

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA BEJAIA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Installation énergétique et turbomachines

Par :

Boufadene Amazigh

Bensidhoum Ali

Thème

**Simulation de traitement thermique superficiel de l'acier par
une source laser mobile**

Soutenu le **02/07/2024** devant le jury composé de:

M. Sadaoui Djamel

Président

M. Boutalbi Nadir

Rapporteur

M. Hamtache Brahim

Examineur

Année Universitaire 2023-2024

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

Populaire et Démocratique Algérienne République

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Déclaration sur l'honneur

Engagement pour respecter les règles d'authenticité scientifique dans l'élaboration d'un travail de recherche

Arrêté ministériel n° 1082 du 27 Décembre 2020 (*)
fixant les règles relatives à la prévention et la lutte contre le plagiat

Je soussigné,

Nom :

Prénom :

Matricule :

Spécialité et/ou Option :

Département :

Faculté :

Année universitaire :/.....

et chargé de préparer un mémoire de (*Licence, Master, Autres à préciser*) :

Intitulé:

.....

.....

déclare sur l'honneur, m'engager à respecter les règles scientifiques, méthodologiques, et les normes de déontologie professionnelle et de l'authenticité académique requises dans l'élaboration du projet de fin de cycle cité ci-dessus.

Fait à Béjaïa le

...../...../.....

Signature de l'intéressé

 Lu et approuvé

.....

(*) Arrêté ministériel disponible sur le site www.univ-bejaia.dz/formation (rubrique textes règlementaires)

Remerciements

Avant tout, nous exprimons notre profonde gratitude à ALLAH le Tout-Puissant, qui nous a accordé la santé, la volonté, le courage et la patience nécessaires pour mener à bien ce travail de recherche.

Nous adressons nos sincères remerciements à M. BOUTALBI N., Docteur à l'Université Abderrahmane Mira de Bejaia, pour sa patience, sa disponibilité et son accompagnement tout au long de la réalisation de ce projet.

Nous remercions également chaleureusement les membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail. Qu'ils trouvent ici l'expression de notre reconnaissance la plus sincère.

Enfin, un grand merci à toutes les personnes qui ont, de près ou de loin, contribué à l'aboutissement de ce mémoire.

Dédicaces

Je dédie ce travail :

A ma chère mère pour son amour, son encouragement et ses sacrifices.

A mon cher père pour son soutien son affection et la confiance qu'il m'a accordé.

A mes chères frères, leurs femmes et enfants.

A tous les membres de ma famille, mes grands-mères.

A mon enseignant Amokrane Saïd au début de mon parcours scolaire, la première année du primaire.

A tous mes amis, Anis, Ramy, Massoud, Mazighetc.

Et tous ceux qui m'aiment.

Amazigh

Dédicaces

Je dédie ce travail :

A ma chère mère pour son amour, son encouragement et ses sacrifices.

A mon cher père pour son soutien son affection et la confiance qu'il m'a accordé.

A mes chères frères, leurs femmes et enfants.

A tous les membres de ma famille.

A tous mes amis.

Et tous ceux qui m'aiment.

Ali

Sommaire

Remerciements	i
Dédicaces	ii
dédicace	iii
Liste des figures	viii
Liste des tableaux	ix
NOMENCLATURE	x
Introduction générale.....	1
Généralité sur les lasers	2
I.1. Introduction.....	3
I.2 Définition et importance des traitements thermiques superficiels.....	3
I.2.1 Définition	3
I.2.2 Importance	3
I.3 Applications industrielles et technologiques des traitements thermiques superficiels.	4
I.4. Les sources énergétiques de traitement thermique superficiel.....	5
I.5. Généralité sur les lasers.....	6
I.5.1 Introduction.....	6
I.5.2 Historique	7
I.5.3. Principe de fonctionnement d'un laser	8
I.5.4. Type des lasers	9
I.5.4.1. Laser à gaz	9
I.5.4.2. Laser à solide	9
I.5.4.3. Les lasers à semi-conducteurs.....	9
I.5.4.4. Laser à fibre optique	10
I.5.4.5. Les lasers à colorant.....	10
I.5.4.6. Les lasers à excimères.....	10

I.5.4.7. Laser à atomes froids	10
I.5.5. Mode de fonctionnement des lasers.....	11
I.5.5.1. Fonctionnement continu.....	11
I.5.5.2. Fonctionnement impulsionnel.....	11
I.5.6. Les avantages des lasers	11
I.6. Interaction laser-matière et mécanisme de chauffage superficiel	11
I.7. Traitement thermique superficiel par laser	12
I.7.1 Trempe superficielle au laser.....	12
I.7.2 Fusion superficielle	13
I.7.3. Traitement avec vaporisation	14
I.8. Place et enjeux de traitement thermique superficiel de l'acier	14
I.9.1. Cycle thermique de traitement superficiel en phase solide.....	15
I.9.2. Diagramme fer-C.....	18
I.10. Avantages de l'utilisation du laser mobile pour le traitement thermique	18
I.11 Conclusion	19
Synthèse Bibliographique.....	20
II.1 Introduction	21
II.2 Généralités sur la modélisation et la simulation.....	21
II .3.1 Définition de la modélisation.....	21
II.3.2 Etape de modélisation	21
II.3.3 Les objectifs de la modélisation	22
II.4.1 Définition de la simulation.....	22
II.4.2 Méthodes de simulation	22
II.4.3 Les objectifs de la simulation	22

II.5 Conditions initiales et aux limites	22
II.5.1 Types de conditions aux limites dans les transferts de chaleur	22
II.5.1.1 Condition aux limites de première espèce	23
II.5.1.2 Condition aux limites de deuxième espèce.....	23
II.5.1.3 Condition aux limites de troisième espèce	24
II.6 Logiciels de simulation utilisés.....	24
II.7 Simulations mathématiques de la trempe au laser.....	25
II.7.1 Modèles analytiques	25
II.7.2 Modèles numériques	25
II.8 Les modèles de simulation de traitement thermique d'un acier avec laser mobile en trois niveaux	26
II.8.1 Modèles de base	26
II.8.2 Modèles intermédiaires.....	27
II.8.3 Modèles thermomécaniques et multiphysiques	27
II.9 Conclusion.....	28
Simulation numérique.....	29
III.1 Introduction	30
III.2 Description du modèle.....	30
III.3 Hypothèses simplificatrices.....	30
III.4 Description des modèles de transfert de chaleur et de diffusion adaptés à la simulation du traitement thermique superficiel.....	31
III.4.1 Equation de base	31
III.4.1.1 Équation de la chaleur (conduction thermique)	31
III.4.1.2 Source de chaleur (laser)	31
III.4.2.1 Conditions initiales.....	31
III.4.2.2 Conditions aux limites.....	31
III.4.3 Modèle de diffusion	31
III.5 Description de la méthode des éléments finis	32
III.5.1 Principes fondamentaux.....	32

III.5.2 Étapes de mise en œuvre	32
III.5.3 Applications de la méthode des éléments finis	33
III.6 A propos de Comsol multiphysics	33
III.6.1 Étapes principales de l'utilisation	34
III.6.2 Avantages de COMSOL multiphysics	34
III.6.3 Défis.....	34
III.7.1 La géométrie.....	35
III.7.2 Source de chaleur.....	37
Résultats et discussion.....	
IV.1 Propriétés des matériaux étudiés.....	41
IV.2 Profils des températures superficielles des matériaux étudiés en fonction du temps avec une énergie d'impulsion constante et une vitesse variable.....	42
IV.3 Profils des températures superficielles des matériaux étudiés en fonction du temps avec vitesse constante et une énergie d'impulsion variable.....	43
IV.4 Résultats et Discussions	45
IV.5 Conclusion	46
Conclusion générale	48
Références bibliographiques	50
Résumé	51

Table des figures

Figure I.1 : comprendre l'importance de la résistance à l'usure- Resistance a l usure revêtements bimétalliques lutter contre l'usure.	3
Figure I.2 : matériau idéal résistant a la corrosion.	4
Figure I.3 : Schéma des principales composantes d'un LASER.	6
Figure I.4 : Le premier laser dans l'histoire en 1960.	8
Figure I.5 : Schéma d'une cavité diode laser.	9
Figure I.6 : Fusion superficielle par irradiation laser.	13
Figure I.7 : Cycle de traitement thermique superficiel crée par un laser.	16
Figure I.8 : Evolution des microstructures et des duretés en fonction des températures lors d'un traitement laser.....	17
Figure I.9 : Micrographie optique révélant la zone affectée par la trempe laser ($\times 100$).....	17
Figure I.10 : Micrographie électronique à balayage de la martensite dans les trois zones	17
Figure I.11 : Diagrammes Fe-C pour les aciers et les fontes. En pointillés : diagramme stable Fe-C. En traits pleins : diagramme métastable Fe -Fe ₃ C	18
Figure II.1 : conditions aux limites de type température imposée à la surface.....	23
Figure II.2 : conditions aux limites de type flux imposée.....	23
Figure II.3 : Surface adiabatique.....	24
Figure II.4 : conditions aux limites de type convection à la surface.....	24
Figure III.1 : Modèles physique et mathématique de la Trempe superficielle au laser.	30
Figure III.2 : plaque d'acier.	35
Figure III.3 : maillage de la plaque.	36
Figure III.4 : quelques caractéristiques clés du maillage.	36
Figure IV.1 : déplacement de la source laser mobile sur la plaque d'acier.	39
Figure IV.2 : Distribution de la température tout au long de la plaque.	39
Figure IV.3 : profils des températures superficielles (K) en fonction du temps (s) des matériaux étudiés obtenue à V=100mm/s, V=200mm/s, V=400mm/s, avec une puissance constante Ep=1 Joule sous l'effet thermique de laser mobile	43
Figure IV.4 : profils des températures superficielles (K) en fonction du temps (s) des matériaux étudiés obtenue à V=100mm/s et Ep1=1J, Ep2=150J, Ep3=400J sous l'effet thermique de laser mobile.	44

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Les caractéristiques principales des lasers les plus utilisés dans l'usinage.....	10
Tableau I.2 : Comparaison entre trempe au chalumeau, trempe par induction et trempe au laser	15
Tableau III.1 : Dimensions typiques.	35
Tableau III.2 : Conditions initiales.....	35
Tableau III.3 : Conditions de convection et de rayonnement.....	35
Tableau IV.1 : Propriétés thermiques et mécaniques de l'acier 4340.....	41
Tableau IV.2 : Propriétés thermiques et mécaniques de l'acier sus 403	41
Tableau IV.3 : Propriétés thermiques et mécaniques de l'acier cobalt supermendur.....	42

NOMENCLATURE

Symbole	définitions	Unité (SI)
k	Conductivité thermique	W/(m·K)
h	Coefficient de convection	W/(m ² ·K)
T_{amb}	Températures ambiante	K
T	Températures	K
t	Temps	s
Q	La source de chaleur mobile	J
C_p	La capacité thermique spécifique	J/(K·kg)
V	La vitesse de balayage	m/s
U	Déplacement	m
P_0	La puissance du laser	(W)
I_0	Intensité maximale du laser	(W/m ²)

Symbole Grec	Définition	Unité (SI)
α	La diffusivité thermique	m ² /s
ρ	Masse volumique	kg·m ⁻³
ϵ	Emissivité de la surface	/
β	Le coefficient de dilatation thermique	1/K

Introduction Générale

Introduction Générale

Les lasers, depuis leur invention en 1960, ont révolutionné de nombreux domaines de la science, de la technologie et de la médecine. Leur capacité à produire des faisceaux de lumière cohérente et hautement concentrée a ouvert la voie à une multitude d'applications innovantes, allant de la communication optique à la chirurgie médicale de précision.

Dans ce mémoire, nous explorerons en profondeur les principes fondamentaux des lasers, leurs mécanismes de fonctionnement, ainsi que leurs applications pratiques dans divers domaines. Nous examinerons également les avancées récentes dans la recherche sur les lasers, ainsi que les défis technologiques et les opportunités qui se présentent dans ce domaine en constante évolution.

Tout d'abord, nous aborderons les bases théoriques des lasers, en expliquant les concepts de l'émission stimulée, de l'amplification de la lumière, et de la rétroaction optique, qui sont au cœur du fonctionnement des lasers. Nous décrirons également les différents types de lasers, tels que les lasers à gaz, les lasers à semi-conducteurs, et les lasers à solide, en mettant en lumière leurs caractéristiques distinctives et leurs applications spécifiques.

Ensuite, nous nous pencherons sur les applications pratiques des lasers dans divers domaines. Nous discuterons de leur utilisation en télécommunications pour la transmission de données à haut débit, en imagerie médicale pour le diagnostic et le traitement des maladies, ainsi que dans l'industrie pour la découpe et la soudure de matériaux. Nous explorerons également les avancées récentes dans des domaines émergents tels que la photonique quantique, les lasers à ultra-haute intensité, et les lasers à impulsions ultra-courtes.

Le premier chapitre est une généralité sur les lasers qui contiennent une généralité historique sur les lasers, leur principe de fonctionnement, leurs caractéristiques, leur type et mode de fonctionnement, et leurs applications d'usinage, le traitement thermique et en fin la trempe superficielle.

Le deuxième chapitre on va voir des généralités sur la modélisation et la simulation et leurs principes de fonctionnement, les différents Modèles de simulation, les différents Modèles Mathématiques à la trempe au laser et leurs applications dans le domaine de l'industrie enfin Les modèles de simulation de traitement thermique d'un acier avec laser mobile.

Le troisième chapitre "Simulation de traitement thermique superficiel d'un acier par une source laser mobile" contient description générale sur le modèle, hypothèses simplificatrice, l'équation de base, les conditions initiales et aux limites, et enfin la résolution du modèle par la méthode des éléments finis sous le logiciel Comsol Multiphysics.

Chapitre I

Généralités sur les lasers

Généralités sur les lasers

I.1. Introduction :

Les traitements thermiques superficiels constituent une catégorie primordiale de techniques utilisées dans l'industrie pour améliorer les caractéristiques des surfaces des matériaux. Ils consistent à appliquer de manière contrôlée de la chaleur sur la couche extérieure d'un matériau, sans altérer de manière significative son noyau ou sa masse. L'objectif principal de ces traitements est d'optimiser les propriétés mécaniques, chimiques et physiques de la surface afin d'augmenter la durabilité, la résistance à l'usure, la résistance à la corrosion et d'autres caractéristiques importantes pour une variété d'applications industrielles.

