

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEURE ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA-BEJAIA
FACULTE DE TECHNOLOGIES
DEPARTEMENT GENIE MECANIQUE



Mémoire fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme de Master en

Génie Mécanique

Option : Energétique

Réalisé par :

HAMADOU Djamel

MOKRANI Massin

Encadré par : Dr N. BOUTALBI

Thème

Etude de l'influence de type de laser sur le durcissement thermique du matériau

Devant le Jury composé de :

- Mr. Nadir BOUTALBI**
- Mr. Amar DJEMA**
- Mr. Hamza ALI AGHA**

Année Universitaire : 2018-2019

Remerciements

Louange à Dieu le Miséricordieux qui nous a donné la force, la volonté et la patience durant toutes nos années d'études, et d'accomplir ce travail.

Nous tenons tout d'abord à remercier Monsieur BOUTALBI Nadir, pour l'honneur qu'il nous a fait en acceptant de nous encadrer. Ces conseils précieux ont permis une bonne orientation dans la réalisation de ce modeste travail.

Nos remerciements vont également au président et aux membres de jury d'avoir accepté et juger notre travail.

Nous remercions tous ceux qui ont contribué de près et de loin à la réalisation de ce travail.

Nos très sincères remerciements vont aussi à tous les enseignants et enseignantes qui ont contribué à notre formation durant notre cycle semestre.

Merci à nos parents, grands parents, frères et sœurs qui nous ont toujours soutenus tout au long de notre cursus.

Dédicaces

*N*ous dédions se modeste travaille à :

*N*os très chers parents ;

*N*os frères et sœurs ;

*N*os grands parents ;

*N*os tantes et oncles ;

*N*os adorables amis ;

*N*os enseignants ;

Table de matière

Table de matière	I
Liste des figures	IV
Liste des tableaux	VI
Liste des abréviations	VII
Introduction générale	1
Chapitre 1	
I.1. Généralités sur les lasers	3
I.1.1. Introduction historique	3
I.1.2. Description généralités	4
I.1.2.1. Principe de fonctionnement	4
I.1.2.2. Caractéristiques des faisceaux laser	5
I.1.2.3. Type de laser	6
I.1.3. L'interaction laser matière et application a l'usinage	6
I.1.3.1. Effets de l'interaction laser matière	7
I.1.4. Traitement superficiel par laser	8
I.1.4.1. Le rôle de traitement thermique superficiel	8
I.1.4.2. Source de laser utilisé pour les traitements superficiels	9
I.1.4.3. Place est enjeux du traitement thermique de surface par laser	11
I.1.4.4. Cycle thermique de traitement superficiel	13
I.2. Traitement de matière surfacique	14
I.2.1. traitement de surface sans apport de matière	14
I.2.1.1. Trempe superficielle	15
I.2.1.2. Fusion superficielle	15
I.2.1.3 Traitement avec vaporisation	15
I.2.2. Traitement de surface avec apport de matière	16
I.2.2.1. Formation d'un revêtement	16
I.2.2.2. Formation d'un composite superficiel	16
I.2.2.3. Formation d'un alliage superficiel	17

Conclusion	18
Chapitre 2	
II.1.introduction	19
II.2. Méthodes expérimentales	19
II.3. La modélisation mathématique et la simulation numérique	21
II.3.1. La Modélisation du TTL.....	22
II.3.2. Condition aux limites spatiales et temporelles	22
II.3.3 Les Modèles de TTL	23
II.3.4 les modèles analytiques	24
II.3.5. Les modèles numériques :.....	26
II.3.6. PROGICIEL DE MODELISATION (logiciel de simulation)	28
Conclusion	29
Chapitre 3	
III.1. Introduction	30
III.2. Modulation de l'intensité laser à des impulsions périodiques	31
III.3. Modèle mathématique	32
III.3.1 Difficulté de résoudre l'équation analytiquement	33
III.3.2 La solution analytique de Zubair et Chaudhry	33
III.4.Travail perspective	34
III.4.1. Techniques d'inversion de la transformée de Laplace	36
III.4.2.Description de la méthode de STEHFEST	38
III.4.3.Validation de code de calcul	40

Chapitre 4

IV.1. Evolution de la température superficielle des matières pour

Différents lasers à des différentes intensités49

IV.2. Evolution de la température superficielle des matières maximale

en profondeur, pour différents lasers à des différentes intensités55

Conclusion60

Conclusion générale61

BibliographieVIII

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Mécanisme d'un laser	4
Figure I.2 : Les différents applications liées au laser	7
Figure I.3 : Applications industrielles des faisceaux lasers	8
Figure I.4 : Cycle thermique de traitement superficiel créé par laser	13
Figure I.5 : Principaux traitements de surface praticables par le laser	14
Figure I.6 : Fusion superficielle par irradiation laser.....	15
Figure I.7 : Formation d'un revêtement de surface avec pré dépôt d'un matériau D'apport.....	17
Figure I.8 : Formation de revêtement de surface avec injection de poudre Pulvérisée sous le faisceau laser	17
Figure I.9 : Formation d'un composite superficiel.....	18
Figure I.10 : Formation d'un alliage de surface par injection de gaz réactif.....	18
Figure I.11 : Formation d'un alliage de surface avec injection de poudres additives.....	19
Figure I.12 : Formation d'un alliage de surface à partir d'un pré dépôt d'éléments D'addition.....	19
Figure II.1 : Mesure de la température au point d'impact du faisceau avec le pyromètre infrarouge IP140	20
Figure II.2 : Exemple de condition aux limites	22
Figure III. 1 : Appareille de mesure des impulsions périodique	30
Figure III. 2 : Signal d'impulsion carré	31
Figure III. 3 : Schématisation du modèle TTL	32
Figure III. 4 : Organigramme de calcul	39
Figure III .5 : Phase d'échauffement pour le modèle BLACKWELLE	43
Figure III .6 : Phase d'échauffement pour le modèle de Zubair et Chaudhry pour la source de type exponentiel	48
Figure IV.1 : Evolution de la température superficielle de l'Acier pour différents lasers à des différentes intensités	49

Figure IV.2 : Evolution de la température superficielle du fer pour différents lasers à des différentes intensités	50
Figure IV.3 : Evolution de la température superficielle de Nickel pour différents lasers à des différentes intensités	51
Figure IV.4 : Evolution de la température superficielle de cuivre pour différents lasers à des différentes intensités	52
Figure IV.5 : Evolution de la température superficielle de l'acier maximale en profondeur, pour différents lasers à des différentes intensités	55
Figure IV.6 : Evolution de la température superficielle maximale de fer en profondeur, pour différents lasers à des différentes intensités	56
Figure IV.7 : Evolution de la température superficielle maximale Nickel en profondeur, pour différents lasers à des différentes intensités	57
Figure IV.8 : Evolution de la température superficielle maximale de Cuivre en profondeur, pour différents lasers à des différentes intensités	58

LISTE DE TABLEAUX

Tableau I.1 : Les caractéristiques principales des lasers les plus fréquents	9
Tableau I .2 : Avantages et inconvénients de quelques traitements thermiques surfaciques	12
Tableau III.1 : Propriétés de différents matériaux prévus a étudié lors de la simulation	35
Tableau III .2 : Propriétés de différente interaction laser matière	35
Tableau III.3 : Les caractéristiques thermo physiques du substrat et du faisceau laser.....	40
Tableau III.4 : Resultat de Simulation pour la céramique par le modèle de Blackwell	40
Tableau III .5 : Résultat de simulation pour la céramique par le modèle de Zubair et Chaudhry pour la source de type exponentiel	47
Tableau IV.1 : L'absorbtivité du laser pour les differents matériaux traités pour une intensité laser $I_0= 10^8 \text{ W/m}^2$	53
Tableau IV.2 : Temperature superficielle maximale pour differents materiaux et differents laser à $t=6\text{s}$ pour une intensité laser $I_0= 10^8 \text{ W/m}^2$	54
Tableau IV.3 : Evaluation de la temérature en profondeur pour un temps $t=6(\text{s})$.et une puissance laser de $I_0=10^8$	59

NOMENCLATURE

Symbole	Signification
A	Absorptivité
Cp	Capacité thermique [J / KgK]
$erfc(x) = \int_x^{\infty} \frac{2}{\sqrt{\pi}} e^{-t^2} dt$	Fonction d' erreur complémentaire
h	Coefficient de convection thermique [Wm ⁻² K ⁻¹]
I ₀	Pic de l'intensité laser [W .m ⁻²]
I ₀ '	Intensité de la source laser [W .m ⁻²]
k	Conductivité thermique [Wm ⁻¹ .K ⁻¹]
q̇	Source interne générée par laser [W .m ⁻³]
R	Réfectivité [-]
t	Temps [s]
T	Température [c°]
x	Distance [m]
α	Diffusivité thermique [m ² /s]
ρ	Densité [Kg /m ³]
θ (t-t ₀)	Température [c °]
μ	Coefficient d'absorption [m]
λ	Langueur d'angle [μm]

Liste des abréviations

Abréviation	Signification
TTL	Traitement Thermique par Laser
LM	Laser-Matière
ND-YAG	Neodymium-Doped Yttrium Aluminium Garnet
UV	Ultra-Violet
XEF	xenon difluoride
XECL	xenon monochloride

Introduction générale

Introduction Générale

Dans ces dernières années, l'application de technologie laser industrielle et de plus en plus courante ils savent tout faire, de plus en plus ils le font de mieux en mieux ils sont devenu grâce aux réponses plus précis qu'ils apportent à des situations industrielles toujours plus diversifiées et les plus exigeantes, un outil incontournable dans le domaine l'automobile, l'aéronautique, les télécommunications, ou le médical, On utilise fréquemment des lasers de puissance pour changer ou améliorer les propriétés mécaniques des matériaux tels que, leur dureté superficielle; leur résistance à la fatigue.... Le laser offre ainsi un moyen efficace et précis pour les traitements de surface en contrôlant les modifications des microstructures superficielles. Ainsi le durcissement des matériaux peut se faire par faisceau laser qui contrairement aux procédés conventionnels de traitement thermique, fait que seule une mince couche est soumise au traitement. Les effets du traitement thermique par laser dépendent essentiellement du degré de contrôle de la distribution spatio-temporelle de la température

Grâce à cet avantage technique et économique

- limitation économique (rendement) et modulable des apports énergétiques
- 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.

Notre travail s'intéresser à l'étude de l'influence de type de laser sur le durcissement thermique des matériaux à l'état solide qui est la plus utiliser dans l'industrie, de par les avantages de ce type de traitement par rapport aux autres employés, et que sont la faible distorsion relevée, les faibles contraintes thermiques induites dans le substrat, la définition exacte de la zone à traiter, une grande flexibilité et une bonne reproductibilité .

Pour avoir un durcissement superficiel à l'état solide de bonne qualité cela nécessite de contrôler l'évolution de la température spatiale et temporelle dans le substrat traité. Le besoin d'atteindre une haute température rend le contrôle de celle de la surface très important.

Pour avoir un traitement plus rapidement celui introduit a une recherche d'une précision rehaussée et d'une commande de contrôle de processus.

Il existe plusieurs méthodes expérimentales qui utilisent les appareils et des méthodes techniques pour déterminer le profil de température ainsi que la microstructure du

durcissement tel que le pyromètre, thermocouple ... mais ces techniques expérimentales ont des inconvénients considérables.

La modélisation mathématique trouve la solution à ces problèmes, avec un bas coût et une prédiction meilleure de connaissance des propriétés qui peuvent être obtenues à tous les stades de développement du produit. Les applications larges de durcissements superficiels encouragent le développement de plusieurs modèles mathématiques selon des hypothèses simplificatrices et des descriptions des effets induits probables lors du TTL.

La présente étude développe une solution semi analytique basé sur la méthode de **GAVER-STEHFEST** de l'inversion numérique de la solution développée analytiquement dans le domaine de Laplace pour le profil de température du processus de traitement thermique superficiel pour un corps semi infini avec une condition de frontière convective sous l'effet du laser périodique de type signal carré , dans une direction unidimensionnelle, utilisant la théorie classique (Fourier), a pour objet d'étudier l'influence de type d'une gamme de lasers émis dans l'infrarouge tel que Nd :YAG , CO, CO₂ sur le traitement de surface des matériaux .

Chapitre *I*

**Laser et ses applications au
traitement thermique
superficiel**

I.1. Généralités sur les lasers :

I.1.1. Introduction historique :

Dans ce mémoire, nous nous sommes intéressés sur la technologie récente de laser. Ce développement méritant une connaissance plus ou moins succincte de la chronologie ayant conduit à cette explosion des applications du Laser.

L'histoire du laser est particulièrement intéressante. Elle débute, comme presque tout en physique du XXI^{ème}, en 1917 qu'A. Einstein (prix Nobel 1921) établit le concept d'émission stimulée en analysant une population fictive d'atomes à 2 niveaux d'énergie E_n et E_m , distants de $h\nu$, en équilibre thermique dans une enceinte à la température T . La statistique de Boltzmann définit la répartition des atomes entre les deux niveaux, et la loi de Planck fournit la densité spectrale du rayonnement électromagnétique du corps noir constitué par cette collection d'atomes.

Les phénomènes d'absorption et d'émission spontanée des photons d'énergie $h\nu$ sont pris en compte par Einstein, qui admet qu'à l'équilibre Thermodynamique le nombre, par unité de temps, de transitions de n vers m est égal à celui de m vers n . Dans ces hypothèses, Einstein démontre que la loi de Planck entraîne la nécessité du concept d'émission stimulée.

En 1940, Fabricant réalise probablement la première inversion de population dans ses mesures d'absorption de lumière entre deux états excités d'espèces gazeuses, au cours desquelles il parvient à désexciter rapidement le niveau le moins énergétique. Le laser aurait pu naître à l'aube de la Seconde Guerre mondiale si Fabricant (reconnu comme le grand-père du laser) avait pensé à placer le gaz dans une enceinte avec deux miroirs en bout.

Dans les années 1952/1954 le phénomène d'amplification stimulée est observé simultanément par les deux équipes de Townes, Gordon, Zeiger (États-Unis) et de Basov et Prokhorov (URSS), qui, pour cela, reçoivent simultanément le prix Nobel en 1964. En 1954, le jet moléculaire en sortie d'un four dans lequel se trouvent des molécules d'ammoniac (NH_3) excitées par collision, passe entre deux électrodes qui effectuent le tri des espèces excitées. Ces dernières sont envoyées dans une cavité résonnante et les expérimentateurs observent une émission dans un guide d'onde à $2,3 \times 10^{10}$ Hz. Le Maser (microwave amplifier by stimulated emission of radiation) est ainsi inventé.

Cela conduit, en 1958, Townes et Schawlow à élaborer le concept du maser à fréquences optiques, ou **laser** (*light amplification by stimulated emission of radiation*), à partir d'un milieu actif pompé optiquement placé dans un interféromètre de Fabry-Pérot, qui constitue la cavité résonnante. C'est en juillet 1960 que Maiman réalise le premier laser, sous forme de laser à rubis fonctionnant en mode libre (émission dite relaxée). Quelques mois plus tard, Javan fabrique le premier laser à gaz à émission continue.

Dans les années 60, les études portent largement sur le pompage optique, en particulier grâce à N. Blombergen et A. Kastler (prix Nobel en 1966). Le laser est analysé comme une machine de Carnot pour laquelle il est admis que le second principe de la thermodynamique n'est pas remis en cause, malgré de nombreuses hésitations au sein de la communauté scientifique. Au cours de cette période les différents types de laser sont à l'étude, les raies d'émission analysées et les rendements mesurés expérimentalement. [1]

I.1.2. Description généralités :

I.1.2.1. Principe de fonctionnement :

Les lasers se présentent sous des dimensions très différentes les uns des autres pour produire un rayonnement. La présence simultanée de trois éléments est nécessaire :

- un milieu actif
- un résonateur optique (une cavité résonante)
- une source de pompage.

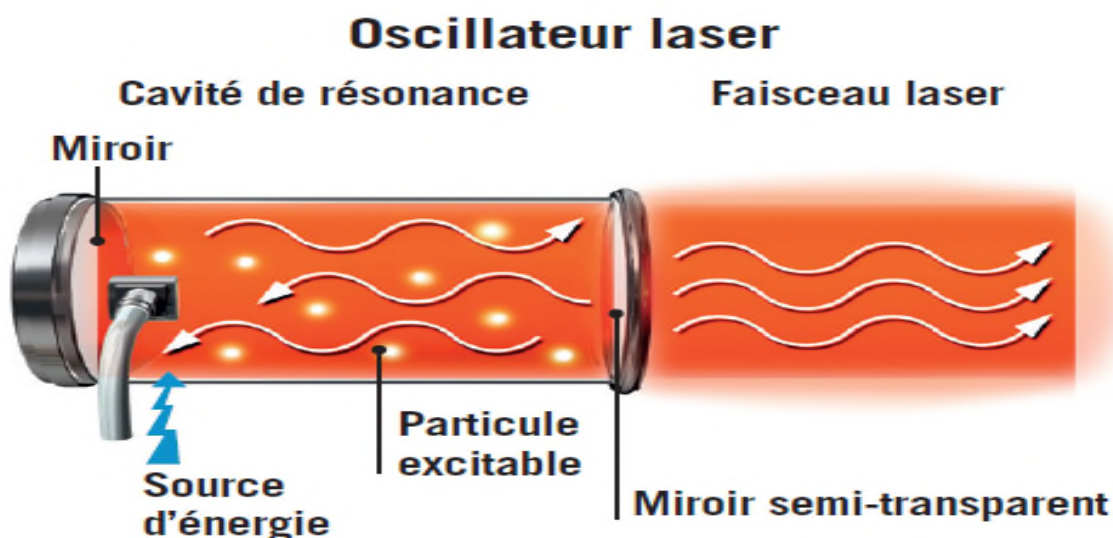


Figure I.1 : Mécanisme d'un laser.

Milieu actif : c'est un milieu qui possède une structure appropriée de niveau s'excitant facilement est pondérant la capacité de stocker l'énergie reçue de l'extérieur, que l'on va exciter ou pomper. C'est un milieu qui peut être solide, liquide ou gazeux.

Résonateur optique : C'est le dispositif, qui permet à la lumière de passer plusieurs fois dans le milieu actif, afin que les atomes soient de plus en plus excités. Ce système est composé de deux miroirs parallèles, entre lesquels est placé le milieu actif. Il est composé d'un miroir qui réfléchit tous les photons et un miroir qui laisse passer 1 à 10 % des rayons et qui réfléchit le reste. Mais le LASER fonctionne également grâce au phénomène d'inversement de population. En effet, afin d'augmenter le nombre d'émissions stimulées et donc d'augmenter la puissance du faisceau LASER, il faut qu'il y est plus d'atomes excités que d'atomes stables dans le milieu actif. Une source excitante va permettre d'élever ces électrons à un niveau d'énergie supérieur. On appelle donc ce phénomène l'inversement de population, qui sera réalisable grâce à **la source de pompage** qui permet d'envoyer de l'énergie dans le milieu actif. Cette énergie peut être de source électrique ou lumineuse. [2] [3]

1.1.2.2. Caractéristiques des faisceaux laser :

Monochromatique :

C'est à dire qui ne contient qu'une fréquence ou qu'une longueur d'onde bien déterminée. Le spectre de la lumière laser, à notre échelle d'observation ne comporte qu'une seule raie. Sa longueur d'onde est donc précise et unique.

Cohérence :

Il s'agit de la caractéristique la plus importante du faisceau laser, qui est elle-même la résultante des autres caractéristiques. Le rayonnement est dit cohérent dans le temps et dans l'espace, si l'on peut calculer la phase de l'onde et son amplitude, à chaque moment et à chaque endroit à partir des valeurs connues auparavant. On distingue la cohérence temporelle et la cohérence spatiale.

Divergence :

Les sources lumineuses conventionnelles émettent dans toutes les directions. Par conséquent, l'intensité décroît avec la racine carrée de la distance. Dans le cas des lasers, à cause des propriétés du résonateur, il y a émission de la lumière uniquement très près et parallèlement à l'axe optique de la cavité.

Densité de puissance :

L'intensité du faisceau laser peut être très grande car la puissance délivrée est focalisée sur une très petite surface. Le laser peut fonctionner en continu ou en impulsionnel. Pour le Mode impulsionnel, l'énergie est délivrée par une seule ou par une série d'impulsions répétitives. Étant donné que la durée d'une impulsion peut être très courte (10^{-9} s), la puissance crête est très grande (1 MW) même si l'énergie totale délivrée est très faible (10^{-3} J). [4] [5]

I.1.2.3.Type de laser :

On peut classer les lasers en groupe selon ces critères suivant :

- L'état du milieu actif : solide, liquide, gaz, ou plasma.
- La gamme spectrale de la longueur d'onde du laser : spectre évident, spectre (IR)
- La méthode d'excitation (pompage) du milieu actif : Pompage optique, pompage Electrique, etc...
- Selon les conditions de sécurité (classes 1, 2, 3A et B).

Généralement la classification de la source laser est faite selon la nature du milieu actif.[6]

I.1.3. L'interaction laser matière et application a l'usinage :

Les lasers ont un champ d'application très vaste couvrant de nombreux secteurs et de domaines variés que la métrologie, la médecine, ou la métallurgie apparus de longue année de développement. Le laser a trouvé un champ d'application très vaste dans l'industrie, il est devenu un outil couramment utilisé pour un grand nombre d'applications tels que le soudage, le perçage, le nettoyage, le marquage ou encore le traitement de surface. Le choix du laser utilisé pour ces différents processus dépend des mécanismes d'interaction entre le laser et la matière traitée. Ces mécanismes dépendent des paramètres techniques du laser, telles :

- de la source laser (longueur d'onde, temps d'interaction densité de puissance délivrée).
- paramètres liés au matériau (nature (métal, semi-conducteur, diélectrique), phase (solide, liquide ou gazeuse), propriétés physiques (optiques, thermiques), état de surface (nature chimique, rugosité)].

