

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب
Université –Ain Temouchent- Belhadj Bouchaib
Faculté des Sciences et de Technologie
Département Mécanique



Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du diplôme de Master en : Génie des matériaux
Domaine : Sciences et technologie
Filière : Génie des procédés
Spécialité : Génie des procédés des matériaux
Thème

Aperçu sur le génie des procédés des matériaux

Présenté Par :

- 1) M. TEMMOUN Sid Ahmed
- 2) M. TOUMI Ibrahim El Khalil

Devant le jury composé de :

Dr MERABTENE Meriem	UAT.B.B (Ain Témouchent)	Président
Pr DJEBBAR Nouredine		UAT.B.B (Ain Témouchent)	Examineur
Dr. BENZAAD Bourassia	M C A	UAT.B.B (Ain Témouchent)	Encadrante
Dr CHERIET Nour El Houda	M C B	UAT.B.B (Ain Témouchent)	Co-Encadrante

Année Universitaire 2024/2025

Remerciements

Tout d'abord, nous tenons à exprimer notre plus profonde et sincère gratitude à notre directrice de thèse, le Dr BENSAAD Bourassia et CHERIET Nour El Houda . Nous avons eu la chance incroyable de bénéficier de ses conseils. Ses patiences constantes, ses soutien inestimable et ses précieuses connaissances ont été déterminants pour mener à bien ce travail. Merci d'avoir cru en nous et de nous avoir guidés à chaque étape. Nous tenons également à remercier les membres de notre jury, le Dr MERABETIN Meriem et le Dr DJEBBAR Noureddine, pour le temps et l'attention qu'ils ont consacrés à l'évaluation de notre thèse. Sur le plan personnel, nous adressons un merci sincère à nos chers parents. Pour leur amour indéfectible, leur soutien émotionnel et leur présence constante à nos côtés, nous leur sommes éternellement reconnaissants. Cette réussite n'aurait pas été possible sans leurs encouragements. Merci à nos merveilleux amis. Votre soutien et vos encouragements ont rendu ce long voyage beaucoup plus facile et plus agréable. Enfin, nous sommes reconnaissants pour le temps passé à l'Université d'Aïn Témouchent Belhadj Bouchaib, un lieu d'apprentissage privilégié, où nous avons eu le privilège de rencontrer des enseignants inspirants et de nouer des amitiés durables.

Dédicace

Je dédie cette réussite à ceux qui ont éclairé mon chemin. À mes parents, dont les sacrifices, la foi inébranlable et l'amour infini ont été ma plus grande force et ma plus grande inspiration. À ma grand-mère, pour sa gentillesse constante. J'exprime également ma profonde gratitude à la merveilleuse famille qui nous a accueillis pendant notre formation. À un moment crucial, vous nous avez ouvert votre maison et votre cœur. Votre générosité et votre soutien resteront à jamais gravés dans ma mémoire. À mes amis, merci pour votre aide essentielle à cette thèse et pour m'avoir accompagné tout au long de cette épreuve. Ce travail est le reflet du soutien que j'ai reçu de vous tous. Avec toute ma profonde gratitude et mon amour.

TEMMOUN SidAhmed

Je dédie cet ouvrage à ma famille bien-aimée, dont le soutien, l'amour et les encouragements ont toujours été une source de force tout au long de ce parcours. À mes parents, pour leurs sacrifices et leur confiance inébranlable en moi. À mes frères et sœurs, pour leur soutien indéfectible. À ma chère tante, dont la gentillesse et le soutien ont été précieux pour moi. À la mémoire de mon oncle et de ma tante décédés, bien que vous ne soyez plus parmi nous, votre amour et votre influence restent profondément présents dans mon cœur. À ceux qui ont cru en moi même lorsque je doutais de moi-même. À mes professeurs et amis, merci pour votre soutien indéfectible. Cette réussite est autant la vôtre que la mienne.

TOUMI Ibrahim El Kalil

ملخص

تقدم أطروحة الماجستير في هندسة عمليات المواد دراسة متعمقة في علم المواد، مع التركيز على تعريفها وتصنيفها وخصائصها الأساسية. تميز الرسالة بين خمس عائلات رئيسية من المواد: المعادن، البوليمرات، السيراميك، المركبات، وأشبه الموصلات، مع تفصيل خصائصها الميكانيكية والحرارية والكهربائية والبصرية والكيميائية. يساعد تحليل البنية الدقيقة والكلية، وكذلك مخططات الطور، على فهم تأثير التنظيم الداخلي على أدائها. كما تسلط الرسالة الضوء على أهمية عمليات التصنيع، وخاصة اللحام، وتأثيرها على الخصائص الميكانيكية للمواد. تم إجراء محاكاة للحام لتقييم تأثيرها على مقاومة وتشوه المواد الملحومة. تهدف هذه المقاربة الشاملة إلى تحسين اختيار وتنفيذ المواد لتلبية الطلبات المتزايدة للصناعة الحديثة، مما يضمن الابتكار والجودة في مختلف القطاعات التكنولوجية

Résumé

Ce mémoire de Master en Génie des Procédés des Matériaux présente une étude approfondie de la science des matériaux, en insistant sur leur définition, classification et propriétés fondamentales. Il distingue cinq grandes familles de matériaux : métalliques, polymères, céramiques, composites et semi-conducteurs, en détaillant leurs caractéristiques mécaniques, thermiques, électriques, optiques et chimiques. L'analyse de la structure micro et macroscopique, ainsi que des diagrammes de phase, permet de comprendre l'influence de l'organisation interne sur leurs performances. Le mémoire met également en lumière l'importance des procédés de fabrication, notamment le soudage, et leur impact sur les propriétés mécaniques des matériaux. Une simulation du soudage est réalisée pour évaluer ses effets sur la résistance et la déformation des matériaux soudés. Cette approche globale vise à optimiser la sélection et la mise en œuvre des matériaux afin de répondre aux exigences croissantes de l'industrie moderne, garantissant ainsi innovation et qualité dans divers secteurs technologiques.

Abstract

This Master's thesis in Materials Process Engineering presents an in-depth study of materials science, focusing on their definition, classification, and fundamental properties. It distinguishes five major families of materials: metals, polymers, ceramics, composites, and semiconductors, detailing their mechanical, thermal, electrical, optical, and chemical characteristics. The analysis of micro and macrostructure, as well as phase diagrams, helps to understand the influence of internal organization on their performance. The thesis also highlights the importance of manufacturing processes, particularly welding, and their impact on the mechanical properties of

materials. A welding simulation is carried out to evaluate its effects on the strength and deformation of welded materials. This comprehensive approach aims to optimize the selection and implementation of materials to meet the increasing demands of modern industry, thus ensuring innovation and quality in various technological sectors.

Sommaire

Contents

Remerciements	i
Dédicace	ii
ملخص	iii
Résumé	iii
Sommaire	v
Liste des figures	x
Liste des tableaux	xii
Introduction générale	2
Introduction	4
1. Définition et classification des matériaux	5
1.1. Définition générale	5
1.2. Le rôle des matériaux dans l'ingénierie	5
1.3. Classification des matériaux	5
1.3.1. Matériaux Métalliques	5
1.3.2. Matériaux Polymères	6
1.3.3. Matériaux Céramiques	7
1.3.4. Matériaux Composites	9
1.3.5. Matériaux Semi-Conducteurs	9
2. Les propriétés des matériaux	10
2.1. Les Propriétés Mécaniques	11
2.2. Les Propriétés Thermiques	12
2.3. Propriétés Électriques et Magnétiques	12
2.4. Propriétés Optiques et Propriétés Chimiques	13
2.4.1. Propriétés Optiques	13

2.4.2. Propriétés Chimiques	13
3. La structure des matériaux.....	14
3.1. Microstructure et macrostructure	14
3.1.1. La Microstructure	15
3.1.2. La Macrostructure.....	16
3.2. Le Diagramme de Phase.....	17
3.2.1. La Transition de Phase	18
3.2.2. La Relation entre la Structure et les Propriétés.....	20
4. Le Comportement des Matériaux dans les Procédés de Fabrication.....	21
4.1. Le comportement des matériaux lors du Moulage (Fonderie)	21
4.2. Le comportement des matériaux lors du Forgeage.....	22
4.3. Le comportement des matériaux lors du Soudage	22
4.4. Le comportement des matériaux lors des procédés de l'usinage (Tournage, Fraisage, etc.)	25
4.5. Le comportement des matériaux lors du Traitement Thermique	26
4.5.1. La Trempe (Quenching)	26
4.5.2. Le Revenu (Tempering)	26
4.5.3. Le Recuit (Annealing)	26
4.5.4. La Normalisation (Normalizing).....	27
4.5.5. Cémentation (Carburizing)	27
4.5.6. Nitruration (Nitriding).....	27
4.5.7. Traitements thermochimiques complémentaires	27
Conclusion.....	27
Introduction	29
1. Le génie des procédés	30
1.1. Définition	30
1.2. Les principes de base du génie des procédés	30
2. Introduction aux procédés de fabrication des matériaux	30

2.1. Processus thermiques	31
2.2. Processus mécaniques	32
2.3. Processus chimiques	33
3. Les procédés de fabrication des matériaux :	34
3.1. La fusion	34
3.2. Le Dépôt.....	35
3.3. Le formage.....	36
3.4. L'Usinage.....	37
4. La classification des procédés de fabrication des matériaux	39
4.1. Les Procédés métallurgiques	40
4.2. Les Procédés céramiques	40
4.3. Les Procédés des polymères	41
4.4. Les Procédés des composites	41
5. L'Influence des procédés de fabrication sur les propriétés des matériaux.....	42
5.1. L'impact des procédés thermiques	42
5.2. L'impact des procédés chimiques	43
5.3. L'impact des procédés mécaniques.....	44
5.4. Les effets des conditions de fabrication sur la microstructure et sur les propriétés des matériaux.	44
5.4.1. Température de fabrication	45
5.3.2. Pression de fabrication	45
5.3.3. Vitesse de refroidissement	47
Conclusion.....	48
Introduction	50
1. L'Optimisation des procédés thermiques	51
1.1. Optimisation des cycles thermiques pour améliorer les propriétés des matériaux	51
1.1.1. Principes clés d'optimisation	51
1.1. L'Optimisation des Traitements thermiques.....	53

1.1.1.	L'Optimisation de la Trempe	53
1.1.2.	L'Optimisation du Revenu	54
1.1.3.	L'Optimisation de le Recuit.....	54
2.	Optimisation des procédés mécaniques	55
2.1.	L'optimisation des techniques de formage, pressage, étirage, emboutissage.....	56
2.1.1.	L'optimisation du Pressage.....	56
2.1.2.	L'optimisation d'Étirage	57
2.1.3.	L'optimisation d'Emboutissage.....	57
3.	Optimisation des procédés chimique et autres procédés spécifiques	58
3.1.	Optimisation des procédés chimiques.....	58
3.1.1.	L'optimisation du traitements de surface en génie des procédés chimiques	59
3.1.2.	L'optimisation du traitement par plasma non thermique	60
3.1.3.	L'optimisation du traitement par haute pression hydrostatique (HPP)	60
3.1.4.	L'optimisation de l'Impression 3D photonique (stéréolithographie)	61
3.1.5.	L'optimisation du Sonochimie.....	62
3.1.6.	L'optimisation du traitements par rayonnement (UV, gamma).....	62
3.2.	L'Optimisation des procédés de fabrication des matériaux avancés	63
3.2.1.	L'optimisation du Frittage (Sintering) :	63
3.2.2.	L'optimisation d'autres procédés avancés	64
4.	Modélisation des procédés de fabrication des matériaux.....	64
4.1.	Utilisation des modèles thermodynamiques et cinétiques pour prévoir les comportements des matériaux	65
4.1.1.	Modèles thermodynamiques.....	65
4.1.2.	Modèles cinétiques	65
4.1.3.	Couplage thermodynamique-cinétique	66
4.2.	Outils de simulation et d'optimisation des procédés	67
4.2.1.	Logiciels de simulation et d'optimisation.....	67
4.2.2.	Approche par éléments finis (EF)	67

Conclusion	67
1. Introduction	70
2. Matériels et méthodes	71
2.1. Le choix de procédés :	71
2.2. Le choix de matériaux :	72
2.3. Le choix de logiciel de simulation	72
3. Modelisation et simulation numérique	73
3.1 Le choix de la géométrie :	73
3.2. La déclaration des propriétés physiques :	75
3.3. Le choix de maillage	76
3.4. Conditions aux limites	77
4. Résultats et discussion	78
4.1. La validation expérimentale de la simulation numérique de l’essai de traction	78
Conclusion générale	83
Bibliographie	84

Liste des figures

Figure 1 Matériaux Métalliques	6
Figure 2 Matériaux Polymères	7
Figure 3 Matériaux Céramiques	8
Figure 4 Matériaux Composites	9
Figure 5 Matériaux Semi-Conducteurs	10
Figure 6 Microstructure d'un matériau	15
Figure 7 La Macrostructure d'un matériau	17
Figure 8 Diagramme de phase binaire Fer-Carbone (Fe-C)	18
Figure 9 Schéma de phénomène de Transitions de Phase	19
Figure 10 Le procédé de Moulage	21
Figure 11 Forgeage	22
Figure 12 Le procédé de Soudage	23
Figure 13 La Soudure homogène	23
Figure 14 La soudure hétérogène	23
Figure 15 Les défauts de soudure	24
Figure 16 La Classification des procédés de soudage	25
Figure 17 Usinage de pièces mécanique en aluminium	26
Figure 18 Schéma du processus des tuyaux	31
Figure 19 Représentation schématique de l'étape de laminage d'un film sec photosensible de SU-8 sur une structure ouverte en SU-8	32
Figure 20 Procédé de fabrication du ciment	34
Figure 21 la coulée du métal fondue sortant du four de la fonderie	35
Figure 22 Le dépôt en couche mince obtenue par les technologies PVD en phase vapeur	36
Figure 23 Les différentes techniques de formage	37
Figure 24 schéma de l'opération de Tournage	38
Figure 25 L'opération de Fraisage	38
Figure 26 le foret de perçage	39
Figure 27 Les zones de soudage	72
Figure 28 Dimensions de l'éprouvette soudée	73
Figure 29 modèle géométrique de l'éprouvette soudée	74
Figure 30 Dimensions de l'éprouvette non soudée	74
Figure 31 modèle géométrique de l'éprouvette non soudée	75

Figure 32 Choix du matériau	76
Figure 33 Le maillage de l'éprouvette soudée et non soudée	77
Figure 34 Les condition aux limites	77
Figure 35 comparaison entre les résultats de l'expérience et les résultats de la simulation numérique	78
Figure 36 comparaison entre le comportement mécanique de l'éprouvette soudée et celui de l'éprouvette non soudée	79
Figure 37 Les courbes contraintes-déformations des trois éprouvettes (MB, MF et zat)	80

Liste des tableaux

Tableau 1 Les Propriétés Mécaniques des matériaux.....	11
Tableau 2 Les Propriétés Thermiques des matériaux.....	12
Tableau 3 Les Propriétés Électriques et Magnétiques des matériaux	13
Tableau 4 Les Propriétés Optiques et Propriétés Chimiques des matériaux	14
Tableau 5 Propriétés mécaniques des matériaux	75

INTRODUCTION
GENERALE

Introduction générale

Les matériaux constituent la pierre angulaire de toute activité industrielle et technologique. Leur sélection, caractérisation et mise en œuvre conditionnent la performance, la durabilité et la sécurité des produits finis, qu'il s'agisse de structures, de machines ou d'appareils électroniques. Ce mémoire s'attache à présenter les fondements de la science des matériaux, en abordant leur définition et leur classification en grandes familles : métalliques, polymères, céramiques, composites et semi-conducteurs. Il met en lumière les propriétés essentielles — mécaniques, thermiques, électriques, optiques et chimiques — qui déterminent le comportement des matériaux dans diverses conditions d'utilisation. L'étude approfondie de la structure, à l'échelle micro et macroscopique, ainsi que l'analyse des diagrammes de phase, permettent de comprendre l'influence de l'organisation interne sur les performances des matériaux. Enfin, l'impact des procédés de fabrication sur la structure et les propriétés des matériaux est souligné, démontrant l'importance d'un contrôle rigoureux tout au long de la chaîne de production. Cette approche globale est indispensable pour concevoir des matériaux adaptés aux exigences croissantes de l'industrie moderne et garantir l'innovation technique dans des secteurs variés. On va découvrir également l'un des procédés de fabrication importants dans le domaine de l'ingénierie des procédés, à savoir le soudage. En suite on va simuler le soudage dans l'un des programmes spéciaux et verrons son rôle dans la modification des propriétés mécaniques des matériaux.

Chapitre I :
Les matériaux

Chapitre 1 : Les matériaux

Introduction

- 1. Définition et classification des matériaux**
- 2. Les propriétés des matériaux**
- 3. Structures des matériaux**
- 4. Comportement des matériaux**

Conclusion

Introduction

Les matériaux sont au cœur de toutes les innovations technologiques et industrielles. Leur sélection, leur caractérisation et leur mise en œuvre conditionnent la performance, la durabilité et la sécurité des produits finis, qu'il s'agisse de bâtiments, de machines, de dispositifs électroniques ou d'objets du quotidien. Ce chapitre vise à présenter les fondements de la science des matériaux, en abordant d'abord leur définition et leur classification en grandes familles (métalliques, polymères, céramiques, composites, semi-conducteurs). Il détaille ensuite les principales propriétés qui déterminent le comportement des matériaux dans diverses conditions d'utilisation, qu'elles soient mécaniques, thermiques, électriques, optiques ou chimiques. L'étude de la structure, à l'échelle micro et macroscopique, ainsi que l'analyse des diagrammes de phase, permettent de comprendre l'influence de l'organisation interne sur les performances des matériaux. Enfin, ce chapitre met en lumière l'impact des procédés de fabrication sur la structure et les propriétés des matériaux, soulignant l'importance d'un contrôle rigoureux tout au long de la chaîne de production. Cette approche globale est essentielle pour concevoir des matériaux adaptés aux exigences croissantes de l'industrie moderne.

1. Définition et classification des matériaux

1.1. Définition générale

Un matériel, c'est tout simplement une substance que les humains utilisent pour créer des objets, construire des bâtiments ou des machines. Cette substance peut provenir de la nature (le bois ou la pierre, le plastique ou les métaux) [1].

1.2. Le rôle des matériaux dans l'ingénierie

Les matériaux jouent un rôle central en ingénierie, car ils déterminent la performance, la durabilité, la sécurité et l'innovation des produits et infrastructures. Leur choix et leur mise en œuvre permettent d'alléger, de renforcer, d'isoler ou d'optimiser les objets techniques selon les besoins spécifiques de chaque application industrielle. Les ingénieurs matériaux interviennent ainsi dans la sélection, la conception, le développement et l'amélioration des matériaux pour garantir que chaque produit réponde aux exigences de qualité, de coût, de fonctionnalité et de respect de l'environnement. Ce rôle est essentiel dans des secteurs variés comme l'aéronautique, l'automobile, l'énergie, la construction, la biomédecine ou l'électronique, où l'innovation repose souvent sur l'utilisation de matériaux adaptés ou sur mesure [2].

1.3. Classification des matériaux

On les regroupe généralement en cinq grandes familles, comme suit :

1.3.1. Matériaux Métalliques

Les matériaux métalliques sont des éléments ou des alliages qui ont des propriétés conductrices de l'électricité et de la chaleur (comme Fer, acier, aluminium, cuivre, nickel, titane) [3]. La figure 1 représente les différents types des matériaux métalliques.



Figure 1 Matériaux Métalliques

1.3.2. Matériaux Polymères

Les matériaux polymères sont des matériaux constitués de macromolécules organiques formées par la répétition de petites unités appelées monomères, liées entre elles par des liaisons covalentes. Ces matériaux se distinguent par leur structure chimique, leur faible densité, leur grande flexibilité et leur résistance à la corrosion.

Les polymères peuvent être naturels (comme le caoutchouc, la cellulose ou l'amidon) ou synthétiques (comme le polyéthylène, le polystyrène, le PVC). Ils sont largement utilisés dans de nombreux domaines, notamment dans l'emballage, l'automobile, l'électronique, le textile, le médical et l'aéronautique, grâce à leurs propriétés variées comme l'isolation thermique ou électrique, la légèreté, la résistance mécanique et chimique .

Ils peuvent aussi être classés selon leur comportement thermique :

- Thermoplastiques : ramollissent à la chaleur (ex : PET, PEHD),
- Thermodurcissables : durcissent de façon irréversible à la chaleur (ex : résines époxy),
- Élastomères : très déformables et capables de retrouver leur forme initiale (ex : caoutchouc) [4].
- En résumé, les matériaux polymères jouent un rôle clé dans le développement de matériaux innovants, légers et performants. La figure 2 présente un exemple de matériau polymère.



Figure 2 Matériaux Polymères

1.3.3. Matériaux Céramiques

Les matériaux céramiques sont des matériaux solides inorganiques non métalliques, obtenus généralement par la cuisson de matières premières naturelles (comme l'argile, le kaolin ou le sable) à haute température. Ils sont composés principalement de composés oxydés, comme les oxydes, les nitrures, les carbures ou les borures. Les matériaux céramiques se distinguent par leur résistance exceptionnelle aux conditions extrêmes, mais leur fragilité limite leur utilisation dans certaines applications mécaniques [5]. La figure 3 présente des exemples de matériaux céramiques.

Les céramiques les plus connues:

- Céramiques traditionnelles : briques, tuiles, poterie, porcelaine
- Céramiques techniques : alumine (Al_2O_3), carbure de silicium (SiC), nitrure de bore (BN)

Ce type de matériaux sont caractérisés principalement par :

- Une dureté élevée
- Une bonne résistance à l'usure et à la corrosion
- Une très haute température de fusion
- Une mauvaise conductivité électrique et thermique (isolants)

Grace à ces caractéristique, les domaines d'utilisation des céramiques sont variés; tels que:

- Électronique: dans l'isolants et les condensateurs,
- Biomédecine: dans les prothèses et les implants dentaires,
- Aérospatiale: dans les revêtements thermiques,
- Industrie mécanique: dans les outils de coupe et les roulements)



Figure 3 Matériaux Céramiques

1.3.4. Matériaux Composites

Les matériaux composites sont des matériaux hybrides qui combinent deux ou plusieurs matériaux différents pour obtenir des propriétés améliorées. Les exemples les plus courants de matériaux composites : les fibres de carbone/époxyde, les fibres de verre/polyester, les particules de céramique/métal [6] . La figure 4 présente un exemple de matériau composite.

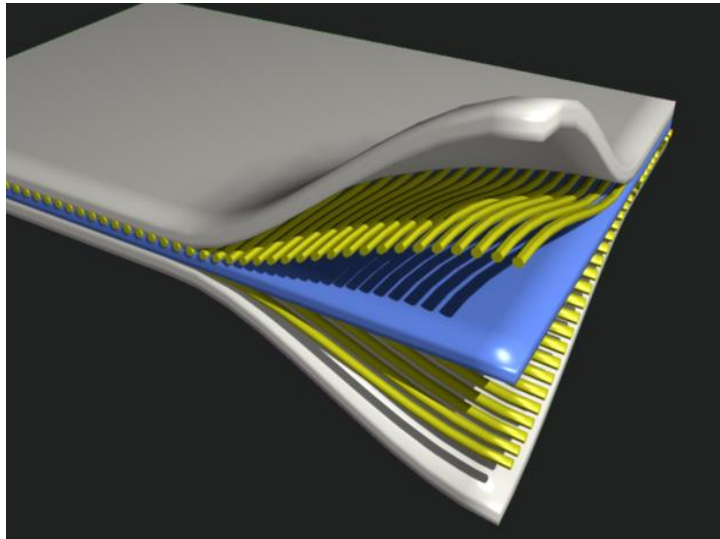


Figure 4 Matériaux Composites

1.3.5. Matériaux Semi-Conducteurs

Les matériaux semi-conducteurs sont des matériaux dont la conductivité électrique se situe entre celle des conducteurs (comme le cuivre) et celle des isolants (comme le verre). Leur particularité est que leur capacité à conduire l'électricité peut être modifiée par des facteurs externes tels que la température, la lumière, ou l'ajout d'impuretés (dopage). La figure 5 présente un exemple de matériau semi-conducteur.