I.2 Définition et importance des traitements thermiques superficiels

I.2.1 Définition :

Les traitements thermiques de surface impliquent l'application ciblée de chaleur sur la surface d'un matériau à l'aide de différentes techniques telles que le chauffage par induction, le traitement au laser, la cémentation, la nitruration ou la trempe. L'objectif de ces méthodes est de transformer la microstructure et la composition chimique de la surface du matériau afin d'en améliorer les propriétés mécaniques et de renforcer sa résistance face à diverses conditions environnementales.

I.2.2 Importance :

- **Amélioration de la résistance à l'usure :** Les traitements thermiques de surface ont la capacité d'augmenter la dureté et la résistance à l'usure des surfaces des pièces, les rendant ainsi particulièrement appropriées pour des applications où la friction, l'abrasion ou le frottement sont des préoccupations majeures. Schématisé dans la figure I.1 [1].



Figure I.1 : comprendre l'importance de la résistance à l'usure- Résistance à l'usure revêtements bimétalliques lutter contre l'usure [1].

- **Augmentation de la résistance à la corrosion** : Certains procédés de traitement thermique de surface, tels que la nitruration et la cémentation, permettent de former des couches de surface qui présentent une résistance accrue à la corrosion. Cela contribue à prolonger la durée de vie des pièces exposées à des environnements corrosifs. Schématisé dans la figure I.2.

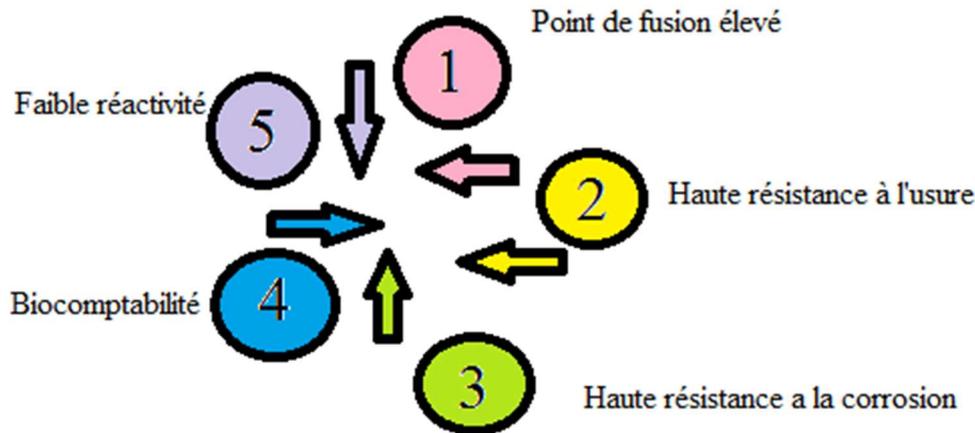


Figure I.2 : matériau idéal résistant à la corrosion.

- **Renforcement de la résistance à la fatigue** : En altérant la microstructure de la surface, les traitements thermiques de surface peuvent améliorer la résistance à la fatigue des pièces, réduisant ainsi les risques de défaillance prématurée sous contrainte cyclique.
- **Modification des propriétés tribologiques** : Les traitements thermiques de surface ont également la capacité de modifier les propriétés tribologiques des surfaces, telles que leur coefficient de frottement et leur capacité de lubrification. Cette modification peut être essentielle dans des applications où le glissement et la friction sont fréquents.
- **Adaptabilité aux besoins spécifiques** : Les traitements thermiques de surface offrent une flexibilité considérable en termes de contrôle des profondeurs de pénétration et des propriétés finales des surfaces traitées. Cette adaptabilité les rend appropriés pour une grande variété d'applications industrielles.

I.3 Applications industrielles et technologiques des traitements thermiques superficiels :

Les traitements thermiques superficiels sont largement exploités dans divers domaines industriels et technologiques pour leurs capacités à améliorer les propriétés des surfaces des matériaux. Voici quelques-unes des principales utilisations industrielles et technologiques de ces traitements :

- **Industrie automobile** : Ces traitements sont fréquemment employés pour renforcer la résistance à l'usure et à la fatigue des pièces cruciales de l'automobile, comme les arbres de transmission, les engrenages et les roulements. Ce renforcement augmente la longévité et la fiabilité des véhicules, et donc, réduit les coûts de maintenance.

- **Industrie aérospatiale** : Dans ce secteur, les traitements thermiques de surface sont appliqués afin d'améliorer les performances des composants soumis à des conditions extrêmes telles que les températures élevées, les charges mécaniques importantes et les environnements corrosifs. Par exemple, les aubes de turbines et les pièces de structure sont souvent traitées thermiquement pour améliorer leur résistance à la fatigue et à la corrosion.
- **Industrie de l'énergie** : Les traitements thermiques superficiels sont utilisés pour prolonger la durée de vie et augmenter les performances des composants des centrales électriques, des turbines à gaz, des éoliennes et des équipements de forage pétrolier et gazier. Ces traitements permettent de minimiser les temps d'arrêt, d'optimiser l'efficacité opérationnelle et de réduire les coûts de maintenance.
- **Industrie métallurgique** : Ils sont largement employés dans la fabrication et le traitement des métaux pour améliorer leurs propriétés mécaniques et leur résistance à l'usure. La cémentation et la nitruration sont couramment utilisées pour durcir la surface des pièces métalliques comme les engrenages, les arbres et les outils de coupe.
- **Fabrication de moules et d'outillages** : Les traitements thermiques de surface sont indispensables dans la fabrication de moules et d'outillages pour l'industrie manufacturière. Ils améliorent la résistance à l'usure, la dureté et la durabilité des surfaces de travail des moules et des outils, ce qui prolonge leur durée de vie et maintient la qualité des produits fabriqués.

Les traitements thermiques superficiels sont essentiels dans de nombreux secteurs industriels et technologiques en améliorant les performances, la durabilité et la fiabilité des composants et des équipements. Ils contribuent à accroître l'efficacité opérationnelle, à réduire les coûts de maintenance et à garantir la qualité des produits fabriqués.

I.4. Les sources énergétiques de traitement thermique superficiel :

Pour le traitement thermique superficiel, une variété de sources énergétiques classiques et nouvelles sont utilisées :

Sources énergétiques classiques : tel que les fours à résistance électrique, à induction électromagnétique, Rayonnement infrarouge..., qui présentent deux inconvénients remarquables :

- Temps de chauffage prolongé.
- Distribution non uniforme de la chaleur.

Les inconvénients peuvent être minimisés grâce à l'emploi de techniques de contrôle avancées et de conceptions de fours améliorées, mais ils demeurent des aspects essentiels lorsqu'on utilise des sources énergétiques traditionnelles pour le traitement thermique.

Sources énergétiques nouvelles ou émergentes : tel que lasers, Plasma thermique, Micro-ondes..., grâce à leur puissance extrême et à leurs localisations énergétiques, elles offrent une solution à ces deux inconvénients. Elles permettent d'obtenir des structures originales et nouvelles, qui sont difficiles ou impossibles à obtenir par d'autres méthodes.

Dans ce contexte on peut distinguer deux types de traitement de matière par faisceau laser :

- Traitement de matière surfacique.
- Traitement de matière volumique.

Notre domaine d'étude se concentre sur le traitement de matière surfacique, où le laser a bouleversé l'industrie et a pris le pas sur les autres sources traditionnelles.

I.5. Généralité sur les lasers :

I.5.1 Introduction :

Le terme "LASER" évoque souvent une image de lumière brillante et concentrée, mais son origine et son utilisation vont bien au-delà de cette simple définition. Laser, qui est un acronyme pour "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation" (Amplification de Lumière par Émission Stimulée de Rayonnement), représente une technologie révolutionnaire dans le domaine de l'optique et de la photonique. Son développement, initié dans les années 1960 par Theodore Maiman, a ouvert une ère de découvertes et d'innovations qui ont eu un impact considérable dans de nombreux domaines scientifiques et industriels. Schématisé dans la figure I.3.

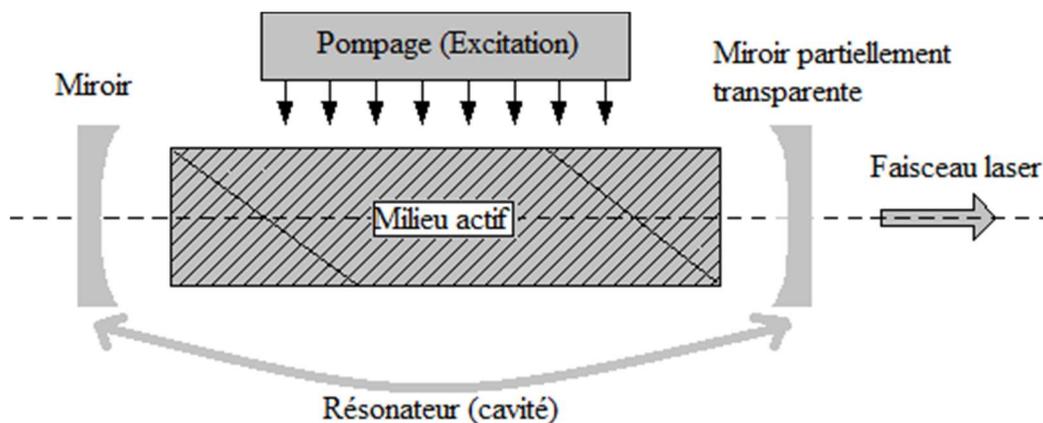


Figure I.3 : Schéma des principales composantes d'un LASER.

Un système laser comporte quatre principales composantes :

- **Le milieu actif du laser** : est constitué des atomes que l'on va exciter (ou pomper). Ce matériau peut être sous forme solide, liquide ou gazeuse.
- **Une source d'excitation** : elle est utilisée pour stimuler les atomes du matériau actif en leur fournissant de l'énergie. Cette source peut être de nature électrique ou lumineuse (par exemple, un autre laser).
- **Un miroir réfléchissant** : il renvoie tous les photons incidents.
- **Un miroir semi-transparent** : il permet à entre 1% et 10% des photons incidents de passer à travers et réfléchit le reste du rayonnement.

I.5.2 Historique :

Les lasers, qui tirent leur nom de "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation" (amplification de la lumière par émission stimulée de rayonnement), ont été inventés en 1960 par Theodore Maiman, marquant ainsi le début d'une ère révolutionnaire dans le domaine de l'optique et de la photonique.

Pourtant, les bases théoriques des lasers remontent à plusieurs décennies avant leur invention pratique. Les travaux d'Albert Einstein au début du 20^e siècle ont jeté les fondements de la théorie des lasers, introduisant notamment le concept d'émission stimulée, processus par lequel les photons peuvent être émis de manière contrôlée et amplifiée.

Les années 1950 ont vu les premiers développements significatifs menant à la création du laser. En 1954, Charles Townes et ses collègues ont proposé le concept du maser (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation), utilisant des micro-ondes plutôt que de la lumière visible. Ces travaux ont ouvert la voie à la réalisation pratique du laser quelques années plus tard.

L'invention du premier laser par Theodore Maiman a marqué un tournant majeur dans l'histoire de la science et de la technologie. Basé sur le principe d'émission stimulée dans un milieu actif, ce premier laser, construit à partir d'un cristal de rubis, a généré un faisceau de lumière cohérente et concentrée, ouvrant la voie à une multitude d'applications potentielles.

Depuis lors, les lasers ont connu un développement spectaculaire dans de nombreux domaines. Leur utilisation s'est étendue à des applications aussi diverses que la communication optique, la médecine, l'industrie, la recherche scientifique et bien d'autres encore. Les progrès technologiques ont permis de diversifier les types de lasers, allant des lasers à gaz aux lasers à semi-conducteurs, et de développer des systèmes laser de plus en plus puissants et sophistiqués.

Aujourd'hui, les lasers jouent un rôle essentiel dans la société moderne, tant sur le plan scientifique que pratique. Leur capacité à générer des faisceaux de lumière cohérente et hautement directive a révolutionné de nombreux domaines, ouvrant la voie à des avancées remarquables dans la technologie, la médecine, les communications, et bien d'autres encore.



Figure I.4 : Le premier laser dans l’histoire en 1960.

Il est intéressant de souligner que tous les éléments requis pour fabriquer un laser He-Ne étaient déjà disponibles à la fin du XVIIIe siècle, mais la théorie était absente.

XVIIe siècle : pompe à vide, génération d'énergie électrique.

L'hélium a été découvert par l'astronome français Jules Janssen en 1868.

Le premier résonateur optique (interféromètre de Fabry et Pérot) a été développé en 1890.

Recherche du néon par W.Ransay et W.Travers en 1898.

1917 : L'émission stimulée par Einstein est proposée.

I.5.3. Principe de fonctionnement d'un laser :

Un système laser comporte trois principales composantes qui sont les suivantes : un milieu actif, un mécanisme de pompage et un résonateur optique.

L'inversion de population favorise le processus d'émission stimulée. De cette manière, un photon se propageant dans le milieu actif a plus de chance de provoquer la désexcitation d'un atome excité que de se faire absorber par un atome au niveau inférieur. Il y a alors plus de photons produits par émission stimulée que de photons perdus dans différents processus d'absorption. Une réaction en chaîne peut alors se produire, entraînant une multiplication des photons dans le milieu actif. L'inversion de population contribue ainsi à l'amplification de la lumière dans le laser. Cependant, ce processus n'est pas suffisant pour produire à lui seul un faisceau laser. C'est pourquoi le milieu actif est placé dans un résonateur optique, qui peut aussi être appelé cavité résonante. Le résonateur est constitué de deux miroirs parallèles entre lesquels est placé le milieu actif. Le premier miroir, le réflecteur, est totalement réfléchissant alors que le second, le coupleur, est semi-transparent. Il permet ainsi à la lumière de sortir de la cavité. Le résonateur contribue en grande partie à l'amplification de la lumière dans le laser. Les photons, en étant réfléchis par les miroirs, peuvent traverser plusieurs fois le milieu actif et provoquer l'émission stimulée d'un plus grand nombre de photons. Lorsque le processus d'amplification se produit dans le laser, on dit qu'il oscille, [2].