- paramètre liés a l'environnement (nature et pression de l'atmosphère de traitement).[7]

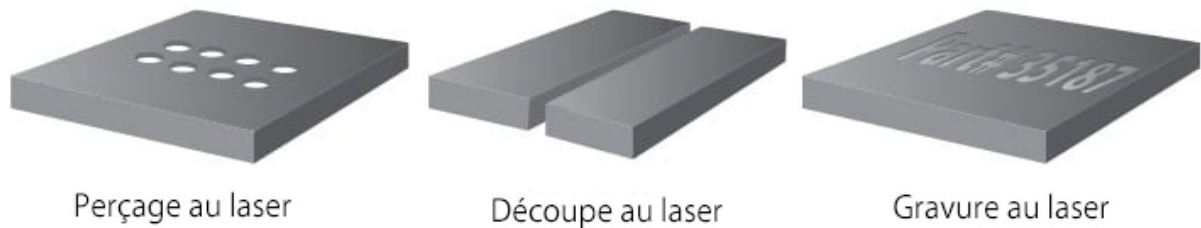


Figure I.2 : Les différentes applications du laser

I.1.3.1. Effets de l'interaction laser matière :

À l'interaction laser matière d'une façon générale un rayonnement laser intense induit sur la surface de matériau par absorption des photons induits, de nombreux effets complexes et indépendants introduisant et ces effets sont :

Un effet thermique : par propagation de la chaleur dans le matériau conduisant au chauffage, à la fusion ou à la vaporisation du matériau selon la densité de puissance (10^2 à 10^8 W/cm²) pour des temps d'interaction variant de la microseconde à la seconde. Ces effets thermiques sont utilisés pour les traitements de surface réalisés en phase solide ou liquide (durcissement, formation d'alliage), la découpe, le soudage, le perçage. Dans le cas où l'énergie matériau sont alors faibles car l'énergie est principalement stockée dans les particules enlevées. Ces effets sont utilisés pour le nettoyage et le décapage de surface, le dépôt (LPVD).

Un effet photochimique : provoquant des perturbations des liaisons interatomiques pouvant altérer les propriétés chimiques du solide, du gaz ou l'interface solide-gaz. Dans le cas où l'énergie des photons est de l'ordre de l'énergie de liaison du solide, le traitement pourra induire des ruptures de liaison en surface (traitement des polymères ou gravure du silicium en présence de chlore par laser excimère). Ces effets font principalement l'objet d'étude en laboratoire. Les principales applications concernent les secteurs de la microélectronique et de l'optoélectronique (dépôt et gravure avec des résolutions spatiales submicroniques).

Un effet mécanique : pour des durées d'impulsion de l'ordre de la dizaine de nanosecondes et des intensités sur la cible de quelques GW/cm^2 . Le plasma formé lors de l'interaction est intense et se détend dans l'espace en exerçant une pression sur la surface. Il en résulte la formation d'une onde de choc qui se propage dans le matériau et induit une déformation plastique et une mise en contrainte de la matière impactée (amélioration de la tenue en fatigue du matériau). On augmente le niveau et le temps d'application de cette pression sur la surface solide en interposant devant la cible un matériau transparent à la longueur d'onde du laser incident ce qui a pour effet de retarder la détente du plasma (traitement en milieu confiné). Les pressions générées à la surface de la cible peuvent atteindre plusieurs dizaines de kbars. Le phénomène est cependant limité pour des flux incidents supérieurs à $10 \text{ GW}/\text{cm}^2$ à partir desquels le matériau de confinement devient absorbant (claquage dans le diélectrique).[8]

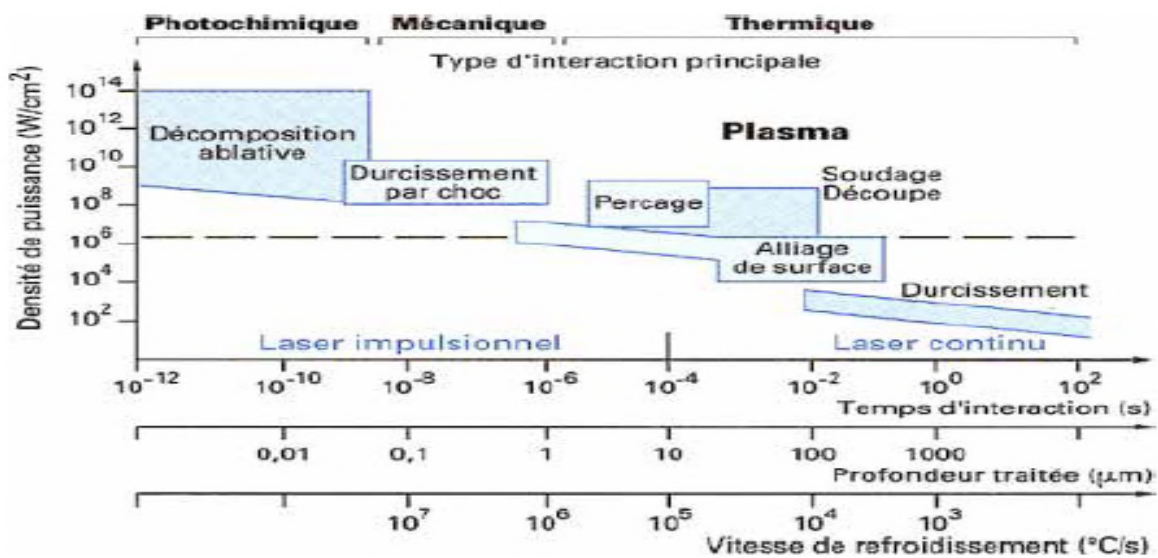


Figure I.3 Applications industrielles des faisceaux lasers.

I.1.4. Traitement superficiel par laser :

I.1.4.1. Le rôle de traitement thermique superficiel :

Les traitements thermique superficiel sont des technique de traitement thermique d'un matériau visant d'améliorer l'aspect externe (rugosité, couleur brillance), d'augmenter la durée de vie est la fiabilité d'un produit ou de métriser les performances d'une pièce ou bien d'apporter des modifications mécanique ou physique (conductibilité électrique, user, Frottement...).[5][8]

I.1.4.2. Source de laser utilisé pour les traitements superficiels

Dans ce tableau on donne les caractéristiques principales des lasers les plus utilisés dans l'industrie qui sont par ailleurs résumées dans le tableau suivant :

Tableau I.1 : Les caractéristiques principales des lasers les plus fréquents.

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

- **Laser à CO₂**

Les longueurs d'onde d'émission des lasers à CO₂ sont 10,6 μm (et éventuellement 9,6 μm), c'est-à-dire l'infrarouge lointain. Le laser à CO₂ peut fournir un faisceau laser d'une puissance de quelques watts jusqu'à 25 kW et même plus. C'est le laser le plus utilisé dans l'industrie. De plus, le laser à CO₂ a un rendement énergétique plus élevé que celui des autres lasers (15 % en plus), ce qui présente aussi un avantage économique. Le milieu actif d'un laser à CO₂ est un mélange de CO₂ (6 % en volume), de N₂ (12 % en volume) et de He (82 % en volume). Néanmoins, le rendement de ce type de laser peut être optimisé en choisissant convenablement la composition du mélange gazeux. Comme dans la plupart des lasers à gaz, l'excitation se fait par une décharge électrique. Cette décharge excite les molécules de N₂ qui vont transférer leur énergie aux atomes de CO₂. Ce type de laser peut aussi fonctionner en mode impulsionnel [impulsions par hachage du faisceau ou impulsions créées par décharge

(mode super pulsé)], en délivrant la puissance disponible avec une fréquence de l'ordre de 1 kHz.

- **Laser YAG-Nd³⁺**

La longueur d'onde d'émission des lasers YAG-Nd³⁺ est 1,06 μm c'est-à-dire que ce laser émet dans l'infrarouge proche. Le néodyme Nd est un lanthanide trivalent. L'ion Nd³⁺ est utilisé comme dopant dans un cristal dont le plus connu est un grenat d'yttrium et d'aluminium (Y₃Al₅O₁₂), en abrégé YAG (Yttrium Aluminium Garnet). La concentration atomique de Nd est généralement comprise entre 0,6 et 1,2 %. Le rendement énergétique de ce laser, qui peut atteindre 3 %, est le plus élevé des lasers à solides. Les lasers YAG-Nd³⁺ peuvent fonctionner en mode continu et en mode impulsionnel (relaxé ou déclenché). En fonctionnement continu, les lasers YAG-Nd³⁺ délivrent des puissances comprises entre 1 et 20 W en mode fondamental TEM₀₀ et 10 à 1 200 W lorsque plusieurs modes transversaux sont présents. En fonctionnement Impulsionnel, les lasers YAG-Nd³⁺ délivrent :

— en régime déclenché (Q-switched ou giant pulse), des impulsions d'une puissance crête très élevée (de l'ordre du GW) et dont la durée est de 15 à 700 ns ;

— en régime relaxé (non-Q-switched ou long pulse ou pulsed laser), des impulsions de quelques joules à une fréquence variant de 1 à 200 Hz avec des durées comprises entre 0,1 à 20 ms, soit une puissance moyenne de 400 W.

- **Lasers à excimères**

Des lasers à vocation purement scientifique, les lasers à excimères, entrent aujourd'hui dans le domaine des applications industrielles. Le mot excimères est une contraction des mots anglo-saxons *excited dimer* qui s'explique par l'utilisation dans la cavité résonnante du laser, d'un mélange d'un gaz rare et d'un halogène, excité électroniquement. De telles molécules, qui dans leur état fondamental électronique ne sont pas liées ou sont faiblement liées, vont réagir ensemble lors d'une décharge UV haute tension préionisée et pulsée. La cinétique de la réaction est complexe. La durée de vie de la molécule excitée AB* n'est pas plus longue que 10 ns. Après relaxation, les molécules excimères se dissocient immédiatement. Les longueurs d'onde d'émissions dans l'UV, qui sont déterminées en fonction de la composition du mélange gazeux, sont : XeCl : 308 nm XeF : 351 nm KrF : 248 nm ArF : 193 nm.

Les lasers à excimères fonctionnent uniquement en mode impulsionnel. L'évolution de la puissance moyenne au cours des dernières années est très rapide. Les caractéristiques principales d'une source commerciale de ce type de laser sont les suivantes : [5]

- énergie par impulsion : 0,1 à 4 J ;
- puissance moyenne : 30 à 750 W ;
- fréquence d'impulsions : 20 à 500 Hz ;

I.1.4.3. Place est enjeux du traitement thermique de surface par laser

Ou cour de la concurrence industrielle d'aujourd'hui, c'est un avantage important que de pouvoir réaliser des produits qui ne s'usent pas, résistent à la corrosion, conservent dans le temps leurs propriétés mécaniques, électriques, optiques ou thermiques. Grâce aux réponses toujours plus précises qu'ils apportent à des situations industrielles toujours plus diversifiées et exigeantes, les traitements de surfaces sont devenus essentiels, et ont permis de répondre la plupart du temps à ce souci d'optimisation des propriétés superficielles [9][10].

Une étude récente, menée aux États-Unis, en Europe et au Japon sur les développements prioritaires dans le domaine des matériaux, classe en tête de liste la technologie des traitements superficiels, Les enjeux techniques concernent :

- l'amélioration de la résistance à la fatigue sous certains types de sollicitations.
- l'amélioration de la résistance à la corrosion simple ou à la corrosion sous contrainte.
- l'amélioration de la résistance à l'usure.

Les sources de chaleur sont suffisant pour permettre les traitements superficiels est sont de deux Type suivant :

Les Sources classiques: chalumeau, inducteur à courant ..., qui présentent deux inconvénients remarquables :

- Une densité d'énergie de chauffage faible.
- Un temps de mise en température relativement long.

C'est parce que la nécessité d'apport rapide d'énergie thermique avec une limitation de la diffusion thermique et un confinement des effets structuraux imposés, les chercheurs trouvent d'autres sources qui répondent aux problèmes.

Les Sources nouvelles: faisceau laser, faisceau d'électrons, torche à plasma, constituent une solution à ces deux inconvénients, grâce à leurs extrême puissance et localisations énergétiques, elles permettent l'obtention de structures originales et nouvelles, difficiles ou impossibles à obtenir par d'autres moyens.

Dans ce contexte on peut distinguer deux types de traitement de matière par faisceau laser : Traitement de matière surfacique et Traitement de matière volumique.

Tableau I .2 : avantages et inconvénients de quelques traitements thermiques surfaciques.

Procédés	Avantages	Inconvénients
Introduction	<ul style="list-style-type: none"> - Taux du processus rapides -Le coût des investissements Inférieur à celui du laser - Large zone de couverture 	<ul style="list-style-type: none"> -Les forces électromagnétiques peuvent gâter la surface. -Invention de bobines complexes pour les travaux spécifiques. (augmentent le coût).
Flamme	<ul style="list-style-type: none"> - Le coût des investissements Inférieur à celui du laser - Bon marché, flexible et mobile. 	<ul style="list-style-type: none"> -Puissance énergétique moyenne. -Reproductibilité faible. -Un temps de mise en température relativement long. -Problèmes liés à l'environnement
Faisceau d'électron	<ul style="list-style-type: none"> -Haute intensité d'énergie ($10^8 - 10^{10}$ w/cm²). - La fraction de déformation est minimale. - Durcissement sélectif. 	<ul style="list-style-type: none"> - Haut cout d'investissement. -Couches absorbantes nécessaire. - Problème de sécurité. - La maintenance faite par des experts
Laser	<ul style="list-style-type: none"> - Haute intensité ($10^8 - 10^{10}$ w/cm²). - Aucun contact mécanique entre le substrat et l'outil. - Pas d'exigence de vide (atmosphère, gaz...) - Traitement rapide. - Durcissement sélectif - Déformation minimale - Le travail précis et local 	<ul style="list-style-type: none"> - Haut coût d'investissement. - Exigence de vide. - Taux de rendement bas. - Hauts frais d'usinage

I.1.4.4. Cycle thermique de traitement superficiel

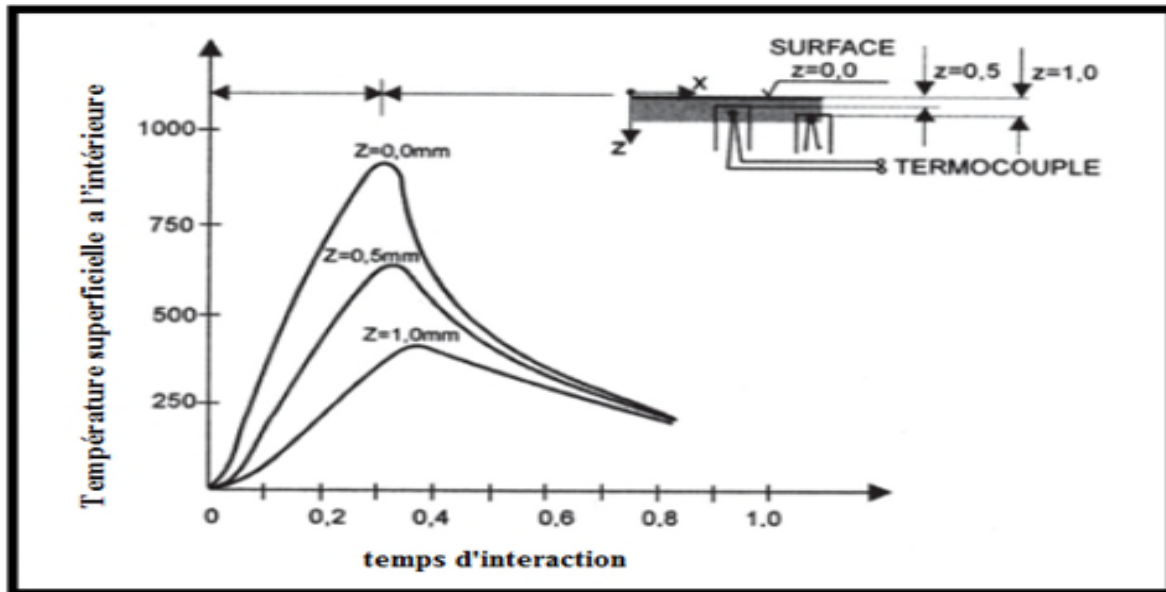


Figure I.4 : Cycle thermique de traitement superficiel créé par laser.

La figure I. 4 montre les cycles de température du chauffage et de l'auto-refroidissement au laser. Un cycle de température a été enregistré par des thermocouples montés à la surface et à l'intérieur à certaines profondeurs de la pièce. Dans ce cas, le faisceau laser avec son axe optique se déplaçait directement à travers les centres des thermocouples insérés dans certaines profondeurs. Un cycle thermique peut être divisé en cycle chauffage et cycles de refroidissement. Les variations des cycles de température dans les profondeurs individuelles indiquent que: [12]

- Les températures maximales ont été obtenues à la surface et dans les profondeurs individuelles.
- La température maximale obtenue diminue en profondeur.
- Le temps de chauffage est atteint à la température maximale obtenue ou juste après.
- Plus la température maximale est élevée, plus le temps de chauffage est long.
- Dans les profondeurs individuelles, les différences de température sont plus grandes dans le chauffage que dans le refroidissement.
- Par conséquent, dans les profondeurs individuelles, les temps de refroidissement sont considérablement plus longs que les temps de chauffage pour obtenir, par exemple, une température maximale.

I.2. Traitement de matière surfacique

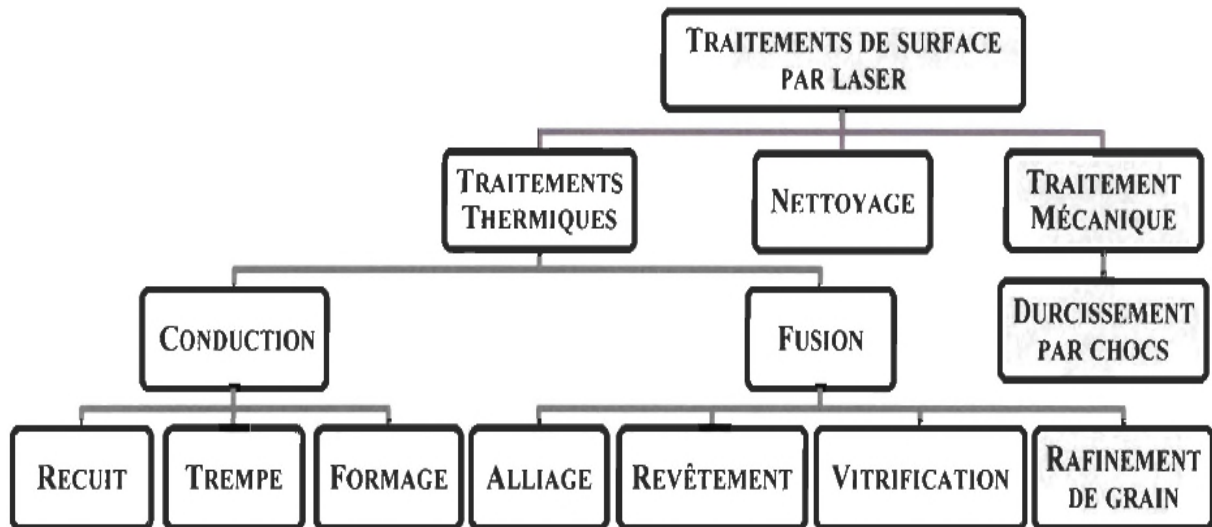


Figure I.5 : Principaux traitements de surface praticables par le laser

Les lasers ont de multiples techniques de traitement de surface. Elle peut être réalisée soit par un effet thermique ou effet physique. Grâce à la variété des effets, il apparaît que le laser est capable d'offrir des solutions variées qu'une modification de la microstructure de matériaux même : grenailage, fusion de surface, la trempe superficielle chez les aciers, d'autre concernant un changement de composition de surface, ce qui veut dire la nitruration, cémentation, carbonituration.

Il y a deux catégories de traitement de surface par irradiation de laser qui sont distinguées :

- Traitement de surface avec apport de matière
- Traitement de surface sans apport de matière

I.2.1. Traitement de surface sans apport de matière

Le traitement superficiel sans apport de matière peut être obtenu, soit d'une transformation structurale à l'état solide, par suite d'un effet de trempe superficielle, soit d'une fusion superficielle, suivie d'une resolidification rapide du matériau irradié.

I.2.1.1. Trempe superficielle

La trempe elle consiste en un chauffage et un maintien à une température appropriée, suivi d'un refroidissement suffisamment rapide pour laisser subsister une structure qui n'existe normalement pas à l'équilibre à la température ambiante. Dans le cas des aciers, le refroidissement rapide provoque la transformation plus ou moins totale de l'austénite en martensite et éventuellement en bainite.

La plupart des traitements thermiques ou thermo-chimiques nécessitent en fin de traitement l'utilisation de bains de trempe. Selon la nuance du matériau à traiter et la finalité demandée, les fluides utilisés sont : [15]

- l'eau éventuellement additive.
- des solutions de polymères dans l'eau.
- des huiles à différentes températures.
- Les sels.
- le plomb.

