



MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITÉ «Abbes LAGHROUR» KHENCHELA  
FACULTÉ DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE



Département de Génie Mécanique

N° de série :.....

## Mémoire de fin d'études

*Pour l'obtention du diplôme de Master (L.M.D)*

**Spécialité : Génie mécaniques**

**Option : Génie des matériaux**

# Cémentation d'un acier obtenu par fabrication additive : microstructure et propriétés mécaniques

*Réalisé par : REKKAB Khawla*

*Dirigé par : Dr. ATHMANI Moussa*

*Membres de jury :*

***Président***

***Dr. GHILANI Laala***

***UNIV Khenchela***

***Encadreur***

***Dr. ATHMANI Moussa***

***UNIV Khenchela***

***Co-encadreur***

***Dr. KAHLOUCHE Abdessalam***

***URFA/CRTI-Setif***

***Examineur***

***Dr. FELLAH Mamoun***

***UNIV Khenchela***

*Année universitaire : 2024/2025*



## *Remerciements*

À l'âme de mon père.

Celui qui m'a transmis les valeurs de l'effort, du respect et de la persévérance. Celui qui a cru en moi, même en silence, et dont les sacrifices m'ont permis d'arriver jusqu'ici. Papa, tu n'es plus là pour partager cette réussite, mais elle porte ton nom, ton empreinte, et tout ton amour.

À ma mère, mon pilier, mon refuge, ma force. Pour chaque mot d'encouragement, chaque prière, chaque larme discrète versée dans mes moments de doute.

À mes frères, Idriss et Mossaab, pour leur présence rassurante, leurs sourires, leur patience.

Et à mes amies chères à mon cœur : Asma, Selma, Asmahan, et Manar. Merci d'avoir été mes sœurs de cœur, mes repères dans les tempêtes, mes rires dans les nuits de stress.

Ce mémoire est pour vous, avec tout mon amour.

# Dédicace

---

Avant tout, je rends grâce à Dieu, qui m'a accordé la force, le courage et l'endurance  
nécessaire pour mener à bien ce travail.

Mes remerciements les plus sincères vont à mon encadrant, Monsieur ATHMANI MOUSSA,  
pour son accompagnement, ses conseils pertinents, et sa disponibilité continue.

Une pensée toute particulière à mes amies formidables : Asma, Selma, Ismahan et Manar.  
Merci pour votre présence constante, vos encouragements, vos rires partagés et votre amitié  
précieuse qui m'ont portée dans les moments les plus intenses de cette aventure.

À ma famille, ma force et mon équilibre : ma mère, qui a été le soutien indéfectible, le  
moteur de mes efforts, la lumière dans mes journées sombres. Idriss et Mossaab, mes frères  
aimants, je vous remercie pour votre bienveillance, votre humour et votre patience.

Enfin, à mon père, qui continue de vivre en moi, dans chacun de mes pas. Ce travail, c'est  
aussi le tien. Merci pour tout, Papa.



---

# Table des matières

---

---

---

## Table des matières

---

### Table des matières

Remercîment

Dédicace

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des symboles et des abréviations

Introduction générale .....	1
Chapitre 1 : Recherche bibliographique .....	3
I.1. Introduction.....	3
I.2. La fabrication additive.....	3
I.2.1. Historique.....	3
I.2.2. Définition de la fabrication additive .....	3
I.2.3. Wire arc additive manufacturing (WAAM) .....	5
I.2.4. Le procédé MIG/MAG .....	6
I.2.5. La fabrication additive par CMT .....	7
I.2.5.1. Principe du procédé Cold Metal Transfer (CMT) .....	7
I.2.5.2. Caractéristique des aciers obtenus par CMT .....	9
I.2.5.3. Future tendances du CMT .....	11
I.3. La cémentation des aciers .....	11
I.3.1. Définition .....	11
I.3.2. Techniques de cémentation.....	11
I.3.2.1. La cémentation en caisse .....	11
I.3.2.2. Cémentation liquide.....	12
I.3.2.3. La cémentation gazeuse.....	12
I.3.2.4. La cémentation ionique.....	13
I.3.3. Profondeur conventionnelle de cémentation .....	14
I.3.4. Mécanisme de la formation de la couche cimentée .....	15

## Table des matières

---

I.3.5. Aciers de cémentation.....	16
I.3.6. Traitements thermiques après cémentation .....	16
I.3.7. Effets de la cémentation sur la microstructure des aciers.....	17
I.4. Propriétés ciblées .....	18
I.4.1. Résistance à l'usure .....	18
I.4.1.1 Mécanismes d'usure .....	18
a. Usure par abrasion.....	19
b. Usure par adhésion .....	20
c. Usure par érosion.....	20
d. Usure par fatigue de surface.....	21
e. Usure par corrosion .....	21
I.5. Travaux similaires.....	21
I.6. Conclusion .....	22
Chapitre 2 : Matériaux et méthodes .....	24
II.1. Introduction .....	24
II.2. Matériaux utilisés .....	24
II.3. Élaboration des échantillons.....	24
II.4. Présentation du procédé WAAM par CMT.....	25
II.5. Technique de préparation .....	25
II.5.1. Découpage des échantillons .....	26
II.5.2. Polissage .....	26
II.5.3. Traitement thermique d'homogénéisation .....	26
II.5.4. Traitement de cémentation gazeuse .....	27
II.5.5. Trempe et Revenu.....	28
II.6. Caractérisation microstructurale .....	29
II.6.1. Microscopie optique (MO).....	29
II.6.2. Détermination des phases en présence par diffraction des Rayons-X .....	29
II.7. Résistance à l'usure (Dispositif expérimental) .....	31
Chapitre 3: Résultats et discussions .....	34

## Table des matières

---

III.1 Introduction .....	34
III.2 Caractérisation microstructurale .....	34
III.2.1 Analyse par microscope optique .....	34
III.2.2 Après traitement thermique.....	35
III.2.3 Analyse par diffraction des rayons X.....	35
III.2.4 Etat cimentée .....	37
III.2.5 Analyse par diffraction des rayons X de l'état cimentée .....	38
III.3 Analyse de la microdureté.....	39
III.4 Analyse du comportement à l'usure .....	40
III.4.1 Coefficient de frottement .....	41
III.4.2 Volume de matière usée .....	42
Conclusion générale .....	45
Références bibliographiques .....	47

# Liste des figures

---

## Liste des figures

Figure I.1: Principe de la fabrication additive. ....	4
Figure I.2: Les principales technologies de fabrication additive métallique.	5
Figure I.3: Principe de la technologie WAAM. ....	6
Figure 4: Descriptif d'une installation MIG/MAG. ....	6
Figure I.5 : Schéma du principe de déposition couche par couche utilisé en CMT. ....	7
Figure I.6: (a) évolution de la vitesse de dévidage et des formes d'ondes de courant et de tension au cours du cycle de transfert d'une goutte de métal liquide avec le procédé CMT / (b) visualisation in-situ de dépôt par CMT.	9
Figure I.7 : micrographie optique de l'acier ER70S-6 obtenu par CMT.....	9
Figure I.8 : Exemples d'application du procédé CMT dans l'industrie aéronautique. ....	10
Figure I.9 : Microstructure d'une couche cémentée dans un milieu contenant CH <sub>4</sub> . ....	13
Figure I.10 : Micrographie d'une couche cémentée par plasma pendant 2 h d'un acier ....	14
Figure I.11 : Profondeur conventionnelle de cémentation ....	14
Figure I.12 : Profondeur de la couche cémentée ....	16
Figure I.13: L'importance relative des mécanismes d'usure dans l'industrie. ....	19
Figure I.14: Mécanisme d'usure abrasive à deux corps et d'usure abrasive à trois corps. ....	19
Figure II.1 : Description de la technique CMT. ....	25
Figure II.2: Polisseuse HITECH. ....	26
Figure II.3 : four de traitement thermique. ....	27
Figure II.4 : armoire de régulation thermique et panneau de régulation des gaz d'un four de cémentation. ....	27

# Liste des figures

---

Figure II.5 : Four de cémentation.....	28
Figure II.6 : Microscope métallographique. ....	29
Figure II.7 : Diffractomètre des rayons X « RIGAKU-MINIFLIX 600 ». ....	30
Figure II.8 : Duromètre ‘Wolpert’. ....	31
Figure II.9 : tribomètre multifonctionnel MFT-5000. ....	32
Figure III.1 : Micrographie optique de l’acier ER70-S6 à l’état brut.....	34
Figure III.2 : Micrographie optique de l’acier ER70-S6 après traitement thermique.....	35
Figure III.3 : Diffractogrammes de l’acier ER70-S6 à l’état brute (Br) et après traitement (BT) thermique à 850 °C pendant 45 min.....	36
Figure III.4 : Décalage du pique $2\theta = 44,6^\circ$ après traitement thermique ..	37
Figure III.5 : Micrographies optiques de l’acier ER70 S-6 après cémentation gazeuse (a et b: Brut + cémentation, c et d: traitement thermique + cémentation) .....	38
Figure III.6 : Diffractogrammes de l’acier ER70-S6 après cémentation....	39
Figure III.7 : Microdureté de l’acier ER70-S6 après cémentation gazeuse pendant 5 h. ....	40
Figure III.8 : Coefficient de frottement de l’acier ER70-S6 après différents traitements. ....	41
Figure III.9 : Volume usé après teste d’usure de l’acier ER70S-6 après différents traitements.....	42

# Liste des tableaux

---

## Liste des tableaux

Tableau I.1: Les nuances des aciers de cémentation. ....	16
Tableau II.1 : la composition chimique de l'acier ER70S-6.....	24

# Liste des symboles et des abréviations

---

## Liste des symboles et des abréviations

<b>Symbole</b>	<b>Signification</b>
T	Température en degrés Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ )
t	Temps de maintien ou de traitement (heures ou minutes)
d	Profondeur ou distance (mm)
HV	Dureté Vickers
$\sigma$	Contrainte mécanique (MPa)
$\varepsilon$	Déformation (sans unité)
f	Fréquence d'oscillation (Hz)
v	Vitesse de déplacement (mm/min)
$\rho$	Masse volumique ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
$\Delta m$	Perte de masse (mg)
$\mu$	Coefficient de frottement
Ra	Rugosité moyenne de surface ( $\mu\text{m}$ )
R	Résistance ( $\Omega$ )
E	Module d'élasticité (GPa)
C	Concentration massique ou atomique (%)
x	Position sur l'axe d'analyse (mm)

# Liste des symboles et des abréviations

---

<b>Abréviation</b>	<b>Signification</b>
FA	Fabrication Additive
CMT	Cold Metal Transfer
WAAM	Wire Arc Additive Manufacturing
ER70S-6	Fil d'apport en acier faiblement allié utilisé pour le soudage
MO	Microscopie Optique
DRX	Diffraction des Rayons X
TC	Échantillon traité thermiquement puis cémenté
BC	Échantillon brut cémenté
Br	Échantillon brut
BT	Échantillon brut traité thermiquement
CH <sub>4</sub>	Méthane
Nital	Réactif composé de l'acide nitrique et de l'éthanol utilisé pour l'attaque métallographique
H <sub>v</sub>	Dureté Vickers
MFT	Tribomètre multifonctionnel
MPa	Méga Pascal
µm	Micromètre



# **Introduction Générale**

# Introduction générale

---

## Introduction générale

La fabrication additive métallique a transformé les techniques de production en rendant possible la création de pièces complexes avec une large liberté géométrique et une optimisation des coûts des matériaux. Parmi les différentes méthodes, les techniques de dépôt de fil métallique sous atmosphère contrôlée, telles que le Cold Metal Transfer (CMT), offrent des bénéfices notables grâce à leur contrôle thermique maîtrisé et leur production minimale de défauts. Le CMT, grâce à son procédé de transfert de matière à froid pulsé, favorise l'obtention de dépôts métalliques sains tout en minimisant les distorsions résiduelles. Toutefois, les aciers produits de cette manière, tels que l'acier ER70S-6 fréquemment employé dans la construction par soudure, montrent souvent des caractéristiques mécaniques de surface insuffisantes pour des usages soumis à des contraintes sévères (frottement, impacts, fatigue).

Pour surmonter ces contraintes, la cémentation gazeuse apparaît comme une option technologique pertinente. Ce procédé thermo-chimique favorise l'enrichissement sélectif de la couche de surface en carbone, générant après la trempe une gradation maîtrisée des caractéristiques mécaniques. Dans le cas de l'acier ER70S-6 provenant du CMT, cette méthode pose deux difficultés majeures : gérer la relation entre la microstructure initiale (composée de ferrite et de perlite, possiblement accompagnées de phases secondaires) et la dispersion du carbone, tout en conservant les caractéristiques mécaniques générales du matériau. Pour atteindre un équilibre optimal entre dureté de surface et ténacité résiduelle, il sera nécessaire d'optimiser les paramètres cruciaux du traitement - température (850-950°C), durée (2-8h), composition atmosphérique (gaz enrichissant et diluant).

L'étude proposée se focalisera sur l'amélioration des propriétés structurales et mécaniques de l'acier ER70S-6 obtenu par CMT via la cémentation gazeuse. L'enjeu est d'établir des relations procédé-structure-propriétés spécifiques à ce couple matériau-traitement, avec des perspectives d'application dans la fabrication de composants critiques pour différents secteurs industriels.

Ce mémoire comprend trois chapitres. Tout d'abord un chapitre consacré à la présentation et la description de la technique de fabrication additive Cold-Metal-Transfert (CMT), puis une deuxième partie sur le traitement thermo-chimique de cémentation est présentée. Le deuxième chapitre présente les techniques expérimentales utilisées et les moyens de caractérisation microstructurale et mécanique. Le troisième chapitre est consacré à la présentation et l'interprétation des résultats obtenus. Enfin, ce mémoire s'achève par une conclusion générale.

*CHAPITRE I*

---

**Recherche bibliographique**

## **Chapitre 1 : Recherche bibliographique**

### **I.1. Introduction**

Cette étude débute par l'établissement d'un socle théorique rigoureux, indispensable à une compréhension approfondie des bases scientifiques, techniques et industrielles du sujet abordé. Ce premier chapitre est donc dédié à une recherche bibliographique exhaustive, visant à explorer les concepts clés associés à la fabrication additive, aux traitements thermochimiques des aciers, en particulier la cémentation, ainsi qu'aux propriétés métallurgiques et mécaniques qui en découlent. L'objectif principal est de dresser un état de l'art détaillé en retraçant les progrès technologiques, en décrivant les procédés impliqués et en analysant les enjeux relatifs aux performances des matériaux. Cette synthèse vise à établir un cadre de référence structuré, essentiel pour éclairer les choix méthodologiques et expérimentaux qui seront développés et justifiés dans la partie suivante.

### **I.2. La fabrication additive**

#### **I.2.1. Historique**

La fabrication additive est une technique de production par ajout successif de matière, apparue à la fin des années 1980 avec des procédés comme la stéréolithographie et le dépôt de fil fondu. D'abord utilisée pour le prototypage rapide en raison de performances mécaniques limitées, elle s'est diversifiée dans les années 1990-2000 avec de nouveaux procédés et matériaux. Aujourd'hui, elle permet de produire des pièces métalliques aux propriétés conformes aux exigences du concepteur, transformant ainsi le prototypage en véritable méthode de fabrication [1].

#### **I.2.2. Définition de la fabrication additive**

La norme NF E 67-001 définit la fabrication additive comme « l'ensemble des procédés permettant de fabriquer, couche par couche, par ajout de matière, un objet physique à partir d'un objet numérique » [2].