Ils jouent un rôle fondamental dans l'électronique moderne et sont utilisés dans la fabrication de composants tels que :

- les diodes,
- les transistors,
- les cellules photovoltaïques,
- les circuits intégrés.

Les matériaux semi-conducteurs les plus courants sont :

- le silicium (Si),
- le germanium (Ge),
- le carbure de silicium (SiC),
- et des composés comme l'arséniure de gallium (GaAs).

Ils sont essentiels dans des domaines comme l'informatique, les télécommunications, l'énergie solaire et les capteurs intelligents [7] .



Figure 5 Matériaux Semi-Conducteurs

2. Les propriétés des matériaux

Les propriétés des matériaux sont les caractéristiques intrinsèques qui définissent leur comportement et leur performance dans différentes conditions. Ces propriétés peuvent être physiques, mécaniques, thermiques, électriques, optiques, etc [8] .

2.1. Les Propriétés Mécaniques

Les propriétés mécaniques d'un matériau déterminent sa réponse aux forces et contraintes externes, influençant ainsi sa durabilité et son efficacité [9] .

Tableau 1 Les Propriétés Mécaniques des matériaux

Propriété Mécanique	Définition	Exemple
Ductilité	Capacité de s'étirer sans se rompre et de conserver sa nouvelle forme [10]	Le cuivre (ductile) L'or (non ductile)
Rigidité	Capacité de résister à la déformation [11]	Le béton armé (rigide) Le contreplaqué (non rigide)
Resistance à la traction	Capacité à résister à une force de traction [12]	Acier (bonne résistance à la traction) Béton (faible résistance à la traction)
Resistance à la compression	Capacité à résister à une force de compression [12]	Béton (bonne résistance à la compression) Glace à 0 °C (faible résistance à la compression)
Fatigue	Resistance à la rupture sous charge cyclique répétée [13]	Titane (bonne résistance à la rupture) Polymère (faible résistance à la rupture)

2.2. Les Propriétés Thermiques

Ces propriétés présentent l'ensemble de caractéristiques qui décrivent le comportement d'un matériau ou d'un système en réponse à des changements de température ou à des échanges de chaleur. Ces propriétés influencent la manière dont les matériaux absorbent, transmettent, stockent ou dissipent la chaleur [14].

Tableau 2 Les Propriétés Thermiques des matériaux

Propriétés Thermiques	Définition	Exemple
Conductivité thermique	Mesure de la capacité d'un matériau à transmettre la chaleur [15]	Cuivre (bon conducteur thermique) Air (mauvais conducteur thermique)
Dilatation thermique linéique	Variation de la longueur d'un matériau par degré de température [16]	Acier (bonne dilatation thermique) Verre (mauvaise dilatation thermique)
Resistance à la chaleur	Température maximale qu'un matériau peut supporter sans dégradation [17]	Béton (bonne résistance à la chaleur) Bois sec (mauvaise résistance à la chaleur)

2.3. Propriétés Électriques et Magnétiques

Ces propriétés présentent l'ensemble de caractéristiques qui décrivent le comportement d'un matériau ou d'un système en réponse à des phénomènes électriques et magnétiques. Ces propriétés influencent la manière dont les matériaux interagissent avec les champs électriques et magnétiques, et sont essentielles pour comprendre et concevoir des systèmes électriques, électroniques et magnétiques [18].

Tableau 3 Les Propriétés Électriques et Magnétiques des matériaux

Propriétés Électriques et Magnétiques	Définition	Exemple
Conductivité électrique	Mesure de la facilité avec laquelle un matériau conduit l'électricité [19]	Cuivre(bon conductivité électrique) Plastique (mauvaise conductivité électrique)
Perméabilité magnétique	Mesure de la réponse d'un matériau à un champ magnétique [20]	Fer(bon perméabilité magnétique) Bois (pas de perméabilité magnétique)

2.4. Propriétés Optiques et Propriétés Chimiques

2.4.1. Propriétés Optiques

Les propriétés optiques d'un matériau ou d'une substance décrivent la manière dont celui-ci interagit avec la lumière. Cela inclut la façon dont le matériau absorbe, réfléchit, transmet, réfracte (plie) ou émet de la lumière. Ces interactions sont essentielles pour comprendre les phénomènes tels que la couleur, la transparence, l'opacité, la fluorescence, et bien plus encore [21] .

2.4.2. Propriétés Chimiques

Les propriétés chimiques d'une substance décrivent sa capacité à subir des transformations chimiques ou à réagir avec d'autres substances pour former de nouveaux composés. Ces propriétés sont souvent étudiées à travers les réactions chimiques que la substance peut subir, telles que la combustion, l'oxydation, les réactions acido-basiques, etc [22] .

Tableau 4 Les Propriétés Optiques et Propriétés Chimiques des matériaux

Propriétés Optiques et Chimiques	Définition	Exemple
Transparence (optique)	Mesuré de la capacité d'un matériau à laisser passer la lumière sans déformer ni l'absorber [23]	Eau distille (transparent) Or (non transparent)
Résistance à la corrosion (chimique)	Capacité d'un matériau à résister à la dégradation chimique ou électrochimique dans un environnement agressif [24]	Cuivre dans l'air humide (résiste au corrosion) Fer pur (ne résiste pas au corrosion)
Stabilité chimique (chimique)	Mesure de la tendance d'une substance à réagir chimiquement avec son environnement ou à se décomposer [25]	Sel de table (chimiquement stable) Métaux alcalins (non stable chimiquement)

3. La structure des matériaux

La structure des matériaux fait référence à l'arrangement spatial des atomes, des molécules ou des particules qui composent le matériau. Cette structure détermine les propriétés physiques et chimiques du matériau, telles que sa densité, sa dureté, sa conductivité thermique et électrique, etc [26].

3.1. Microstructure et macrostructure

Dans le domaine de structure des matériaux on définit les matériaux selon la chaîne microstructure ou macrostructure

3.1.1. La Microstructure

La microstructure désigne l'organisation de ses constituants à l'échelle microscopique, résultant de son arrangement atomique et de la présence de défauts cristallins.

Elle se compose principalement :

- De cristaux ou grains (dans les matériaux polycristallins), dont la taille et l'orientation influencent les propriétés macroscopiques.
- De défauts cristallins (dislocations, lacunes), qui perturbent l'ordre périodique du réseau et modifient localement le comportement du matériau.
- De phases secondaires (présentes dans les alliages ou composites), issues de la coexistence de plusieurs composants chimiques ou structuraux. La figure 6 présente la chaîne microstructure d'un matériau.

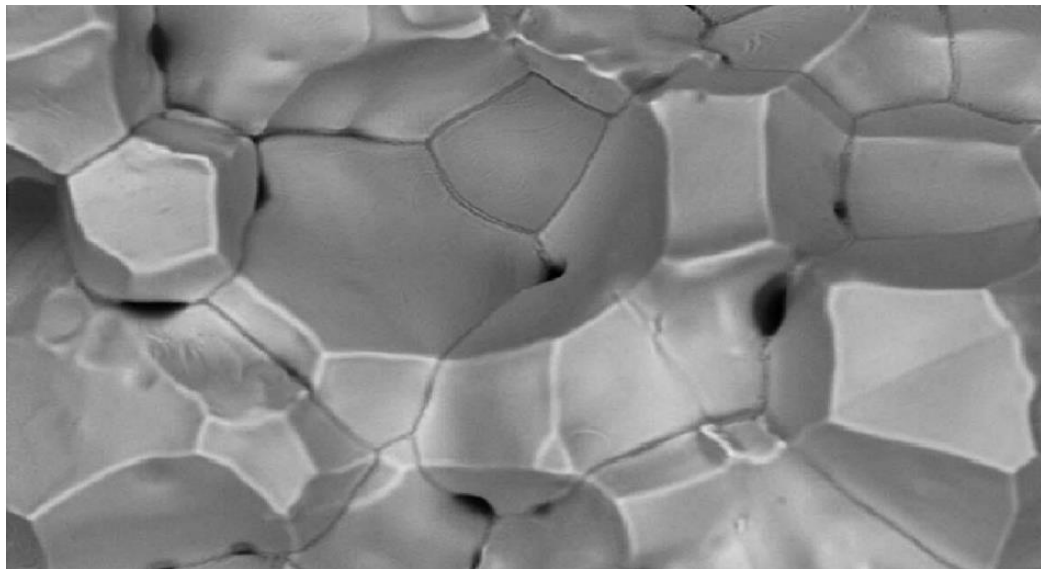


Figure 6 Microstructure d'un matériau

Ces éléments microstructuraux impactent directement les propriétés du matériau :

- La résistance mécanique est souvent améliorée par une réduction de la taille des grains (effet Hall-Petch) et par la présence contrôlée de défauts, qui entravent le mouvement des dislocations.
- La résistance à la corrosion peut être diminuée par les joints de grains ou les défauts, qui constituent des zones privilégiées pour l'initiation de réactions chimiques destructrices. Cette

relation structure-propriété souligne l'importance de la caractérisation microstructurale dans la conception de matériaux performants [27] .

3.1.2. La Macrostructure

La macrostructure d'un matériau correspond à son organisation visible à l'œil nu ou à faible grossissement, reflétant sa morphologie globale. Elle englobe :

- La forme et les dimensions du matériau (plaques, profilés, pièces moulées), déterminant son adaptation à des applications spécifiques.
- La distribution des phases à grande échelle (agrégats, zones hétérogènes), influençant l'homogénéité des propriétés.
- Les défauts macroscopiques (porosités, fissures, retassures), souvent issus des procédés de fabrication.

La figure 7 illustre clairement l'évolution d'une macrostructure et la façon dont l'analyse de Fourier permet de quantifier l'organisation spatiale des phases. Elle met en évidence l'importance de la caractérisation morphologique pour comprendre et optimiser les propriétés des matériaux.

Ces caractéristiques impactent significativement les performances du matériau :

- Les propriétés mécaniques globales (résistance, ductilité, tenue en fatigue) dépendent de la géométrie et de l'intégrité structurale. Par exemple, une porosité excessive réduit la résistance à la traction.
- L'esthétique et la fonctionnalité sont directement liées à la macrostructure : une surface rugueuse ou une forme inadéquate peut rendre le matériau inutilisable dans un contexte industriel ou grand public.

Contrairement à la microstructure, la macrostructure se maîtrise principalement lors de la conception des procédés (moulage, usinage, traitement thermique), soulignant l'importance d'un contrôle qualité rigoureux [28] .

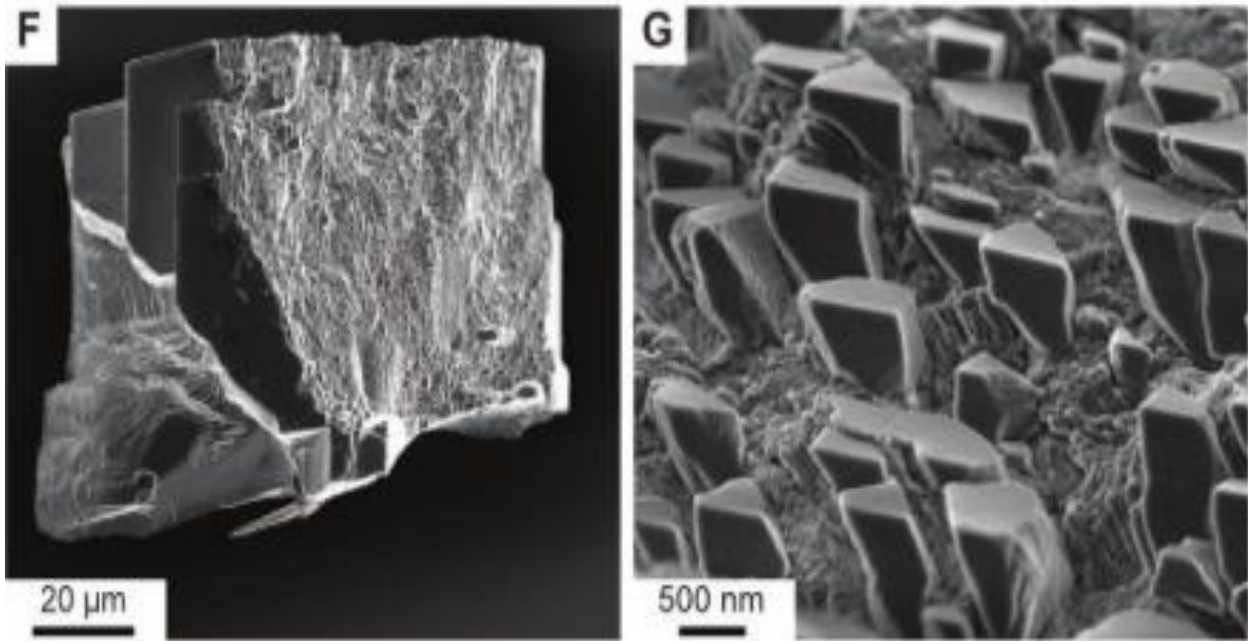


Figure 7 La Macrostructure d'un matériau

3.2. Le Diagramme de Phase

Un diagramme de phase est un outil fondamental en science des matériaux. Il s'agit d'une représentation graphique qui permet de visualiser les états d'équilibre d'un système en fonction de variables thermodynamiques telles que la température, la pression et la composition chimique. Grâce à ce diagramme, il est possible de prévoir quelles phases seront présentes dans un matériau donné selon les conditions auxquelles il est soumis. Cette prévision est essentielle pour comprendre comment les transitions de phase, telles que la fusion, la solidification ou la transformation de phases solides, influencent les propriétés finales du matériau.

Un exemple classique est le diagramme de phase binaire Fer-Carbone (Fe-C) représenté sur la figure 8. Ce diagramme joue un rôle central dans l'étude des alliages ferreux et, en particulier, de l'acier. Il met en évidence plusieurs éléments clés, notamment la ligne de fusion (appelée aussi solidus), la ligne de cristallisation (ou liquidus), ainsi que des points invariants comme l'eutectique, l'eutectoïde et le péritectique. Il permet également d'identifier les différents champs de phases, tels que l'austénite, la ferrite ou la cémentite, qui apparaissent selon la composition en carbone et la température.

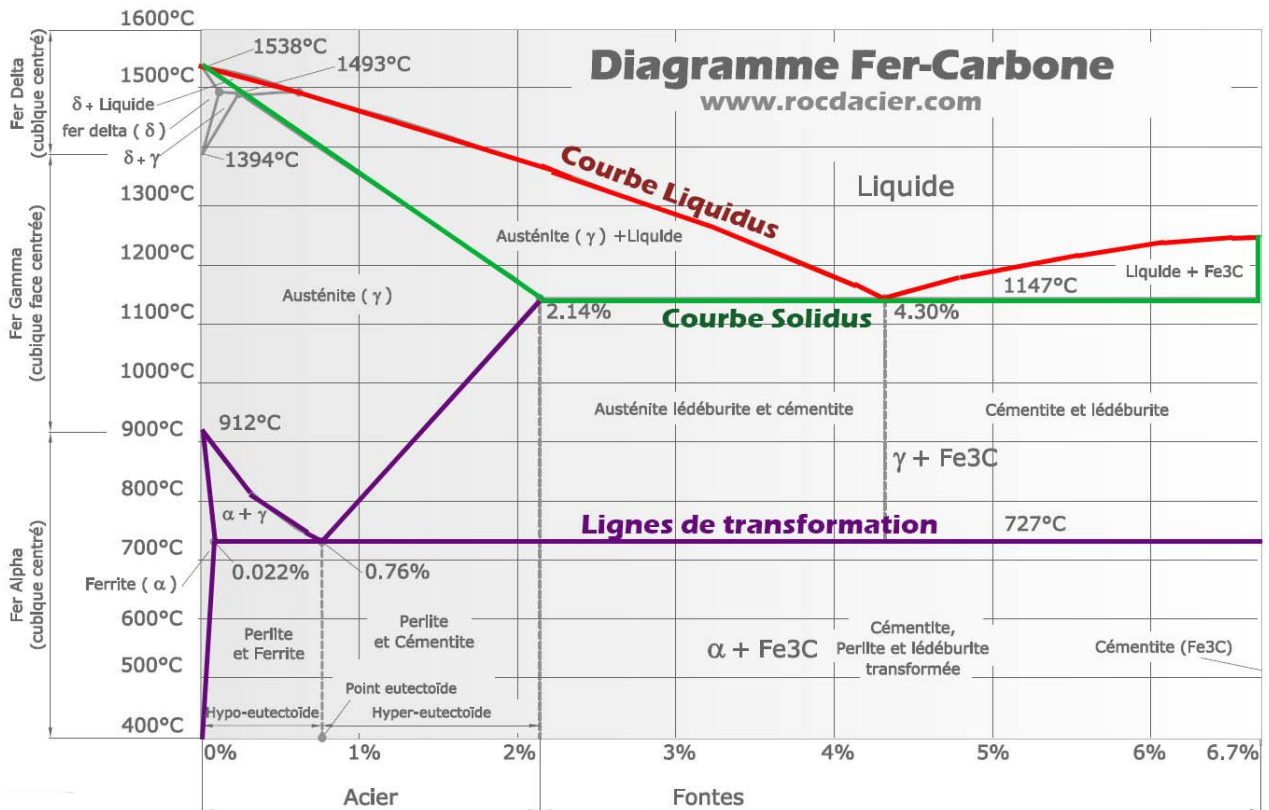


Figure 8 Diagramme de phase binaire Fer-Carbone (Fe-C)

La maîtrise des diagrammes de phase est donc indispensable pour tout ingénieur ou scientifique travaillant dans le domaine des matériaux, car elle permet d'anticiper le comportement des alliages lors des traitements thermiques ou des procédés de fabrication, et d'optimiser ainsi les propriétés mécaniques et fonctionnelles des produits finis [29] .

3.2.1. La Transition de Phase

Une transition de phase est une transformation physique d'un système d'un état (phase) à un autre, qui se produit lorsqu'un paramètre externe, typiquement la température ou la pression, atteint une valeur critique. Cette transformation se caractérise par un changement discontinu ou continu des propriétés thermodynamiques du système, telles que la densité, l'enthalpie ou l'entropie, et correspond au franchissement d'une frontière dans le diagramme de phase. Dans un diagramme de phase, la transition de phase correspond au passage d'une phase à une autre (par exemple, solide à liquide, liquide à gaz), avec des changements souvent marqués par une discontinuité dans une ou

plusieurs grandeurs physiques [30] .La figure 9 schematise les Transitions de Phase possibles.

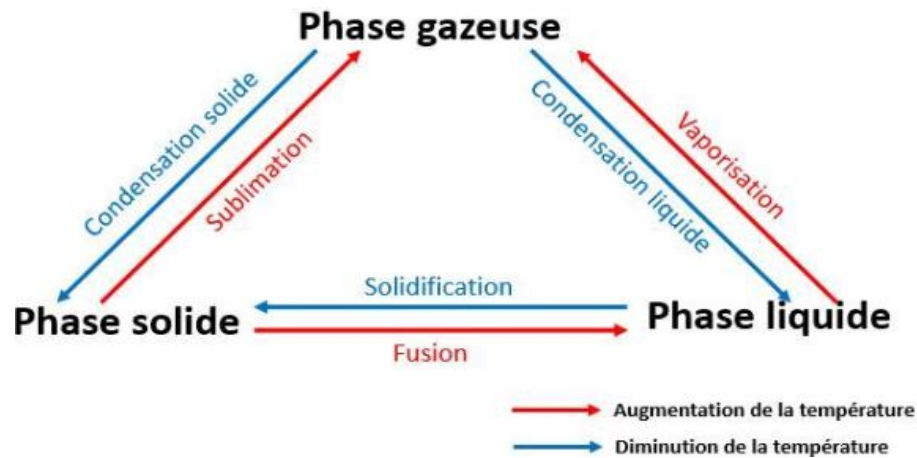


Figure 9 Schéma de phénomène de Transitions de Phase

3.2.1.1. La Fusion/Solidification :

La fusion est la transition de phase au cours de laquelle un corps passe de l'état solide à l'état liquide. Pour un corps pur, cette transformation se produit à une température constante appelée point de fusion. Pendant la fusion, la température reste constante tandis que le corps absorbe une quantité de chaleur appelée enthalpie (ou chaleur) latente de fusion, nécessaire pour rompre les liaisons dans le solide sans augmenter la température [31].

La solidification est l'opération inverse de la fusion, c'est le passage d'un liquide à un état solide. Ce processus se fait généralement par refroidissement à pression constante, à une température appelée point de solidification (qui est souvent égale au point de fusion pour un corps pur). Pendant la solidification, la chaleur latente de fusion est libérée dans l'environnement. La solidification commence par la formation de germes solides (noyaux) qui croissent jusqu'à transformer entièrement le liquide en solide [32].

La connaissance de la température de solidification/fusion définit la température de traitement thermique, affectant la microstructure et les propriétés mécaniques.

3.2.1.2. Transformation Eutectoïde (Péritelécite dans le système Fe-C) :

C'est la transformation isotherme d'une phase solide en deux phases solides à 727°C dans le système Fe-C. Elle définit les microstructures possibles de l'acier (par exemple, perlite, sorbite, bainite), affectant ainsi la dureté, la résistance et la ductilité [33] .

3.2.1.3. Transformation Martensitique :

C'est la transformation non-diffusionnelle (rapide) d'austénite en martensite, induite par refroidissement ou déformation. Elle améliore significativement la dureté et la résistance mécanique de certains aciers, mais peut réduire la ductilité [34] .

3.2.2. La Relation entre la Structure et les Propriétés

La relation entre la structure et les propriétés des matériaux est un aspect fondamental en science des matériaux. En effet, la microstructure – c'est-à-dire l'organisation interne des grains, des phases et des défauts à l'échelle microscopique – joue un rôle déterminant dans les performances d'un matériau. Par exemple, la taille des grains influence directement la résistance mécanique : plus les grains sont fins, plus le matériau est résistant, conformément à la loi de Hall-Petch. À l'inverse, des grains trop gros peuvent rendre le matériau plus fragile.

Les défauts cristallins, tels que les dislocations ou les lacunes, affectent également les propriétés. Une accumulation de dislocations peut augmenter la dureté d'un métal, mais réduire sa ductilité, c'est-à-dire sa capacité à se déformer sans se casser. De même, la présence de phases secondaires, comme la cémentite dans l'acier, peut accroître la dureté mais aussi rendre le matériau plus cassant si leur répartition n'est pas homogène.

La manipulation de la microstructure s'effectue principalement par des traitements thermiques (comme le recuit ou la trempe), l'ajout d'éléments d'alliage ou encore des procédés de déformation plastique. Par exemple, le recuit permet de restaurer la ductilité d'un métal écroui, tandis que la trempe fige une microstructure dure, mais souvent plus fragile. L'ajout de certains éléments d'alliage permet, quant à lui, de stabiliser des phases particulières et d'obtenir des propriétés spécifiques.

Il est donc essentiel de bien contrôler la microstructure pour optimiser les performances des matériaux selon l'usage souhaité. Un contrôle inadéquat peut entraîner l'apparition de défauts, comme des porosités ou une distribution inégale des phases, qui dégradent les propriétés mécaniques ou la résistance à la corrosion. Ainsi, la compréhension et la maîtrise de la relation structure-propriétés permettent de concevoir des matériaux adaptés à des applications variées, tout en évitant les compromis indésirables entre résistance, ductilité et durabilité [35] .

4. Le Comportement des Matériaux dans les Procédés de Fabrication

On définit le comportement du matériaux comme l'ensemble des réponses physiques, chimiques et mécaniques d'un matériau à des sollicitations externes (température, pression, déformation, etc.) lorsqu'il est soumis à un ou plusieurs procédés de fabrication (moulage, forgeage, soudage, usinage, traitement thermique, etc.) [36] .

4.1.Le comportement des matériaux lors du Moulage (Fonderie)

Le moulage également connu sous le terme de fonderie, a un impact significatif sur la structure des pièces obtenues. En effet, le processus de refroidissement influence directement la formation des cristaux, qui peuvent être soit columnaires, soit équiaxes, selon la vitesse et les conditions de refroidissement appliquées. De plus, la qualité du moulage joue un rôle crucial, car elle peut entraîner la présence de défauts tels que des porosités et des inclusions. Un exemple concret de ce procédé est observable dans le moulage de pièces en aluminium ou en fonte, où ces principes sont mis en application [37] .