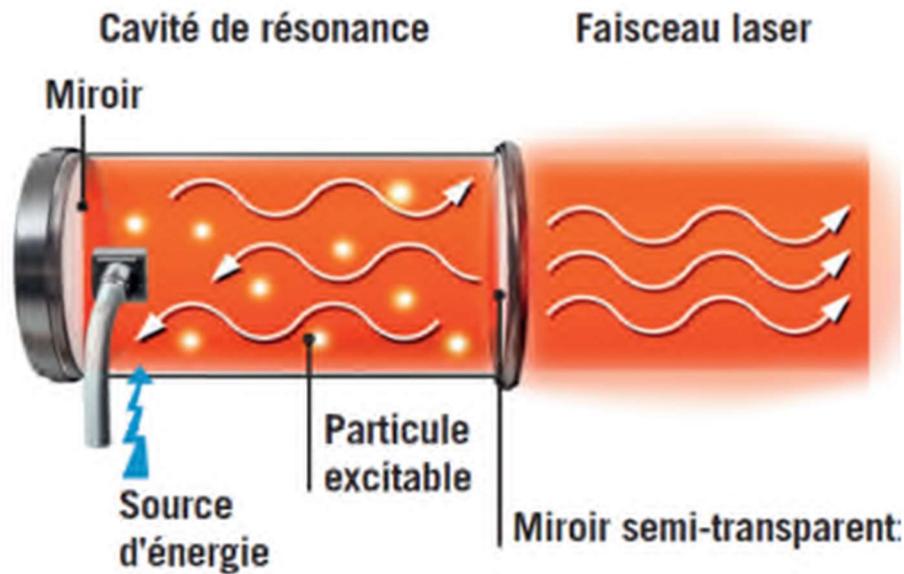


Figure I.5 : Schéma d'une cavité diode laser [2].

I.5.4. Type des lasers :

Différents types de lasers existent, chacun possédant des caractéristiques distinctes et adaptées à des applications particulières. Voici quelques-uns des types les plus fréquents de lasers :

I.5.4.1. Laser à gaz :

Les lasers à gaz font appel à un mélange de gaz en tant qu'environnement amplificateur. Une population inversée est créée par l'excitation du gaz, ce qui permet l'émission de lumière laser. Par exemple, on peut citer le laser à gaz carbonique (CO_2), le laser à hélium-néon (He-Ne), le laser à argon.

I.5.4.2. Laser à solide :

Ces lasers font appel à un matériau solide en tant que milieu amplificateur, habituellement un cristal ou un verre soumis à des ions. Les lasers à solide proposent une puissance de sortie élevée et une stabilité remarquable. Par exemple, le laser Nd:YAG et le laser à rubis.

I.5.4.3. Les lasers à semi-conducteurs :

Se basent sur une jonction p-n de semi-conducteurs afin de générer une population inversée. Ils offrent une taille compacte, une efficacité accrue et peuvent être employés dans divers domaines, tels que les télécommunications et les lecteurs de disques optiques. Parmi les exemples, on peut citer le laser à diode et le laser à semi-conducteur à cavité verticale émettant par la surface (VCSEL).

I.5.4.4. Laser à fibre optique :

Ces lasers font appel à une fibre optique dopée en tant qu'élément amplificateur. Ils proposent une efficacité élevée, une stabilité remarquable et une qualité de faisceau exceptionnelle. On utilise fréquemment les lasers à fibre optique dans les domaines des télécommunications, de la chirurgie et de la télédétection. On peut citer les lasers à fibre dopée à l'erbium (Er) et au ytterbium (Yb).

I.5.4.5. Les lasers à colorant :

Font appel à un colorant organique en tant que milieu amplificateur. Ils ont la capacité de générer une variété de longueurs d'onde et sont fréquemment employés dans le domaine de la recherche scientifique et médicale.

I.5.4.6. Les lasers à excimères :

Ces lasers utilisent des molécules excitées afin de générer des émissions laser dans des zones ultraviolettes éloignées. Ils sont employés pour des utilisations comme la chirurgie oculaire et la lithographie afin de produire des semi-conducteurs.

I.5.4.7. Laser à atomes froids :

Ces lasers employant des atomes refroidis à des températures proches du zéro absolu afin d'obtenir une émission laser très précise et cohérente. Ces instruments sont employés dans les études de base en physique atomique et en métrologie.

Chaque type de laser a ses propres caractéristiques en termes de longueur d'onde, de puissance de sortie, de stabilité, de coût et d'applications appropriées présenté dans le tableau I.1.

Caractéristiques	Lasers		
	CO ₂	Nd ⁺³ -YAG	Excimères
Longueur d'onde (µm)	10,6 IR lointain	1,06 proche IR	0,193 à 0,351 proche UV
Nature de milieu actif	gaz : CO ₂	solide : Nd-YAG	gaz : dimères
Mode de fonctionnement	Continu (impulsionnel)	pulsé (impulsionnel)	Impulsionnel
Puissance moyenne (W)	100 à 25 000	10 à 1 200	30 à 750

Tableau I.1 : Les caractéristiques principales des lasers les plus utilisés dans l'usinage [3].

La diversité des lasers permet de répondre à une large gamme de besoins dans des nombreux domaines scientifiques, industriels et médicaux.

I.5.5. Mode de fonctionnement des lasers :

Le laser peut fonctionner en continu ou en impulsionnel.

I.5.5.1. Fonctionnement continu :

Dans un laser en continu le milieu amplificateur est constamment alimenté par l'énergie, généralement sous forme de courant électrique ou de lumière, pour maintenir la population inversée nécessaire à la production du faisceau laser.

Le laser de cette catégorie génère un faisceau lumineux constant et stable tant que l'énergie est continue. Il est employé dans divers domaines tels que la découpe et le soudage industriels, le traitement médical et les applications de mesure et d'alignement de grande précision.

I.5.5.2. Fonctionnement impulsionnel :

En ce qui concerne le mode impulsionnel, l'énergie est fournie par une seule ou plusieurs impulsions récurrentes. En raison de la courte durée d'une impulsion (10^{-9} s), la puissance crête est extrêmement élevée (1MW) même si l'énergie totale délivrée est très faible (10^{-3} J).

Chaque impulsion entraîne une augmentation rapide de la population inversée et l'émission stimulée, ce qui entraîne un pic d'émission laser. Une fois que chaque impulsion est donnée, le milieu amplificateur a besoin d'un moment pour se détendre avant de recevoir la prochaine.

Ce fonctionnement est employé lorsque des impulsions de grande puissance et de courte durée sont requises, telles que dans la recherche scientifique, la chirurgie au laser, la télédétection et les communications optiques à haut débit.

I.5.6. Les avantages des lasers :

- Les lasers sont utilisés dans divers domaines, tels que la médecine, l'industrie, la communication et la recherche scientifique.
- particulièrement précis.
- Rapidité de traitement.
- Il n'y a pas de contact mécanique entre la surface et l'outil.
- Durcissement sélectif et minimisation de la déformation.
- activation immédiate et à la demande de la source laser.

I.6. Interaction laser-matière et mécanisme de chauffage superficiel :

En général, l'interaction entre le laser et la matière se traduit par un transfert d'énergie du faisceau laser vers le matériau visé. Quand le laser est dirigé vers la surface d'un matériau, différents processus peuvent se produire, dont le principal est l'absorption de l'énergie lumineuse par le matériau, ce qui provoque son chauffage. Plusieurs éléments influencent le processus de chauffage superficiel, tels que les caractéristiques du matériau et les paramètres du laser, tels que la longueur d'onde, la puissance et la durée de l'impulsion.

Voici une vue d'ensemble des processus de chauffage superficiel liés à l'interaction entre le laser et la matière :

- Absorption sélective : En raison de leurs propriétés optiques, certains matériaux absorbent sélectivement certaines longueurs d'onde du faisceau laser. À titre d'exemple, les métaux sont habituellement très réfractaires aux longueurs d'onde visibles, mais absorbent parfaitement les longueurs d'onde dans l'infrarouge proche. Lorsque la longueur d'onde du laser est ajustée pour correspondre à celle absorbée par le matériau, l'énergie lumineuse est transformée en chaleur, ce qui provoque un chauffage localisé de la surface du matériau.
- Conduction thermique : Une fois que la surface du matériau absorbe l'énergie du laser, la chaleur se propage dans le matériau grâce à la conduction thermique. Ce transfert de chaleur a lieu lorsque les molécules du matériau se déplacent et transmettent leur énergie cinétique aux molécules voisines. Les caractéristiques thermiques du matériau, comme sa conductivité thermique et sa capacité thermique spécifique, influencent la vitesse et l'efficacité de la conduction thermique.
- Les effets non linéaires : peuvent se produire à des intensités laser élevées, comme l'ionisation et la formation de plasma. Les conséquences de ces effets peuvent accroître la température de surface du matériau et provoquer des interactions plus complexes, comme l'ablation et la fusion.
- Les effets de phase : peuvent être observés chez certains matériaux lorsqu'ils sont chauffés par le laser, passant de solide à liquide ou à gazeux. Il est possible que ces transitions de phase aient des conséquences significatives dans différents processus industriels, comme la soudure laser, le traitement de surface et la fabrication additive.

Le processus de chauffage superficiel lors de l'interaction entre le laser et la matière est influencé par différents éléments, tels que les caractéristiques du matériau cible et les paramètres du laser. Il est crucial d'avoir une compréhension de ces mécanismes afin de concevoir et de contrôler de manière efficace les processus impliquant l'interaction laser avec la matière dans différentes industries.

I.7. Traitement thermique superficiel par laser :

I.7.1 Trempe superficielle au laser :

L'irradiation d'un laser de puissance en vue d'un durcissement par transformation structurale, sans atteindre la fusion, a pour objet d'obtenir une couche superficielle de dureté élevée tout en conservant au cœur de la pièce une bonne ténacité. La trempe superficielle d'aciers martensitiques faiblement ou non alliés vise à améliorer leurs propriétés mécaniques de surface, ainsi que leur comportement tribologique (dureté, résistance à l'usure). Les vitesses de refroidissement élevées (plusieurs centaines de degrés par seconde) ont été atteintes et assurent un phénomène d'auto trempe de la zone superficielle par la masse du substrat restée froide. Ceci est efficace pour les aciers qui ont une concentration en carbone suffisante pour promouvoir une transformation martensitique, pour les fontes afin de former une structure perlitique. Cette structure dépend de la vitesse de refroidissement et du diagramme de phases

mais généralement, pour ce système, la dureté est augmentée et la résistance à l'usure est améliorée. Cette technique est très utilisée sur des surfaces métalliques pour lesquelles les propriétés métallurgiques et mécaniques peuvent être améliorées, notamment la résistance à l'usure et la tenue à la fatigue sous sollicitations cycliques. Cela confère à des matériaux métalliques un intérêt commercial dans l'emploi des lasers pour le durcissement par transformation structurale.

Le premier champ d'application concerne la construction automobile. En 1975, General Motors utilisa la trempe par irradiation laser pour durcir certains éléments fonte de boîte de direction, Fiat pour les traitements des blocs à cylindres et Nissan pour les traitements des éléments de transmission, afin d'améliorer la résistance à l'usure, obtenir un meilleur refroidissement des cylindres et, en conséquence, développer les moteurs plus compacts.

I.7.2 Fusion superficielle :

Le traitement thermique avec fusion superficielle est un procédé visant à améliorer les propriétés de surface (propriétés mécaniques, tenue à la corrosion,...) par une modification de la structure cristalline du matériau sans changement chimique.

Un gaz inerte, l'argon le plus souvent, est insufflé sur le bain de fusion, de manière à assurer une couverture empêchant l'oxydation au contact de l'air (figure I.6).

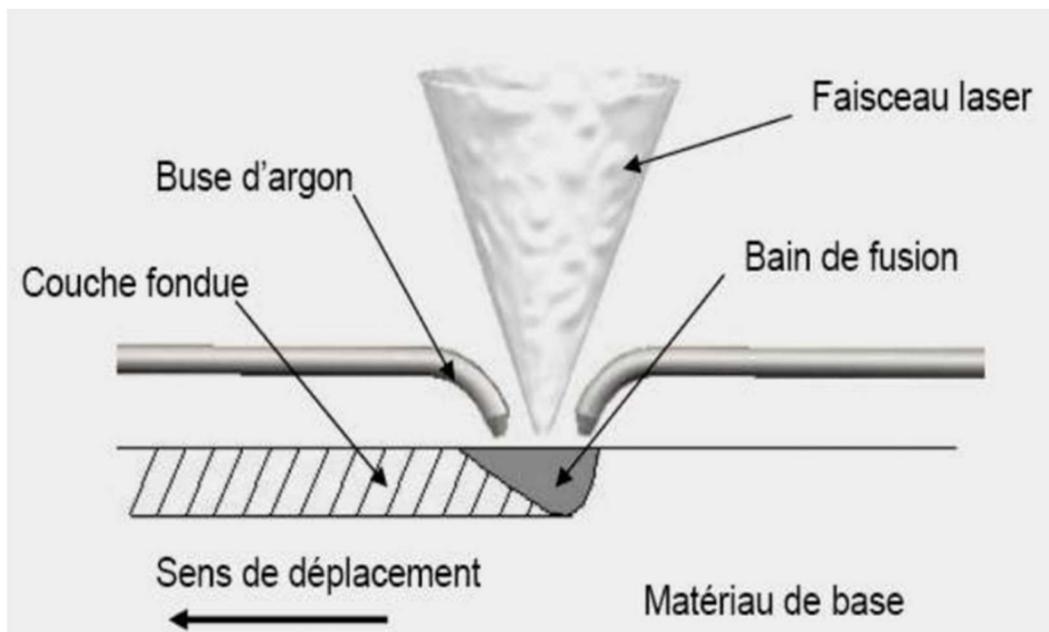


Figure I.6 : Fusion superficielle par irradiation laser

On peut par ce procédé modifier la nature des phases initiales (apparition de phases métastables), la taille des grains, leur morphologie (structure cellulaire ou dendritique) et leur distribution. Dans certains cas, on peut obtenir une amorphisation de la surface se traduisant par une nette amélioration des propriétés mécaniques et de la tenue à la corrosion. Des travaux effectués en Allemagne en industrie automobile ont conduit à la réalisation d'une

machine de traitement superficiel d'arbres à cames. Ainsi, la refusions par irradiation laser est mise en œuvre chez Volkswagen depuis 1993.