Cependant, si l'acception de la fabrication additive (FA) est aujourd'hui normalisée, il n'est pas rare que d'autres termes soient utilisés pour parler de cette technologie de fabrication. Les plus récurrents, bien que pouvant être parfois considérés comme réducteurs, sont :

- fabrication par couches
- impression 3D
- fabrication digitale
- prototypage rapide

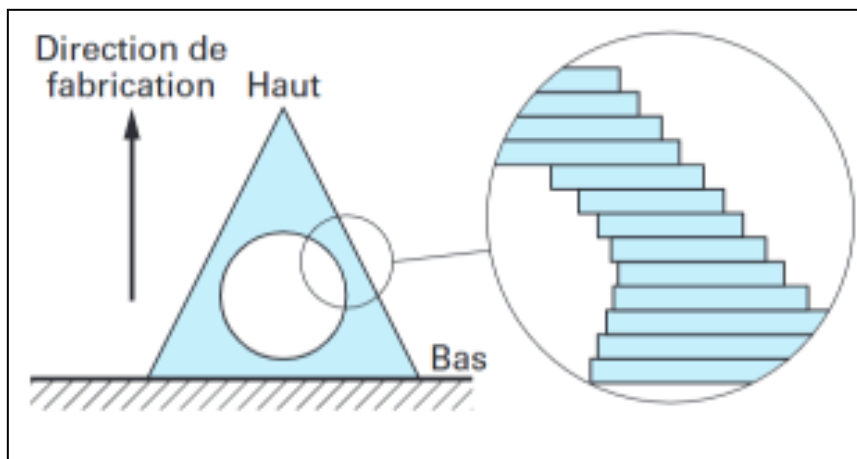
## Chapitre I : Recherche bibliographique

---

– production rapide.

La fabrication additive a montré une voie à la communauté scientifique et industrielle pour la formation directe de produits et a également remplacé les approches traditionnelles dans certains contextes industriels en minimisant la consommation de matériaux [3].

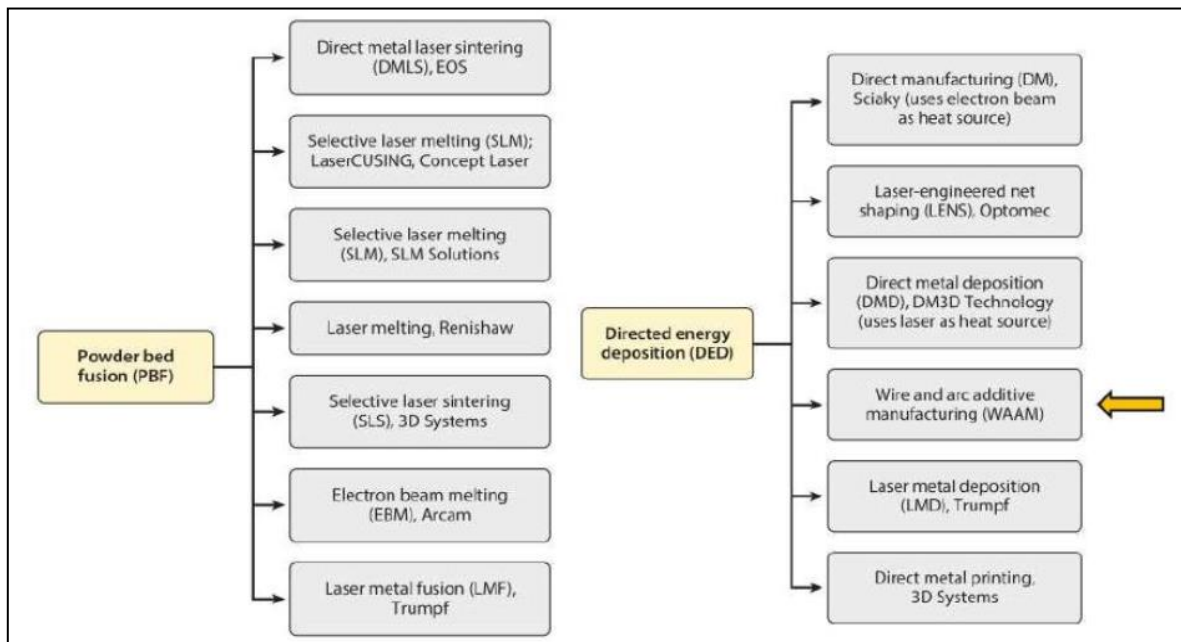
La fabrication additive est une méthode de production d'objets en trois dimensions à partir d'un fichier numérique. Cette technique est qualifiée d'additive car elle consiste à ajouter successivement de fines couches de matériau pour construire l'objet. La technologie peut produire des formes complexes impossibles avec les méthodes traditionnelles de moulage et d'usinage, ou avec les techniques soustractives .



**Figure I.1:** Principe de la fabrication additive.

La fabrication additive (FA) regroupe les procédés de production par ajout de couches successives de matériau, incluant polymères, céramiques, etc. Les technologies de fabrication additive métallique se divisent typiquement en deux grandes catégories (Figure 2): celles basées sur la fusion sur lit de poudre, communément appelées Powder Bed Fusion (PBF), et celles reposant sur le dépôt direct d'énergie, désignées sous le nom de Directed Energy Deposition (DED). Le PBF offre une grande précision et une bonne qualité de surface, tandis que le DED permet une production plus rapide grâce à des couches plus épaisses, au détriment de la précision. Le matériau y est déposé sous forme de poudre ou de fil, puis fondu par une source thermique comme un laser ou un arc électrique.

## Chapitre I : Recherche bibliographique



**Figure I.2:** Les principales technologies de fabrication additive métallique.

### I.2.3. Wire arc additive manufacturing (WAAM)

La fabrication additive par arc métallique (WAAM) est de plus en plus valorisée pour son efficacité. Elle offre des taux de dépôt élevés, une meilleure utilisation des matériaux, des délais de production réduits, des performances accrues des pièces et une diminution des coûts d'inventaire. Semblable au soudage, le procédé permet de fabriquer de grandes pièces couche par couche avec une complexité réduite [7].

Le procédé WAAM utilise le soudage à l'arc au gaz métallique (GMAW) et du fil métallique comme matière première pour fabriquer ou réparer des pièces en 3D. Il appartient à la famille des procédés de dépôt d'énergie directe (DED) selon la classification ASTM. Le WAAM est surtout adapté à la production de pièces de taille moyenne à grande, notamment dans l'aéronautique [8].

Le procédé WAAM permet un dépôt rapide de métal avec peu de déchets, réduisant ainsi les coûts et les délais par rapport aux méthodes traditionnelles. Il fonctionne par arc électrique entre une buse et le métal déjà déposé, guidé par un robot en couches 2D. La qualité des cordons dépend de paramètres comme la qualité du fil, les vitesses d'alimentation et de déplacement, et l'apport de chaleur, tous optimisés pour une meilleure géométrie. Des simulations permettent de prédire la solidification. Pour éviter les défauts (contraintes, porosités, manque de fusion), on ajuste les paramètres ou l'inclinaison de la buse. Les propriétés mécaniques finales reposent sur le bon contrôle de ces facteurs.[8].

## Chapitre I : Recherche bibliographique

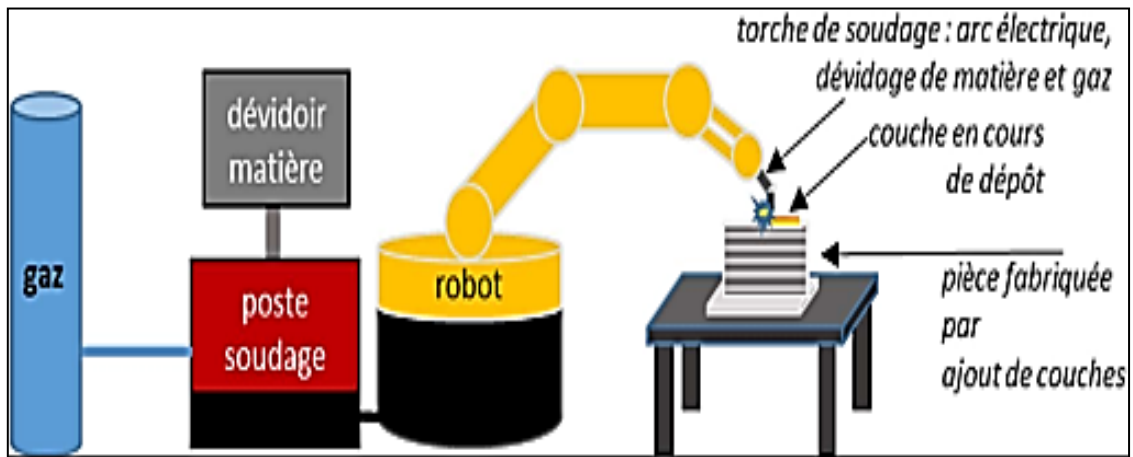


Figure I.3: Principe de la technologie WAAM.

### I.2.4. Le procédé MIG/MAG

Dans le procédé MIG/MAG, l'électrode fusible est un fil métallique alimenté par un dévidoir via une torche. Le contact électrique se fait par un tube contact, et la torche assure aussi l'arrivée du gaz, qui stabilise l'arc et protège le bain de fusion contre l'oxydation.

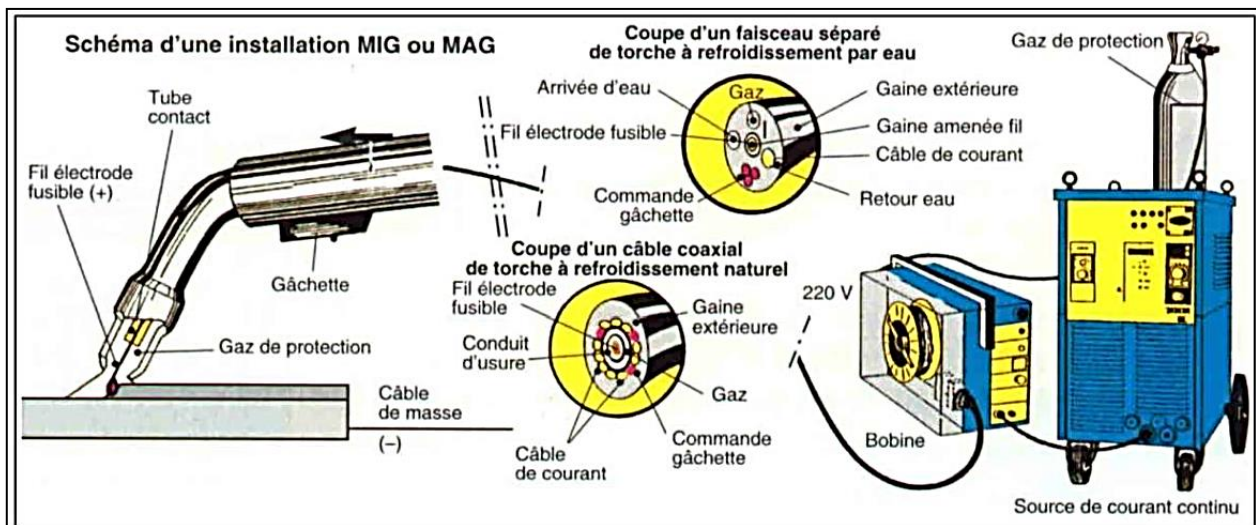


Figure 4: Descriptif d'une installation MIG/MAG.[9]

Le transfert de matière fondue permettant de former le dépôt peut se faire de différentes façons. Trois modes classiques de transfert de matière peuvent se mettre en place selon les réglages paramètres, avec par ordre croissant d'énergie utilisée et de quantité de matière déposée, les régimes court-circuit, globulaire et pulvérisation axiale. Des développements récents de générateurs ont permis de gérer différemment le transfert du métal [10]. Des « lois synergiques » ont ainsi été développées permettant, par l'intermédiaire de cartes électroniques, de contrôler avec une grande précision les évolutions de tension et d'intensité de l'arc électrique et la vitesse de dévidage du fil.

## Chapitre I : Recherche bibliographique

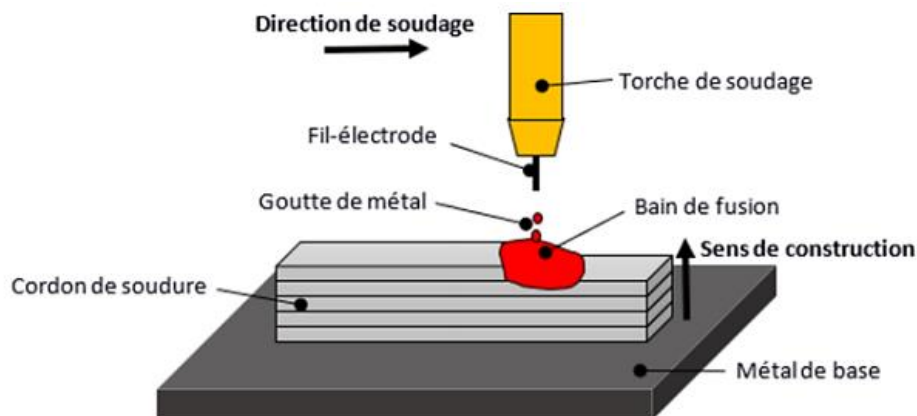
On peut notamment citer les synergies se basant sur des courants d'arc pulsés, mais aussi celles dont la vitesse et le sens de dévidage du fil sont paramétrables avec le poste. C'est le cas du procédé CMT utilisé dans le cadre de cette étude, et détaillé ci-après.

### I.2.5. La fabrication additive par CMT

Cette section présentera le sous-processus WAAM, appelé CMT, utilisé pour cette étude, ainsi que certaines de ses variantes, ses caractéristiques principales et les avantages de chacune.

#### I.2.5.1. Principe du procédé Cold Metal Transfer (CMT)

Le CMT est un soudage MIG-MAG amélioré, le principe de ce procédé repose sur un mouvement d'avance et de recul alterné du fil d'apport [11], qui facilite le détachement de la goutte fondue au bout du fil lors du court-circuit sans faire appel à des forces électromagnétiques. L'efficacité matérielle du procédé CMT est de 100 %. Il est utilisé dans des applications telles que l'aérospatiale, les ponts, les locomotives, les dispositifs microélectroniques et les structures en acier. La figure 5 montre le principe du procédé CMT.



**Figure I.5 :** Schéma du principe de dépôt couche par couche utilisé en CMT [4].

Le CMT est un procédé de soudage qui comprend un 'robacter drive' équipé d'un servomoteur. Lorsque la pointe du fil d'apport touche le bain de fusion, le servomoteur rétracte le fil, ce qui entraîne le transfert de gouttes. Lorsque la goutte est transférée, l'arc est rallumé et le fil est avancé pour le transfert suivant. Pendant le transfert, le courant chute presque à zéro, ce qui élimine les projections de gouttes dans le métal de base [12].

La régulation de l'arc électrique du CMT est réalisée via un contrôle des signaux électriques (tension et courant) ainsi qu'une action mécanique sur l'avance et le recul du fil. Par rapport au soudage MIG-MAG traditionnel, le CMT présente d'énormes avantages en termes de la stabilité de

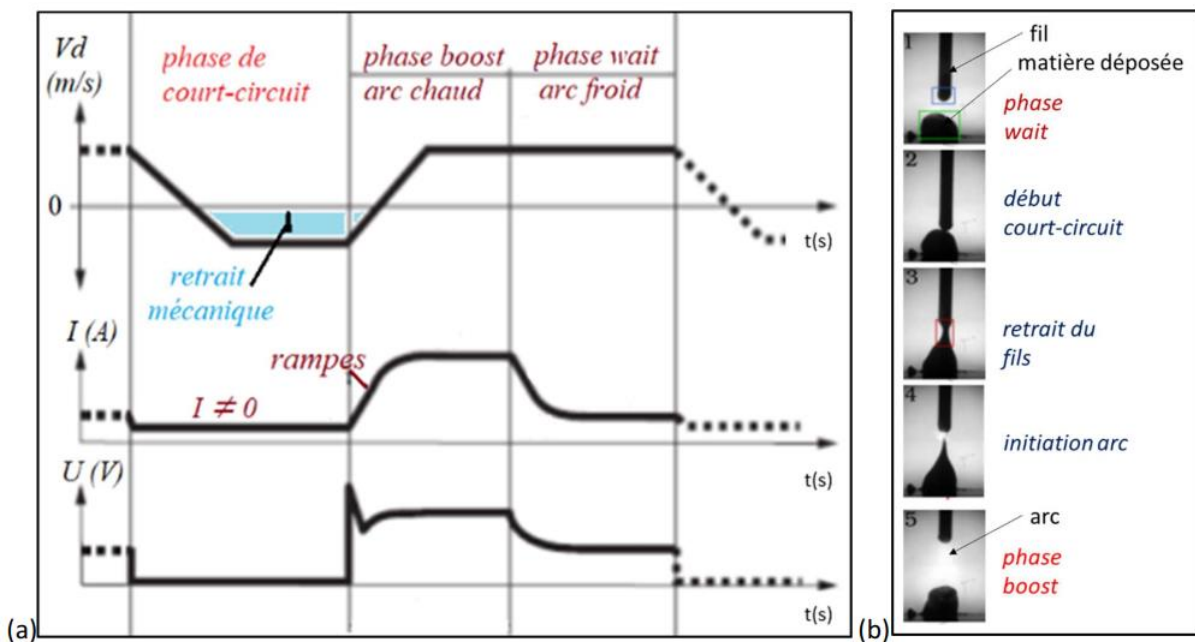
## Chapitre I : Recherche bibliographique

l'arc, la forte réduction de projections et la réduction de l'apport de chaleur, ceux qui le rendent particulièrement adapté au procédé FA [13].

