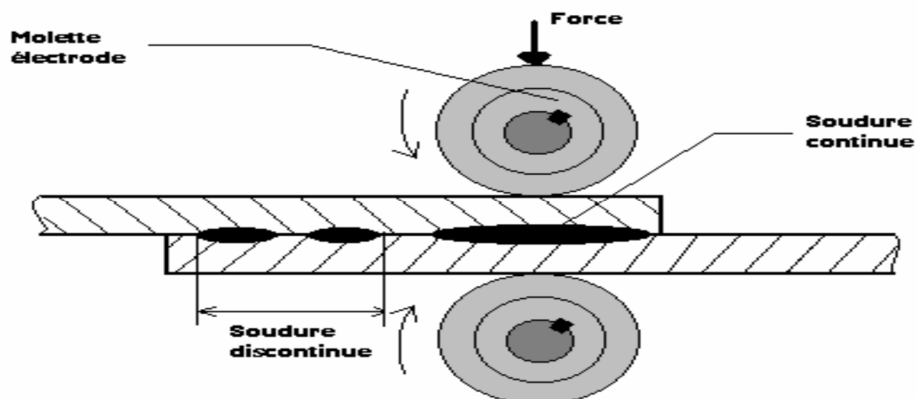


Figure 2.7. Principe du soudage par molette. [16]

Applications

Ce procédé est très utilisé en grande et petite série, il est aussi très rapide. Il est utilisé dans de très nombreux domaines : l'industrie automobile, aéronautique, aérospatiale, nucléaire, électrique et électronique, les appareils ménagers, le mobilier métallique, les armatures en fils, le soudage en bout de barre, de profilés, de pièces tubulaires, de tôles, etc [17]

Applications

Ce procédé est très utilisé en grande et petite série, il est aussi très rapide. Il est utilisé dans de très nombreux domaines : l'industrie automobile, aéronautique, aérospatiale, nucléaire, électrique et électronique, les appareils ménagers, le mobilier métallique, les armatures en fils, le soudage en bout de barre, de profilés, de pièces tubulaires, de tôles, etc [4]

3.6. Soudage oxygaz

Définition

Dans ce procédé, (figure 2.8) le soudage utilise la chaleur de combustion d'un gaz combustible (principalement acétylène ou propane) mélangé dans certaines proportions à un gaz comburant (O₂).

Le poste de soudage à la flamme comporte des bouteilles de gaz, des détendeurs, des tuyaux flexibles, chalumeau et l'électrode d'appoint introduite à la main.

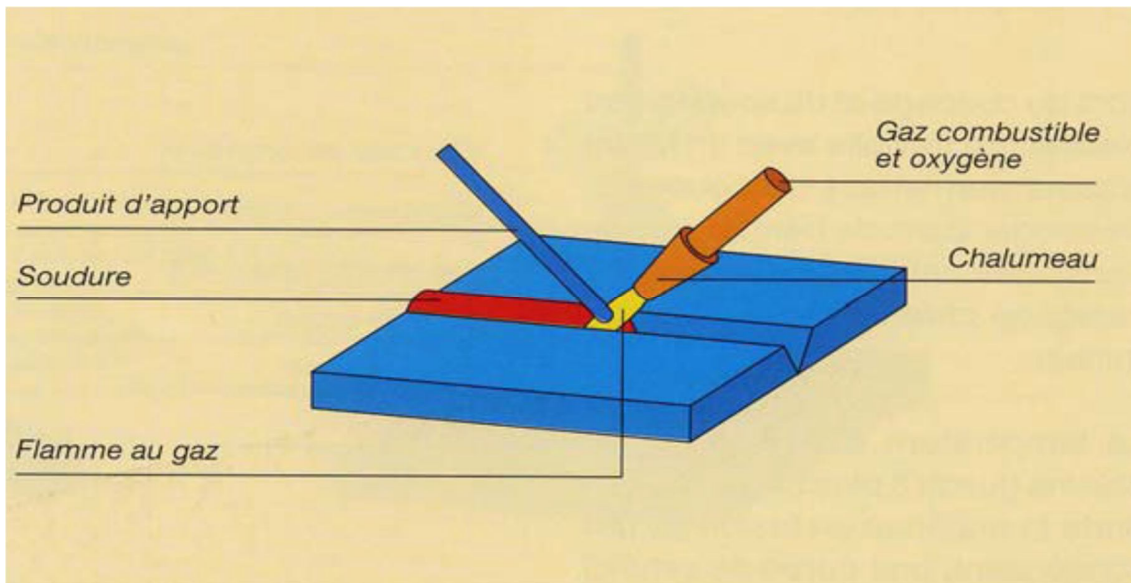


Figure 2.8. Principe du soudage oxygaz. [16]

Application

Travaux de réparation ou pour souder de la tôle légère.

4. Autres procédés

Le soudage par faisceau d'électrons (soudage FE) apparaît en 1958 (figure 2.9). Il relève, avec le soudage laser, de la catégorie du soudage par faisceau à haute densité d'énergie. Grâce à l'utilisation de très hautes températures, il permet une pénétration étroite et profonde. Il présente néanmoins un inconvénient majeur : il faut en effet pouvoir disposer d'une chambre à vide pouvant contenir à la fois le canon à électrons et la pièce à souder. L'aéronautique et le nucléaire sont les premiers à le plébisciter.

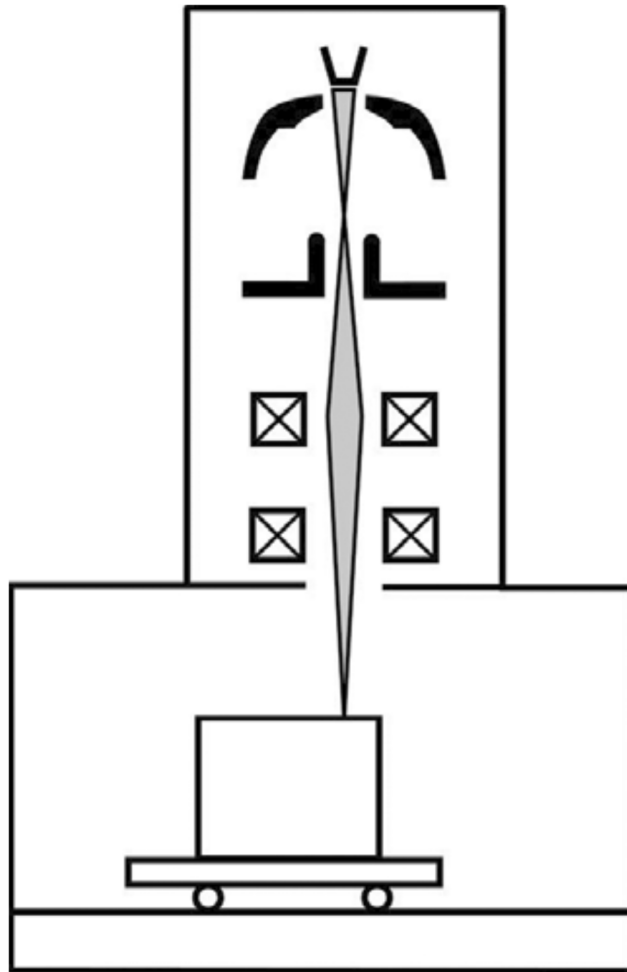


Figure 2.9. Principe du soudage par faisceau d'électrons. [16]

Le soudage (et le coupage) laser ont des caractéristiques idéales à plus d'un titre (figure 2.10). Le faisceau laser permet une conduite plus concentrée de la chaleur, des déformations très faibles et de très grandes vitesses de soudage. Malheureusement, un laser puissant est encombrant et coûteux, et il faut trouver le moyen d'amener le faisceau lumineux jusqu'au point de soudure. Pour y parvenir, un système de miroirs réfléchit le faisceau dans les lasers CO₂, et le rayon peut être transmis par fibre optique dans les lasers YAG, ce qui fait de ces derniers l'instrument idéal pour les robots soudeurs.

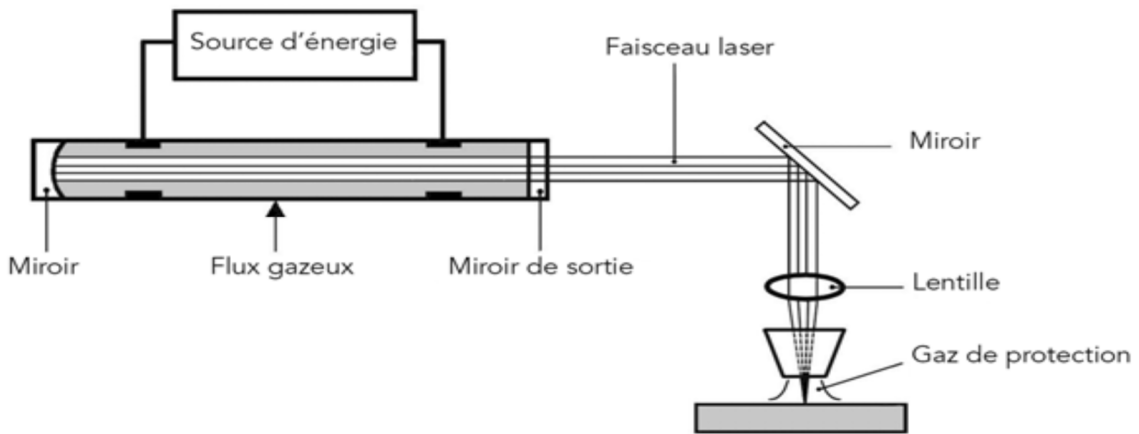


Figure 2.10. Principe du soudage laser. [16]

Le soudage par friction-malaxage a été breveté par TWI en 1992 (figure 2.11). Le procédé est parfaitement adapté à l'aluminium et donne un joint de bonne qualité sans fusion. Il n'exige pas de matériau d'apport, consomme peu d'énergie et a un faible impact environnemental. Sa simplicité et son efficacité en font l'une des plus brillantes innovations du XXe siècle dans le domaine du soudage. [4]

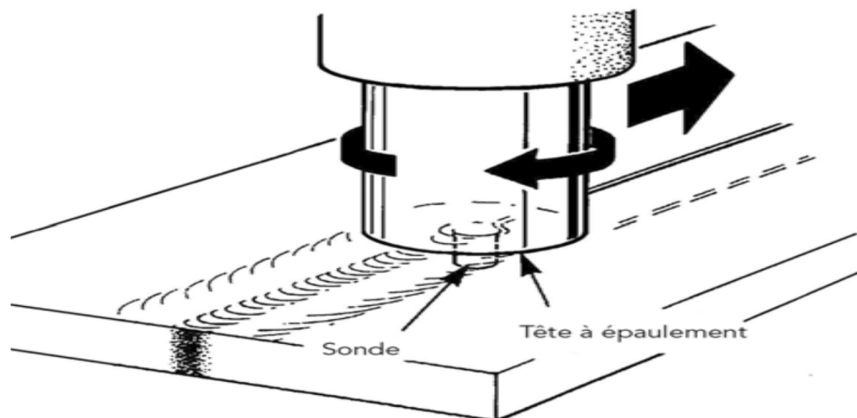


Figure 2.11. Soudage par friction-malaxage. [16]

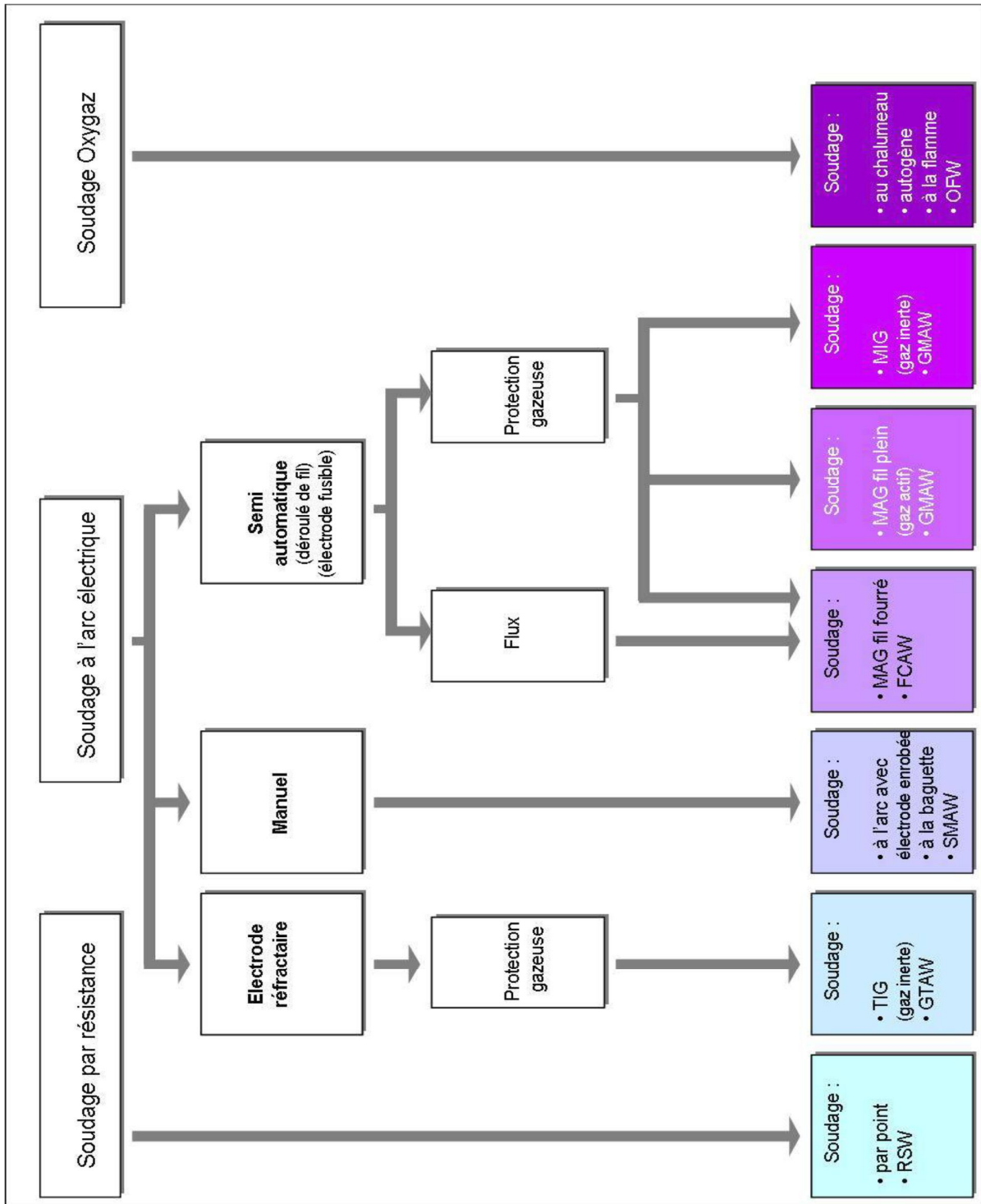


Figure 2.12. Organigramme des procédés de soudage les plus répandus.

5. Cycles thermiques de soudage

Sur le plan thermique, le soudage est caractérisé par un apport important et localisé de chaleur sur la pièce soudée. La diffusion de l'énergie, ainsi apportée, dans le métal fait du soudage une véritable opération de traitement thermique. Ces effets sont caractérisés par [19]:

- Un chauffage très rapide jusqu'à une température comprise entre la température initiale et la température de fusion du métal.
- Un refroidissement qui succède immédiatement au chauffage et dont la cinétique dépend essentiellement des paramètres de soudage.

L'intérêt de la connaissance du cycle thermique (c'est-à-dire la variation de la température en fonction du temps, en tout point de l'assemblage) de soudage est de permettre l'interprétation quantitative des phénomènes métallurgiques engendrés par cette opération pour déterminer le critère de choix des procédés de soudage et des modes opératoires (Figure 2.13 et Figure 2.14) [20]

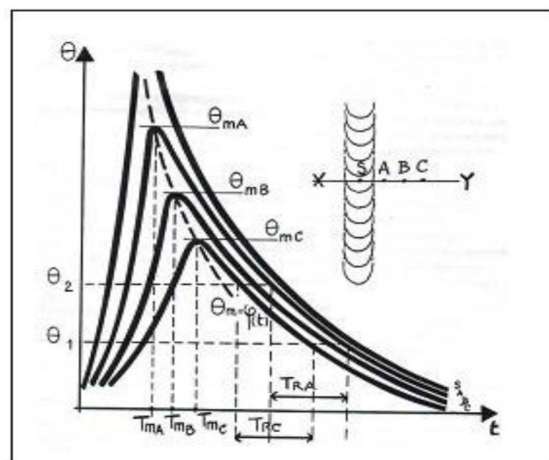


Figure 2.13. $\theta = f(t)$, Faisceau de courbes de cycle thermique [20].

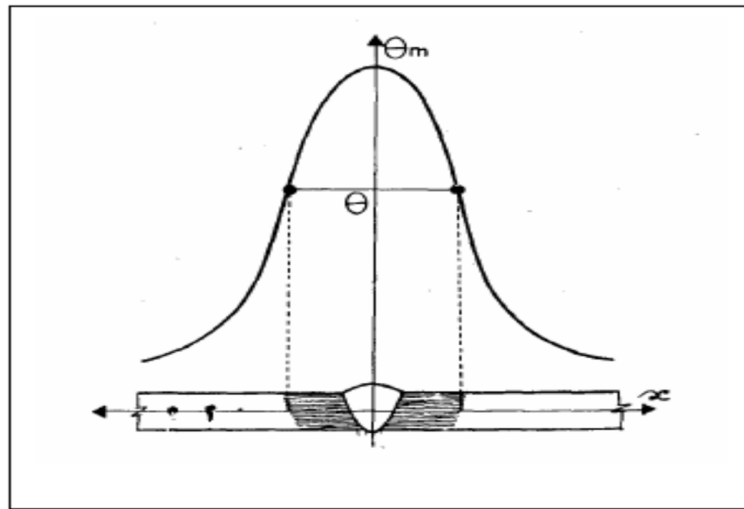


Figure 2.14. $\theta = f(x)$, répartition de la température dans Soudure.

5.1. Conséquences métallurgiques des cycles thermiques de soudage

Au cours d'un cycle thermique de soudage, un acier inoxydable austénitique ne subira une transformation structurale que si sa température a dépassé 1100 °C environ. Les propriétés mécaniques de la zone soudée sont très fortement liées à la structure métallurgique obtenue après l'opération de soudage.

Le déplacement du volume thermique provoque, perpendiculairement à la ligne de fusion, des changements microstructuraux dans le métal de base. Ces modifications dépendent de la température maximale atteinte et de la cinétique de refroidissement en ce point. On distingue dans une soudure d'acier inoxydable austénitique, après son retour à la température ambiante, et à partir de l'axe du cordon, successivement les zones suivantes : [19, 20, 21]

a. Zone fondue (ZF)

C'est le volume qu'occupe le métal fondu après solidification dans les soudures par fusion [18]. La zone fondue se solidifie à l'état austéno-ferritique ou totalement ferritique et sa transformation ferrite (δ) austénite n'est généralement pas complète par suite de la rapidité du refroidissement à haute température. Une certaine proportion de ferrite δ subsiste donc à la température ambiante.

Cette proportion est d'autant plus élevée que le refroidissement à haute température ($> 1250\text{ °C}$) a été plus rapide. Par suite des ségrégations issues de la solidification, cette ferrite δ est à la fois dans les espaces interdendritiques et dans les axes des dendrites. L'austénite par ailleurs ne subit aucune transformation jusqu'à son retour à la température ambiante [20, 21]. Le métal fondu au cours du soudage a des caractéristiques mécaniques supérieures à celles d'un même métal élaboré d'une manière classique. Ceci est dû aux déformations importantes auxquelles il est soumis et au refroidissement rapide du joint soudé.

b. Zone affectée thermiquement (ZAT)

La zone affectée par la chaleur ou thermiquement, ZAC ou ZAT (appelée aussi, en anglais « Heat Affected Zone »), est la partie du métal de base qui n'a pas été fondue, mais dont les propriétés mécaniques ou la microstructure ont été modifiées à un degré quelconque par la chaleur de soudage [23]. Dans cette zone affectée par la chaleur, il apparaît de très forts gradients de température qui évoluent rapidement dans le temps. On peut distinguer :

- **Zone de surchauffe**

C'est la partie de la ZAT la plus proche de la zone fondue, elle est appelée ZAT surchauffée ou ZAT de haute température, la température dans cette zone a dépassé 1100 °C environ et le métal a subi plus ou moins partiellement la transformation **austénite ferrite (δ)** (La quantité de ferrite (δ) restant néanmoins toujours faible). La rapidité du refroidissement peut impliquer l'existence d'une certaine proportion de ferrite (δ). Cette zone devrait subir un grossissement exagéré des grains ce qui provoque une dégradation des propriétés mécaniques et ceci en fonction de la température et du temps de surchauffe. Mais il faut noter que l'existence d'une structure biphasée à haute température limite très sensiblement le grossissement des grains [22, 24].

- **Une partie voisine de la zone de surchauffe**

Dont la température atteinte au cours du cycle se situe entre 1100 °C et 850 °C environ. Dans cette zone, le métal a subi un nouveau traitement d'hypertrempe et subsiste donc dans un état austénitique comparable à celui du métal de base.

- **Une partie enfin dont la température maximale**

A été comprise entre 500 et 850 °C environ et dans laquelle les carbures de chrome ont pu précipiter aux joints des grains d'austénite.

Les transformations microstructurales dans la ZAT sont contrôlées par les procédures de soudages et les compositions chimiques des alliages. Pour une composition donnée, la microstructure de la ZAT est contrôlée en imposant des cycles thermiques, des épaisseurs définies, et des températures d'interpasses et de préchauffage.

Dans la ZAT surchauffée, pour certaines vitesses de refroidissement (ou de soudage), des réactions peuvent se produire telle que la formation des nitrures dans le cas où la formation de l'austénite est incomplète.

Plus la vitesse de refroidissement sera lente, plus la transformation de la ferrite en austénite aura le temps de se réaliser. Pour des vitesses lentes, le risque de précipitation des carbures apparaîtra ; les principaux facteurs qui contrôlent la précipitation sont [25] :

- ✓ La composition chimique de l'alliage.
- ✓ Les conditions de préchauffage.
- ✓ Le temps de maintien aux hautes températures, et le cycle thermique total.

c. Métal de base (MB)

C'est le métal des pièces à assembler, ou la partie qui n'a pas été affecté par la chaleur de soudage. Les figures 2.15 et 2.16 représentent les différentes zones d'un cordon de soudure et la variation de dureté dans un joint soudé respectivement [26].