I.7.3. Traitement avec vaporisation :

On utilise dans ce cas des lasers pulsés (CO₂, Nd-YAG, Excimère) qui délivrent une densité de puissance très élevée (de 10⁶ à 10¹¹ W/cm²) durant des impulsions de courte durée (10⁻⁸ à 10⁻⁶ secondes). Ces impulsions répétées entraînent une vaporisation rapide de la surface [4]. Les vapeurs métalliques s'ionisent entraînant la formation d'un plasma dont la durée de vie est de quelques millisecondes. Aux effets thermiques, sont associés des effets mécaniques dus aux ondes de choc générées durant l'expansion du plasma, lesquelles interagissent avec la surface, ou des effets explosifs se produisent du fait de l'absorption très importante d'énergie sur un temps très bref. Les applications concernent le nettoyage (élimination de graisses ou de salissures divers) ou la découpe des surfaces (peinture, revêtement, oxydes,...) ainsi que la modification de l'état des surfaces (texture des surfaces, marquage dans les industries de la microélectronique, ou de l'automobile) sans altérer les propriétés du matériau en profondeur.

I.8. Place et enjeux de traitement thermique superficiel de l'acier :

De tous les alliages métalliques, les aciers sont parmi ceux les plus couramment employés dans les applications industrielles. Le domaine de traitement thermique superficiel des aciers, économiquement important pour les industries mécaniques moderne, la plus large place revient au durcissement superficiel par trempe après chauffage par laser.

L'essor de ce procédé est lié à ses avantages techniques et économiques :

- Permet des localisations énergétiques plus précises encore que l'induction.
- Disponibilité (délai de mise en œuvre) et souplesse de la source.
- Cycles rapides et non polluants autorisant le traitement en chaîne de fabrication.
- Qualité des pièces traitées en ce qui concerne la reproductibilité du durcissement, les risques de déformations, la facilité de mise en compression naturelle des surfaces, la faible épaisseur affectée par l'oxydation de celles-ci.

Trempe au chalumeau	Trempe par induction	Trempe au laser
pièce de moyenne à grande taille, avec géométries complexes	pièces de petite à grande taille	pièces de petite à grande taille, avec géométries complexes
Grande profondeur trempe, précision limitée	Grande profondeur de trempe, zone trempée précise	zone trempée très précise, très faibles déformations, profondeur de trempe limitée
installation spéciales innovantes	parc machines innovant et dans l'état actuel de la technique (CNC, surveillance du processus)	installation universelle CNC avec déplacement en 3D et réglage du processus
	fiabilité du processus et reproductibilité élevées	fiabilité du processus et reproductibilité élevées

Tableau I.2 : Comparaison entre trempe au chalumeau, trempe par induction et trempe au laser [4].

I.9.1. Cycle thermique de traitement superficiel en phase solide :

Le mécanisme de traitement superficiels en phase solide par laser (transformation structurale) repose sur l'échauffement intense de la surface étudiée généralement pour les matériaux ferreux a une température T supérieur à la température de transformation structurale du matériau traité et légèrement inférieure à sa température de fusion. Seule une mince couche de surface du substrat est rapidement chauffé dans le champ de phase austénitique, le refroidissement de la zone traitée se fait par conduction thermique vers le cœur de la pièce (auto-trempe) voir le cycle thermique sur la figure I .6. Il en résulte la formation de martensite avec des grains d'austénite extrêmement fins et la zone traitée devient très résistante.

Ce type de traitement peut être caractérisé par six paramètres principaux : L'intensité énergétique du faisceau : elle a une influence sur le profil de température ainsi que sur la profondeur de pénétration. Le temps d'interaction τ : c'est le temps duquel un élément de surface atteint les transformations structurales. Le gradient thermique : le principe même du traitement veut que la température maximale atteinte soit ou voisinage de la température de fusion (traitement en phase solide). Vitesse d'échauffement V_c et Vitesse de refroidissement V_r et enfin La surface irradiée

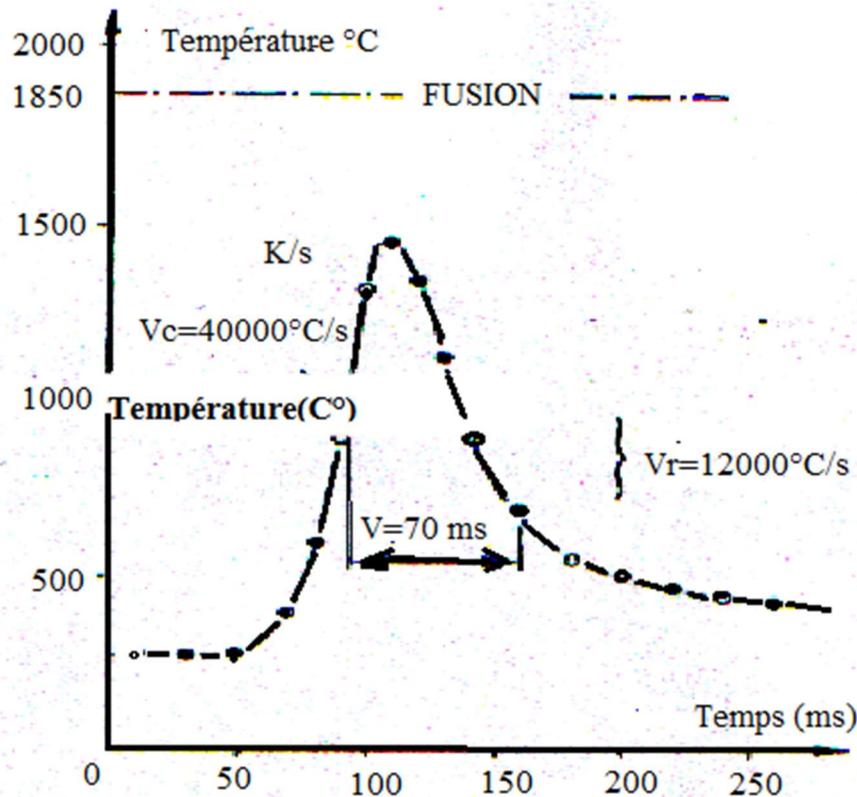


Figure I.7 : Cycle de traitement thermique superficiel créé par un laser [5].

Il est cependant utile de noter que la microstructure d'une pièce obtenue par une trempe après un chauffage laser pourrait être assez différente d'une autre obtenue par une trempe traditionnelle ; ce n'est pas simplement un problème du temps de l'austénitisation court mais aussi le fait qu'en chauffant de façon rapide, les températures de la transformation sont déplacées efficacement aux plus hautes températures. Les figures suivantes I.7 -I.9 montrent l'évolution des microstructures, les différentes micrographies de la zone traitée.

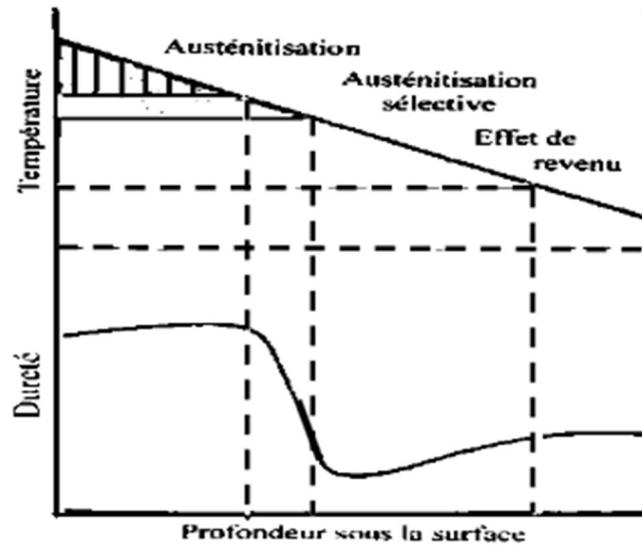


Figure I.8 : Evolution des microstructures et des duretés en fonction des températures lors d'un traitement laser [5].

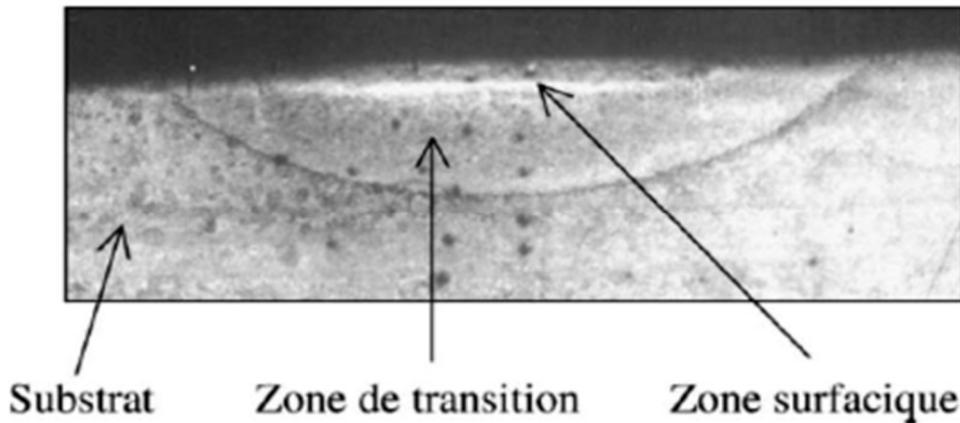


Figure I.9 : Micrographie optique révélant la zone affectée par la trempe laser ($\times 100$) [5].

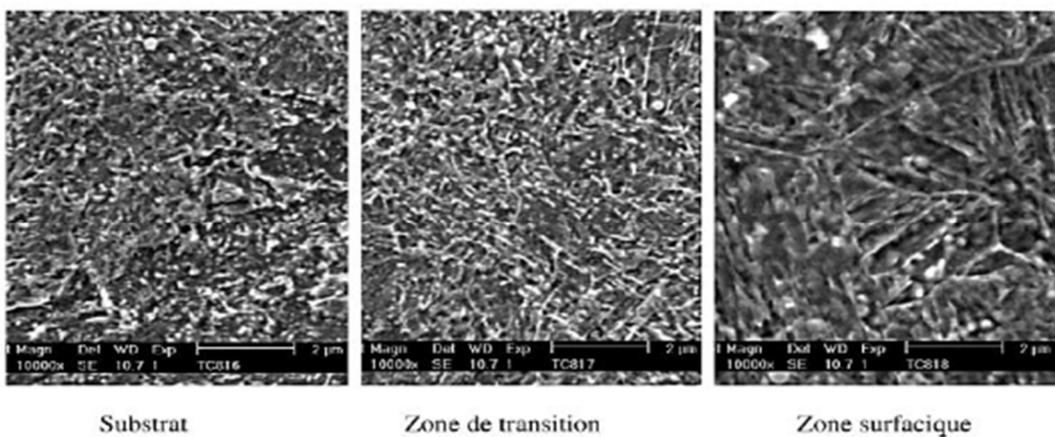


Figure I.10 : Micrographie électronique à balayage de la martensite dans les trois zones ($\times 10000$) [5].

I.9.2. Diagramme fer-C :

➤ **Diagramme stable- diagramme métastable :**

L'étude dans les conditions d'équilibre des alliages Fe-C, montre qu'ils subissent deux types d'évolution :

- La première produit une phase riche en carbone de formule Fe_3C appelé carbone de fer ou cémentite. Le diagramme correspondant est dit métastable ou à cémentite.
- La deuxième forme une phase riche en carbone qui reste à l'état de graphite pur Cgr, qui a une miscibilité nulle avec le fer. Le diagramme correspondant est dit stable ou à graphite. Son obtention exige la décomposition du carbone Fe_3C en refroidissant avec une vitesse très lente et en ajoutant un catalyseur à grande pouvoir de graphitisation tel que le silicium [6] .

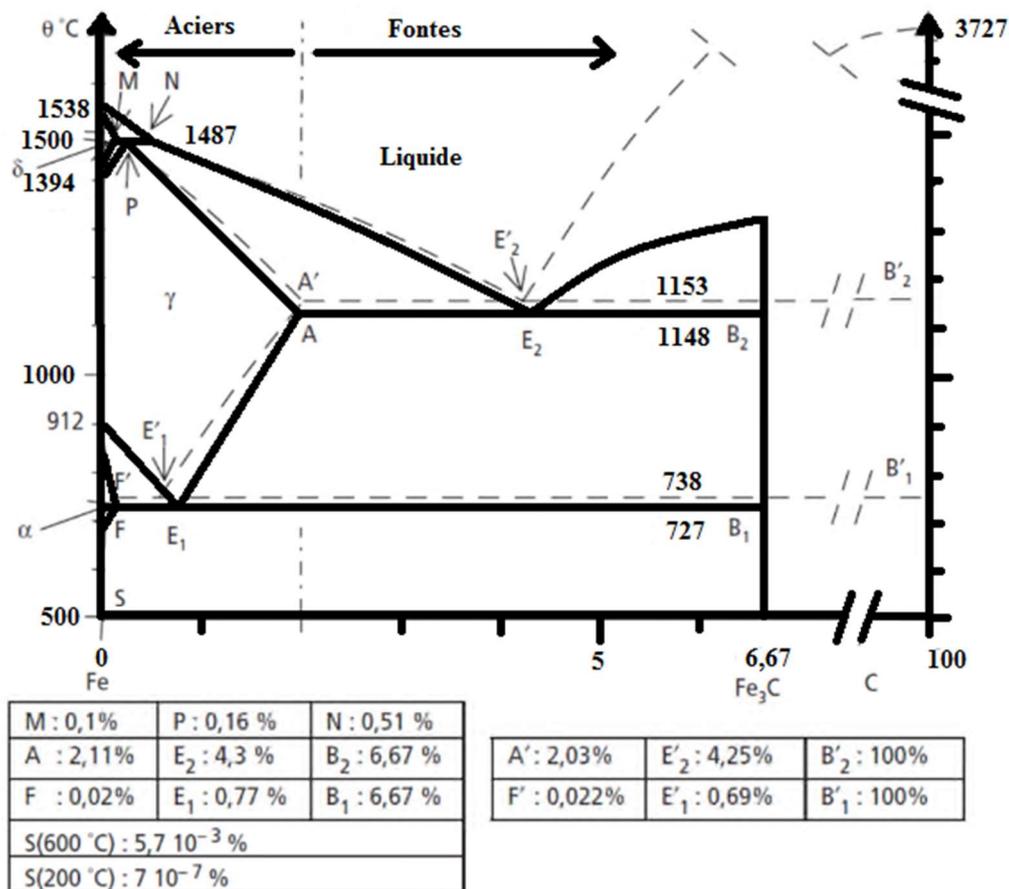


Figure I.11 : Diagrammes Fe-C pour les aciers et les fontes. En pointillés : diagramme stable Fe-C. En traits pleins : diagramme métastable Fe-Fe₃C, [7].