Figure 10 Le procédé de Moulage

4.2. Le comportement des matériaux lors du Forgeage

Le forgeage est un procédé de mise en forme des métaux qui consiste à déformer plastiquement une pièce par application d'efforts importants, souvent à chaud, afin d'obtenir une forme désirée tout en améliorant les propriétés mécaniques du matériau. Le comportement des matériaux lors du forgeage dépend principalement de la température, de la vitesse de déformation, et de la microstructure initiale [38].



Figure 11 Forgeage

4.3. Le comportement des matériaux lors du Soudage

Le soudage est une opération consistant à réunir deux ou plusieurs parties d'un assemblage, assurant leur continuité, soit par chauffage, soit par pression, soit par les deux, avec ou sans métal d'apport. La figure 12 présente le procédé de soudage à l'arc électrique.



Figure 12 Le procédé de Soudage

On distingue principalement deux types de soudure :

- **Soudure homogène** : le métal qui compose le joint est de même nature que les pièces à souder.

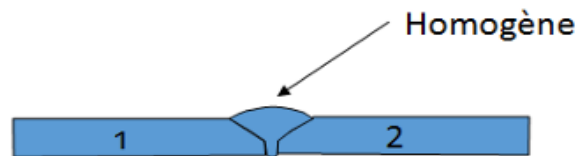


Figure 13 La Soudure homogène

- **Soudure hétérogène** : le métal du joint est différent de celui des pièces à assembler [40].

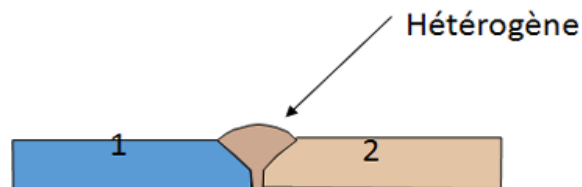


Figure 14 La soudure hétérogène

Le soudage génère deux zones à microstructures différentes :

- La Zone Fondue (ZF)
- La Zone Affectée thermiquement (ZAT),

Ce procédé peut entraîner des défauts (porosités, fissures de solidification) en fonction des paramètres de soudage, comme illustré sur la figure 15 par le soudage de pièces en acier inoxydable pour des applications corrosives [39].

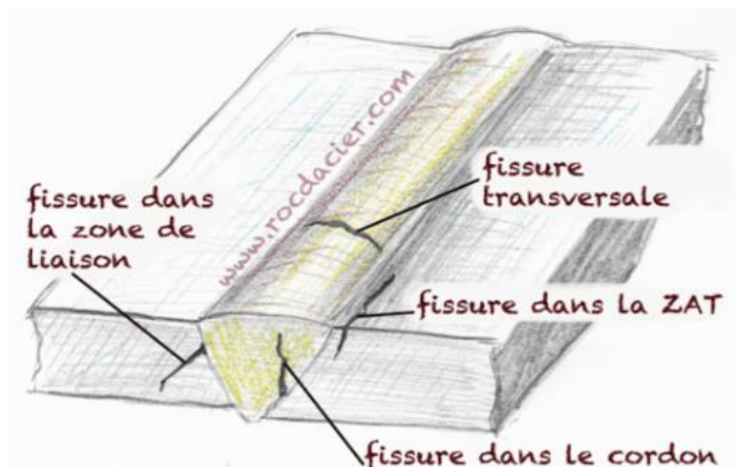


Figure 15 Les défauts de soudure

Les procédés de soudage peuvent être classés comme présenter sur la figure 16 :

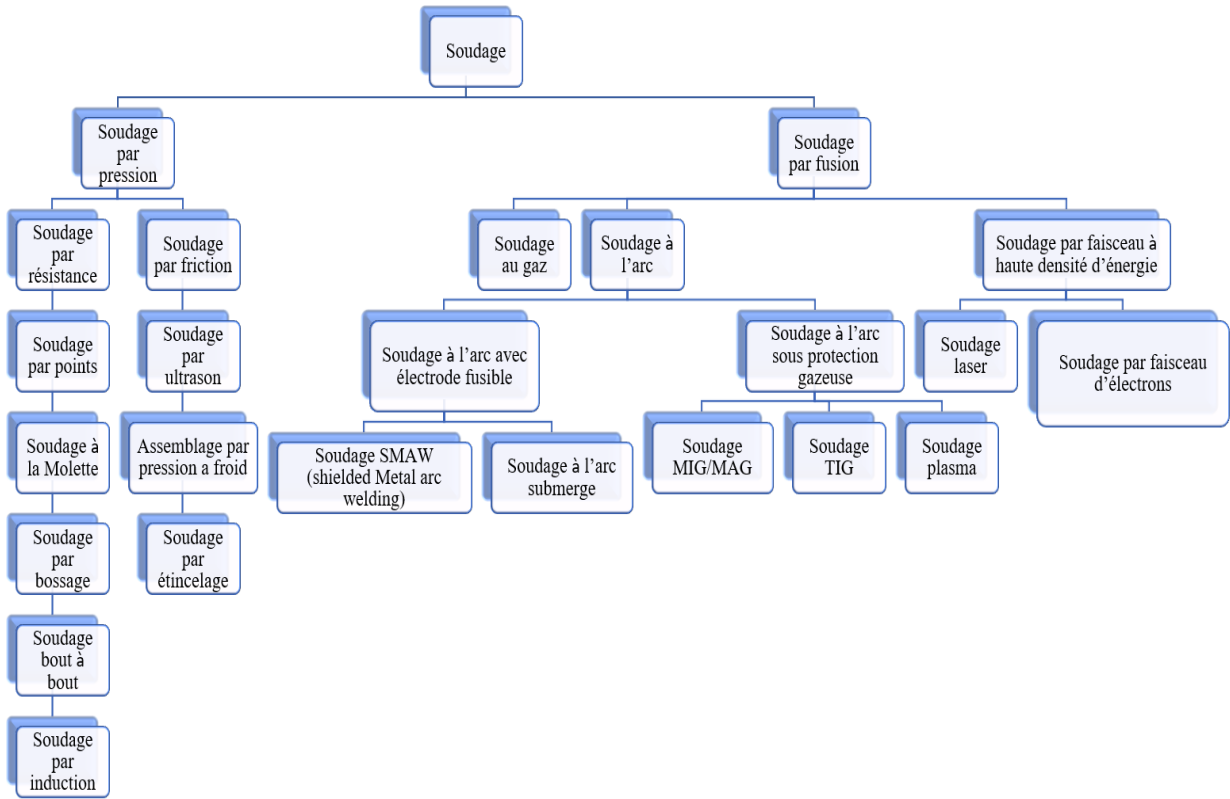


Figure 16 La Classification des procédés de soudage

4.4. Le comportement des matériaux lors des procédés de l'usinage (Tournage, Fraisage, etc.)

L'usinage a un impact sur la structure des pièces, entraînant à la fois des déformations en surface et la création de résidus de contrainte, mais également améliorant notablement la précision dimensionnelle et la qualité de surface. Un exemple d'application concrète est l'usinage de pièces en aluminium pour des utilisations dans le secteur aérospatial représentée sur la figure 17 [41].



Figure 17 Usinage de pièces mécanique en aluminium

4.5. Le comportement des matériaux lors du Traitement Thermique

Le traitement thermique modifie la microstructure (recuit, trempé, etc.) pour améliorer les propriétés mécaniques et réduit les contraintes internes, comme dans le cas du traitement thermique d'acier pour accroître sa dureté [42]. Les principales méthodes de traitement thermique sont :

4.5.1. La Trempe (Quenching)

Cette méthode consiste au chauffage du métal à une température spécifique suivi d'un refroidissement rapide (eau, huile, gaz) pour augmenter la dureté et la résistance mécanique. La trempe est souvent suivi d'un revenu pour réduire la fragilité

4.5.2. Le Revenu (Tempering)

Cette méthode consiste au traitement thermique réalisé après la trempe, consistant à chauffer le métal à une température inférieure pour améliorer la ductilité et réduire les contraintes internes.

4.5.3. Le Recuit (Annealing)

Cette méthode consiste au chauffage suivi d'un refroidissement lent pour adoucir le métal, améliorer sa ductilité et homogénéiser la structure.

4.5.4. La Normalisation (Normalizing)

Cette méthode consiste au chauffage à une température supérieure à la température critique puis refroidissement à l'air, pour affiner la structure et améliorer les propriétés mécaniques.

4.5.5. Cémentation (Carburizing)

Cette méthode consiste au traitement thermochimique de surface enrichissant la couche superficielle en carbone pour augmenter la dureté de surface tout en conservant un cœur plus ductile.

4.5.6. Nitruration (Nitriding)

Cette méthode consiste au traitement thermochimique introduisant de l'azote dans la surface pour durcir la couche externe sans déformation importante.

4.5.7. Traitements thermochimiques complémentaires

Cette méthode consiste au carbonitruration, nitrocarburation, boruration, etc., pour améliorer la résistance à l'usure et la dureté superficielle [43].

Conclusion

En conclusion, la compréhension approfondie des matériaux, de leur classification à leurs propriétés et leur structure, constitue un pilier fondamental de l'ingénierie moderne. Les relations étroites entre la microstructure, la macrostructure et les propriétés finales des matériaux permettent d'optimiser leur utilisation dans des applications variées, tout en anticipant les contraintes liées aux procédés de fabrication. La maîtrise des diagrammes de phase et des traitements thermiques offre aux ingénieurs des outils puissants pour adapter les matériaux aux besoins spécifiques de chaque secteur industriel. Enfin, le contrôle de la qualité et l'innovation dans le choix et la transformation des matériaux sont des leviers essentiels pour répondre aux défis technologiques, économiques et environnementaux actuels. Ce chapitre pose ainsi les connaissances de base nécessaires à toute démarche de conception et de développement de nouveaux matériaux performants et durable .

Chapitre II :
Principes fondamentaux de
génie des procédés des
matériaux

Chapitre II : Principes fondamentaux du Génie des procédés des matériaux

Introduction

- 1. Le Génie des Procédés des Matériaux**
- 2. Les propriétés des matériaux et l'influence des procédés**
- 3. La classification des procédés de fabrication des matériaux**

Conclusion

Introduction

Le génie des procédés occupe une place centrale dans l'industrie moderne, en permettant la transformation contrôlée des matières premières en produits finis à haute valeur ajoutée. Cette discipline, à la croisée de la chimie, de la physique, de la mécanique et de l'économie, s'appuie sur des principes fondamentaux pour concevoir, optimiser et maîtriser les procédés de fabrication des matériaux. La diversité des matériaux (métaux, céramiques, polymères, composites) exige l'utilisation de procédés spécifiques, adaptés à leurs propriétés et à leurs applications. Ce chapitre présente une vue d'ensemble des principaux procédés de fabrication, qu'ils soient thermiques, mécaniques ou chimiques, et détaille leur influence sur la microstructure et les propriétés des matériaux. Il met également en lumière l'importance du choix des procédés et des paramètres de fabrication, qui conditionnent la performance, la fiabilité et la durabilité des produits finis. Enfin, une classification systématique des procédés est proposée, permettant d'orienter efficacement la sélection des méthodes de fabrication selon la nature des matériaux et les exigences des applications industrielles.

1. Le génie des procédés

1.1. Définition

Le génie des procédés constitue une discipline interdisciplinaire qui combine les principes de la chimie, de la physique, de la biologie, des mathématiques et de l'économie pour concevoir, mettre en œuvre, contrôler et améliorer les procédés industriels permettant la transformation des matières premières en produits finis. Cette discipline vise à optimiser les opérations de production tout en assurant la viabilité économique et la durabilité environnementale des procédés [44].

1.2. Les principes de base du génie des procédés

Le génie des procédés est une discipline scientifique et technique qui vise la conception, l'optimisation et la gestion des procédés industriels permettant la transformation de la matière à grande échelle. Il repose sur l'application combinée des principes fondamentaux de la chimie, de la physique, de la mécanique et des phénomènes de transfert (masse, énergie, quantité de mouvement). L'objectif principal est de concevoir des procédés efficaces, sûrs et économiquement viables, en maîtrisant les opérations unitaires telles que la séparation, la réaction chimique, le transfert thermique et les transformations physiques. Le génie des procédés s'appuie aussi sur des bilans de matière et d'énergie, ainsi que sur la modélisation et le contrôle des systèmes industriels. Cette discipline est essentielle dans de nombreux secteurs industriels, notamment la chimie, la pétrochimie, l'agroalimentaire, et l'environnement [45].

2. Introduction aux procédés de fabrication des matériaux

Dans le domaine des matériaux, les procédés de fabrication jouent un rôle fondamental en déterminant leurs propriétés finales, leur durabilité, et leur adéquation aux applications envisagées. Ces procédés regroupent un ensemble d'opérations thermiques, mécaniques et chimiques, visant à transformer la matière brute en produits aux performances ciblées. Comprendre ces méthodes est essentiel pour optimiser le comportement des matériaux en service, que ce soit en améliorant leur résistance, leur dureté, leur tenue en environnement agressif ou encore leur aptitude à la mise en forme. Cette section présente les principaux types de procédés appliqués dans l'ingénierie des matériaux : les traitements thermiques, les procédés mécaniques et les transformations chimiques. Chacun de ces procédés agit à un niveau différent de la structure du matériau, modifiant soit sa

composition, soit sa microstructure, pour en adapter les propriétés aux exigences fonctionnelles des pièces fabriquées.

2.1. Processus thermiques

Les traitements thermiques sont des procédés qui modifient les caractéristiques des matériaux grâce à des cycles précis de chauffage et de refroidissement. En appliquant ces cycles, on peut influencer la structure interne du matériau afin d'obtenir des propriétés spécifiques, telles qu'une meilleure dureté, une résistance accrue ou une plus grande ductilité. Généralement, ces traitements se déroulent en plusieurs étapes : d'abord, le matériau est porté à une température déterminée, puis il est maintenu à ce niveau pour permettre certaines transformations internes, avant d'être refroidi selon un rythme contrôlé. Ce processus permet également de réduire ou d'éliminer les contraintes internes, contribuant ainsi à améliorer les performances globales du matériau. [46]

Le schéma ci-dessous illustre le processus industriel complexe de fabrication des tuyaux structuré autour de la qualité et de la conformité. Il intègre des contrôles à chaque étape, des traitements thermiques et de surface, et une gestion efficace.

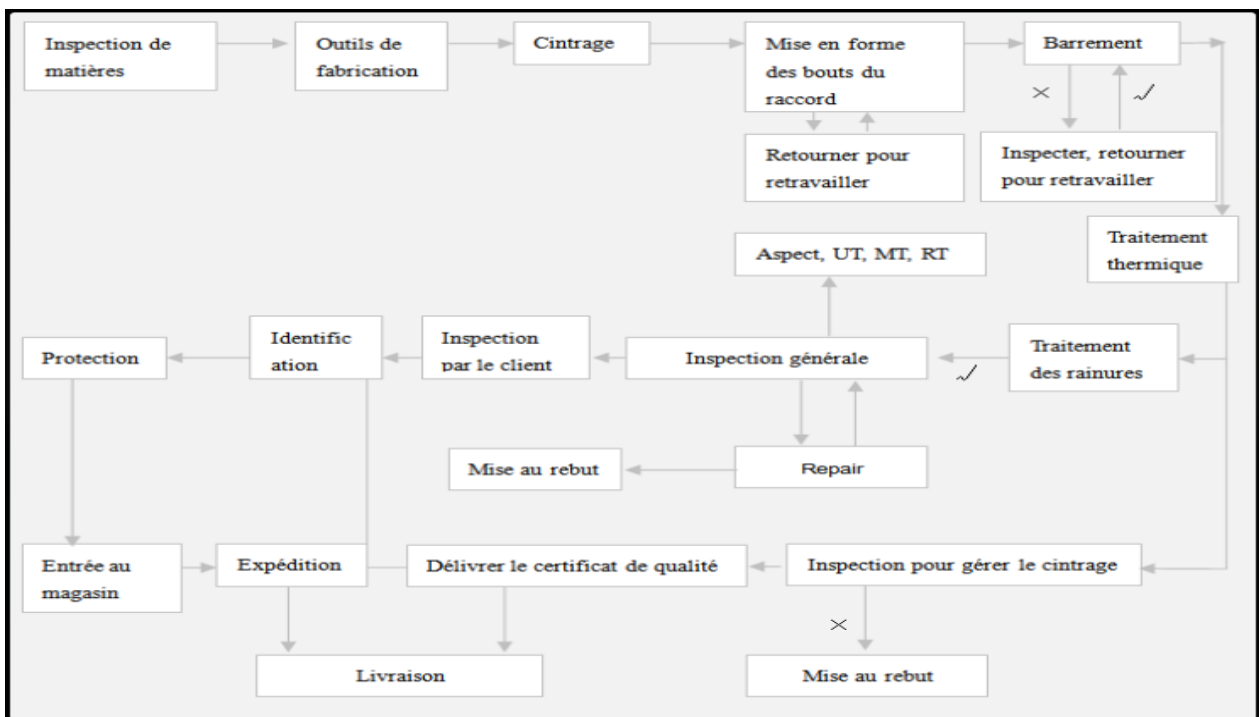


Figure 18 Schéma du processus des tuyaux

2.2. Processus mécaniques

Les procédés mécaniques modifient la structure des matériaux par l'application de forces physiques (pression, impact, frottement). Cela comprend :

- Déformation plastique (laminage, forgeage, emboutissage) pour affiner la microstructure et augmenter la résistance par écrouissage.
- Traitements mécaniques de surface (grenailage, galetage, brunissage) qui améliorent la résistance à l'usure et la ténacité en induisant des contraintes résiduelles bénéfiques dans les couches superficielles.

Ces procédés sont essentiels pour adapter les propriétés mécaniques et tribologiques des matériaux à leur usage final [47].

la figure 19 illustre le procédé de laminage d'un film sec photosensible SU-8 sur un substrat en silicium structuré. Le film SU-8 est appliqué à l'aide de deux rouleaux, supérieur et inférieur, qui exercent une pression contrôlée pour assurer une adhésion uniforme du film sur la surface et dans les éventuelles cavités de la structure. Cette méthode permet d'obtenir une couche de résine homogène et bien positionnée, essentielle pour la fabrication de microstructures précises en microfluidique ou en microtechnologie. Le laminage présente l'avantage d'éviter l'écoulement de résine dans les canaux ouverts, contrairement à d'autres techniques de dépôt.

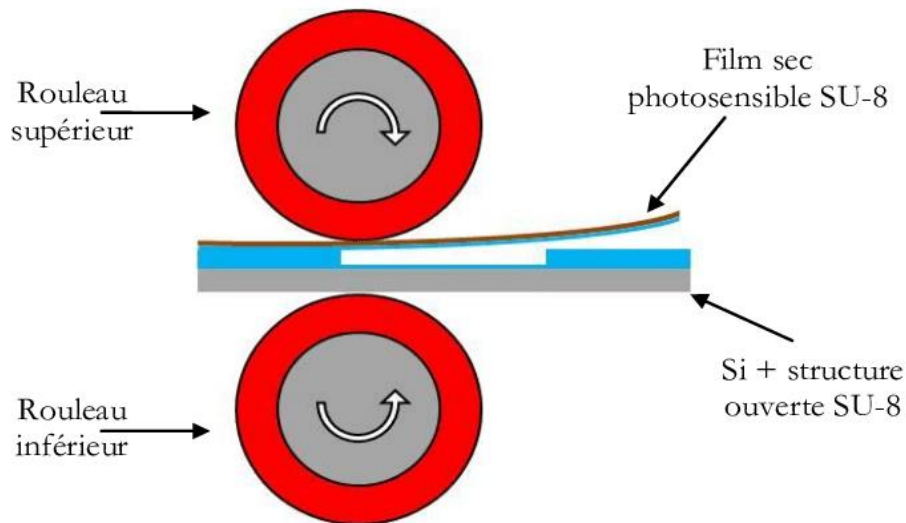


Figure 19 Représentation schématique de l'étape de laminage d'un film sec photosensible de SU-8 sur une structure ouverte en SU-8.

2.3. Processus chimiques

Les procédés chimiques impliquent des réactions ou des diffusions d'éléments dans le matériau pour modifier sa composition et ses propriétés. Les principaux procédés sont :

- Traitements thermochimiques (cémentation, nitruration, carbonitruration) où des éléments comme le carbone ou l'azote diffusent en surface pour durcir la couche externe sans affecter le cœur du matériau.
- Réactions chimiques contrôlées lors de la synthèse ou du traitement de polymères, céramiques ou composites, permettant d'obtenir des structures et propriétés spécifiques. Ces transformations sont utilisées pour améliorer la résistance à l'usure, la dureté superficielle ou la résistance à la corrosion. [48]

La figure 3 schématise les étapes clés de la fabrication industrielle du ciment, depuis l'extraction des matières premières jusqu'à la livraison du produit fini. Les phases principales comprennent le concassage, la cuisson en four rotatif pour obtenir le clinker, puis le broyage final avec du gypse. Le schéma illustre l'importance du contrôle qualité à chaque étape pour garantir un ciment conforme aux normes.

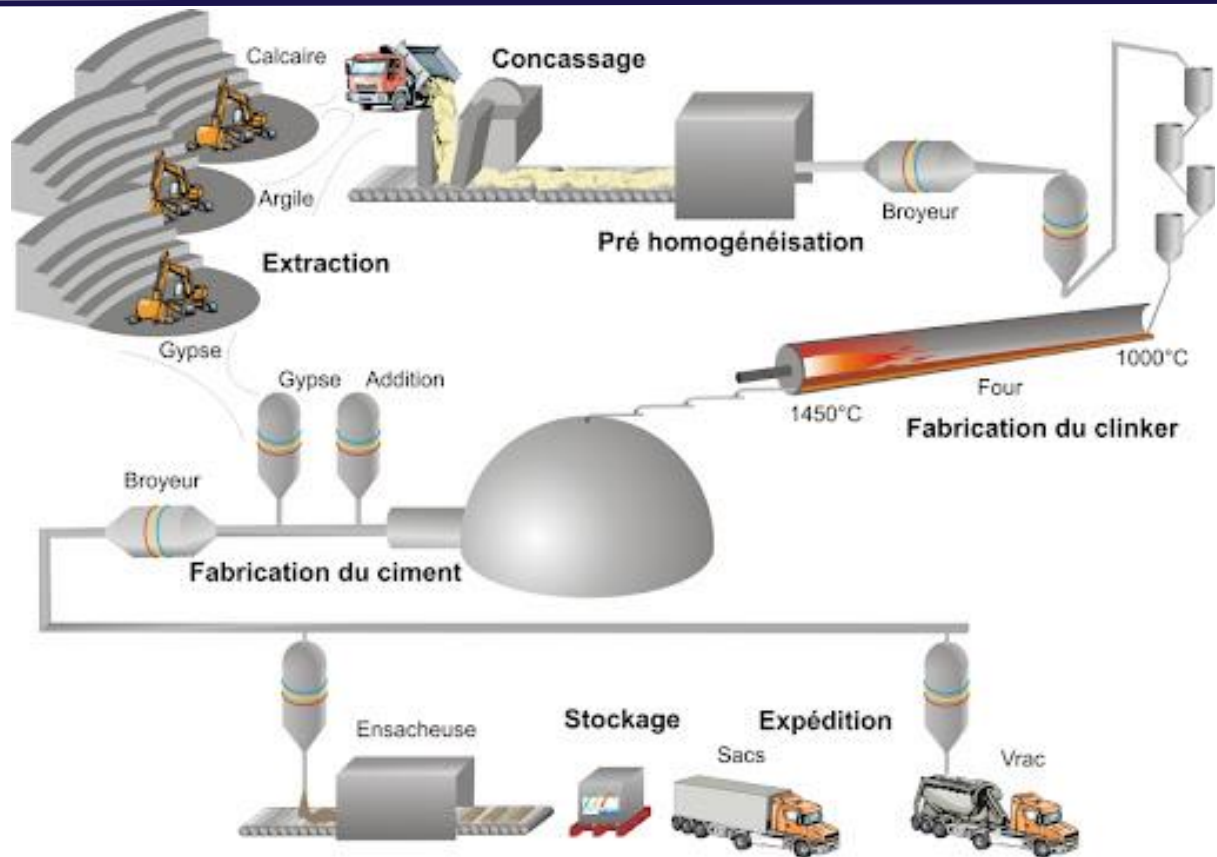


Figure 20 Procédé de fabrication du ciment

3. Les procédés de fabrication des matériaux :

3.1. La fusion

Le procédé de fusion consiste à chauffer un matériau jusqu'à son état liquide afin de le couler dans un moule, où il prend la forme souhaitée après solidification. Cette technique constitue la méthode fondamentale du moulage et est largement employée pour la fabrication de pièces complexes ou de grande taille, telles que les carters moteurs ou les structures mécaniques. Le moulage par fusion permet d'obtenir une grande variété de formes, mais nécessite de gérer les phénomènes de retrait qui surviennent lors du refroidissement du matériau [49]. La figure 4 représente la coulée du métal fondue sortant du four de la fonderie.