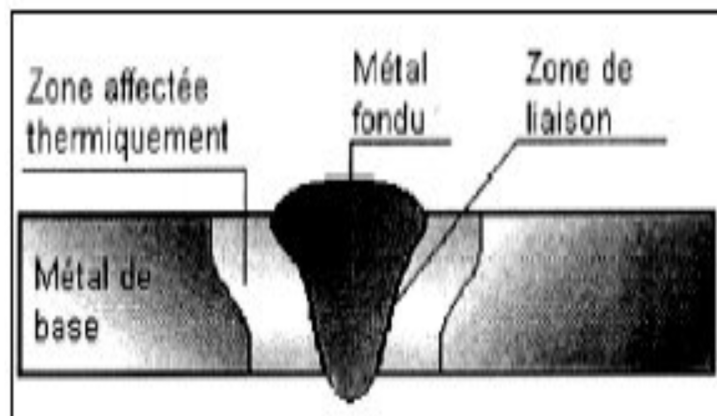


Figure 2.15. Cordon de soudure.

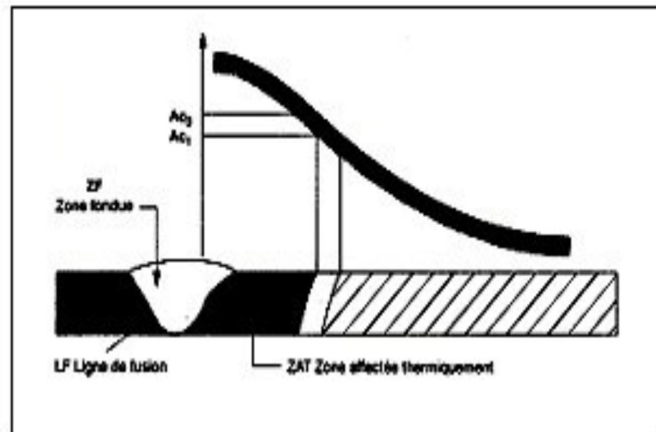


Figure 2.16. Variation de la dureté dans un joint soudé

6. Les défauts des soudages

6.1. Les fissures

Les fissures sont définies comme des discontinuités de type fracture caractérisées par une extrémité en pointe et à haut rapport de longueur /largeur. Elles peuvent se produire dans le Métal fondu, la zone affectée thermiquement, et le métal de base lorsque des contraintes localisées dépassent la résistance maximum du matériau. la fissuration est souvent initiée par des concentrations de contraintes causées par d'autres discontinuités mécaniques ou à proximité d'entailles associées à la configuration du joint. Les contraintes qui provoquent la fissuration peuvent être soit résiduelles ou appliquées. Les contraintes résiduelles se développent en raison de restrictions issues de l'opération de soudage et de la contraction thermique qui suit la solidification de la soudure. Les fissures liées au soudage présentent peu de déformation plastique...Si une fissure est décelée durant le soudage, celle-ci doit être complètement éliminée avant de poursuivre le soudage. Le soudage sur une fissure supprime rarement la fissure. [24]

6.1.1. Fissure à chaud (ou de solidification)

C'est une fissure localisée normalement au centre de la coupe transversale d'une soudure (soit soudure d'angle, soit soudure bout à bout), qui peut déboucher en surface et se propager dans le

sens longitudinal. Elle se forme lors de la solidification du métal déposé à température élevée (Figure 2.17).

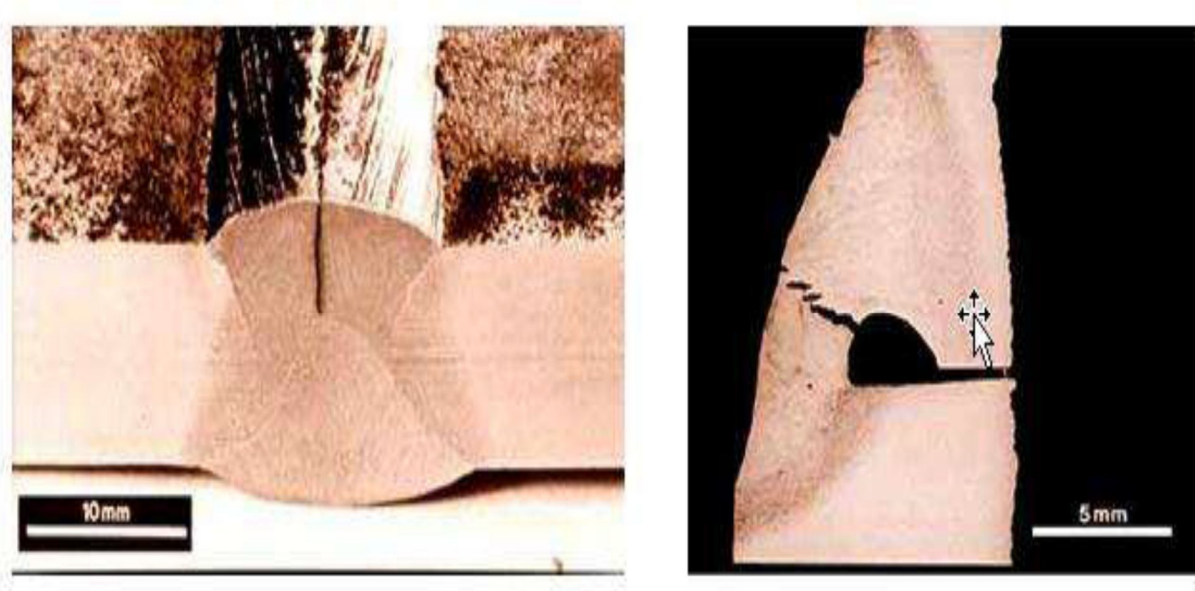


Figure 2.17. Fissure à chaud (ou de solidification). [24]

a. Causes possibles

Retrait transversal exagéré, sur tout pour des cordons avec un rapport profondeur/ largeur supérieur à deux (rapport classique pour des procédés avec grande densité de courant tels que le soudage sous flux et le soudage MAG).

- Une teneur en carbone, phosphore ou soufre du métal de base trop élevée peut provoquer une fissure inter-dendritique par suite de la dilution entre MB et MD, des impuretés viennent se loger à l'endroit où la solidification se produit en dernier lieu, et où de plus les dendrites provenant de cette solidification se rejoignent avec une orientation différente (Figure 2.18). Notons que l'importance de la migration des impuretés augmente avec la température. C'est un effet défavorable de la préchauffe.
- Ecartement trop important entre les parties à assembler dans le cas de soudures d'angle.

- Soudures d'angle avec concavité importante : celles-ci ont parfois une résistance insuffisante pour encaisser des contraintes de retrait normales.
- Transformations allotropiques : on appelle ainsi les modifications de structure cristalline qui se produisent lors du chauffage et du refroidissement de l'acier ; étant donné que ces transformations s'accompagnent de changements de volume et de solubilité en certains éléments, elles induisent des tensions internes et l'apparition d'éventuels constituants fragiles.

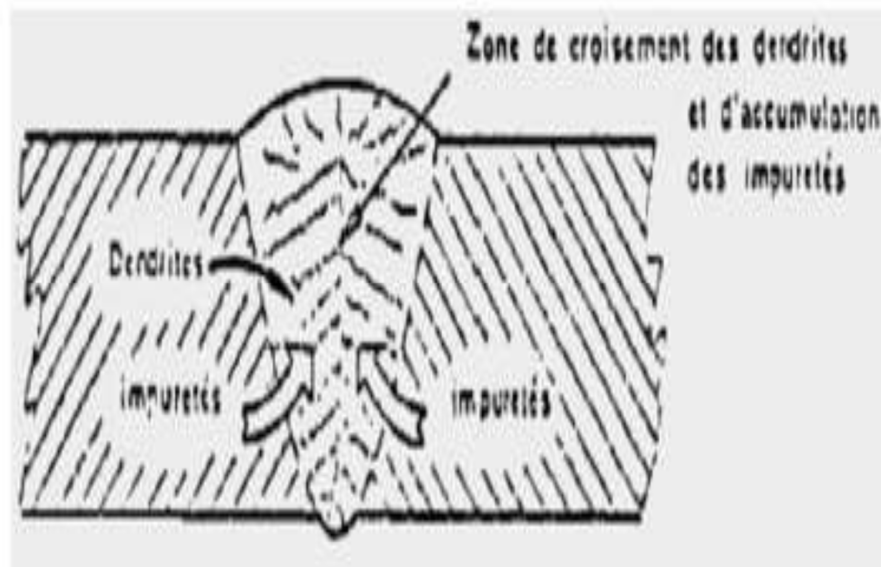


Figure 2.18. Evolution d'un joint soudé en une seule passe en cours de refroidissement. [25]

b. Méthodes de détection

- Pour des fissures débouchant en surface : examen visuel, magnétique, ressuage
- Pour fissures internes : examen par ultrasons ou radiographie.

c. Méthode de réparation

Eliminer la partie défectueuse de la soudure 5 mm au-delà de l'extrémité visible de la fissure et réparer par soudage.

d. Mesures préventives

- Adapter les paramètres de soudage afin de s'approcher d'un rapport profondeur-largeur 1/1.
- Teneur en P et S dans le métal de base à limiter à 0.05 % pour les deux éléments.
- Limiter l'écartement des assemblages.
- Adapter le régime thermique afin d'éviter un retrait transversal important. [25]

6.1.2. Fissures à froid (fissures d'hydrogène)

Ce sont des fissures qui apparaissent à la suite de contraintes dans le métal aux alentours de la température ambiante. Ces fissures sont toujours localisées dans des zones de transition avec structure de trempe et peuvent déboucher dans la soudure même. La diffusion d'hydrogène est toujours un facteur contribuant. Ces fissures n'apparaissent parfois que plusieurs heures après les Travaux de soudage (Figure 2.19)

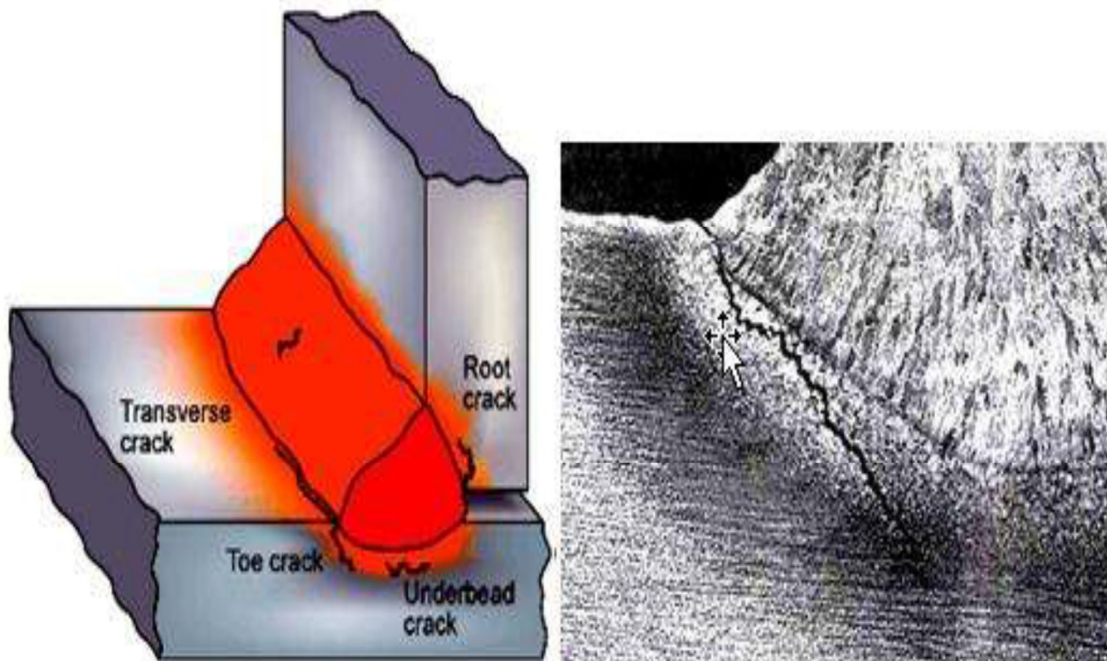


Figure 2.19. Fissure à froid (fissure d'hydrogène). [25]

a. Causes possibles

La diffusion de l'hydrogène du métal de base vers la zone affectée thermiquement qui a une structure de trempe et qui est donc fissurant.

Ces porosités d'hydrogène ont une pression élevée et peuvent donc être à la base d'une fissure. L'hydrogène peut venir de l'humidité dans ou sur les produits de soudage ou d'autres produits contaminants tels que la peinture, l'huile ou des oxydes.

La probabilité de fissuration se voit en plus augmentée avec la hausse du carbone équivalent et de l'épaisseur.

De grands écartements, un régime thermique faible ou manque de préchauffe peuvent également être des éléments.

b. Méthodes de détection

- Pour des fissures débouchant en surface : examen visuel, magnétique, ressuage
- Pour fissures internes : examen par ultrasons ou radiographie.

c. Méthode de réparation

Éliminer la partie défectueuse de la soudure 5 mm au-delà de l'extrémité visible de la fissure et réparer par soudage. Chaque réparation doit être exécutée ici par un préchauffage correct et doit être exécutée avec l'apport calorifique correct lors du soudage, afin d'éviter une nouvelle fissuration.

d. Mesures préventives

- Utiliser des produits de soudage à basse teneur d'hydrogène. Suffisamment sécher les Électrodes avant soudage surtout celles avec enrobage basique.
- S'il y a préchauffage, chauffer l'entièreté de la section à la température voulue.
- Suivre consciencieusement la procédure qualifiée pour des aciers à caractère trempant dans la zone affectée thermiquement. [21]

1. Introduction

L'essai de traction constitue un des essais les plus utilisés pour la caractérisation mécanique des matériaux. Etant purement uniaxial du moins tant qu'il n'y a pas de striction (diminution catastrophique de la section de l'éprouvette au centre de celle-ci), il permet de s'affranchir des méthodes de calcul inverse pour aboutir directement à une loi de comportement uniaxiale.

Il permet de déterminer de nombreuses grandeurs normalisées, comme la contrainte à rupture, la contrainte maximale, la limites d'élasticité, etc. nécessaires dans les calculs de structure. Nous donnons ici tout d'abord la description générale d'une machine de traction, puis des éléments concernant les éprouvettes, les mesures de déformation et de charge appliquée.

2. La machine de traction

Une machine de traction est constituée d'un bâti portant une traverse mobile. L'éprouvette de traction, vissée ou enserrée entre des morts, selon sa géométrie, est amarrée à sa partie inférieure à la base de la machine et à sa partie supérieure à la traverse mobile (dans le cas d'une machine mécanique) ou au vérin de traction (dans le cas d'une machine hydraulique). Le déplacement de la traverse vers le haut réalise la traction. Une machine de traction comporte une cellule de charge, qui permet de mesurer l'effort appliqué à l'éprouvette et le déplacement de l'éprouvette peut être suivi de diverses façons. Les dispositifs expérimentaux sont généralement asservis et peuvent être pilotés à vitesse de montée en charge, à charge constante, à vitesse de déformation constante, etc. selon ce qui peut être proposé par le système de pilotage. (figure 3.1.)

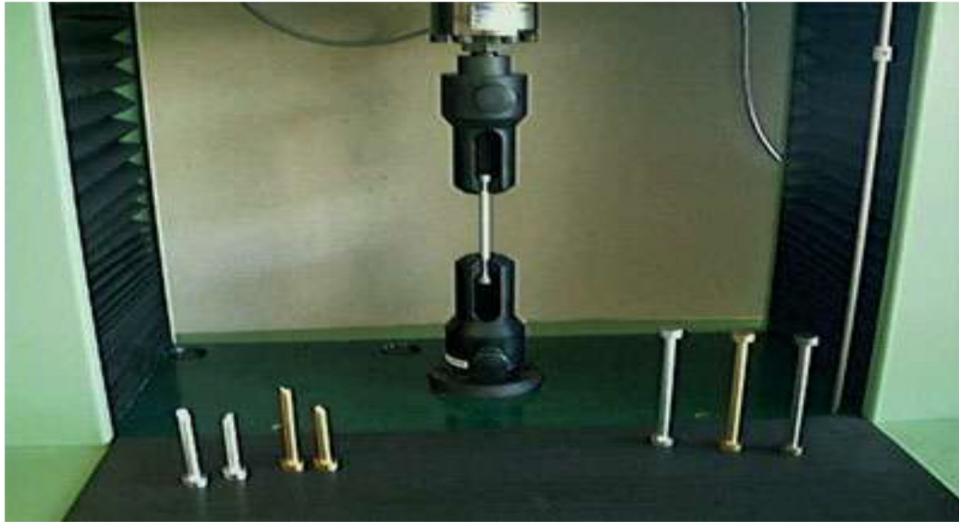


Figure 3.1. La machine de traction

3. Les éprouvettes

Les éprouvettes de traction adoptent deux géométries : cylindrique ou plate. La section doit être constante sur une longueur suffisante pour obtenir un état de contrainte homogène pendant l'essai. Aux deux extrémités sont usinées des têtes d'amarrage avec des rayons de courbures suffisamment grands pour éviter des concentrations de contrainte excessives. Dans le cas des éprouvettes plates, le centrage de l'éprouvette peut devenir problématique si des trous calibrés ne sont pas percés dans les têtes. (figure 3.2)

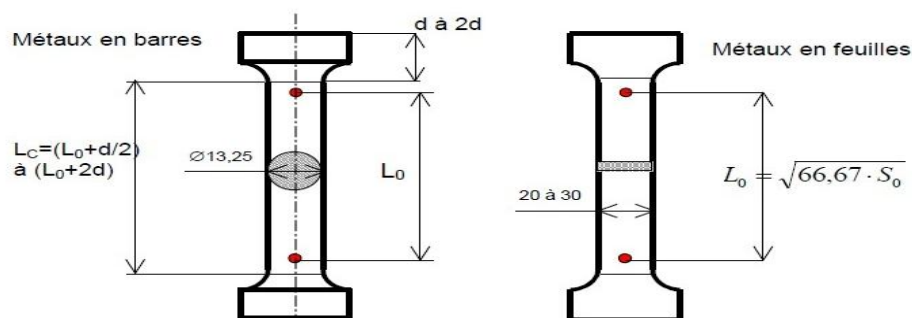


Figure 3.2. Epreuve de traction normalisée

On note : S_0 : section initiale en mm²

S_u : section minimale après rupture

L_0 : longueur initiale entre repères

L_u : Longueur ultime après rupture

L_c : longueur de la partie calibrée

a. Sens de prélèvement de l'éprouvette

Tous les paramètres qui sont déduits de l'essai de traction traduisent les propriétés de l'acier dans la direction de l'essai. Ces valeurs dépendent donc de la direction de prélèvement de l'éprouvette par rapport à d'éventuelles directions d'anisotropie (par exemple en carrosserie, la direction de laminage de la tôle mince).

Pour les tôles laminées, la direction de prélèvement doit donc toujours être précisée : (figure 3.3)

- sens long SL (repéré par l'indice 0°)
- sens travers ST (repéré par l'indice 90°)
- sens "oblique" (repéré par l'indice 45°).

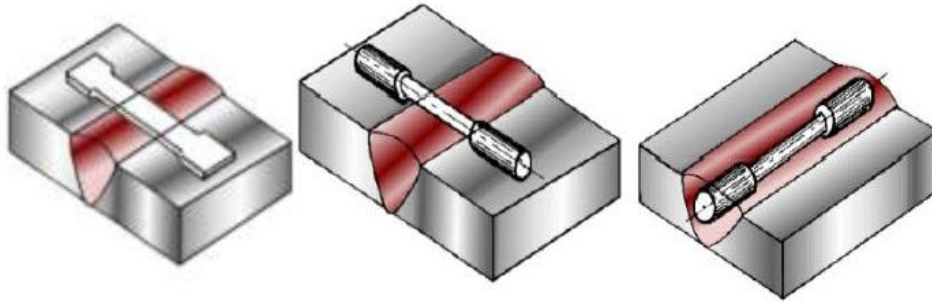


Figure 3.3. Evaluation des caractéristiques d'un cordon de soudure

b. Dimension des éprouvettes

La dimension des éprouvettes de traction diffère selon l'épaisseur du produit testé :

- ép. < 3 mm : largeur 20mm et longueur 80 mm
- ép. > 3 mm : largeur 30mm et longueur $5,65 \cdot S_0$, avec $S_0 = \text{largeur} \times \text{épaisseur}$

La dimension des éprouvettes varie aussi selon les pays : Japon (norme JIS), USA (norme ASTM)

Ces variations de taille d'éprouvettes se traduisent par des valeurs de caractéristiques mécaniques non comparables, mais qui peuvent cependant être converties d'une norme à l'autre sur la base de corrélations largement vérifiées.

4. Principe de l'essai de traction

L'essai de traction détermine l'aptitude d'un matériau à se déformer, soumis à un effort variable. Ce type d'essai est nécessaire pour prévoir le comportement du matériau dans des conditions réelles d'utilisation.

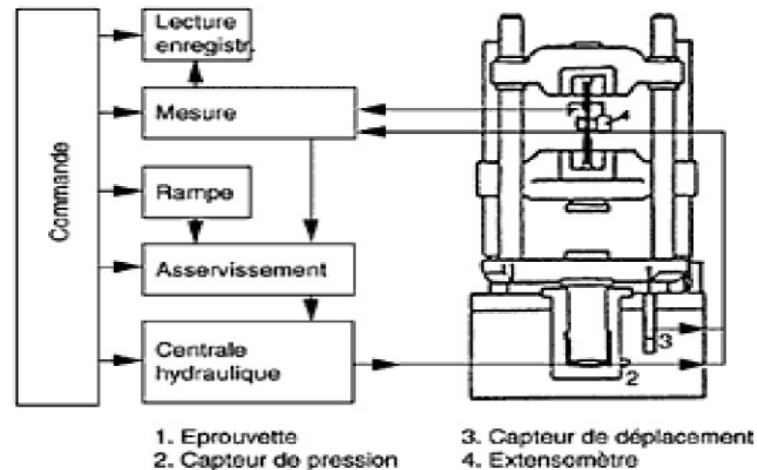


Figure 3.4. Principe de l'essai de traction

L'essai de traction consiste à appliquer sur une éprouvette normalisée du matériau d'étude un effort F et à mesurer l'allongement correspondant ΔL , ou inversement d'imposer l'allongement ΔL et à mesurer l'effort F .

ΔL et F sont des grandeurs physiques liées à la structure ici à l'éprouvette.