I.10. Avantages de l'utilisation du laser mobile pour le traitement thermique :

- Concentration de l'énergie et contrôle de la température.
- Flexibilité et mobilité.
- Efficacité et rapidité.

- Résultats uniformes et Moins de contraintes résiduelles.
- Moins de contamination et Réduction des risques.

I.11 Conclusion :

Les matériaux jouent un rôle essentiel dans le traitement thermique superficiel par laser. Dans notre premier chapitre, nous avons brièvement exposé quelques informations générales sur les lasers et leurs applications. Parmi les différentes méthodes de traitement thermique superficiel, il est possible de bombarder la surface de la matière avec une densité élevée, ce qui entraîne une augmentation significative de la température en un instant, suivie d'un refroidissement rapide qui nous permet de traiter la surface sans atteindre l'intérieur de la pièce.

Chapitre II

Synthèse Bibliographique

Synthèse Bibliographique

II.1 Introduction :

Les techniques de modélisation et de simulation jouent un rôle essentiel dans de nombreux secteurs scientifiques et industriels. Ils offrent la possibilité de visualiser, étudier et anticiper le comportement de systèmes complexes sans avoir recours à des expériences coûteuses et parfois impossibles à réaliser.

II.2 Généralités sur la modélisation et la simulation :

La création de modèles et leur simulation sont utiles pour tester des conditions qui pourraient être difficiles à reproduire avec des prototypes matériels seuls, en particulier au début du processus de conception, lorsque le matériel peut ne pas être disponible. La modélisation et la simulation peuvent améliorer la qualité de la conception du système dès le début, réduisant ainsi le nombre d'erreurs détectées plus tard dans le processus de conception. Cela conduit à une réduction significative du temps et du coût de développement [7].

II .3.1 Définition de la modélisation:

La modélisation est le processus de création d'une représentation abstraite ou simplifiée d'un système réel, en utilisant des outils adaptés à son objectif, tels que les mathématiques, la géométrie ou des approches mécanistes. Elle s'appuie sur des données empiriques, souvent collectées in situ, pour paramétrer et calibrer les modèles, permettant de capturer les comportements du système et d'intégrer des facteurs d'influence pour améliorer la précision, [8].

II.3.2 Etape de modélisation :

- L'objectif de la modélisation est défini.
- Le recensement des informations (données externes, données expérimentales) est effectué.
- Un modèle est créé (spécifications, élaboration en fonction des axiomes et des hypothèses).
- Les paramètres du modèle sont identifiés.
- La vérification se fait en confrontant le modèle à la réalité.
- Les conclusions sont tirées.

II.3.3 Les objectifs de la modélisation :

- Résumer les données pour les décrire.
- Prédire (simuler), c'est-à-dire faire des prédictions.
- Expliciter (comprendre) signifie avoir des objectifs mécanistiques.

II.4.1 Définition de la simulation :

La simulation de procédé trempe au laser est de plus en plus utilisée par les industrielles pour développer des recettes d'application. Malgré l'investissement initial important, la modélisation et la simulation d'un procédé permettent par la suite de guider la sélection de paramètres d'opération, réduire les manipulations en laboratoire et diminuer les spécimens tests [9].

II.4.2 Méthodes de simulation :

- Analyses numériques des équations différentielles selon les méthodes de Runge-Kutta.
- L'utilisation de la méthode des éléments finis ou de la méthode des caractéristiques pour traiter les équations aux dérivées partielles est recommandée.
- Simulation atomistique en physique des matériaux.
- Techniques de Monte-Carlo en physique statistique, physique des matériaux, physique nucléaire, physique des particules, mathématiques, statistiques et économétrie.

II.4.3 Les objectifs de la simulation :

- Pour compléter les informations, il est nécessaire de connaître les valeurs intermédiaires (interpolation) ou une valeur qui ne fait pas partie de l'intervalle observé (extrapolation).
- Les résultats obtenus dépendront de l'exactitude et de la précision du modèle choisi.
- La pratique de faire des inférences consiste à anticiper le comportement du système primaire lorsqu'on change les paramètres de structure du modèle ou son entrée.

II.5 Conditions initiales et aux limites :

Ces conditions dépendent évidemment du problème étudié. Elles traduisent le lien entre le milieu étudié et le milieu extérieur. Comme l'équation de la chaleur est de premier ordre en temps et de second ordre en espace, on rappelle que deux conditions aux limites dans chaque direction et une condition temporelle (condition initiale) sont exigées pour aboutir à une solution de l'équation de départ (condition finale).

II.5.1 Types de conditions aux limites dans les transferts de chaleur :

Il existe trois catégories de conditions aux limites fréquemment rencontrées lors des transferts de chaleur.

I.1. II.5.1.1 Condition aux limites de première espèce :

Les conditions aux limites de type température imposée (problème de Dirichlet) permettent de connaître la température à la surface à tout moment.

$$T_s = f_s(M_s, t) \quad \text{avec } M_s \text{ point de la surface du système}$$

Cas particulier : surface isotherme ($T_s = \text{cte}$).

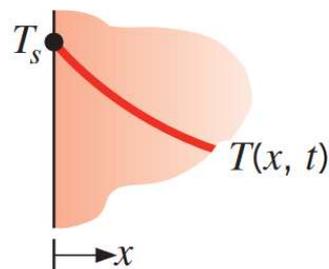


Figure II.1 : conditions aux limites de type température imposée à la surface [10].

I.2. II.5.1.2 Condition aux limites de deuxième espèce :

Est également connu sous le nom de conditions aux limites de type flux imposée (problème de Neumann), Dans cette situation, la densité de flux à la frontière du domaine étudié est connue à tout moment.

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = f(M_s, t)$$

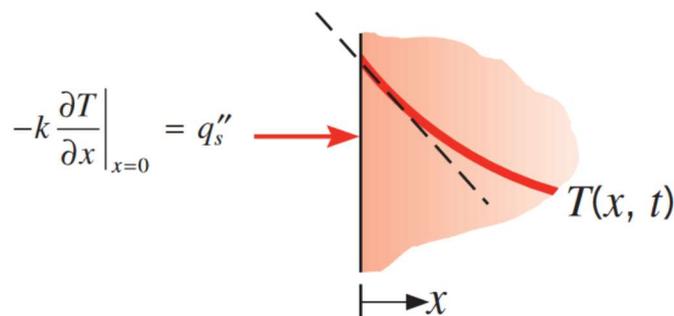


Figure II.2 : conditions aux limites de type flux imposée [10].

Cas particulier : surface adiabatique ou système isolé. $-K \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_s = 0$

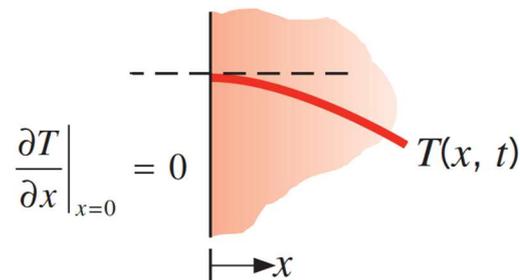


Figure II.3 : surface adiabatique [10].

II.5.1.3 Condition aux limites de troisième espèce :

Connues sous le nom de conditions de Fourier ou de Newton, telles que le transfert linéaire (problème de Fourier).

$$-K \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_s = h(T_s - T_{\text{amb}})$$

Avec ;

h : coefficient d'échange thermique superficiel (en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)

T_{amb} : température de référence du milieu extérieur.

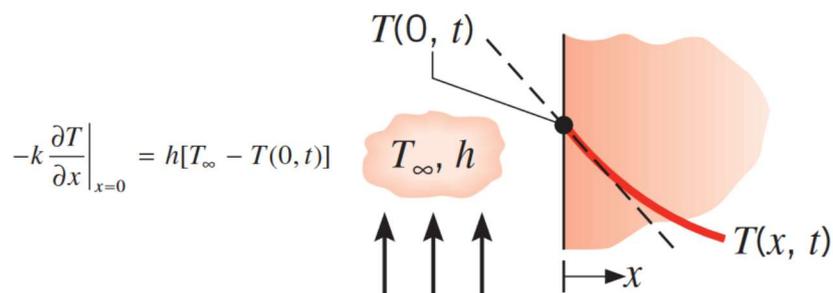


Figure II.4 : conditions aux limites de type convection à la surface [10].

II.6 Logiciels de simulation utilisés :

Des logiciels dédiés peuvent être utilisés par exemple :

- **Fluent** : C'est un logiciel qui contient des capacités de modélisation physique nécessaires pour modéliser le flux, la turbulence, le transfert de chaleur et les réactions pour des applications industrielles.
- **COMSOL Multiphysics** : C'est un logiciel de simulation numérique basé sur la méthode des éléments finis. Il permet de simuler de nombreux phénomènes physiques et applications en ingénierie, et tout particulièrement les phénomènes couplés.
- **Flow3D** : C'est un logiciel qui fournit une plate-forme complète et polyvalente de simulation pour l'étude du comportement dynamique des fluides lors des processus physiques et surtout pour des applications industrielles.

II.7 Simulations mathématiques de la trempe au laser :

II.7.1 Modèles analytiques :

BLACKWELL a examiné analytiquement le phénomène de l'enlèvement explosif de matière traitée, observée par DABBY et PAEK, et a calculé le profil de la température dans un corps semi infini durcit avec une source laser assumée comme une loi en décroissance exponentielle avec la profondeur x . Une condition au limite convective est admise et la transformée de Laplace est utilisée pour résoudre l'équation différentielle de la conduction de la chaleur. Il a montré que la température maximale se déplace à l'intérieur du matériau. Quand le nombre adimensionnel Bi est plus grand que 0.05.

Martin GT et al ont discuté de solutions pour le régime permanent et le profil de température dans un corps dur semi-infini traité dans un système de cordon cyclique avec une source laser gaussienne indépendante du temps.

ZUBAIR S. M et CHAUDHRY M. A ont d'abord discuté la solution fondamentale au problème considéré par BLACKWELL. Ils ont fourni une solution analytique au problème basé sur la transformée de Laplace, dans lequel la matière est soumise à une source laser instantanée, identifiée par la pulsation de Dirac. Dans les applications pratiques de TTL, la pulsation laser est dépendante du temps selon plusieurs formes, [5].

II.7.2 Modèles numériques :

CHEUNG. N et al, ont développé un modèle mathématique pour prédire la profondeur de la zone traitée par une source laser de distribution gaussienne indépendante u temps. L'équation de Fourier de la conduction de la chaleur est résolue en utilisant la méthode des différences finies. Dans des coordonnées cylindriques, pour l'étude de la distribution de la température produit dans un matériau avec des propriétés thermo-physiques dépendantes du temps, ils ont obtenu la profondeur à laquelle le durcissement e produit. Les simulations théoriques sont comparées avec les résultats expérimentaux ou un laser CO₂ continu.

GUSTAVO G. et TIEN-CHEN J ont présenté une étude numérique de la distribution de la température suivant le modèle de ZUBAIR et CHAUDHRY ou la source laser est dépendante

du temps exponentiellement, avec une dépendance des propriétés des matériaux avec la température. Les effets de non-linéarité, sont étudiés. L'équation de la conduction de la chaleur gouvernante, les conditions aux limites et la condition initiale sont présentées dans une forme adimensionnelle comme une fonction d'un groupe de paramètres adimensionnelles, La résolution de l'équation gouvernante est une approche de type volumes finis, avec une grille variable qui assure une plus grande résolution dans le domaine près de la limite où la source de la chaleur laser est appliquée. Les effets des paramètres différents ainsi que les propriétés thermiques dépendantes sont étudiées en détail. Les résultats calculés sont comparés avec les études analytiques pour les propriétés thermiques constantes obtenues, pour un matériau semi infini et à dimension finie. De plus, les solutions numériques présentes sont comparées avec les résultats expérimentaux.

BESSROUR .J et al l'étude proposée est une contribution à l'établissement d'un modèle instationnaire qui permet de simuler l'histoire thermique totale du traitement superficiel dans un domaine tridimensionnel, de frontière quelconque, jusqu'au retour à l'équilibre thermique après refroidissement. La formulation du problème intègre un code de calcul par éléments finis pour la résolution de l'équation de la chaleur en régime transitoire non linéaire. Le schéma numérique développé permet la résolution avec une condition de frontière mobile moyennant une discrétisation spatio-temporelle adaptée. Il tient compte des non-linéarités dues à la variation des caractéristiques thermo-physiques en fonction de la température et des pertes par rayonnement aussi que celles par convection, [5].

II.8 Les modèles de simulation de traitement thermique d'un acier avec laser mobile en trois niveaux :

Lors de la simulation du traitement thermique de l'acier par une source laser mobile, les modèles peuvent être classés en trois niveaux en fonction de leur complexité et des phénomènes qu'ils prennent en compte.

II.8.1 Modèles de base :

Ces modèles se concentrent principalement sur la conduction thermique sans inclure les phénomènes plus complexes comme les transformations de phase ou les contraintes mécaniques.

➤ Modèles de conduction thermique :

- **Description:** Simulent la distribution de chaleur dans l'acier en utilisant la loi de Fourier de la conduction thermique, en prenant en compte le mouvement de la source laser.
- **Applications:** Idéaux pour obtenir une première estimation de la distribution de température induite par un laser mobile.
- **Équations:**

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T + \frac{Q(x,y,t)}{\rho C_p}$$

Où T est la température, α la diffusivité thermique, ρ la densité, C_p la capacité thermique spécifique, et $Q(x,y,t)$ la source de chaleur mobile (laser).