Trois phases distinctes interviennent lors du transfert de matière avec le procédé CMT, elles sont schématisées Figure 6:

1. La phase « **boost** », appelée aussi d'arc chaud, est une phase au cours de laquelle l'arc électrique, de forte intensité, produit la fusion de l'extrémité du fil électrode, formant une goutte de métal liquide. Le réglage de l'intensité du courant et de la durée de cette phase permet de contrôler la taille et la température de la goutte de métal liquide, qui reste accrochée à l'extrémité du fil.
2. Durant la phase « **wait** », dite aussi d'arc froid, l'intensité est abaissée de manière à éviter le grossissement excessif de la gouttelette de métal liquide et son détachement, et le fil descend, jusqu'à entrer en contact avec le substrat ou le métal déjà déposé.
3. La phase de « **court-circuit** » démarre juste après le contact du fil. Le court-circuit produit l'extinction de l'arc électrique, et la tension devient presque nulle. Un courant de faible intensité est maintenu, de manière à assurer un apport de chaleur suffisant pour maintenir la gouttelette à l'état liquide. Le retrait mécanique du fil est alors activé, ce qui permet le transfert de la gouttelette liquide dans le bain sans projection.

Les nombreux paramètres contrôlant les formes d'ondes du courant et de la tension ainsi que le dévidage du fil sont programmés dans les lois synergiques intégrées au poste de soudage, mais ils peuvent aussi être modifiés par l'utilisateur.



## Chapitre I : Recherche bibliographique

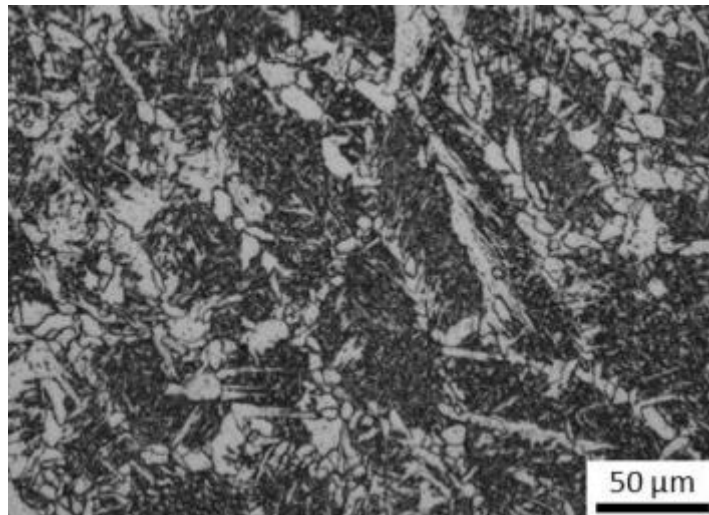
---

**Figure I.6:** (a) évolution de la vitesse de dévidage et des formes d'ondes de courant et de tension au cours du cycle de transfert d'une goutte de métal liquide avec le procédé CMT / (b) visualisation in-situ de dépôt par CMT [14].

### I.2.5.2. Caractéristique des aciers obtenus par CMT

L'acier obtenu par soudage selon le procédé Cold Metal Transfer (CMT) présente un ensemble de caractéristiques mécaniques et microstructurales distinctives, directement liées au faible apport thermique contrôlé du procédé. Grâce à son mode de transfert par court-circuit, le CMT génère une distorsion thermique minimale, des contraintes résiduelles réduites, et une excellente précision dimensionnelle, ce qui est crucial pour les applications de haute précision.

La microstructure est généralement constituée de grains colonnaires fins et de structures dendritiques se développant de manière épitaxiale à partir du substrat, en particulier dans les cas de dépôts multicouches ou de fabrication additive. Toutefois, en raison de la solidification rapide et des cycles thermiques inhérents au procédé, l'acier déposé présente souvent une dureté relativement élevée (par exemple, 200 à 250 HV pour les aciers doux) et une résistance à la traction modérée, généralement comprise entre 450 et 600 MPa selon l'alliage et les paramètres de dépôt [5]. La figure 7 présente les micrographies optiques de l'acier ER70S-6 obtenu par fabrication additive (CMT). On observe que la microstructure de l'acier est cellulaire/dendritique.



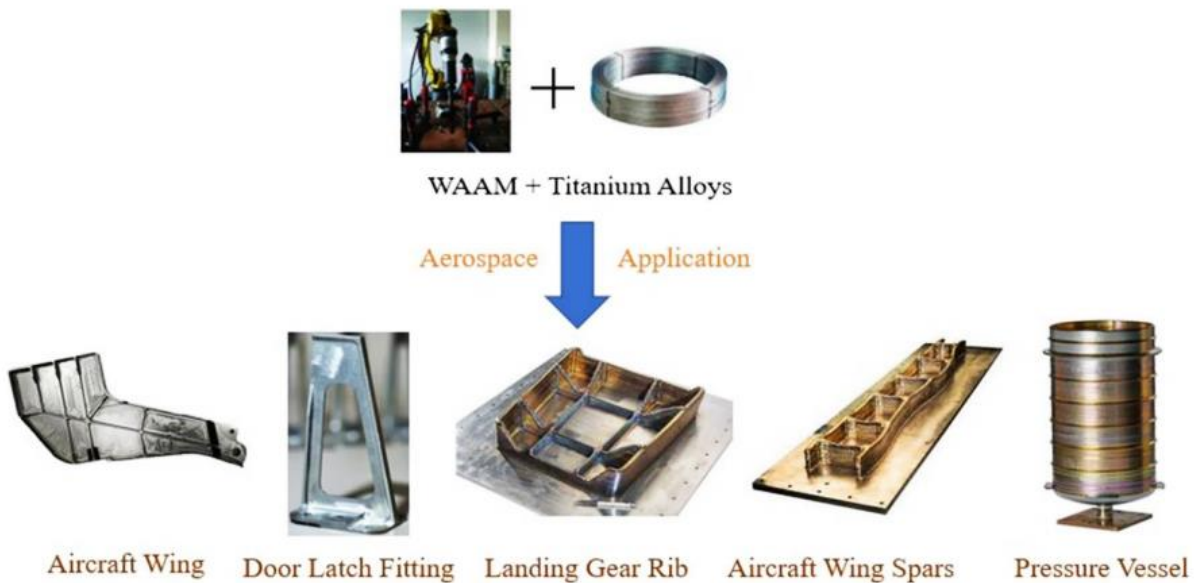
**Figure I.7 :** micrographie optique de l'acier ER70S-6 obtenu par CMT [6].

La ductilité et la résilience (résistance au choc) peuvent être réduites par rapport aux aciers traités par des procédés conventionnels, notamment à l'état brut de dépôt, en raison de la ségrégation d'éléments d'alliage, de l'anisotropie microstructurale et de la porosité. Ces effets peuvent toutefois

## Chapitre I : Recherche bibliographique

être atténués par des traitements thermiques post-soudage ou post-dépôt, tels que le revenu de normalisation ou l'austénitisation suivie d'une trempe et d'un revenu.

D'un point de vue industriel, le procédé CMT est largement utilisé dans les secteurs de l'automobile, de l'aéronautique, de la construction navale et de l'outillage, en particulier dans les applications de soudage de tôles fines, d'assemblage aluminium-acier, ou de fabrication additive de type WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing). Dans le secteur automobile, par exemple, le CMT est utilisé pour la fabrication de blanks soudés sur mesure, de composants d'échappement, ou de structures de châssis, en raison de sa capacité à assembler des matériaux dissemblables et à produire des cordons de soudure lisses avec très peu de projections[19]. La figure 8 montre quelques exemples du domaine d'application du CMT.



**Figure I.8 :** Exemples d'application du procédé CMT dans l'industrie aéronautique.

En fabrication additive, les aciers déposés par CMT trouvent des applications prometteuses dans la réparation de pièces de grande valeur, le prototypage rapide et la fabrication d'outillages sur mesure, où le contrôle couche par couche, la bonne finition de surface et l'efficacité d'utilisation du matériau sont essentiels. Le faible apport thermique et la possibilité de contrôle précis de l'arc rendent le procédé CMT particulièrement adapté au dépôt d'aciers faiblement alliés ou à faible teneur en carbone (par exemple ER70S-6), et même d'aciers à haute résistance avancés (AHSS), sans provoquer d'élargissement excessif du grain ni de dégradation de la zone affectée thermiquement.

## Chapitre I : Recherche bibliographique

---

### I.2.5.3. Future tendances du CMT

Les futures tendances du Cold Metal Transfer (CMT) s'orientent vers une plus grande précision, polyvalence et durabilité. L'hybridation CMT-laser combine précision et vitesse pour des applications aérospatiales et automobiles, tandis que les versions CMT Pulsé et Advanced améliorent le contrôle sur matériaux ultra-minces. L'intelligence artificielle révolutionne le procédé via des systèmes auto-adaptatifs et robots autonomes capables de corriger les défauts en temps réel. La fabrication additive WAAM-CMT émerge comme solution économique pour l'impression 3D de pièces métalliques grandes dimensions. Les développements se concentrent aussi sur les alliages innovants (aciers à haute entropie, aluminium) pour applications extrêmes (nucléaire, spatial), tandis que l'éco-soudage réduit l'empreinte carbone via des gaz optimisés et énergies renouvelables. Ces avancées positionnent le CMT comme technologie clé pour l'industrie 4.0 (quatrième révolution industrielle, caractérisée par l'intégration avancée des technologies numériques, intelligentes et connectées dans les processus de production), notamment en aérospatial, automobile et énergie, où précision, résistance et durabilité sont critiques.

### I.3. La cémentation des aciers

#### I.3.1. Définition

La cémentation est un procédé thermo-chimique de diffusion qui consiste à enrichir la surface de l'acier en carbone à une température comprise entre 850°C et 1000°C. Cette opération est généralement suivie d'une trempe et d'un revenu qui peuvent dans certains cas, être précédé d'un recuit d'adoucissement [15].

#### I.3.2. Techniques de cémentation

Les agents de cémentation peuvent être solides, liquides ou gazeux :

##### I.3.2.1. La cémentation en caisse

La cémentation en caisse consiste à placer les pièces dans une caisse fermée avec un ciment solide (charbon de bois + carbonate de baryum  $\text{BaCO}_3$  comme activateur). Le mélange peut être sous forme de granulés (60-75% charbon, 25-40%  $\text{BaCO}_3$ ) ou de morceaux de charbon enrobés. Porté à 900-950°C, le traitement dure environ 8 heures pour obtenir une profondeur de cémentation jusqu'à 1,6 mm. Ce procédé utilise des mélanges carbonés générant des gaz carburants (CO) en milieu confiné, d'où son nom. Peu employé aujourd'hui, il est réservé aux grosses pièces ou aux petites séries.

## Chapitre I : Recherche bibliographique

---

### I.3.2.2. Cémentation liquide

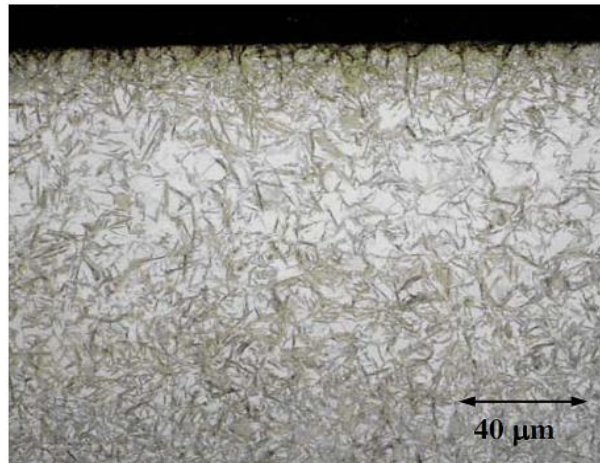
Les ciments liquides sont à bases de cyanures ou de ferro-cyanures fondus. Les pièces sont immergées dans le bain de sel fondu à la température choisie pour la réaction chimique et la diffusion. La cémentation en bain de sel permet un chauffage homogène et une action chimique régulière, sa mise en œuvre est simple et son coût d'investissement est faible, mais les sels de cyanure utilisés ont des effets polluants [17].

### I.3.2.3. La cémentation gazeuse

La cémentation gazeuse utilise soit le procédé à l'azote et méthanol, soit le procédé par générateur endothermique. Dans les deux cas, il se forme dans le four une atmosphère composée de monoxyde de carbone et d'hydrogène. L'opération s'effectue entre 900 °C et 950 °C et dure plusieurs heures [18].

Il s'agit là d'un procédé chimique de traitement superficiel, augmente la dureté superficielle par diffusion de carbone, améliorant ainsi la résistance à l'usure et à la fatigue. Les pièces, chauffées à haute température, sont exposées à une atmosphère carbonée pour permettre cette diffusion. Le traitement s'effectue généralement dans un four de trempe, où les pièces subissent une trempe immédiate après cémentation pour obtenir une structure martensitique. L'atmosphère riche en carbone est créée par l'ajout de gaz enrichi (gaz naturel ou air dilué) à un mélange gazeux endothermique (40 % N<sub>2</sub>, 40 % H<sub>2</sub>, 20 % CO, et < 0,1 % CO<sub>2</sub>) [16].

La cémentation gazeuse offre un contrôle précis de la profondeur de traitement et une exécution plus rapide que la cémentation en caisse, grâce à l'absence de temps de chauffe du matériau. Elle permet également un cycle de diffusion sans apport de gaz, réduisant la teneur en carbone en surface pour une transition plus progressive. Cependant, cette méthode nécessite des investissements lourds, la limitant aux grandes séries de production. L'analyse microstructural de la couche cémentée révèle la coexistence de la martensite et l'austénite résiduelle près de la surface (Figure 9).



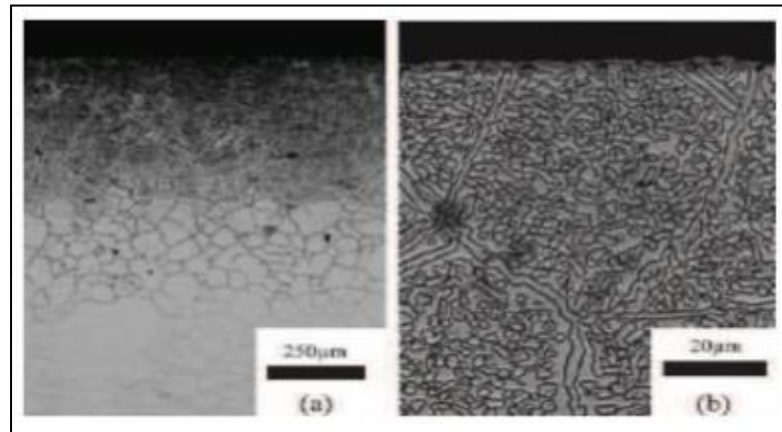
**Figure I.9 :** Microstructure d'une couche cémentée dans un milieu contenant  $\text{CH}_4$ .

### I.3.2.4. La cémentation ionique

Les cémentations « basse pression » et « assistée plasma ou ionique » sont utilisées pour le traitement de petites ou moyennes pièces. Elles permettent d'obtenir une bonne qualité de la couche cémentée qui conduit, grâce à l'absence d'oxydation interne, à des caractéristiques de tenue en fatigue supérieures à celles obtenues avec les autres procédés. Il est possible de le réaliser par ce procédé des sur-carburations (résistance à l'usure) [16].