I.2.1.2. Fusion superficielle

Un 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)

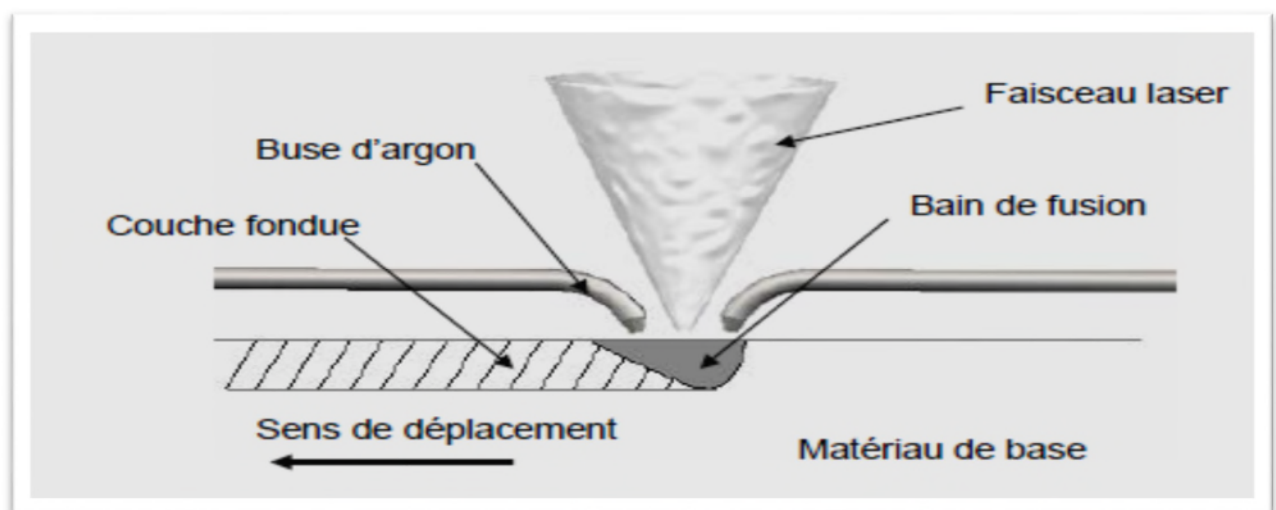


Figure I.6 : Fusion superficielle par irradiation laser [13]

I.2.1.3. Traitement avec vaporisation

Dans traitement avec vaporisation On utilise des lasers pulsés (Co₂, Nd-YAG, excimères), qui délivrent une densité de puissance instantanée très élevée (de 10⁶ à 10¹¹ W.cm⁻²) pendant des impulsions de courte durée (10⁻⁸ à 10⁻⁶ seconde). Ces impulsions répétées entraînent une vaporisation rapide de la surface. 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 par les ondes de choc générées par l'expansion du plasma, lesquelles interagissent avec la surface, ou des effets explosifs dus à une absorption d'énergie très importante sur un temps très bref. Les applications concernent le nettoyage (élimination de graisses ou de salissures diverses) ou le décapage des surfaces (peinture revêtement, oxyde,...) ainsi que la modification d'états de surfaces (texture des surfaces, marquage dans les industries de la microélectronique, de l'automobile) sans modification des propriétés du matériau en profondeur.

I.2.2. Traitement de surface avec apport de matière

Traitement de surface avec apport de matière par irradiation laser est un traitement visant à améliorer les propriétés de surface du matériau par une modification chimique. Pour cela, avant ou en cours de traitement, d'autres matériaux ou éléments d'apport sont ajoutés soit à l'état gazeux en atmosphère contrôlée, soit sous forme solide, afin d'élaborer des revêtements ou bien des composites ou alliages superficiels. [13]

I.2.2.1. Formation d'un revêtement

La formation d'un revêtement est l'irradiation avec fusion du matériau d'apport est un procédé au cours duquel est incorporé au substrat superficiellement fondu, un matériau extérieur, afin d'améliorer les propriétés de surface du substrat initial (résistance à l'usure, à l'oxydation ou à la corrosion).

Dans le cas de l'élaboration d'un revêtement par fusion laser, le matériau ou les matériaux d'apport doivent passer par l'état liquide tout en évitant la fusion du substrat sur une épaisseur trop importante afin de réduire le plus possible la dissolution du matériau du substrat dans le bain de fusion et d'altérer le moins possible le revêtement. Le matériau

d'apport est déposé au préalable sur le matériau à revêtir (Figure I.7) ou bien il est injecté à l'état de poudre.

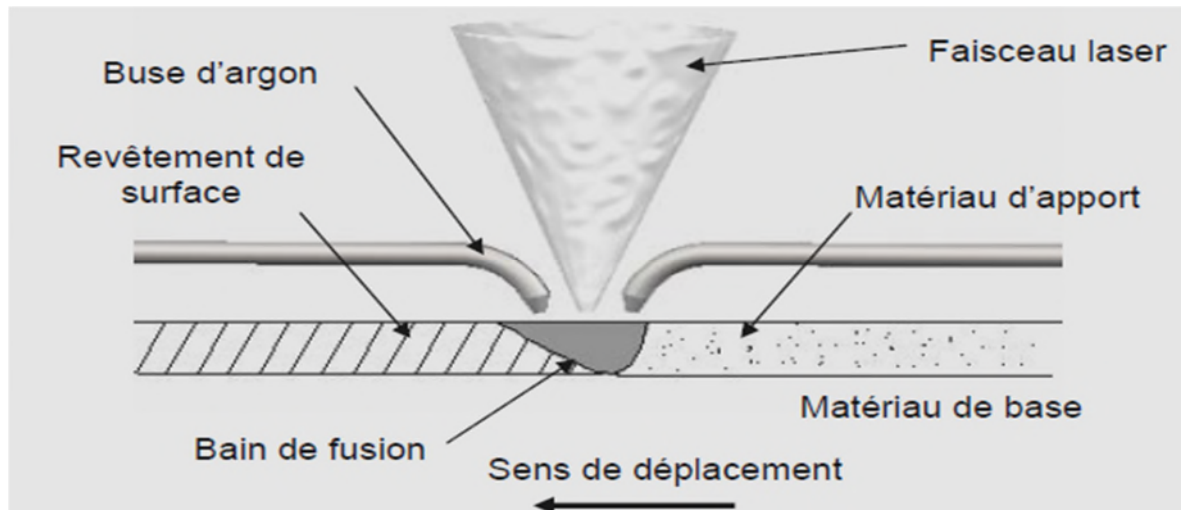


Figure I.7 : Formation d'un revêtement de surface avec pré dépôt d'un matériau D'apport [13]

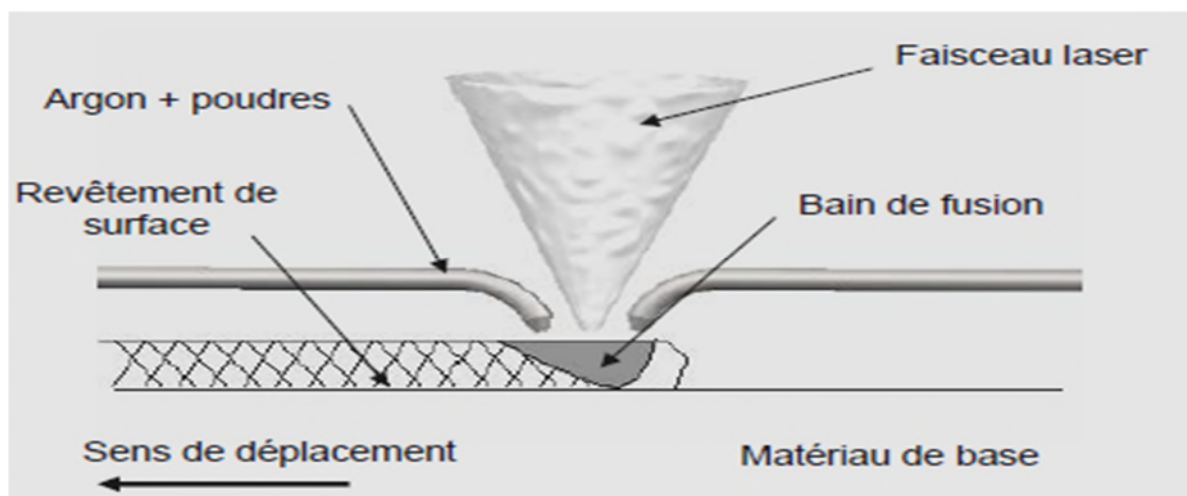


Figure I.8 : Formation de revêtement de surface avec injection de poudre Pulvérulente sous le faisceau laser [13]

I.2.2.2. Formation d'un composite superficiel

Des particules de renfort sont injectées dans le métal fondu superficiellement. Ces particules s'incrusteront, sans fondre, dans le bain de fusion. Après solidification du métal, de telles particules de type carbure ou nitrure induisent une augmentation sensible de la dureté

Dans la zone traitée par fusion. (Figure I.9)

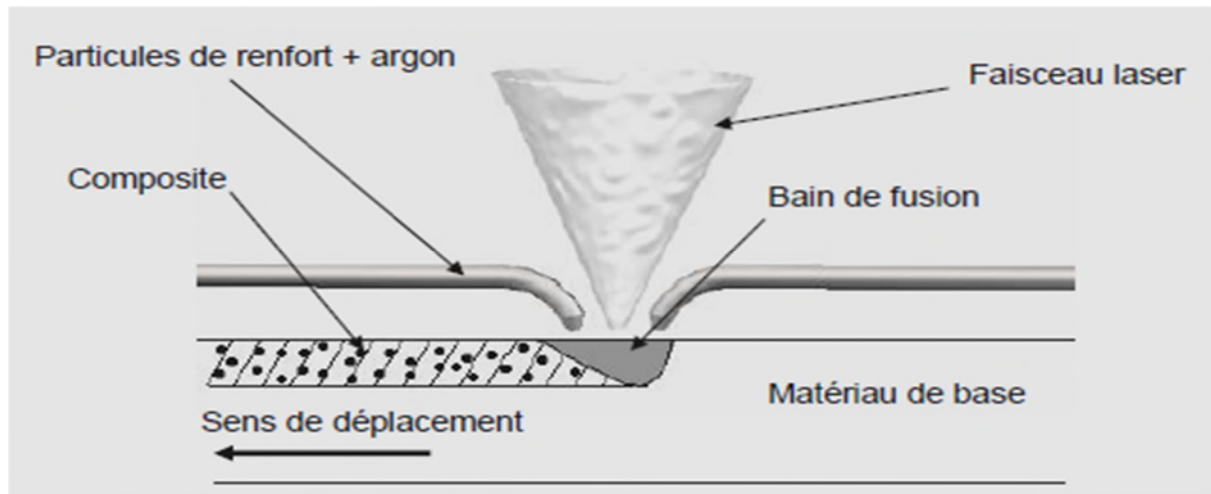


Figure I.9 : Formation d'un composite superficiel [13]

I.2.2.3. Formation d'un alliage superficiel

Le procédé est sensiblement le même que dans le cas de la formation d'un revêtement, si ce n'est que la fusion d'une couche relativement épaisse du substrat est recherchée. Cette partie du substrat doit incorporer le gaz réactif (Figure I.10) ou bien l'élément d'addition pulvérulente injecté sous le faisceau (Figure I.11) ou déposé préalablement (Figure I.12), afin de former un alliage de surface après solidification. [14]

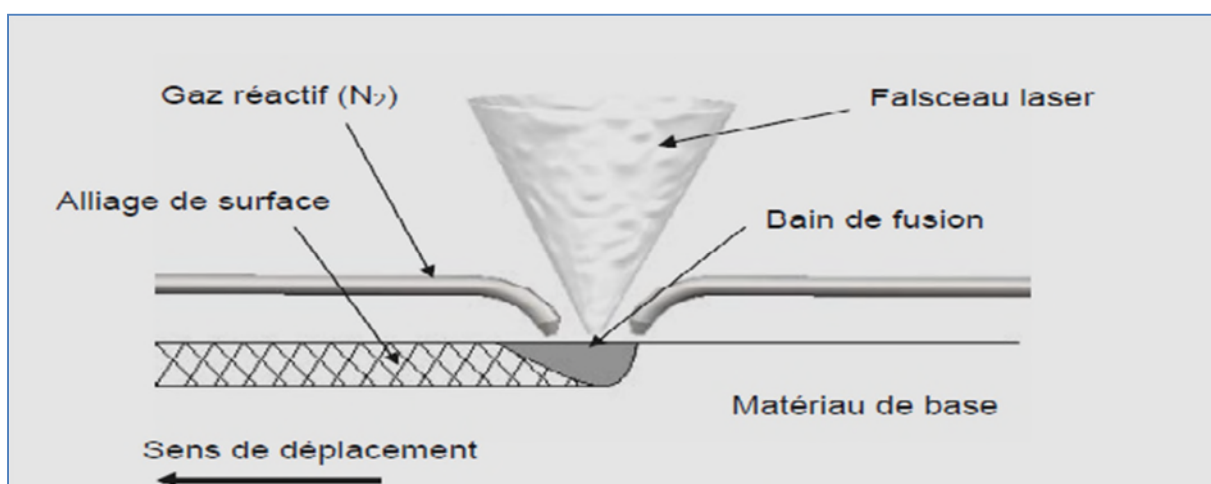


Figure I.10 : Formation d'un alliage de surface par injection de gaz réactif. [13]

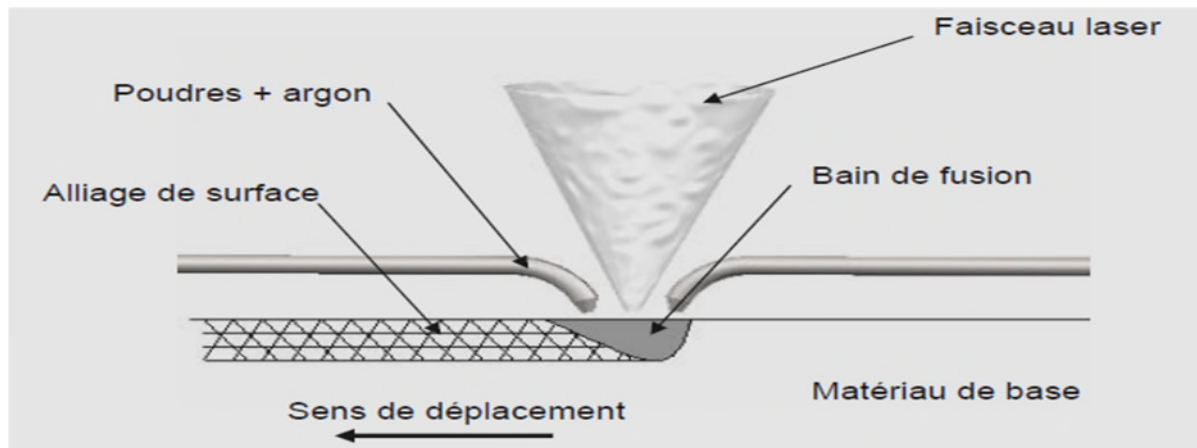


Figure I.11 : Formation d'un alliage de surface avec injection de poudres additives [13]

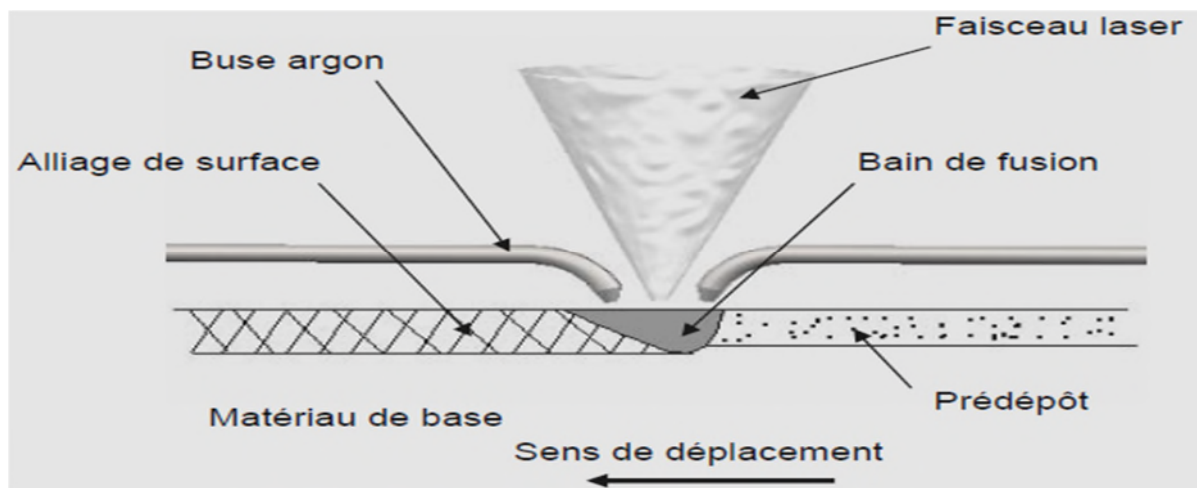


Figure I.12 : Formation d'un alliage de surface à partir d'un pré-dépôt d'éléments d'addition [13]

Conclusion

En quelques années, les lasers ont passé du statut d'appareil de laboratoire pour les physiciens à celui de système industriel très répandu. Les lasers trouvent des applications larges dans l'industrie de la métallurgie, ils offrent un champ d'applications très vaste concernant de nombreux secteurs industriels. Ils jouent un rôle très important grâce à la diversité des effets induits dans l'ensemble des traitements de surface par laser. Ils ont de multiples techniques de traitement de surface, elles peuvent être réalisées soit par un effet thermique ou effet physique. Grâce à la variété des effets, il apparaît que le laser est capable d'offrir une solution variée qu'une modification de la microstructure de matériaux.

Chapitre ***II***

Contrôle de processus

II.1. Introduction

La nécessité d'atteindre la température la plus élevée autorisée rend le contrôle de la température de surface très important. En particulier, le contrôle du processus est nécessaire pour les pièces complexes à section transversale variable. Pour obtenir un traitement thermique de bonne qualité, il est nécessaire de contrôler les évolutions de température dans le temps et dans l'espace. Généralement, il est nécessaire d'obtenir des propriétés presque constantes sur une grande surface de matériau.

Il existe plusieurs méthodes expérimentales utilisant des appareils et des méthodes techniques pour déterminer le profil de température ainsi que la microstructure du durcissement. Pour cela, de nombreuses mesures expérimentales ont été effectuées. Par exemple, Xu et al. ont introduit le pyromètre avec une résolution temporelle de l'ordre des nanosecondes. Ils mesuraient la température de la zone de transition d'un matériau solide chauffé par un rayon laser excimères. IGNATIEV ET AL. ont utilisé un ensemble de pyromètres pour contrôler le cycle thermique en temps réel, comme le montre l'exemple du laser Nd: YAG agissant sur des matériaux métalliques et céramiques. [16]

II.2. Methodes expérimentales

Les pyromètres sont des appareils parfaits pour effectuer des mesures de la température sans contact et avec précision. Dotés de mécanisme optique les pyromètres sont un outil sûr pour mesurer avec précision la température. Mais les puissances et les longueurs d'onde utilisées varient beaucoup d'une application à l'autre. De plus, les matériaux sur lesquels est appliqué le laser (plastique, métal, etc.) ont des comportements très différents.

Pour mesurer la Température, il existe donc plusieurs types de pyromètres, qui se distinguent notamment par la longueur d'onde et le temps nécessaire pour faire la mesure. Voici les Trois modèles l'important de catalogue d'Impact (qui couvre des plages de 0,7 à 14 μm) sont couramment utilisés.

- L'Igar 12-LO est un pyromètre bi-chromatique (1,45 et 1,8 μm) avec fibre optique (Jusqu'à 30 m de long), utilisable pour des plages de mesure comprises entre 300 et 2 000 °C. Le temps de mesure est inférieur à 2 ms. Ce capteur peut travailler sur des cibles aussi petites que 0,45 mm.
- L'IPE 140 travaille dans la plage 3- 5 μm et il est quant à lui prévu pour des mesures entre 5 et 1 200 °C et des cibles de 0,7 mm seulement. Son temps de réponse est de l'ordre de 1,5 ms.

- L'IP 140, enfin, travaille de 2 à 2,8 μm et il offre une plage de mesure entre 50 et 1 300 °C. Il est utilisable sur des cibles encore plus petites, de 0,25 mm. Son temps de réponse est similaire au précédent (1,5 ms). [17]

L'essentiel

- _ Le laser et le pyromètre laser travaillent tous deux dans l'infrarouge
- _ Le pyromètre ne doit pas être influencé par le laser
- _ Il lui faut être capable de mesurer des cibles très petites
- _ Le temps de réponse est également un paramètre important
- _ En plus des applications de recherche, l'utilisation du pyromètre peut être envisagée
Pour contrôler le pilotage d'un processus laser ou la qualité du travail réalisé (chapitre 2)

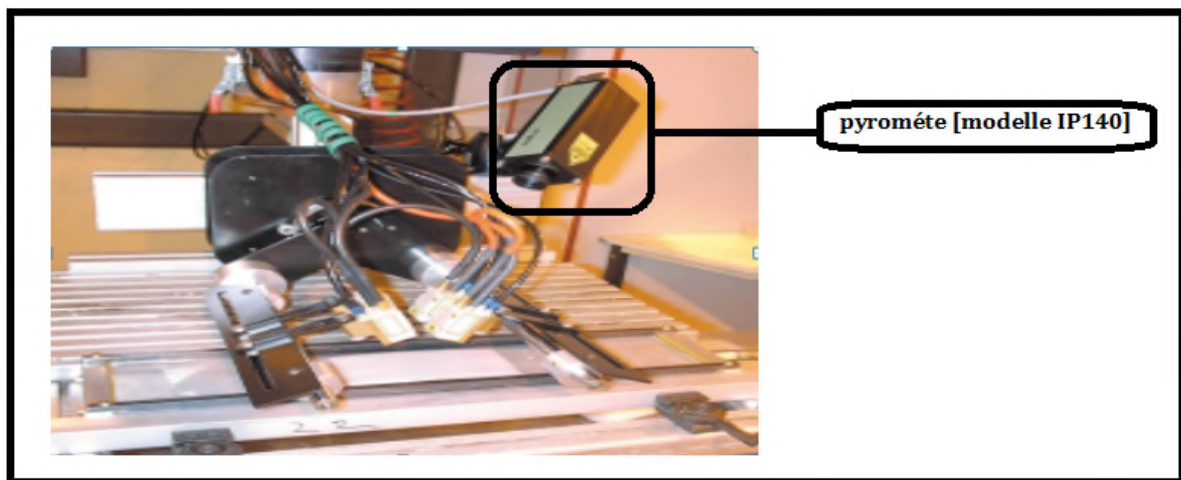


Figure II.1: mesure de la température au point d'impact du faisceau avec le pyromètre infrarouge IP140.