Figure 21 la coulée du métal fondue sortant du four de la fonderie

3.2. Le Dépôt

Les procédés de dépôt consistent à ajouter de la matière de manière contrôlée, couche par couche, sur une surface ou un substrat. Ces techniques englobent le dépôt physique en phase vapeur (PVD), le dépôt chimique en phase vapeur (CVD) ainsi que la fabrication additive, telle que l'impression 3D. Elles permettent la réalisation de pièces aux géométries complexes et l'intégration de fonctions avancées dans les matériaux, grâce à un contrôle précis de l'épaisseur et des propriétés des couches déposées [50]. La figure 5 représente le dépôt en couche mince obtenue par les technologies PVD en phase vapeur.

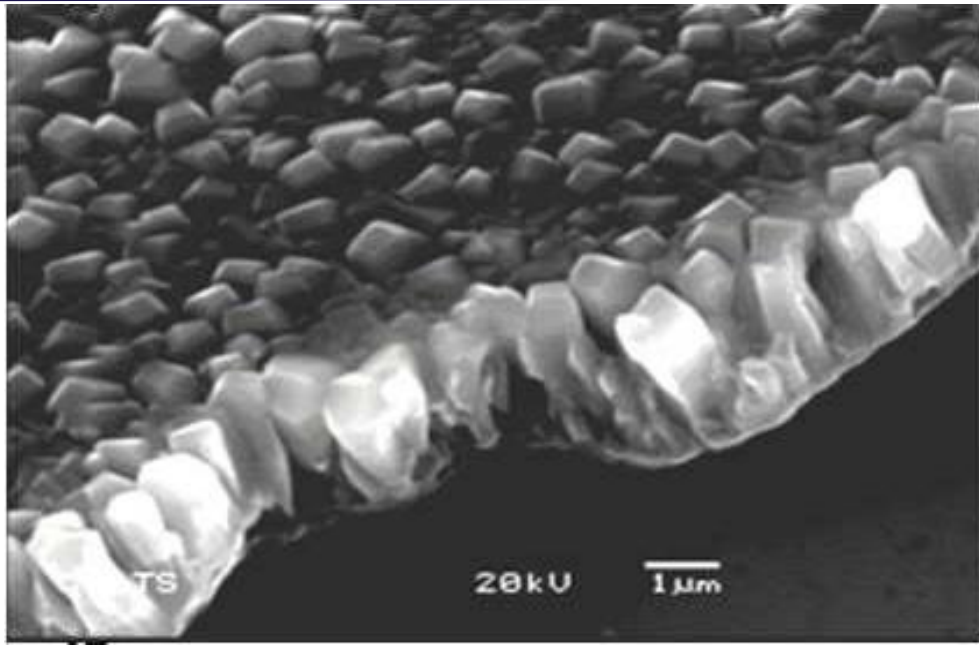


Figure 22 Le dépôt en couche mince obtenue par les technologies PVD en phase vapeur

3.3. Le formage

Le formage regroupe l'ensemble des procédés par lesquels un matériau, généralement à l'état solide, subit une déformation plastique sans enlèvement de matière afin d'adopter une forme désirée. Parmi ces techniques figurent le laminage, l'emboutissage, le forgeage et l'extrusion. Ces méthodes sont couramment utilisées pour fabriquer des pièces résistantes telles que des tôles, des barres ou des profilés, tout en optimisant la structure interne du matériau pour améliorer ses propriétés mécaniques [51]. La figure 6 représente les différentes techniques de formage.



Figure 23 Les différentes techniques de formage

3.4. L'Usinage

L'usinage est un procédé de fabrication par enlèvement de matière, qui consiste à retirer des copeaux à l'aide d'outils coupants tels que le tournage, le fraisage, le perçage ou la rectification. Ce procédé permet d'obtenir des pièces avec des tolérances dimensionnelles très strictes et une qualité de surface élevée. L'usinage est souvent utilisé en phase de finition, après d'autres procédés de mise en forme, afin d'atteindre la géométrie finale et les spécifications précises requises [52]. Il y a plusieurs types d'usinages, on donne à titre d'exemple :

- **Le Tournage**

Le tournage est un procédé d'usinage où la pièce à usiner tourne autour d'un axe fixe tandis qu'un outil de coupe immobile enlève la matière. Il permet de fabriquer principalement des pièces cylindriques avec une grande précision [53]. La figure 7 schématise l'opération de tournage ; elle représente l'outil de tour en contact avec la pièce montée sur le mandrin.

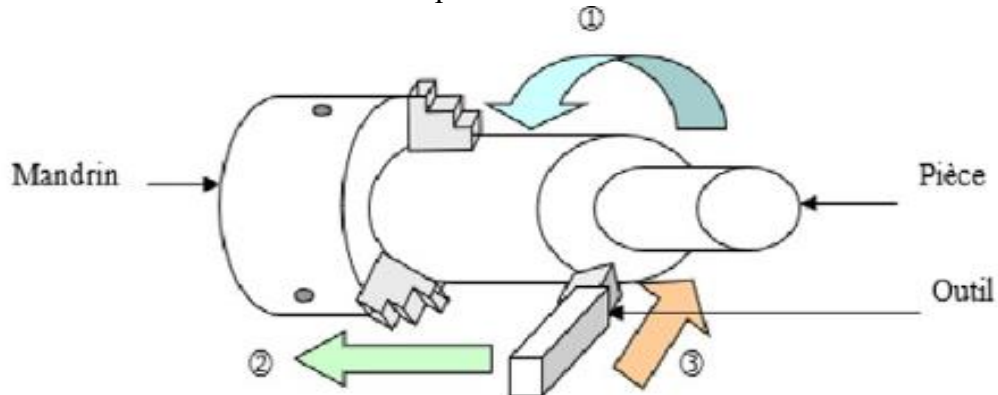


Figure 24 schéma de l'opération de Tournage

- **Le Fraisage**

Le fraisage consiste à enlever de la matière à l'aide d'une fraise rotative qui se déplace sur la pièce. Il permet de réaliser des surfaces planes, des formes complexes et des rainures [53]. La figure 8 représente la fraise entraînant l'enlèvement de la matière de la pièce.

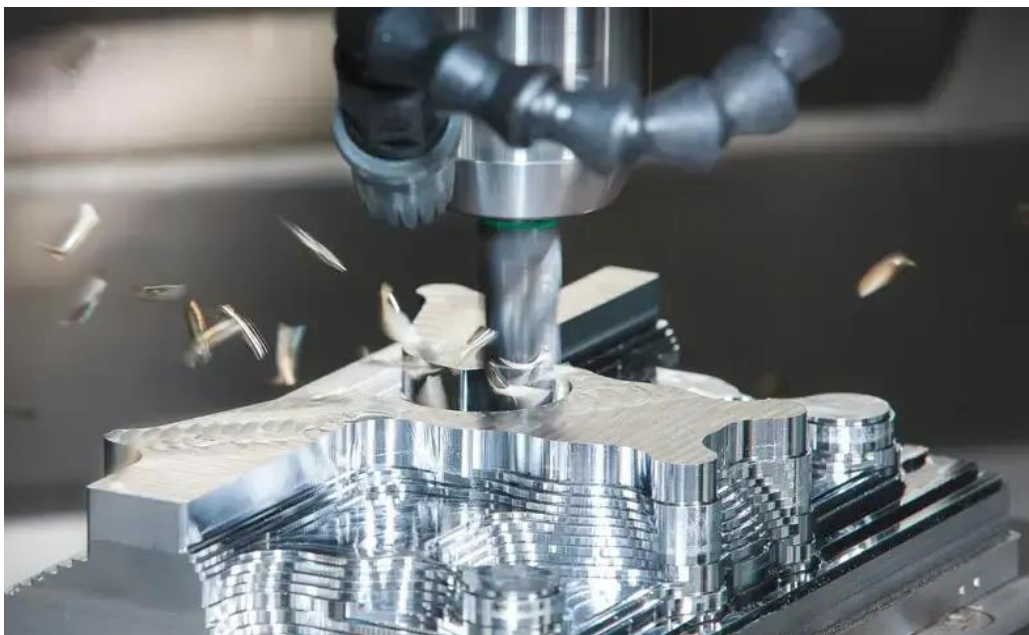


Figure 25 L'opération de Fraisage

- Le Perçage

Le perçage est un procédé d'usinage destiné à créer des trous dans une pièce à l'aide d'un foret rotatif. C'est une opération fondamentale pour préparer des assemblages ou des passages [53]. Sur la figure 9 on représente le foret de perçage.

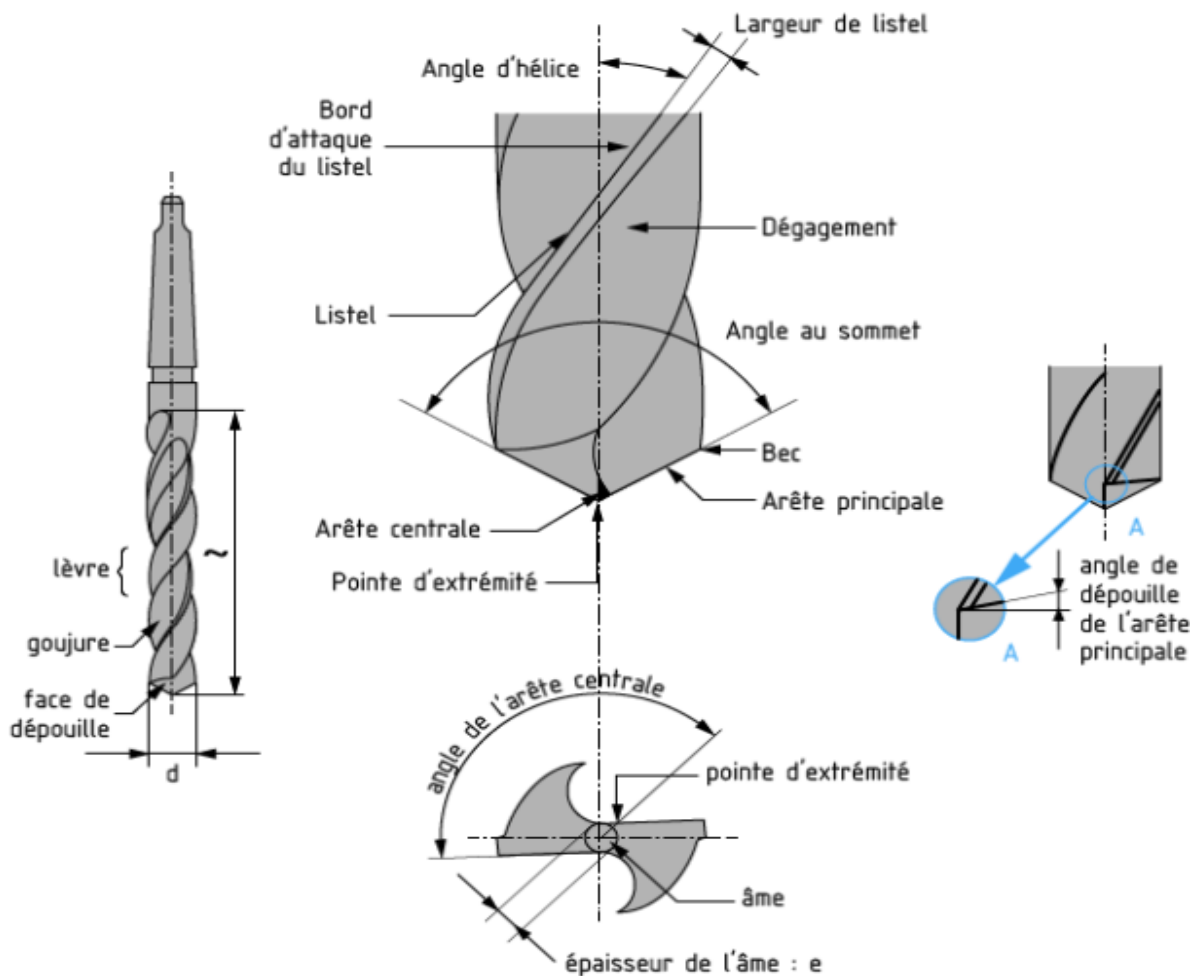


Figure 26 le foret de perçage

4. La classification des procédés de fabrication des matériaux

La classification des procédés de fabrication des matériaux consiste à regrouper les différentes méthodes utilisées pour transformer des matières premières en produits finis ou semi-finis, en fonction de critères tels que les principes physiques mis en œuvre, les états de la matière impliqués, les outils et équipements utilisés, ou les caractéristiques des produits obtenus. Cette classification aide à comprendre la diversité des approches de fabrication et à choisir la méthode la plus

appropriée pour un matériau ou un produit spécifique. Les procédés sont classés en trois grandes familles :

4.1. Les Procédés métallurgiques

Les procédés métallurgiques constituent un ensemble de techniques industrielles essentielles pour transformer les minerais en matériaux métalliques utilisables. Ils combinent des transformations chimiques et physiques, notamment par chauffage à haute température (pyrométallurgie), traitement chimique (hydrométallurgie) et mise en forme mécanique. L'objectif principal est de modifier la composition chimique, la microstructure et les propriétés mécaniques des métaux afin de répondre aux exigences fonctionnelles et de performance. Il existe de nombreux types tels que :

- **Le Forgeage** : il consiste en la déformation à chaud du métal. C'est une technique de façonnage où le métal est chauffé et façonné à l'aide de marteaux ou de presses pour obtenir la forme désirée.
- **Le Laminage** : il consiste à la réduction de l'épaisseur du procédé où le métal est passé entre des rouleaux pour réduire son épaisseur et obtenir des feuilles ou des bandes.
- **La Fonderie sous Pression** : il consiste à l'injection de métal fondu d'une technique où le métal fondu est injecté sous pression dans un moule pour créer des pièces complexes.
- **Le Traitement Thermique** : il consiste au contrôle des propriétés d'un ensemble de procédés utilisant la chaleur pour modifier les propriétés mécaniques des métaux (trempage, revenu, etc.).
- **L'Électroformage** : c'est une technique où un métal est déposé sur un mandrin par électrolyse pour créer des couches minces ou des formes complexes. [54]

4.2. Les Procédés céramiques

Les procédés d'élaboration des matériaux céramiques reposent sur une chaîne opératoire relativement uniforme, qui commence par la préparation des poudres, suivie de la mise en forme, du séchage, puis du traitement thermique (cuisson ou frittage) pour obtenir le produit fini. Ces étapes permettent de contrôler la microstructure, la densité et les propriétés finales des céramiques, qu'elles soient traditionnelles ou techniques.

- **Le Frittage** : c'est Technique où des poudres céramiques sont compactées et cuites à haute température pour former des pièces solides.
- **Le Pressage Isostatique à Chaud (PIP)** : il consiste au compactage sous pression et chaleur d'un procédé où des poudres céramiques sont compactées sous pression et chaleur pour obtenir des pièces de forme complexe.
- **La Coulée sous Vide** : il consiste à élimination des bulles d'air utilisant une technique de coulée où le vide est utilisé pour éliminer les bulles d'air et améliorer la qualité des pièces céramiques.
- **La Décoration Céramique** : c'est l'ensemble de méthodes utilisées pour ajouter des motifs, des couleurs et des finitions aux surfaces céramiques. [55]

4.3. Les Procédés des polymères

Les procédés polymères regroupent l'ensemble des techniques permettant la synthèse et la mise en forme des matériaux plastiques. La synthèse repose principalement sur des réactions chimiques de polymérisation, telles que la polymérisation en chaîne et la polycondensation, qui permettent d'assembler des monomères en longues chaînes macromoléculaires. Ces réactions chimiques sont fondamentales pour obtenir des polymères aux propriétés spécifiques adaptées aux applications industrielles.

- **Moulage par Injection** : il consiste à l'njection de polymère fondu par une technique où un polymère fondu est injecté sous pression dans un moule pour créer des pièces complexes.
- **Extrusion** : c'est un procédé où un polymère fondu est poussé à travers une filière pour former des profilés de forme continue.
- **Polymérisation en Emulsion** : c'est une technique de synthèse des polymères où des monomères réagissent dans une émulsion aqueuse.
- **Thermoformage** : il consiste à la déformation de feuilles sous chaleur des feuilles de polymère sont déformées sous l'effet de la chaleur pour obtenir des formes complexes [56].

4.4. Les Procédés des composites

Les matériaux composites sont constitués d'au moins deux phases distinctes :

- Une matrice (organique, métallique ou céramique)

- Un renfort (fibres, particules).

Leur fabrication repose sur des procédés spécifiques visant à combiner ces constituants pour obtenir des propriétés mécaniques, thermiques ou chimiques supérieures à celles des matériaux classiques.

- **La Stratification manuelle** : c'est une technique où des couches de matériaux préimprégnés sont posées manuellement pour former des composites.
- **Le Moulage par injection pour composites** : c'est un procédé où un polymère et des renforts sont injectés ensemble dans un moule pour créer des pièces composites complexes.
- **La Pultrusion** : c'est une technique où des fibres et une matrice polymère sont combinées et formées en continu pour créer des profilés composites.
- **L'Autoclave** : c'est un procédé où des composites sont cuits à haute pression et température contrôlées pour améliorer leurs propriétés [57].

5. L'Influence des procédés de fabrication sur les propriétés des matériaux

On rappelle que les propriétés des matériaux désignent l'ensemble des caractéristiques physiques, mécaniques, chimiques et thermiques qui déterminent leur comportement sous différentes conditions (charges mécaniques, températures, environnements corrosifs, etc.). Ces propriétés se classent en quatre catégories principales :

- Mécaniques : Résistance à la traction, dureté, ductilité, ténacité.
- Physiques : Conductivité thermique/électrique, densité, dilatation thermique.
- Chimiques : Résistance à la corrosion, réactivité, stabilité chimique.
- Technologiques : Aptitude au formage, soudabilité, usinabilité. [58]

Les procédés de fabrication et de traitement modifient la microstructure des matériaux, ce qui impacte directement leurs propriétés macroscopiques. Chaque type de procédés a un impact différent :

5.1. L'impact des procédés thermiques

Les procédés thermiques jouent un rôle essentiel dans le façonnement des propriétés physiques, mécaniques et structurales des matériaux. En soumettant les matériaux à des cycles contrôlés de chauffage et de refroidissement, il est possible d'influencer leur microstructure interne, et par conséquent d'adapter leurs performances aux exigences d'usage. Qu'il s'agisse d'augmenter la dureté, d'améliorer la ductilité, de réduire les contraintes internes ou d'optimiser la résistance à la corrosion, les traitements thermiques sont largement utilisés dans l'industrie des métaux, des alliages, des céramiques et même de certains polymères. Ce processus repose sur des phénomènes tels que la diffusion atomique, les transformations de phase ou la relaxation des défauts cristallins. Dans l'industrie, les deux procédés de traitement thermique les plus courants sont :

- **Recuit** : Réduit les contraintes internes et restaure la ductilité en homogénéisant la microstructure (ex : élimination des dislocations dans les métaux écrouis).
- **Trempe** : Durcit les aciers en bloquant la formation de phases instables (martensite), mais augmente la fragilité. La figure représente Temps de chauffage en min, recommandés pour revenu normal et trempe et dépendance de C_{eq} pour une pièce de diamètre 60m.

Comprendre l'influence de ces traitements permet de mieux concevoir les matériaux pour des applications techniques avancées, en garantissant durabilité, fiabilité et performance. Ainsi, l'étude de l'impact des procédés thermiques constitue un enjeu majeur dans le domaine de la science des matériaux et de l'ingénierie. [59]

5.2. L'impact des procédés chimiques

L'impact des procédés chimiques joue un rôle crucial dans la modification des propriétés de surface des matériaux, permettant d'adapter leurs performances fonctionnelles sans altérer leurs caractéristiques internes. En intervenant sur la composition chimique de la surface, ces procédés améliorent la dureté, la résistance à la corrosion ou d'autres propriétés spécifiques selon les besoins d'application. Parmi les procédés chimiques les plus utilisés, on distingue :

- **Cémentation** : la cémentation enrichit la surface en carbone pour améliorer la dureté superficielle des aciers, sans affecter le cœur ductile.
- **Revêtements** : le revêtement protège contre la corrosion (ex. : galvanisation, anodisation) en modifiant la chimie de surface.

Maîtriser l'influence de ces traitements chimiques est indispensable pour développer des matériaux à la fois durables et performants, capables de répondre aux exigences de divers environnements. Cela confère à l'étude des procédés chimiques une importance capitale dans les domaines de la science des matériaux et de l'ingénierie. [60]

5.3. L'impact des procédés mécaniques

L'impact des procédés mécaniques joue un rôle fondamental dans la modification des propriétés physiques, mécaniques et structurales des matériaux. En soumettant les matériaux à des déformations plastiques contrôlées, il est possible d'agir sur leur microstructure interne, ce qui permet d'adapter leurs performances aux besoins spécifiques d'utilisation. Que ce soit pour augmenter la résistance mécanique, affiner la taille des grains ou modifier la ductilité, les procédés mécaniques sont largement employés dans l'industrie des métaux et alliages. Ces transformations reposent sur des phénomènes tels que l'accumulation de dislocations et le raffinement microstructural. Parmi les procédés mécaniques les plus courants, on trouve :

- **L'écroutissage** : L'écroutissage accroît la résistance mécanique par déformation plastique via l'accumulation de dislocations, mais entraîne une diminution de la ductilité.
- **Le laminage et le forgeage** : Le laminage et le forgeage affinent la taille des grains, améliorant ainsi la résistance selon la loi de Hall-Petch :

$$\sigma \propto \sqrt{\frac{1}{d}}$$

Comprendre l'impact de ces traitements permet d'optimiser la conception des matériaux pour des applications techniques avancées, en assurant durabilité, fiabilité et performance. Ainsi, l'étude des procédés mécaniques constitue un enjeu majeur en science des matériaux et en ingénierie. [61]

5.4. Les effets des conditions de fabrication sur la microstructure et sur les propriétés des matériaux.

Les conditions de fabrication déterminent la microstructure des matériaux, influençant leurs propriétés mécaniques, physiques et chimiques. Paramètres comme la température, la vitesse de refroidissement ou les traitements thermiques modifient la taille et la distribution des grains, affectant dureté et ductilité. Des procédés comme le soudage créent des gradients thermiques qui peuvent induire des zones fragiles. Maîtriser ces paramètres permet d'optimiser la microstructure

et les performances des matériaux selon les besoins industriels. Cette relation est essentielle en génie des matériaux pour adapter les procédés aux caractéristiques souhaitées [62].

5.4.1. Température de fabrication

La température de fabrication influence directement la microstructure et les propriétés mécaniques des matériaux, notamment la taille des grains et la précipitation des phases. Un contrôle précis de cette température permet d'optimiser dureté, ductilité et ténacité. Ainsi, la maîtrise des paramètres thermiques est essentielle pour répondre aux exigences industrielles spécifiques[63],

a. Effet sur la microstructure

La température de fabrication est un paramètre critique qui doit être rigoureusement contrôlé pour influencer favorablement la microstructure et, par conséquent, les performances des matériaux dans leurs applications industrielles [64] .

- **Augmentation de la température** : Favorise la croissance des cristaux, augmentant la taille des grains, ce qui peut réduire la résistance mécanique [65] .
- **Diminution de la température** : Peut entraîner une structure plus fine, améliorant les propriétés mécaniques [66] .

b. Effet sur les propriétés des matériaux

La température de fabrication influence directement les propriétés mécaniques, thermiques et chimiques des matériaux, modifiant leur microstructure et comportement en service. Une augmentation de température peut provoquer dilatation thermique, déformations, et altérer la résistance, la ductilité et la dureté. Elle affecte aussi la conductivité thermique et électrique, ainsi que l'usure dans les systèmes en frottement. Maîtriser cette température est essentiel pour optimiser les performances et la durabilité des matériaux dans leurs applications industrielles [67].