Il s'agit d'un procédé relativement moderne utilisé pour cémenter les pièces dans un environnement sans oxydant. Le procédé est réalisé à température élevée dans un four à vide utilisant des gaz pulsés d'hydrocarbure tels que le propane, l'éthylène et l'acétylène. Les avantages principaux sont les suivants : une surface sans oxydant, une faible distorsion, une bonne finition, une bonne pénétration pour les formes complexes, des performances de traitement régulières et des temps de traitement améliorés. Ce procédé ne s'applique pas à tous les aciers ; il est principalement utilisé pour les pièces d'injection et de transmission dans les secteurs de l'automobile et de l'aérospatial. Étant donné la pression de trempe relativement faible, le traitement n'est pas universellement appliqué à tous les types d'alliages et d'aciers. Il existe toutefois des fours sous vide avec trempe à l'huile, et qui sont de plus en plus populaires en termes d'utilisation pour l'exécution de ce traitement.

## Chapitre I : Recherche bibliographique

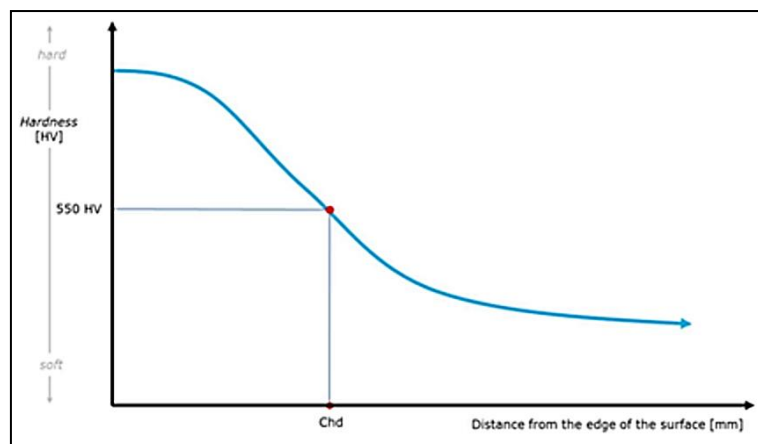


**Figure I.10 :** Micrographie d'une couche cémentée par plasma pendant 2 h d'un acier .

### I.3.3. Profondeur conventionnelle de cémentation

La profondeur conventionnelle de cémentation est définie par la distance entre la surface et la couche dont la dureté Vickers est  $HV = 550$  lorsqu'on la mesure sous une charge de 9.807 N. Cette profondeur dépend donc du profil de la teneur en carbone, du degré de transformation martensitique des divers points de la couche enrichie et de la présence éventuelle d'austénite résiduelle [17].

La profondeur de cémentation est plus grande après un long temps de maintien et un potentiel élevé de carbone produit une quantité élevée de carbone en surface. Le choix de l'atmosphère a également une grande influence sur le processus de cémentation. Les différentes atmosphères employées dans l'industrie de cémentation impliquent la dissociation des composants de l'atmosphère en surface de l'acier ; ainsi le carbone libéré est aisément dissous par la phase d'austénite et peut diffuser dans la pièce [21]. En outre, certains éléments d'alliage peuvent agir d'une manière sensible sur la vitesse de diffusion du carbone au cours de la cémentation [22].



**Figure I.11 :** Profondeur conventionnelle de cémentation [22].

### I.3.4. Mécanisme de la formation de la couche cémentée

La cémentation est basée essentiellement sur la diffusion du carbone dans l'acier et elle n'est possible que lorsque le carbone se trouve à l'état atomique, obtenu, par exemple par dissociation des gaz contenant du carbone sous forme de CO, CH<sub>4</sub>... etc. Le carbone atomique absorbé par la surface de l'acier diffuse vers l'intérieur du métal. La progression de la diffusion vers l'intérieur est plus facile dans la ferrite que dans l'austénite à cause de l'énergie d'activation de l'austénite qui est plus élevée. Aux températures de l'existence de la ferrite (au-dessous du point A1), la cémentation ne se fait pas par suite d'une faible solubilité du carbone dans le fer  $\alpha$ .

La cémentation est réalisée généralement aux températures supérieures au point AC3 (920 à 950°C) qui rendent l'austénite stable, dissolvant en quantité le carbone. Pendant la cémentation, les atomes de carbone diffusent dans le réseau du fer  $\gamma$ . Lorsque la limite de saturation de l'austénite en carbone, déterminée par la ligne SE du diagramme Fe-Fe<sub>3</sub>C est atteinte, les conditions favorisent la formation à la surface d'une couche de cémentite continue. Dans les conditions réelles, il est rare qu'on observe la formation d'une couche de cémentite continue à la surface. Dans les conditions courantes, la cémentation au-dessus du point AC3, ne forme que l'austénite qui se décompose après refroidissement lent en précipitant la ferrite et la cémentite.

Dans ces conditions un refroidissement lent produit trois zones dans la structure de la couche cémentée (Figure 12).

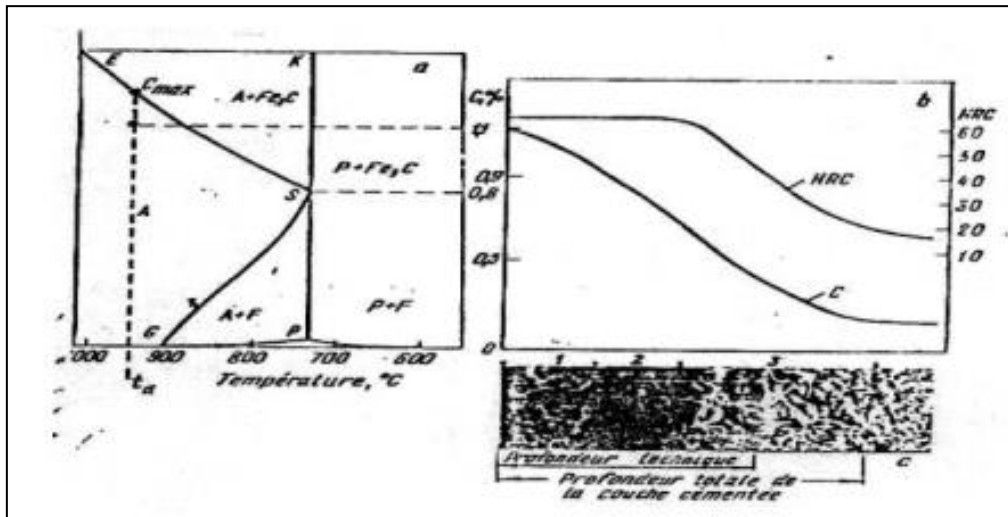
1. **L'Hypereutectoïde** constituée de perlite et de cémentite secondaire formant un réseau suivant l'ancien grain d'austénite.
2. **L'Eutectoïde** constitué de perlite lamellaire.
3. **L'Hypoeutectoïde** constituée de perlite et de ferrite.

L'épaisseur de la couche cémentée diminue avec l'augmentation de la concentration en carbone dans l'acier. Pour un acier à  $\leq 0,17$  % C, elle est de 15 % de l'épaisseur soumise à la cémentation, pour les aciers à  $> 0,17$  % C, elle est de 5 à 9 %. Le plus souvent, l'épaisseur de la couche varie de 0,5 à 2 mm et la concentration en carbone dans la couche superficielle doit être de 0,8 à 1,0 %. Des concentrations plus élevées dégradent les propriétés mécaniques de la pièce cémentée.

Les éléments d'alliages influent fortement sur la structure de la couche cémentée, le mécanisme de sa formation est la vitesse de diffusion. Le chrome et le tungstène diminuent le coefficient de diffusion du carbone dans l'austénite, car ils augmentent l'énergie d'activation, mais en renforçant la concentration du carbone à la surface, augmente quelque peu, la profondeur de

## Chapitre I : Recherche bibliographique

cémentation. Le nickel au contraire accroît la vitesse de diffusion mais diminue la concentration du carbone à la surface et donc la profondeur de cémentation. Le manganèse n'exerce presque aucune action sur le coefficient de diffusion, accroît la concentration du carbone à la surface et augment donc quelque peu la profondeur de cémentation [23].



**Figure I.12** : Profondeur de la couche cémentée [23].

### I.3.5. Aciers de cémentation

Ce sont des aciers à grain fin et à basse teneur en carbone [17]. Les aciers de construction non alliés et alliés spéciaux pour cémentation se classent en six familles indiquées dans le tableau suivant :

**Tableau I.1:** Les nuances des aciers de cémentation [17].

types d'aciers Nuances	Nuances
Aciers au carbone	C10-C12-C18
Aciers au manganèse-chrome	16MoCr5-20MoCr5
Aciers au chrome-molybdène	18CrMo4
Aciers au nickel-chrome	10NCr6-16NiCr6- 0NiCr6- 14NiCr11
Aciers au nickel-chrome molybdène	20NiCrMo2-18NiCrMo6
Aciers au bore	21Bo3-20MoBo5-19NiCrMoBo2

### I.3.6. Traitements thermiques après cémentation

Pour donner aux pièces leurs propriétés finales, on les soumet après cémentation à des traitements thermiques dont le but est :

- De corriger la structure et d'affiner le grain au cœur et dans la couche cémentée.

## Chapitre I : Recherche bibliographique

---

- D'obtenir une dureté élevée de la couche cémentée et de bonnes propriétés mécaniques de cœur.
- D'éliminer le réseau de carbure dans la couche cémentée, qui peut apparaître par suite de la sursaturation en C [24].

Le traitement thermique conduit la couche cémentée à une structure composée de martensite d'une certaine quantité d'austénite résiduelle et des carbures. L'opération terminale des pièces ayant subi la cémentation est un revenu à basse température à 160 ou 180 °C, transforme la martensite de trempe de la couche superficielle en martensite de revenu assurant ainsi un adoucissement. Dans le cas d'une trempe d'aciers fortement alliés, la structure de la couche cémentée garde en quantité (jusqu'à 50%) de l'austénite résiduelle qui altère la propriété de dureté. Après trempe, ces aciers sont traités à froid contribuant à la transformation de la plus grande partie de cette austénite en martensite. La quantité d'austénite résiduelle peut être diminuée en réduisant la quantité de carbone dans la couche ou en ajoutant dans le four, avant l'achèvement du processus, de l'ammoniac pour former des nitrures des éléments d'alliages.

La cémentation suivie d'un traitement thermique élève la limite de fatigue des pièces par suite de la formation dans la couche cémentée de contraintes résiduelles de compression importantes. La limite à la fatigue peut être encore élevée par écrouissage réalisé par grenailage [24].

### I.3.7. Effets de la cémentation sur la microstructure des aciers

Les propriétés de surface conditionnent la tenue des pièces en frottement (usure et fatigue). On cherche généralement à réaliser des couches superficielles de propriétés particulières (notamment de dureté élevée) s'appuyant sur un cœur peu fragile (donc moins dur) donnant à la pièce dans son ensemble une combinaison exceptionnelle de propriétés (résistance au frottement, à l'usure, à la fatigue et une bonne ténacité). On rencontrera donc très souvent, la macrostructure suivante :

- Une couche superficielle présentant, en général, une dureté élevée ( $\approx 700 H_V$  ou plus) et des contraintes résiduelles de compression importantes (plusieurs centaines de MPa). L'épaisseur de cette couche peut varier de 0,1 à plusieurs millimètres.
- Un cœur constituant la partie restante de la pièce avec une dureté beaucoup plus faible (inférieure en général à  $400 H_V$ ).

La formation de carbure est favorisée par la température de revenu à 200 °C. Il a été rapporté que l'acier cémenté et revenu à cette température acquiert des propriétés mécaniques excellentes [25]. En contrepartie selon Christiansen et al. [26], la décomposition de l'austénite qui a permis la précipitation des carbures de chrome se traduira. Par conséquent, à la rétraction du chrome de la

## Chapitre I : Recherche bibliographique

---

solution solide. Ainsi, les propriétés favorables de la résistance à la corrosion de l'acier seront affectées.

Les difficultés de traitements de surface de pièces cémentées proviennent essentiellement de la présence de graisses ou huiles difficilement éliminables à la surface des pièces dont l'origine peut être en amont du traitement thermique (huiles silicones) ou imputable au traitement lui-même (trempes après cémentation).

### I.4. Propriétés ciblées

#### I.4.1. Résistance à l'usure

L'usure est généralement définie comme la détérioration indésirable d'un composant par le retrait de matière de sa surface. Cela se produit par déplacement et détachement des particules de la surface. Les propriétés mécaniques de l'acier sont fortement réduites en raison de l'usure. L'usure du matériau peut être due au frottement des métaux les uns contre les autres, à l'effet d'érosion des milieux liquides et gazeux, au grattage des particules solides de la surface et à d'autres phénomènes de surface. Dans les essais en laboratoire, l'usure est généralement déterminée par la perte de poids dans un matériau et la résistance à l'usure est caractérisée par la perte de poids par unité de surface par unité de temps [27].

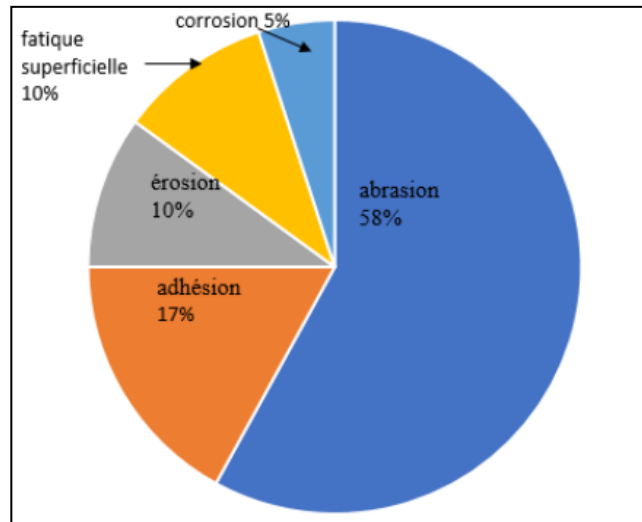
En termes d'ingénierie, l'usure est souvent classée comme légère ou sévère. L'usure légère est ce que les ingénieurs s'efforcent d'obtenir en créant des surfaces de contact de forme et de topographie appropriées. Le choix de matériaux et de traitements de surface adéquats est également nécessaire pour obtenir des conditions d'usure légère. Cependant, la lubrification de la surface est souvent le facteur le plus important pour garantir des conditions d'usure légère. Parfois, une usure sévère peut se produire, produisant des surfaces rugueuses ou rayées, une usure sévère est généralement inacceptable sur les machines hautes performances. L'usure peut également être classée en fonction des mécanismes d'usure fondamentaux impliqués [28].

##### I.4.1.1 Mécanismes d'usure

Une liste non exhaustive de mécanismes d'usure peut être dressée. Ces phénomènes, repérés dans des cas différents de contacts, peuvent en théorie s'appliquer tous en même temps, certains étant prépondérants par rapport à d'autres en fonction des conditions imposées [29]. Les mécanismes d'usure décrits dans la littérature sont l'usure adhésive, l'usure abrasive, l'usure corrosive, l'usure par érosion et l'usure par fatigue de surface. L'importance relative des mécanismes d'usure dans l'industrie est présentée sur la figure 13.

## Chapitre I : Recherche bibliographique

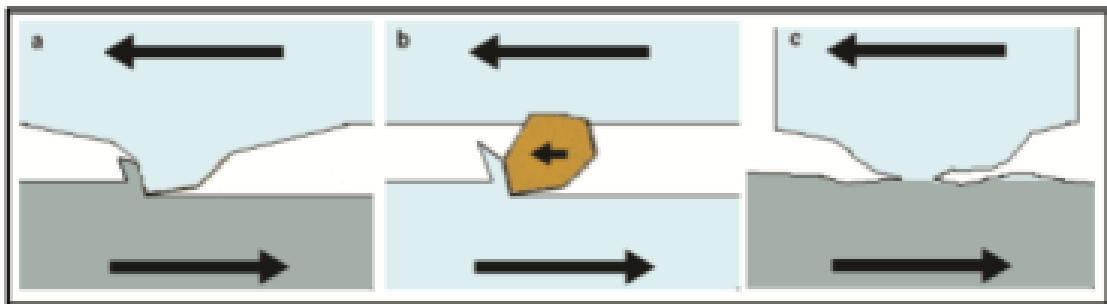
Le contrôle de l'usure est obtenu en modifiant les propriétés de la surface. Cependant, la modification de surface visant à réduire un type d'usure particulier ne rend pas nécessairement la surface insensible aux attaques d'autres types d'usure [30].