Les inconvénients de méthodes expérimentaux :

- Ceux sont des techniques coûteuses
- Difficile de mesurer la température en profondeur
- Certaines grandeurs ne peuvent pas être connues ou alors de manière très indirecte (gradient thermique, la vitesse locale de refroidissement, le temps local de solidification.....)
- Ne peuvent pas prédire les propriétés du substrat en cours du traitement, ce qui pose une difficulté de contrôle de procédé.

II.3. La modélisation mathématique et la simulation numérique

La modélisation mathématique et la simulation numérique ont pris une importance considérable ces dernières années dans tous les domaines de la science et des applications industrielles (ou science de l'ingénieur). La modélisation mathématique est l'art (ou la science selon le point de vue) de représenter ou d'interprétation abstraite de la réalité physique qui est accessible à l'analyse et au calcul.

La simulation numérique permet de calculer sur ordinateur ses modèles et de simuler la réalité physique. La simulation de procédé est de plus en plus utilisée par les industries 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.

La modélisation et la simulation d'un mécanisme ou d'un système a pour but de décrire mathématiquement son comportement afin de le voir «fonctionner» sur le papier ou à l'écran à travers ses équations. Les résultats du calcul sont numériques ou graphiques on peut même visualiser les mouvements. Cette méthode offre de nombreux avantages:

- elle permet d'étudier le comportement d'un prototype et d'apporter les corrections Nécessaires avant de le réaliser, d'où gain de temps et d'argent;
- elle permet parfois d'éviter de faire des mesures trop coûteuses ou même impossibles sur l'objet réel (grandes machines, simulation d'accidents);
- elle permet de faire «fonctionner» le système dans des situations extrêmes sans aucun danger, ni frais;
- elle permet de découvrir des effets inattendus.

En général le transfert thermique se fait selon trois modes : conduction, convection et rayonnement. Le modèle doit être, prédictif c'est-à-dire qu'il doit permettre de prévoir dans une certaine mesure le résultat d'une expérience. [18]

II.3.1. La Modélisation du TTL

La modélisation du traitement thermique s'appuie sur la résolution de l'équation de la chaleur dans les conditions du traitement Laser. Il convient de prendre en compte un certain nombre de facteurs, tels que: le profil d'intensité du faisceau, la propriété d'absorption de l'énergie superficielle à la lumière, les conditions aux limites de la pièce et la modification de la conductivité thermique en fonction de la température. [19]

II.3.2. Condition aux limites spatiales et temporelles

Pour déterminer la répartition de la température dans un milieu, il est nécessaire de résoudre le problème en forme de l'équation de chaleur. Cependant, une telle solution dépend des conditions physiques existant aux frontières du milieu, si la situation est dépendante du temps, les conditions existant dans le milieu à un moment initial. En ce qui concerne les conditions limites, il y a plusieurs possibilités communes qui sont simplement exprimées en mathématiques. Et si l'équation de chaleur est le deuxième ordre dans les coordonnées spatiales, deux limites conditions doivent être exprimées pour chaque coordonnée nécessaire pour décrire le système. Parce que l'équation est de premier ordre dans le temps, cependant, une seule condition, appelée la condition initiale. [20]

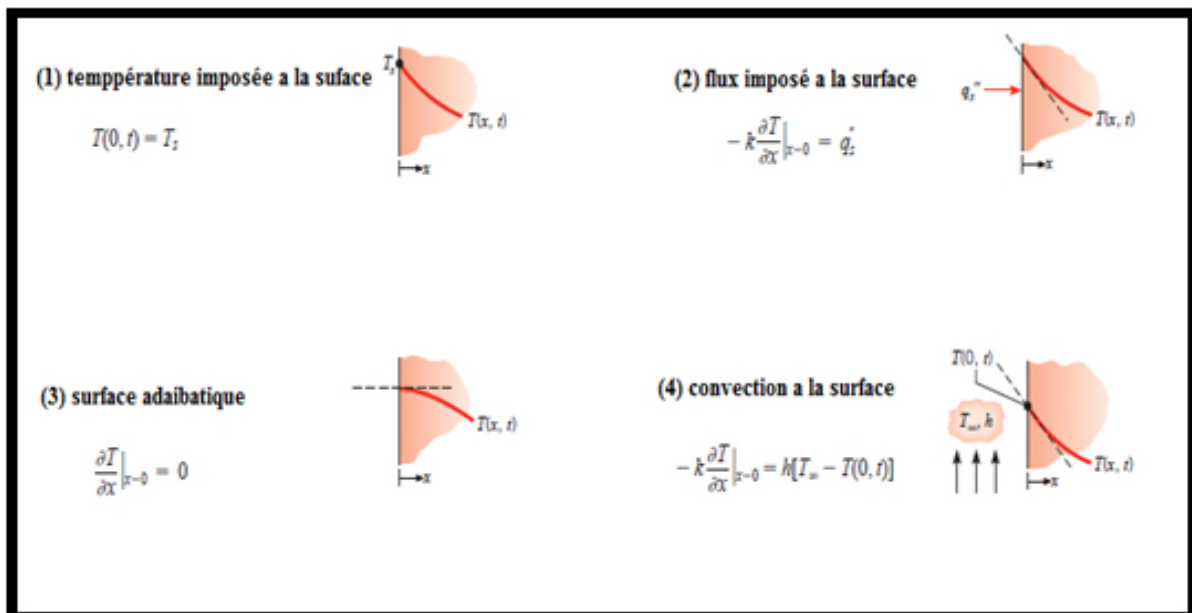


Figure II.2 : Exemple de condition aux limites

II.3.3. Les Modèles de TTL

L'efficacité du traitement passe, en premier lieu, par la capacité à maîtriser les évolutions spatio-temporelles des champs de températures induits dans le matériau. Ces évolutions, qui conditionnent la cinétique de chauffe ainsi que la profondeur et la largeur de la zone traitée, dépendent des paramètres suivants :

- la puissance du Laser et la taille du faisceau
- l'interaction du faisceau avec le matériau : l'absorption par la surface et la durée d'interaction
- les transferts thermiques : les propriétés thermo-physiques du matériau (conductivité thermique, capacité thermique, chaleurs latentes de changement de phase) et les pertes en surface par rayonnement et par convection

La modélisation mathématique est devenu un outil incontournable ces dernières années dans tous les domaines de la science et des applications industrielles ce qui a permis le développement de plusieurs modèles de TTL selon les hypothèses simplificatrices et se sont contentés d'une description probable des effets induits. Et on peut distinguer deux modèles essentielles selon la méthode de résolution.

- les modèles analytiques
- les modèles numériques

À l'état solide dans le domaine de validité de la théorie de Fourier Les modèles de traitement superficiel ont reçu une attention accrue ces derniers temps. Cette théorie est valable dans les conditions suivantes :

- Si l'intensité des faisceaux laser ne dépasse pas 10^{12} W/m².
- Dans les pulsations laser courtes, La théorie de Fourier peut plus déterminer correctement le profil de la température dans le substrat si la durée de l'interaction est inférieure à la nanoseconde.

Les modèles basés sur d'autres théories (la théorie cinétique des électrons, la théorie de double retard de phase ...) Sont étudiées brièvement dans les articles. [21]

La modélisation consiste à remplacer le système réel par un objet physicomathématique équivalent, ayant le même comportement que le système réel. C'est une abstraction construite pour répondre au but poursuivi. Un même système peut donner lieu à plusieurs modèles, selon les effets qu'on veut étudier.

La démarche pour construire et utiliser un modèle passe par huit étapes:

1. Fixer clairement le but poursuivi.
2. Remplacer les éléments réels par une abstraction physico-mathématique convenablement adaptée au but poursuivi.
3. Simplifier le modèle en éliminant tout ce qui n'a pas ou très peu d'effet sur le Phénomène étudié.
4. Mettre le modèle en équations.
5. Résoudre les équations, étudier numériquement les résultats, visualiser sur des Graphes ou à l'écran.
6. Faire une analyse de sensibilité des paramètres.
7. Étudier plusieurs variantes.
8. Tirer les conclusions intéressantes pour la construction. [18]

II.3.4. Résolutions des modèles analytiques

Blackwell est que le point de température maximale (avant le changement de phase se produit à la surface exposée) se trouve à l'intérieur du corps en raison de la perte de chaleur à l'environnement. Nous notons que pour un matériau qui se développe sur la phase de changement et le changement de phase initial se produit à l'intérieur du corps au lieu de la surface exposée, alors l'explosif l'enlèvement de matière est prévu. Blackwell a enquêté sur cet enlèvement de matière phénomène analytique en calculant la température profil dans un corps semi-infini avec une exponentielle en décomposition (avec position) source et convective condition limite. Il a montré que le l'emplacement de la température maximale est une fonction forte des paramètres sans dimension tels que Biot et Numéros de Fourier. [22]

ZUBAIR S. Met 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, mais cette fois, ils discutent la résolution de l'équation de transfert pour une source laser dépendant du temps pour deux cas, pour une source laser

instantanée modelée par l'impulsion de Dirac, et comme deuxième cas, une impulsion laser dépendante du temps de forme exponentiel de type :

$I=I_0 \exp (-\lambda^2 t)$ elle exprime une pénétration exponentielle dans le matériau. La température et le flux de la chaleur réduits comme des fonctions des paramètres adimensionnels sont calculés et présentés sous forme graphique. Quelques cas particuliers d'intérêt pratique sont aussi discutés. [22]

Yilbas et al Ils ont considéré un électron approche de la théorie cinétique lors de la modélisation du processus de chauffage. Ils ont observé des oscillations de la température de surface en raison de pulsations laser. La solution en forme fermée à l'impulsion de chauffage laser permet un pour identifier facilement les paramètres affectant à travers un expression analytique développée entre la température et Les paramètres. En conséquence, la solution sous forme fermée pour le chauffage répétitif par impulsions laser devient fructueux lors de l'examen la possibilité de chauffage à température constante en surface par un processus répétitif de chauffage par impulsions laser. Dans la présente étude, chauffage répétitif par impulsions laser de l'acier avec une la condition limite à la surface est considérée. Une forme fermée La solution pour le procédé de chauffage au laser est obtenue à l'aide d'un Méthode de transformation de Laplace. Les conditions pour constant la température de chauffage à la surface sont étudiés et le pouls paramètre (β_0 / γ_0) entraînant la possible stabilisation de la température la réalisation à la surface est discutée. [23]

Rozzi et al Ils ont modelé le processus de chauffage au laser et a obtenu une solution pour augmentation de la température dans le substrat selon une méthode approximative. Ils ont indiqué que leurs prédictions concordait bien avec les résultats expérimentaux, en particulier dans la région de surface. Lors du traitement laser des surfaces métalliques, un le gaz auxiliaire est utilisé. Cela est dû au fait que le gaz auxiliaire a deux effets en fonction du choix du gaz: (i) il protège la surface de la pièce par la prévention de l'exothermique réaction, et (ii) il initie des réactions exothermiques pour augmenter l'énergie disponible à la surface de la pièce. Le ancien est utilisé pour le traitement de matériaux non métalliques et les procédés de traitement de surface assistés par gaz non réactif, tels que procédés de nitruration assistés par laser, dans lesquels de l'azote est utilisé comme gaz auxiliaire , et ce dernier est utilisé dans la découpe au laser et opérations de soudage. Lors de la modélisation du chauffage laser traiter la contribution du gaz auxiliaire au transport de

l'énergie doit être considéré. Dans ce cas, le problème de chauffage devient conjugué et une condition limite convective à la surface doit être prise en compte. [23]

Jen et Gutierrez présentent une solution pour la géométrie unité avec trois ensembles déférents des conditions limites thermiques, c'est-à-dire une température de paroi constante, isolée et convection, à la surface éloignée (c'est-à-dire une surface éloignée de la surface d'entrée de chaleur laser). Ils montrent que la taille joue un rôle important dans la détermination de la répartition de la température, de la température maximale et de l'emplacement de la température maximale à l'intérieur de la pièce. [24]

BOUAZIZ. M.N et BOUTALBI. N ont réalisé une solution semi-analytique pour le champ de température basée sur l'inversion numérique des transformations de Laplace sur la base de la solution compacte proposée par Zubair et Chaudhry après avoir pris en compte un temps-impulsion dépendante en forme de signal périodique. [16]

Shuja et al ont introduit le chauffage par pulsation laser des surfaces avec refroidissement convectif. Ils ont montré que le refroidissement convectif n'influçait pas l'élévation de température du substrat, en particulier dans la région de surface en raison de l'absorption d'énergie élevée du champ irradié. [25]

Lee et al Une analyse de la conduction thermique à double déphasage dans le chauffage au laser à impulsions courtes des métaux avec une méthode hybride a été réalisée par Lee et al Ils ont indiqué que le déphasage du flux thermique conduit à induire des ondes thermiques avec des fronts d'onde nets séparant les zones chauffées et non chauffées du film métallique, tandis que le déphasage du gradient de température détruit les formes d'ondes et augmente thermiquement zone perturbée. [26]

Yilbas et Kalyon ont étudié Une solution de forme fermée comprenant des cycles de chauffage et de refroidissement au laser avec variation de paramètre d'impulsion. Les résultats ont révélé que la solution de forme est en accord avec les prédictions numériques. Le taux de surface augmentation de la température dans le cycle de chauffage et de son taux de décroissance dans le cycle de refroidissement étaient élevés pour les impulsions courtes. Mécanismes de transfert de chaleur pendant une impulsion courte. [26]

II.3.5. Résolutions Des modèles numériques :

Diniz Neto et Lima ont étudié la hausse de température à l'intérieur de la pièce en raison d'impulsions laser Nd: YAG consécutives. Ils ont montré numériquement que la zone affectée par la chaleur était indépendante de la fréquence des impulsions laser. [23]

Shuja et Yilbas ont étudié la possibilité de la thermo intégration à la surface lors de lasers répétitifs à assistance gazeuse chauffage pulsé des surfaces en acier. Ils ont résolu numériquement le régime des équations de flux et de transfert de chaleur, et prédit l'élévation de température à l'interface gaz – solide. Ils ont indiqué que l'intégration thermique en surface était possible pour impulsions répétitives avec des rapports de faible intensité. De plus, le chauffage par impulsions des surfaces métalliques a été étudié numériquement. Et Ils ont introduit trois différents des impulsions consécutives et un impact de jet de gaz utilisé pendant le processus de chauffage au laser. Ils ont montré que la réalisation température de surface constante était peu probable impulsions de grandes périodes de refroidissement et le gaz auxiliaire ne avait un effet considérable sur l'élévation de la température de surface. [23]

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. [21]

Kou, Sun et Le (Kou et al) ont présenté une modélisation numérique par différence finie de traitement de superficiel à l'aide d'un laser CO₂. Le modèle tridimensionnel inclut les pertes thermiques (par convection et radiation), ainsi que les variations du coefficient d'absorption et des propriétés thermo physiques de l'acier en fonction de la température.

Ils ont validé le modèle à l'aide d'essais expérimentaux menés sur des spécimens d'acier. Ceci a un effet similaire à une diminution du coefficient d'absorption. Après avoir recueilli les résultats expérimentaux, ils tentèrent d'estimer le coefficient d'absorption en ajustant celui-ci dans le modèle numérique. L'équipe détermina qu'un coefficient de 88,6 % rendait de bons résultats. [27]

Colombo, Mantrelli et Trombetti ont publié une modélisation simple par la technique des volumes finis. Ils simulèrent diverses trajectoires sur des plaquettes d'acier inoxydable.

Dans ce modèle, la tache focale carrée balaye une surface dont le coefficient d'absorption est fixé à 70 %. Ils y incluent les pertes par radiation et convection de même que la dépendance des propriétés thermo-physiques à la température.

Plus la vitesse d'avance est élevée, plus les durées des cycles thermiques sont courtes et plus les gradients de température vers l'intérieur sont élevés. Dans cette situation, la puissance laser doit être augmentée pour atteindre une température de surface équivalente et compenser le temps d'interaction plus court. [27]

Wu et al ont développé un modèle numérique basé sur la méthode des éléments finis (FEM) qui était plus compliquée dans la formulation mathématique. [28]

Shuja et al et Naqavi ont élaboré leurs modèles en utilisant la méthode du volume fini (VMF) avec grille non uniforme, bien qu'ils puissent produire des résultats avec précision, Leurs solutions encore long temps de calcul requis en raison de l'exigence de stabilité sur la base des énoncés. [28]

II.3.6. PROGICIEL DE MODELISATION (logiciel de simulation)

Pro laser est publiée en 1997 par Ion et Anisdahl, qui permet de déterminer les paramètres à utiliser en fonction des résultats de trempe désirés. Par exemple, l'utilisateur fournit au logiciel les dimensions des trempes à obtenir, le type d'acier, le type de laser et le logiciel retourne la taille de la tache focale, la vitesse d'avance et la puissance optique nécessaire. En se basant sur le type de laser, le coût de l'électricité et le coefficient d'absorption, le logiciel inclut une estimation des coûts de la trempe par unité de surface (\$/cm²). Le coefficient d'absorption utilisé par le logiciel est fixé à 62 %, donnée obtenue empiriquement via des essais appliqués sur différents aciers avec un laser CO₂. En analysant les résultats, on s'aperçoit que les résultats prédits par le logiciel ont une erreur relative moyenne de 25 % sur la profondeur durcie et de 23 % quant à la dureté atteinte. [27]

LATHEM En 2010, l'équipe de Martinez *et Al* publia le développement d'un simulateur semblable à celui visé dans le présent travail. Le simulateur fut développé afin de prédire les résultats de trempe au laser sur une pièce à géométrie complexe. Il permet de modéliser le passage du laser (mouvement sur trois axes) et les flux thermiques en découplant.

Le LATHM offre la possibilité de changer la distribution de l'irradiante dans la tache focale, ce qui est un avantage majeur quant à la flexibilité du logiciel. [27]

COMSOL est un logiciel de modélisation de divers phénomènes physiques. Il nous permettra de simuler les flux thermiques en trois dimensions à l'intérieur de la composante. Il calculera alors les flux thermiques issus de l'apport énergétique du laser, simulé par les conditions aux frontières qui se déplacent et varient en fonction des conditions d'interactions et du temps. COMSOL propose une fonction éprouvée qui permet de simuler le déplacement de condition frontière. Cette solution clé en main est tout à fait appropriée pour modéliser le déplacement du laser sur des spécimens plats, sans variations des conditions d'interactions. En effet ils utiliseront le logiciel COMSOL et le module complémentaire Livelink pour MATLAB, qui offre une solution complète.

Conclusion

Malgré l'importance et le développement des applications de laser, le contrôle de processus n'a pas pu trouver une solution exacte (précise) par les méthodes de mesures expérimentales, cela a encouragé les chercheurs à développer plusieurs modèles mathématiques et des simulations numériques qui prennent en considération les effets induits et gouvernantes des phénomènes de traitement thermique. Ceci a permis de calculer et de dimensionner les profils spatiaux temporels de la température ainsi que d'autres grandeurs thermiques.