- **Augmentation de la température** : Peut augmenter la conductivité thermique, mais réduire la résistance à la corrosion [68] .
- **Diminution de la température** : Peut améliorer la résistance à la corrosion, mais réduire la conductivité thermique [69].

5.3.2. Pression de fabrication

La pression de fabrication influence significativement la microstructure et les propriétés mécaniques des matériaux. Sous pression élevée, la densification est améliorée, réduisant la porosité et augmentant la cohésion intergranulaire, ce qui accroît la résistance mécanique et la dureté. De plus, la pression modifie les distances interatomiques, entraînant des variations structurales et élastiques, et peut induire l'apparition de nouvelles phases cristallines, affectant ainsi les propriétés physiques et chimiques des matériaux. La compréhension de ces effets est essentielle pour optimiser les procédés de fabrication et les performances finales des matériaux [70].

a. Effet sur la microstructure

L'effet de la pression de fabrication sur la microstructure est majeur, car une pression élevée favorise la densification des matériaux en réduisant la porosité et en améliorant la cohésion intergranulaire. Cela conduit à une microstructure plus compacte avec des grains mieux liés, ce qui augmente la résistance mécanique et la dureté. De plus, la pression peut influencer la taille des grains et la distribution des phases secondaires, modifiant ainsi les propriétés mécaniques et la résistance à l'usure. En céramiques, par exemple, la réduction de la porosité sous pression améliore la ténacité et la rigidité, tandis que dans les métaux, elle peut limiter la formation de défauts structuraux [70].

- **Augmentation de la pression** : Peut favoriser la formation de défauts, réduisant la résistance mécanique [71].
- **Diminution de la pression** : Peut améliorer l'homogénéité de la structure, augmentant la résistance mécanique [72].

b. Effet sur les propriétés des matériaux

La pression de fabrication influence fortement les propriétés des matériaux en modifiant leur structure atomique et leurs constantes élastiques. Sous haute pression, les distances interatomiques se réduisent, ce qui peut entraîner l'apparition de nouvelles phases cristallines et modifier les propriétés mécaniques, thermiques et électroniques. Cette compression améliore souvent la résistance mécanique, la dureté et la stabilité structurale, tout en affectant la compressibilité et la conductivité. Ces effets sont particulièrement importants dans les matériaux soumis à des conditions extrêmes, où la pression joue un rôle clé dans la performance et la durabilité [73].

- **Augmentation de la pression** : Peut augmenter la dureté, mais réduire la ductilité [74].

- **Diminution de la pression** : Peut améliorer la résistance à la corrosion, mais réduire la résistance mécanique [75].

5.3.3. Vitesse de refroidissement

La vitesse de refroidissement influence fortement la microstructure et les propriétés des matériaux. Un refroidissement rapide favorise la formation de grains fins et augmente la phase amorphe dans les polymères, ce qui améliore la dureté et la résistance mécanique, mais peut aussi engendrer des contraintes internes et des fissures. À l'inverse, un refroidissement lent permet une cristallisation plus complète avec des grains plus gros, améliorant la ductilité et réduisant les défauts tels que la porosité. Le contrôle précis de la vitesse de refroidissement est donc essentiel pour équilibrer résistance, ductilité et intégrité du matériau selon l'application [76] .

a. Effet sur la microstructure

La vitesse de refroidissement a un impact majeur sur la microstructure des matériaux. Un refroidissement rapide, comme dans la solidification rapide de l'alliage Al-5%Cu, favorise la formation de grains très fins et la dispersion de précipités eutectiques, ainsi que l'apparition de nouvelles phases, améliorant ainsi la dureté et la résistance mécanique. En revanche, un refroidissement lent conduit à des grains plus gros et à une microstructure moins homogène, ce qui peut diminuer les performances mécaniques. Le contrôle de la vitesse de refroidissement est donc crucial pour optimiser la microstructure et les propriétés des matériaux [77] .

- **Vitesse de refroidissement rapide** : Peut provoquer des contraintes de refroidissement, affectant négativement les propriétés mécaniques [78] .
- **Vitesse de refroidissement lente** : Peut favoriser la précipitation, améliorant les propriétés mécaniques [79].

b. Effet sur les propriétés des matériaux

La vitesse de refroidissement influence significativement les propriétés des matériaux, notamment leur cristallinité et leur phase amorphe. Un refroidissement rapide limite la cristallisation des chaînes polymériques, augmentant la fraction amorphe, ce qui élève la température de transition vitreuse et génère un pic de cristallisation à froid plus important lors du chauffage ultérieur. À l'inverse, un refroidissement lent favorise une cristallisation plus complète, déplaçant le pic de

fusion vers des températures plus basses, ce qui peut indiquer la formation de différentes phases cristallines ou un début de dégradation. Ainsi, la maîtrise de la vitesse de refroidissement est essentielle pour contrôler les propriétés thermiques et mécaniques des matériaux [77] .

- **Vitesse de refroidissement rapide** : Peut augmenter la conductivité thermique, mais réduire la résistance à la corrosion [80].
- **Vitesse de refroidissement lente** : Peut améliorer la résistance mécanique, mais réduire la ductilité [81].

Conclusion

En conclusion, la maîtrise des procédés de fabrication des matériaux constitue un enjeu majeur pour l'industrie, tant sur le plan technique qu'économique. Les différentes méthodes – fusion, dépôt, formage, usinage, traitements thermiques, mécaniques ou chimiques – permettent d'adapter la structure et les propriétés des matériaux aux besoins spécifiques de chaque application. Les conditions de fabrication, telles que la température, la pression ou la vitesse de refroidissement, jouent un rôle déterminant sur la microstructure et, par conséquent, sur les performances finales des produits. La classification des procédés, selon la nature des matériaux et les principes physiques mis en œuvre, facilite le choix des techniques les plus appropriées. Ainsi, une compréhension approfondie des relations entre procédés, microstructure et propriétés ouvre la voie à l'innovation et à l'optimisation dans la conception de matériaux performants, durables et compétitifs.

Chapitre III :
Les procédés de fabrication et
leurs optimisations

Chapitre III : Les procédés de fabrication et leur optimisation

Introduction

1. **Optimisation des procédés thermiques**
2. **Optimisation des procédés mécaniques**
3. **Optimisation des procédés chimiques et autres procédés spécifiques**

Conclusion

Introduction

Dans l'industrie moderne, la transformation des matières premières en produits finis compétitifs repose sur la maîtrise d'une grande diversité de procédés de fabrication. Ces procédés, qu'ils soient thermiques, mécaniques, chimiques ou issus des technologies avancées, jouent un rôle déterminant dans la qualité, la performance et la durabilité des matériaux obtenus. La compréhension des principes fondamentaux de chaque procédé, ainsi que l'optimisation de leurs paramètres (température, pression, vitesse, environnement chimique), sont essentielles pour répondre aux exigences croissantes des marchés en termes de productivité, de coût, de fiabilité et d'innovation. Ce chapitre propose un panorama structuré des principales familles de procédés de fabrication, en détaillant leurs mécanismes, leurs applications industrielles et leur impact sur les propriétés des matériaux. Il met en lumière l'importance de l'intégration des nouvelles technologies, de l'automatisation et du contrôle qualité pour garantir la compétitivité et l'adaptabilité de l'industrie face aux évolutions technologiques et économiques.[80]

1. L'Optimisation des procédés thermiques

L'optimisation des procédés thermiques vise à améliorer l'efficacité énergétique des systèmes en minimisant les pertes et en maximisant l'utilisation de la chaleur. Cette discipline combine thermodynamique, mathématiques appliquées et ingénierie des procédés. Les procédés thermiques regroupent l'ensemble des opérations utilisant la chaleur pour transformer ou améliorer les propriétés des matériaux dans l'industrie. Ils reposent sur la maîtrise des transferts thermiques (conduction, convection, rayonnement) afin d'optimiser et de contrôler des équipements comme les fours, échangeurs de chaleur ou systèmes de refroidissement. La compréhension de ces phénomènes est essentielle pour adapter les procédés aux besoins industriels, garantir leur efficacité et assurer la qualité des produits finis. Ces procédés interviennent dans des opérations telles que le chauffage, la fusion, la solidification ou le traitement thermique des métaux. [81]

1.1. Optimisation des cycles thermiques pour améliorer les propriétés des matériaux

L'optimisation des cycles thermiques est une démarche essentielle en génie des matériaux pour ajuster les propriétés mécaniques, structurales ou fonctionnelles des matériaux. Elle repose sur une analyse fine des paramètres de traitement (température, durée de maintien, vitesse de refroidissement) et leur impact sur la microstructure et les performances finales.

1.1.1. Principes clés d'optimisation

L'optimisation vise à ajuster les paramètres des traitements thermiques pour obtenir des propriétés mécaniques optimales des matériaux. Elle repose sur la maîtrise des températures, temps et vitesses de chauffage/refroidissement, ainsi que sur la compréhension des transformations métallurgiques. Cette approche permet d'améliorer la qualité tout en réduisant les coûts et les défauts.[86]

- **Le Contrôle des paramètres opératoires :**

Le contrôle des paramètres opératoires est un pilier fondamental en génie des procédés, notamment dans l'optimisation des cycles thermiques pour améliorer les propriétés des matériaux. Il s'agit de surveiller, ajuster et réguler des variables telles que la température, la pression, le débit ou la

composition, afin d'atteindre les objectifs de performance, de sécurité et de qualité du procédé industriel

- Température de chauffage : Détermine la formation de phases métallurgiques (ex : austénite pour les aciers).
- Durée de maintien : Influence l'homogénéisation des éléments d'alliage et la croissance des grains.
- Vitesse de refroidissement : Définit la microstructure finale (martensite, bainite, perlite) et donc la dureté, la résilience ou la ductilité.
- **Adaptation aux matériaux :**

L'optimisation des cycles thermiques pour améliorer les propriétés des matériaux nécessite une adaptation fine aux caractéristiques spécifiques de chaque type de matériau. Cette adaptation repose sur la compréhension des propriétés thermiques, mécaniques et structurales propres à chaque famille de matériaux (métaux, polymères, céramiques, composites, matériaux à changement de phase). A titre d'exemple on donne :

- Aciers : Cycles de trempe/revenu pour équilibrer dureté et ténacité.
- Alliages d'aluminium : Traitements T4 (trempe) et T6 (trempe + revenu) pour améliorer la résistance mécanique.
- Fontes : Recuit graphitisant pour réduire les contraintes internes.
- **Outils d'optimisation :**

L'optimisation des cycles thermiques dans le génie des procédés repose sur des outils méthodologiques et logiciels qui permettent de modéliser, simuler et améliorer les performances énergétiques et thermodynamiques des systèmes. Ces outils facilitent le contrôle précis des paramètres opératoires et l'adaptation aux matériaux, en maximisant l'efficacité et en minimisant les pertes énergétiques.

- Modélisation numérique : Simulation des gradients thermiques et prédiction des microstructures.
- Caractérisation expérimentale : Mesures de dureté, microscopie électronique (MEB), diffraction XRD. [87]

1.1. L'Optimisation des Traitements thermiques

L'optimisation des traitements thermiques est essentielle pour améliorer les propriétés thermiques et mécaniques des matériaux, notamment la conductivité, la résistance à la chaleur, la dureté et la ductilité. Les traitements thermiques incluent des procédés tels que le recuit, la trempe, le revenu et la cémentation, chacun ayant un impact spécifique sur la microstructure et les performances finales du matériau [82]. Les traitements thermiques sont des procédés essentiels permettant de modifier la structure interne des matériaux, notamment des métaux et alliages, afin d'améliorer leurs propriétés mécaniques, chimiques et physiques tels que :

1.1.1. L'Optimisation de la Trempe

La trempe est un traitement thermique fondamental qui consiste à chauffer un acier au-delà de sa température critique afin de former une structure austénitique, suivie d'un refroidissement rapide destiné à transformer cette austénite en martensite, une phase caractérisée par une grande dureté et une résistance mécanique élevée. L'optimisation de ce procédé vise à maximiser ces propriétés tout en limitant les défauts tels que fissures, déformations ou contraintes résiduelles qui peuvent compromettre la qualité du matériau. Parmi les paramètres critiques à maîtriser, la température d'austénitisation doit être suffisamment élevée — généralement comprise entre 750 °C et 900 °C selon la nuance d'acier — pour homogénéiser la structure sans dépasser le seuil où apparaissent des phases indésirables. La durée de maintien à cette température doit permettre une transformation complète en austénite tout en évitant un grossissement excessif des grains. La vitesse et le mode de refroidissement, notamment le choix du fluide (eau, huile, air, pulvérisation) et la régulation de la vitesse de refroidissement, sont essentiels pour assurer une transformation martensitique uniforme et prévenir les fissures thermiques. Par ailleurs, l'uniformité thermique est fortement influencée par l'empilage des pièces dans le four et la circulation de la chaleur ; l'optimisation des schémas d'empilage peut réduire les écarts thermiques de 24 % à 32 % sur de grandes pièces forgées, améliorant ainsi la qualité et la reproductibilité du traitement. Sur le plan des techniques avancées, la simulation numérique en 3D, intégrant convection, rayonnement et écoulement turbulent, permet de prédire la distribution thermique et d'ajuster les paramètres pour une meilleure homogénéité. La trempe par pulvérisation offre un contrôle précis du refroidissement via des jets pulvérisés, augmentant la flexibilité de la vitesse de refroidissement et améliorant l'évacuation de la chaleur, ce qui réduit les risques de déformations et de fissures. Enfin, l'intégration de capteurs

et l'automatisation dans les fours permettent un contrôle en temps réel des cycles thermiques, optimisant la consommation énergétique tout en garantissant la qualité constante du traitement.. [83]

1.1.2. L'Optimisation du Revenu

Le revenu est un traitement thermique réalisé après la trempe, dont l'objectif principal est de réduire la fragilité induite par la formation de martensite tout en conservant une dureté acceptable. Ce procédé consiste à chauffer l'acier trempé à une température inférieure au point d'austénitisation, généralement comprise entre 150 °C et 650 °C, puis à le maintenir à cette température pendant une durée déterminée avant refroidissement. L'optimisation du revenu est essentielle pour ajuster le compromis entre dureté, ténacité et résistance à la fatigue, garantissant ainsi des performances mécaniques équilibrées. Parmi les paramètres clés à maîtriser, la température de revenu influence la nature et la taille des précipités carbures ainsi que la décomposition des phases martensitiques résiduelles ; par exemple, un revenu à 550 °C favorise une précipitation modérée des carbures, tandis qu'à 620 °C, la décomposition est plus avancée, modifiant la microstructure et les carbures aux joints de grains. La durée de maintien joue un rôle important dans la diffusion et la précipitation des carbures ainsi que dans la relaxation des contraintes internes : un temps trop court peut laisser une microstructure instable, alors qu'un temps trop long peut entraîner une perte excessive de dureté. La vitesse de chauffage est également déterminante, une montée en température lente (environ 0,2 °C/s) favorisant une meilleure précipitation dans la martensite, contrairement à une vitesse rapide (environ 5 °C/s) qui peut limiter ce phénomène et affecter la microstructure finale. L'optimisation vise ainsi à contrôler la décomposition des blocs martensite-austénite résiduelle et la formation de carbures pour obtenir une matrice stable avec des propriétés mécaniques améliorées. Les objectifs principaux de cette optimisation sont d'améliorer la ténacité et la résistance à la fatigue sans sacrifier la dureté, de réduire la durée totale du cycle thermique afin d'augmenter la productivité industrielle, et d'assurer la reproductibilité ainsi que la stabilité des propriétés mécaniques des pièces traitées. [84]

1.1.3. L'Optimisation de le Recuit

Le recuit est un traitement thermique qui consiste à chauffer un matériau métallique à une température précise, suivie d'un maintien à cette température et d'un refroidissement contrôlé, dans

le but de modifier sa microstructure afin d'améliorer ses propriétés mécaniques et thermiques. L'optimisation du recuit vise à obtenir une structure homogène, à réduire les contraintes internes, à améliorer la ductilité et la conductivité thermique, tout en minimisant les déformations et les défauts. Parmi les paramètres essentiels à maîtriser, la température de recuit doit être suffisamment élevée pour permettre la recristallisation et la dissolution des carbures, sans toutefois provoquer une croissance excessive des grains. Par exemple, pour les aciers faiblement alliés, cette température se situe généralement entre 680 °C et 730 °C, en fonction de la composition et de l'état initial du matériau. La durée de maintien doit être adaptée pour assurer une homogénéisation complète de la structure, tout en évitant d'allonger inutilement le cycle, ce qui augmenterait les coûts énergétiques. La vitesse de refroidissement joue également un rôle clé : un refroidissement lent favorise la formation d'une microstructure ferrito-perlitique stable, essentielle à la fois pour la ductilité et la conductivité thermique. Enfin, le type de recuit (détente, recristallisation, normalisation) doit être choisi selon l'objectif recherché, chaque type nécessitant une optimisation spécifique des paramètres thermiques. L'optimisation globale du recuit vise à réduire les contraintes internes et les risques de fissuration, à améliorer la machinabilité et la formabilité du matériau, à obtenir une microstructure fine et homogène garantissant des propriétés thermiques et mécaniques optimales, tout en diminuant la consommation énergétique par une gestion efficace des temps et températures [85].

2. Optimisation des procédés mécaniques

L'optimisation des procédés mécaniques consiste à déterminer les paramètres opératoires et configurations techniques optimales pour des systèmes mécaniques, en conciliant performance technique et contraintes économiques. Cette discipline combine modélisation mathématique, simulation numérique et validation expérimentale. Les procédés mécaniques regroupent les techniques de transformation, de façonnage et d'assemblage des matériaux par des actions physiques, sans modification chimique. Essentiels dans l'industrie, ils incluent l'usinage, le formage, l'assemblage et le traitement de surface. Leur maîtrise permet d'assurer la qualité, la précision et la compétitivité des produits dans des secteurs comme l'automobile, l'aéronautique ou la construction. [88]

2.1. L'optimisation des techniques de formage, pressage, étirage, emboutissage

L'optimisation des procédés de formage des métaux, tels que le pressage, l'étirage et l'emboutissage, vise à améliorer la qualité des pièces finies tout en minimisant les défauts (plissements, strictions, ruptures) et les efforts nécessaires. Ces procédés sont largement utilisés dans l'industrie pour façonner des tôles métalliques en pièces aux formes complexes [89] .

2.1.1. L'optimisation du Pressage

Le pressage est un procédé de mise en forme mécanique qui consiste à appliquer une pression sur un matériau granulé ou broyé, souvent préchauffé, afin d'obtenir une pièce compacte. L'optimisation des paramètres opératoires du pressage vise à maximiser la densité et la qualité du produit final tout en minimisant la durée du procédé et la consommation énergétique. Parmi les paramètres clés, la pression appliquée doit être suffisante pour compacter efficacement le matériau sans provoquer de fissures ni autres défauts. Par exemple, dans le pressage mécanique du broyat de karité, la pression varie généralement entre 4 et 8 MPa selon le type de presse (vis ou hydraulique), tandis que des études en laboratoire ont montré que des pressions plus élevées, proches de 20 MPa, permettent d'augmenter significativement le taux d'extraction, jusqu'à environ 78 % à 90 °C. La température de préchauffage est également déterminante : une température d'environ 90 °C améliore la fluidité du matériau et facilite l'extraction. Concernant la durée de pressage, le maintien de la pression pendant environ 5 minutes suffit à stabiliser le taux d'extraction, mais un temps plus long, jusqu'à 17 minutes, peut assurer un écoulement maximal. Enfin, la géométrie et les matériaux de la cage de pressage, notamment les entailles destinées à l'évacuation du produit, jouent un rôle crucial dans l'efficacité globale du procédé. L'optimisation repose sur des essais expérimentaux combinés à une modélisation des phénomènes mécaniques et thermiques, avec un contrôle en temps réel de la force et du déplacement via des capteurs, permettant d'ajuster précisément les paramètres et d'identifier les conditions optimales. La répétition des essais garantit la robustesse et la reproductibilité des résultats, ouvrant la voie à des améliorations simples et peu coûteuses des presses artisanales utilisées localement [90].

2.1.2. L'optimisation d'Étirage

L'étirage est un procédé de formage par déformation plastique qui consiste à allonger une pièce métallique en la faisant passer à travers une matrice ou un moule, afin de réduire sa section transversale et d'améliorer la finition de surface. L'optimisation de ce procédé vise à maximiser la qualité dimensionnelle, la résistance mécanique et la productivité, tout en limitant les défauts tels que fissures, plis ou déformations non désirées. Parmi les paramètres essentiels à maîtriser, la vitesse d'étirage doit être adaptée au matériau : une vitesse trop élevée peut engendrer des ruptures ou des plis, alors qu'une vitesse trop faible réduit la productivité. La lubrification joue un rôle clé en réduisant les frottements entre la pièce et la matrice, ce qui diminue l'usure des outils et améliore la qualité de surface. La température de travail, qu'il s'agisse d'étirage à chaud ou à froid, doit être optimisée pour améliorer la ductilité du matériau et prévenir les fissures. Enfin, la géométrie de la matrice, notamment l'angle et la finition, influence la distribution des contraintes et la qualité finale de la pièce. L'optimisation combine des essais expérimentaux, la simulation numérique par éléments finis et le contrôle précis des paramètres opératoires. Les modèles numériques permettent de prédire les zones critiques de déformation et d'ajuster les paramètres pour éviter les défauts, tandis que l'analyse des contraintes guide la conception des outils et le choix des conditions de travail [91].

2.1.3. L'optimisation d'Emboutissage

L'emboutissage est un procédé de formage à froid qui consiste à déformer une tôle métallique en la faisant glisser entre un poinçon et une matrice afin d'obtenir des pièces aux formes complexes. L'optimisation de ce procédé vise à améliorer la qualité des pièces tout en réduisant les défauts tels que les plissements, strictions ou ruptures, et en minimisant les efforts nécessaires. Parmi les paramètres clés à maîtriser, les efforts serre-flan jouent un rôle crucial : un réglage optimal de la force de serrage permet d'éviter le plissement en cas de serrage insuffisant et la rupture par étirement si le serrage est excessif. Des méthodes d'optimisation numérique permettent de déterminer la valeur idéale de ces efforts selon la géométrie spécifique de chaque pièce. La vitesse de formage doit également être adaptée au matériau pour limiter les défauts et garantir une bonne qualité de surface. Par ailleurs, l'utilisation d'un lubrifiant approprié réduit les frottements et l'usure des outils, ce qui améliore la qualité finale des pièces. L'optimisation de la géométrie et de la finition des poinçons et matrices contribue à diminuer les concentrations de contraintes, limitant

ainsi les risques de défaillance. Pour atteindre ces objectifs, l'optimisation combine des essais expérimentaux, la simulation numérique par éléments finis et des méthodes mathématiques telles que les surfaces de réponse. Ces outils permettent de prédire les zones critiques, d'ajuster précisément les paramètres opératoires et de concevoir des outils adaptés afin de maximiser à la fois la qualité et la productivité du procédé [92].

3. Optimisation des procédés chimique et autres procédés spécifiques

L'optimisation des procédés chimiques et autres procédés spécifiques constitue un enjeu majeur pour améliorer l'efficacité, la qualité et la durabilité des productions industrielles. Elle consiste à ajuster les paramètres de fonctionnement (température, pression, concentration, temps de réaction, etc.) afin d'atteindre un équilibre optimal entre rendement, coût, rapidité et impact environnemental.