**Figure I.13:** L'importance relative des mécanismes d'usure dans l'industrie[31].

### a. Usure par abrasion

L'usure abrasive est définie comme étant l'usure par déplacement de matière, produite par des particules dures ou des protubérances dures. Les particules dures peuvent se trouver encastrées dans l'une des surfaces ou être entre les deux surfaces en mouvement relatif (voir Figure 14)



**Figure I.14:** Mécanisme d'usure abrasive à deux corps et d'usure abrasive à trois corps.

Les surfaces endommagées par abrasion présentent des sillons de profondeur variable, parallèles au déplacement. L'usure est assez constante au cours du temps, le volume des débris croît linéairement avec la charge appliquée et la distance parcourue.

La perte de matière dépend à la fois du matériau usé et de l'antagoniste, et l'aspect des sillons fournit de précieuses indications :

## Chapitre I : Recherche bibliographique

---

- S'ils sont brillants et très peu profonds, les aspérités de la pièce antagoniste ont raclées couches d'oxydes.
- S'ils sont isolés, et brusquement interrompus, des particules dures introduites entre les surfaces sont plus ou moins incrustées.
- S'ils sont interrompus et rayent la pièce dure, des particules abrasives sont enchâssées dans la pièce tendre.
- S'ils sont interrompus et marquent la pièce tendre, la pièce antagoniste plus dure est trop rugueuse.

La dureté et la ductilité d'un matériau jouent un rôle important sur sa résistance à l'usure abrasive. Pour créer un sillon ou une rainure, il suffit que la dureté de l'antagoniste soit seulement de 20 % supérieure à celle de la surface rayée. Quant à la ductilité, elle caractérise l'aptitude du matériau à se déformer sans décohésion c'est à dire sans émission des débris.

Mais bien d'autres paramètres jouent un rôle et l'abrasion est un processus dans lequel interviennent la géométrie des pièces en contact, la topographie de leurs surfaces (hauteur et forme des rugosités), les caractéristiques mécaniques et métallurgiques des matériaux (fragilité, élasticité, plasticité...), les caractéristiques physico-chimiques résultant de l'environnement [32].

### b. Usure par adhésion

Elle se produit par un transfert de matière de l'un des solides sur l'autre. Elle résulte de la formation des micro-jonctions entre les surfaces et la création des micro-ruptures. Les aspérités des surfaces en contact sont soumises à des contraintes locales élevées et subissent des déformations élastiques et plastiques qui provoquent un rapprochement des atomes et la création des liaisons interfaciales. Ces dernières peuvent être de nature adhésive lorsque l'interface est maintenue (matériaux non métalliques) ou cohésive lorsque l'interface disparaît suite aux mécanismes diffusionnels qui résultent de l'absence ou de la rupture des films superficiels. Le grippage peut avoir lieu si les aspérités de contact ne peuvent plus être cisailées [33].

### c. Usure par érosion

Elle est produite par l'impact de particules solides contenues dans un fluide en mouvement ou par des particules liquides en milieu gazeux. Celles-ci provoquent une perte de matière. L'usure érosive se manifeste par des fissures et des éclats microscopiques dans le cas des matériaux fragiles et par des piqûres ou des rayures dans le cas des matériaux ductiles ou alors par du polissage [33].

## Chapitre I : Recherche bibliographique

---

### d. Usure par fatigue de surface

Il y a formation de fissures dans les matériaux en présence, sous l'effet de gradients de contraintes cycliques. Les fissures se propagent vers la surface et il y a détachement de « grosses » particules dont la taille peut atteindre le millimètre.

On parlera particulièrement d'égrènement lorsqu'il y a formation de trous correspondant à la microstructure initiale des matériaux. Il y a « déchaussement » au niveau des joints de grains d'un métal par exemple.

On parle de délamination lorsque les déformations plastiques répétées des premiers corps conduisent à des fissures en sous-surface, parallèles à la surface. Il y a propagation des fissures le long du plan de cisaillement maximum.

Malgré une somme importante de travaux sur l'usure, peu d'entre eux abordent le problème dans sa globalité [34].

### e. Usure par corrosion

Si on parle de la corrosion on parle aussi de l'oxydation, qui est en général un problème de réaction chimique entre la surface d'un matériau et l'environnement lors du frottement à température élevée dans la zone de contact, donc la corrosion est la modification des surfaces due à cette réaction [35].

## I.5. Travaux similaires

Plusieurs travaux ont étudié le comportement microstructural et mécanique des aciers obtenus par fabrication additive, en particulier l'acier faiblement allié ER70S-6, utilisé dans des procédés tels que WAAM.

Shibo Liu et al. ont mené une étude sur le dépôt WAAM utilisant un matériau d'apport de type ER70S-6, en mettant en évidence la sensibilité des propriétés mécaniques à l'apport thermique, ainsi que la formation de microstructures différentes selon les conditions de soudage [43]. Les auteurs montrent que la dureté et les propriétés mécaniques du matériau dépendent fortement des vitesses de refroidissement et des conditions thermiques locales, notamment à travers la cartographie des différentes zones affectées thermiquement.

De même, les travaux de Y. Kheradm et al. [44] ont exploré l'influence de l'apport thermique sur les propriétés mécaniques et la microstructure de murs fabriqués en ER70S-6. Ils constatent que plus l'apport thermique est réduit, plus la structure devient homogène, avec une taille de grain plus fine et une résistance mécanique améliorée. La limite d'élasticité mesurée atteint

## Chapitre I : Recherche bibliographique

---

jusqu'à 560 MPa, tandis que la résistance à la traction ultime (UTS) atteint 740 MPa, montrant clairement l'influence de la microstructure fine sur les performances mécaniques.

Enfin, Y. Ayan et al. [45] ont fabriqué des structures FGM (Functionally Graded Materials) avec l'acier ER70S-6 combiné à un acier inoxydable austénitique. Leur étude démontre que l'orientation de fabrication influence significativement les propriétés mécaniques, avec une résistance à la traction plus élevée dans la direction horizontale que verticale. Des études microstructurales par diffraction X ont confirmé une transition progressive dans les interfaces, sans défaut majeur.

### I.6. Conclusion

Ce chapitre bibliographique a offert une vue d'ensemble approfondie des connaissances actuelles sur la fabrication additive, en mettant un accent particulier sur le procédé WAAM et sa variante CMT. Il a également exploré les processus de cémentation des aciers et les traitements thermiques qui garantissent leur efficacité. L'examen des propriétés mécaniques recherchées, comme la résistance à l'usure et à la corrosion, souligne l'importance cruciale du contrôle des paramètres microstructuraux pour optimiser les performances des pièces produites.

*CHAPITRE II*

---

**Matériaux et méthodes**

### Chapitre 2 : Matériaux et techniques expérimentales

#### II.1. Introduction

Ce chapitre se consacre à la présentation des matériaux et des méthodes expérimentales employées dans le cadre de cette recherche. Initialement, il met en lumière les propriétés de l'acier ER70S-6, en précisant notamment sa composition chimique. Par la suite, il détaille les étapes de fabrication des échantillons, réalisées par le biais de la fabrication additive utilisant la technique CMT, ainsi que les différents traitements thermiques et thermochimiques effectués. Enfin, il fournit une description approfondie des méthodes de caractérisation microstructurale et tribologique, lesquelles constituent les fondements indispensables à l'étude des propriétés des matériaux développés.

#### II.2. Matériaux utilisés

Le matériau de base utilisé dans cette étude est un acier faiblement allié de type ER70S-6, généralement employé comme fil d'apport dans les procédés de soudage à l'arc avec électrode fusible, notamment les procédés MIG/MAG et leurs variantes modernes comme le Cold Metal Transfer (CMT). Ce fil est particulièrement adapté aux applications de fabrication additive de type WAAM, en raison de sa bonne tenue mécanique, de sa soudabilité élevée et de sa capacité à générer une structure homogène dans des dépôts multi-couches [5, 7]. La composition chimique de cet acier est donnée dans le tableau ci-dessous. L'acier d'étude est fourni sous forme de bobine avec un diamètre de fil de 1mm.

**Tableau II.2 :** la composition chimique de l'acier ER70S-6.

Elément	C	Si	Mn	S	Cu	Fe
Valeurs	0.08	0.31	0.62	0.06	0.134	Bal

#### II.3 Élaboration des échantillons

##### Description de la technique

Elle comprend essentiellement : un poste de soudure qui est une source de soudage avancé de type TPS 500i-*Fronius*, équipé par plusieurs procédés de soudage avancés MIG/MAG. Ce poste est capable de délivrer un courant allant jusqu'à 500A.

La torche de soudure manuelle est portée par une table CNC tout en laissant le bout de la torche en position perpendiculaire par rapport à la table CNC. Cette dernière assure les

mouvements de translation selon X et Y et l'incrémentation selon l'axe Z. La table CNC (voir Figure 1) est une machine-outil à commande numérique piloté par un logiciel MACH3 qui permet de déterminer la trajectoire de l'impression.

### II.4. Présentation du procédé WAAM par CMT.

L'utilisation d'un mélange de gaz d'argon et de dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) est courante. Ce mélange de gaz est souvent appelé gaz de protection ou gaz de soudage et est utilisé pour protéger le bain de soudure de l'oxydation et d'autres contaminants atmosphériques pendant le processus de soudage. Dans cette étude un mélange de 82% d'argon et 18% de  $\text{CO}_2$  est utilisé.



Figure II.15 : Description de la technique CMT.

- **Paramètres de soudage**

**Vitesse de dévidage :** 1,8 mm/min.

**Vitesse de torche :** 1250 mm/min.

**Incrémentation :**

**Axe X :** 12,5 mm.

**Axe Y :** 0,5 mm.

**Courant utilisé :** 95 A.

### II.5. Technique de préparation

Après l'impression du mur en acier ER70-S6 par CMT, et avant de procéder au découpage des échantillons nous avons effectué une opération de rectification des deux surfaces du mur à l'aide d'une fraiseuse pour rendre les surfaces lisses et planes.

### II.5.1. Découpage des échantillons

À cette étape, les échantillons ont été découpés à l'aide d'une machine de tronçonnage automatique. Cet équipement est particulièrement adapté à la découpe de pièces de tailles et de formes variées. Les échantillons sont découpés presque de la même taille (10x20) mm.

### II.5.2. Polissage

Le polissage des échantillons a été réalisé à l'aide d'une polisseuse de type HITECH (figure 2). Les échantillons étaient maintenus en place, tandis que les disques abrasifs tournaient à vitesse constante (300 tr/min). Une série de papiers abrasifs à grains décroissants (P240, P320, P600, P800, P1000 et P1200) a été utilisée successivement. Cette progression a permis d'éliminer les rayures et d'uniformiser la surface.

Pour affiner davantage la qualité de surface, un polissage de finition a été réalisé à l'aide d'une suspension diamantée de  $03\mu\text{m}$ , appliquée sur un disque en tissu. Cette étape finale a permis d'obtenir une surface parfaitement lisse, brillante et sans défauts, assurant ainsi une excellente préparation pour l'attaque chimique et l'analyse métallographique.



**Figure II.16:** Polisseuse HITECH.

### II.5.3. Traitement thermique d'homogénéisation

Un premier traitement thermique a été appliqué à  $850\text{ }^{\circ}\text{C}$  pendant 45 minutes dans un four à résistance électrique (Nabartherm). Ce traitement vise à réduire les contraintes résiduelles générées lors du dépôt, homogénéiser la structure interne. Il s'agit d'un recuit dit « de détente » ou « d'homogénéisation », indispensable dans les pièces issues de la fabrication additive pour corriger les gradients thermiques internes et stabiliser la matrice ferritique.



**Figure II.17** : four de traitement thermique.

### II.5.4. Traitement de cémentation gazeuse

Dans le cadre de la présente étude, un traitement de cémentation a été réalisé au sein de l'atelier de fabrication de tracteurs agricoles situé à El-Khroub (Constantine). Le four utilisé est un four industriel de type "RICHTER", fonctionnant sous atmosphère gazeuse contrôlée.

Ce four est composé de deux unités principales :

Une armoire de régulation thermique (Figure II.4.a), assurant le contrôle de la température, du temps de traitement et de la sécurité du processus.

Un panneau de régulation des gaz (Figure II.4.b), permettant l'injection et le contrôle du débit des gaz réactifs (généralement un mélange riche en méthane ou monoxyde de carbone).



**Figure II.18** : armoire de régulation thermique et panneau de régulation des gaz d'un four de cémentation.

## Chapitre II : Matériaux et techniques expérimentales

---

Le principe de fonctionnement repose sur l'injection d'un gaz carburant à haute température (environ 930°C) dans l'enceinte du four. Ce gaz, en présence d'un gaz porteur neutre (azote, hydrogène), diffuse à la surface des pièces en acier, enrichissant leur surface en carbone par phénomène de diffusion atomique. La figure 5 présente le four de cémentation utilisé dans ce travail.

Les conditions opératoires appliquées pour le traitement sont les suivantes:

1. Température de traitement : 930°C
2. Durée de maintien : 5 heures
3. Type d'atmosphère : Carburante à base de CH<sub>4</sub>



**Figure II.19 :** Four de cémentation.

On note ici que deux types d'échantillons ont été soumis à un traitement de cémentation : i) des échantillons à l'état brut (**Br**), ii) des échantillons traités thermiquement (**BT**), que l'on dénote après cémentation **BC** et **TC** respectivement.

### II.5.5. Trempe et Revenu

Après traitement de cémentation, les échantillons sont refroidis dans le four à l'ambiante. Un traitement de trempe qui consiste à refroidir les échantillons préalablement cémentés du domaine austénitique (850 °C) dans un bain d'huile chauffée à 80 °C est réalisé. Après trempe, un traitement de revenu de détente est effectué à 200 °C pendant 2h.

Après le polissage fin, les surfaces à observer sont soumises à une attaque chimique visant à révéler les différentes phases constituantes. L'agent d'attaque utilisé est une solution de Nital à 4 %. L'attaque dure environ 20 secondes, après quoi les échantillons sont soigneusement rincés puis séchés.

### II.6. Caractérisation microstructurale

L'analyse microstructurale constitue une étape essentielle pour évaluer l'influence des procédés de fabrication et des traitements thermochimiques sur la structure interne de l'acier ER70S-6. Les techniques utilisées permettent d'observer les morphologies de grains, la présence de phases spécifiques. Dans cette étude, deux méthodes principales de caractérisation ont été mobilisées : la microscopie optique (MO), et la diffraction des rayons X (DRX).

#### II.6.1. Microscopie optique (MO)

Les observations microstructurales ont été effectuées à l'aide d'un microscope métallographique vertical de type Nikon Eclipse LV150N (Figure II.6). Ce microscope est associé à un logiciel informatique permettant un réglage facile de la mise au point et de l'éclairage, ce qui permet une observation et une analyse encore plus approfondies des échantillons. L'attaque a été réalisée à l'aide du réactif Nital 4 %.



Figure II.20 : Microscope métallographique.

#### II.6.2. Détermination des phases en présence par diffraction des Rayons-X

La technique d'analyse par diffraction des rayons X repose sur l'interaction élastique d'un faisceau monochromatique de photons X avec la matière cristallisée. La diffraction résultante aboutit à l'obtention d'un diffractogramme et permet la détermination des distances réticulaires des plans de diffraction.

La loi de Bragg définit la relation entre la longueur d'onde du faisceau incident ( $\lambda$ ), le paramètre réticulaire repéré par les indices de Miller ( $d_{hkl}$ ) et l'angle de diffraction ( $\theta$ ), l'entier naturel  $n$  représentant l'ordre de diffraction[14].

$$n \lambda = 2 d_{hkl} \sin \theta \text{ (II.1)}$$

Où:

$\lambda$ : Longueur d'onde des rayons X ( $\lambda = 1,54 \text{ \AA}$ ).

$\theta$ : Position du pic (Angle de Bragg).

d: Diamètre des particules.