Chapitre *III*

**Analyse et modélisation
mathématique de TT par une
source laser dépendante du
temps**

III.1. Introduction

L'utilisation des impulsions laser périodiques permet d'avoir plusieurs formes de l'évolution de profil de la température transitoire qui se développent dans le matériau du Substrat pendant le traitement thermique. Ceci permet de modifier la période d'action du procédé de la température, qui est supérieur à la température de transformation structurale selon le type du matériel traité, sans atteindre des températures superficielles très élevées et avec une meilleure utilisation de l'énergie [29]

Au cours du traitement de surface au laser, il est essentiel d'obtenir des impulsions laser périodique contrôlées est des températures de surface constante (presque chauffage isothermique de la surface). Ceci fournit une amélioration métallurgique et propriétés mécaniques sur la surface traitée par le faisceau laser. La réalisation du chauffage quasi isothermique à une surface par une seule impulsion laser est très difficile, car le laser forme des impulsions transitoires et les temps de montée et de descente du laser ne sont pas pareils. Les impulsions laser répétitives fournissent cependant presque les conditions de chauffage isothermique à la surface de la pièce ce qui permet de :

- Obtenir le temps exigé au-dessus de la température de transformation sans excéder les températures de surface au-dessus du point de fusion.
- Modifier un tel temps correspondant aux structures du matériau traité, afin d'obtenir une transformation presque complète de la martensite avec des valeurs également élevées de dureté

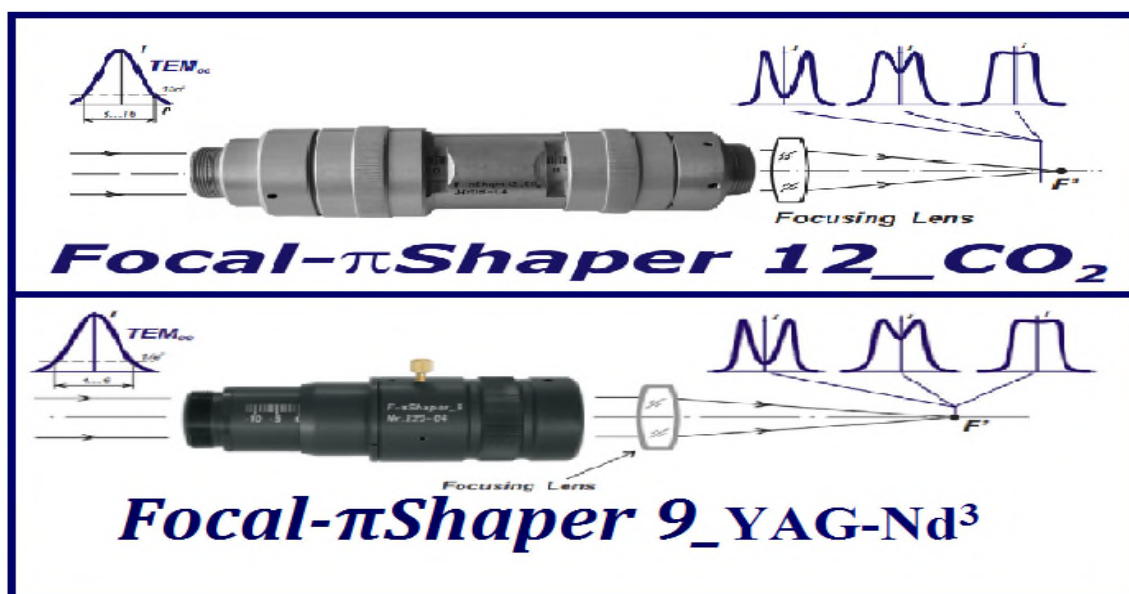


Figure III. 1 : appaerille de mesure des impulsions périodique

III.2. Modulation de l'intensité laser à des impulsions périodiques

La distribution gaussienne est la plus simple et la forme la plus souhaitable d'un faisceau fourni par une source laser notamment le mode transverse fondamental TEM_{00} , puis par l'utilisation des méthodes et des équipements techniques on peut obtenir des distributions quasi-harmonique et cela peut être convertis à des impulsions périodiques contrôlées couramment utilisé dans des procédés technologiques de traitement thermique en insérant dans la cavité résonante un commutateur optique on peut avoir plusieurs formes de signaux périodiques laser selon le type d'application d'usinage, dans le domaine du traitement thermique de surface, la modélisation de ce processus exige de modéliser la source laser Dana notre travaille nous intéressons au signale carré. [30]

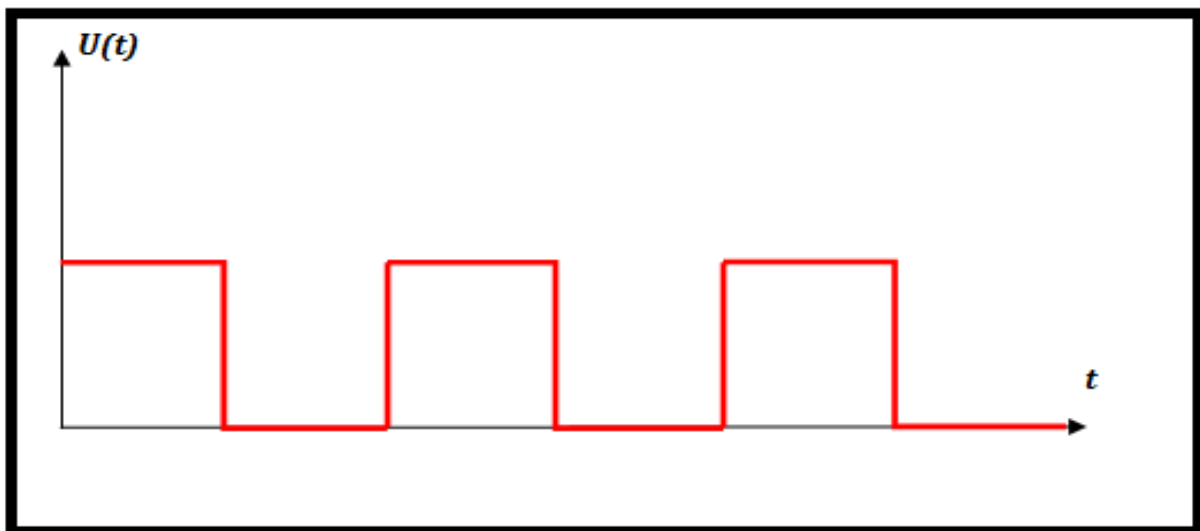


Figure III. 2 : signal d'impulsion carré

Equation mathématique de l'intensité laser :

$$U(t) = \frac{E_0}{2} + \frac{2E_0}{\pi} \left(\sum_{n=0}^{+\infty} \frac{1}{2n+1} \sin((2n+1)\omega_0 t) \right) \dots \dots \dots \text{(III.1)}$$

III.3. Modèle mathématique

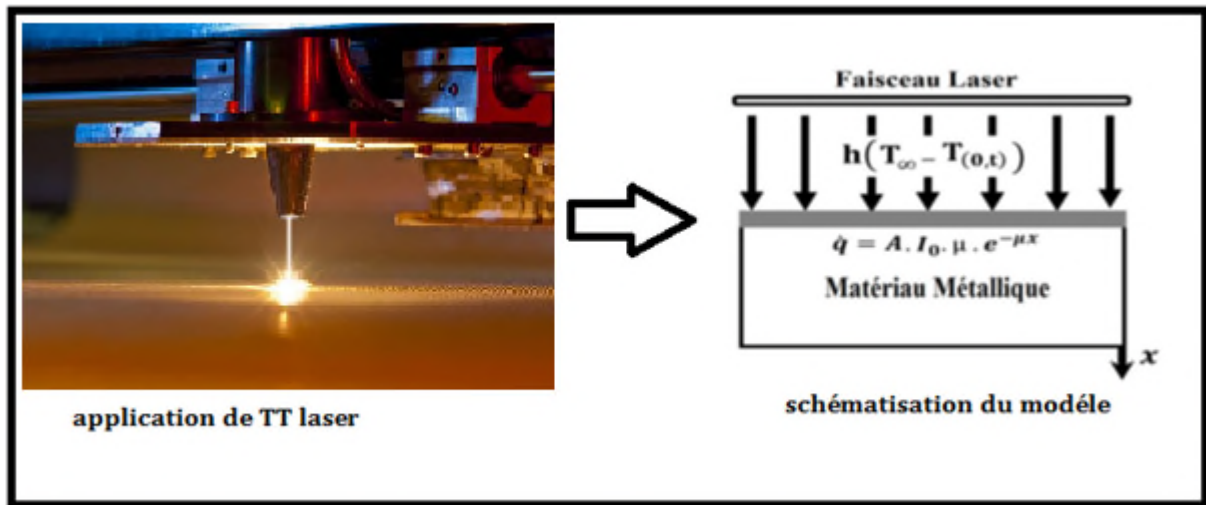


Figure III. 3 : Schématisation du modèle TTL

Hypothèses simplificatrices

- La source interne laser de type gaussien est indépendante du temps
- Le matériau traité est isotope est semi infini
- Les propriétés thermo physique du substrat sont indépendantes de la température
- Les pertes d'énergie par rayonnement sont négligeables

Les équations mathématiques

$$\rho C p \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + q'(x, t) \quad (\text{III.2})$$

Le terme de la source d'énergie laser interne est modélisé comme

$$q' = \dot{I}_0(t) (1 - R) \mu \exp(-\mu x) \quad (\text{III.3})$$

Les conditions initiales et aux limites

$$\left\{ \begin{array}{l} T(x, 0) = T_0 \\ -K \frac{\partial T(0, t)}{\partial t} = h [T_\infty - T(0, t)] \\ \frac{\partial T(\infty, t)}{\partial x} = 0 \end{array} \right. \quad (\text{III.4})$$

III.3.1. Difficulté de résoudre l'équation analytiquement

La résolution de l'équation analytiquement est possible que pour des cas de sources laser simples à cause de la complexité du produit de convolution, pour les signaux lasers de pulsations périodiques d'intérêt reconnu dans le domaine et qui ayant une formulation mathématique compliquée exemple signal laser type carré (**figure III .2**), cette complexité est due au terme de sommation qui représente les répétitions des pulsations cette discontinuité rend impossible la détermination analytique de la température atteinte durant l'opération d'échauffement.

Notre travail est basé de résoudre le problème d'un modèle avec une approche semi analytique, qui est basé sur la transformée de Laplace l'étude de ZUBAIR et CHAUDHRY, avec pour l'objectif d'obtention des solutions pour une large gamme de différentes sources laser dépendantes du temps.

III.3.2. La solution analytique de Zubair et Chaudhry

La solution de Zubair dans le domaine réel :

$$\theta(x, t) = (T_{\infty} - T_0) \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{at}} \right) - E \left(\frac{hx}{k}, \frac{at}{x^2} \right) \right] - \frac{\mu(1 - R)}{\rho C_p} \left[\frac{\left(\frac{\mu + \frac{h}{k}}{\frac{h}{k}} \right)}{\frac{h}{k}} \times \left\{ \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{at}} \right) - E \left(\frac{hx}{k}, \frac{at}{x^2} \right) \right\} \times \left\{ \frac{\partial}{\partial x} [\exp(a\mu^2 t) * I_0(t)] \right\} - \left\{ \exp(-\mu x + a\mu^2 t) \right\} * I_0(t) \right] \quad (\text{III.5})$$

Avec la fonction particulière :

$$E \left(cx, \frac{at}{x^2} \right) = \exp \left[cx + c^2 x^2 \left(\frac{at}{x^2} \right) \right] \times \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{at}} \right) + cx \sqrt{\frac{at}{x^2}}$$

La solution compacte de Zubair dans le domaine de Laplace

$$\bar{\theta}(x, p) = \left[\frac{\frac{h(T_{\infty}-T_0)}{k} \frac{1}{p} + \frac{I_0(1-R)\mu\left(\mu+\frac{h}{k}\right)}{k} \frac{1}{p} \frac{1}{\mu^2-\frac{p}{a}}}{\sqrt{\frac{p}{a} + \frac{h}{k}}} \right] \exp\left(-\sqrt{\frac{p}{a}} x\right) - \frac{I_0(1-R)\mu \exp(-\mu x)}{k} \frac{1}{p} \frac{1}{\mu^2-\frac{p}{a}} \quad (\text{III.6})$$

III.4. Notre Travail :

Dans notre travail, perspectif est de résoudre le problème avec une approche semi analytique, qui basé sur l'étude de ZUBAIR et CHAUDHRY, avec pour l'objectif l'obtention des solutions pour une large gamme de différentes sources laser dépendantes du temps.

La base de notre modèle repose sur la transformée de Laplace. La solution dans ce domaine est donnée par ZUBAIR et CHAUDHRY avec l'inconnue à développer y est relative à la source dépendante du temps non réel.

$$\bar{\theta}(x, p) = \left(\frac{h(T_{\infty}-T_0)}{k} - \frac{(1-R)\mu\left(\mu+\frac{h}{k}\right)}{\rho c p} \frac{p \bar{I}_0(p)}{(p-\alpha\mu^2)} \right) \left[\frac{\exp\left(-x\sqrt{\frac{p}{a}}\right)}{P(\sqrt{(P/\alpha)+h/k})} \right] + \frac{\mu(1-R)\exp(-\mu x)\bar{I}_0(p)}{\rho c p(p-\alpha\mu^2)} \quad (\text{III.7})$$

Pour éviter ce problème (la solution compacte proposé par Zubair et Chaudhry en domaine réel est pour un signale laser périodique type carré) en s'intéresse à des méthodes numériques développée pour l'inversion et parmi ces méthodes (Méthode de Zakian, Méthode des séries de Fourier, Méthode de Stehfest).

Le profil de température pour une source laser dépendant du temps lors de traitement de surface soumis a une condition limite convective, est présenté analytiquement selon une forme fondamentalement compacte et exemple d'application, les solutions sont discuté par Zubair et Chaudhry pour le cas d'une source laser en forme d'impulsion de type exponentiel est par le modèle de Blackwell.

Le modèle de Zubair et Chaudhry,présent une particularité importante est aussi bénéfique du fait de l'introduction d'une source laser variable en temps.

Tableau III.1 : Propriétés de différents matériaux prévus a étudié lors de la simulation

Matériau	C_p [J / KgK]	k [W / mK]	ρ [Kg / m ³]	α [m ² /S] × 10 ⁻⁶	σ ($\Omega \cdot m$) ⁻¹	T_F [C°]
Cuivre	385	401	8954	116.32	58.5 × 10 ⁶	1083
Nickel	447	92	8800	22.696	14.3 × 10 ⁶	1455
Acier	502.48	88	7700	22.74	5.9 × 10 ⁶	1400
Fer	460	80	7900	22.29	10.1 × 10 ⁶	1528

Tableau III .2 : Propriétés de différente interaction laser matière

Type de laser	caractéristique	Cuivre	Nickel	Acier	Fer
LASER CO ₂ $\lambda = 10,6\mu m$	Coefficient d'absorption μ	27.994 × 10 ¹¹	27.994 × 10 ¹¹	27.994 × 10 ¹¹	27.994 × 10 ¹¹
	Réfectivité R	0.9854	0.9854	0.9854	0.9854
LASER CO $\lambda = 2,5\mu m$	Coefficient d'absorption μ	57.643 × 10 ¹¹	57.643 × 10 ¹¹	57.643 × 10 ¹¹	57.643 × 10 ¹¹
	Réfectivité R	0.9848	0.9848	0.9848	0.9848
LASER Nd : YAG $\lambda = 1,06\mu m$	Coefficient d'absorption μ	88.532 × 10 ¹¹	88.532 × 10 ¹¹	88.532 × 10 ¹¹	88.532 × 10 ¹¹
	Réfectivité R	0.9536	0.9536	0.9536	0.9536
LASER ERBIUM $\lambda = 1.53\mu m$	Coefficient d'absorption μ	73.746 × 10 ¹¹	73.746 × 10 ¹¹	73.746 × 10 ¹¹	73.746 × 10 ¹¹
	Réfectivité R	0.9614	0.9614	0.9614	0.9614

III.4.1. Techniques d'inversion de la transformée de Laplace

Dans ce travail, les méthodes utilisées pour la recherche de la transformée inverse de Laplace sont : la méthode de Stehfest, la méthode de Zakian et celle des séries de Fourier.

Méthode de Zakian

La méthode de Zakian approche les fonctions dépendant du temps, en utilisant la série infinie. Ainsi, $f(t)$ est calculé comme une somme d'évaluation pesée de $F(s)$.

$$f(t) = \frac{2}{t} \sum_{i=1}^n \text{REAL} \left(K_i F \left(\frac{a_i}{t} \right) \right) \quad \text{(III.8)}$$

Les paramètres α et k sont des constantes données. Cette méthode est rapide et facile à mettre en application, et il y'a un seul paramètre libre n à optimiser pour obtenir des solutions précises. La méthode exige l'utilisation de l'arithmétique complexe. [31]

Méthode des séries de Fourier

Dubner et Abate sont les premiers utilisateurs de cette technique pour la recherche de la transformée inverse de Laplace. La technique est basée sur le choix d'un contour d'intégration de l'intégrale d'inversion, recherche de la transformé de Fourier, ensuite, faire l'approximation de la transformé en utilisant les séries de Fourier, selon la relation suivante:

$$f(t) = \frac{\exp(ct)}{t_{max}} \left[\frac{F(C)}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (\text{Re}[F(C + j\omega_k)] \cos(\omega_k t) - \text{Im}[F(C + j\omega_k)] \sin(\omega_k t)) \right]$$

(III.9)

Avec : $\omega_k = \frac{k\pi}{t_{max}}$

La somme infinie est dans la pratique calculée pour un nombre fini N de termes. En général, on prendra $N > 100$. Cette méthode nécessite le choix de deux paramètres C et t_{max}

Crump a estimé ces deux paramètres, comme suit : $C = \frac{\ln(\text{Err})}{2t_{max}}$

Pour diminuer l'erreur de troncature, on prend un temps de calcul plus important que celui qui nous intéresse. Pour cela, le pas de temps est calculé à partir de la relation :

$\Delta t = 1.5 t_{\max} / n$ détermine le nombre de valeurs de temps du calcul. On prend juste les valeurs de la fonction qui correspond à $t < t_{\max}$. [31]

Méthode de Stehfest

La méthode de Stehfest est une méthode numérique rapide pour le calcul de la transformée de Laplace inverse. Elle permet de calculer la valeur d'une fonction $f(t)$ à partir d'un échantillon restreint de valeurs de sa transformée de Laplace $F(p)$. Le résultat s'exprime sous la forme d'une somme de N termes (N pair) :

Cette technique d'inversion numérique a été introduite en premier temps par Graver. Elle a été largement utilisée dans la littérature d'ingénierie pétrolière. L'approche utilisée dans l'algorithme de Stehfest est :

$$f(t) = \frac{\ln 2}{t} \sum_{i=1}^n V_i F\left(\frac{\ln 2}{t} i\right) \quad \text{(III.10)}$$

Tels que : f est la fonction dans l'espace réel, F est la transformée de f dans l'espace de Laplace. Les coefficients V_i sont donnés par la relation :

$$V_i = (-1)^{\binom{n+1}{2}} \sum_{K=\binom{i+1}{2}}^{\min(i, \frac{n}{2})} \frac{k^{\binom{n+1}{2}} (2k)!}{\binom{n-k}{2}! k! (2k-1)!} \quad \text{(III.11)}$$

Le paramètre n représente le nombre de termes utilisés dans la sommation, il doit être optimisé. L'augmentation de n augmente la précision du résultat jusqu'à une certaine limite, puis la précision diminue en raison de l'augmentation des erreurs d'arrondies. Généralement, pour une simple précision, on prend $n=10$, et pour une double précision $n=20$.

Pour des fonctions $f(t)$ et $F(p)$ « régulières », la méthode de Stehfest fournit généralement des résultats très précis. Cette technique est couramment utilisée pour inverser des fonctions $F(p)$ dont on connaît une expression analytique

La méthode de Stehfest est plus simple à mettre en œuvre car elle ne nécessite pas de choisir certains paramètres. La méthode de Fourier peut conduire à un meilleur résultat dans le cas d'inversion de certaines fonctions comme les fonctions périodiques par exemple. L'étude du comportement de la fonction $F(p)$ aux temps longs ($t \rightarrow \infty$ soit $p \rightarrow 0$) et aux temps courts ($t \rightarrow 0$ soit $p \rightarrow \infty$) peut conduire à des formules approchées de $F(p)$ dont on peut alors trouver la transformée de Laplace inverse analytiquement. La comparaison de ces

solutions analytiques avec les résultats de l'inversion numérique donne une indication sur la justesse de l'inversion numérique.[31]

III.4.2. Description de la méthode de STEHFEST

La transformé de Laplace inverse de la fonction $\theta(p)$ peut se calculer par l'algorithme de STEHFEST :

$$f(t) = \frac{\ln 2}{t} \sum_{i=1}^n V_i F\left(\frac{\ln 2}{t} i\right) \quad (\text{III.12})$$

Pour une double précision : $N = 10$

$V_1 = 1/12.$
$V_2 = -385/12.$
$V_3 = 1279.$
$V_4 = -46871/3.$
$V_5 = 505465/6.$
$V_6 = -473915/2.$
$V_7 = 1127735/3.$
$V_8 = -1020215/3$
$V_9 = 328125/2.$
$V_{10} = -65625/2$

L'équation (III.12) est utilisée pour résoudre l'équation (III.7), suivant un programme en FORTRAN 77. Cette possibilité, nous permet en accord avec l'organigramme présenté, D'envisager plusieurs sources dépendantes du temps.