3.1. Optimisation des procédés chimiques

L'optimisation des procédés chimiques est la démarche visant à rendre un procédé industriel chimique aussi efficace que possible, en maximisant la production, le rendement et la qualité du produit tout en minimisant les coûts, la consommation d'énergie et l'impact environnemental. Elle consiste à ajuster les paramètres de fonctionnement (température, pression, concentrations, temps de réaction, etc.) et à choisir les meilleures méthodes pour atteindre ces objectifs. Désigne une suite d'opérations industrielles organisées pour transformer des matières premières en produits finis ou intermédiaires, en modifiant leur composition chimique. Cette transformation s'appuie sur des réactions chimiques contrôlées, couplées à des étapes de séparation, purification et conditionnement, le tout dans une logique d'optimisation économique, énergétique et environnementale [93]

3.1.1. L'optimisation des traitements de surface en génie des procédés chimiques

L'optimisation des traitements de surface en génie des procédés chimiques vise à améliorer les performances des matériaux en modifiant leurs propriétés physico-chimiques telles que la résistance à la corrosion, la dureté, l'adhérence ou la résistance à l'usure, tout en maîtrisant les coûts et l'impact environnemental. Chaque procédé, qu'il s'agisse du dépôt chimique en phase vapeur (CVD) pour déposer une couche de carbure de silicium, de la nitruration gazeuse ou plasma pour durcir la surface des métaux, de la galvanisation et électrodéposition pour protéger contre la corrosion, ou encore de la phosphatation et de l'anodisation pour améliorer l'adhérence des revêtements et la protection contre la corrosion, nécessite une optimisation spécifique des paramètres opératoires.

Les paramètres critiques à ajuster comprennent le choix du procédé adapté au matériau et à l'application, les conditions opératoires telles que la température, la pression, la durée de traitement, la composition chimique des bains ou gaz, ainsi que la vitesse de dépôt ou d'exposition. Par exemple, dans la nitruration plasma, la température plus basse et le contrôle précis du plasma permettent de réduire les déformations tout en améliorant la dureté, tandis que dans la galvanisation, la maîtrise de la densité de courant et de la composition électrolytique garantit un dépôt uniforme et protecteur.

Le contrôle de la qualité à travers des techniques analytiques (microscopie, spectroscopie, essais mécaniques) est essentiel pour valider l'efficacité du traitement et ajuster les paramètres en temps réel. L'optimisation intègre également la durabilité des couches formées et les coûts énergétiques et matériels, cherchant un équilibre entre performance technique et économie.

Pour atteindre ces objectifs, les méthodes d'optimisation s'appuient sur la modélisation des phénomènes physico-chimiques (cinétique de dépôt, diffusion, interactions surface-milieu), la simulation numérique et les plans d'expériences (DOE), qui permettent d'explorer efficacement l'espace des paramètres et de réduire le nombre d'essais expérimentaux nécessaires. Cette approche systématique assure une amélioration continue des traitements de surface, adaptée aux exigences industrielles modernes en termes de qualité, coût et respect de l'environnement.[94]

3.1.2. L'optimisation du traitement par plasma non thermique

L'optimisation des traitements par plasma non thermique (PNT) repose sur la maîtrise fine des paramètres opératoires afin d'améliorer l'efficacité des procédés tout en réduisant la consommation énergétique et les risques de déformation des matériaux. Le plasma non thermique, ou plasma froid, se caractérise par une température macroscopique proche de la température ambiante, ce qui permet de traiter des matériaux sensibles à la chaleur sans altération significative. Les paramètres clés à optimiser incluent la géométrie du réacteur plasma, la nature et la pression du gaz vecteur, la puissance et la fréquence de la décharge électrique, ainsi que le temps de traitement. L'optimisation de la géométrie permet d'améliorer la distribution du plasma et la surface d'interaction avec le matériau, maximisant ainsi la génération d'espèces réactives (radicaux, ions) nécessaires aux réactions chimiques ciblées. Le contrôle précis de la puissance et de la fréquence de la décharge influence la densité électronique et la production d'espèces actives, optimisant la cinétique des réactions sans surchauffer le système. Par ailleurs, le choix du gaz (air, azote, argon, etc.) et sa pression affectent la composition chimique du plasma et la nature des espèces produites, ce qui doit être adapté à l'application spécifique (dépollution, modification de surface, stérilisation). Enfin, l'intégration de systèmes de contrôle en temps réel et la modélisation numérique permettent d'ajuster dynamiquement les paramètres pour maintenir des conditions optimales, tout en assurant la reproductibilité et la robustesse du procédé. Ces stratégies d'optimisation sont essentielles pour développer des applications efficaces et économes en énergie dans les domaines de la dépollution de l'air, du traitement des eaux, ou du traitement de surfaces sensibles [95]

3.1.3. L'optimisation du traitement par haute pression hydrostatique (HPP)

L'optimisation du traitement par haute pression hydrostatique (HPP) repose sur l'ajustement précis de plusieurs paramètres clés afin d'assurer une inactivation microbienne efficace tout en préservant les qualités nutritionnelles et organoleptiques des aliments. Les principaux paramètres à optimiser sont la pression appliquée (généralement entre 400 et 600 MPa), la durée de maintien sous pression

(de 2 à 15 minutes), la température du milieu (souvent proche de la température ambiante ou en froid positif), ainsi que le nombre et la nature des cycles de pression (continue ou pulsée). Ces paramètres doivent être adaptés en fonction des caractéristiques intrinsèques du produit, telles que le pH, l'activité de l'eau, la composition de la matrice alimentaire et le type de micro-organismes présents, car ces facteurs influencent la barorésistance des bactéries et la stabilité des enzymes. Par exemple, une faible activité de l'eau peut réduire l'efficacité du traitement. L'optimisation inclut également la gestion des effets thermiques liés à la compression, en contrôlant la température initiale et la cinétique de compression pour compenser l'élévation de température due à la pression. L'application de cycles pulsés, avec un contrôle précis de la durée, du nombre de pulses, de la vitesse d'application et de décompression, ainsi que l'introduction de temps de latence entre les cycles, permet d'accroître l'efficacité de l'inactivation microbienne tout en réduisant la pression nécessaire, limitant ainsi les altérations des propriétés du produit. Enfin, l'intégrité du conditionnement et la répartition homogène de la pression par le liquide vecteur (généralement de l'eau) sont essentielles pour garantir la qualité et la sécurité des aliments traités. Ces stratégies d'optimisation permettent de prolonger significativement la durée de conservation des aliments, tout en conservant leur fraîcheur, leurs valeurs nutritionnelles et leurs qualités sensorielles[96] .

3.1.4. L'optimisation de l'Impression 3D photonique (stéréolithographie)

L'optimisation de l'impression 3D photonique par stéréolithographie (SLA) vise à maximiser la précision dimensionnelle, la qualité de surface et la reproductibilité des pièces tout en réduisant les temps de fabrication et les coûts. Ce procédé utilise une source lumineuse pour polymériser sélectivement une résine photosensible couche par couche, permettant d'obtenir des détails très fins et des surfaces lisses. Les paramètres clés à optimiser incluent la résolution de l'écran (notamment la taille des pixels de l'écran LCD ou la précision des lentilles de collimation), la puissance et la durée d'exposition à la lumière, la température ambiante contrôlée dans la chambre d'impression, ainsi que la qualité et la composition de la résine utilisée. Une température stable et proche de l'ambiante limite les déformations dues à la dilatation thermique, garantissant une meilleure exactitude. L'optimisation passe également par le calibrage précis des composants optiques et mécaniques, ainsi que par le choix de matériaux rigides pour une meilleure stabilité dimensionnelle. Par ailleurs, la préparation des fichiers numériques STL est essentielle : il faut veiller à une tessellation adaptée, avec des surfaces lisses, une épaisseur minimale des parois

compatible avec la résolution de l'imprimante, et une complexité maîtrisée pour réduire les temps d'impression sans perdre en qualité. L'utilisation de logiciels de simulation et de plans d'expériences permet d'ajuster ces paramètres pour chaque application spécifique, assurant ainsi une production fiable et efficace de pièces aux tolérances strictes, notamment dans les secteurs médical, dentaire et industriel [97].

3.1.5. L'optimisation du Sonochimie

L'optimisation en sonochimie vise à maximiser l'efficacité des réactions chimiques induites par les ultrasons en contrôlant précisément plusieurs paramètres clés. Parmi ceux-ci, la fréquence ultrasonore, généralement comprise entre 20 kHz et 200 MHz, joue un rôle fondamental : des fréquences basses (autour de 12 à 20 kHz) favorisent une cavitation plus intense avec des bulles plus grosses, ce qui améliore l'effet mécanique sur les réactions, notamment pour la désintégration ou la solubilisation de solides. La puissance acoustique appliquée doit être ajustée pour assurer une cavitation optimale sans provoquer d'effets indésirables comme la surchauffe ou la dégradation des produits. La température du milieu est également critique : une augmentation modérée jusqu'à environ 80 °C peut améliorer la diffusion et les rendements, mais la cavitation est plus facilement atteinte à des températures plus basses, ce qui nécessite un compromis adapté à chaque application. La pression hydrostatique influence aussi la sonochimie, une légère augmentation (de 1 à 3,5 bar) améliorant significativement l'efficacité énergétique et la reproductibilité du procédé. L'introduction de gaz dissous (argon, hélium) dans le milieu favorise la germination des bulles de cavitation, renforçant les effets sonochimiques. Enfin, l'optimisation passe par l'utilisation de systèmes de contrôle sophistiqués, intégrant capteurs de température, logiciels de réglage et enregistrement automatique des données, ainsi que par la conception adaptée des réacteurs pour assurer une distribution homogène des ultrasons et une sonication concentrée dans l'espace et dans le temps. Ces stratégies permettent d'augmenter les rendements, d'accélérer les réactions et de garantir la reproductibilité à l'échelle industrielle [98].

3.1.6. L'optimisation des traitements par rayonnement (UV, gamma)

L'optimisation des traitements par rayonnement, qu'il s'agisse de rayons UV ou gamma, repose sur le contrôle précis des paramètres d'irradiation afin d'assurer une efficacité maximale dans la désinfection, la stérilisation ou la conservation, tout en préservant les qualités du produit traité.

Pour les rayons UV, notamment les UV-C, l'optimisation porte sur la dose de rayonnement (fluence), qui dépend de l'intensité (irradiance) et du temps d'exposition, afin d'atteindre une inactivation efficace des microorganismes sans endommager les matériaux ou aliments. La configuration de la source, la distance à la surface, et la nature du milieu influencent également la performance. Concernant les rayons gamma, l'optimisation implique la maîtrise de la dose absorbée, la durée d'exposition, la géométrie du produit et la distribution homogène du rayonnement pour garantir une stérilisation complète sans altération excessive des propriétés physico-chimiques. La gestion des effets thermiques et radiolytiques, ainsi que la conformité aux normes de sécurité et de traçabilité, sont aussi des aspects essentiels. L'utilisation de logiciels de planification (ex. EUDMODEL en radiothérapie) et de dosimétrie permet de modéliser et d'ajuster précisément les paramètres pour chaque application spécifique, qu'il s'agisse de traitement alimentaire, médical ou industriel. Enfin, l'optimisation prend en compte la nature du microorganisme ciblé, la composition du produit et les conditions environnementales, afin d'adapter la dose et le mode d'irradiation pour une efficacité maximale [99].

3.2.L'Optimisation des procédés de fabrication des matériaux avancés

L'optimisation des procédés de fabrication des matériaux avancés consiste à modéliser, simuler et ajuster les paramètres des procédés pour améliorer la qualité, la performance et la durabilité des matériaux tout en réduisant les coûts et l'impact environnemental. Elle vise à maîtriser l'interaction complexe entre le matériau, le procédé de mise en forme et le produit final afin d'obtenir des pièces fonctionnelles répondant aux exigences techniques spécifiques.[100]

3.2.1. L'optimisation du Frittage (Sintering) :

L'optimisation du frittage consiste à ajuster plusieurs paramètres clés pour améliorer la densification, la résistance mécanique et la qualité finale des matériaux frittés tout en évitant les défauts comme la déformation ou la croissance excessive des grains. Parmi ces paramètres, la température joue un rôle central en contrôlant la cinétique du frittage : elle doit être suffisamment élevée pour favoriser la liaison et la diffusion atomique sans atteindre la fusion du matériau. Le temps de maintien à cette température doit être équilibré pour permettre une diffusion complète sans provoquer un grossissement excessif des grains qui dégraderait les propriétés mécaniques. La pression appliquée pendant le frittage favorise le réarrangement des particules et la réduction de la

porosité, mais doit être contrôlée pour éviter fissures et déformations. La taille et la distribution des particules influencent également la vitesse et l'uniformité du frittage, les particules fines favorisant une meilleure densification mais pouvant causer des agglomérations. La composition de la poudre, incluant les additifs, est optimisée pour améliorer certaines propriétés tout en garantissant une bonne compatibilité avec le matériau de base. L'atmosphère de frittage (inertie, réductrice) est choisie pour prévenir l'oxydation et favoriser certaines caractéristiques de surface. Enfin, la vitesse de chauffage doit être adaptée pour assurer une montée en température homogène, limitant les contraintes thermiques et les défauts. L'ensemble de ces paramètres est souvent optimisé par des essais expérimentaux combinés à la modélisation numérique afin d'atteindre une densification maximale, une microstructure fine et homogène, et des propriétés mécaniques optimales. [101]

3.2.2. L'optimisation d'autres procédés avancés

L'optimisation des autres procédés avancés de fabrication englobe une large gamme de techniques telles que l'induction, l'hydroformage, le brasage, l'extrusion, l'injection ou encore le clinchage. L'objectif principal est de définir précisément les critères de conception et les paramètres opératoires pour fabriquer des pièces robustes répondant aux exigences spécifiques des secteurs comme l'aérospatiale ou l'énergétique. Cette optimisation s'appuie sur une approche interdisciplinaire combinant mécanique, physique et science des matériaux. Elle inclut la modélisation avancée des phénomènes physiques complexes (grandes déformations inélastiques, hautes vitesses de déformation, températures élevées, frottement sévère) et le développement d'algorithmes hybrides d'optimisation multi-objectifs intégrés à des logiciels de calcul par éléments finis. Ces outils permettent de résoudre des problèmes non linéaires liés à la mise en forme des matériaux, tout en respectant les règles métiers et en paramétrant les modèles géométriques pour une ingénierie à base de connaissances. Par ailleurs, l'intégration des technologies modernes telles que l'intelligence artificielle, l'Internet des Objets (IoT) et la robotique contribue à l'amélioration continue des procédés, en optimisant en temps réel les réglages, la maintenance prédictive, la planification de la production et la gestion des flux. Ces avancées permettent de réduire les rebuts, d'augmenter la flexibilité, de diminuer la consommation énergétique et d'améliorer globalement la performance industrielle[102].

4. Modélisation des procédés de fabrication des matériaux

La modélisation des procédés de fabrication des matériaux consiste à représenter mathématiquement les étapes de transformation de la matière (synthèse, mise en forme, traitement) pour prédire leurs propriétés finales, optimiser les paramètres opératoires et réduire les coûts expérimentaux. Elle combine des équations physico-chimiques, des simulations numériques et des analyses multi-échelles. [103]

4.1. Utilisation des modèles thermodynamiques et cinétiques pour prévoir les comportements des matériaux

Les modèles thermodynamiques et cinétiques sont essentiels pour prédire l'évolution des matériaux lors de leur fabrication. Ils permettent de simuler les transformations de phases, les réactions chimiques et les mécanismes de dégradation, en s'appuyant sur des bases théoriques et des données expérimentales.

4.1.1. Modèles thermodynamiques

Les modèles thermodynamiques prédisent les états d'équilibre des systèmes matériaux en fonction de paramètres comme la température, la pression et la composition.

- **Méthode CALPHAD** : c'est le Calcul des diagrammes de phases en ajustant les énergies libres des phases sur des données expérimentales et des calculs ab initio. Elle est appliquée dans la prédiction de la stabilité des alliages (ex. système Er-Zr) et optimisation des procédés de solidification. [104]
- **Simulations multi-échelles** : c'est le couplage de modèles atomiques (calculs DFT) et macroscopiques (éléments finis) pour décrire les propriétés mécaniques et thermiques, utilisée dans le domaine de comportement des matériaux sous irradiation (ex. aciers pour réacteurs nucléaires). [105]

4.1.2. Modèles cinétiques

Les modèles cinétiques décrivent l'évolution temporelle des systèmes hors équilibre, en intégrant les mécanismes de diffusion, réaction et nucléation.

- **Loi d'Arrhenius :**

$$k = A \cdot e^{-\frac{E_a}{RT}}, \text{ où } k \text{ est la constante de vitesse, } E_a \text{ l'énergie d'activation.}$$

Utilise dans l'estimation des vitesses de réaction lors de la synthèse de céramiques ou de la décomposition thermique. [106]

- **Dynamique moléculaire et Monte-Carlo cinétique**

La dynamique moléculaire (DM) et la méthode de Monte-Carlo cinétique (KMC) sont deux techniques de simulation numérique complémentaires utilisées pour étudier l'évolution atomistique et la cinétique des matériaux à différentes échelles de temps et d'espace. La dynamique moléculaire simule le mouvement des atomes en résolvant les équations de Newton, permettant d'observer les phénomènes à l'échelle atomique sur des durées typiquement de l'ordre de la nanoseconde. Elle est particulièrement utile pour étudier les mécanismes de diffusion, les réactions chimiques, et les transformations structurales à court terme. La Monte-Carlo cinétique, quant à elle, est une méthode stochastique qui modélise les événements atomiques rares (comme la diffusion par saut d'atomes ou la croissance de précipités) sur des échelles de temps beaucoup plus longues, allant de microsecondes à plusieurs minutes, en se basant sur des probabilités de transition entre états. Le couplage de ces deux méthodes permet de combiner la précision atomistique de la dynamique moléculaire avec la capacité de la Monte-Carlo cinétique à simuler des phénomènes sur des temps expérimentaux plus longs, ce qui est essentiel pour comprendre l'évolution microstructurale des matériaux sous contraintes thermiques ou mécaniques. [107]

4.1.3. Couplage thermodynamique-cinétique

L'approche intégrée combine les deux modèles pour prédire à la fois les états finaux et les chemins d'évolution comme le vieillissement des aciers :

- Thermodynamique : Calcul des diagrammes de phases pour identifier les précipités stables (ex. carbures).

- Cinétique : Simulation de la croissance des précipités via des lois de diffusion.[108]

4.2. Outils de simulation et d'optimisation des procédés

Les outils de simulation et d'optimisation des procédés industriels combinent logiciels spécialisés et méthodes numériques (éléments finis, modélisation multiphysique).

4.2.1. Logiciels de simulation et d'optimisation

- **ProSimPlus** : utiliser pour la simulation de procédés industriels continus (chimie, pharmacie), et les bilans matière/énergie, optimisation des paramètres opératoires. [109]
- **ASPEN Plus** : utiliser pour modéliser des procédés chimiques et pétrochimiques, et optimisation thermodynamique et analyse de sensibilité. [110]

4.2.2. Approche par éléments finis (EF)

- **Logiciel ANSYS** : utilisée pour la simulation thermomécanique de fours de traitement ou réacteurs, et la prédiction des contraintes résiduelles dans les pièces usinées. [111]
- **Modélisation des transferts thermiques** : c'est la résolution numérique des équations de conduction/convection. [112]
- **Optimisation topologique** : Minimise la masse tout en respectant des contraintes mécaniques. [113]

Conclusion

En conclusion, la diversité et la complexité des procédés de fabrication constituent un levier stratégique pour l'innovation et la performance industrielle. La maîtrise des procédés thermiques, mécaniques, chimiques et avancés permet d'adapter finement la structure et les propriétés des matériaux aux besoins spécifiques de chaque application. L'optimisation des paramètres de process, l'intégration de traitements de surface, ainsi que le recours à des technologies de pointe comme la fabrication additive ou le traitement par plasma, ouvrent la voie à la conception de produits toujours plus performants, durables et compétitifs. La compréhension approfondie des interactions entre procédés, matériaux et propriétés finales est ainsi indispensable pour

accompagner la transition vers une industrie plus efficace, respectueuse de l'environnement et tournée vers l'avenir.

Chapitre IV :

Etude de cas

Chapitre 4 : Etude de cas : Comportement mécanique en traction de la soudure

1.Introduction

2.Matériels et méthodes

3. Modelisation et simulation numérique

4.Résultats et discussion

1. Introduction

Forts des connaissances acquises aux chapitres précédents concernant les divers procédés de fabrication mécanique et, plus particulièrement, les techniques d'assemblage par soudage, ce chapitre se propose d'approfondir l'étude d'un procédé spécifique à travers une analyse de cas concrète. Le soudage, en tant que méthode d'assemblage permanent largement répandue dans l'industrie, induit des transformations significatives au sein des matériaux, tant sur le plan métallurgique que mécanique. Comprendre et prédire ces effets est crucial pour garantir l'intégrité et la performance des structures soudées.

Afin d'analyser en détail les effets induits par le processus de soudage, une approche par simulation numérique sera mise en œuvre. Cette méthode offre l'avantage de visualiser et de quantifier des phénomènes complexes tels que, les contraintes résiduelles et les déformations résultant de l'apport de chaleur localisé. L'objectif de cette simulation est de mettre en évidence l'influence des paramètres de soudage sur la microstructure et les propriétés mécaniques de l'assemblage final.

2. Matériels et méthodes

2.1. Le choix de procédés :

Le choix de ce procédé se justifie par son accessibilité et sa relative simplicité de mise en œuvre, ce qui en fait une technique encore pertinente dans certains contextes de fabrication et de réparation, notamment pour des opérations de maintenance ou des assemblages de pièces de taille modeste.

L'acier C48, quant à lui, est un acier au carbone semi-dur couramment utilisé dans des applications nécessitant une bonne résistance mécanique et une certaine aptitude à la trempe. L'étude de son comportement lors du soudage au chalumeau permettra d'analyser les transformations microstructurales induites par un cycle thermique potentiellement moins concentré que d'autres techniques de soudage, et d'évaluer les risques de décarburation ou de formation de phases fragiles.

Suite à cette opération de soudage, un joint présente macroscopiquement trois zones distinctes :

- le Métal de Base (MB), qui conserve sa microstructure et ses propriétés initiales, n'ayant pas été significativement affecté par la chaleur.
- La Zone Affectée Thermiquement (ZAT), adjacente au MB, a subi un cycle thermique intense mais sans fusion, entraînant des transformations microstructurales à l'état solide telles que la croissance des grains ou la formation de nouvelles phases.
- Enfin, la Zone de Metal fondue (MF), qui s'est solidifié, constitue la région où les matériaux ont été portés à l'état liquide et où la microstructure résultante dépend des conditions de solidification et de la composition chimique. La caractérisation de ces trois zones – MB,

ZAT et ZF (ou MF) – est essentielle pour l'évaluation des propriétés mécaniques et de l'intégrité du joint soudée

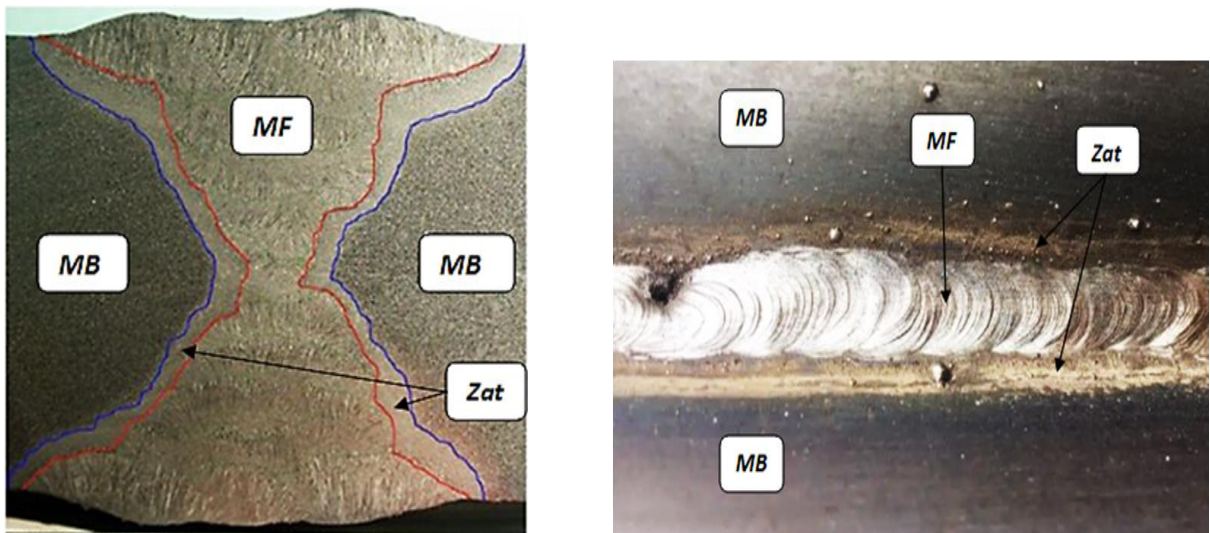


Figure 27 Les zones de soudage

2.2. Le choix de matériaux :

Le matériau choisi c'est l'acier C48 qui est un acier non allié à moyenne teneur en carbone, appartenant à la catégorie des aciers de cémentation (surface hardening steels). Sa composition chimique est caractérisée par une teneur en carbone de 0,45 % à 0,52 %, avec des teneurs contrôlées en manganèse (0,50–0,80 %), silicium (0,15–0,40 %), et des impuretés limitées (phosphore $\leq 0,030$ %, soufre 0,020–0,035 %). Conforme à la norme UNI 7847-79 (Italie), il est principalement utilisé pour des pièces mécaniques soumises à des contraintes de fatigue et d'usure, nécessitant une surface durcie par traitement thermique (trempe) tout en conservant un cœur ductile. [121]

2.3. Le choix de logiciel de simulation

Dans cette étude on a choisi ABAQUS qui est un logiciel de simulation numérique basé sur la méthode des éléments finis. Ce logiciel offre la possibilité d'associer différents modèles de comportement mécanique afin de reproduire au mieux la réalité. Il permet de simuler le comportement d'une grande variété de matériaux, tels que les métaux, le béton, les composites ou encore les polymères, etc.[120]

3. Modelisation et simulation numérique

La préparation d'un modèle physique dans ABAQUS requiert la définition précise de plusieurs paramètres essentiels. Il s'agit notamment de :

- La création du modèle géométrique
- L'attribution des propriétés physiques des matériaux
- La discrétisation de la géométrie à l'aide d'un maillage adapté
- La spécification des conditions aux limites
- Le choix du type d'analyse ou de résolution à effectuer, ainsi que de la sélection des grandeurs à extraire en sortie.