L'ensemble des spectres de diffraction ont été réalisés sur un diffractomètre « Mini Flex 600 », lié à un micro-ordinateur pour enregistrer les diffractogrammes (**figure 7**). Le traitement des spectres de DRX est effectué par le logiciel X'pertHighscore. L'analyse par DRX a été effectuée dans l'intervalle  $[20,90]^\circ$  avec un pas de  $0,02^\circ/\text{S}$



**Figure II.21** : Diffractomètre des rayons X « RIGAKU-MINIFLIX 600 ».

### Caractérisation des propriétés mécaniques

#### 1. Micro dureté

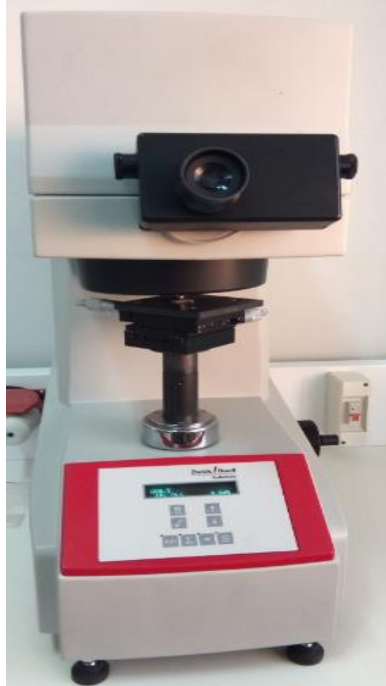
On appelle dureté la propriété d'un corps de s'opposer à la déformation plastique provoquée par des contacts de la couche superficielle, la rapidité et la simplicité de l'essai de dureté, ainsi que la possibilité de juger des propriétés d'une pièce sans la détruire, contribuent à sa large extension pour le contrôle de la qualité du métal des pièces et des produits métalliques.

Pour cela nous avons utilisé la micro dureté **Vickers HV**. Elle est le rapport entre la charge appliquée et la surface projetée de l'empreinte rémanente :

$$H_V = 1.854 \cdot F / 9.81 \cdot d^2 \quad (\text{II.2})$$

Avec **F** la charge appliquée et la diagonale de l'empreinte en  $\mu\text{m}$ . Cette méthode est largement appliquée pour mesurer des pièces de faibles épaisseur ou couches superficielles minces à dureté élevée. La dureté est déterminée par l'empreinte laissée dans la surface mise à l'épreuve par une

pyramide en diamant à base carré sous une charge de **100 g**. L'objectif de cet essai est d'étudier l'effet de la cémentation gazeuse sur l'évolution de la microdureté, de la surface vers le cœur des échantillons. La figure II.8 montre le microduromètre utilisé dans cette étude.

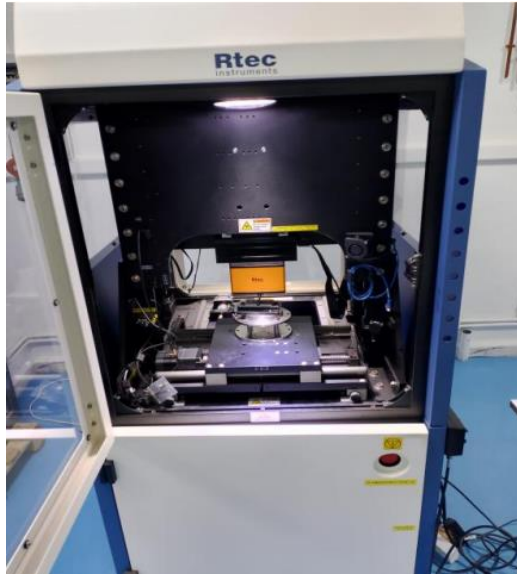


**Figure II.22** : Duromètre 'Wolpert'.

### II.7. Résistance à l'usure (Dispositif expérimental)

Les essais d'usure ont été réalisés à l'aide d'un tribomètre de type « pin-on-disk » en mode alternatif (Rtec MFT-5000). Une bille en acier 100C6 de 6 mm de diamètre a été mise en contact avec la surface de différents échantillons (**Br, BT, BC et TC**), sous une charge de 10 N, avec une fréquence de 10 Hz et un rayon de 10 mm de longueur. Nous avons fixé la durée du test à 30 minutes pour chaque échantillon. La perte de masse a été mesurée à l'aide d'une balance de précision. Le volume usé est calculé en exploitant la relation entre la masse et la masse volumique de l'acier ( $\rho = \frac{M}{V}$ ).

L'essai permet de déterminer le coefficient de frottement pour chaque échantillon. La figure 8 montre le tribomètre universel multifonctionnel utilisé dans cette étude.



**Figure II.23** : tribomètre multifonctionnel MFT-5000.

*CHAPITRE III*

---

**Résultats et discussions**

# Chapitre III : Résultats et discussions

## Chapitre 3: Résultats et discussions

### III.1 Introduction

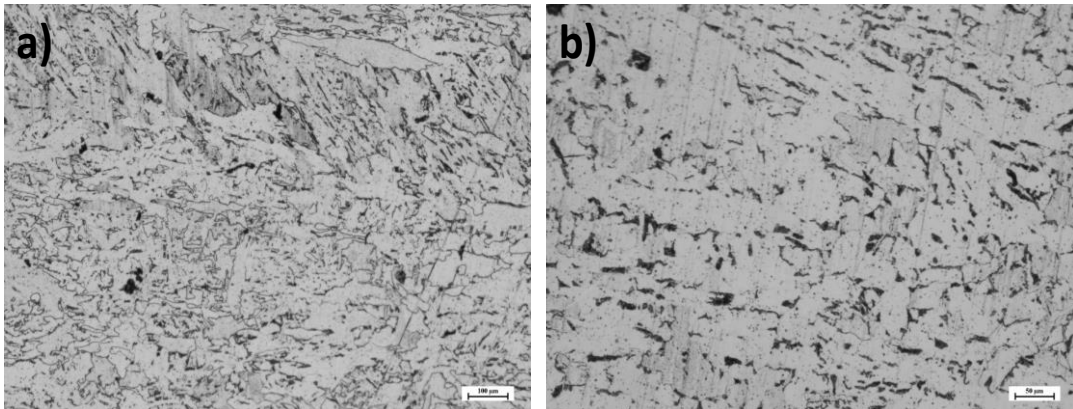
Ce chapitre présente et analyse les résultats obtenus suite aux différentes caractérisations effectuées sur les échantillons d'acier ER70S-6, dans le but d'évaluer l'impact du traitement thermique et de cémentation gazeuse sur les propriétés microstructurales et mécaniques de l'acier ER70S-6 obtenu par CMT.

### III.2 Caractérisation microstructurale

#### III.2.1 Analyse par microscope optique

##### III.2.1.1 Etat brut :

La microstructure observée sur la face latérale du mur en acier ER70S-6 déposé par le procédé CMT à 95 A révèle une solidification directionnelle marquée, caractérisée par des grains allongés suivant le gradient thermique latéral. La figure III.1.a montre une structure hétérogène composée majoritairement de ferrite aciculaire, avec des zones sombres dispersées pouvant correspondre à des inclusions non métalliques ou à des microporosités.



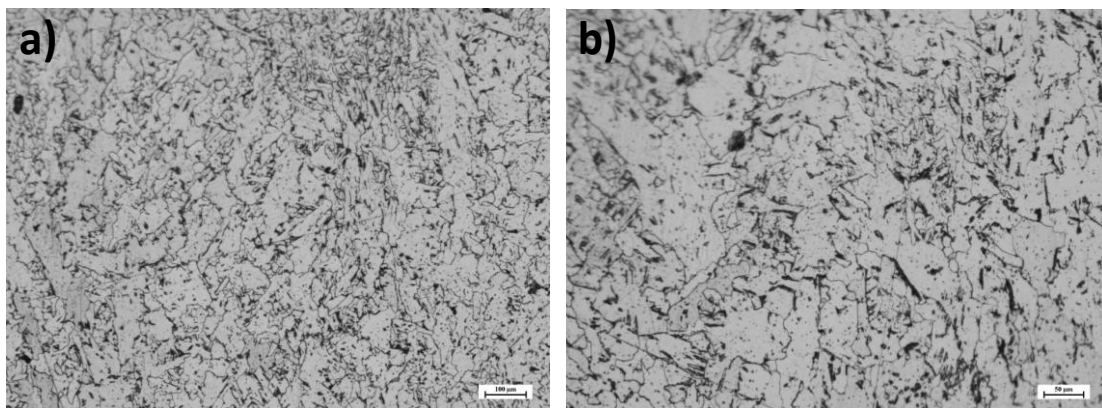
**Figure III.124 :** Micrographie optique de l'acier ER70-S6 à l'état brut.

À plus fort grossissement (figure III.1.b), la microstructure devient plus détaillée, mettant en évidence des sous-structures typiques d'une solidification rapide avec des stries parallèles évoquant la croissance de grains colonnaires. L'intensité relativement faible (95 A) du courant lors du dépôt limite l'apport thermique, ce qui favorise un refroidissement plus rapide et donc la formation de grains fins et orientés. Cette configuration microstructurale est typique des dépôts par CMT sur aciers faiblement alliés.

## Chapitre III : Résultats et discussions

### III.2.1.2 Après traitement thermique

Les micrographies de la figure III.2 représentent la microstructure de la face latérale d'un acier ER70S-6 réalisé par le procédé CMT (Cold Metal Transfer) avec un courant de soudage de 95 A, après avoir subi un traitement thermique de normalisation. Ce traitement a consisté en un chauffage à 850 °C pendant 45 minutes, suivi d'un refroidissement à l'air libre. Cette opération thermique a pour objectif principal d'homogénéiser la structure métallurgique, d'éliminer les contraintes résiduelles issues du soudage et de favoriser la recristallisation des grains.



**Figure III.25** : Micrographie optique de l'acier ER70-S6 après traitement thermique.

À l'observation microscopique, la microstructure révèle une prédominance de ferrite polygonale, identifiable par ses grains clairs, fins et équiaxes, témoignant d'un bon degré de recristallisation. La perlite est également présente, en moindre proportion, apparaissant sous forme de zones sombres généralement situées aux joints de grains. La ferrite offre une bonne ductilité et une grande ténacité, tandis que la perlite, plus dure, améliore la résistance mécanique globale. La structure observée est caractéristique d'un acier faiblement allié ayant subi une normalisation efficace, avec une distribution homogène des phases et une réduction notable de l'orientation directionnelle initialement induite par le soudage.

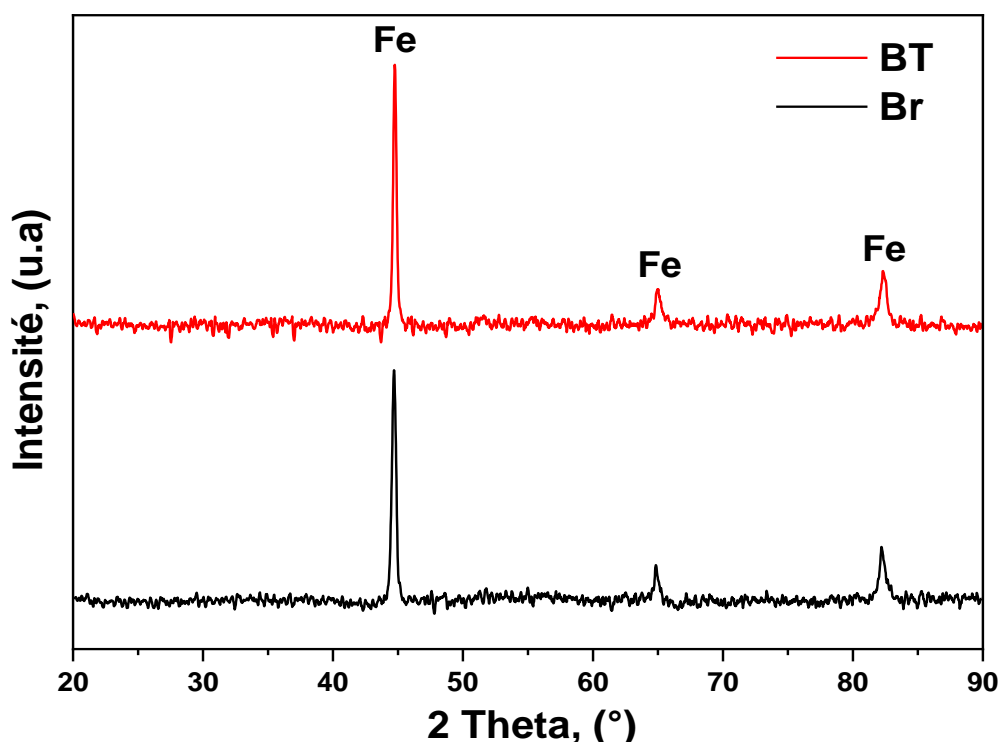
Dans le cas précédent (état brut), on a observé souvent une structure allongée ou directionnelle due au refroidissement rapide et à la solidification dirigée. Après traitement thermique, cette texture disparaît : les grains deviennent isotropes. Cela indique que le flux de chaleur et les contraintes directionnelles ont été neutralisés par la recristallisation.

### III.2.2 Analyse par diffraction des rayons X

Le diffractogramme DRX de l'acier ER70S-6 (figure III.3) comparant l'état brut de soudage (Br) et l'état traité thermiquement (BT) met en évidence des modifications significatives de la structure cristalline. La figure III.3 montre clairement que l'acier est formé principalement de la

## Chapitre III : Résultats et discussions

ferrite, sans aucune trace d'oxyde, car les échantillons ont subi un polissage préalable qui enlève tout sort d'oxyde à la surface.



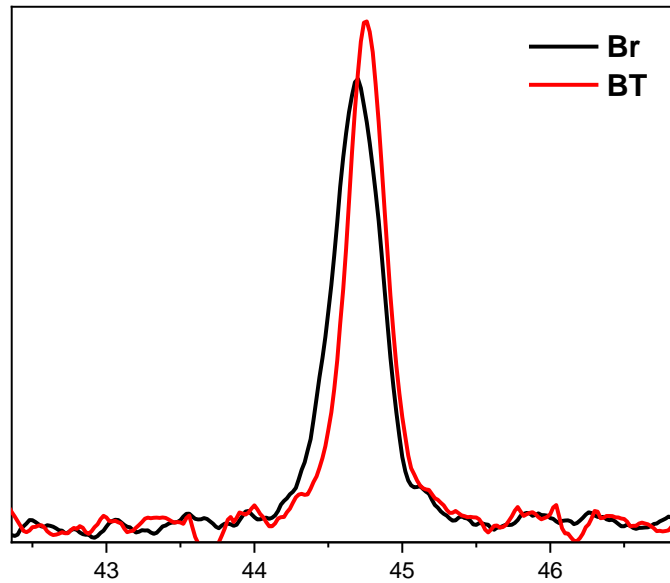
**Figure III.3** : Diffractogrammes de l'acier ER70-S6 à l'état brute (Br) et après traitement (BT) thermique à 850 °C pendant 45 min

Après un traitement thermique à 850 °C pendant 45 minutes suivi d'un refroidissement à l'air, les pics de diffraction correspondant à la phase ferritique ( $\alpha$ -Fe) se décalent légèrement vers les angles les plus élevés (figure III.4), ce qui traduit une diminution du paramètre de maille. Le décalage des pics de diffraction vers les angles les plus grands ( $2\theta$ ) observé après traitement thermique peut s'expliquer, en partie, par la transformation microstructurale de la ferrite aciculaire en ferrite polygonale.

En effet, la ferrite aciculaire, formée lors du refroidissement rapide après soudage, se caractérise par une morphologie en aiguilles, une forte densité de dislocations et la présence d'éléments d'alliage (comme le carbone, le manganèse ou le silicium) piégés en solution solide [51]. Cette configuration entraîne une distorsion du réseau cristallin, augmentant localement le paramètre de maille. Suite au traitement thermique de normalisation, la ferrite aciculaire est remplacée par une ferrite polygonale à grains équiaxes, plus stable thermodynamiquement, avec une densité de dislocations nettement réduite et un rejet partiel des éléments d'alliage sous forme de précipités [52]. Cette réorganisation du réseau cristallin conduit à une réduction globale du paramètre de

## Chapitre III : Résultats et discussions

maille, ce qui se traduit par un déplacement des pics de diffraction vers les angles les plus élevés. Ces résultats confirment que le traitement thermique appliqué est efficace pour stabiliser la microstructure et améliorer l'homogénéité cristalline du matériau [53].