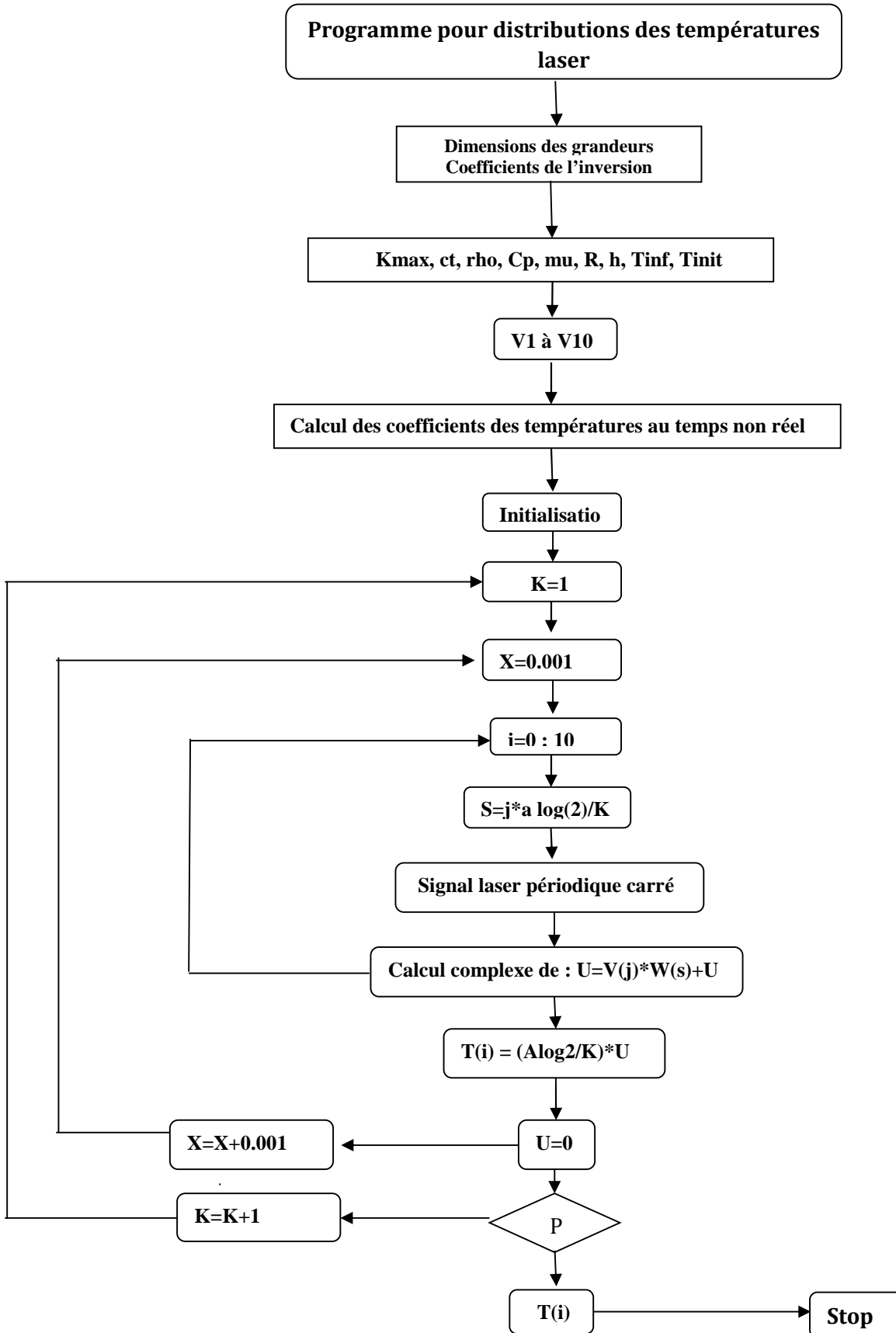


Figure III. 4 : Organigramme de calcul

III.4.3. Validation de code de calcul

La validation ce faite pour un céramique technique de type **MgO**

Tableau III.3 : Les caractéristiques thermo physiques du substrat et du faisceau laser

Substrat	ρ [Kg / m ³]	C_p [J / KgK]	k [W / mK]	$\mu \times 10^{-3}$ [1/m]	I_0 [W/m]	λ^2 [S ⁻¹]
Céramique Technique (MgO)	3580	870	40	1,00	2×10 ⁷	0,2

Donner de calcul pour la phase d'échauffement :

K =40 , rho= 3580.,Cp=870,h=10.,Tinf=25 ;Tinit=25., amu= 1000.,AR= 0

I₀=20000000

Donner de calcul pour la phase refroidissement

K =40 , rho= 3580.,Cp=870,h=10000.,Tinf=25 ;Tint=....., amu= 1000.,AR= 0

I₀=0

A/ Validation par le modèle de Blackwell

Calculé numérique

Tableau III.4: Resultat de Simulation pour la céramique par le modèle de Blackwell

X=0.0m

Temps	Température
0.2	585
0.3	782
0.4	942
0.5	1035
0.6	1185
0.7	1305
0.8	1415
0.9	1525
1	1625
1.1	1725
1.2	1815
1.3	1895
1.4	1975
1.5	2065
1.6	2135

X=0.002 m

Temps	Température
0.2	305
0.3	445
0.4	579
0.5	690
0.6	810
0.7	915
0.8	1014
0.9	1115
1	1205
1.1	1295
1.2	1385
1.3	1465
1.4	1535
1.5	1615
1.6	1695

X=0.004 m

Temps	Température
0.2	97.9
0.3	164
0.4	237
0.5	313
0.6	392
0.7	469
0.8	544
0.9	620
1	693
1.1	766
1.2	837
1.3	906
1.4	972
1.5	1035
1.6	1105

Calculs analytique

x=0.00mm

$$500 \cdot (4001 - 4001.0002500625156289072268067017 \cdot \exp(8.026712900532973736595389456 \cdot 1099e^{-7 \cdot x}) \cdot (1 - \operatorname{erf}(0.25 \cdot \sqrt{1.2842740640852757978552623129776e^{-5 \cdot x}})) + 0.50025006251562890722680670167542 \cdot \exp(12.842740640852757978552623129776 \cdot x) \cdot (1 - \operatorname{erf}(1000 \cdot \sqrt{1.2842740640852757978552623129776e^{-5 \cdot x}})) - 0.5 \cdot \exp(12.842740640852757978552623129776 \cdot x) \cdot (1 - \operatorname{erf}(-1000 \cdot \sqrt{1.2842740640852757978552623129776e^{-5 \cdot x}})) + \exp(12.842740640852757978552623129776 \cdot x) - 1) + 25$$

$$x = 0.002m$$

$$f2(x) = 4001 * (1 - \operatorname{erf}(0.001 / \sqrt{(1.2842740640852757978552623129776e-5 * x)}))$$

$$f3(x) = -4001.0002500625156289072268067017 * \exp(8.0267129005329737365953894561099e-7 * x + 0.0005) * (1 - \operatorname{erf}(0.25 * \sqrt{(1.2842740640852757978552623129776e-5 * x)} + 0.001 / \sqrt{(1.2842740640852757978552623129776e-5 * x)}))$$

$$f4(x) = 0.50025006251562890722680670167542 * \exp(12.842740640852757978552623129776 * x + 2)$$

$$f5(x) = (1 - \operatorname{erf}((1000 * \sqrt{(1.2842740640852757978552623129776e-5 * x)} + 0.001 / \sqrt{(1.2842740640852757978552623129776e-5 * x)})))$$

$$f6(x) = f4(x) * f5(x)$$

$$f7(x) = -0.5 * \exp(12.842740640852757978552623129776 * x - 2)$$

$$f8(x) = (1 - \operatorname{erf}((-1000 * \sqrt{(1.2842740640852757978552623129776e-5 * x)} + 0.001 / \sqrt{(1.2842740640852757978552623129776e-5 * x)})))$$

$$f9(x) = f6(x) * f7(x)$$

$$f10(x) = \exp(-2) * (\exp(12.842740640852757978552623129776 * x) - 1)$$

$$f11(x) = (f2(x) + f3(x) + f6(x) + f9(x) + f10(x)) * 500 + 25$$

$$x = 0.004$$

$$f12(x) = 4001 * (1 - \operatorname{erf}(0.002 / \sqrt{(1.2842740640852757978552623129776e-5 * x)}))$$

$$f13(x) = -4001.0002500625156289072268067017 * \exp(8.0267129005329737365953894561099e-7 * x + 0.001) * (1 - \operatorname{erf}(0.25 * \sqrt{(1.2842740640852757978552623129776e-5 * x)} + 0.002 / \sqrt{(1.2842740640852757978552623129776e-5 * x)}))$$

$$f14(x) = 0.50025006251562890722680670167542 * \exp(12.842740640852757978552623129776 * x + 4)$$

$$f15(x) = (1 - \operatorname{erf}((1000 * \sqrt{(1.2842740640852757978552623129776e-5 * x)} + 0.002 / \sqrt{(1.2842740640852757978552623129776e-5 * x)})))$$

$$f16(x) = f14(x) * f15(x)$$

$$f17(x) = -0.5 * \exp(12.842740640852757978552623129776 * x - 4)$$

$$f18(x) = (1 - \operatorname{erf}((-1000 * \sqrt{(1.2842740640852757978552623129776e-5 * x)} + 0.002 / \sqrt{(1.2842740640852757978552623129776e-5 * x)})))$$

$$f19(x) = f16(x) * f17(x)$$

$$f20(x) = \exp(-4) * (\exp(12.842740640852757978552623129776 * x) - 1)$$

$$(f12(x) + f13(x) + f16(x) + f19(x) + f20(x)) * 500 + 25$$

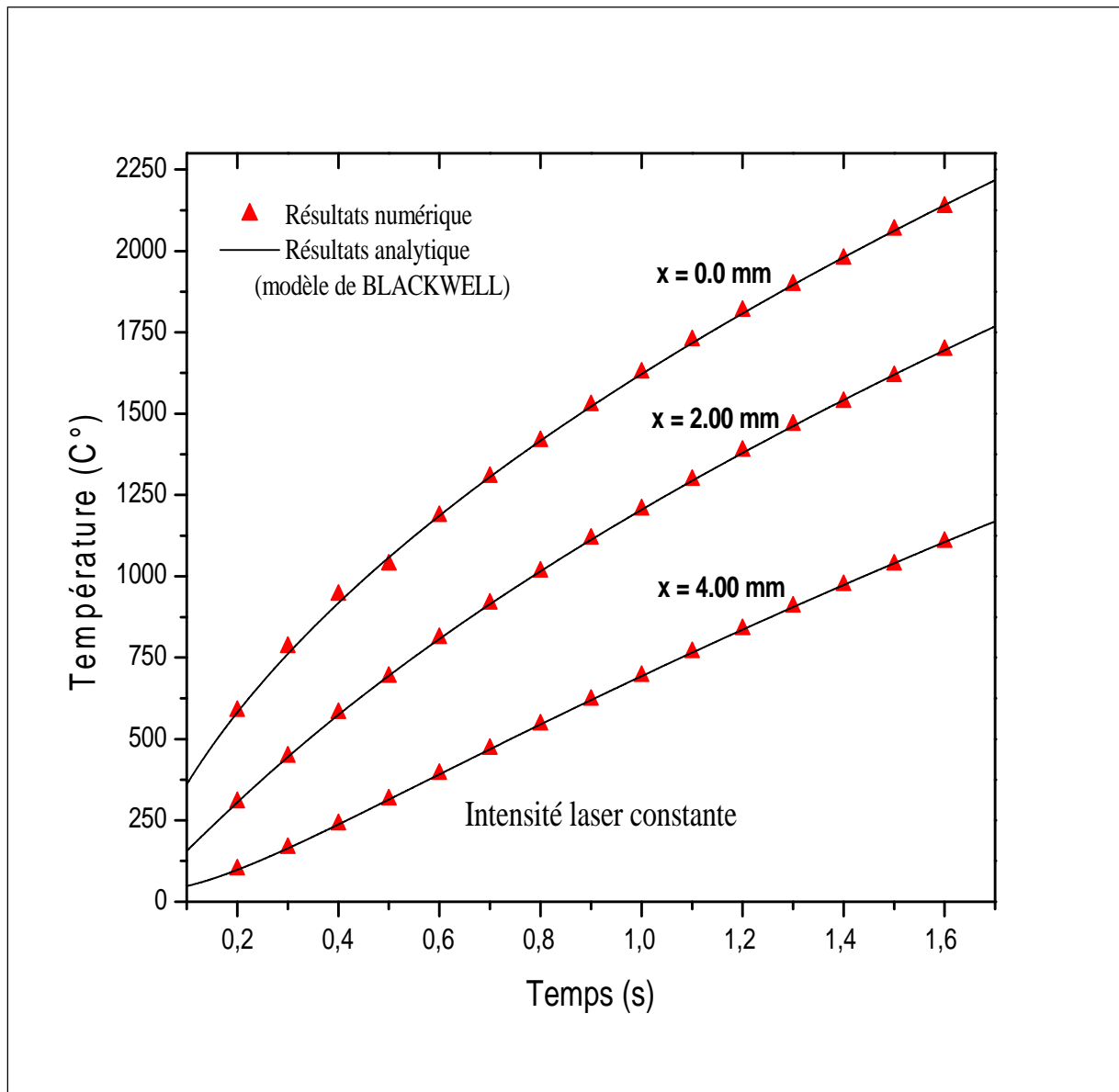


Figure III .5 : phase d'échauffement pour le modèle BLACKWELLE

Validation avec le Modèle de ZUBAIR et CHAUDHRY

Pour la source de type exponentiel

Phase d'échauffement

Le calcul analytique

X=0.00m

$$\lambda^2 = 0.2$$

$$\mu = 1000$$

$$\rho = 3580$$

$$Cp = 870$$

$$K = 40$$

$$I_0 = 20000000$$

$$\lambda = 0.44721359549995793928183473374626$$

$$\text{Alpha} = 1.2842740640852757978552623129776e-5$$

$$h/k = 0.25$$

$$(h/k)^2 = 0.0625$$

$$\lambda/\sqrt{\text{alpha}} = 124.79182665543444957046177974932$$

$$\rho Cp = 3114600$$

$$\mu \alpha^2 = 12.84274064085275797855262312977$$

$$A = 0.07909677406247492195967806653011$$

$$B = 25683.308676806411210605162885877$$

$$F1(x) = \exp(0.2 * t) * (1 - \text{erf}(-0.44721359549995793928183473374626 * \sqrt{t}))$$

$$F2(x) = -1.0040147154849698218326010034956 * \exp(0.2 * t) * (1 - \text{erf}(0.44721359549995793928183473374626 * \sqrt{t}))$$

$$F3(x) = 0.0040147154849698218326010034956291 * \exp(8.0267129005329737365953894561063e-7 * t) * (1 - \text{erf}(0.25 * \sqrt{t} * (1.2842740640852757978552623129776e-5 * t)))$$

$$C = -3210.685160213189494638155782444$$

$$F4(x) = \exp(12.84274064085275797855262312977 * t) * (1 - \text{erf}(-1000 * \sqrt{t} * (1.2842740640852757978552623129776e-5 * t)))$$

$$F5(x) = -1.0005001250312578144536134033508 * \exp(12.84274064085275797855262312977 * t) * (1 - \text{erf}(1000 * \sqrt{t} * (1.2842740640852757978552623129776e-5 * t)))$$

$$F6(x) = 5.0012503125781445361340335083771e4 * \exp(8.0267129005329737365953894561063e-7 * t) * (1 - \text{erf}(0.25 * \sqrt{t} * (1.2842740640852757978552623129776e-5 * t)))$$

$$F7(x) = -507.90967740624749219596780665324 * (\exp(0.2 * t) * \exp(12.84274064085275797855262312977 * t))$$

$$F8(x) = (f1(x) + f2(x) + f3(x)) * 25683.30867680641121060516288587$$

$$F9(x) = (f4(x) + f5(x) + f6(x)) * (-3210.685160213189494638155782444)$$

$$F10(x) = (f8(x) + f9(x)) * 0.07909677406247492195967806653011$$

$$F11(x) = (f10(x) + f7(x)) + 25$$

$$X = 0.002 \text{ m}$$

$$F12(x) = \exp(0.2 * t + (-0.2495836533108688991409235594986)) * (1 - \operatorname{erf}(-0.44721359549995793928183473374626 * \sqrt{t} + (0.001 / \sqrt{1.2842740640852757978552623129776e-5 * t})))$$

$$F13(x) = -(1.0040147154849698218326010034956) * \exp(0.2 * t + 0.2495836533108688991409235594986) * (1 - \operatorname{erf}(0.44721359549995793928183473374626 * \sqrt{t} + (0.001 / \sqrt{1.2842740640852757978552623129776e-5 * t})))$$

$$F14(x) = 0.0040147154849698218326010034956291 * \exp(0.0005 + 8.0267129005329737365953894561063e-7 * t) * (1 - \operatorname{erf}(0.25 * \sqrt{1.2842740640852757978552623129776e-5 * t} + (0.001 / \sqrt{1.2842740640852757978552623129776e-5 * t})))$$

$$F15(x) = \exp((-2) + 12.84274064085275797855262312977 * t) * (1 - \operatorname{erf}((-1000) * \sqrt{1.2842740640852757978552623129776e-5 * t} + (0.001 / \sqrt{1.2842740640852757978552623129776e-5 * t})))$$

$$F16(x) = -(1.0005001250312578144536134033508) * \exp(2 + 12.84274064085275797855262312977 * t) * (1 - \operatorname{erf}(1000 * \sqrt{1.2842740640852757978552623129776e-5 * t} + (0.001 / \sqrt{1.2842740640852757978552623129776e-5 * t})))$$

$$F17(x) = 5.0012503125781445361340335083771e-4 * \exp(0.0005 + 8.0267129005329737365953894561063e-7 * t) * (1 - \operatorname{erf}(0.25 * \sqrt{1.2842740640852757978552623129776e-5 * t} + (0.001 / \sqrt{1.2842740640852757978552623129776e-5 * t})))$$

$$F18(x) = -(507.9096774062474921959678066532) * \exp(-2) * (\exp(0.2 * t) - \exp(12.84274064085275797855262312977 * t))$$

$$F19(x) = (f12(x) + f13(x) + f14(x)) * 25683.30867680641121060516288587$$

$$F20(x) = (f15(x) + f16(x) + f17(x)) * (-3210.685160213189494638155782)$$

$$F21(x) = (f19(x) + f20(x)) * 0.0790967740624749219596780665$$

$$F22(x) = (f21(x) + f18(x)) + 25$$

$$X = 0.004 \text{ m}$$

$$F23(x) = \exp(0.2 * t + (-0.499167306621737798281847118996)) * (1 - \operatorname{erf}(-0.44721359549995793928183473374626 * \sqrt{t} + (0.002 / \sqrt{1.2842740640852757978552623129776e-5 * t})))$$

$$F24(x) = -(1.0040147154849698218326010034956) * \exp(0.2 * t + 0.499167306621737798281847118996) * (1 - \operatorname{erf}(0.44721359549995793928183473374626 * \sqrt{t} + (0.002 / \sqrt{1.2842740640852757978552623129776e-5 * t})))$$

$$F25(x)=0.0040147154849698218326010034956291*\exp(0.001+8.0267129005329737365953894561063e-7*t) *(1-\operatorname{erf}(0.25*\sqrt{1.2842740640852757978552623129776e-5*t})+(0.002/\sqrt{1.2842740640852757978552623129776e-5*t})))$$

$$F26(x)=\exp((-4)+12.84274064085275797855262312977*t)*(1-\operatorname{erf}((-1000)*\sqrt{1.2842740640852757978552623129776e-5*t})+(0.002/\sqrt{1.2842740640852757978552623129776e-5*t})))$$

$$F27(x)=- (1.0005001250312578144536134033508)*\exp(4+12.84274064085275797855262312977*t) *(1-\operatorname{erf}(1000*\sqrt{1.2842740640852757978552623129776e-5*t})+(0.002/\sqrt{1.2842740640852757978552623129776e-5*t})))$$

$$F28(x)=5.0012503125781445361340335083771e-4*\exp(0.001+8.0267129005329737365953894561063e-7*t) *(1-\operatorname{erf}(0.25*\sqrt{1.2842740640852757978552623129776e-5*t})+(0.002/\sqrt{1.2842740640852757978552623129776e-5*t})))$$

$$F29(x)= -(507.9096774062474921959678066532)* \exp (-4)*(\exp (0.2*t)-\exp (12.84274064085275797855262312977*t))$$

$$F30(x)=(f23(x)+f24(x)+f25(x))* 25683.30867680641121060516288587$$

$$F31(x)=(f26(x)+f27(x)+f28(x))* (-3210.685160213189494638155782)$$

$$F32(x)=(f30(x)+f31(x))* 0.0790967740624749219596780665$$

$$F33(x)=(f32(x)+f29(x))+25$$

Résultat numérique**Tableau III .5** : Résultat de simulation pour la céramique par le modèle de Zubair et Chaudhry pour la source de type exponentiel**X=0.00m**

Temps	Température
0.2	597
0.25	692
0.3	767
0.35	878
0.4	987
0.45	1085
0.5	1145
0.55	1185
0.6	1285
0.65	1345
0.7	1425
0.75	1485
0.8	1565
0.85	1625
0.9	1695
10.95	1765
1.0	1825
1.05	1905
1.1	1965
1.15	2025
1.2	2105

X= 0.002m

Temps	Température
0.2	311
0.25	385
0.3	454
0.35	530
0.4	608
0.45	662
0.5	731
0.55	796
0.6	860
0.65	919
0.7	984
0.75	1045
0.8	1105
0.85	1165
0.9	1225
0.95	1285
1.0	1345
1.05	1395
1.1	1465
1.15	1515
1.2	1575

X=0.004m

Temps	Température
0.2	98.9
0.25	132
0.3	167
0.35	206
0.4	244
0.45	286
0.5	326
0.55	368
0.6	411
0.65	454
0.7	496
0.75	539
0.8	582
0.85	626
0.9	669
0.95	714
1.0	757
1.05	801
1.1	845
1.15	889
1.2	933

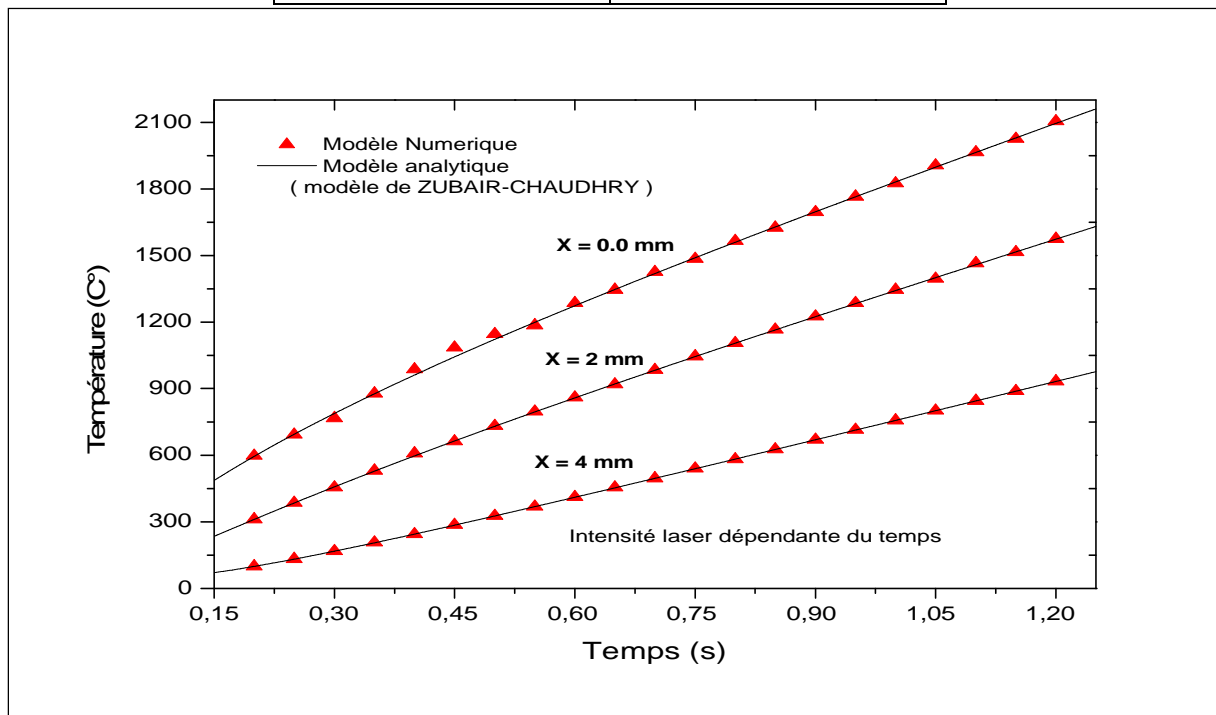


Figure III .6 : phase d'échauffement pour le modèle de Zubair et Chaudhry pour la source de type exponentiel.