Afin de les interpréter et ainsi de caractériser le matériau, on introduit des variables relatives au matériau : la contrainte σ et la déformation ε .

La contrainte σ associée à la force F est définie par :

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (3.1)$$

Avec S la section de l'éprouvette.

Cette σ grandeur est à distinguer de la contrainte nominale (ou conventionnelle) σ_n liée à la structure.

La contrainte nominale est le rapport entre la force F et la surface initiale de l'échantillon S_0 :

$$\sigma_n = \frac{F}{S_0} \quad (3.2)$$

La déformation dite déformation vraie, est égale au cumul des déformations élémentaires

$$\varepsilon = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) \quad (3.3)$$

Cette grandeur ε est à distinguer de la déformation nominale ε_n liée à la structure.

La déformation nominale (ou allongement relatif) est le rapport entre l'allongement Δl et la longueur initiale l_0 :

$$\varepsilon_n = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (3.4)$$

l_0 désigne la longueur initiale de l'éprouvette (il s'agit de la longueur entre congés raccordant le corps de l'éprouvette à ses têtes).

On peut aussi bien considérer une longueur de base repérée initialement sur le corps de cette éprouvette.

l_0 est également appelée longueur utile de l'éprouvette, longueur mesurée par l'extensomètre.

Les relations permettant de passer des grandeurs vraies aux grandeurs nominales s'écrivent telle que, l'hypothèse d'une déformation sans variation de volume :

$$\sigma = \sigma_n(1+\varepsilon_n) \quad (3.5)$$

$$\varepsilon = \ln(1+\varepsilon_n) \quad (3.6)$$

A partir de ces deux grandeurs mécaniques et nous allons pouvoir d'écrire le comportement du matériau. On obtient la courbe de traction caractéristique du matériau en portant sur le diagramme la contrainte vraie et la déformation vraie.

5. Exploitations de l'essai

5.1. Interprétation qualitative

Sur un diagramme effort-déformation (figure 3.5), on observe les phases successives suivantes :

- **Zone OA** : domaine des **déformations élastiques ou réversibles** (zone parfois linéaire) si l'on cesse la charge, l'éprouvette retrouve ses dimensions initiales
- **Zone AB** : la déformation n'est plus complètement réversible. La déformation est plastique (ou permanente) homogène ; appelée aussi déformation plastique répartie. Les allongements croissent plus vite que les charges. L'allongement a lieu avec une diminution régulière de la section tout au long de l'éprouvette.
- **Zone BC** : la déformation plastique se localise dans une petite portion de l'éprouvette et n'est plus homogène, c'est la striction on aboutit à la rupture en C. les allongements croissent avec une diminution de la charge.

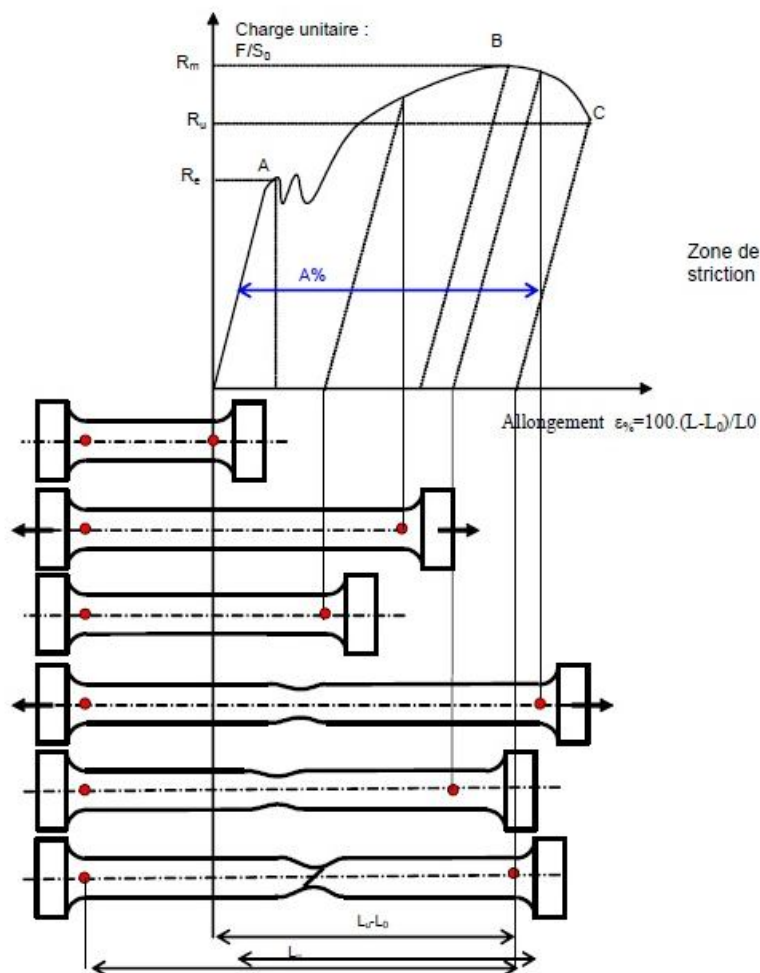


Figure 3.5. Diagramme charge-allongement

5.2. Définitions

Sur le diagramme charge-allongement, qui peut être enregistré ou tracé par points, on utilise les coordonnées suivantes :

- En abscisse, l'allongement relatif $\frac{\Delta l}{l_0}$ de l'éprouvette ou plutôt d'une certaine base de mesure l_0 (l_0 est la longueur initiale de l'éprouvette) ;

$$\varepsilon\% = 100 * \frac{l-l_0}{l_0} \quad (3.7)$$

- En ordonnée : la charge unitaire, définie à tout instant de l'essai, c'est le quotient de la charge par la section initiale de l'éprouvette S_0

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad (3.8)$$

Le point A est la limite d'élasticité (ou résistance élastique à la traction) :

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} \quad (3.9)$$

Le point B correspond à la charge maximale il est appelé résistance à la traction ou résistance à la rupture (bien qu'il n'y ait pas encore rupture) ;

$$R_m = \frac{F_r}{S_0} \quad (3.10)$$

C'est la charge maximale atteinte durant l'essai de traction à partir de ce point, la déformation commence à se localiser sous forme de striction, ce qui explique la décroissance de l'effort nécessaire aux déformations au-delà du point B.

Un processus de mise en forme qui conduirait à franchir ce point se traduirait par des risques difficiles à contrôler de rupture ou de non-conformité géométrique.

Le point C correspondant, lui, à la charge ultime.

Après rupture de l'éprouvette et reconstitution de celle-ci, on mesure L_U et S_U respectivement longueur entre repères et section minimale ultimes.

L'allongement relatif total ou A pour cent de l'éprouvette est l'allongement de rupture :

$$A\% = 100 \frac{L_u - L_0}{L_0} \quad (3.11)$$

Où L_u est la longueur de l'éprouvette après rupture. Il caractérise la ductilité du matériau.

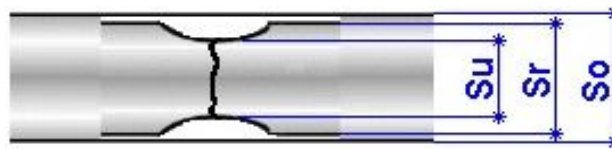
Cet allongement est la somme de l'allongement réparti A_r jusqu'au maximum de la charge et de l'allongement localisé de striction A_z :

$$A = A_r + A_z \quad (3.12)$$

La striction est la réduction de section maximale de l'éprouvette rompue c'est-à-dire dans la section de rupture (Figure 3.6). Le coefficient de striction traduit l'aptitude à la déformation à froid.

$$Z\% = 100 \frac{S_0 - S_N}{S_0} \quad (3.13)$$

Avec S_0 : section initiale et S_u : section après rupture.



S_0 : Dimension éprouvette initiale
 S_r : Dimension éprouvette après rupture
 S_u : Dimension de la striction après rupture

Figure 3.6. Dimension d'éprouvette

5.3. Le Processus thermomécaniques

L'acier possède une structure granulaire. Elle influence le comportement mécanique des aciers à deux niveaux :

- A l'échelle microscopique, par les irrégularités d'alignement (les dislocations) et les éléments d'alliage en insertion ou en substitution que comporte chaque grain, qui est lui-même un monocristal de fer.
- A une échelle plus macroscopique, par la forme des grains (allongés ou bien massifs) ainsi que par leur taille. Pour une composition chimique donnée, ces caractéristiques de l'acier sont en relation avec les cycles thermomécaniques subis tout au long de la filière de fabrication :
 - ❖ Le laminage à chaud
 - ❖ Le laminage à froid
 - ❖ Le recuit.
 - ❖ Le skin-pass.

Les températures de laminage, les vitesses de refroidissement, les températures de bobinage (pour les feuilles), les taux de réduction d'épaisseur au laminoir à froid, les cycles de recuit, les taux de skin-pass sont autant de paramètres permettant d'ajuster la structure cristalline et granulaire de l'acier et donc les propriétés finales du produit.

5.4. Influence de la température

Les limites élastiques et de rupture dépendent de la température. Cette propriété est utilisée pour la mise en forme par déformation plastique à chaud (forgeage).

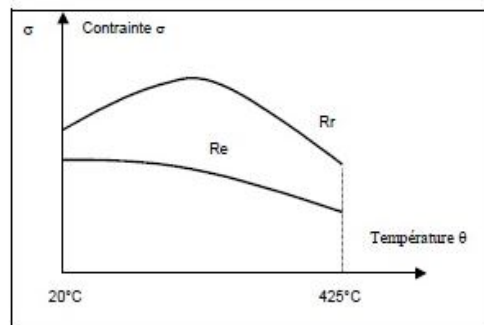


Figure 3.7. Influence de la température sur les limites élastiques et de rupture

Remarque : en métrologie, on tient compte du fait qu'un acier admet une dilatation de $1\mu\text{/}^\circ\text{C}/10\text{mm}$ environ.

6. Constantes d'élasticité

6.1. Définitions

Dans la première portion de la courbe, il y a proportionnalité entre charge unitaire et déformation, au moins en première approximation : c'est la loi de Hooke.

La caractéristique d'élasticité est la pente de cette droite qui est le module d'élasticité E (Coefficient d'élasticité longitudinal ou module d'Young) ; il exprime le rapport entre la charge unitaire appliquée et la déformation longitudinale de l'éprouvette.

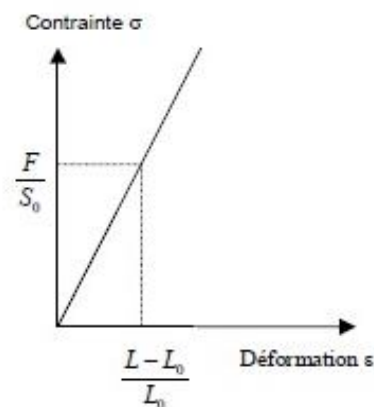


Figure 3.8. Module d'Young

Bien que l'essai de traction permette difficilement de les mesurer, il est intéressant de rappeler les définitions des constantes élastiques et leurs relations.

Lorsqu'on trace la courbe de σ en fonction de ϵ dans la zone élastique, la pente de la courbe est donnée par $\tan\theta$.

$$E = \frac{F \cdot v}{S_0 \cdot \Delta L} \quad (3.14)$$

Remarque : L'essai de traction n'est pas assez précis en général pour la mesure du module d'élasticité, car même si l'on amplifie suffisamment, et les techniques électroniques le permettent, de petites déformations parasites diminuent la valeur de la pente en plus des écarts à la loi de proportionnalité.

Ces écarts sont attribués à des microdéformations plastiques pour les aciers doux et à des contraintes résiduelles pour certains aciers traités qui conduisent à une plastification progressive de l'éprouvette.

ν : le coefficient de Poisson,

G : le module d'élasticité transversal ou de cisaillement.

L_e : coefficient de Poisson exprime le rapport entre la déformation longitudinale de l'éprouvette et la déformation transversale. Pour les Aciers on a environ : $\nu = 0,3$.

Le module de cisaillement G exprime le rapport entre le couple et la déformation par cisaillement, par exemple dans un essai de torsion.

Ces trois grandeurs sont liées par la relation suivante

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (3.15)$$

6.2. Quelques valeurs usuelles de E :

Tungstène -----	420 000 MPa
Aciers -----	200 000 à 220 000 MPa
Aciers inox -----	198 000MPa
Fontes graphite sphéroïdal -----	160 000 à 190 000MPa
Cuivre -----	126 000 MPa

Fontes graphite lamellaire -----	120 000 MPa
Laitons -----	105 000 MPa
Alliages d'aluminium -----	70 000 à 75 000 MPa
Plomb -----	17 000 MPa

7. Limite d'élasticité

7.1. Cas général

Le diagramme de l'essai de traction peut présenter différentes formes de courbes

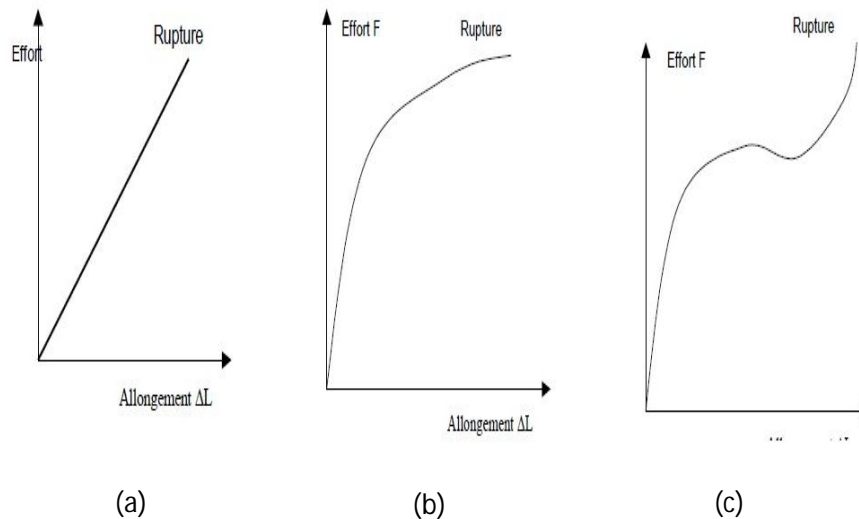


Figure 3.9. Diagramme de l'essai de traction (a ; b ; c)

Figure 3.9.a : La rupture intervient très rapidement à l'issue de la période élastique.

La période plastique est inexistante. C'est le cas de tous les **matériaux fragiles** tels que le verre, les céramiques, les bétons, les pierres à bâtir, les polymères thermodurcissables, la fonte grise et les aciers bruts de trempe (avant revenu).

Figure 3.9.b : Le passage de la période élastique à la période plastique est progressif. La striction est pratiquement inexistante en fin d'essai. C'est le cas des aciers peu ductiles (aciers alliés et à fort pourcentage de carbone).

Figure 3.9.c : Les périodes élastique et plastique sont très distinctes. La striction est importante. C'est le cas des aciers ductiles (aciers doux et à faible pourcentage de carbone).

L'élasticité n'est pas linéaire et le comportement sous contrainte dépend du temps. C'est le cas des élastomères et de certaines matières plastiques.

7.2. Cas des aciers

Pour les aciers, on est conduit à distinguer 2 types principaux de courbes de traction suivant la présence ou non d'un crochet à la limite d'élasticité.

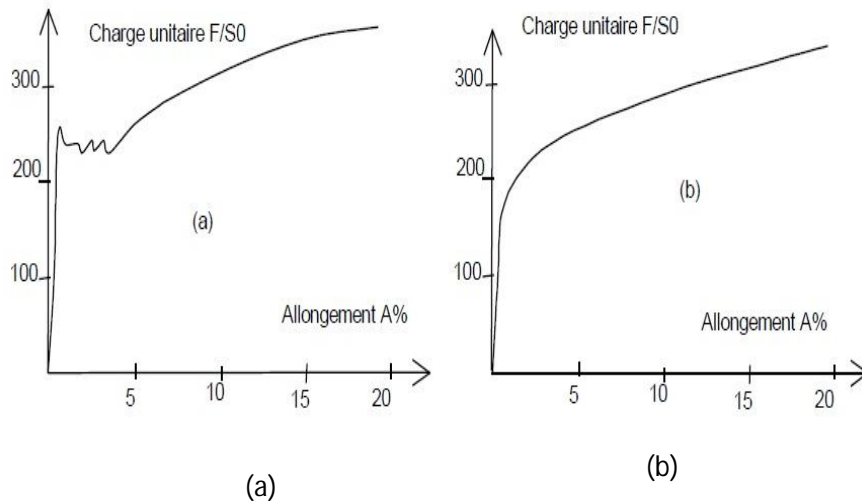


Figure 3.10. Courbes de traction des aciers

La courbe (a) correspond à des aciers ferriques en général, mais peut se présenter avec moins de netteté pour des aciers plus durs traités, parfois même alliés.

Ce type de courbes amène à la définition des grandeurs :

- La limite d'élasticité R_{eH} en MPa
- La limite d'élasticité inférieure R_{eL} en MPa
- La longueur du palier A_P en %

La courbe (b), avec un passage progressif, correspond aux aciers durs ou aux aciers austénitiques.

Quand la limite est marquée par un palier de charge, la mesure ne semble pas poser trop de problèmes, alors que le passage progressif nécessite la définition de limites conventionnelles.

Lors des essais courants, on n'observe pas toujours de limite supérieure car, comme nous le verrons par la suite, elle est très sensible aux conditions d'essai et à la qualité de l'éprouvette.

La limite inférieure est moins sensible aux défauts géométriques de l'éprouvette, mais le palier est rarement horizontal (irrégularités de propagation des bandes de Piobert-Lüders).

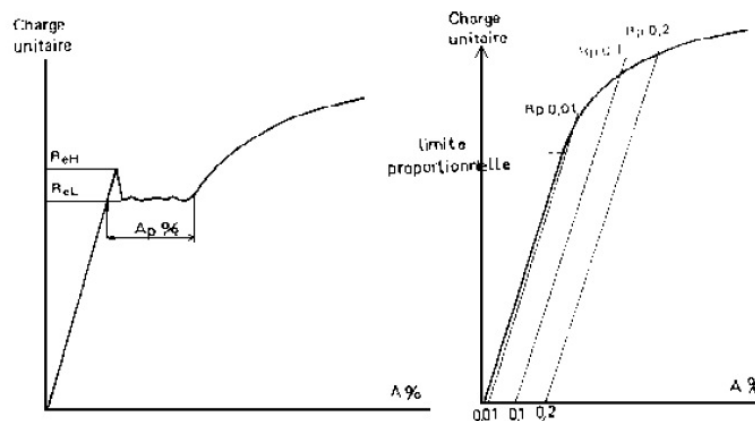


Figure 3.11. Courbes de traction des aciers avec palier de charge

7.3. Limites conventionnelles

Comme le montre la figure ci-dessus (figure 3.12), il y a passage progressif de l'élasticité linéaire à la déformation plastique. La limite d'élasticité pourrait être prise égale à la limite de proportionnalité, mais au fur et à mesure que l'on amplifie l'enregistrement de l'allongement pour mieux voir cette limite, on met en évidence le manque de linéarité de la montée élastique pour des raisons d'imperfections d'éprouvette et de non obéissance rigoureuse à la loi de HOOKE.

Il est donc préférable de définir des limites conventionnelles où l'on apprécie un allongement permanent faible mais mesurable avec précision, comme 0,2 % par exemple.

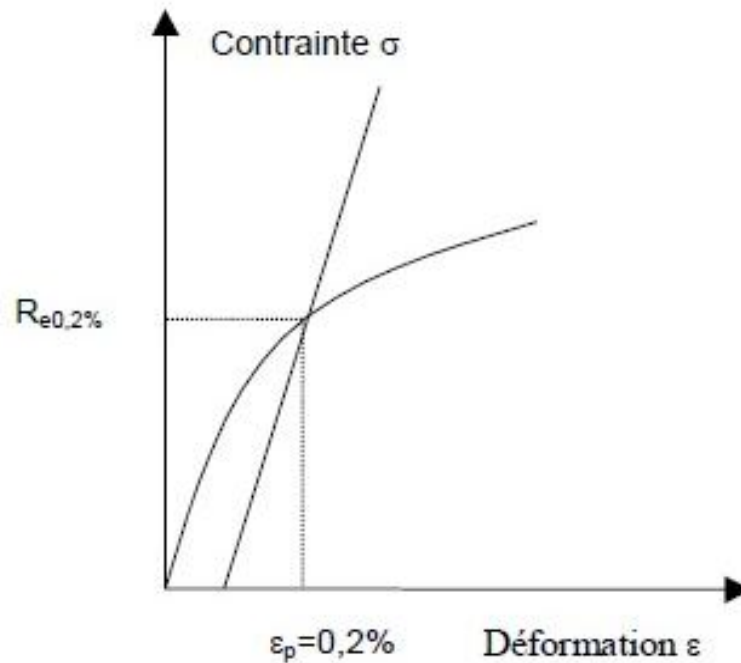


Figure 3.12. Courbes de limites conventionnelles

La limite élastique, notée $R_{e0,2\%}$ correspond au point où le comportement cesse d'être élastique pour devenir plastique.

Pour certains matériaux, le passage d'une zone à l'autre pouvant être progressif (figure ci-contre), il est nécessaire de définir un critère permettant de fixer tout de même une valeur de R_e .

Ainsi on choisit souvent $R_{e0,2\%}$ qui correspond après décharge à un allongement plastique (ou rémanent) de 0,2%.

On définit des limites conventionnelles à 0,2% - 0,1% - 0,02% ou 0,01%

L'emploi le plus répandu de $R_{0,2}$ ($R_{p0,2\%}$) est lié aux méthodes de mesure, puisqu'autrefois on soumettait l'éprouvette à des charges croissantes avec démontage et mesure de l'allongement rémanent ; il fallait donc que l'on puisse apprécier l'allongement rémanent avec une certaine précision dépendant des moyens métrologiques.

L'apparition des extensomètres mécaniques, puis des extensomètres électroniques à amplification forte, a amené à considérer de plus en plus l'allongement mesuré sur diagramme au détriment de l'allongement rémanent.

La limite conventionnelle s'obtient alors en traçant par la valeur d'allongement choisie une parallèle à la montée élastique ; la précision obtenue permet le cas échéant de prendre des valeurs plus petites que 0,2 %.

Cette dernière est la plus fréquemment employée car elle est utilisable avec tous les types d'extensomètres.

On admet généralement que la limite d'élasticité proportionnelle est voisine de R_p 0,01 % mais ce n'est qu'une approximation.