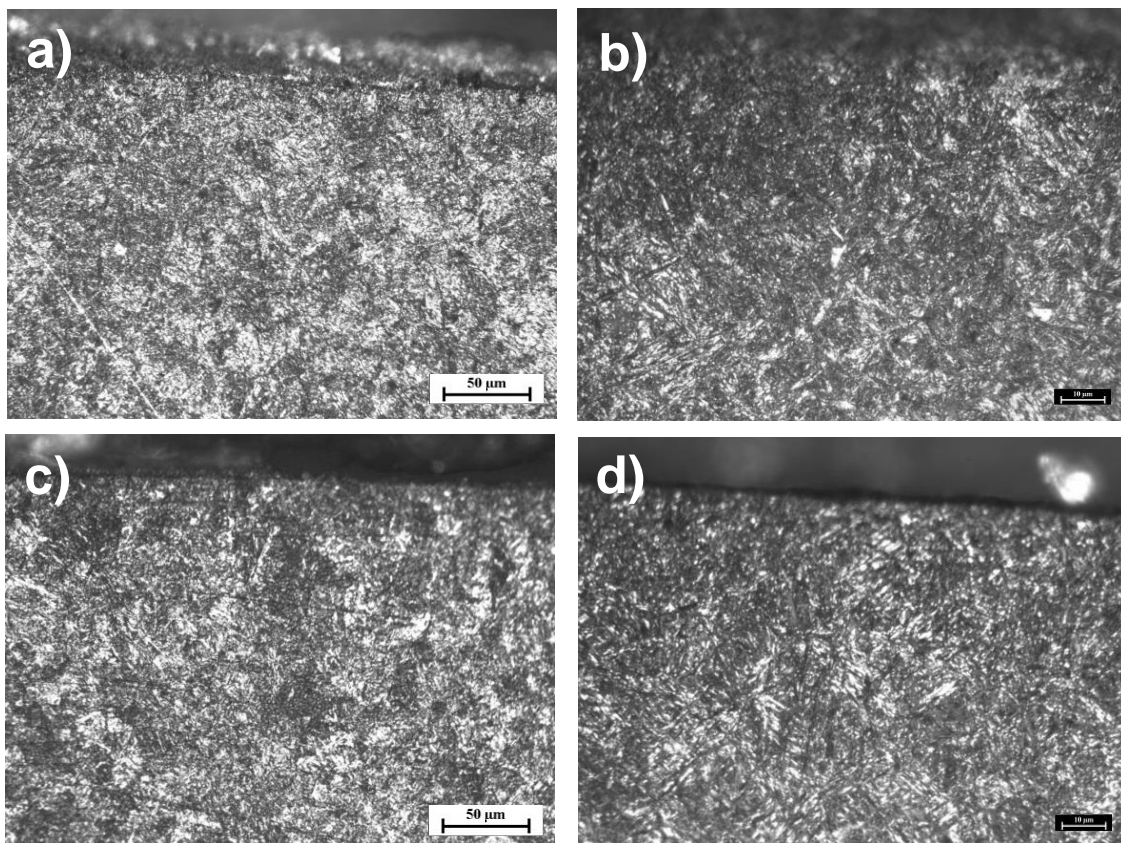


**Figure III.4 :** Décalage du pique  $2\theta = 44,6^\circ$  après traitement thermique

### III.2.3 Etat cémentée

Les microstructures observées dans la **figure III.5 (a et b)** montrent une transformation martensitique typique de l'acier faiblement allié ER70S-6 après un traitement thermochimique (cémentation gazeuse à  $930^\circ\text{C}$ , refroidissement lent dans le four), suivi d'une austénitisation à  $850^\circ\text{C}$ , d'une trempe à l'huile chaude ( $80^\circ\text{C}$ ), puis d'un revenu de détente à  $200^\circ\text{C}$  pendant 2 h. La microstructure de l'acier à l'état brut cémentée (BC) révèle une structure complexe, composée majoritairement de martensite avec des zones sombres et allongées indiquant la présence de martensite lath.

## Chapitre III : Résultats et discussions



**Figure III.5 :** Micrographies optiques de l'acier ER70 S-6 après cémentation gazeuse (a et b: Brut + cémentation, c et d: traitement thermique + cémentation)

La microstructure de l'acier (TC) montre une structure plus homogène et dense en aiguilles martensitiques, indiquant une trempe plus efficace ou une austénitisation plus homogène. Le traitement thermique préalable appliqué à 850 °C pendant 45 minutes avec un refroidissement à l'air, avant la cémentation gazeuse, joue un rôle d'homogénéisation de la structure de l'acier ER70S-6 brut obtenu par le procédé CMT. Ce recuit permet principalement de réduire les contraintes internes générées par la fabrication additive, d'homogénéiser la distribution des éléments d'alliage et du carbone, et de recristalliser la microstructure qui peut présenter une forte anisotropie ou des zones surfondues ou mal transformées. En rétablissant une structure plus uniforme et stable, ce traitement thermique améliore la réactivité de l'acier vis-à-vis de la cémentation ultérieure en assurant une meilleure diffusion du carbone dans les couches superficielles [54].

### III.2.3.1 Analyse par diffraction des rayons X de l'état cémentée

Dans les deux cas, les pics d'intensité les plus marqués correspondent à la magnétite ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) et à l'hématite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), indiquant une oxydation de la surface durant le traitement thermique, probablement en raison d'une atmosphère partiellement oxydante pendant la cémentation ou la

## Chapitre III : Résultats et discussions

trempe. La figure III.6 montre l'absence des pics liés à la phase martensitique (sauf le faible pic apparaît à  $44,36^\circ$ ).

Les pics d'oxydes sont dominants dans les deux diffractogrammes, ce qui indique qu'ils proviennent majoritairement de la surface. Or, la cémentation se fait à haute température et en atmosphère potentiellement oxydante, ce qui peut conduire à la formation d'une couche d'oxyde épaisse qui masque les signaux de phases plus profondes, comme la martensite. Le rayon X ne pénètre que sur quelques microns de profondeur, donc si la couche d'oxyde est épaisse, elle peut écranter les signaux des phases métalliques sous-jacentes, comme la martensite. Une intensité faible du tube à rayons X peut aussi rendre difficile la détection des pics de phases minoritaires ou désordonnées comme la martensite.

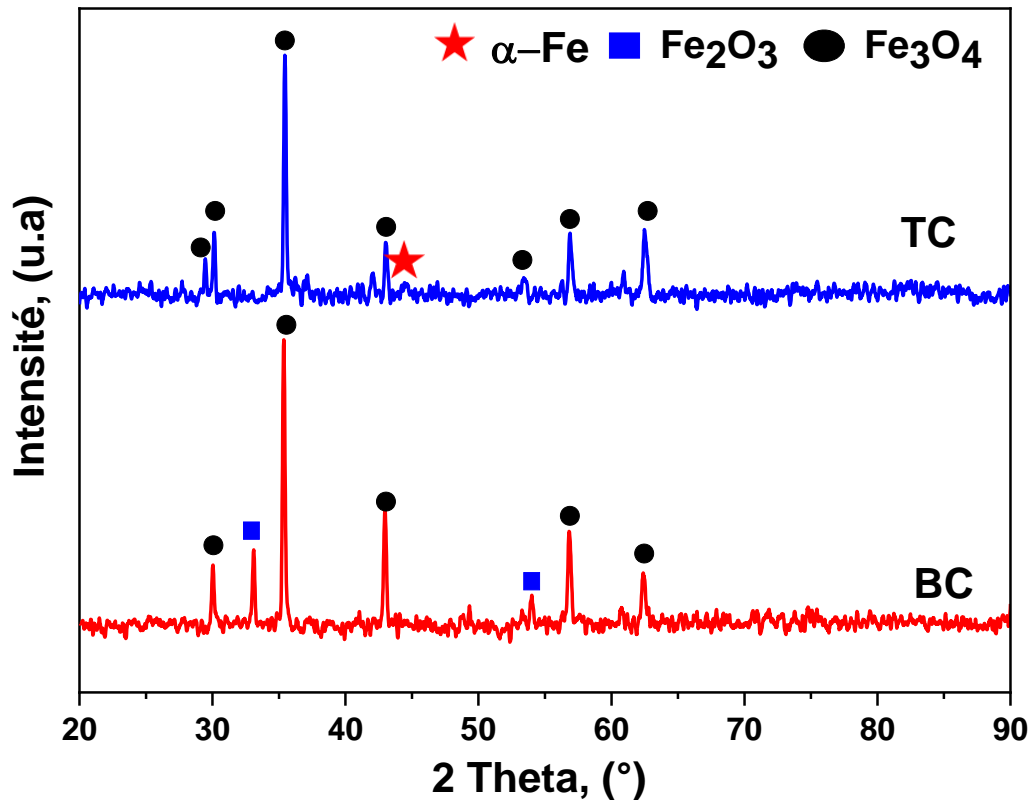


Figure III.6 : Diffractogrammes de l'acier ER70-S6 après cémentation

### III.3 Analyse de la microdureté

Le profil de microdureté Vickers présenté dans la figure III.7 met en évidence l'effet combiné de la cémentation et du traitement thermique préalable sur l'acier ER70S-6. L'échantillon brut (Br) présente une dureté relativement faible et constante ( $\sim 150\text{--}200\text{ HV}_{0.1}$ ), ce qui est typique d'une microstructure ferritique sans durcissement de surface. Après cémentation (BC), la dureté en surface augmente fortement pour atteindre un maximum proche de  $553\text{ HV}_{0.1}$ , suivi d'une

## Chapitre III : Résultats et discussions

décroissance progressive sur environ 800  $\mu\text{m}$ . Cette élévation de dureté est liée à la diffusion du carbone dans la couche superficielle et à la formation d'une structure martensitique, bien que non détectée clairement en DRX à cause de la couche d'oxydes.

L'échantillon traité thermiquement puis cémenté (TC) montre également un pic de dureté élevé ( $\sim 550 \text{HV}_{0,1}$ ), mais légèrement inférieur à celui de BC,. Cette différence peut être expliquée par le traitement préalable à 850 °C (recuit d'homogénéisation) qui a permis une microstructure plus homogène et une diffusion du carbone plus uniforme. En effet, comme discuté précédemment, cette étape améliore la réceptivité de la cémentation et favorise une transformation martensitique plus régulière après trempe. La phase oxydée détectée en DRX ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) pourrait également jouer un rôle dans l'amortissement partiel du pic de dureté en surface.

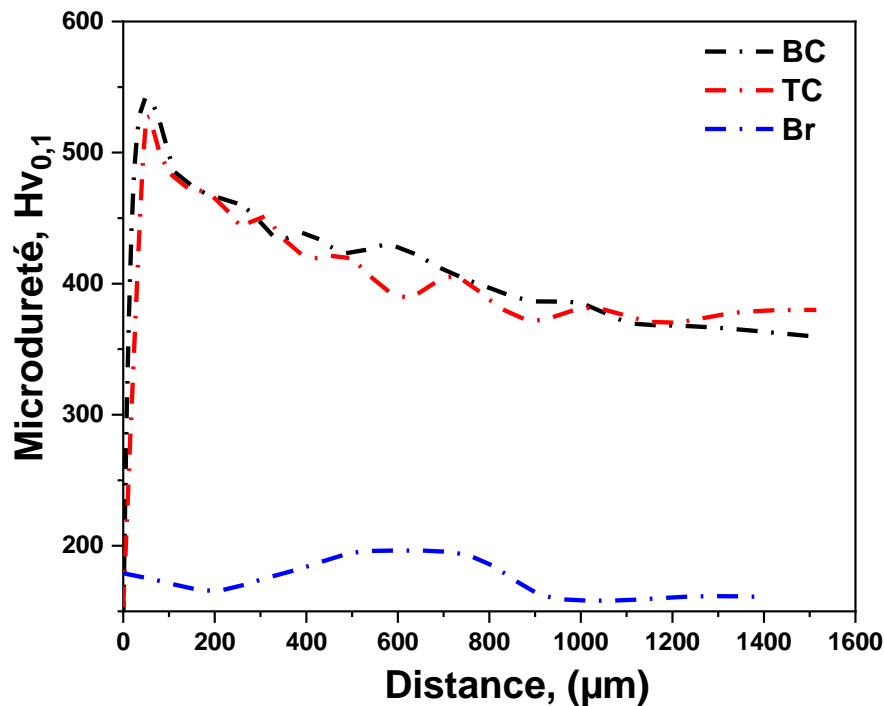


Figure III.7 : Microdureté de l'acier ER70-S6 après cémentation gazeuse pendant 5 h.

### III.4 Analyse du comportement à l'usure

En complément des analyses microstructurales et mécaniques précédemment présentées, des essais d'usure ont été réalisés afin d'évaluer le comportement tribologique de l'acier ER70S-6 après différents traitements. Les paramètres analysés incluent le coefficient de frottement ainsi que le volume de matière perdue pendant les tests. Ces résultats permettent de mieux comprendre l'impact de la cémentation et du traitement thermique sur la résistance à l'usure du matériau.

## Chapitre III : Résultats et discussions

### III.4.1 Coefficient de frottement

Le graphique du coefficient de frottement (COF) en fonction du temps met en évidence l'effet des traitements thermo-chimiques et thermiques sur le comportement tribologique de l'acier ER70S-6 (figure III.8). L'échantillon brut (Br) présente un COF relativement élevé, atteignant une valeur stable autour de 0,6, ce qui est attendu pour une microstructure ferritique tendre. L'échantillon traité thermiquement uniquement (BT) montre un comportement similaire, avec un léger abaissement du COF, ce qui peut s'expliquer par la formation d'une structure plus homogène après recuit, mais sans modification notable de la dureté de surface.

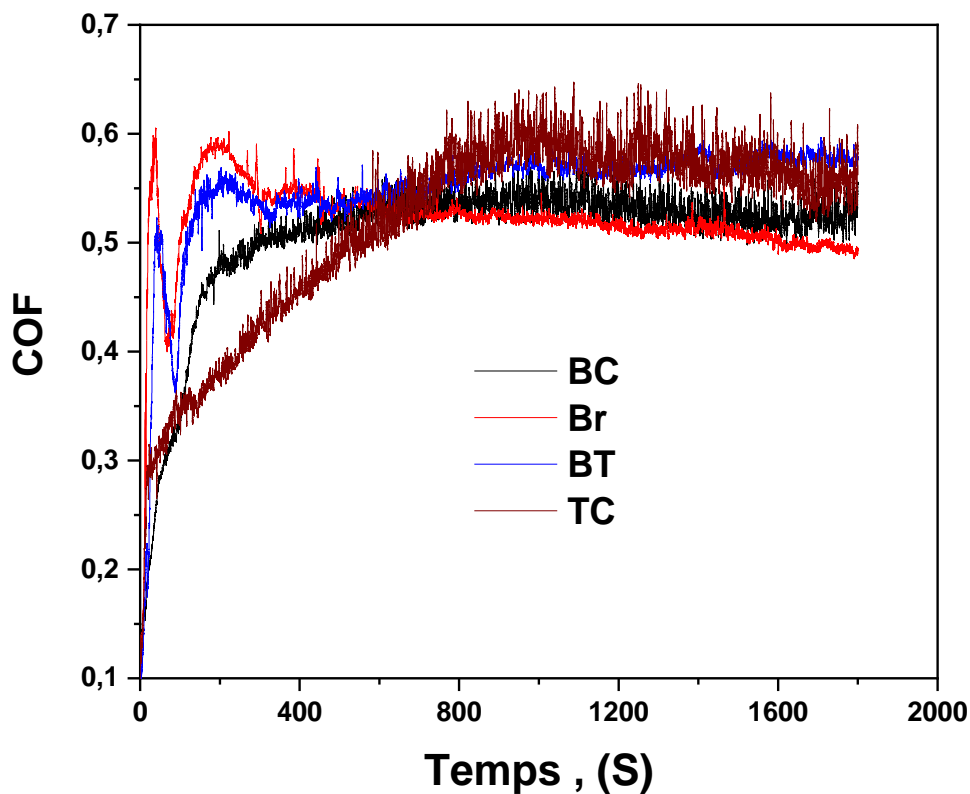


Figure III.8 : Coefficient de frottement de l'acier ER70-S6 après différents traitements.