Chapitre *IV*

Résultats et discussions

IV.1. Evolution de la température superficielle des matières pour différents lasers a desdéférentes intensité

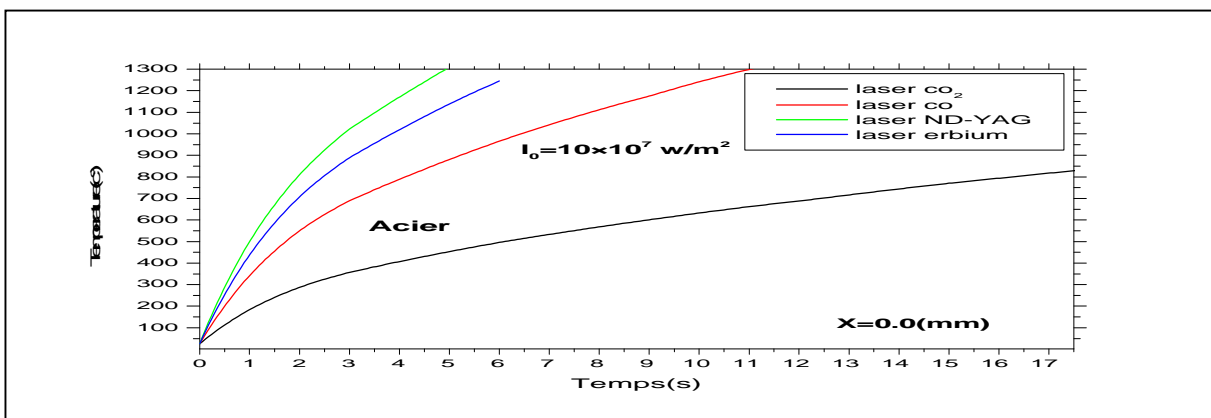
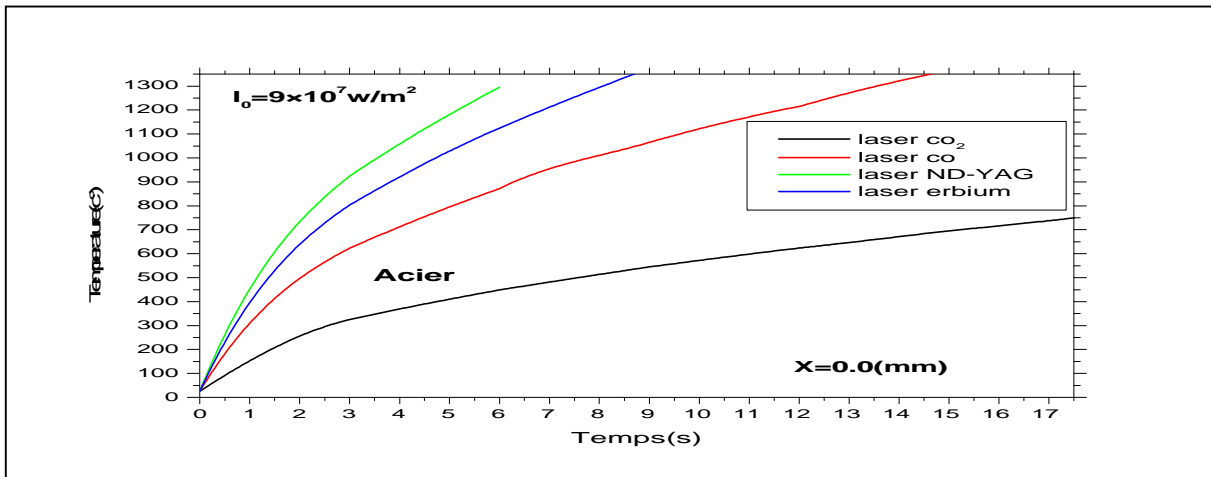
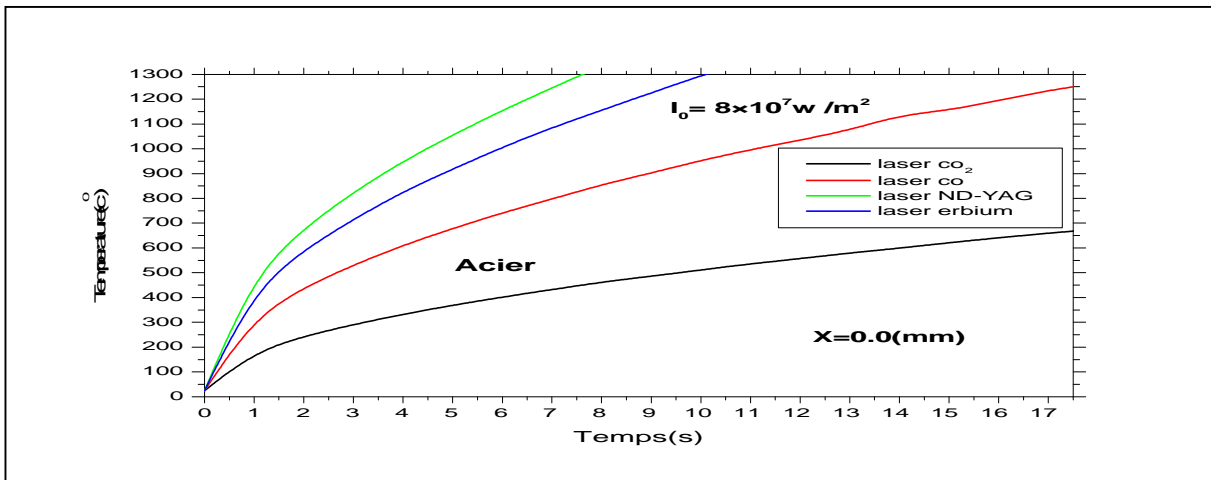


Figure IV.1: évolution de la température superficielle de l'Acier pour différents lasers à des déférentes intensités.

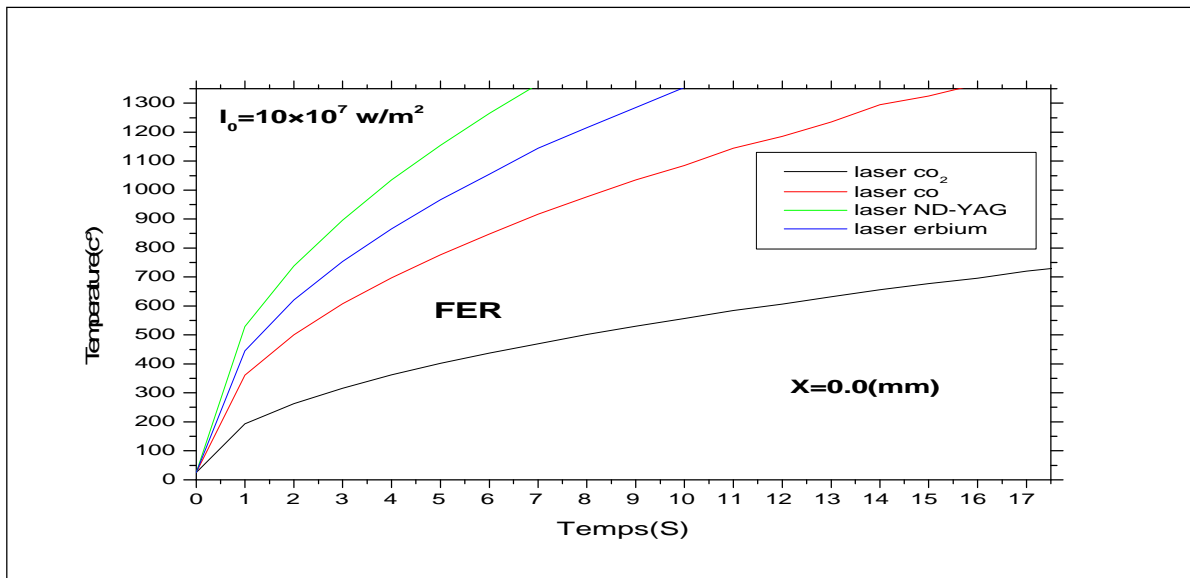
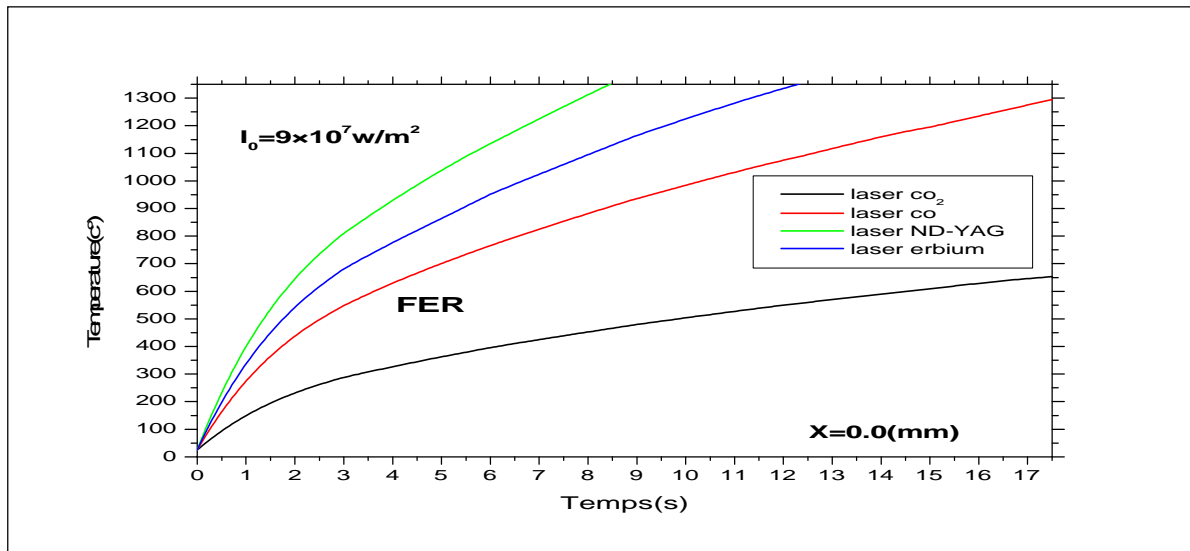
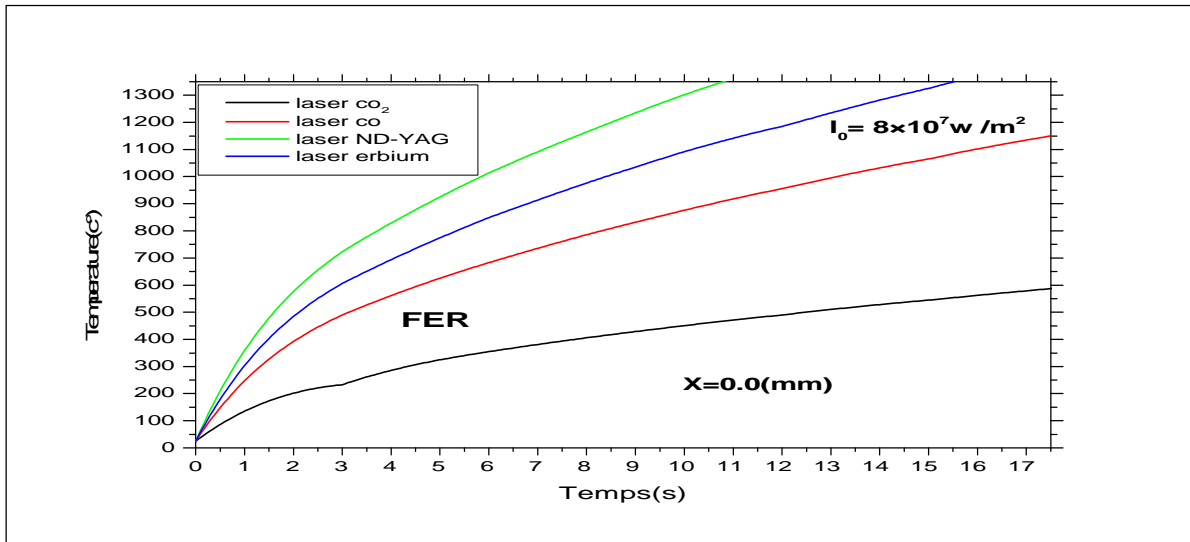


Figure IV.2: évolution de la température superficielle du fer pour différents lasers à des différentes intensités.

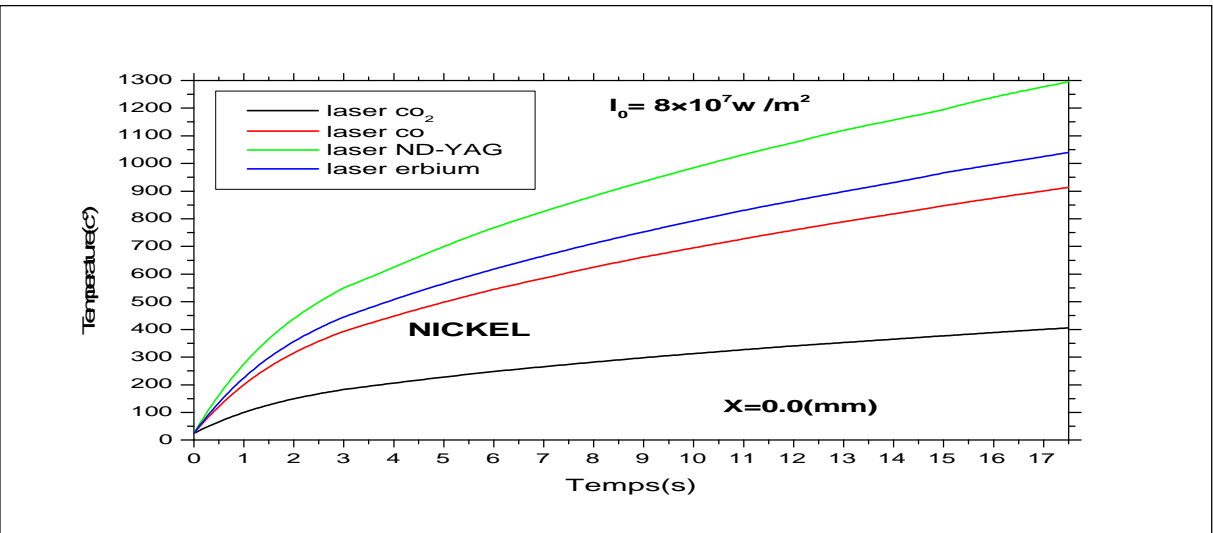
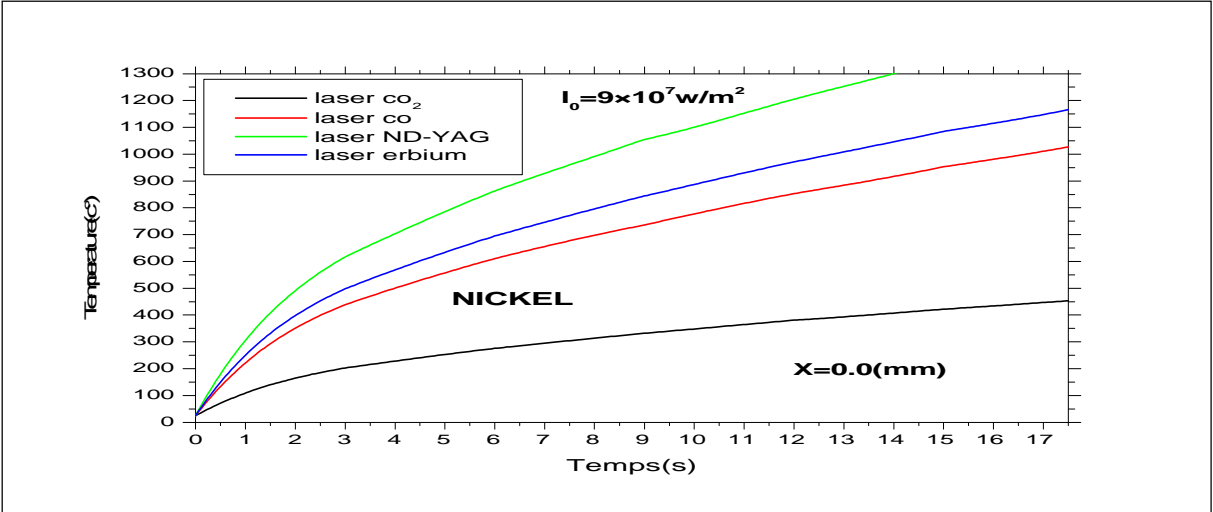
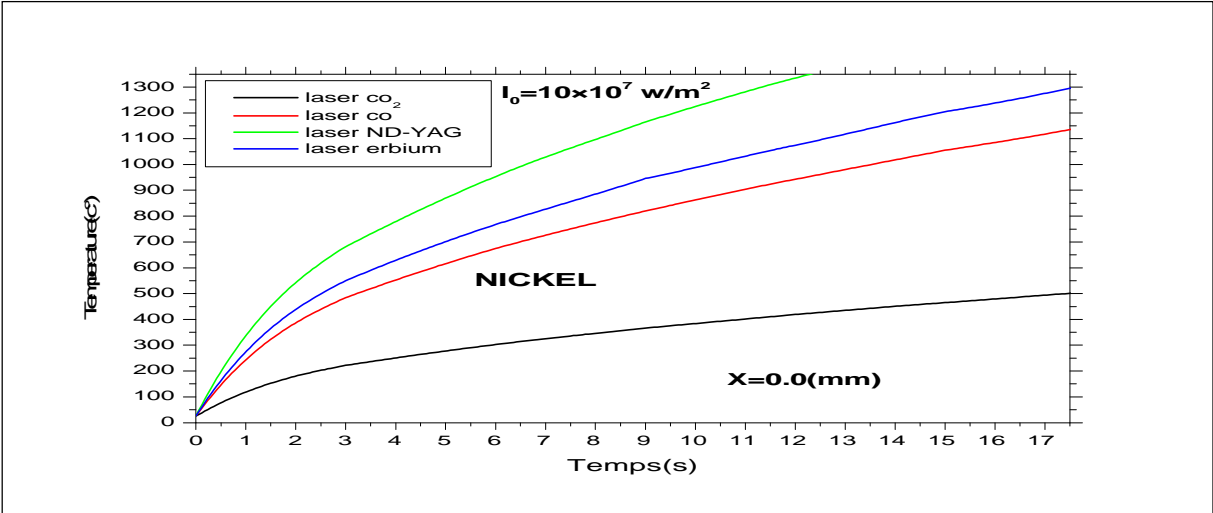


Figure IV.3: évolution de la température superficielle de Nickel pour différents lasers à des différentes intensités.