8. Courbe rationnelle de traction

8.1. Contrainte vraie

Comme le montre la définition, la charge de rupture est une grandeur conventionnelle puisque l'on rapporte la charge maximale à la section initiale.

La contrainte vraie correspond à la charge rapportée à la section instantanée, soit :

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (3.16)$$

F charge appliquée, S section instantanée.

8.2. Déformation rationnelle

L'allongement ordinaire n'est pas additif, ce qui est gênant pour les calculs de plasticité ; on le remplace par la déformation rationnelle

$$\varepsilon^* = \ln \frac{L}{L_0} \quad (3.17)$$

La déformation rationnelle s'introduit de la façon suivante.

Soit L la longueur entre repères de l'éprouvette à un instant donné si on l'allonge d'une quantité ΔL , l'allongement relatif sera $\frac{\Delta L}{L}$ et, depuis le début de l'essai, l'allongement relatif total sera égal à :

$$\boldsymbol{\varepsilon}^* = \sum_{L_0}^L \frac{\Delta L}{L} \quad (3.18)$$

Ou en considérant des allongements infiniment petits dL

$$\boldsymbol{\varepsilon}^* = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \ln \frac{L}{L_0} \quad (3.19)$$

On peut aussi écrire

$$\boldsymbol{\varepsilon}^* = \ln \frac{S}{S_0} = \ln \frac{L}{L_0} \quad (3.20)$$

Si l'on admet la constance du volume de la partie calibrée $S_0.L_0 = S.L$

De plus,

$$\boldsymbol{\sigma}^* = \frac{F}{S} = \frac{F}{S_0} \left(\frac{S_0}{S} \right) = \frac{F}{S_0} \left(\frac{L}{L_0} \right) = \frac{F}{S_0} \left(\frac{L_0 + \Delta L}{L_0} \right) \quad (3.21)$$

D'où : $\boldsymbol{\sigma}^* = \boldsymbol{\sigma}(1 + \boldsymbol{\varepsilon})$

Cela n'est évidemment valable que dans la zone des allongements répartis et à condition que l'homogénéité de la déformation de la partie calibrée sur la base de mesure soit acceptable.

Cette déformation rationnelle diffère peu de l'allongement ordinaire :

$$A\% = 100 \frac{L - L_0}{L_0}$$

Pour les faibles valeurs si on l'exprime en % ; on a la relation

$$\boldsymbol{\varepsilon}^* = \ln \left(1 + \frac{A\%}{100} \right) \quad (3.22)$$

La différence ne dépasse pas 2 % pour une déformation de 20 %, mais l'écart grossit pour les déformations importantes.

Dans ce chapitre nous présenterons les techniques expérimentales d'analyse des déformations en expliquant le mode opératoire propre à chacune d'elles. Nous nous intéresserons en particulier à la méthode de corrélation d'images numériques.

4 : Méthodes d'analyses des déformations

Pour utiliser les matériaux métalliques d'une façon plus fiable, il est important de déterminer leurs conditions de déformation et de rupture. Pour cela plusieurs méthodes ont été développées.

Dans ce qui suit, nous présenterons les méthodes d'analyse et techniques expérimentales développées pour caractériser le comportement mécanique des matériaux.

Ces techniques sont classées en méthodes mécaniques, méthodes optiques directes et méthodes optiques indirectes.

4.1 : L'extensomètre

Le but de l'extensomètre est de mesurer un déplacement, en général des allongements longitudinaux et transversaux d'une région de l'éprouvette, et de permettre l'enregistrement de cette mesure, ce qui revient, en général, à traduire une déformation en signal électrique ou optique [22].

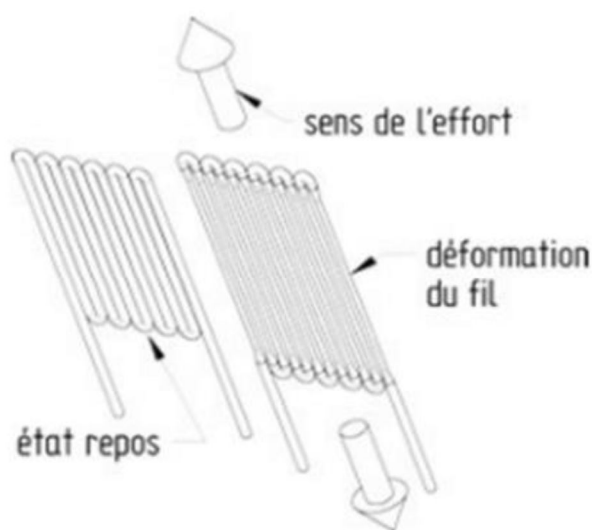
4.1.1 : Jauge de déformation

Les premiers types d'extensomètres avec contact sont des dispositifs traduisant leur propre déformation en variation de résistance. Le principe est de coller une jauge (fil conducteur très fin) sur l'éprouvette à déformer (figure II.1), de telle sorte que le fil résistant puisse subir la même déformation que le matériau. Le fil est distribué parallèlement à une direction donnée, le nombre de brins de la grille varie entre 10 et 20 pour un conducteur métallique. Ces méthodes permettent typiquement de mesurer des déformations de $\pm 1\mu\text{m}/\text{m}$.

La figure II.1-a représente le schéma de fonctionnement de ces dispositifs. La relation qui lie déformation de l'extensomètre et résistance est donnée par l'expression [22] :

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{1}{k} * \frac{\Delta R}{R} \quad (4..)$$

Où R est la résistance électrique et K le facteur de jauge, qui dépend très fortement du coefficient de Poisson ($K=C(1-2\nu) + 1+2\nu$), où C dépend du matériau.



(a)



(b)

Figure 4.1. : (a) jauge collée sur l'éprouvette. (b) schéma du fonctionnement d'une jauge de déformation [23].

4.1.1.2 : Avantages

Un des avantages majeurs de cette technique est sa simplicité de mise en œuvre. En effet c'est une technique qui est utilisée depuis de nombreuses années et qui est bien maîtrisée [28,27].

4.1.1.3 : Inconvénient :

On ne peut pas utiliser cette technique avec des éléments chauds car les propriétés des jauges s'en trouveraient modifiées. De plus cette technique provoque l'ajout de nouvelles contraintes sur le matériau pas toujours facilement quantifiables. De plus cette technique ne permet pas de réaliser des études sur des essais en grandes déformations.

4.1.2 : Extensomètre à pinces

Le deuxième type d'extensomètres avec contact sont les extensomètres à pinces (figure I.2). Il en existe deux types.

Les extensomètres à LVDT (Linear variable différentiel transformer) ont un corps constitué d'un noyau central relié à l'éprouvette par des pinces qui l'enserrent légèrement, et il coulisse librement, autour duquel s'enroulent trois bobines. Une de ces bobines (primaire) est alimentée en courant et lorsque le noyau coulisse, cela induit du courant dans les bobines secondaires dont les variations sont proportionnelles au déplacement du noyau.

Le courant augmente dans l'une des bobines et diminue dans l'autre, ce qui permet de mesurer la position du noyau. Son déplacement autour de la position d'équilibre du pont génère deux tensions représentatives de l'amplitude du déplacement et de son sens. La valeur de ce déplacement est obtenue par comparaison des valeurs maximales de chaque signal. On mesure des déplacements, dans des conditions optimales, de l'ordre de $1 \mu\text{m}$. La résolution en déformation est d'environ 0,5 % [23].

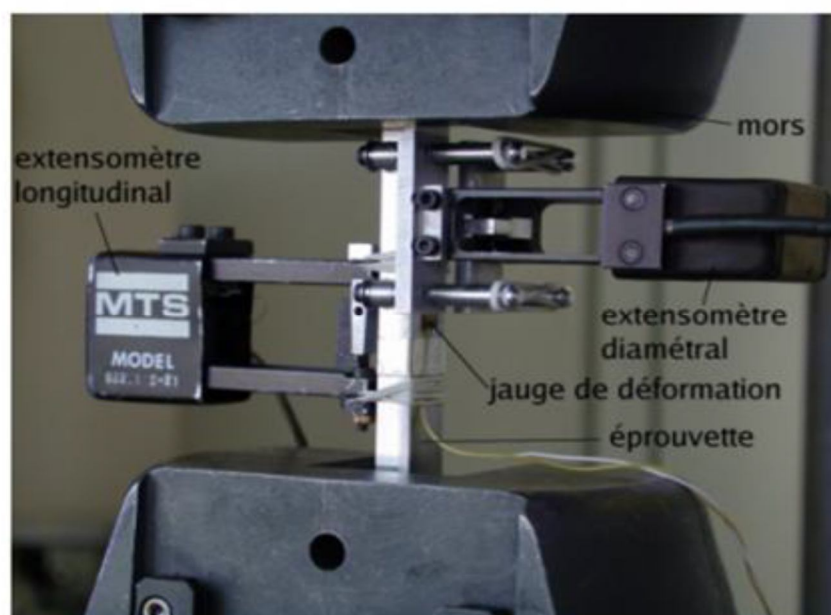


Figure 4 .2. : Extensomètres diamétral et longitudinal sur une Eprouvettes de traction [22].

Le deuxième type d'extensomètre consiste en la mesure de la déflexion d'une barre située dans le corps de l'extensomètre par des jauges de déformation. Cette barre, fléchit sous le déplacement des couteaux suite à la déformation de l'échantillon.

4.2 : Méthodes optiques indirectes

4.2.1 : Méthode de Moiré

D'une manière générale, le moiré est une figure composée de lignes sombres et claires (figure II.3) résultant de la superposition de deux réseaux (ensemble de lignes globalement parallèles) Il s'agit en fait d'un phénomène d'interférences spatiales entre les deux réseaux.

Ce phénomène peut être exploité pour analyser la déformation des matériaux métalliques, si on l'applique en extensomètre, il suffit de tracer un réseau sur la pièce à étudier, et de superposer le réseau de référence au réseau déformé par la déformation de la pièce, il apparait un moiré. La diffraction optique donne lieu à une distribution de franges claires et sombres, la comparaison des deux réseaux permet de mesurer le déplacement et donc de déterminer les déformations [23].

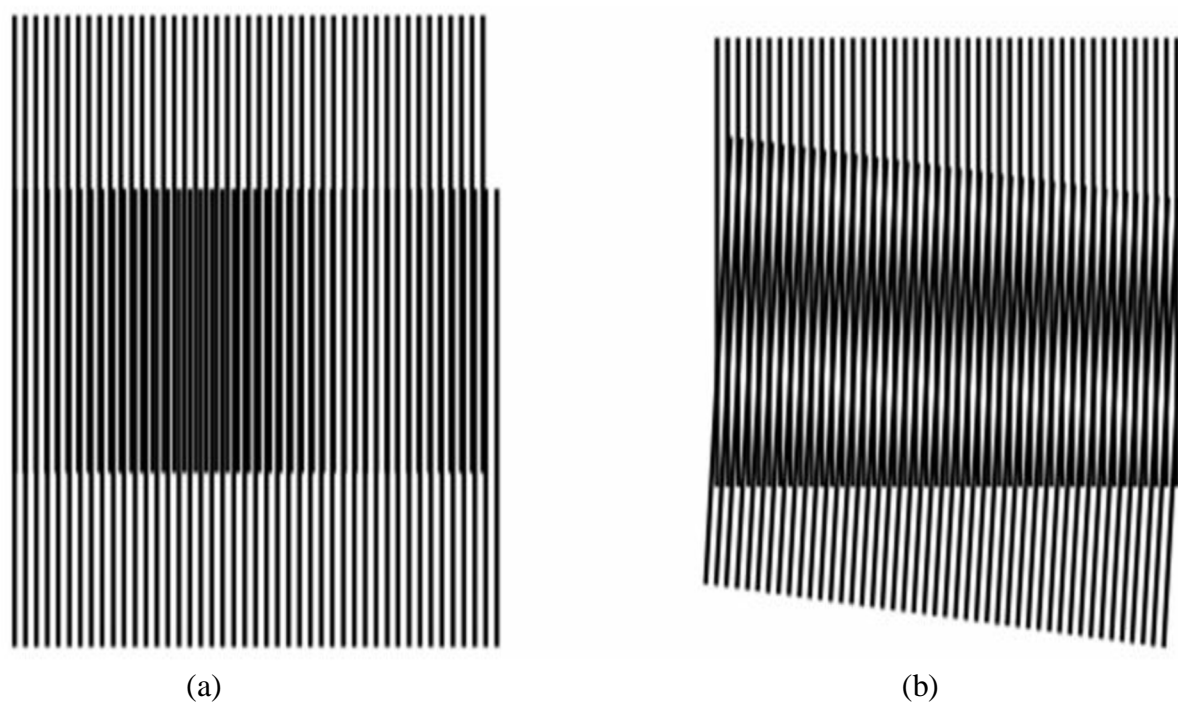


Figure 4.3. : Principe du phénomène de moiré. (a) Moiré de réseaux de pas voisins (b) Moiré de réseaux de même pas inclinés entre eux [23].

❖ Cas de la traction uniaxial

Prenons un échantillon de longueur l sur laquelle on trace un réseau de pas p dont les traits sont perpendiculaires à l'axe de traction. Sous tension, l'échantillon a une longueur $l \cdot (1+\varepsilon)$, où ε est la déformation. Le pas du réseau devient $p \cdot (1+\varepsilon)$, on a donc $\delta p = p \cdot \varepsilon$. L'espacement entre deux zones sombre vaut donc [23] :

$$2d = p/\varepsilon \quad (4.1)$$

Ceci permet de déterminer la déformation. Mais, la mesure de la distance entre deux sombres est imprécise, du fait de la largeur de chaque zone. On peut se contenter de compter le nombre N de traits sombres que l'on voit sur une longueur l . Soit :

$$N = l \cdot \varepsilon / p \quad (4.2)$$

La précision est la déformation qui sépare deux apparitions de traits, soit :

$$\Delta\varepsilon = p/l \quad (4.3)$$

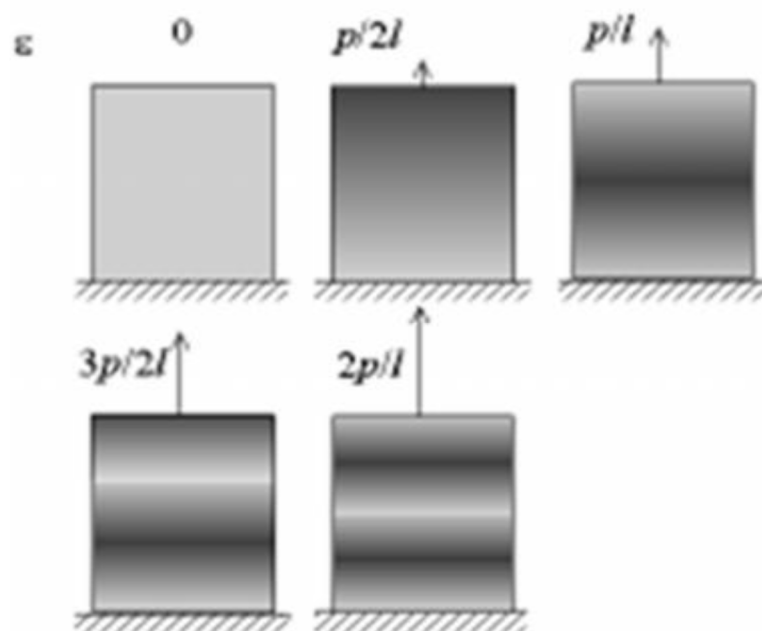


Figure 4.4 : Utilisation du moiré en extensomètre : cas de la traction simple.

Cette technique est d'une bonne précision qui est de $\pm 5.10^{-6}\%$, mais sa mise en œuvre nécessite beaucoup de rigueur en ce qui concerne le dépôt de la grille, la superposition des réseaux...etc. [24,23]

4.2.2 : Interférométrie holographique

Le principe général consiste à superposer des ondes lumineuses puis reconstituer une image à trois dimensions. Grâce à l'holographie, on est capable de faire interférer les ondes lumineuses provenant, à différents instants, d'un même objet se déplaçant et se déformant au cours du temps. L'holographie consiste à enregistrer par interférométrie, sur un support photosensible (plaque photographique), l'onde lumineuse diffusée par un objet éclairé, puis à restituer à cette onde lumineuse à partir de l'enregistrement (appelé hologramme).

En général, la source d'éclairage utilisée est un laser qui possède les propriétés adaptées pour la création d'interférences lumineuses de bon contraste.

Le principe d'enregistrement d'un hologramme, illustre par le schéma de la figure (II.5), est le suivant.

- ❖ Éclairage avec une source **S**, de l'objet qui diffuse la lumière qu'il reçoit .
- ❖ Un observateur placé derrière la plaque photographique perçoit l'objet éclairé.
- ❖ Pour enregistrer l'onde Σ avec sa phase ϕ , il faut la faire interférer avec une onde lumineuse de référence ΣR provenant également de la source **S** (même source) et cela par prélèvement d'une partie de l'onde d'éclairage avec un petit miroir **MR**
- ❖ Les ondes Σ et ΣR interfèrent dans tout l'espace où elles se superposent.

La plaque photographique **H** enregistre une section de ce phénomène d'interférence. Ainsi, ces interférences issues avant et après déformation donnent lieu, après développement, à des franges d'interférence qui permettent d'accéder au déplacement correspondant.

L'avantage de cette méthode est bien la forte résolution, qui est de $0.05\mu m$. Son inconvénient est qu'elle est très délicate à mettre en œuvre (sensible aux vibrations pendant les poses).

La mauvaise qualité des franges, ainsi que la complexité du montage optique. Ceci explique que malgré sa robustesse, son utilisation est limitée à la mesure de faibles déplacements. [22,24,25]

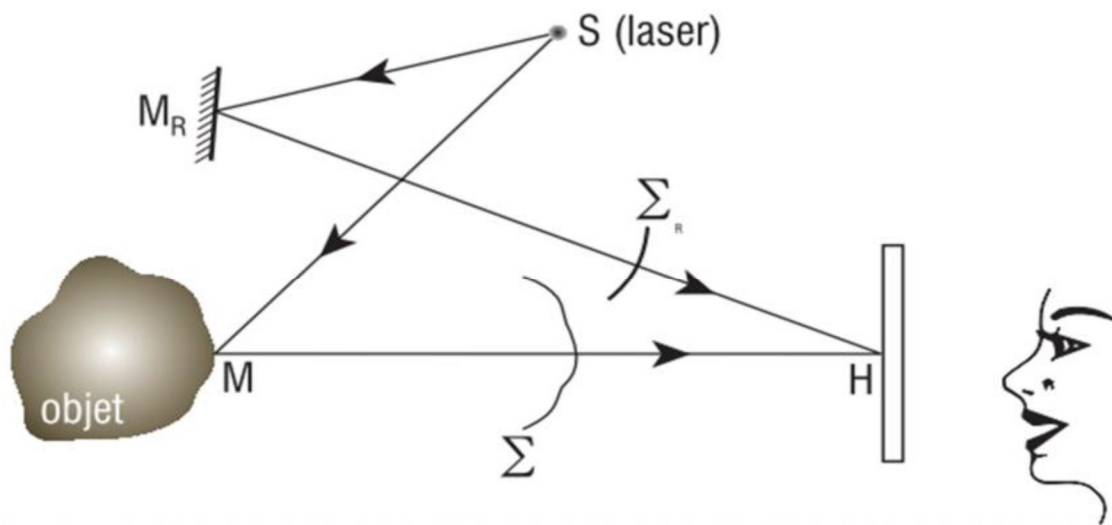


Figure IV.5 : Principe d'enregistrement d'un hologramme [23].

4.2.3 : Interférométrie speckle (granularité laser)

Cette technique a été inventée dans les années 1970 pour compléter les insuffisances de l'holographie dans le domaine de l'interférométrie en ce qui concerne le milieu d'enregistrement. Contrairement à l'interférométrie holographique classique, l'interférométrie de speckle (Figure II.6) permet l'utilisation de caméras CCD (Coupled Charged Device) pour calculer et visualiser le champ des déplacements d'un objet diffusant. Elle est très utilisée dans l'industrie, et cela malgré des performances qui sont incomparables avec celles de l'interférométrie holographique comme la possibilité d'avoir une image 3D de cet objet. Les caméras CCD ont une résolution faible ($6 \mu\text{m}$ au mieux aujourd'hui) comparée à celle des plaques photographiques argentiques (une fraction de μm). [22,24]

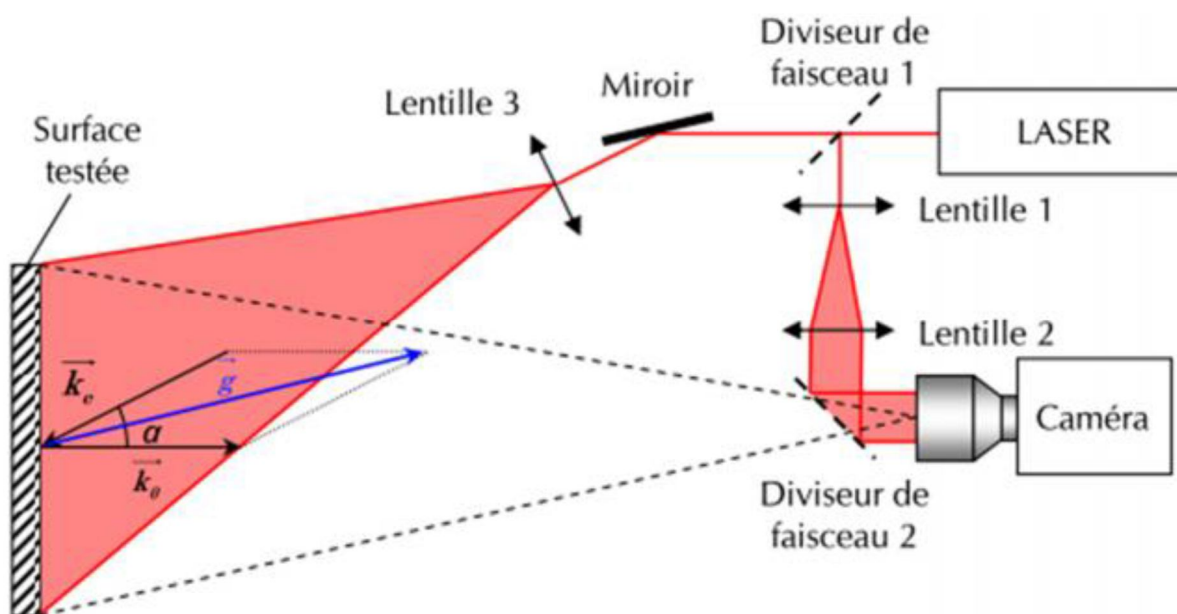


Figure 4.6. Représentation schématique d'interférométrie speckle[23].