II.8.2 Modèles intermédiaires :

Ces modèles incluent des phénomènes supplémentaires tels que les transformations de phase et les effets de convection et de rayonnement pour une simulation plus réaliste.

➤ Modèles de transformation de phase et de convection/rayonnement

- **Description:** Intègrent les transformations de phase et les effets de convection et de rayonnement en plus de la conduction thermique. Ces modèles prennent en compte les changements de microstructure de l'acier sous l'effet du laser.
- **Applications:** Utilisés pour prédire les zones affectées thermiquement (HAZ) et les transformations de phase (par exemple, la formation de martensite).
- **Équations:**

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + V \cdot \nabla T \right) = k \nabla^2 T + Q(x, y, t)$$

Où v est la vitesse du fluide environnant (si applicable).

- ✓ Transformation de Phase : Utilisation de modèles basés sur les diagrammes TTT ou CCT pour intégrer les transformations de phase.

Exemples : Prédiction de la formation de martensite et distribution de température lors du passage d'un laser sur une pièce d'acier.

II.8.3 Modèles thermomécaniques et multiphysiques :

- **Description :** Couplent les effets thermiques, mécaniques et microstructuraux pour prédire les contraintes résiduelles, les déformations, et les transformations de phase dans l'acier traité par laser.
- **Applications :** Essentiels pour des analyses détaillées de la qualité du traitement thermique, incluant les déformations plastiques et les contraintes résiduelles.
- **Équations :**
- ✓ Thermomécanique :

$$\sigma_{ij,j} + f_i = \rho \ddot{u}_i$$

Et :

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial t} = C_{ijkl} \frac{\partial \epsilon_{kl}}{\partial t} + \alpha_{ijkl} \frac{\partial T}{\partial t}$$

Où σ est le tenseur de contrainte, u le déplacement, C le tenseur de rigidité, ϵ la déformation, et α le coefficient de dilatation thermique.

✓ Multiphysique :

Combinaison des équations de conduction thermique, de transformation de phase, et de mécanique des solides.

La Simulation de l'effet d'un laser mobile sur une pièce d'acier, prédiction des zones durcies, des contraintes résiduelles, et des déformations plastiques.

Ces trois niveaux de modèles de simulation permettent d'aborder le traitement thermique par laser mobile à différents degrés de complexité, en fonction des besoins spécifiques de l'application et des ressources disponibles. Les modèles de base offrent une première approximation de la distribution de température, les modèles intermédiaires intègrent des phénomènes supplémentaires pour une simulation plus réaliste, et les modèles avancés fournissent une analyse détaillée des effets thermomécaniques et des transformations microstructurales.

II.9 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons étudié des généralités sur la modélisation et la simulation et leurs principes de fonctionnement, les différents Modèles de simulation, les différents Modèles Mathématiques a la trempe au laser et leurs applications dans le domaine de l'industrie enfin nous avons abordé Les modèles de simulation de traitement thermique d'un acier avec laser mobile

Chapitre III

Simulation Numérique

Simulation Numérique

III.1 Introduction :

L'objectif de ce chapitre est de simuler et d'analyser le traitement thermique superficiel des aciers en utilisant une source laser mobile. La simulation est réalisée avec COMSOL Multiphysics en deux dimensions (2D). Cette étude vise à comprendre les effets thermiques et mécaniques induits par le laser sur l'acier, notamment la distribution de température, les transformations de phase, et les contraintes thermomécaniques.

III.2 Description du modèle :

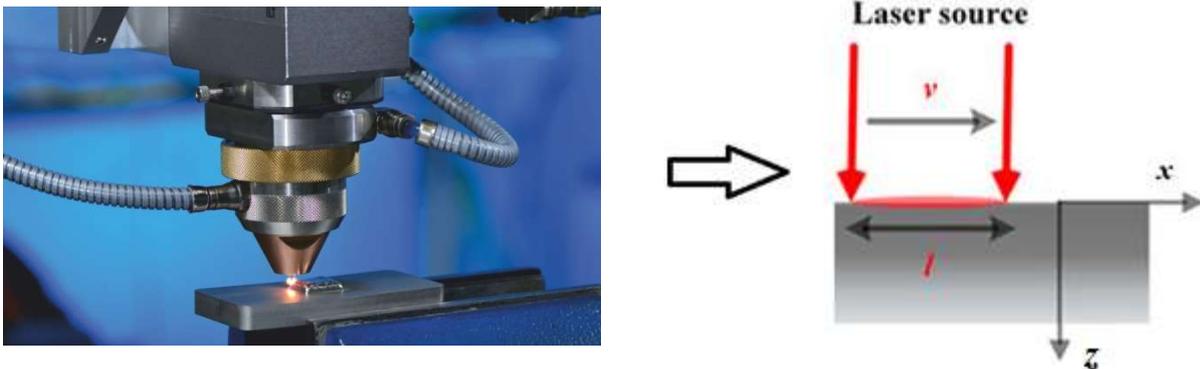


Figure III.1 : Modèles physique et mathématique de la Trempe superficielle au laser.

Le processus de traitement thermique en phase solide consiste à chauffer localement et rapidement le matériau de surface jusqu'à atteindre la température critique du changement structural, et légèrement inférieure à son point de fusion. La zone traitée est refroidie par trempe vers le centre de la pièce.

En général, le traitement thermique de surface au laser et la trempe sont impliqués dans un processus de chauffage limité par conduction.

III.3 Hypothèses simplificatrices :

- La simulation est effectuée en deux dimensions (2D).
- Les propriétés thermiques et mécaniques sont considérées comme constantes.
- La distribution de la puissance du laser est modélisée comme une distribution gaussienne en 2D.

- Les coefficients de convection et d'émissivité sont considérés comme constants et uniformes sur toute la surface de la plaque.
- Les effets de convection naturelle dans le matériau liquide ou semi-liquide sont négligés.
- La température initiale de la plaque est supposée uniforme et égale à la température ambiante.
- La plaque d'acier est supposée exempte de contraintes initiales avant l'application du traitement thermique.
- Les propriétés thermiques et mécaniques de l'acier sont considérées isotropes, c'est-à-dire identiques dans toutes les directions.

III.4 Description des modèles de transfert de chaleur et de diffusion adaptés à la simulation du traitement thermique superficiel :

III.4.1 Equation de base :

III.4.1.1 Équation de la chaleur (conduction thermique) :

- $\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q(x, y, t)$

III.4.1.2 Source de chaleur (laser) :

Le laser est modélisé comme une source de chaleur mobile avec une distribution gaussienne :

$$Q(x, t) = \frac{P_0}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-vt)^2}{2\sigma^2}\right)$$

III.4.2.1 Conditions initiales :

- $T(x, y, 0) = 0$

III.4.2.2 Conditions aux limites :

- Conditions aux limites de convection : $-k \frac{\partial T}{\partial n} = h(T - T_\infty)$
- Conditions aux limites de rayonnement : $-k \frac{\partial T}{\partial n} = \epsilon \sigma_{SB} (T^4 - T_\infty^4)$
- Bords Adiabatiques : $-k \frac{\partial T}{\partial n} = 0$

III.4.3 Modèle de diffusion :

La diffusion thermique décrit la manière dont la chaleur se propage dans le matériau. La diffusion est intégrée dans l'équation de la chaleur à travers le terme de conduction thermique.

- Diffusivité thermique :

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p}$$

- Équation simplifiée de la chaleur :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \cdot \nabla^2 T + \frac{Q(x,t)}{\rho C_p}$$

Où : ∇^2 est l'opérateur laplacien, qui en 2D est donné par :

$$\nabla^2 T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}$$

III.5 Description de la méthode des éléments finis :

La méthode des éléments finis (MEF) est une technique numérique largement utilisée pour résoudre les équations différentielles partielles (EDP) et les problèmes de valeur aux limites dans divers domaines d'ingénierie et de physique. Voici une description détaillée de la méthode des éléments finis, y compris ses principes fondamentaux, ses étapes de mise en œuvre et ses applications.

III.5.1 Principes fondamentaux :

- **Discrétisation du domaine :** La première étape de la MEF consiste à diviser le domaine de calcul en un ensemble fini d'éléments plus petits et simples, tels que des triangles en 2D ou des tétraèdres en 3D. Ces éléments sont reliés par des nœuds, qui sont les points de jonction des éléments.
- **Fonctions de forme :** Les fonctions de forme sont des fonctions mathématiques utilisées pour interpoler les valeurs de la variable étudiée (par exemple, la température, le déplacement, etc.) à l'intérieur des éléments à partir de ses valeurs aux nœuds. Les fonctions de forme sont souvent choisies comme des polynômes de faible degré.
- **Formulation faible :** La formulation faible est obtenue en multipliant l'équation différentielle par une fonction test et en intégrant sur le domaine. Cette approche permet de transformer l'EDP en un système d'équations algébriques plus simple à résoudre.

III.5.2 Étapes de mise en œuvre :

- **Définition du problème :** Identification de l'équation différentielle qui régit le phénomène étudié, plus la définition des conditions aux limites et des conditions initiales nécessaires pour résoudre le problème.
- **Maillage du domaine :** Création du maillage ; division du domaine en éléments finis. Le maillage peut être uniforme ou adaptatif, en fonction de la complexité de la géométrie et des gradients de la solution. Avec affinement du Maillage Dans les

régions où des gradients élevés sont attendus, le maillage est affiné pour améliorer la précision des résultats.

- Construction des fonctions de forme : Sélection des fonctions, de forme choix des fonctions de forme appropriées pour les éléments. Les fonctions de forme doivent satisfaire les conditions de compatibilité et de complétude.
- Assemblage du système d'équations : Formulation des équations, transformation de l'EDP en une forme intégrale par la formulation faible. Plus assemblage des matrices, construction des matrices de masse, de raideur, et du vecteur de charge en intégrant les contributions de chaque élément.
- Résolution du système linéaire : avec le système d'équations algébriques résultant est résolu à l'aide de méthodes numériques comme l'élimination de Gauss, les méthodes itératives ou les solveurs directs. Pour les problèmes dépendant du temps, des méthodes de discrétisation temporelle comme les schémas d'Euler, de Runge-Kutta, ou d'intégration implicite sont utilisées.
- Post-traitement des résultats : Les résultats sont visualisés sous forme de champs de distribution (par exemple, température, déplacement) à travers le domaine. Et l'analyse des résultats inclut l'interprétation des distributions de variables, la vérification des contraintes et des déformations, et l'évaluation des performances du système.

III.5.3 Applications de la méthode des éléments finis :

- Mécanique des structures : Analyse des déformations et contraintes, et calcul des modes propres et des fréquences.
- Transfert de chaleur : Distribution de température, problèmes de convection et conduction.
- Dynamique des fluides (CFD) : Écoulements de fluides, et étude d'interactions Fluide-Structure.
- Électromagnétisme : Propagation des ondes électromagnétiques et analyse des champs électriques et magnétiques.

La méthode des éléments finis est une technique puissante et polyvalente pour résoudre des problèmes complexes en ingénierie et en physique. En divisant le domaine en éléments finis et en utilisant des fonctions de forme pour interpoler les solutions, la MEF permet de transformer des équations différentielles partielles en systèmes d'équations algébriques plus simples à résoudre. Son application s'étend à de nombreux domaines, offrant des solutions précises et détaillées pour des problèmes de déformation des structures, de transfert de chaleur, de dynamique des fluides, et d'électromagnétisme.

III.6 A propos de Comsol multiphysics :

COMSOL Multiphysics est un logiciel de simulation numérique qui utilise la méthode des éléments finis pour modéliser et résoudre des problèmes multiphysiques dans divers domaines d'ingénierie et de sciences.

III.6.1 Étapes principales de l'utilisation :

- Choix des modules physiques : Sélection des modules spécifiques en fonction de l'application (électromagnétisme, mécanique des fluides, mécanique structurelle, transfert de chaleur, acoustique, chimie, etc.).
- Choix du type d'étude : Définition du type d'analyse à réaliser (stationnaire, transitoire, harmonique, modal, etc.).
- Géométrie : Création ou importation de la géométrie du modèle à analyser. L'interface permet de dessiner des géométries 2D et 3D ou d'importer des modèles CAD.
- Choix du matériau : Sélection des matériaux à utiliser dans le modèle à partir de la bibliothèque de matériaux de COMSOL ou en définissant des matériaux personnalisés avec des propriétés spécifiques.
- Maillage : Génération du maillage de la géométrie, étape cruciale pour la précision de la simulation. Le maillage peut être ajusté pour optimiser la résolution et les temps de calcul.
- Calcul : Exécution de la simulation en utilisant les solveurs numériques de COMSOL pour résoudre les équations différentielles décrivant le problème Multiphysique.
- Affichage et export des résultats : Post-traitement des résultats avec des outils de visualisation avancés pour créer des graphes, des tracés de surface, des coupes, et des animations. Les résultats peuvent être exportés dans divers formats pour une analyse approfondie ou une présentation.

III.6.2 Avantages de COMSOL multiphysics :

- Flexibilité : Combinaison de différentes physiques dans une seule simulation.
- Précision : Résultats précis grâce à des méthodes de calcul avancées.
- Interface intuitive : Facilité de modélisation et de simulation même pour les utilisateurs sans compétences en programmation.

III.6.3 Défis :

- Complexité : Peut être difficile à maîtriser pour les nouveaux utilisateurs.
- Coût : Les licences peuvent être coûteuses.