En revanche, les échantillons cémentés (BC et TC) présentent des coefficients de frottement nettement plus faibles et plus stables, avec une valeur moyenne avoisinant 0,45–0,5. Cela s'explique par l'augmentation significative de la dureté de surface due à la cémentation, comme observé dans le profil de microdureté, réduisant ainsi la déformation plastique locale, la formation de débris d'usure et les phénomènes d'adhérence. L'échantillon TC (traité puis cémenté) montre un COF légèrement plus bas et plus régulier que BC, ce qui peut être attribué à la structure plus homogène induite par le recuit préalable, favorisant une couche cémentée plus

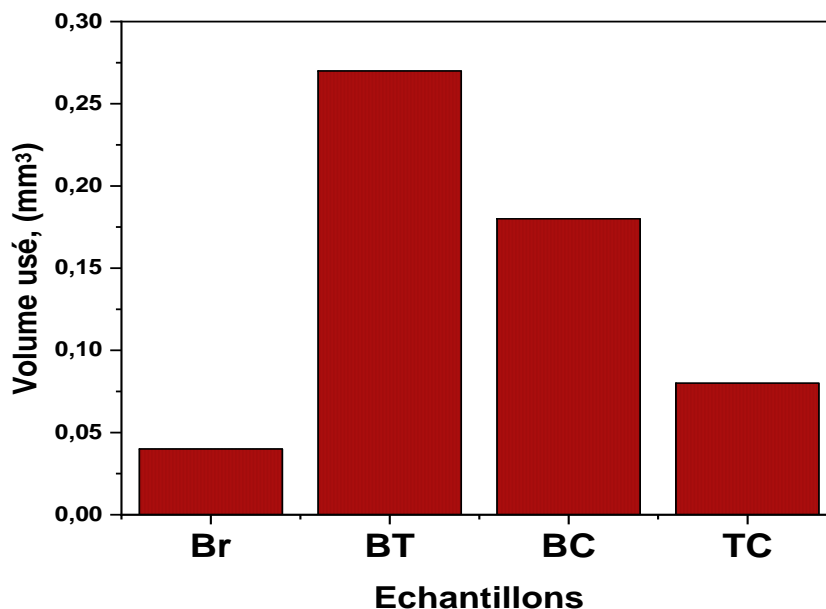
## Chapitre III : Résultats et discussions

uniforme, moins sujette à la fissuration ou à l'écaillage. Par ailleurs, la présence de couches oxydées ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$  et  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), identifiées par DRX, peut aussi contribuer à une légère réduction du frottement en jouant le rôle de lubrifiants solides.

### III.4.2 Volume de matière usée

La figure III.9 montre la variation du volume usé en fonction de différents traitements. L'échantillon Brut (Br) montre la meilleure résistance à l'usure (volume usé le plus faible), ce qui peut paraître contre-intuitif au vu de sa faible dureté. Cela pourrait s'expliquer par une microstructure plus ductile, capable de mieux absorber les charges de contact sans fissuration, ainsi qu'un comportement de frottement plus stable (comme vu dans le graphique du COF).

Les échantillons BC et TC montrent un volume usé plus élevé que l'échantillon Br, malgré une dureté de surface plus élevée. L'interprétation des résultats met en évidence le rôle déterminant de la couche d'oxyde formée lors de la cémentation sur la résistance à l'usure des échantillons. En effet, bien que les échantillons cémentés (BC et TC) présentent une dureté de surface élevée, leur résistance à l'usure s'avère inférieure à celle de l'échantillon brut (Br), ce qui peut paraître paradoxal au premier abord. Cette faiblesse est principalement attribuée à la présence d'une couche d'oxyde épaisse (identifiée par DRX comme  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  et  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), générée en surface durant le traitement thermo-chimique à haute température.



**Figure III.9** : Volume usé après teste d'usure de l'acier ER70S-6 après différents traitements.

## Chapitre III : Résultats et discussions

---

Cette couche d'oxyde agit comme une barrière fragile, susceptible de se fissurer et de se détacher sous l'effet des sollicitations mécaniques lors des tests d'usure. Une fois endommagée, elle produit des débris abrasifs qui aggravent le phénomène d'usure par abrasion. De plus, la faible adhérence de cette couche à la matrice métallique favorise la formation de zones de délamination, ce qui accélère la perte de matière. Ce comportement est particulièrement marqué dans l'échantillon TC, où le traitement thermique préalable a pu accentuer la formation d'oxydes, rendant la surface encore plus instable mécaniquement [55].

Enfin, l'échantillon BT (traité seul) est le moins résistant, ce qui est cohérent avec sa faible dureté, son COF élevé et sa microstructure probablement grossie par le recuit, le rendant plus sensible à la déformation plastique et à l'arrachement de matière.



# **Conclusion Générale**

# Références bibliographiques

---

## Conclusion générale

La présente étude a permis d'évaluer l'effet combiné d'un traitement thermique préalable (850 °C, 45 min, refroidissement à l'air) et d'un traitement thermochimique de cémentation sur le comportement microstructural, mécanique et tribologique de l'acier ER70S-6 élaboré par CMT.

L'évolution microstructurale observée avant et après traitement thermique révèle une transformation notable de la ferrite aciculaire en ferrite polygonale. Cette modification est induite par le recuit d'homogénéisation à 850 °C, qui favorise la recristallisation statique et la disparition des sous-structures internes héritées du soudage CMT. Cette transformation est bénéfique pour l'uniformité de la microstructure, mais peut réduire la dureté initiale.

Les analyses ont montré que le recuit d'homogénéisation favorise la régularisation de la microstructure de départ, facilitant la diffusion du carbone lors de la cémentation. Les résultats de diffraction des rayons X (DRX) ont révélé la formation de phases oxydées en surface ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), accompagnées d'un affaiblissement relatif des pics associés à la martensite, possiblement en raison d'une couche d'oxyde épaisse ou de l'atténuation du signal en profondeur.

Les profils de microdureté ont confirmé l'efficacité de la cémentation en augmentant significativement la dureté de surface pour les échantillons BC et TC. Toutefois, les performances tribologiques n'ont pas suivi cette même tendance. Les résultats de coefficient de frottement (COF) et de volume usé ont montré que les échantillons cémentés (en particulier BC) présentent une résistance à l'usure inférieure à celle de l'échantillon brut, malgré leur dureté plus élevée. Cette dégradation est principalement attribuée à la formation d'une couche d'oxyde fragile en surface, qui agit comme une barrière mécanique instable favorisant l'usure abrasive.

En conclusion, bien que la cémentation améliore nettement la dureté de l'acier, son efficacité tribologique reste limitée par la formation d'oxydes de surface. Le traitement thermique préalable optimise la diffusion du carbone et la régularité de la couche durcie, mais il semble également accentuer l'oxydation. Pour améliorer la résistance globale à l'usure, il est donc indispensable de maîtriser l'atmosphère du procédé de cémentation afin de limiter la formation d'oxydes néfastes.

# Références bibliographiques

---



## Références Bibliographiques

# Références bibliographiques

---

## Références bibliographiques

- [1] Hopkinson, E., Hague, R., & Dickens, P. (2005). *Fabrication rapide : une révolution industrielle à l'ère numérique*. Wiley-Blackwell.
- [2] AFNOR. (2011). *NF E67-001 : Additif de fabrication – vocabulaire* (p. 4).
- [3] Singh, SR et Khanna, P. (2021). Fabrication additive par arc électrique (WAAM) : un nouveau procédé pour façonner les matériaux techniques. *Materials Today : Actes*, 44 , 118–128.
- [4] Cambon, C. (2021). *Étude thermomécanique du procédé de fabrication métallique arc-fil : approche numérique et expérimentale* [Thèse de doctorat, Université Montpellier].
- [5] Funch, CV, Christiansen, TL, & Somers, MAJ (2022). Nitruration gazeuse d'acier maraging fabriqué de manière additive : cinétique de nitruration et évolution de la microstructure. *Surface & Coatings Technology*, 432 , article 128055.
- [6] Guo, Y. (2025). *Microstructures et propriétés mécaniques de l'acier ER70S-6 fabriqué par fabrication additive à l'arc à fil*. Mémoire de master, Université technologique de Nanyang.
- [7] Popovich, A., Sufiiarov, V., Polozov, I., Borisov, E., et Masaylo, D. (2016). Production d'implants de hanche en alliages de titane par fabrication additive. *Revue internationale de bio-impression*, 2 (2), 78–84.
- [8] Frazier, W. (2014). Fabrication additive métallique : une revue. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23 (6), 1917–1928.
- [9] Roguin, P. (2012). Présentation des procédés de soudage. *Cours ESSA-Institut de Soudure* .
- [10] Giot, K. (2012). Procédés de soudage : Procédés MIG et MAG. *Cours ESSA-Institut de Soudure* .
- [11] Fronius. (2014). *Transfert de métal froid : la technologie* . Technologie CMT.
- [12] Balasubramanian, M., Choudary, MV, Nagaraja, A., & Sai, KOC (nd). Procédé de transfert de métal à froid – Une revue. *Matériaux aujourd'hui* .
- [13] Selvi, S., Vishvakshenan, A., et Rajasekar, E. (2018). Technologie de transfert de métal froid (CMT) - Un aperçu. *Technologie de défense*, 14 (1), 28–44.
- [14] Monier, R. (2016). *Étude expérimentale du comportement dynamique des phases liquides en soudage par court-circuit contrôlé* [Thèse de doctorat, Université de Montpellier 2].
- [15] Duchateau, D., Laurent, A., Peyre, JP, Raffal, B. et Thomas, D. (1997). *Interactions traitements thermiques, traitements de surface sur les aciers* . CETIM.
- [16] Langevin, R. (septembre 2015). *Guide d'auto-apprentissage pour les opérateurs en traitement thermique* .
- [17] HIDOURI, A. (2016-2017). *Matériau métallique* (Chapitre 9). ISET Kasserine.
- [18] CNRS. (2001). *Ateliers de traitement thermique – Hygiène et sécurité* . Cahiers de notes documentaires, n° 183, 2e trimestre, p. 6.
- [19] Chakraborty, D., Tirumala, T., Chitral, S., et al. (2022). État de l'art du procédé de fabrication additive par arc électrique d'alliages de titane pour applications aérospatiales. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 31 (8), 6149–6182.
- [21] Ghiglione, D. et Leroux, C. (nd). *Pratique des traitements thermo-chimiques, cémentation, carbonitruration* . Technique de l'ingénieur M1226, 2-20.
- [22] An, X., Cawley, J., Rainforth, WM, et Chen, L. (2003). *Spectrochimica Acta - Partie B*, 58 .

# Références bibliographiques

---

- [23] Bensaada, S. (novembre 2019). *Traitements thermiques, classification et désignation des aciers et des fontes*. Université de Biskra.
- [24] Krauss, G. (1991). Microstructure et propriétés de l'acier cémenté. Dans *Manuel des métaux. Traitement thermique* (vol. 4). ASM International.
- [25] Michaud, P. (1986). *Compréhension du rôle des éléments carburigènes dans la performance de nuances d'aciers destinés aux outillages pour l'injection d'alliages légers*. Aciers spéciaux, n° 35.
- [26] Krauss, G. (1991). Microstructure, contrainte résiduelle et fatigue des aciers cémentés. Dans *Proceedings Quenching and Carburizing* (pp. 205–225). Institut des matériaux, Melbourne.
- [27] Gupta, J. (2009). *Propriétés mécaniques et d'usure d'échantillons d'acier doux carburé* [Thèse de doctorat].
- [28] Fischer, A., et Bobzin, K. (éd.). (2009). *Frottement, usure et protection contre l'usure* (vol. 10). John Wiley & Sons.
- [29] Fillot, N. (2004). *Étude mécanique de l'usure : Modélisation par éléments discrets des débits de troisième corps solide*, Thèse de doctorat, INSA Lyon.
- [30] Chattopadhyay, R. (2001). *Usure de surface : analyse, traitement et prévention*. ASM International.
- [31] Brunetière, N. (2015). *Introduction à la tribologie*. Institut Pprime – Futuroscope.
- [32] Ionescu, CC (2012). *Caractérisation des mécanismes d'usure par tribocorrosion d'alliages modèles Ni-Cr* [Thèse de doctorat].
- [33] Jellad, A. (2006). *Étude des propriétés mécaniques et tribologiques de couches minces nanostructurées : Cas du carbure de chrome*. Thèse de doctorat.
- [34] BEDLAOUI, A. (2019). *Thèse de doctorat* [Université M'Hamed Bougara Boumerdès].
- [35] LABIDI, M. (2008). *Étude du comportement en frottement et usure des matériaux céramiques Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et ZrO<sub>3</sub>*, Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba.
- [36] Landolt, D. (2003). *Corrosion et chimie des surfaces des métaux*. Presses Polytechniques et Universités Romandes.
- [38] Landolt, D. (1993). *Corrosion et chimie de surfaces des métaux* (Traité des matériaux). Presses Polytechniques et Universités Romandes.
- [39] Annou, M. (2013). *Étude de la résistance à la corrosion des dépôts composites (Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)* [Mémoire de magistère, Université Kasdi Merbah Ouargla].
- [40] Khoukhi, F. (2008). *Étude de l'efficacité de deux inhibiteurs de corrosion dans les milieux multiphasiques (eau, huile et gaz)*, Mémoire de magistère, Université M'Hamed Bougara de Boumerdès.
- [41] Deghamna, M., & Boumellit, Z. (2018). *Développement d'un revêtement anti-corrosion à base de TMOS sur l'acier doux A9 et l'acier inoxydable C0400-08 via le procédé sol-gel* [Projet de fin d'études, Université 8 Mai 1945 Guelma].
- [42] Landolt, D. (1993). *Corrosion et chimie de surface des métaux*. Presses Polytechniques et Universités Romandes.
- [43] Hannachi, L. et Dafri, W. (2008). *Les liquides ioniques inhibiteurs de corrosion efficaces sur l'acier A9 dans un milieu acide : Une approche écologique* [Mémoire de fin d'études, Université 8 Mai 1945 Guelma].

# Références bibliographiques

---

- [44] Kheradmand Fardnchi, Y., et al. (2022). Influence de l'apport thermique sur les propriétés de l'acier ER70S-6 par WAAM. *Revue de Soudage Avancé* .
- [45] Ayan, Y., et coll. (2023). Étude microstructurale et mécanique d'alliages FGM obtenue par WAAM. *Journal des Matériaux Métallique* .
- [46] Zaharia, F., et al. (2020). Effet de la cémentation gazeuse sur la résistance à l'usure de l'acier à faible teneur en carbone. *Surface Engineering*, 36 (7), 579–589.
- [47] Singh, R., et Khanna, P. (2021). Procédé WAAM dans la fabrication additive des aciers. *Materials Today : Actes*, 44, 118–128.
- [48] Kheradmand Fardnchi, Y., et al. (2022). Microstructure et analyse mécanique de l'acier ER70S-6 après WAAM. *Revue de recherche avancée sur le soudage*, 18 (2), 85–98.
- [49] Krauss, G. (1991). *Microstructure et propriétés des aciers carburés* . ASM International.
- [50] Totten, G. (2006). *Traitement thermique de l'acier : métallurgie et technologies* . CRC Press.
- [51] Davis, CL, & King, JE (1994). Amorçage du clivage dans la zone affectée thermiquement à gros grains réchauffée de manière intercritique : Partie I. Preuves fractographiques. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 25 , 563–573.
- [52] Araki, T., Enomoto, M., et Shibata, K. (1991). Aspects microstructuraux des structures ferritiques bainitiques et bainitiques des aciers HSLA à faible teneur en carbone (< 0,1 %) refroidis en continu. *Materials Transactions, JIM*, 32 , 729–736.
- [53] Seede, R., et al. (2021). Effet des traitements thermiques sur la microstructure et les propriétés mécaniques d'un acier martensitique à très haute résistance fabriqué par fabrication additive par fusion laser sur lit de poudre. *Fabrication additive*, 47 , 102255.
- [54] Frazier, WE (2014). Fabrication additive métallique : une revue. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23 , 1917–1928.
- [55] Delaunois, F., Stanciu, VI, Megret, A., & Sinnaeve, M. (2022). Comportement à l'oxydation et à l'usure de l'acier rapide et de l'acier semi-rapide utilisés dans les laminoirs à chaud. *Revue internationale des technologies de fabrication avancées*, 119 , 677–689.