La figure II.6 montre le principe de l'interférométrie holographique. La lumière cohérente réfléchie par une surface dépolie (surface micro-rugueuse) donne lieu à un champ de granularité, il en résulte une figure de grains lumineux. Ces petites surfaces d'intensité et de phase constante sont créées par l'interférence des ondes provenant des points de surface illuminée. Les franges d'interférence créées, par la superposition de champs de granularité devront pouvoir être lues par la caméra électronique pour remonter au champ de déplacement (Figure IV.7).



Figure 4.7 : Photographie de speckle (granularité laser) [26].

Le principal avantage de la méthode speckle est qu'elle permet l'accès aux trois composantes du déplacement d'une surface. De plus, la préparation de la surface est très simple. En revanche, de sa nature interférométrique, elle est très sensible aux vibrations extérieures [22,24,26].

4.2.4 : Schearographie

Elle consiste à mesurer directement les variations de déplacements sur une figure d'interférences. Il faut que l'objet soit éclairé par une lumière cohérente et la lumière réfléchissante oriente vers un dispositif optique crée une paire d'images décalées.

On déduit la distribution de phase correspondante à partir d'un interferogramme spéculaire créé par la paire d'images décalées qui interfèrent. En effectuant la différence entre les distributions de phase, avant et après déformation, on obtient une figure de frange digitale. Le champ de déplacement est déduit à partir de la figure de changement de phase relatif. Cette méthode permet la mesure des déplacements d'ordre nanométrique mais sa mise en œuvre est difficile pour une qualité des franges d'interférences de bonne précision [24].

4.3 : Méthodes optique directes

Ces techniques consistent à mesurer les déplacements des points ou les variations des caractéristiques de formes géométriques tracées sur le matériau en utilisant un moyen optique.

4.3.1 : Mesure des variations des caractéristiques géométrique d'un réseau

Le principe est de tracer sur le matériau à déformer un réseau de motifs géométriques (cercles ou carrés). Si on prend par exemple un réseau de cercles, après déformation il se transforme en réseau d'ellipses. Les nouvelles caractéristiques géométriques du réseau obtenu après déformation sont mesurées à l'aide d'utilisation d'une binoculaire et d'une table micrométrique à mouvements croisés. Les déformations détectées sont de 1 à 100% avec une précision de $\pm 0.5\%$.

De nouvelles méthodes ont été développées pour le calcul de déformation sur des surfaces à 3D mais leur mise en œuvre reste difficile [22 ,23].

4.3.2 : Extensomètre optique « Apollor »

4.3.2.1 : Principe de la méthode

Le système « Apollor » est un système qui permet la mesure des déformations locales d'un échantillon par focalisation de la caméra sur la zone de déformation de l'éprouvette (Figure VI.1). Cette technique permet un suivi en temps réel de l'image vidéo. En effet, le logiciel peut piloter un système de pied motorisé où est fixée la caméra. On peut aussi grâce à ce système piloter la machine de traction en fonction de la réponse du matériau [23,24].

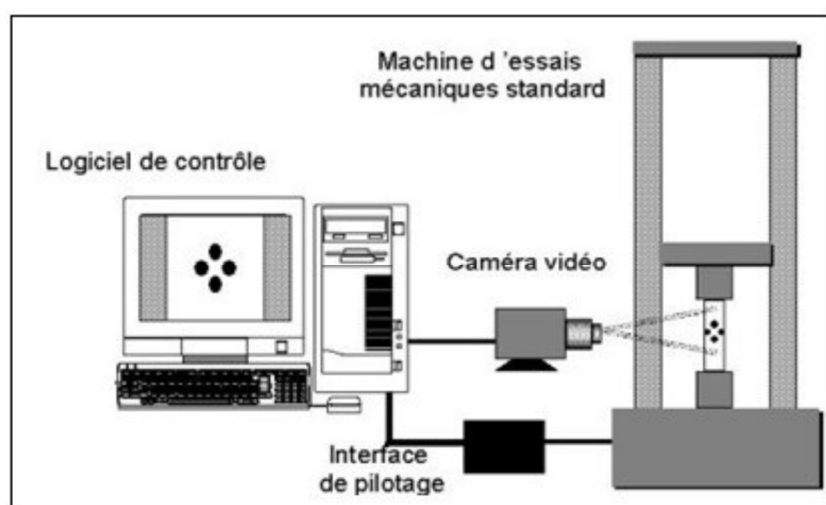


Figure 4.8 : Description du principe Apollor.

En pratique, pour calculer les déformations ce système mesure la distance entre plusieurs taches dessinées sur l'éprouvette. Ce nombre de taches peut varier de 2 à 7. On utilise la méthode à deux taches (1D) (Figure VI.3) pour réaliser des essais de traction de type conventionnel (comme avec des jauges extensométriques) [25].

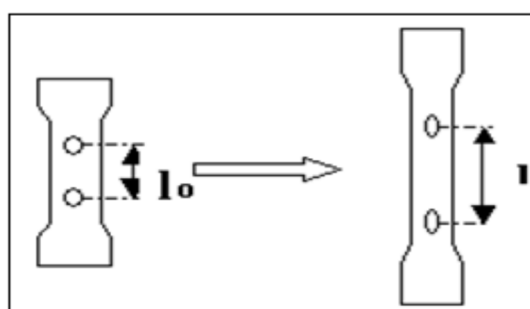


Figure 4.9 : Eprouvette avec deux taches.

La seconde méthode (Figure IV.4) tient compte de 4 taches et est utilisée pour prendre en compte les effets de la déformation transverse (2D).

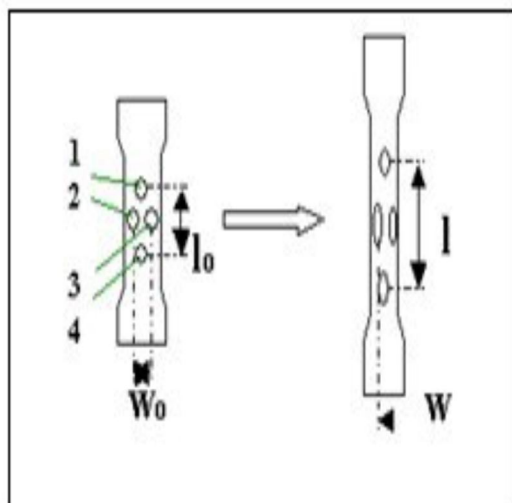


Figure 4.10 : Eprouvette avec 4 taches

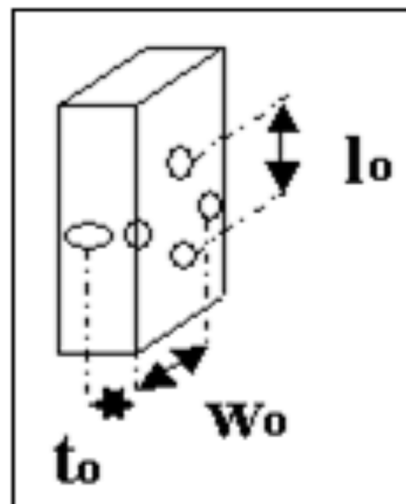


Figure 4.11 : Eprouvette avec 5 taches.

La troisième méthode utilise 5 taches dont une se trouvant sur l'épaisseur de l'éprouvette (Figure IV.5). Cette méthode est principalement utilisée pour prendre en compte la variation de volume [25].

La dernière méthode, à 7 taches, permet de mesurer 4 déformations longitudinales partielles et une transverse (Figure-IV.6). Cette méthode permet, si les taches sont judicieusement placées, de mesurer les déformations dans les trois directions (3D).

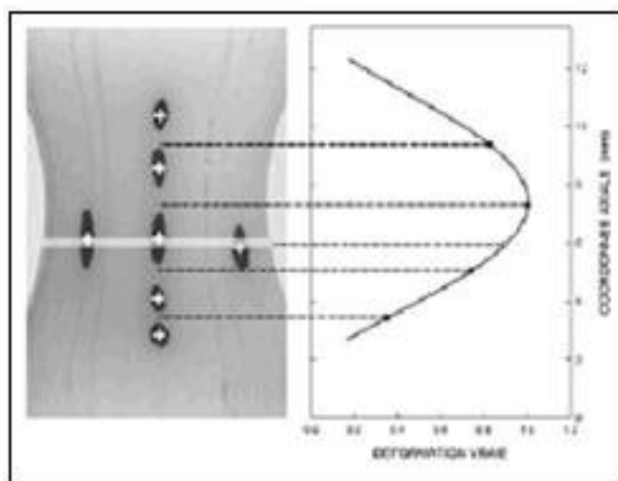


Figure 4.12- Eprouvette avec sept taches.

4.3.2.2 : Avantages

Le système « Apollor » comporte de nombreux avantages. Il permet d'effectuer des mesures sans contact. En effet, dans cette technique, à partir d'une séquence vidéo enregistrée à l'aide d'une caméra, un logiciel détermine les déplacements d'un échantillon. Puisque cette technique est basée sur des mesures à distance, elle permet de visualiser des échantillons froids ou chauds. Le logiciel permet aussi un traitement des données vidéo en temps réel ce qui permet à la caméra de suivre l'échantillon dans son déplacement. Ce système permet aussi d'obtenir les courbes de contraintes vraies à vitesse de déformation vraie constante. Ce système permet aussi de mesurer des déformations longitudinales et transverses ainsi que des variations de volume.

4.3.2.3 : Inconvénients

L'inconvénient majeur de cette technique est qu'elle ne permet pas d'étudier globalement une éprouvette. En effet, le système par l'analyse des tâches permet de travailler uniquement dans une zone locale.

4.3.2.4 : Domaines d'applications

Les domaines d'application de cette méthode sont très nombreux. Elle peut être utilisée pour tous types d'essais mécaniques comme la traction, la compression ou encore le cisaillement ou le fluage. Ces essais peuvent être réalisés sur de nombreux types de machines qu'elles soient électromécaniques ou hydrauliques. Cette méthode possède aussi l'avantage de pouvoir travailler sur de nombreux types d'échantillons tels que des éprouvettes standards, sablier, des films ou encore des pièces réelles.

4.3.3 : Thermographie infrarouge

4.3.3.1 : Principe de la méthode

Cette méthode utilise la propriété thermique des matériaux, lorsqu'on les étire, ont tendance à s'échauffer. Grâce à la variation de la chaleur dans le matériau, on peut déterminer la déformation. C'est à dire plus le matériau est déformé, plus il s'échauffe [26].

Cette technique de mesure exploite le rayonnement infrarouge émis naturellement par les objets dès lors que leur température est supérieure au zéro absolu (0 K). L'analyse se fait par

conséquent sans contact ce qui est une des conditions requises pour mesurer sans perturbation de si faibles variations de température. L'autre avantage décisif est l'accès à une cartographie de la surface de l'éprouvette, ainsi tous les points d'un objet peuvent être mesurés simultanément. Enfin, les techniques modernes de détecteurs quantiques à plans focaux ont définitivement ouvert la thermographie au suivi de phénomènes rapides [27].

4IV.3.3.2 : Avantages

En combinant cette technique avec des simulations numériques par éléments finis on peut retrouver les conditions aux limites, réelles, des pièces étudiées. L'avantage de la thermoélasticimétrie est de permettre de mesurer des contraintes dans des cas où des moyens standards, comme l'extensomètre, ne peuvent pas être utilisés : c'est le cas des structures chaudes comme un pot d'échappement, trop petites comme une bille d'injecteur, trop grandes comme un pont, en grand déplacement ou sous tension [28].

4.3.3.3 : Inconvénients

Cette technique est relativement délicate à mettre en œuvre, particulièrement au niveau de l'isolation thermique. En effet, elle ne permet pas de perturbation importante qui pourrait fausser largement les résultats. De plus, dans cette technique, la température est déduite à partir de l'émissivité initiale du matériau. Il faut donc veiller à ce que celle-ci ne varie pas au cours du test de déformation, car cela entraînerait l'apparition de résultats incohérents [25].

4.3.3.4 : Domaines d'applications

Cette méthode permet de travailler sur des pièces réelles, sans instrumentation de surface et avec des sollicitations dynamiques sur de nombreux cycles. Cette méthode est donc utilisable sur un vaste panel d'applications, mais elle est particulièrement adaptée pour l'étude de pièces utilisées dans le transport ferroviaire, aéronautique ou automobile [29].

4.3.4 : Méthode de corrélation d'images

La corrélation d'images est une technique expérimentale utilisée en science des matériaux pour déterminer des déplacements et calculer des déformations. Contrairement aux moyens de mesures traditionnels (extensomètres et jauges de déformation), qui donnent des valeurs moyennées en un point, la corrélation d'images permet d'accéder à des champs de valeurs.

Le développement spectaculaire des appareils photos et des caméras CCD permet d'accéder à une grande quantité d'informations. En effet, chaque pixel du capteur apporte une information codée sur un nombre de bits définis par la sensibilité du capteur (typiquement 8, 12 et 16 bits). Cette information correspond au flux lumineux reçu sur ce pixel. Par exemple, l'information sur un pixel d'un capteur 8 bits prendra une valeur comprise entre 0 (pas de flux) et 256 (flux maximum). Chaque image brute est stockée sous la forme d'une matrice 2D dont chaque case a une valeur que l'on appelle niveau de gris.

La corrélation d'images est une technique qui compare deux images pour estimer les déplacements des points d'une image déformée par rapport à une image de référence. Les algorithmes de corrélation utilisent les images sous forme de matrices de niveaux de gris comme données d'entrée. La figure II.8 montre le principe optique de formation d'image.

On la comparant avec la méthode de speckle, qui permet d'atteindre une précision de l'ordre de 10^{-7} en déplacement, la méthode de corrélation d'image peut atteindre seulement 10^{-4} en déformation, mais de celle speckle sur une surface limitée [14,16,17].

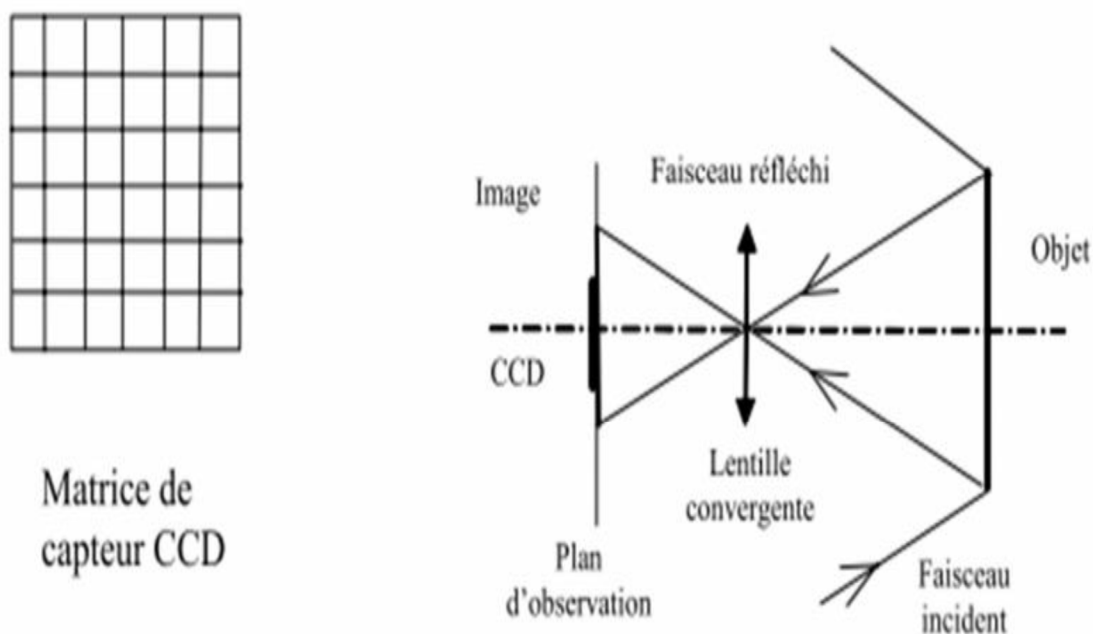


Figure 4.13 : Schéma d'une matrice de capteur CCD et du principe optique de formation d'image [22].

4.4. Analyse des déformations à l'aide de la méthode de corrélation d'images numériques

La mesure des champs de déformations permet de faire apparaître des phénomènes inaccessibles aux seules mesures de déformation, telles, le moiré, la méthode speckle, ...etc. Chacune d'elle possède des avantages et des inconvénients avec une précision plus ou moins grande. Parmi les différentes techniques utilisées, la corrélation d'image est un moyen séduisant pour explorer l'évolution de la déformation plastique à l'échelle locale. Elle est d'usage simple, répandu, rapide et précise, dotée d'une grande résolution spatiale et d'une dynamique de niveau de gris. Le développement des camera CCD (Coupled Charged Device), simples pour choisir le grandissement, permet la mise en œuvre facile de cette technique non intrusive [27].

4.4.1. Présentation de la méthode de corrélation d'images

La méthode de corrélation d'images consiste à comparer deux images (l'une avant déformation et l'autre après déformation) dont la surface doit présenter une distribution aléatoire de motif à niveaux de gris repérable.

Il est donc possible, à l'aide d'une camera CCD, d'enregistrer la position des points à un instant t et, grâce à un logiciel de corrélation d'images, de remonter à une mesure du champ de déplacement en un grand nombre de points de la surface.

On peut ensuite en déduire le champ de déformation sur la surface de l'échantillon. Cette technique peut être utilisée à l'échelle macroscopique, dans le cas de procédés d'emboutissage par exemple (Figure II.9), ou à l'échelle microscopique pour des mesures très locales de la déformation (Figure II.10) [14]. Dans la suite de ce chapitre, le formalisme mathématique est dû aux travaux de P. Vacher et al [27].

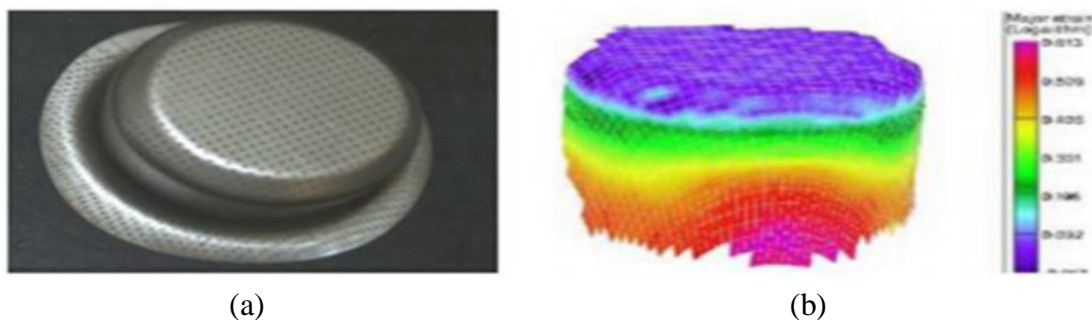


Figure 4.14 : (a) Échantillon embouti couvert de la grille de points permettant la mesure par corrélation d'image. (b) Champ de déformation reconstruit par corrélation d'images [22].

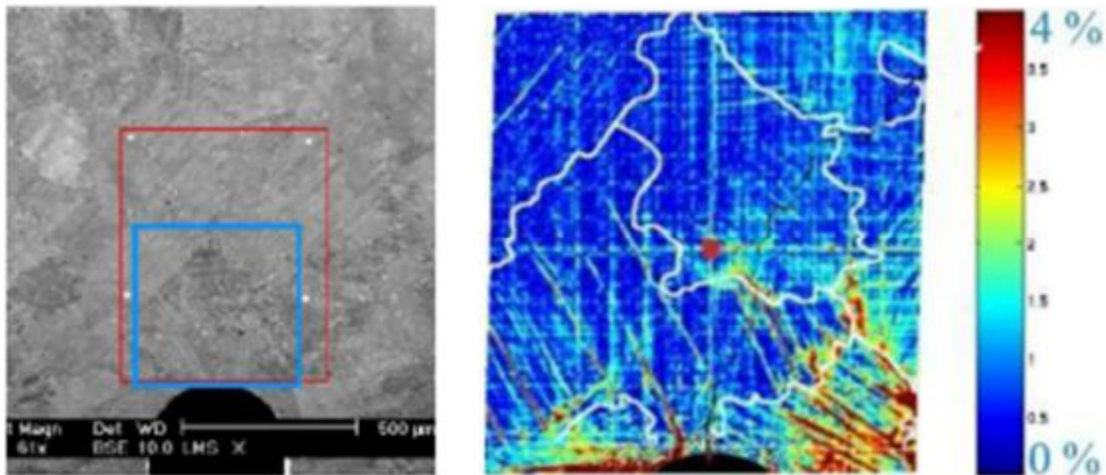


Figure 4.15 : Image de gauche : cliché de microscopie Électronique à balayage lors d'essais in-situ et image de droite : champ de déformation déduit par corrélation d'images, révélant la localisation de la déformation [27]

4.4.1.1. Quelques rappels de la mécanique des milieux continus

Considérons un corps matériel évoluant dans le temps sous l'effet des forces qui lui sont appliquées. Soit Ω_0 la configuration de ce corps au temps $t = 0$, choisie comme configuration de référence. Soit M un point matériel de Ω_0 occupant la position \vec{X} dans un référentiel R . La position de ce point au temps t sera alors décrite par l'équation II.1 [28] :

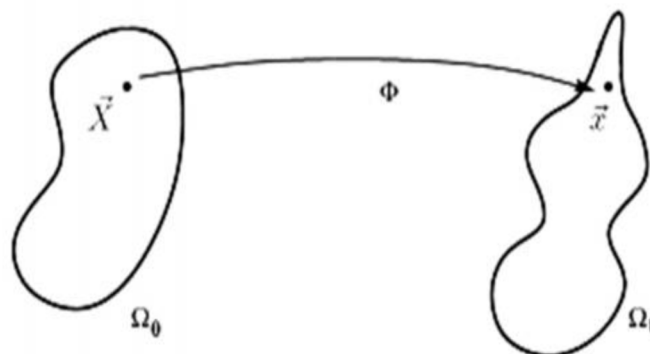


Figure 4.11 : Transformation d'un corps matériel a l'instant t [20].

$$\vec{x}(t) = \phi(\vec{X}, t) \quad (4.4)$$

Ce type de description est appelé description Lagrangienne du mouvement. On peut également suivre la trajectoire du point M en observant son déplacement \vec{u} , défini par :

$$\vec{x}(t) = \vec{X} + \vec{u}(\vec{X}, t) \quad (4.5)$$

Pour étudier localement la transformation ϕ au voisinage du point M, on définit le gradient de la transformation, noté F_{ij} , par :

$$d_{X_i} = F_{ij} dJ_j \quad \text{avec} \quad F_{ij} = \frac{\partial X_i}{\partial X_j} \quad (4.6)$$

F_{ij} Peut également être exprimé à partir du gradient du déplacement $\vec{u}(\vec{X}, t)$:

$$F_{ij} = \delta_{ij} + \frac{\partial u_i}{\partial X_j} \quad (4.7)$$

On peut montrer que ce tenseur gradient de transformation est inversible et correspond au produit contracté d'un tenseur rotation R_{ij} et d'un tenseur des déformations pures U_{ij} :

$$F_{ij} = U_{ij} * R_{ij} \quad (4.8)$$

F_{ij} Peut également être décomposé en une part due à la transformation élastique du corps matériel et en une part due à sa transformation plastique.