III.7.1 La géométrie:

- Définition de la géométrie :

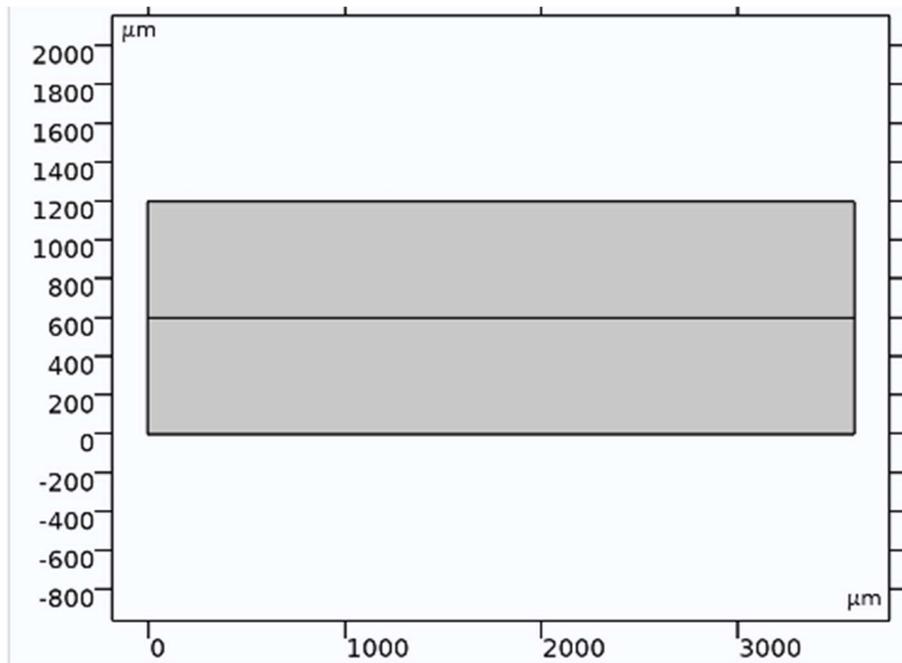


Figure III.2 : plaque d'acier.

Créez une section transversale de la plaque d'acier en 2D dans COMSOL Multiphysics.

Longueur (mm)	3.6
Largeur (mm)	1.2

Tableau III.1 : Dimensions typiques.

- Paramétrage des conditions aux limites :

Température initiale de la plaque d'acier (K)	293.15
---	--------

Tableau III.2 : Conditions initiales.

Propriétés	Valeur	Unités
Coefficient de convection (h)	10	$W/(m^2.K)$
Température ambiante (T_{amb})	293.15	K
Emissivité de la surface (ϵ)	0.7	/

Tableau III.3 : Conditions de convection et de rayonnement.

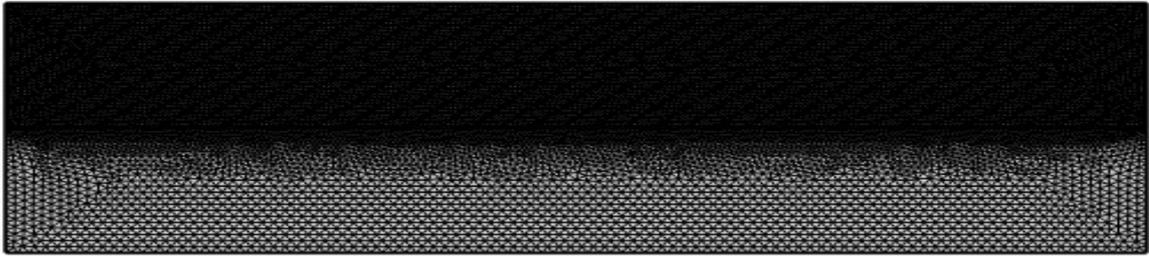
Maillage :

Figure III.3 : maillage de la plaque.

Pour cette étude, un maillage extrêmement fin a été utilisé afin d'obtenir des résultats plus précis et de capturer les détails fins de la distribution de température au cours du traitement thermique par laser de l'acier. Voici quelques caractéristiques clés du maillage :

Description	Valeur
Statut	Maillage complet
Points du maillage	18041
Triangles	35597
Éléments d'arêtes	740
Éléments ponctuels	6
Nombre d'éléments	35597
Qualité minimale des éléments	0.6474
Qualité moyenne des éléments	0.9492
Rapport de surface de l'élément	0.04762
Surface du maillage	4.32E6 μm^2

Figure III.4 : quelques caractéristiques clés du maillage.

Le choix d'un maillage extrêmement fin pour cette étude est justifié par la nécessité d'obtenir des résultats précis et détaillés. Bien que cela augmente les exigences en termes de calcul et de ressources, les avantages en termes de précision et de fiabilité des résultats l'emportent largement. Ce maillage permet de capturer efficacement les variations de température induites par le laser, fournissant ainsi des données de haute qualité pour l'analyse du traitement thermique des matériaux étudiés.

III.7.2 Source de chaleur :

Source de chaleur mobile avec une distribution de puissance gaussienne en 1D :

$$Q(x, t) = \frac{P_0}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - vt)^2}{2\sigma^2}\right)$$

Caractéristiques de la source laser :

- Un laser pulsé a été sélectionné pour cette simulation en raison de sa capacité à fournir des impulsions d'énergie concentrées et bien contrôlées.
- Trois niveaux d'énergie d'impulsion ont été utilisés : 1 J, 150 J et 400 J. Ces niveaux d'énergie permettent d'étudier comment l'intensité énergétique affecte la montée en température et la profondeur de pénétration thermique dans les matériaux.
- La vitesse de balayage du laser a été variée pour comprendre son influence sur le profil de température. Des vitesses de 100 mm/s, 200 mm/s et 400 mm/s ont été utilisées. Une vitesse de balayage plus lente permet une exposition plus longue, augmentant ainsi la température, tandis qu'une vitesse plus rapide réduit le temps d'exposition et, par conséquent, l'élévation de la température.

Chapitre IV

Résultats et discussions

Résultats et discussions

Dans cette simulation, nous avons utilisé une source laser mobile pour effectuer le traitement thermique de différents types d'acier, notamment l'acier AISI 4340, l'acier inoxydable SUS 403 et le cobalt Supermen dur.



Figure IV.1 : déplacement de la source laser mobile sur la plaque d'acier.

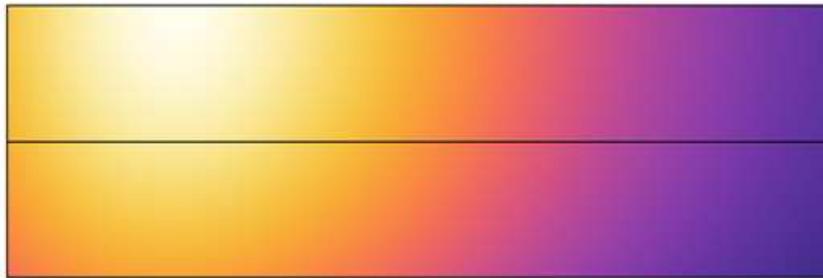


Figure IV.2 : Distribution de la température tout au long de la plaque.

➤ **Matériaux étudiés :**

- **Acier AISI 4340** : Connu pour sa résistance et sa dureté.
- **Acier inoxydable SUS 403** : Utilisé pour ses propriétés de résistance à la corrosion et à la chaleur.
- **Cobalt Supermen dur** : Réputé pour ses propriétés magnétiques et sa résistance aux hautes températures.

➤ **Objectifs de l'étude** : L'objectif principal était de comprendre comment les variations de l'énergie d'impulsion et de la vitesse de balayage influencent la température de surface des différents aciers. Nous avons cherché à :

- **Analyser la montée en température** : Voir comment chaque combinaison de paramètres affecte la température maximale atteinte en surface.

- **Identifier les conditions optimales** : Déterminer les paramètres qui permettent un traitement thermique efficace tout en minimisant les risques de fissuration ou de fusion.

➤ **Résultats attendus :**

Les résultats sont présentés sous forme de graphes montrant la variation de la température en fonction du temps pour chaque type d'acier et pour chaque combinaison d'énergie d'impulsion et de vitesse de balayage. Ces graphes nous permettront de visualiser et de comparer l'impact des paramètres du laser sur le traitement thermique de surface.

En variant l'énergie d'impulsion et la vitesse de balayage, nous avons pu obtenir des données précises sur la dynamique de chauffage et de refroidissement en surface. Ces données fournissent une base pour optimiser les paramètres de traitement thermique laser dans des applications industrielles, assurant ainsi une efficacité maximale tout en minimisant les risques de dommages thermiques aux matériaux.

IV.1 Propriétés des matériaux étudiés :

➤ AISI-4340 :

Propriétés	Valeur	Unités
Conductivité thermique (k)	44.5	W/(m.K)
Capacité thermique spécifique (Cp)	475	J/(kg.K)
Densité (ρ)	7850	Kg/m ³
Module d'élasticité (E)	205	GPa
Coefficient de dilatation thermique (α)	$12.3 \cdot 10^{-6}$	1/K
Perméabilité relative	1	/
Conductivité électrique	$4.032 \cdot 10^6$	S/m
Permittivité relative	1	/
Coefficient de poisson	0.28	/

Tableau IV.1 : Propriétés thermiques et mécaniques de l'acier 4340.

➤ Acier sus403:

Propriétés	Valeur	Unités
Conductivité thermique (k)	24	W/(m.K)
Capacité thermique spécifique (Cp)	460	J/(kg.K)
Densité (ρ)	7800	Kg/m ³
Conductivité électrique	$1.74 \cdot 10^6$	S/m
Permittivité relative	1	/

Tableau IV.2 : Propriétés thermiques et mécaniques de l'acier sus 403.

➤ L'acier cobalt supermen dur :

Propriétés	Valeur	Unités
Conductivité thermique (k)	17	W/(m.K)
Capacité thermique spécifique (Cp)	420	J/(kg.K)
Densité (ρ)	8200	Kg/m ³
Perméabilité relative	1	/
Conductivité électrique	$2.61 \cdot 10^6$	S/m

Tableau IV.3 : Propriétés thermiques et mécaniques de l'acier cobalt supermen dur.

IV.2 Profils des températures superficielles des matériaux étudiés en fonction du temps avec une énergie d'impulsion constante et une vitesse variable :

On obtient trois courbes comme suivant :

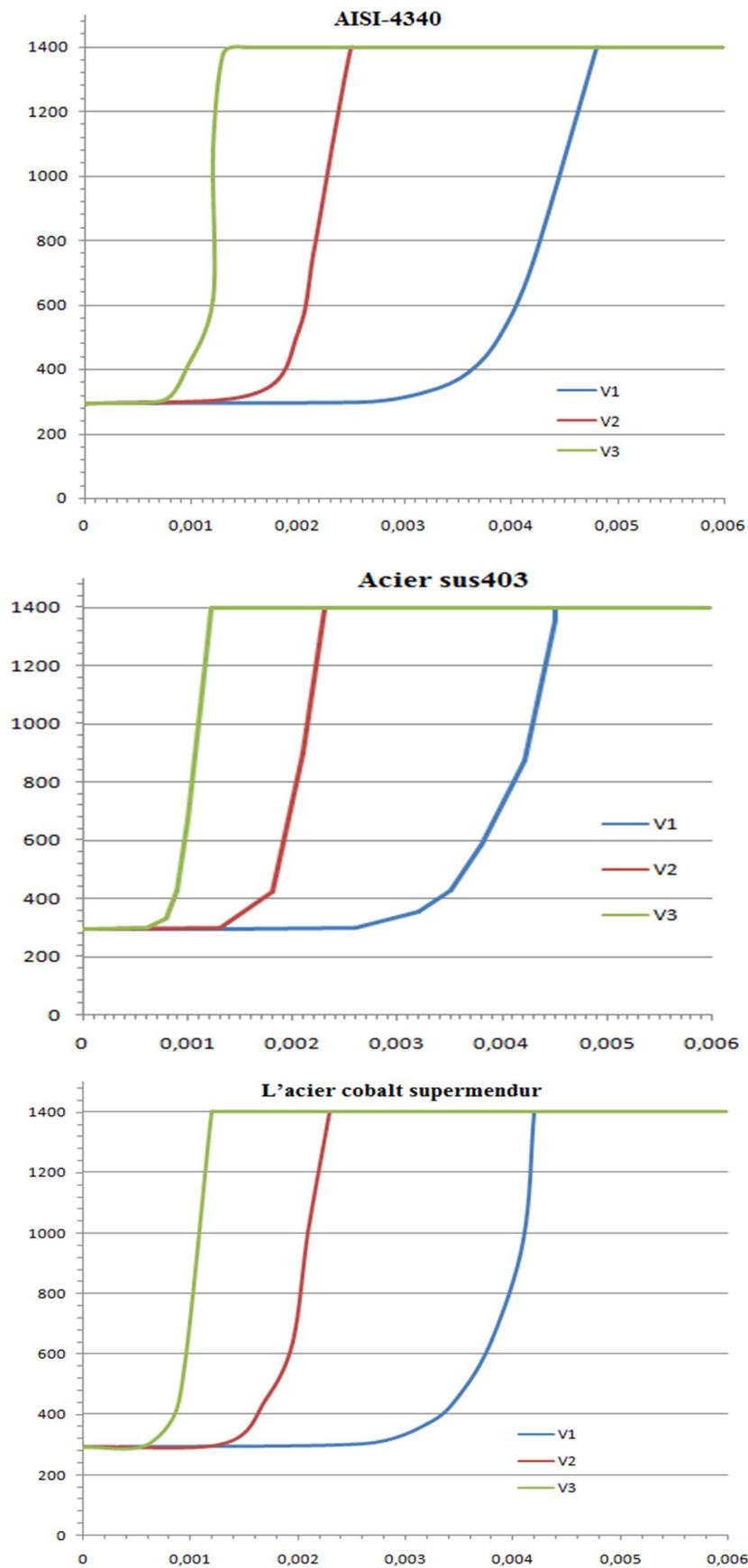


Figure IV.3 : profils des températures superficielles (K) en fonction du temps (s) des matériaux étudiés obtenue à $V=100\text{mm/s}$, $V=200\text{mm/s}$, $V=400\text{mm/s}$, avec une puissance constante $E_p=1$ Joule sous l'effet thermique de laser mobile.

La figure IV.3 représente l'évolution de la température en fonction du temps pour les matériaux étudiés selon trois cas de changement de vitesse $V_1=100$ mm/s, $V_2=200$ mm/s, $V_3=400$ mm/s avec une puissance constante $E_p=1$ Joule. Une simple analyse pour les trois courbe, on voit que la température superficielle pour le cas de $V=400$ mm/s augmente plus rapide par rapport à $V=200$ mm/s et $V=100$ mm/s dans un temps réduit, et on remarque aussi quand elle augmente la température à 1400K elle reste stable sur toute la plaque dans les trois cas, c'est une proportion importante comme il semble qui peut voir un effet direct et efficace.