Cette démarche structurée permet de représenter fidèlement le comportement réel du système étudié et d'obtenir des résultats fiables lors des simulations numériques. [121]

3.1 Le choix de la géométrie :

Dans cette étude on s'intéresse à la simulation numérique d'un essai de traction. La forme géométrique de l'éprouvette est imposée par le type d'essai choisi. On peut voir sur la figure 17 une axi-symétrie par rapport à l'axe OX. La géométrie étudiée comporte trois zones principales :

- **Première zone** : c'est le métal de base noté « MB » avec les propriétés mécaniques qui sont décrites en détail sur le tableau 5.
- **Deuxième zone** : c'est le métal fondu noté « MF » avec les propriétés mécaniques qui sont décrites en détail sur le tableau 5.
- **Troisième zone** : c'est la zone affectée thermiquement notée « ZAT » avec les propriétés mécaniques qui sont décrites en détail sur le tableau 5.

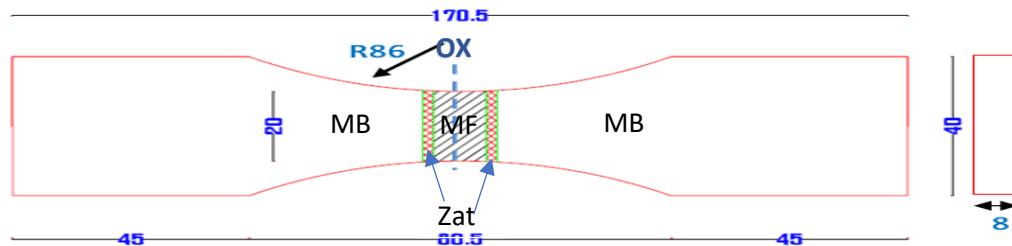


Figure 28 Dimensions de l'éprouvette soudée

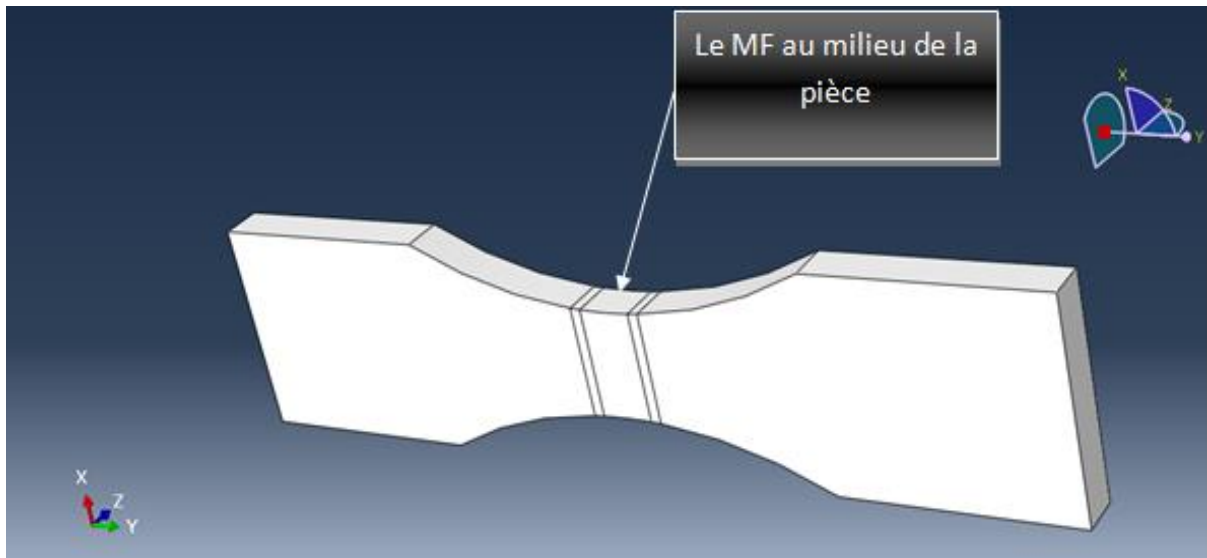


Figure 29 modèle géométrique de l'éprouvette soudée

Afin de détecter la zone fragile dans l'éprouvette soudée, on suppose de simuler des essais de traction réalisés sur les matériaux de trois zones séparées. Alors on a crée trois autres éprouvettes différentes (figure 20) :

- **Première éprouvette** : avec les propriétés mécaniques de Métal Fondu (MF)
- **Deuxième éprouvette** : avec les propriétés mécaniques de Métal de Base (MB)
- **Troisième éprouvette** : avec les propriétés mécaniques de la Zone affectée thermiquement (Zat)

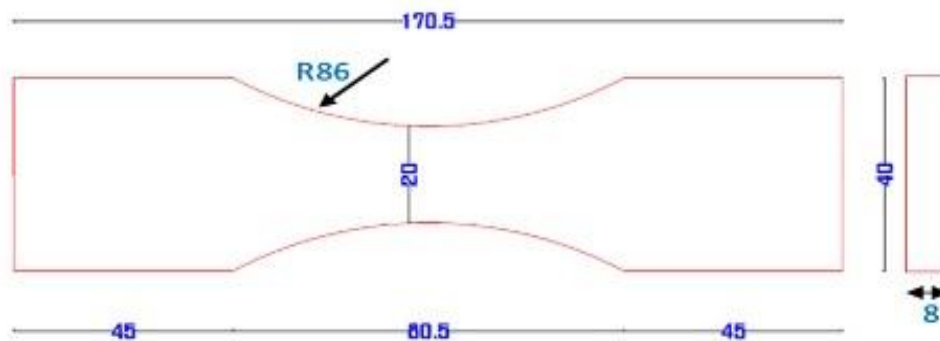


Figure 30 Dimensions de l'éprouvette non soudée

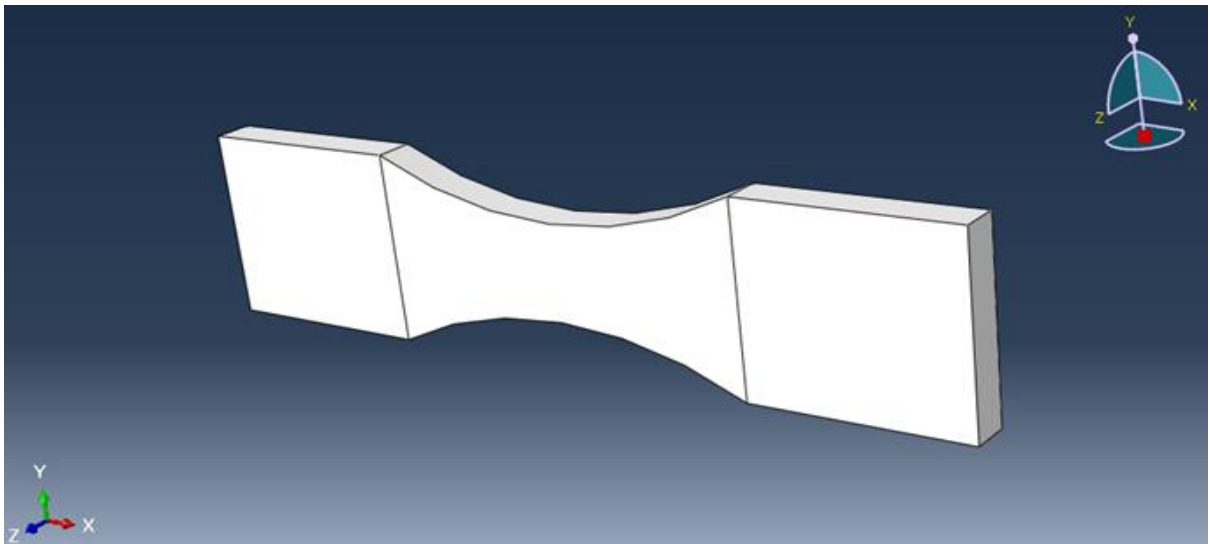


Figure 31 modèle géométrique de l'éprouvette non soudée

3.2. La déclaration des propriétés physiques :

Les données expérimentales caractérisant les propriétés mécaniques et les paramètres de soudage ont été intégrées au modèle numérique pour simuler avec précision (tableau 6, figure 6) :

- le comportement global du matériau considéré (contraintes macroscopiques),
- le comportement local (gradients près du cordon),
- ainsi que la géométrie réaliste du joint de soudure.

Tableau 5 Propriétés mécaniques des matériaux [114]

Matériaux	Propriétés mécaniques				
	Re (MPa)	Rm (MPa)	A (%)	k	N
Métal de Base (MB)	445	760	40	836	0,302
Métal fondu (MF)	420	720	35	1009	0,508
Zone affectée thermiquement (ZAT)	325	660	30	980	0,401

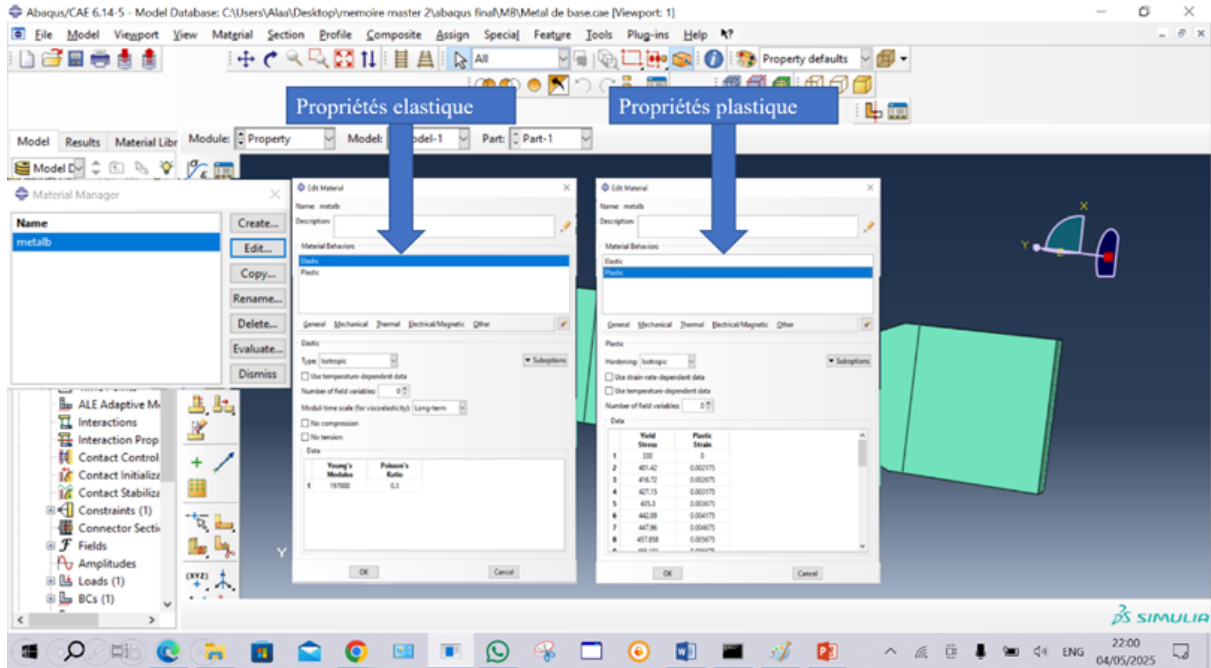


Figure 32 Choix du matériau

3.3. Le choix de maillage

Le maillage a été réalisé avec une densité faible dans la zone du métal de base MB afin de limiter les calculs dans cette région, qui n'est pas le principal objet d'étude. En revanche, un maillage plus fin a été appliqué dans les zones critiques, à savoir la zone affectée thermiquement (ZAT) et la zone fondue MF. Le but est d'augmenter la précision des calculs dans ces régions où les gradients de contraintes et de températures sont plus importants. Ce raffinement local du maillage permet d'obtenir des résultats numériques plus précis et fiables dans les zones d'intérêt tout en optimisant le temps de calcul global.

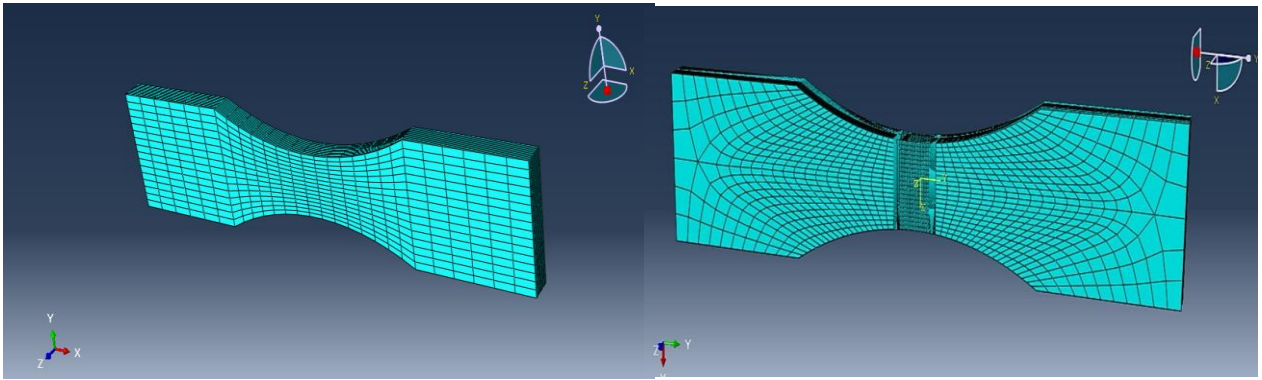


Figure 33 Le maillage de l'éprouvette soudée et non soudée

3.4. Conditions aux limites

Comme on peut le voir sur la figure 34 Pour simuler les conditions opératoires d'un essai de traction, on procède comme suit :

- On désigne par encastrement, la fixation de l'éprouvette, sur un coté, sur le dispositif de traction,
- Sur l'autre coté de l'éprouvette, le chargement appliqué est représenté par une Force,

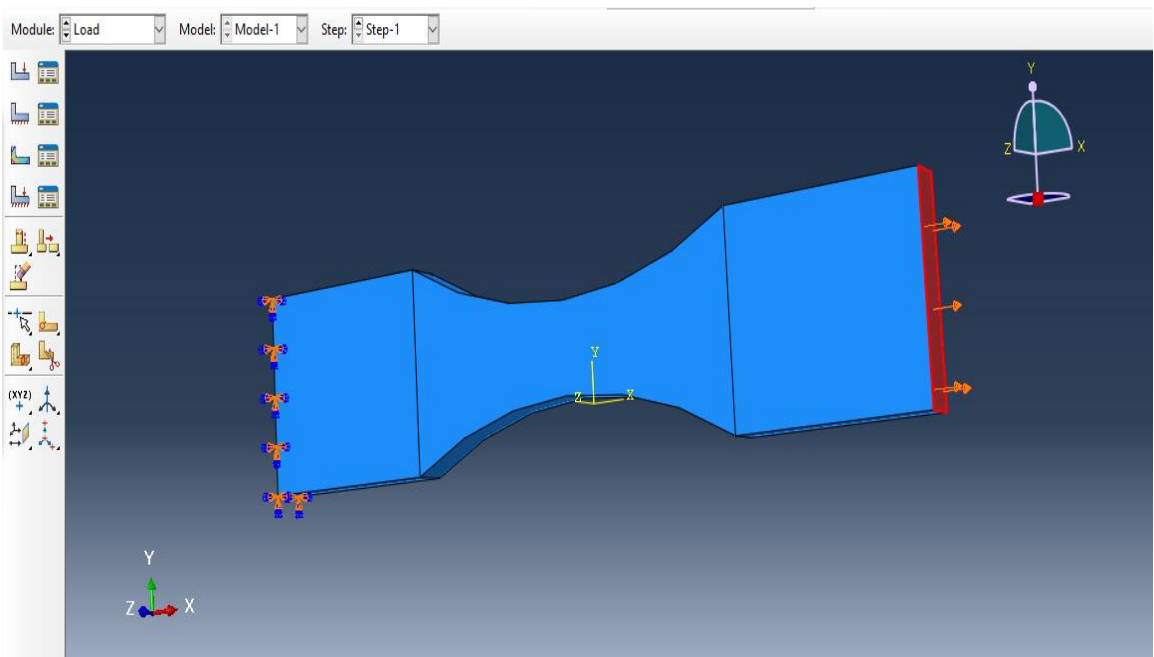


Figure 34 Les condition aux limites

4. Résultats et discussion

4.1. La validation expérimentale de la simulation numérique de l'essai de traction

Dans le but de vérifier la fiabilité de la simulation numérique, a été réalisée une comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats numériques obtenus pour le cas d'une éprouvette en métal de base C48. La figure 35 montre que les deux courbes, correspondant aux résultats expérimentaux et aux résultats de la simulation numérique, présentent une allure similaire, tant sur le plan de la forme que du comportement global. Un léger écart est toutefois observé. Cet écart peut être attribué à certaines simplifications du modèle numérique ou à des variations expérimentales. Cette bonne concordance confirme la fiabilité de notre approche de simulation pour représenter le comportement mécanique du matériau étudié.

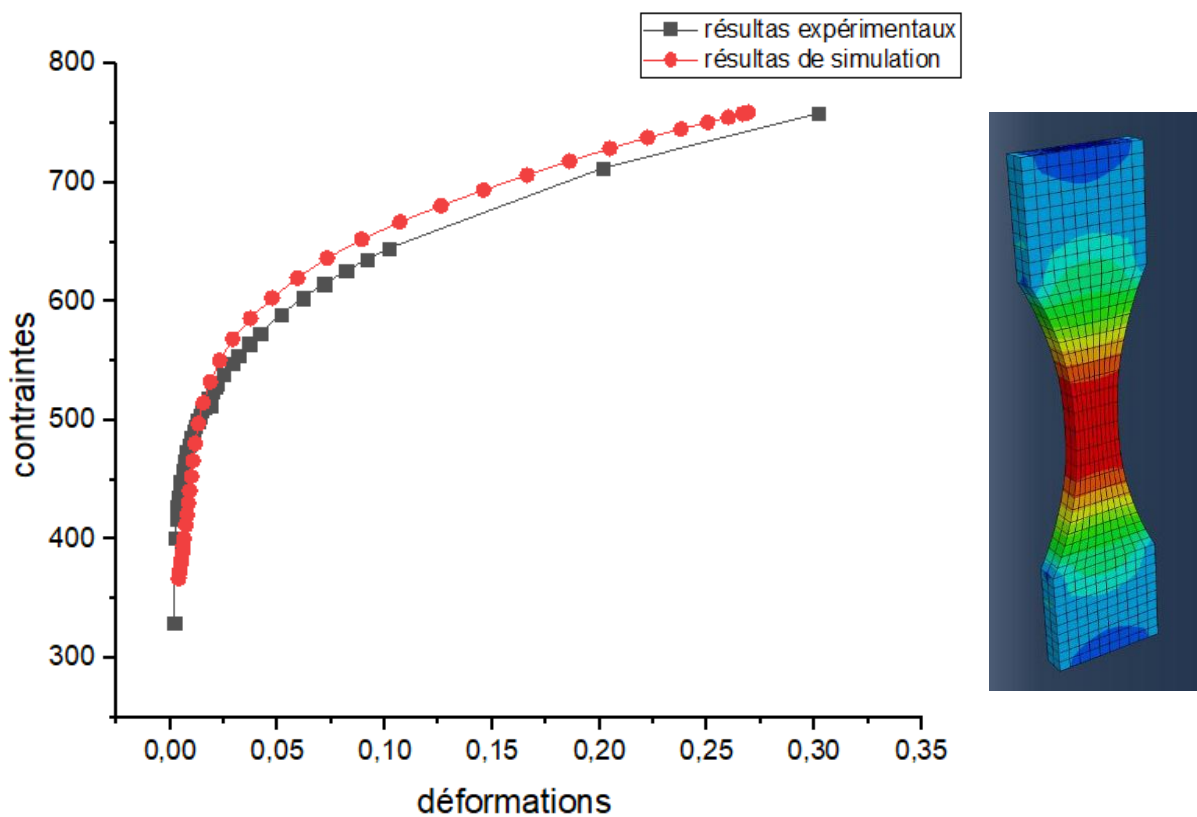


Figure 35 comparaison entre les résultats de l'expérience et les résultats de la simulation numérique

La figure ci-dessous présente une comparaison entre les courbes contrainte-déformation d'une éprouvette soudée et celles obtenues pour une éprouvette non soudée. On remarque que

l'éprouvette non soudée présente une meilleure résistance mécanique, avec une limite d'élasticité et une résistance maximale plus élevées. En revanche, l'éprouvette soudée montre une diminution de ces propriétés, accompagnée d'une déformation plus importante. Il est intéressant de noter que la partie élastique des deux courbes est presque confondue, ce qui indique une raideur initiale similaire. Toutefois, dès l'entrée en phase plastique, un écart significatif apparaît entre les deux courbes, traduisant une altération du comportement mécanique due au soudage. Pour mieux comprendre cette différence et identifier les zones responsables de cette variation, nous analyserons dans les figures suivantes le comportement mécanique des différentes zones de la jointure soudée, le métal de base (MB), le métal fondu (MF) et la zone affectée thermiquement (ZAT).