Cette décomposition s'exprime mathématiquement à l'aide du produit contracté :

$$F_{ij} = F_{ik}^e * F_{ik}^p \quad (4.9)$$

On peut quantifier la déformation à partir du tenseur de Green-Lagrange :

$$E_{ij} = \frac{1}{2} (F_{ki} \cdot F_{kj} - \delta_{ij}) = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial X_j} + \frac{\partial u_j}{\partial X_i} + \frac{\partial u_k}{\partial X_i} + \frac{\partial u_k}{\partial X_j} \right) \quad (4.10)$$

Ce calcul se simplifie considérablement lorsqu'on l'hypothèse de transformations infinitésimales.

L'expression du tenseur de déformation devient linéaire défini par la relation suivante :

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial X_j} + \frac{\partial u_j}{\partial X_i} \right) \quad (4.11)$$

Mise en œuvre pratique de la méthode

La surface à niveaux de gris aléatoires est obtenue par pulvérisation de peintures blanche (fond) puis noire (mouchetis).

La projection de la peinture sur la surface de l'échantillon doit être appliquée juste avant l'essai (<1h) et de façon à avoir une surface mouchetée comme le montre la (figure II.12.)

Les tailles des mouchetures doivent être <20 pixels

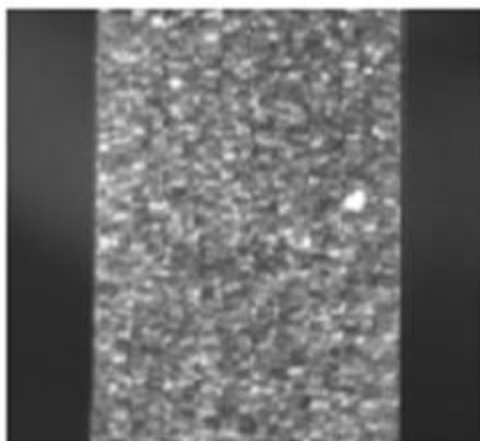


Figure 4.16 : Surface présentant des niveaux de gris aléatoires créés par pulvérisation de Peintures blanche (fond) puis noire (mouchetis). [22]

4.4.2. Outils de calculs

4.4.2.1. Eléments de grille et motif de corrélation

L'image qui sera déformée doit être divisée en grille d'éléments carrés de cotes L_p , comme la montre sur la figure II.13

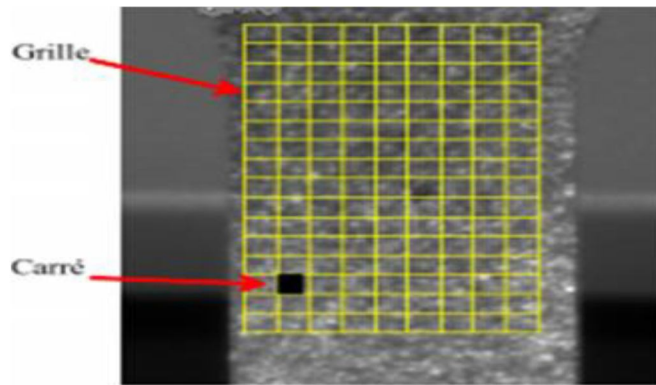


Figure 4.17 : Grille virtuelle appliquée sur l'échantillon [22].

Autour de chacun des quatre points de l'élément de grille une zone d'analyse de dimensions variables est définie, qu'on appelle, motif de corrélation. Donc Le champs de déplacements pour chaque élément de la grille peut être calculé.

4.4.2.2. Niveaux de gris

Le niveau de gris de l'image initial est représenté par une fonction discrète $f(x,y)$ qui devient $f^*(x^*,y^*)$ pour l'image déformée [27]:

$$f^*(x^*,y^*)=f^*[x+u(x,y) , y+v(x,y)] \quad (4.12)$$

Où $u(x, y)$ et $v(x, y)$ sont les champs de déplacement d'un élément de grille donne.

Un point de l'image initial se déplace après déformation en position subpixel. Les niveaux de gris dans l'image sont obtenus par interpolation bilinéaire. Quatre points sont nécessaires pour une interpolation bilinéaire afin d'obtenir la fonction suivante :

$$f^*(x^*,y^*)= .x^*+ .y^* + .x^* y^* +\lambda \quad (4.13)$$

$$\text{Avec } \begin{cases} x^* = x + u(x \cdot y) \\ y^* = y + v(x \cdot y) \end{cases}$$

Où

$$\begin{cases} \alpha = f^*(1, 0) - f^*(0, 0) \\ \beta = f^*(0, 1) - f^*(0, 0) \\ \gamma = f^*(1, 1) + f^*(0, 0) - f^*(0, 1) - f^*(1, 0) \end{cases}$$

$$\lambda = f^*(0,0)$$

IV.4.2.3 Coefficient de corrélation

Le coefficient de corrélation est défini par [21] :

$$cor = 1 - \frac{\int_{\Delta_s} f(x,y)f^*(x^*,y^*)dxdy}{\sqrt{\int_{\Delta_s} f(x,y)^2dxdy \int_{\Delta_s} f^*(x^*,y^*)^2dxdy}} \quad (4.14)$$

Où Δ_s est le domaine de motif de corrélation concerne dans l'image initiale.

Si $f(x,y) = f^*(x^*,y^*)$, donc $Cor=0$, alors la corrélation est parfaite.

Les paramètres de corrélation choisis ici sont indépendants des modifications globales de niveaux de gris entre deux images. Le coefficient de corrélation est utilisé comme indicateur de degré de similarité entre deux motifs, le premier est centré sur un pixel de l'image initiale carré, le deuxième est dans une position subpixel dans l'image déformée et est quadrilatéral.

IV.4.2.4 Champs de déplacements

Le calcul des déplacements des quatre sommets du quart de la grille permet d'obtenir le champ de déplacement associé à ce carré en utilisant les relations suivantes des champs de déformation.

$$\begin{cases} U_x(x,y) = a_u x + b_u x + c_u xy + d_u \\ U_y(x,y) = a_v x + b_v x + c_v xy + d_v \end{cases} \quad (4.15)$$

Avec

$$\begin{cases} du_a = u_x(x_a, y_a) \\ du_b = u_x(x_a + L_p, y_a) \\ du_c = u_x(x_a + L_p, y_a + L_p) \\ du_d = u_x(x_a, y_a + L_p) \end{cases} \quad (4.16)$$

Le champ de déplacement a la forme suivante :

$$U_x(x,y) = (du_B - du_A) \frac{x-x_A}{L_p} + (du_D - du_A) \frac{y-y_A}{L_p} + c(du_C - du_B + du_A - du_D) * \frac{(x-x_A)(y-y_A)}{L_p^2} + du_A$$

$$v_x(x,y) = (dv_B - dv_A) \frac{x-x_A}{L_p} + (dv_D - dv_A) \frac{y-y_A}{L_p}$$

$$\frac{y-y_A}{L_p} + c(dv_c - dv_B + dv_A - dv_D) * \frac{(x-x_A)(y-y_A)}{L_p^2} + dv_A \quad (4.17)$$

4.4.3. Champ de déformation

Le tenseur de Green-Lagrange E est donné en fonction du gradient de la déformation F par l'expression :

$$\mathbf{E} = \frac{1}{2} \{ \mathbf{F}^T + \mathbf{F}^{-1} \} \quad (4.18)$$

$$E_{ij} = \frac{1}{2} \{ \mathbf{u}_{ij} + \mathbf{u}_{ji} \} + \frac{1}{2} \mathbf{u}_{i,k} \mathbf{u}_{j,k} \quad (4.19)$$

Avec $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k} \in (\mathbf{x}, \mathbf{y})$ et $\mathbf{u}_{ij} = \delta u_i \delta_j$

Les valeurs du tenseur de Green-Lagrange exprimées dans la base principale sont :

$$E_x = \frac{E_{xx} + E_{yy}}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{(E_{xx} - E_{yy})^2 + 4E_{xy}^2}$$

$$E_y = \frac{E_{xx} + E_{yy}}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{(E_{xx} - E_{yy})^2 + 4E_{xy}^2} \quad (4.20)$$

Supposant OX et OY les axes principaux de déformation. L'angle que fait la direction OX avec l'axe des abscisses est donné par :

$$\theta = \text{Arctg} \left(\frac{E_{xy}}{E_{xx} - E_{yy}} \right) \quad (4.21)$$

Les déformations logarithmiques sont exprimées en fonction de Ex et Ey dans le référentiel OXY comme suit :

$$E_{Lx} = \frac{1}{2} \ln(2E_x + 1)$$

$$E_{Ly} = \frac{1}{2} \ln(2E_y + 1) \quad (4.22)$$

4.4.4. Méthode utilisée pour déterminer les champs de déplacement

Le principe de calcul est développé dans ce qui suit pour un niveau de grille

Première étape

P un point de l'image initiale et P* un point de l'image déformée.

Dans le cas des faibles déformations, la première étape consiste de localiser un point avant déformation qui peut être localisé à nouveau approximativement dans l'image déformée.

Dans ce cas, le champ de déplacement approximatif est :

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_{x0} &= \mathbf{u}_{A0}(x, y) = \mathbf{u}_{B0}(x, y) = \mathbf{u}_{C0}(x, y) = \mathbf{u}_{D0}(x, y) = d\mathbf{u}_0 \\ \mathbf{v}_{x0} &= \mathbf{v}_{A0}(x, y) = \mathbf{v}_{B0}(x, y) = \mathbf{v}_{C0}(x, y) = \mathbf{v}_{D0}(x, y) = d\mathbf{v}_0 \end{aligned} \quad (\text{IV.23})$$

Aux déformations élevées ($E_{ij} > 0.5$), ou grande rotation ($> 20^\circ$), tous les paramètres initiaux doivent être définis. Ceci consiste à localiser quatre points dans l'image initiale et de repérer leurs correspondants dans l'image déformée. A la fin de cette première étape, un champ de déplacement approximatif est défini.

Processus itératif

A la première itération, figure IV.18, le champ de déplacement obtenu est appliqué au motif autour de chaque point de l'élément de grille (A, B, C, D).

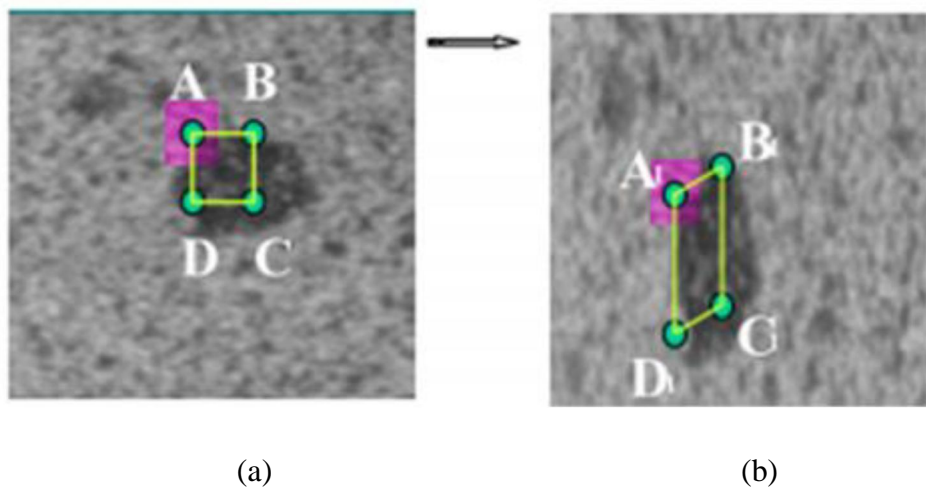


Figure 4.18 : Processus itératif pour obtenir un champ de déplacement
(a) L'image initiale, (b) l'image déformée [25].

L'analyse autour du point A est comme suit :

- ❖ Le motif sélectionné autour du point A (image non déformée) est localisé à A1 dans l'image déformée
- ❖ Le motif est déplacé dans le plan de l'image finale et le paramètre Cor est calculé systématiquement.

- ❖ La position optimale (x,y) du motif déformé est celle qui minimise le paramètre de corrélation.

Cette approche est appliquée aux trois autres points (B, C, D), ainsi les nouvelles coordonnées des point A1, B1, C1 et D1 permettent le calcul du nouveau champ de déplacement qui est proche du champ réel.

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_{x1}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) &= (\mathbf{du}_{B1} - \mathbf{du}_{A1}) \frac{x - x_A}{L_p} + (\mathbf{du}_{D1} - \mathbf{du}_{A1}) \\ &\quad * \frac{y - y_A}{L_p} + c(\mathbf{du}_{C1} - \mathbf{du}_{B1} + \mathbf{du}_{A1} - \mathbf{du}_{D1}) * \frac{(x - x_A)(y - y_A)}{L_p^2} + \mathbf{du}_{A1} \\ \mathbf{v}_{x1}(x, y) &= (dv_{B1} - dv_{A1}) \frac{x - x_A}{L_p} + (dv_{D1} - dv_{A1}) \\ &\quad * \frac{y - y_A}{L_p} + c(dv_{C1} - dv_{B1} + dv_{A1} - dv_{D1}) * \frac{(x - x_A)(y - y_A)}{L_p^2} + dv_{A1} \quad (4.24) \end{aligned}$$

Pour la prochaine itération, les calculs précédents sont appliqués en utilisant Les champs de déplacement (u1, v1).

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_{xi}(x, y) &= (\mathbf{du}_{Bi} - \mathbf{du}_{Ai}) \frac{x - x_A}{L_p} + (\mathbf{du}_{Di} - \mathbf{du}_{Ai}) \\ &\quad * \frac{y - y_A}{L_p} + c(dv_{Ci} - dv_{Bi} + dv_{Ai} - dv_{Di}) * \frac{(x - x_A)(y - y_A)}{L_p^2} + dv_{Ai} \\ \mathbf{v}_{yi}(x, y) &= (dv_{Bi} - dv_{Ai}) \frac{x - x_A}{L_p} + (dv_{Di} - dv_{Ai}) \\ &\quad * \frac{y - y_A}{L_p} + (dv_{Ci} - dv_{Bi} + dv_{Ai} - dv_{Di}) * \frac{(x - x_A)(y - y_A)}{L_p^2} + dv_{Ai} \quad (4.25) \end{aligned}$$

Cette méthode est poursuivie jusqu'à ce qu'un champ de déplacement est stable d'une étape à l'autre obtenue :

$$dv_{\alpha^n} = dv_{\alpha^{(n-1)}} + \delta_v$$

Avec $\alpha = A, B, C, D$.

Le calcul de condition d'arrêt δu et $\delta v < \delta$ déplacement est généralisé à chaque élément de grille dans la zone étudiée.

Dans certains cas, l'élément de grille obtenu est incorrect. Un simple moyen pour detecter cela, qui, consiste à observer le gap entre deux éléments de grille voisins et dans la définition de la

distance au-delà de laquelle l'un d'eux est considéré aberrant. L'élément de grille aberrant sera celui qui a le plus mauvais paramètre de corrélation, il sera calculé de nouveau ou considéré définitivement perdu.

Un gap entre les points de deux éléments de la grille peut exister quand le champ de déplacement bilinéaire est insuffisant pour décrire le champ de déplacement réel [25,27].

Le calcul de coefficient de corrélation prend beaucoup de temps, pour cela un essai est établi pour minimiser le temps de calcul. Il consiste en l'utilisation des méthodes d'optimisation pour détecter le minimum de valeur sur la surface OXYZ. Pour un point de l'image initial dans un champ de déplacement, il y a un point de l'image et son motif déformé, en déplaçant ce motif dans l'image initiale, le coefficient de corrélation est établi ainsi que la surface discrète [27].

4.5 :Conclusion

Ces diverses techniques (et d'autres...) permettent de mesurer les déformations des objets (structures ou éprouvettes) avec diverses performances. Les mesures ponctuelles sont complétées aujourd'hui par des possibilités de mesures de champs, mais les informations apportées sont toujours relatives aux déformations à la surface de l'objet. L'avenir permettra peut-être d'accéder à des informations de volume.

5. : Partie Expérimentale

Dans ce chapitre, nous étudions la détermination d'une carte de champs de déplacements et de déformations, suite à un essai de traction sur une éprouvette soudée d'un acier d'usage générale E24. Une machine de traction et une caméra CCD pour acquisition d'image numériques ont été utilisées. Un algorithme de corrélation d'image numérique permet le calcul et la représentation schématique des champs de déplacements.

Cet algorithme va comparer deux images successives et nous fournit les déplacements des différents points dans la soudure. Il calcule également les déformations locales dans les différentes zones de la soudure.

5.1 : Présentation du matériel utilisée et méthodes d'analyse

5.1.1 : Présentation du matériel utilisé :

5.1.1.1 : Matériau utilisé :

Le matériau utilise pour nos expériences est l'acier E24 (**acier de construction métallique**).

C'est un acier de construction mécanique, d'usage général avec une teneur en carbone ne dépassant pas 0.1%. C'est donc un acier hypoeutectoïde classé dans la catégorie des aciers doux.

L'acier E24 est désigné par S235 qui indique que c'est un acier de construction mécanique, dans la valeur maximale de la limite d'élasticité ne dépasse pas 235 Mpa ou 24 kg/mm² soit en moyenne 24 daN/mm² (d'où la désignation E24 selon l'ancienne norme : 24 indiquant sa limite d'élasticité minimale en daN/mm²).

Cet acier a comme particularité une excellente conformation et soudabilité.

Nuance	R min (MPa)	Re min (MPa)	Emploi
S235(E24)	340	235	Construction mécanique et métallique générale assemblée ou soudée

5.1.2 : Essai de traction

L'essai de traction est le plus souvent utilisé pour la caractérisation mécanique des matériaux.

Il permet de déterminer de nombreuses grandeurs. Il consiste à soumettre une éprouvette à une charge jusqu'à sa rupture. On peut mesurer son allongement ΔL en fonction de la charge F qui lui est appliquée.

5.1.2.1 : Machines d'essais

Une machine de traction moderne dispose d'un entraînement électrique réglable pour effectuer des essais simples ou cycliques à vitesse contrôlée. Elle doit être équipée de capteurs de force et d'allongement, ainsi que d'un système d'amarrage. Grâce au micro-ordinateur, le contrôle de l'essai et l'acquisition des données sont devenus très simples. Des capteurs combinés avec des cartes d'acquisition de données, gérés par des logiciels hautement polyvalents, permettent de contrôler la machine et pouvant développer des forces jusqu'à 50 kN, à l'aide de quelques touches.

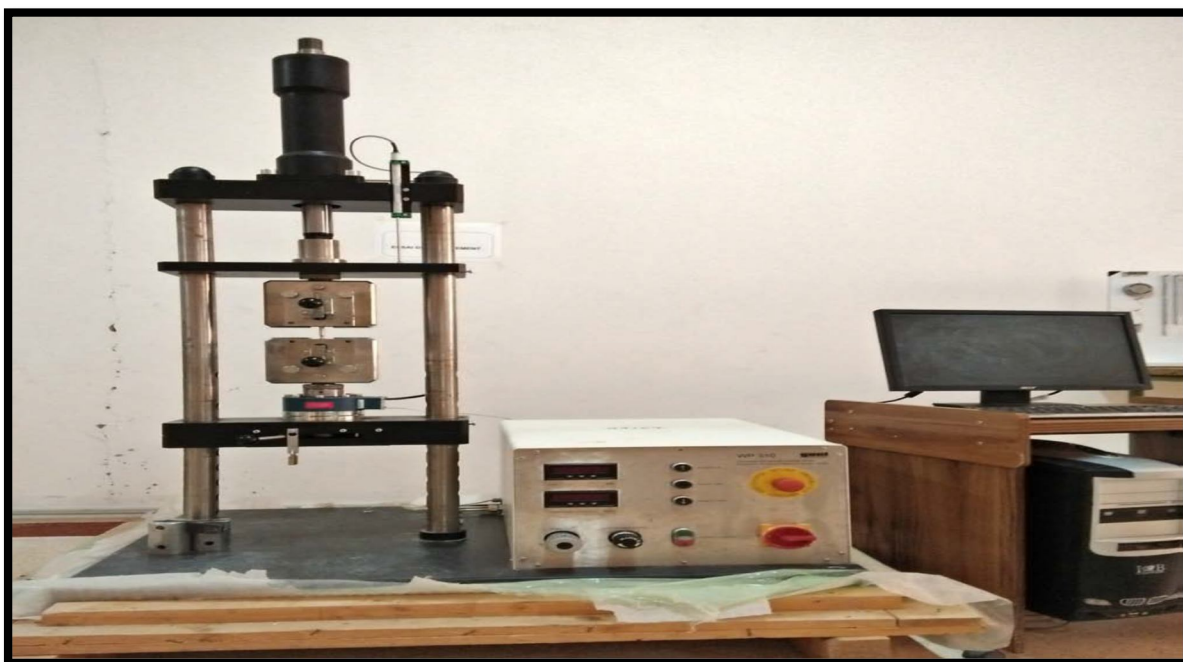


Figure.5.1 : Machine de traction

Le dispositif d'amarrage est composé d'une paire de mordaches ou d'un autre système de fixation adapté à la forme de l'éprouvette (p.ex. : pour éprouvette avec tête filetée ou tête à épaulement). Afin d'éviter tous moments de flexion, il est important que les fixations soient bien orientées et alignées suivant l'axe de traction.

Ceci n'est pas toujours facile à réaliser, mais est particulièrement critique lorsqu'on doit mesurer des matériaux fragiles, tels que les céramiques, qui ne peuvent pas s'adapter. De même toute composante de torsion est à éviter. L'effort est exercé par l'entraînement soit mécanique soit hydraulique sur l'une des fixations. Un système de réglage assure une vitesse de déformation constante. Ce système permet également d'effectuer des cycles de déformation (p.ex. : vitesse d'accroissement constante, cycles sinusoïdaux, etc.) ou d'imposer la contrainte au lieu de la déformation.