IV.3 Profils des températures superficielles des matériaux étudiés en fonction du temps avec vitesse constante et une énergie d'impulsion variable :

On obtient trois courbes comme suivant :

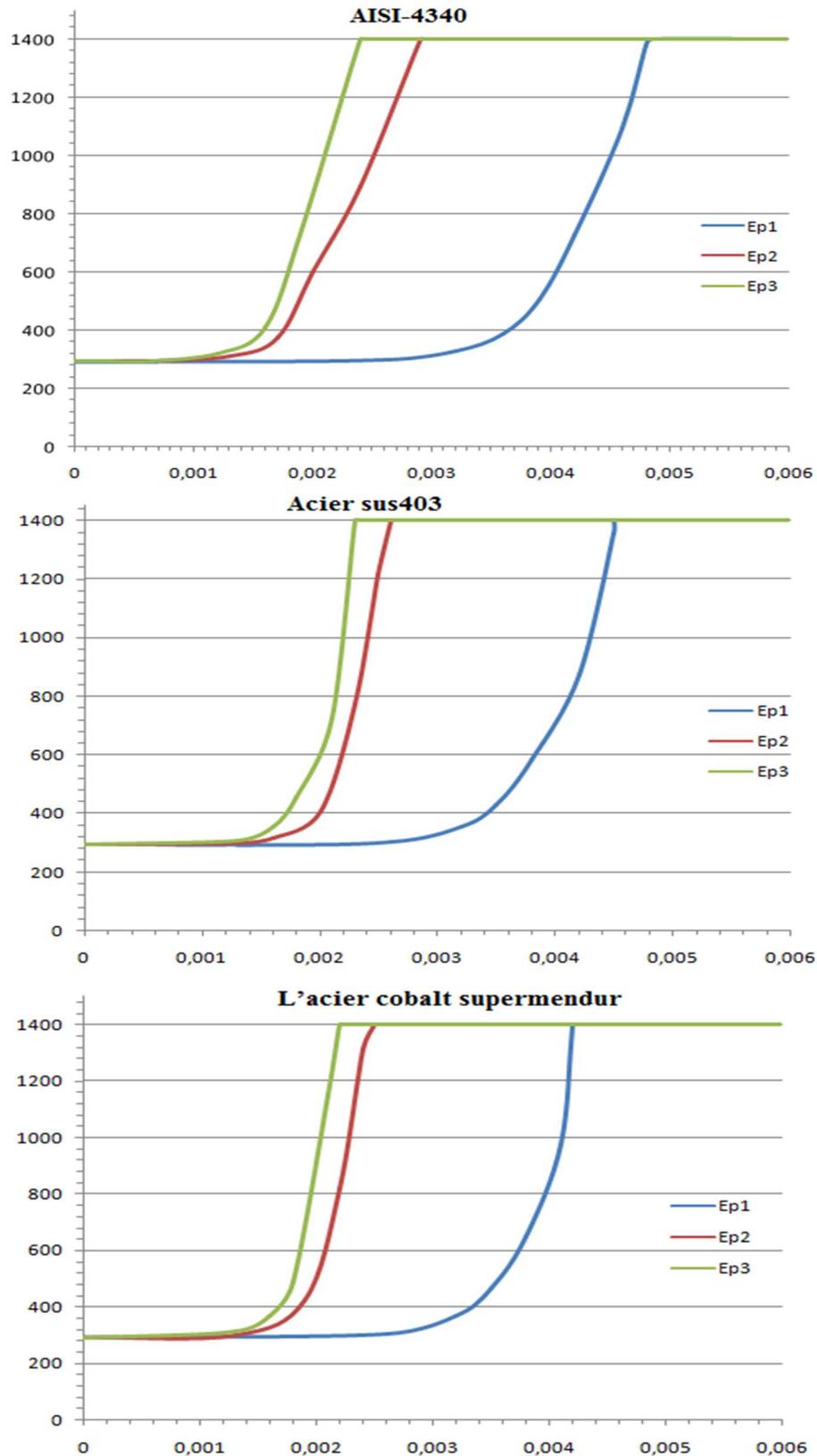


Figure IV.4 : profils des températures superficielles (K) en fonction du temps (s) des matériaux étudiés obtenue à $V=100\text{mm/s}$ et $Ep1=1\text{J}$, $Ep2=150\text{J}$, $Ep3=400\text{J}$ sous l'effet thermique de laser mobile.

La figure IV.4 représente l'évolution de la température en fonction du temps pour les matériaux étudiés selon trois cas de changement de l'intensité $E_{p1}=1J$, $E_{p2}=150J$, $E_{p3}=400J$ avec une vitesse constante $V=100mm/s$. Une simple analyse pour les trois courbes, on voit que la température superficielle pour le cas de $E_{p3}=400J$ augmente plus rapidement par rapport à $E_{p2}=150J$ et $E_{p1}=1J$ dans un temps réduit, et on remarque quand elle atteint la température à $1400K$ elle reste stable sur toute la plaque dans les trois cas, c'est une proportion importante comme il semble qui peut voir un effet direct et efficace.

IV.4 Discussion des résultats :

Les simulations effectuées sur les trois matériaux - acier AISI 4340, acier inoxydable SUS 403, et cobalt Supermen dur - ont révélé des tendances similaires en ce qui concerne l'impact de la vitesse de balayage et de l'énergie d'impulsion sur la température de surface.

➤ **Impact de la vitesse de balayage :**

- **Variation de la vitesse :** À chaque augmentation de la vitesse de balayage, la température maximale atteinte en surface a également augmenté. Simultanément, le temps nécessaire pour atteindre cette température a diminué. Cela s'explique par le fait qu'une vitesse plus lente permet un temps d'exposition plus long, ce qui conduit à une accumulation plus importante de chaleur à la surface du matériau.
- **Conséquences pratiques :** Contrôler la vitesse de balayage est crucial pour optimiser le traitement thermique. Une vitesse plus lente est avantageuse pour atteindre des températures élevées rapidement, mais elle nécessite un contrôle précis pour éviter des surchauffes locales ou des dommages thermiques excessifs.

➤ **Impact de l'énergie d'impulsion :**

- **Variation de l'énergie :** L'augmentation de l'énergie d'impulsion a également conduit à une augmentation de la température de surface et à une réduction du temps nécessaire pour atteindre cette température. Une énergie d'impulsion plus élevée fournit une plus grande quantité de chaleur instantanément, ce qui accélère le processus de chauffage.
- **Conséquences pratiques :** La gestion de l'énergie d'impulsion est essentielle pour assurer un traitement thermique efficace. Une énergie d'impulsion trop élevée peut entraîner des risques de fissuration ou de fusion, tandis qu'une énergie trop faible peut être inefficace pour atteindre les températures désirées.

➤ **Comparaison entre les matériaux :**

- **AISI 4340** : A montré une réponse modérée aux variations de la vitesse de balayage et de l'énergie d'impulsion, avec une montée en température rapide et une bonne dissipation de la chaleur.
- **SUS 403** : A présenté une résistance plus élevée à la montée en température, nécessitant des énergies d'impulsion plus élevées pour atteindre des températures similaires à celles de l'AISI 4340.
- **Cobalt supermen dur** : A affiché la montée en température la plus rapide parmi les trois, en raison de ses propriétés thermiques supérieures, mais aussi une plus grande sensibilité aux variations de la vitesse de balayage et de l'énergie d'impulsion.

IV.5 Conclusion :

Les résultats de cette simulation mettent en évidence l'importance cruciale du contrôle précis des paramètres laser, notamment la vitesse de balayage et l'énergie d'impulsion plus l'influence des matériaux, dans le traitement thermique superficiel des aciers. Cette étude démontre l'importance de la précision dans le réglage des paramètres laser pour le traitement thermique superficiel des aciers. Une compréhension approfondie de l'interaction entre la vitesse de balayage, l'énergie d'impulsion, et les propriétés matérielles est essentielle pour optimiser les processus industriels et garantir des performances fiables et efficaces

Conclusion Générale

Conclusion Générale

En conclusion, Cette étude démontre qu'il est désormais possible de modéliser numériquement le traitement thermique laser de surface de matériaux avec une grande précision à l'aide d'un logiciel de calcul par éléments finis tel que COMSOL Multiphysics. Bien que la mise en œuvre du modèle soit complexe et longue en raison du grand nombre de paramètres à prendre en compte, les résultats obtenus montrent un accord remarquable entre les prédictions numériques et les mesures expérimentales.

Le traitement thermique superficiel au laser des matériaux a été étudié en détail dans ce mémoire, en incluant des éléments théoriques, de modélisation et de simulation pratique. Au cours du chapitre initial, nous avons exposé des informations générales sur les lasers et leurs utilisations dans le domaine du traitement thermique, mettant en évidence leur importance grandissante dans les industries contemporaines afin d'améliorer les caractéristiques des matériaux.

La synthèse bibliographique sur la modélisation du procédé de traitement thermique au laser a été réalisée dans le deuxième chapitre. Nous avons abordé les progrès récents, les méthodologies et les difficultés qui y sont liées, notamment en raison du nombre important de paramètres à prendre en compte. Cette revue de la littérature a permis de situer notre travail dans le cadre des recherches existantes et de justifier les choix méthodologiques réalisés.

Dans le troisième chapitre, nous avons réalisé des simulations avec le logiciel COMSOL Multiphysics pour trois types d'aciers : AISI 4340, SUS 403, et cobalt Supermendur. En variant la vitesse de balayage et l'énergie d'impulsion, nous avons étudié leur impact sur la variation de la température en surface des matériaux.

Les simulations réalisées ont mis en évidence l'importance cruciale du contrôle précis des paramètres laser, tels que la vitesse de balayage et l'énergie d'impulsion, pour optimiser le traitement thermique. Chaque matériau a réagi différemment aux variations de ces paramètres, soulignant la nécessité d'adapter les conditions de traitement en fonction des propriétés spécifiques de chaque type d'acier.

En conclusion, Cette étude démontre qu'il est désormais possible de modéliser numériquement le traitement thermique laser de surface de matériaux avec une grande précision à l'aide d'un logiciel de calcul par éléments finis tel que COMSOL Multiphysics. Bien que la mise en œuvre du modèle soit complexe et longue en raison du grand nombre de paramètres à prendre en compte, les résultats obtenus montrent un accord remarquable entre les prédictions numériques et les mesures expérimentales.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] FasterCapital. *Comprendre la résistance des clients*. Retrieved [date of access], from <https://fastercapital.com/fr/sujet/comprendre-la-r%C3%A9sistance-des-clients.html>, 2024.
- [2] Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives. "Le laser : un concentré de lumière". Paris : CEA, 2014.
- [3] Boutalbi, Nadir. «Etude de sensibilité aux paramètres en phase solide lors du traitement thermique par laser». Diss. Médéa, Université Yahia Farès. Institut des Sciences de L'Ingénieur, 2007.
- [4] Mebarki. el houari ; Ayouz syphax « Trempe superficielle de l'acier par laser Nd:YAG ».Diss.Béjaia ; université abderrahmane MIRA ,2020.
- [5] Boutalbi, Nadir. «Transferts thermiques non linéaires des matériaux par laser ». Diss. Université Yahia Farès de Médéa, Institut des Sciences et d, 2017
- [6] Ben Nasser, M., Amdouni, H., Hajbrahim, F., & Hssin, H. « **Matériaux métalliques** ». Support de cours, Institut Supérieur des Études Technologiques du Kef, Tunisie, 2014.
- [7] MathWorks. *MATLAB et Simulink : Plateformes de conception et d'analyse*. MathWorks, sur <https://www.mathworks.com>, 2024.
- [8] Rayner, M. E. "An introduction to mathematical modelling, by Edward A. Bender. Pp x, 256.£ 11· 95. 1978. SBN0 471 02951 3 (Wiley)." *The Mathematical Gazette* 64.427 (1980)
- [9] Yettou, Aissa . « Transfert thermique non linéaire lors de l'interaction laser-matériau : analyse et modélisation ». .Diss.Béjaia ; université abderrahmane MIRA ,2020.
- [10] Bergman, Theodore L., et al. *Introduction to heat transfer*. John Wiley & Sons, 2011.

Résumé

Cette étude numérique, réalisée à l'aide de COMSOL Multiphysics, a permis de quantifier l'influence de la vitesse de balayage et de l'énergie d'impulsion sur la distribution thermique induite par un traitement thermique par laser sur des aciers. Nos résultats montrent que la profondeur de pénétration de la chaleur diminue linéairement avec la vitesse de balayage, tandis que la température superficielle augmente exponentiellement avec l'énergie d'impulsion. Ces résultats ouvrent de nouvelles perspectives pour l'optimisation des propriétés mécaniques de surface des aciers en fonction des applications industrielles.

Mots clés : traitement thermique Superficiel, modélisation, simulation numirique, source laser mobile

Abstract

This numerical study, conducted using COMSOL Multiphysics, has quantified the influence of scan speed and pulse energy on the thermal distribution induced by laser heat treatment on steels. Our results demonstrate that the heat penetration depth decreases linearly with scan speed, while the surface temperature increases exponentially with pulse energy. These findings open up new avenues for optimizing the surface mechanical properties of steels to meet various industrial applications."

Keywords: Surface heat treatment, modeling, numerical simulation, mobile laser source

Résumé

Cette étude numérique, réalisée à l'aide de COMSOL Multiphysics, a permis de quantifier l'influence de la vitesse de balayage et de l'énergie d'impulsion sur la distribution thermique induite par un traitement thermique par laser sur des aciers. Nos résultats montrent que la profondeur de pénétration de la chaleur diminue linéairement avec la vitesse de balayage, tandis que la température superficielle augmente exponentiellement avec l'énergie d'impulsion. Ces résultats ouvrent de nouvelles perspectives pour l'optimisation des propriétés mécaniques de surface des aciers en fonction des applications industrielles.

Mots clés : traitement thermique Superficiel, modélisation, simulation numérique, source laser mobile

Abstract

This numerical study, conducted using COMSOL Multiphysics, has quantified the influence of scan speed and pulse energy on the thermal distribution induced by laser heat treatment on steels. Our results demonstrate that the heat penetration depth decreases linearly with scan speed, while the surface temperature increases exponentially with pulse energy. These findings open up new avenues for optimizing the surface mechanical properties of steels to meet various industrial applications."

Keywords: Surface heat treatment, modeling, numerical simulation, mobile laser source