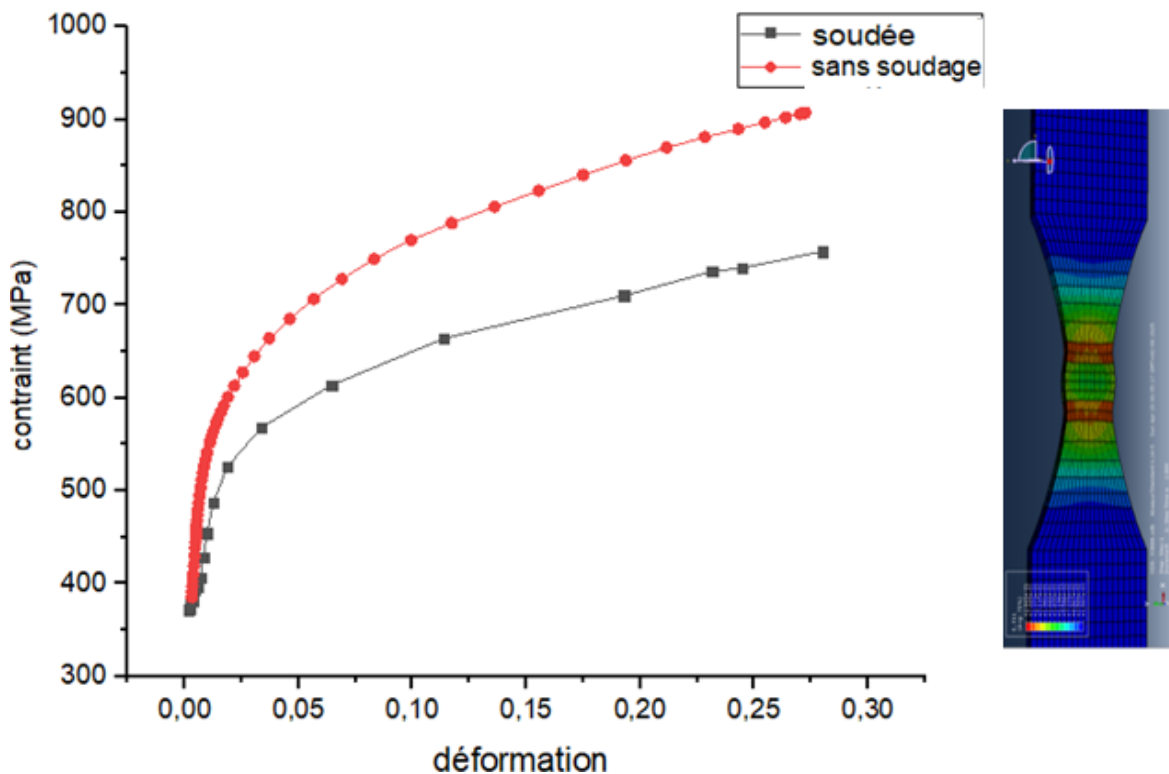


Figure 36 comparaison entre le comportement mécanique de l'éprouvette soudée et celui de l'éprouvette non soudée

D'après les résultats de la simulation numérique obtenus pour les éprouvettes issues du métal de base (MB), du métal fondu (MF) et de la zone affectée thermiquement (ZAT), présentés sur la figure 36, nous avons constaté que la ZAT est la zone qui présente la plus grande déformation. Ce comportement peut être expliqué par les modifications microstructurales induites par le procédé de soudage. En effet, la ZAT subit un cycle thermique intense qui entraîne des transformations

métallurgiques importantes, telles que la recristallisation, la croissance des grains, ou encore la formation de phases plus fragiles ou moins résistantes. Ces changements altèrent localement les propriétés mécaniques de l'acier, en particulier sa limite d'élasticité et sa ductilité. Ainsi, le soudage influence de manière significative la microstructure de l'acier, rendant la ZAT plus sensible à la déformation sous chargement, ce qui est bien reflété par les résultats de simulation.

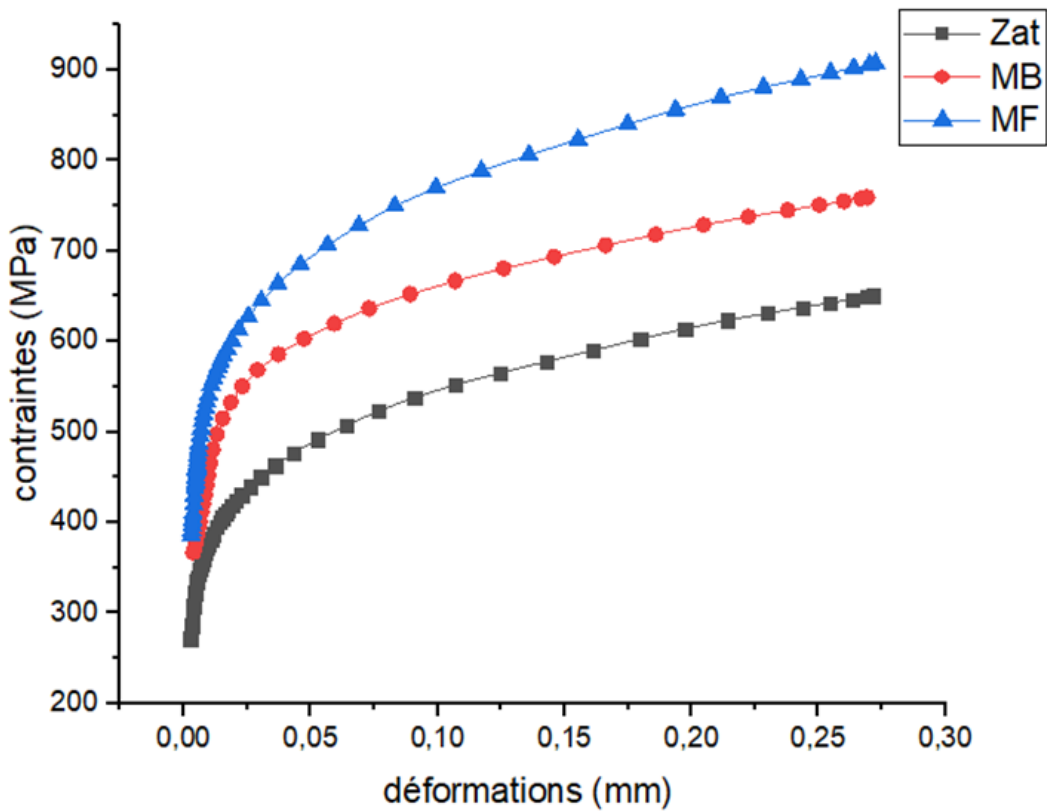


Figure 37 Les courbes contraintes-déformations des trois éprouvettes (MB, MF et zat)

Conclusion

A travers cette étude numérique, nous avons :

- Démonstré encore une fois la fiabilité de la simulation numérique sur ABAQUS à travers la comparaison des courbes contrainte-déformation obtenues expérimentalement et numériquement,

- mis en évidence l'influence du soudage sur les propriétés mécaniques des matériaux à travers la comparaison entre les courbes contrainte-déformation obtenues pour l'éprouvette sans soudure et l'éprouvette soudée,
- démontré que la microstructure de la zone affectée thermiquement est la partie la plus sensible à la déformation à travers la comparaison entre les courbes contrainte-déformation obtenues par la simulation numérique des essais de traction réalisés sur des éprouvettes dont le matériau correspond au métal de base, à la zone affectée thermiquement et au métal fondu.

Conclusion générale

Conclusion générale

la maîtrise des matériaux dépend d'une compréhension approfondie de leur classification, de leurs propriétés intrinsèques et de leur structure interne, ainsi que de la connaissance des interactions complexes entre ces éléments. La relation étroite entre la microstructure, la macrostructure et les propriétés mécaniques, thermiques, électriques ou chimiques permet de guider la conception et l'optimisation des matériaux. De plus, les procédés de fabrication affectent directement la structure telle qu'elle est observée dans la simulation de soudage, ce qui impacte considérablement les propriétés mécaniques du matériau étudié et donc les performances finales du matériau. La science des matériaux est donc un domaine fondamental de l'ingénierie moderne, où l'innovation technologique dépend en grande partie de la capacité à sélectionner, contrôler et optimiser les matériaux en fonction des contraintes et des besoins industriels. Cette synergie entre la science fondamentale, la technologie et la production ouvre la voie à des avancées significatives dans des secteurs tels que l'aviation, l'automobile, l'énergie, la construction et la biomédecine, contribuant ainsi au progrès technologique et économique global.

Bibliographie

Chapitre1

- [1] "Science des Matériaux" de J. Smith, Chapitre 1 : "Introduction aux Matériaux", p. 5, Éditions Technos, 2018
- [2] Collectif Presses des Mines, Matériaux pour l'ingénieur (2010) : Chapitre 2 : "Choix et mise en œuvre des matériaux" (pages 45-90)
- [3] Source: "Materials Science and Engineering" de William D. Callister Jr. et David G. Rethwisch, chapitre 2, page 23
- [4] "Polymer Science and Engineering" de James C. Seferis et al., chapitre 1, page 3
- [5] "Ceramic Materials" de C. Barry Carter et M. Grant Norton, chapitre 1, page 5
- [6] "Composite Materials" de Carl Zweben, chapitre 1, page 3
- [7] "Semiconductor Materials" de S. M. Sze et Kwok K. Ng, chapitre 1, page 5
- [8] "Materials Science and Engineering" de William D. Callister Jr. et David G. Rethwisch, chapitre 1, page 5
- [9] "Mécanique des Matériaux" de P. Dupont, Chapitre 5 : "Propriétés Mécaniques de Base", p. 102, Éditions Scientifiques Françaises, 2015)
- Tableau 1 : tableau des propriétés mécanique
- [10] Propriétés des Matériaux de M. Johnson, Presses Universitaires, 2020, Chapitre 5 : "Ductilité et Déformabilité", p. 120
- [11] Science des Matériaux de T. Lee, Éditions de l'Ingénieur, 2018, Chapitre 2 : "Rigidité et Module de Young", p. 30
- [12] Mécanique des Matériaux de J. Smith, Éditions Scientifiques Françaises, 2019, Chapitre 3 : "Résistance des Matériaux", p. 50
- [13] Fatigue des Matériaux de R. Brown, Presses Académiques, 2012, Chapitre 4 : "Fatigue et Nombre de Cycles", p. 90

[14] "Thermal Propriétés of Matter" de Charles Kittel. Édition : 1ère édition. Page : 12.
Éditeur : Wiley. Année de Publication : 1966. ISBN : 978-0471415268

Tableau 2 tableau des propriétés thermiques

[15] thermal propriétés of Matter

[16] matériels science engineering

[17] engineerings matériels

[18] "Electromagnétisme" de David J. Griffiths. Edition : 4. Page : 12. Éditeur :
Cambridge. University Press. Année de Publication : 2017. ISBN : 978-110-71007-95

Tableau 3 tableau des propriétés électrique et magnétique

[19] électromagnétisme p234

[20] magnétisme and électricité

[21] "Optique" de Eugene Hecht, qui offre une compréhension approfondie des propriétés optiques des matériaux (disponible dans les bibliothèques universitaires ou sur des plateformes de vente de livres en ligne

[22] "Chimie Générale" de Linus Pauling, un ouvrage classique qui couvre de manière approfondie les principes et les propriétés chimiques des éléments et des composés (disponible dans les bibliothèques universitaires ou sur des plateformes de vente de livres en ligne

Tableau 6 tableau des Propriétés Optiques et Propriétés Chimique

[23] optique des matériaux par J. Taur-chapitre 5

[24] corrosion et protection des matériaux par P. Marcus chapitre 3

[25] chimie générale inorganique par J.E. House chapitre 5

[26] "Materials Science and Engineering" de William D. Callister Jr. et David G. Rethwisch, chapitre 2, page 25

[27] Metallography and Microstructures » par ASM Handbook, Volume 9 (Couvre les aspects de la microstructure des matériaux métalliques

- [28] *Materials and Processes in Manufacturing* » par E. Paul DeGarmo, J. T. Black, et Ronald A. Kohser (Chapitre 2 : Propriétés des Matériaux et leur Sélection
- [29] *Materials Science and Engineering : An Introduction* » par William D. Callister Jr. et David G. Rethwisch, Chapitre 10 : Phases et Diagrammes de Phase, p. 320-321 (Édition 2020, Wiley).
- [30] M. Schwartz, "Lecture 9: Phase Transitions," Harvard University, 2017.
- [31] F. G. Ramírez, *Thermodynamics and Phase Transitions*, 1st ed. New York, NY, USA: Springer, 2014, ch. 2, pp. 45-47
- [32] J. Dantzig and M. Rappaz, *Solidification*, EPFL Press, 2009, ch. 1, pp. 1-5.
- [33] *Principles of Materials Science and Engineering* » par William F. Smith et Javad Hashemi, Chapitre 4: Transformations de Phase, p. 143-145 (Édition 2011, McGraw-Hill)
- [34] *Metallography and Microstructures* » par ASM Handbook, Volume 9, Article: Transformations de Phase dans les Alliages Ferreux, p. 615-618 (Édition 2004, ASM International).
- [35] William D. Callister, "Science et génie des matériaux", 3e édition, Chapitre 4 "Défauts dans les solides" et Chapitre 9 "Transformations de phases" (pages 108-125 et 232-260)
- [36] ("*Materials Processing and Manufacturing*" de S. Kalpakjian et S. R. Schmid (Chapitre 1-3) "*Metal Forming: Fundamentals and Applications*" de M. C. Shaw, N. N. Z. Gao, et K. Osakada (Chapitre 1-2)
- [37] « *Materials Processing and Manufacturing* » par S. Kalpakjian et S. R. Schmid, Chapitre 11: Moulage, p. 341-346 (Édition 2018, Cambridge University Press)
- [38] Source: « *Metal Forming: Fundamentals and Applications* » par M. C. Shaw, N. N. Z. Gao, et K. Osakada, Chapitre 4: Forgeage, p. 123-127 (Édition 2015, ASM International)
- [39] « *Welding Metallurgy* » par S. D. Kiser, M. E. Fine, et J. E. Indacochea, Chapitre 6: Microstructures de Soudage, p. 201-206 (Édition 2017, Woodhead Publishing)
- [40] K. Fedaoüi, *Cours de Technologie de Soudage*, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algérie, 2023
- [41] « *Manufacturing Engineering and Technology* » par S. Kalpakjian et S. R. Schmid, Chapitre 20: Usinage, p. 623-627 (Édition 2019, Pearson)

[42] M. Bensaada, "Traitement thermique," Université de Biskra, Algérie, 2023

[43] « Heat Treatment of Metals » par D. W. Rahoï, Chapitre 5: Traitement Thermique des Alliages Ferreux, p. 157-162 (Édition 2018, CRC Press)

Chapiter 2

[44] "Tout savoir sur le métier d'Ingénieur Génie des Procédés," BlueDocker, 29 avril 2024.

[45] M. Semai, "Chapitre I : Introduction au génie des procédés," Cours de Génie des Procédés, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2023

[46] D. R. Askeland and P. P. Phulé, The Science and Engineering of Materials, 6th ed., Stamford, CT, USA: Cengage Learning, 2015, pp. 350-380.

[47] G. E. Dieter, Mechanical Metallurgy, 3rd ed., New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1986, pp. 1-60.

[48] J. R. Davis, Surface Engineering for Corrosion and Wear Resistance, 2nd ed., Materials Park, OH, USA: ASM International, 2001, pp. 120-160.

[49] J. Campbell, Casting: Principles and Applications, 2nd ed., Oxford: Butterworth-Heinemann, 2015

[50] Ionbond, "Revêtements CVD | Dépôt Chimique en phase Vapeur," Ionbond, 3 décembre 2024.

[51] W. F. Hosford, Metal Forming: Mechanics and Metallurgy, 2nd ed., Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2010

[52] G. Boothroyd, P. Dewhurst, and W. A. Knight, Fundamentals of Machining and Machine Tools, 3rd ed., Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2010,

[53] Types d'opérations d'usinage : classifications et différences », RapidDirect, 2025

[54] J. R. Davis, Electroplating, Electroless Plating, and Electroforming, Materials Park, OH, USA: ASM International, 2001, pp. 210-230.

[55] R. M. German, Ceramic Processing and Sintering, 2nd ed., Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2014, pp. 250-270.

[56] S. M. Othman, Polymer Processing: Principles and Design, 1st ed., New York, NY, USA: Wiley, 2017, pp. 180-200.

- [57] J. K. Fink, Handbook of Engineering and Specialty Thermoplastics: Volume 3, New York, NY, USA: Wiley, 2017, pp. 450-460.
- [58] W. D. Callister Jr. and D. G. Rethwisch, Materials Science and Engineering: An Introduction, 10th ed., Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2018, pp. 50-150.
- [59] J. Smith, Heat Treatment: Principles and Techniques, 2nd ed., New York, NY, USA: Springer, 2018.
- [60] GP-Genie-des-procedes-des-materiaux_MAJ-2022, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumédiène (USTHB), 2022.
- [61] S. Ekşi, "Effect of Different Heat Treatments on Mechanical Properties of AISI Steels," Sakarya University Journal of Science, vol. 24, no. 3, pp. 472–479, 2020
- [62] J. R. Davis, ASM Specialty Handbook: Heat Resistant Materials, Materials Park, OH, USA: ASM International, 1997, pp. 45–67
- [63] G. E. Dieter, Mechanical Metallurgy, 3rd ed., New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1986, pp. 120–135.
- [64] G. E. Dieter, Mechanical Metallurgy, 3rd ed., New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1986, pp. 110–125.
- [65] W. D. Callister Jr. and D. G. Rethwisch, Materials Science and Engineering: An Introduction, 10th ed., Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2018, pp. 250-260.
- [66] W. D. Callister Jr. and D. G. Rethwisch, Materials Science and Engineering: An Introduction, 10th ed., Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2018, pp. 260-270.
- [67] G. E. Dieter, Mechanical Metallurgy, 3rd ed., New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1986, pp. 130–145.
- [68] W. D. Callister Jr. and D. G. Rethwisch, Materials Science and Engineering: An Introduction, 10th ed., Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2018, pp. 300-310.
- [69] W. D. Callister Jr. and D. G. Rethwisch, Materials Science and Engineering: An Introduction, 10th ed., Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2018, pp. 310-320.
- [70] R. W. Cahn, P. Haasen, et E. J. Kramer, Materials Science and Technology: A Comprehensive Treatment, vol. 5, Processing of Materials, Weinheim, Germany: VCH Publishers, 1991, pp. 245–270.

- [71] G. E. Dieter, Mechanical Metallurgy, 3rd ed., New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1986, pp. 120-130.
- [72] G. E. Dieter, Mechanical Metallurgy, 3rd ed., New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1986, pp. 130-140.
- [73] StudySmarter, "Microstructure des métaux: Alliage, Cristallisation," StudySmarter, 2023.
- [74] M. Kumar, "Pressure Effects on Hardness and Ductility of Metals," Materials Science Review, vol. 14, no. 1, pp. 33-40, 2023.
- [75] J. R. Davis, Corrosion: Understanding the Basics, 2nd ed., Materials Park, OH, USA: ASM International, 2000, pp. 85-95.
- [76] Influence de la vitesse de refroidissement sur le comportement thermique d'un matériau PET," Analyzing Testing Netzsch, 2023.
- [77] C. Serrar, N. Boumaiza, A. Boubertakh, et N. Boukheit, « Calcul de la vitesse de refroidissement et microstructure de l'alliage Al-5%Cu solidifié rapidement », Sciences & Technology. A, Exactes Sciences, no. 32, pp. 21–27, 2010
- [78] D. R. Askeland and P. P. Phulé, The Science and Engineering of Materials, 6th ed., Stamford, CT, USA: Cengage Learning, 2015, pp. 375-385.
- [79] D. R. Askeland and P. P. Phulé, The Science and Engineering of Materials, 6th ed., Stamford, CT, USA: Cengage Learning, 2015, pp. 385-395.
- [80] D. R. Askeland and P. P. Phulé, The Science and Engineering of Materials, 6th ed., Stamford, CT, USA: Cengage Learning, 2015, pp. 390-395.
- [81] D. R. Askeland and P. P. Phulé, The Science and Engineering of Materials, 6th ed., Stamford, CT, USA: Cengage Learning, 2015, pp. 395-400.

Chapitre 3:

- [82] G. Boothroyd, P. Dewhurst, et W. Knight, Product Design for Manufacture and Assembly, 3rd ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2010, ch. 1, pp. 1-15.
- [83] Techniques de l'Ingénieur, "Thermique pour l'industrie," 2024

- [84] H. Benzerouk, "Polycopié de cours Traitements thermiques Pour Master 1 Génie des matériaux," Université 20 Août 1955 Skikda, 2023
- [85] ÉTS Montréal, "Traitement thermique de grandes pièces forgées en four électrique," École de technologie supérieure, 11-Oct-2023.
- [86] Hurel, "Optimisation du traitement thermique d'un acier à haute résistance : étude du revenu," Mémoire de maîtrise, École de technologie supérieure, Montréal, QC, Canada, 2017
- [87] TP2 : Traitements thermiques des aciers, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2020
- [88] J. Totten, Steel Heat Treatment Handbook, 2nd ed., CRC Press, 2006, pp. 45-67.
- [89] A. Agazzi, "Optimisation thermique des outillages, quel est son intérêt," ct-ipc.com, 18-Oct-2023.
- [90] Omnifab, "La mécanique de procédés: Définition et objectifs," 04-Apr-2025
- [91] L. B. Ayed, A. Delamézière, J.-L. Batoz, et C. Knopf-Lenoir, "Optimisation des efforts serre-flan pour l'emboutissage d'une boîte carrée," Revue Européenne des Éléments Finis, vol. 15, pp. 54-62, 2006.
- [90] M. Yé, J. F. Blais, et al., "Étude des paramètres opératoires de pressage mécanique des matières premières pour l'extraction du beurre de karité," Rev. Sci. Tech. Off. Int. Epizoot., vol. 26, no. 1, pp. 123-134, 2007
- [91] J. Smith et al., "Optimization of the Metal Drawing Process: Parameters and Tooling Design," Journal of Materials Processing Technology, vol. 150, no. 1-2, pp. 123-130, 2004.
- [92] L. B. Ayed, A. Delamézière, J.-L. Batoz, et C. Knopf-Lenoir, "Optimisation des efforts serre-flan pour l'emboutissage d'une boîte carrée," Revue Européenne des Éléments Finis, vol. 15, pp. 54-62, 2006
- [93] J.-P. Wauquier, "Procédés chimiques," Techniques de l'Ingénieur, vol. J2 000, pp. 1-20, 2016.
- [94] N. Bouzegaia, Cours Traitement de surfaces, Université de Batna 2, 2023
- [95] Techniques de l'Ingénieur, "Plasma non thermique et traitement de l'air," 8 Jan. 2025.

- [96] F. Guillard et al., "La haute pression hydrostatique et la conservation des aliments : mécanisme d'action et optimisation du traitement," Nutrition — Science en évolution, vol. 16, no. 3, pp. 15-25, hiver 2019
- [97] Formlabs, "Guide de l'impression 3D stéréolithographique (SLA)," 13-Nov-2024.
- [98] L. Chatel, "Qu'est-ce que la sonochimie ?," L'actualité chimique, no. 410, pp. 11-15, sept. 2016.
- [99] A. Hadji-Aichaoui, "Programmation MATLAB pour le calcul de paramètres radiobiologiques et optimisation des traitements par rayonnement," Mémoire, Université d'Ouargla, 2023.
- [100] S. Kunar, A. K. Dargar, S. R. Medapati, N. Mandal, P. Chatterjee, et N. Talib, Optimization of Advanced Manufacturing Processes, Routledge, 2025.
- [101] "Quels Sont Les Paramètres Clés Du Frittage ?Optimisez Les ...," Kindle Tech, 2024.
- [103] COMSOL, "Modéliser les Procédés de Fabrication avec COMSOL Multiphysics®," Webinar, 2024.
- [104] J. Hertz, "Modélisation CALPHAD des diagrammes multiconstitués," *Techniques de l'Ingénieur*, Réf. M4105, 2024.
- [105] N. M. Ghoniem et N. Kioussis, *Multiscale Modeling of the Deformation of Advanced Ferritic Steels for Generation IV Nuclear Energy*, U.S. Department of Energy, Rapport DE-FC07-06ID14748, 2009.
- [106] GDR Feux, "Chapitre 3. Décomposition thermique des solides," École thématique, 2018.
- [107] CEA, "Modélisation et simulation des matériaux de structure," 2023.
- [108] CEA, *Thermodynamique et cinétique : exemples de modélisation*, Monographie, 2018.
- [109] ProSim, "Simulation et optimisation des procédés industriels avec ProSimPlus," Livre blanc, 2023.

[110] M. Mohammadi, "Modélisation de procédés chimiques avec ASPEN Plus," Université de Boumerdès, 2015.

[111] Ansys, "Thermal Analysis and Simulation Software," 2025.

[112] Université de Naama, "Simulation numérique des transferts thermiques par la méthode des éléments finis," 2024.

[113] M. P. Bendsøe et O. Sigmund, *Topology Optimization: Theory, Methods, and Applications*, 2^e éd., Springer, 2003, ch. 1–3.

Chapter 4

[114] CHERIET Nour El Houda *Simulation de la durée de vie d'une structure mécanique soudée sollicitée en mode vibratoire*, 2012

[115] Dassault Systèmes, Abaqus Analysis User's Manual, 2023