5.1.2.2 : Conditions de la machine

5.1.2.2.1 : Dimensions

L×I×h :	1000 × 750 × 1740 mm
Espace de montage :	925 × 300 mm
Poids :	280 kg
Alimentation électrique :	230 VAC / 50 Hz

5.1.2.2.2 : Génération de la force de teste : hydraulique

Force d'essai max :	± 50 kN
Course max du piston :	150 mm
Surface du piston :	3436 mm ²
Pression max du système :	175 bar
Vitesse de déplacement, réglable :	0 – 425 mm/min
Force d'essai, réglable :	0 – 50 kN
Puissance motrice :	0,55 kW
Quantité de remplissage :	6 litres
Type d'huile classe de viscosité :	ISO 32

5.1. 2.2.3 : Capteur de déplacement

Principe de mesure :	Potentiomètre linéaire
Plage de mesure :	0 – 150 mm

5.1.2.2.4 : Affichage numérique pour la force et le déplacement

Affichage :	LED 6 positions 14,2 mm
Fréquence de répétition des mesures :	2,5 1/s
Résolution :	40000 pas
Fonctions spéciales :	Tare, alarme, mémoire de valeur maximale
Interface :	Série, RS232
Vitesse de transmission :	1200 bauds
Protocole :	Impair, 7 bits de données, 1 bit d'arrêt
Fiche, face arrière :	SUB-D 25

5.1.3 : préparation des éprouvettes de traction

Elle est obtenue après découpage par sciage a disque abrasif à l'aide d'un appareil de type discotom-2 (**Fig.III.2**), disponible au niveau du département mécanique.



Figure.5.2 : Découpage a disque modèle Discotom-2



Figure.5.3 : opération de découpage d'échantillons

5.3.1 : Dimension de l'éprouvette de traction

L'éprouvette de traction est une plaque non normalisée de dimensions 180x30x3 mm composée de deux pièces égales soudées avec du cuivre. Enduit d'une couche de peinture blanche.

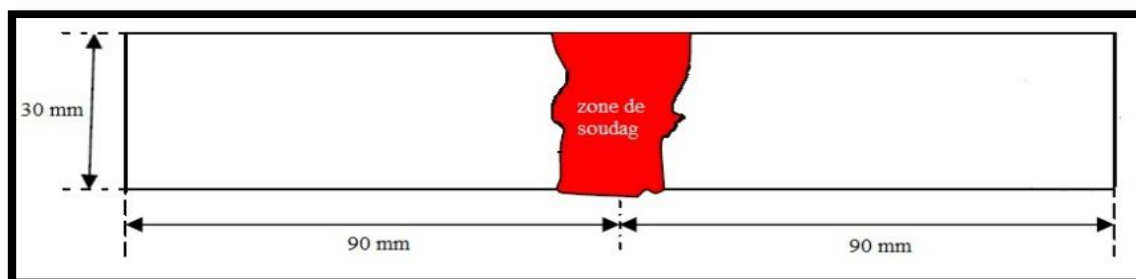


Figure.5.4 : Eprouvette de traction

Pour utiliser la corrélation d'images numériques, une projection de peinture sur la surface de l'éprouvette de traction nous a permis d'obtenir le motif aléatoire à niveau de gris (Figure IIV.5). Le mouchetis (noir ensuite blanc) est bien échantillonné spatialement pour avoir des taches de très faibles dimensions (entre 3 et 10 pixels). Le mouchetis est réalisé juste avant

l'essai de déformation pour conserver l'élasticité de la peinture, est représenté sur la figure ci-dessous.

Ainsi, les images de la surface de l'éprouvette ont été enregistrées à l'aide d'une caméra CCD (Sony). L'algorithme de corrélation d'images numériques nous a permis de déterminer les champs de déplacements associés à chaque état de déformation de l'éprouvette.

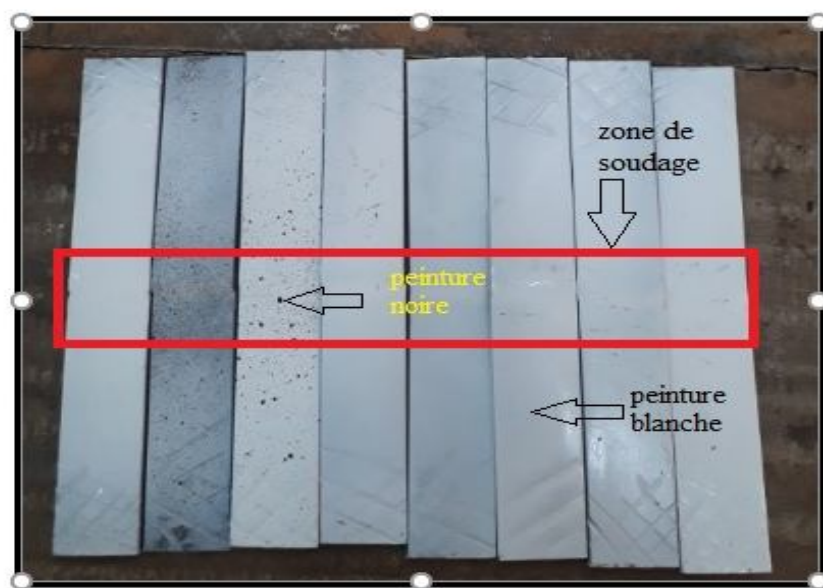


Figure.5.5 : Eprouvette de traction

5.4 : Montage expérimentale

Le montage expérimental est constitué d'une machine de traction guidé par un ordinateur, d'une éprouvette en acier (E21) plate et d'une caméra CCD placé en face de la plaque (Figure IIV.6).

La caméra reliée à un micro-ordinateur est utilisée pour enregistrer les images avant et après déplacements de la plaque sous l'effet des forces de traction. Le principe consiste à enregistrer une séquence d'images des déplacements engendré par la plaque pendant l'essai de traction. Cette série d'images sera traité sous Matlab par un code de corrélation d'images numériques pour donner les déplacements entre une image de référence (non déformée) et les autres images après déformation de l'éprouvette.

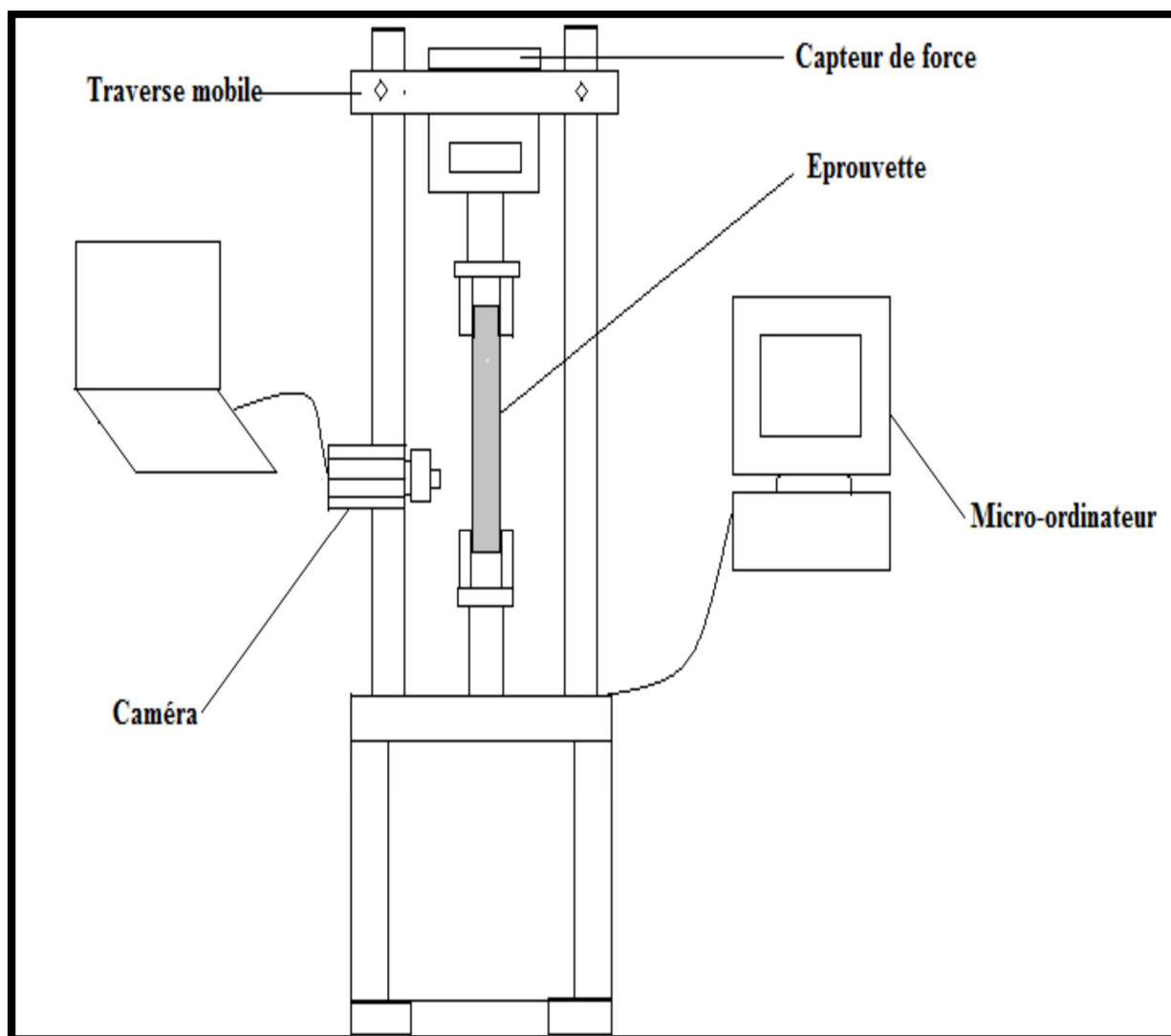


Figure 5.6 : Montage expérimentale de l'essai de traction par corrélation d'images numériques

5.4.1 : Calibration de la caméra

Résolution spatiale de la caméra :

Une caméra CCD est caractérisée par un ensemble de pixels dont la forme est rectangulaire. La grandeur d'un pixel est définie comme étant égale au diamètre d'un cercle dont la surface correspond à celle du pixel. La caméra CCD utilisée pour le déroulement des expériences est une SONY. SSC – DC198P couleur, 720 x 576 pixel (horizontal x vertical).

Pour connaître la relation entre déplacement réelle et déplacement en pixel sur la caméra CCD, on utilise la méthode suivante :

Largeur de la pièce : 30 mm

Largeur de l'image capturée : 400 pixels

$$400 \text{ pixels} \rightarrow 30 \text{ mm}$$

$$1 \text{ pixel} \rightarrow x$$

$$X = \frac{30}{400} = 0.075 = 75 \mu\text{m}$$

Donc un déplacement d'un pixel correspond à un déplacement réel de 75 μm .

5.5 : Résultat expérimentale

5.5.1 : Courbe de traction

Afin de pouvoir utiliser les courbes de traction brutes, on doit les modifier de façon que les résultats obtenus ne soient fonction que du matériau étudié et non de la géométrie de l'éprouvette on définit ainsi :

La Contrainte : $\sigma = \frac{F}{S_0}$ unité : Pascal

La Déformation : $\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$

$$S_0 = d_0 * h_0$$

S_0 et L_0 sont les caractéristiques initiales de l'éprouvette, ΔL est son allongement.

Résumer les valeurs moyennes calculées σ_{moy} dans la figure suivante :

$$d_0 = 30 \text{ mm}; h_0 = 3 \text{ mm} \quad \text{alors: } S_0 = 3 * 30 = 90 \text{ mm}^2$$

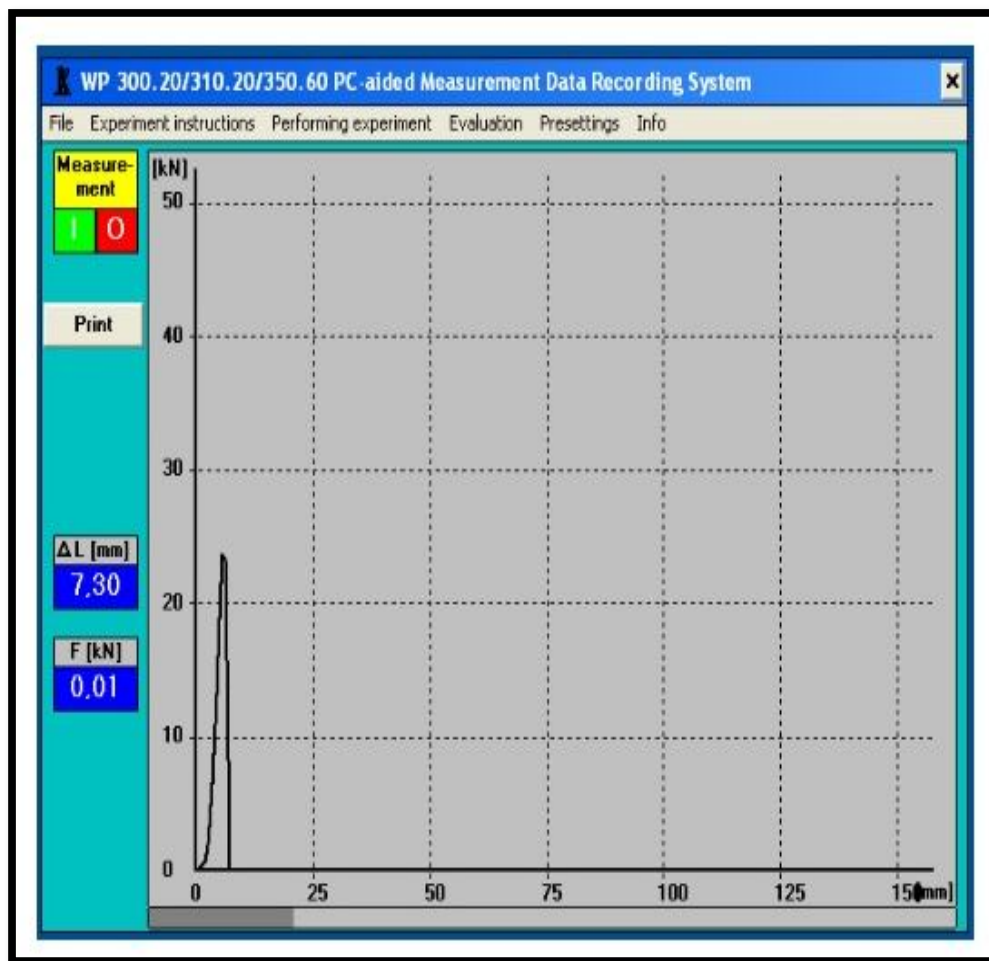


Figure 5.7 : courbe "contrainte-déformation σ "

La figure IIV.7 montre la courbe "contrainte-déformation" de traction de E 24 soudée au centre avec du cuivre.

On distingue bien les domaines de déformation élastique, plastique et de striction.

Cette courbe nous permet de déterminer les grandeurs caractéristiques de la courbe. A savoir, le module de Young, la limite élastique, la résistance à la traction, ...etc.

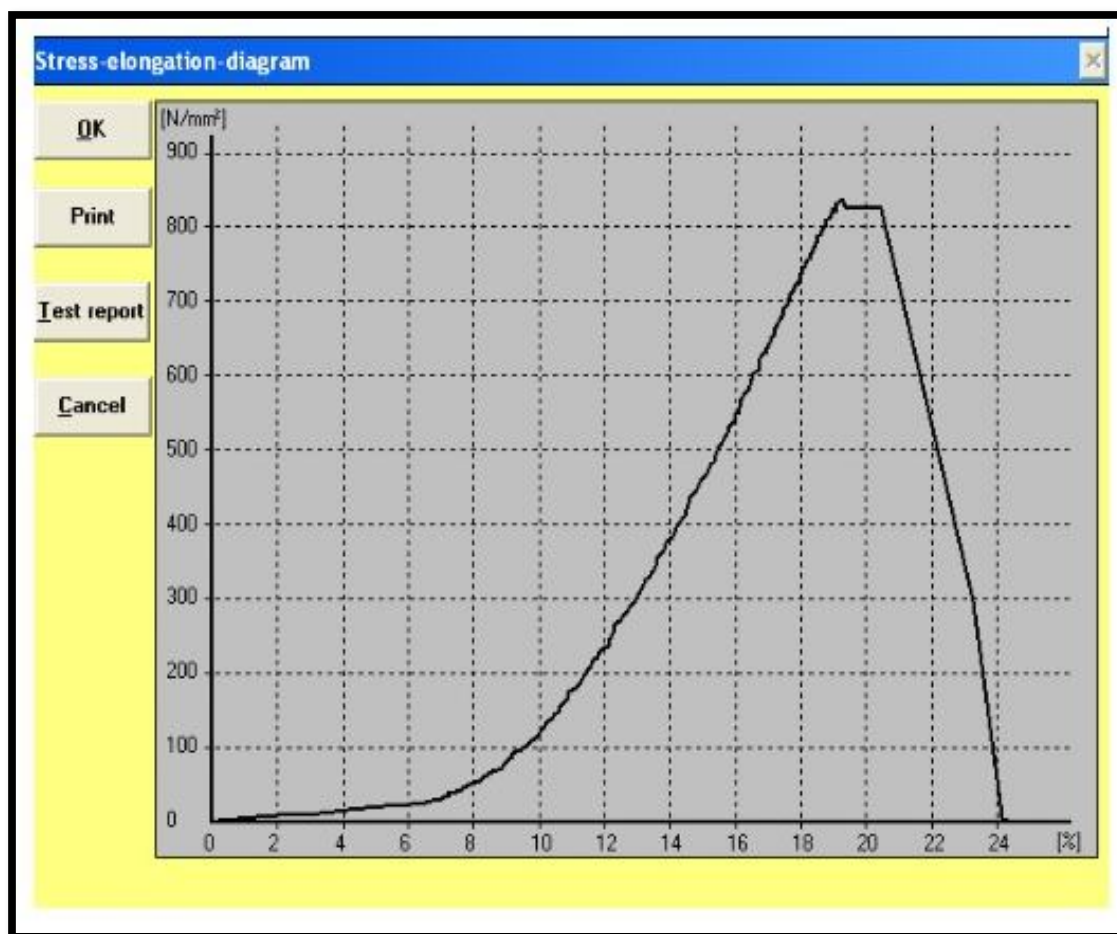


Figure 5.8 : courbe de contrainte-déformation σ (N/mm²) en fonction de ϵ (%)

5.5.2 : Champs de déplacement par la technique de corrélation d'images

La corrélation d'images est une technique assez nouvelle. Elle présente de grands avantages par rapport aux anciennes techniques d'extensomètre optique. Il s'agit de mesurer les champs de déplacements qui apparaissent lors d'un essai sur une éprouvette, à partir d'un film pris lors de l'expérience.

Dans le cadre de cette étude, un mouchetis a été projeté sur la zone d'étude de l'éprouvette permettant d'obtenir des grains noirs et blancs d'un diamètre moyen de l'ordre d'une dizaine de micron.

La surface de l'échantillon est éclairée en lumière blanche (figure.IIV.9) et les images sont stockées tout au long de l'essai grâce à une caméra reliée à un micro-ordinateur.

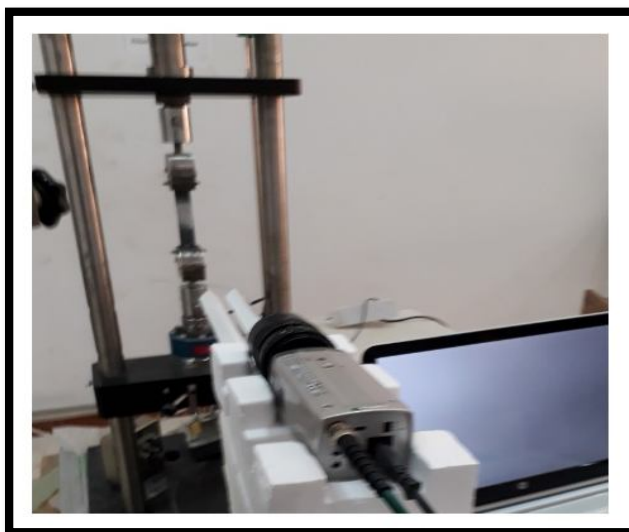


Figure 5.9 : positionner la caméra

Lors des essais, la caméra doit être correctement placée pour permettre une bonne mise au point (netteté) et une prise d'image perpendiculaire à la zone à étudier afin de permettre une numérisation réussie. Une zone d'étude ou masque (partie traitée) doit être renseignée pour le traitement des images.

Ce masque peut avoir différentes formes et permet de s'intéresser à une zone locale bien déterminée. La deuxième étape consiste à renseigner le logiciel d'acquisition et de traitement d'images sur l'intervalle de temps entre deux images successives. Pour l'ensemble des essais nous avons opté pour un temps de deux secondes. En effet, pour la plupart des configurations des éprouvettes, et avec une vitesse de déplacement de la traverse mobile de 1 mm/min, le choix d'une image toutes les deux secondes permet de limiter le volume moyen des fichiers informatiques à traiter.

La zone d'étude sur l'éprouvette couvre une surface d'environ (40×30) mm². Cette zone recouvre les parties de la soudure.

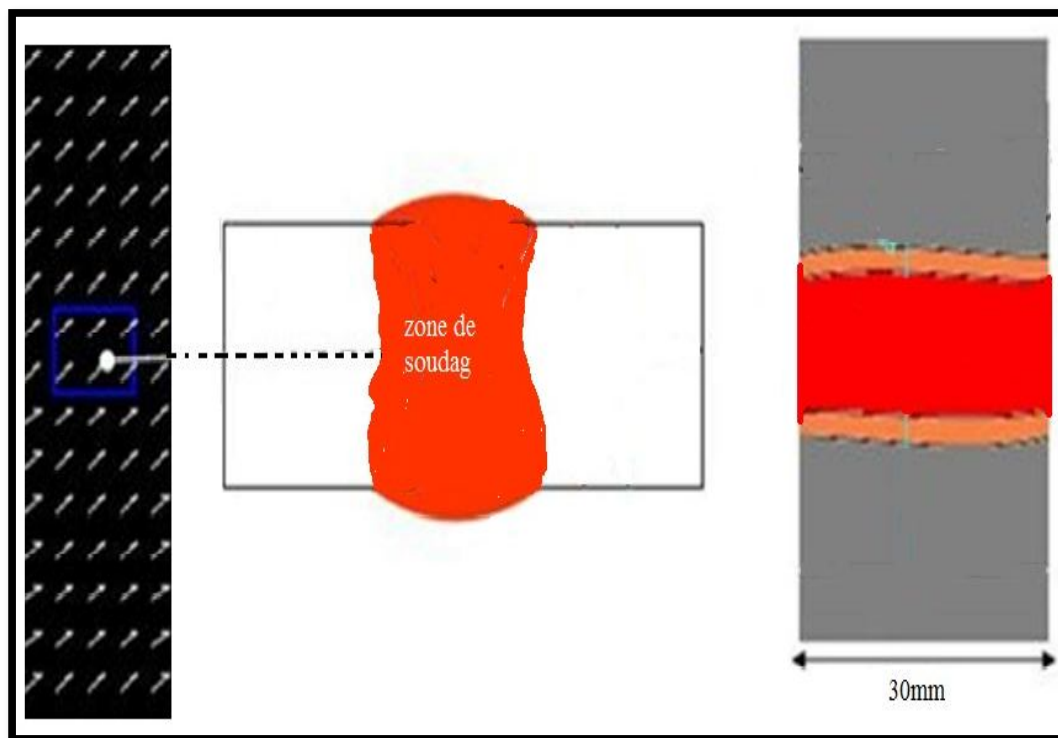


Figure 5.10: a) Champ des vecteurs de déplacement b) Profil du balayage pour le calcul des déformations locales. c) Zone d'étude (Masque)

Dans ce calcul, l'algorithme va comparer deux images successives, et à partir des écarts de luminosité, la valeur du déplacement est déduite. Ensuite, en comparant deux images successives (Figure. 11.a et 11.b), point entre un temps t_0 et un temps $t_0 + \Delta t$ pour le même point, cette opération est répétée pour les images suivantes.

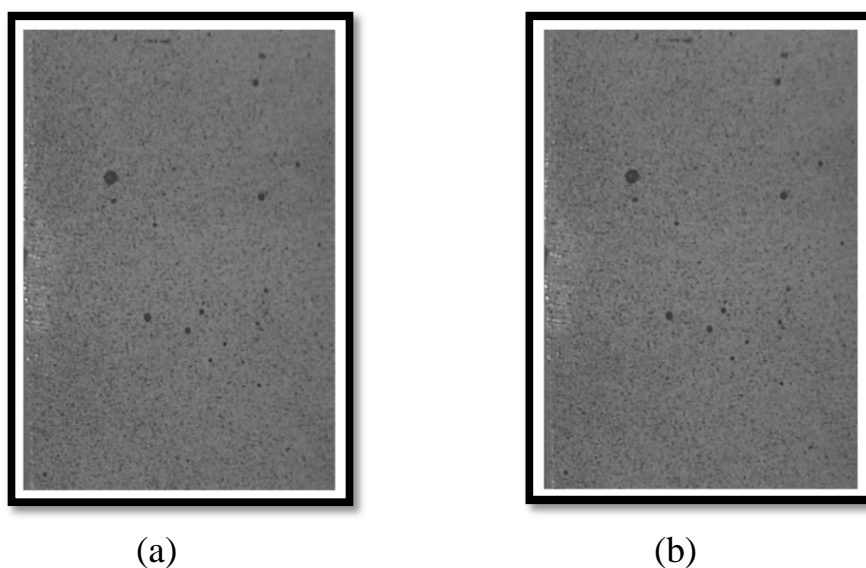


Figure 5.11 : a) Image référence (initiale), b) Image déformée (actuelle)

Pour traiter les images on utilise le logiciel de Matlab, on a capturé plus de 300 images divisées en trois groupes chaque groupe contient 100 images.

Nous avons étudié deux images successives de chaque groupe a titre d'exemple.

A : début de l'expérience

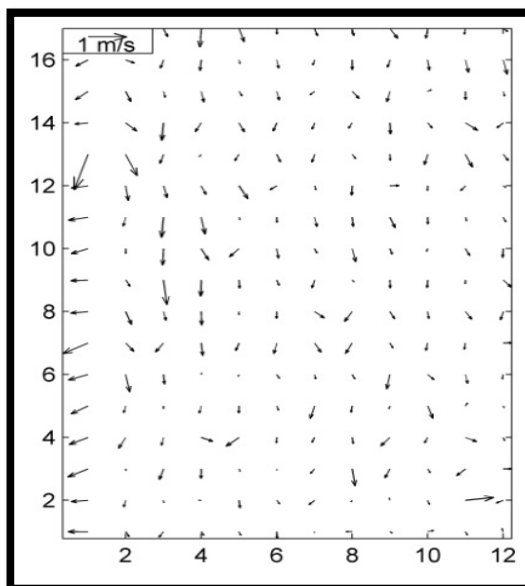


Figure 5.12 : Champ de déplacement en début de l'expérience



Figure 5.13 : Amplitude de déplacement en début de l'expérience

On remarque un déplacement de la deuxième image par rapport à la première image d'une valeur moyenne de 0.2 pixel.

B : milieu de l'expérience

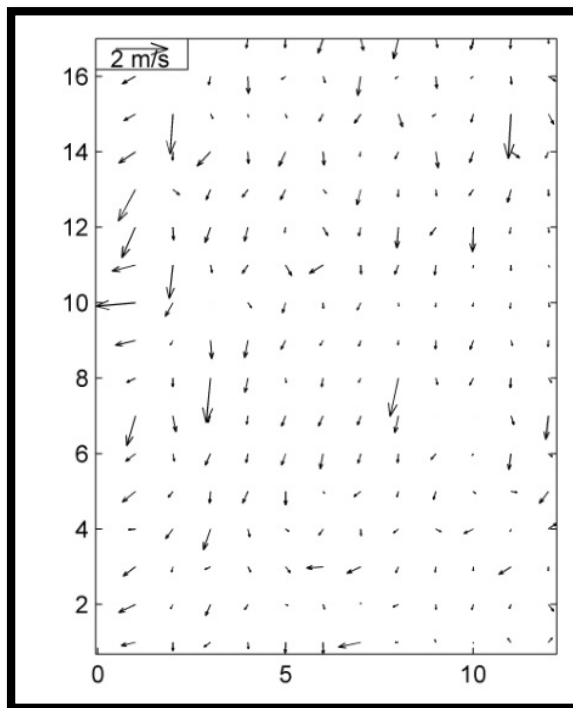


Figure 5.14 : Champ de déplacement en milieu de l'expérience

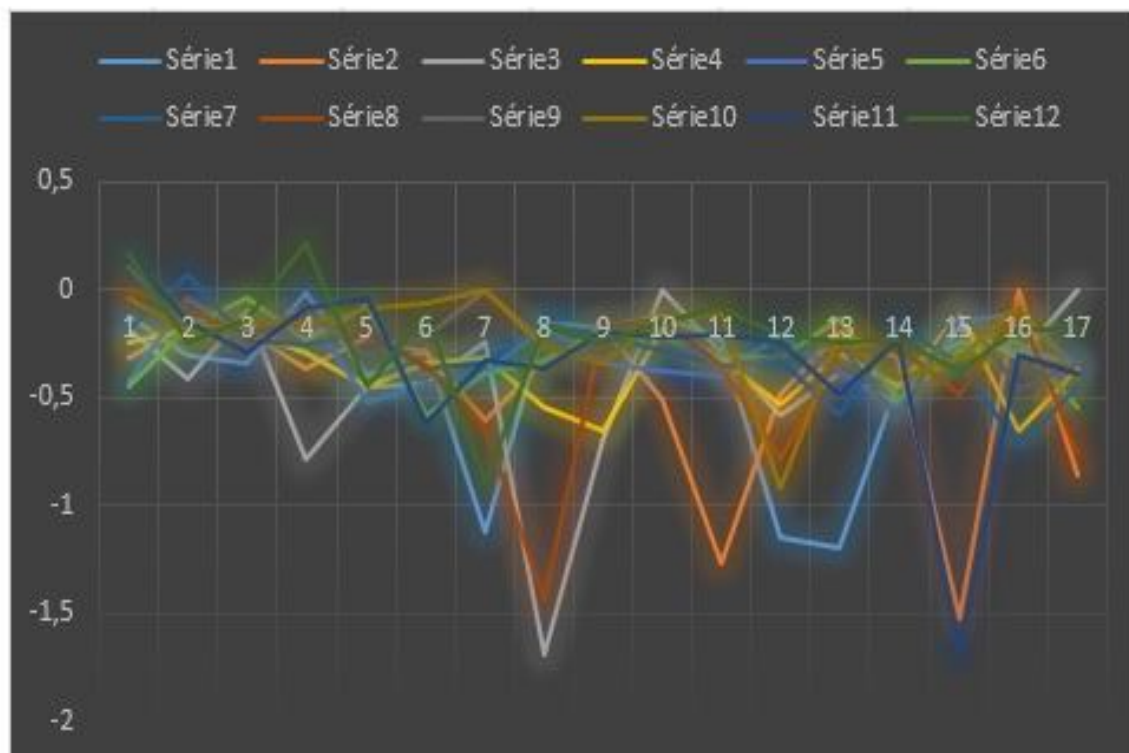


Figure 5.15 : Amplitude de déplacement en milieu de l'expérience

Dans l'échantillon prélevé dans le deuxième groupe, on remarque une augmentation de l'amplitude du déplacement de l'éprouvette avec une valeur moyenne de 0.5 pixel. Donc il y a évolution du champ de déplacement avec l'augmentation de la force de traction.

C : à la fin de l'expérience

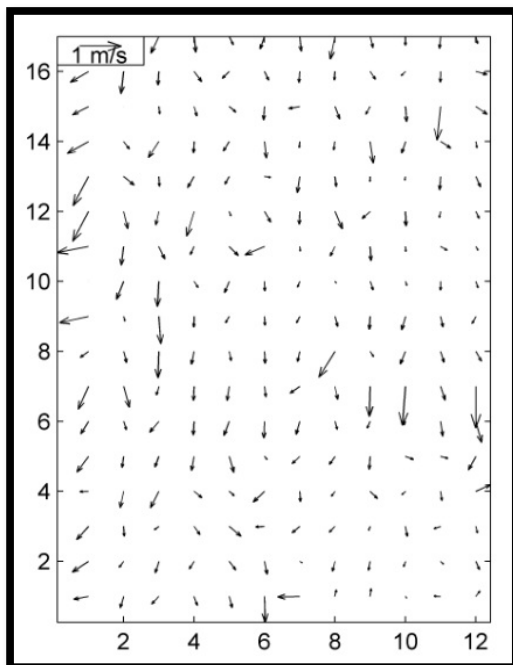


Figure 5.16 : Champ de déplacement à la fin de l'expérience

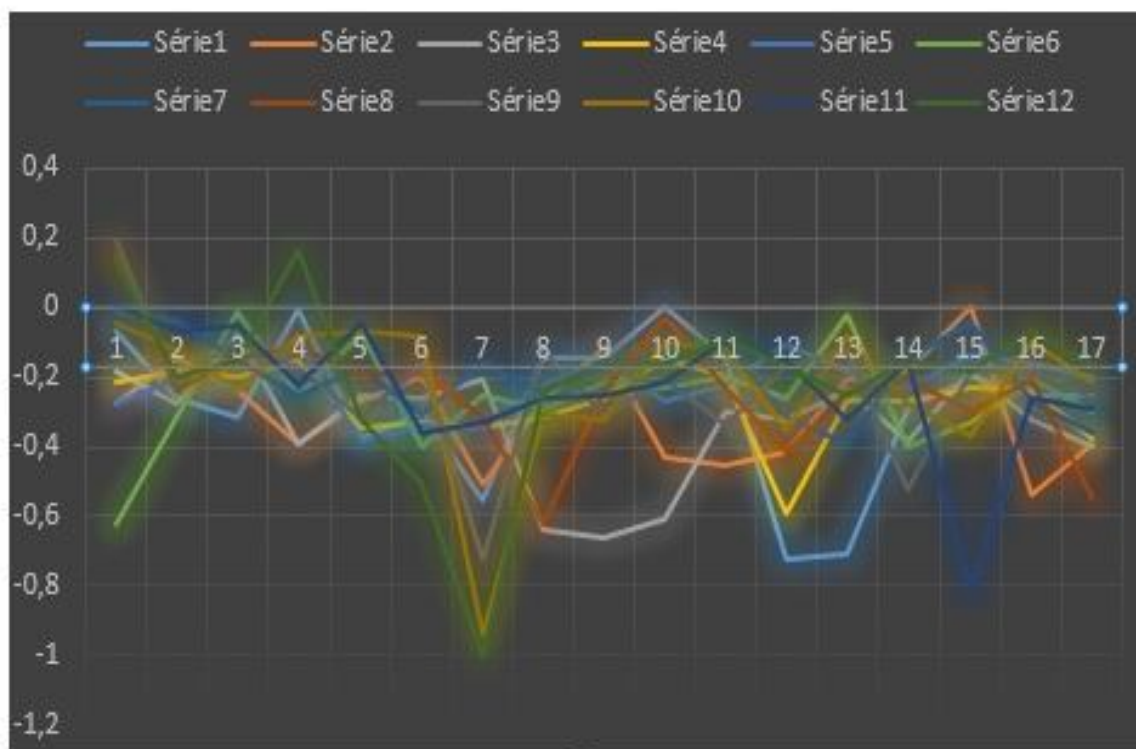


Figure 5.17 : Amplitude de déplacement à la fin de l'expérience

Dans la dernière séries de mesure, nous remarquons, en plus du déplacement moyen enregistré qui est de l'ordre de 0.2 pixel, nous constatons une amplification des déplacements au niveau de la zone d'images 7 jusqu'à un déplacement de l'ordre de 0.9 pixel.

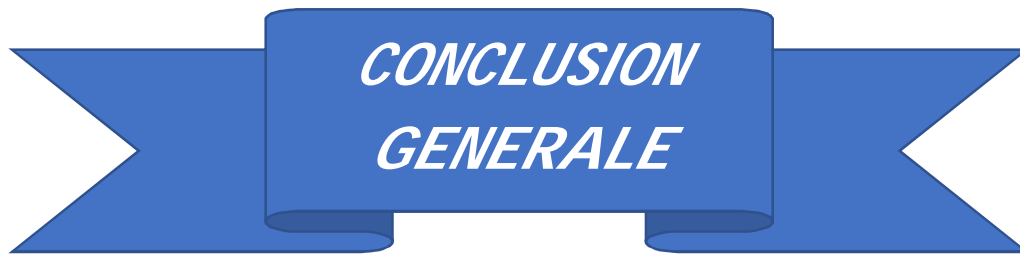
Cette zone correspond à la zone de soudure, d'où la rupture à commencer sur le côté droite de l'éprouvette comme le montre la figure IIV.16.

5.6 : Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats expérimentaux de l'essai de traction, par corrélation d'images. Le calcul des déplacements par corrélation d'images numériques nous a permis d'analyser qualitativement le champ de déplacement d'une éprouvette soumise à un essai de traction.

L'allongement de l'éprouvette peut être déterminé en calculons la somme des déplacements de tous les images successives par rapport à une image de référence.

Le champ de déformation nous a permis de prédire la zone de rupture de l'éprouvette.



CONCLUSION GENERALE

L'objectif de cette étude est de déterminer une carte de déformations d'une éprouvette soudée en acier type E24. Les travaux réalisés nous ont permis de montrer que :

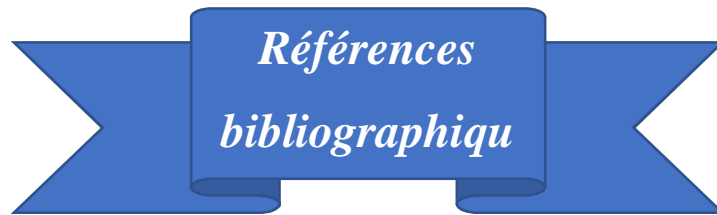
L'essai de traction assisté par le logiciel de corrélation d'image réalisé sur le matériau étudié E24, nous a permis de déterminer le champ de déplacements et le champ de déformations avec précision.

La technique de corrélation d'images permettent de mesurer les déformations des objets (structures ou éprouvettes) avec performance. Les mesures ponctuelles sont complétées aujourd'hui par des possibilités de mesures de champ, mais Les informations apportées sont toujours relatives aux déformations à la surface de l'objet. L'avenir permettra peut-être d'accéder à des informations de volume.

L'essai de traction réalisé sur E24, mené sur éprouvette rectangulaire normalisée et soudée, met en évidence les effets génériques de l'écrouissage :

- Durcissement par effet direct de l'augmentation de la densité de dislocations
- Chute de la ductilité par augmentation de la cinétique d'endommagement intergranulaire.
- Renforce considérablement la résistance à la déformation de l'acier étudié.

Les aciers d'usage générale sont des solutions solides de structure cubique à faces centrées possédant une forte capacité d'écrouissage liée à leur faible énergie de faute d'empilement



*Références
bibliographiques*

- [1] G. BERANGER, « Génialité Dès L'acier », Epp 22. Sollac. (1996).
- [2] A. ROOS, « Précis De Métallurgie Appliquée ». Edition Technique Et Documentation-Lavoisier (1982).
- [3] R. STEINER, « Properties And Sélection: Irons Steels And High Performance Alloys Volume
- [4] De 10 Em Edition Metals Handbook International American Society of Matériels, (1990). Disponible En Ligne Sur Le Site : [Http://Www.Totalmateria.Com/Articles/Art62.Htm](http://Www.Totalmateria.Com/Articles/Art62.Htm)
- [5] A. BOUMARAF, « Effet De Soudage Sur La Structure D'un Acier Faiblement Allié (Bs2) Utilise Dans La Fabrication Des Bouteilles A Gaz », Mémoire De Master En Génie Mécanique, Université Mohamed Khider Biskra, (2015).
- [6] R. VILLEGAS, « Genèse De La Ferrite Aciculaire Dans Les Aciers A Moyen Carbone Microalliés Au Vanadium. Morphologie Fractale En Relation Avec Les Propriétés Mécaniques. Thèse De Doctorat De Ltnpl (Institut National Polytechnique De Lorraine), (2007).
- [7] H. Michel-Montrieux, Physique des Matériaux, Université de Liège, labo1.pdf.
- [8] S. Bensaada, Elaboration Des Métaux Ferreux (FONTES ET ACIERS).
- [9] S. Bensaada, Traitements Thermiques, Classification Et Désignation Des Aciers Et Fontes.
- [10] CH. Harkati (1998), Thèse de magistère, Université de Constantine.
- [12] G. Béranger, G. Henry, G. Sauz (1994), le livre de l'acier, Ed Technique et documentation-lavoisier, Paris.
- [13] G. MURRY, « Transformations Dans Les Aciers », Techniques De L'ingénieur, MI 115, Centre Français D'exploitation (2002).
- [14] G. MURRY, « Généralités Sur Aciers », Techniques De L'ingénieur, Centre Français d'exploitation, (2002).
- [16] S. WEI ET S. LU « Effects Of Multiple Normalizing Processes On The Microstructure And Mechanical Properties Of Low Carbon Steel Weld Metal With And Without Nb », Journal Of Materials And Design, Vol 35, pp 43–54, (2012).
- [17] W. ZHANG, J.W. ELMER ET T. DEBROY « Modeling And Real Time Mapping Of Phases During Gta Welding Of 1005 Steel », Materials Science And Engineering A, Vol 333 ,pp 320-335, (2002).
- [18] R. VARISELLAZ. Soudage élément de conception et de réalisation, Dunod 1987

- [19] C.LEYMONIE , R.BOUVEROT. Contribution à l'étude des traitements thermiques après soudage d'aciers faiblement alliés. Soudage et techniques connexes N°1/2 1970
- [20] P.BERTHET. Déformations et contraintes en soudage, publications de la soudure autogène EYROLLES 1988
- [21] H. GRANJON. Bases métallurgiques de soudage, publications de soudage et de ses applications 1995.
- [22/14] M. Blétry, Méthodes de caractérisation mécanique des matériaux, Ellipses, (2006-2007).
- [23/17] R.Moulart, Thèse de Doctorat, ENSAM.Paris, (2007).
- [24/13] H.Ait-Amokhtar, thèse de Doctorat, Université de Béjaia, (2006).
- [12/25] C.Boris et V.Pierre, Granularité laser et interférence de speckles, Bulletin de l'Union des Physiciens N°101, p.1101-1121, (2009).
- [19/26] P. SMIGIELSKI, F. ALBE, B. DISCHLI, Progress in holographic and inteferometric endoscopy Holographics Int."2, London, 26-29 July, 1992. Proceedings SPIE Vol. 1732
- [21/27] P.Vacher , S.Dumoulin, et S.M.Touchal, Bidimensional strain measurement using digital images, PIME ,Vol 213, Part C, p.811-817, (1999).
- [20/28] N.Amatous, mécanique des milieux continus, cours 3eme année license,2010-2011.

ملخص

تهدف هذه الدراسة حساب الانتقالات والتشوهات التي تظهر خلا اجراء عملية الشد على عينة من الحديد الصلب ذو الاستعمال العام بتملحيمها بمعدن النحاس، مستعملين الة الشد مربوطة بجهاز كمبيوتر مزود ببرنامج القياس وقمنا بتسليك كاميرا ذات دقة على مساحة التلحيم والتي تمكننا من ملاحظة الانتقالات الحاصلة على مستوى منطقة التلحيم

الكلمات المفتاحية: صلب ذو استعمال عام، تلحيم، انتقالات،

Résumé

L'objectif de cette étude est la détermination d'une carte de champs de déplacements et de déformations, suite à un essai de traction sur une éprouvette soudée d'un acier d'usage générale E24. Une machine de traction assistée par un logiciel de corrélation d'image numérique nommé « Sony » a été utilisée.

Ce logiciel va comparer deux images successives et nous fournit les déplacements des différents points dans la soudure. Il calcul également les déformations locales dans les différentes zones de la soudure. Les résultats obtenus montrent que ces déformations sont faibles dans le métal de base, elles sont de plus en plus importantes en s'approchant de la zone fondue.

Mots clefs : Acier d'usage générale E24, soudage, déformation, corrélation d'images.

Abstract

The objective of this study is the determination of a map of displacement fields and deformations, following a tensile test on a welded specimen of a steel of general use E24. traction machine assisted by digital image correlation software named "Sony" was used.

This software will compare two successive images and provides us with the displacements of the different points in the welding. It also calculates the local deformations in the different areas of the weld. The results obtained show that these deformations are weak in the base metal, they are more and more important when approaching the melted zone.

Key words: E24 general purpose steel, welding, warping, image correlation.