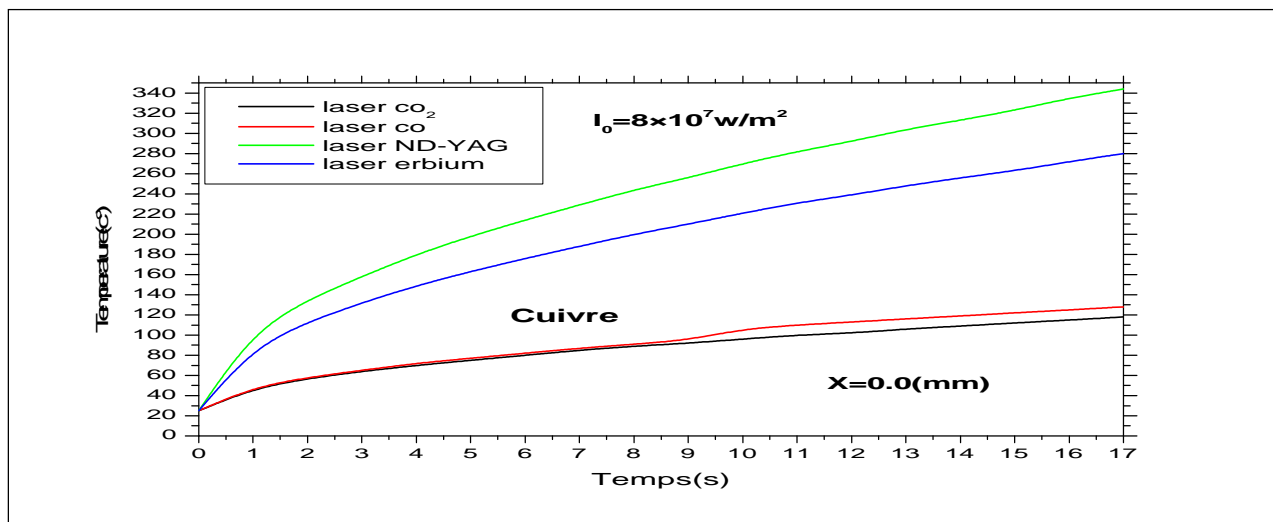
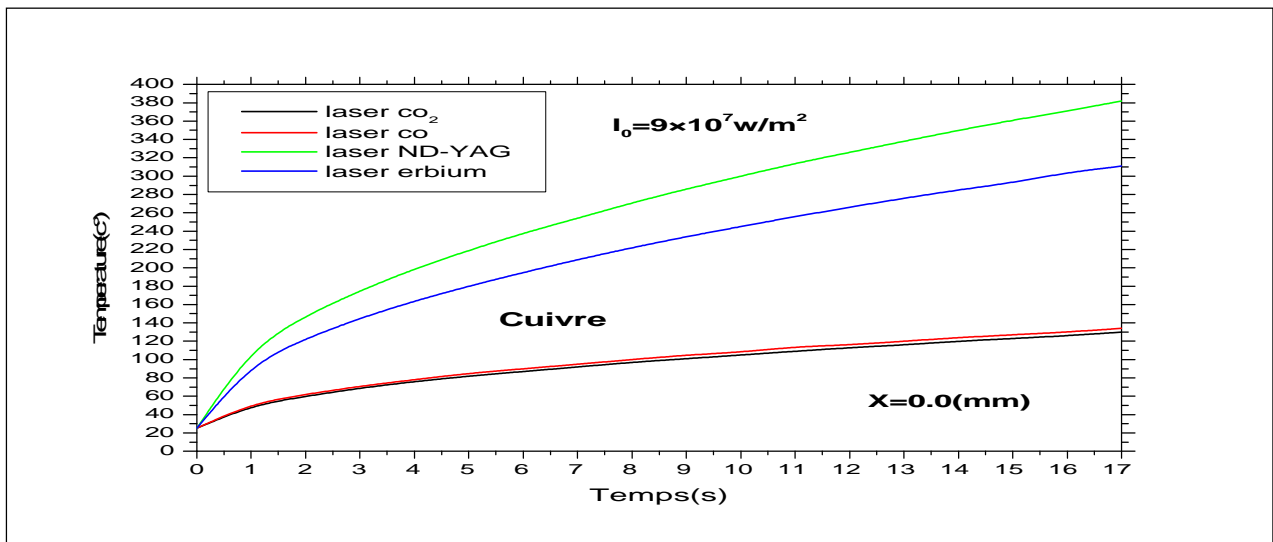
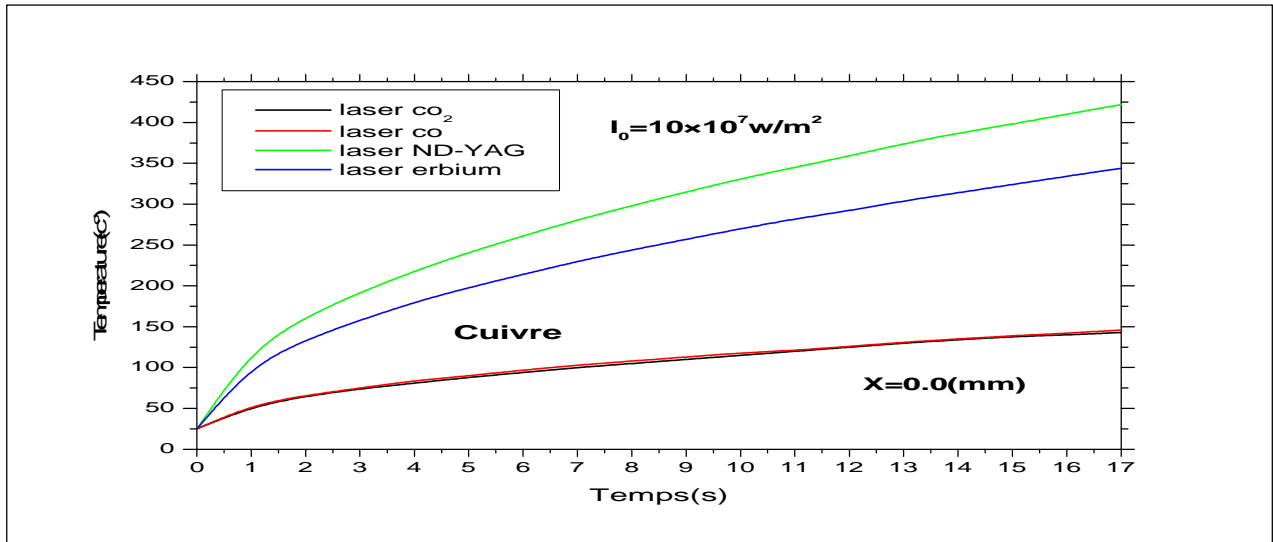


Figure IV.4: Evolution de la température superficielle de cuivre pour différents lasers à des différentes intensités.

Les figures IV.1,2,3,4, représentent l'évolution de la température superficielle ($X=0.0\text{mm}$) pour les matériaux Acier, fer, nickel, cuivre respectivement pour les différents lasers à des différentes intensités, le laser ayant la plus grande absorptivité et coefficient d'absorption et reliât à la longueur d'onde du laser, le (Tableau A) affiche le profil de température superficielle le plus évolué, dans l'ordre Nd :YAG, Erbium ; CO, CO₂. Cette différence d'évolution de température à une influence direct sur la structure cristalline finale de la surface du matériau traité. C'est la remarque générale enregistrée sur tous les matériaux traités (acier, fer, Nickel et le Cuivre).

Tableau IV.1 : l'absorbivité du laser pour les différents matériaux traités pour une intensité laser $I_0 = 10^8 \text{ W/m}^2$.

Type de matériau	Type de laser	Absorptivité ($A=1-R$)	Coefficient d'absorption [1/m]
Acier	ND -YAG	0.1461	28.113×10^{11}
	Erbium	0.1217	23.400×10^{11}
	CO	0.0952	18.305×10^{11}
	CO ₂	0.0470	8.890×10^{11}
Fer	ND-YAG	0.1117	36.788×10^{11}
	Erbium	0.0930	30.610×10^{11}
	CO	0.0727	23.951×10^{11}
	CO ₂	0.0353	11.632×10^{11}
Nickel	ND-YAG	0.0938	43.767×10^{11}
	Erbium	0.0781	36.430×10^{11}
	CO	0.0611	28.499×10^{11}
	CO ₂	0.0298	13.840×10^{11}
Cuivre	ND-YAG	0.0464	88.532×10^{11}
	Erbium	0.0386	73.746×10^{11}
	CO	0.0152	57.643×10^{11}
	CO ₂	0.0146	27.994×10^{11}

Comme on peut distinguer que l'évolution du profil de température superficielle en fonction du temps de l'interaction thermique de même type laser avec les quatre matériaux devient de plus en plus important dans le matériau ayant le plus grande absorptivité et coefficient d'absorption et le plus basse diffusivité thermique et une capacité thermique plus

grand , ce qui affiche le profil de température superficiel le plus évolué, dans l'ordre suivant, Acier, fer, Nickel et enfin le cuivre. Ce qui est dans le tableau B indiqué ci-dessous pour une intensité laser de 10^8 W/m². L'augmentation de l'intensité si pour avoir la température superficiale maximale au cours de traitement thermique superficiale en phase solide plus rapidement, l'ordre des effets des lasers reste toujours le même (laser ND-YAG, laser erbium, laser Co, et enfin le laser CO₂).

Tableau IV.2 : Température superficiale maximale pour différents matériaux et différents lasers à $t=6s$ pour une intensité laser $I_0= 10^8$ W/m².

Type de laser	Matériau	Absorptivité $A=(1-R)$	Diffusivité thermique $[m^2/s] \times 10^{-6}$	Capacité thermique massique $[J /Kg K]$	T_{MAX} [C°]
ND-YAG	Acier	0.1461	22.74	502.48	1435
	Fer	0.1117	22.29	460	1265
	Nickel	0.0938	23.38	447	953
	Cuivre	0.0464	116.32	385	261
ERBIUM	Acier	0.1217	22.74	502.48	1245
	Fer	0.0930	22.29	460	1055
	Nickel	0.0781	23.38	447	768
	Cuivre	0.0386	116.32	385	214
CO	Acier	0.0952	22.74	502.48	966
	Fer	0.0727	22.29	460	849
	Nickel	0.0611	23.38	447	675
	Cuivre	0.0152	116.32	385	97
CO ₂	Acier	0.0447	22.74	502.48	496
	Fer	0.0353	22.29	460	437
	Nickel	0.0298	23.38	447	303
	Cuivre	0.0146	116.32	385	94

Cependant l'évolution de profil de température superficiale n'est pas le critère unique de l'influence de type de laser sur le traitement thermique du matériau. On pourra s'articuler sur l'évolution de la température suivant la profondeur.

IV.2. Evolution de la température superficielle de l'acier maximale en profondeur, pour différents lasers à des différentes intensités.

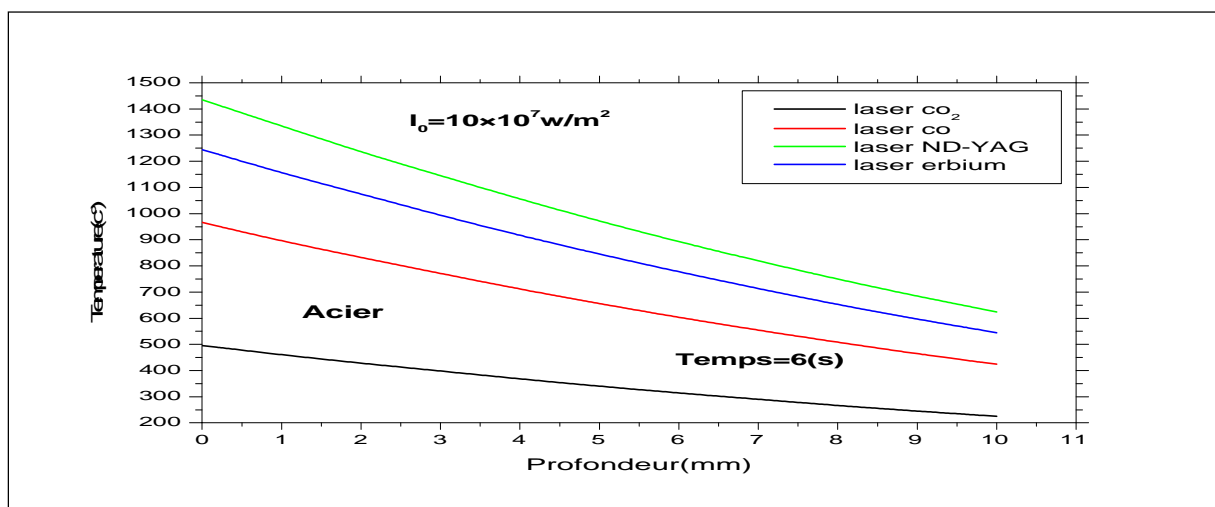
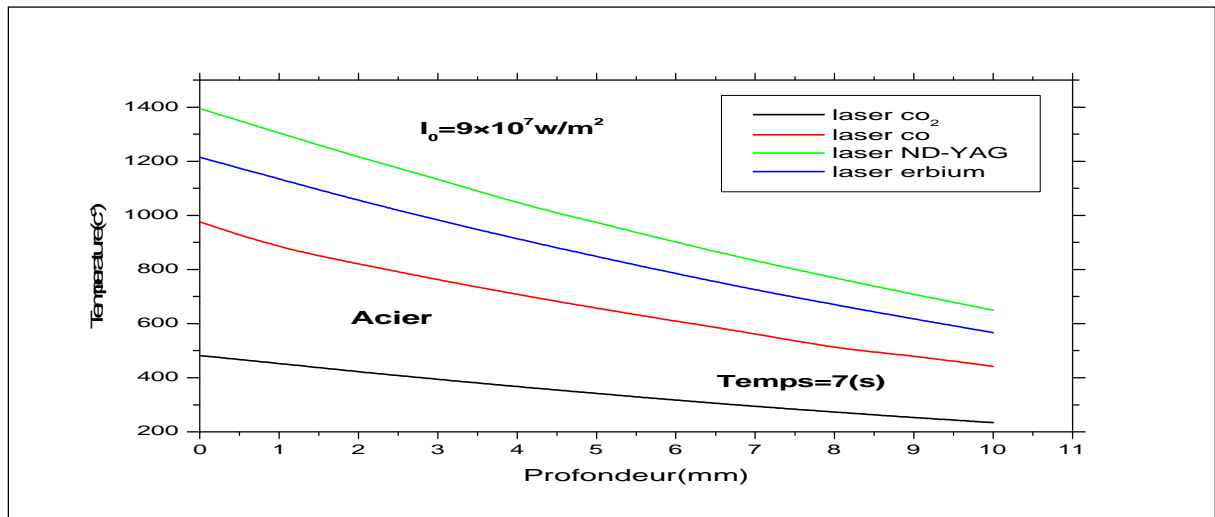
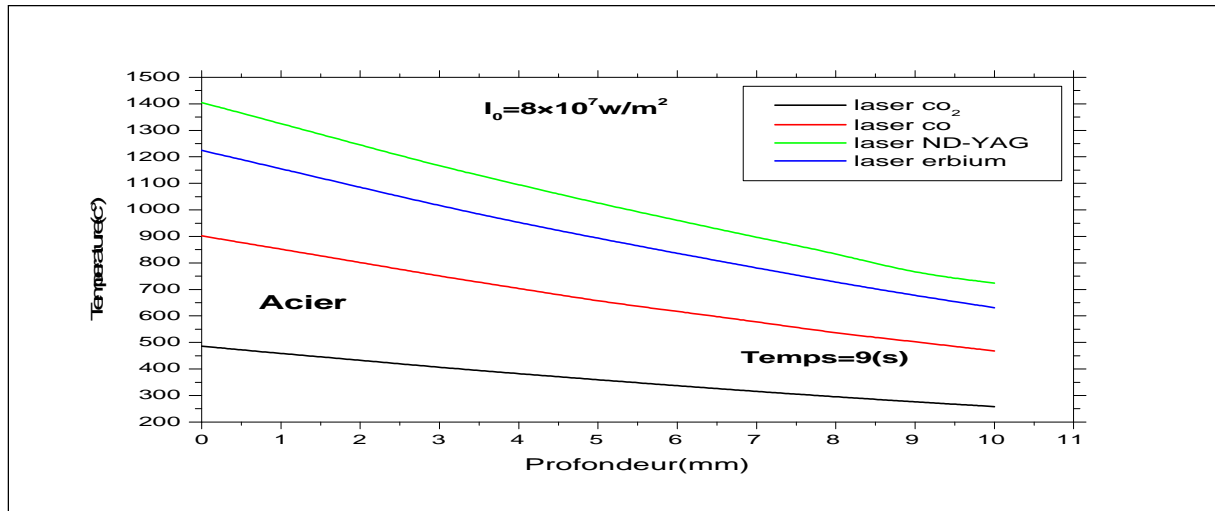


Figure IV.5 : évolution de la température superficielle de l'acier maximale en profondeur, pour différents lasers à des différentes intensités.

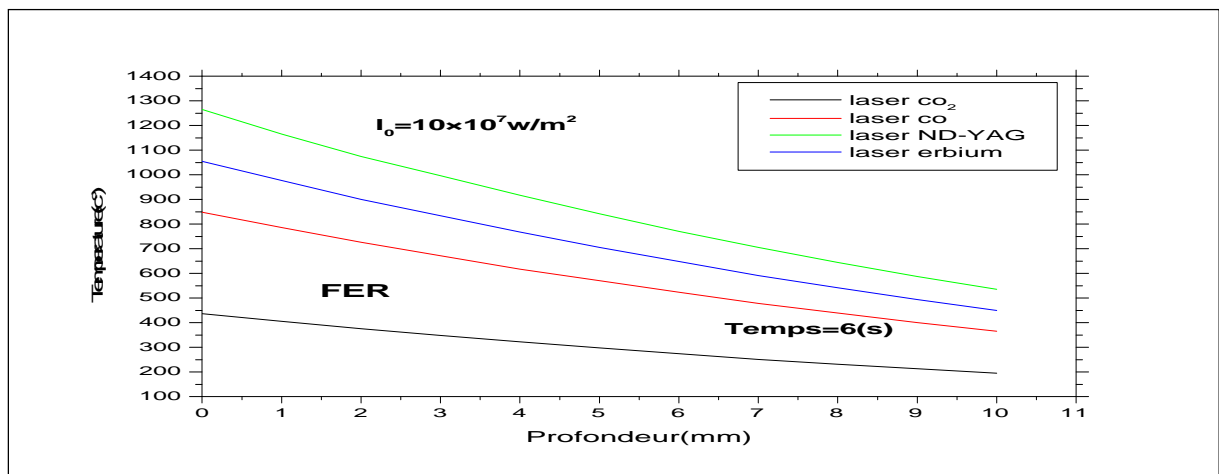
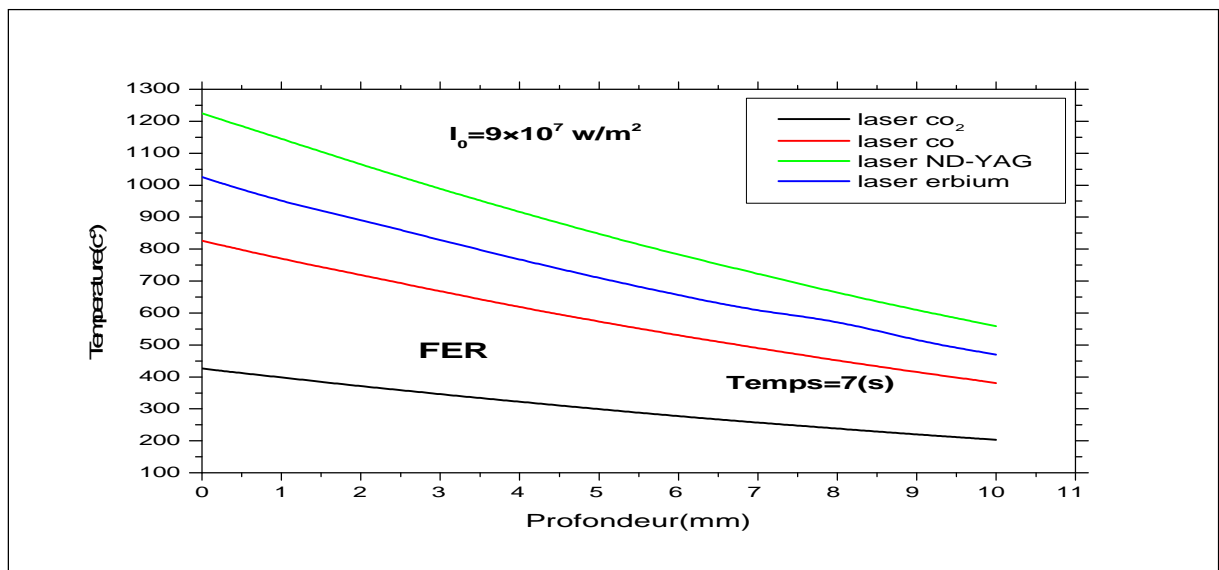
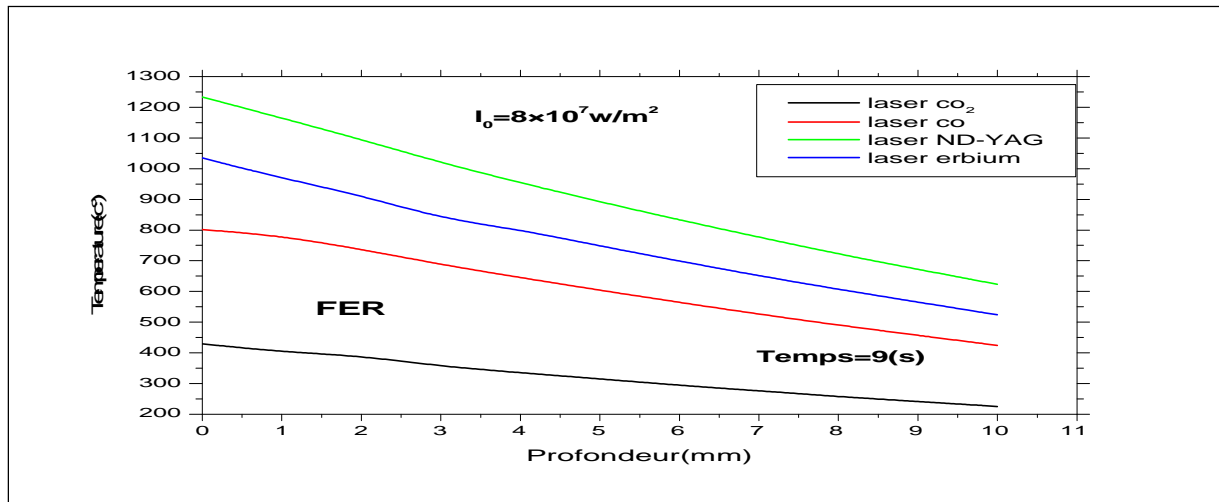


Figure IV.6: évolution de la température superficielle maximale de fer en profondeur, pour différents lasers à des différentes intensités.

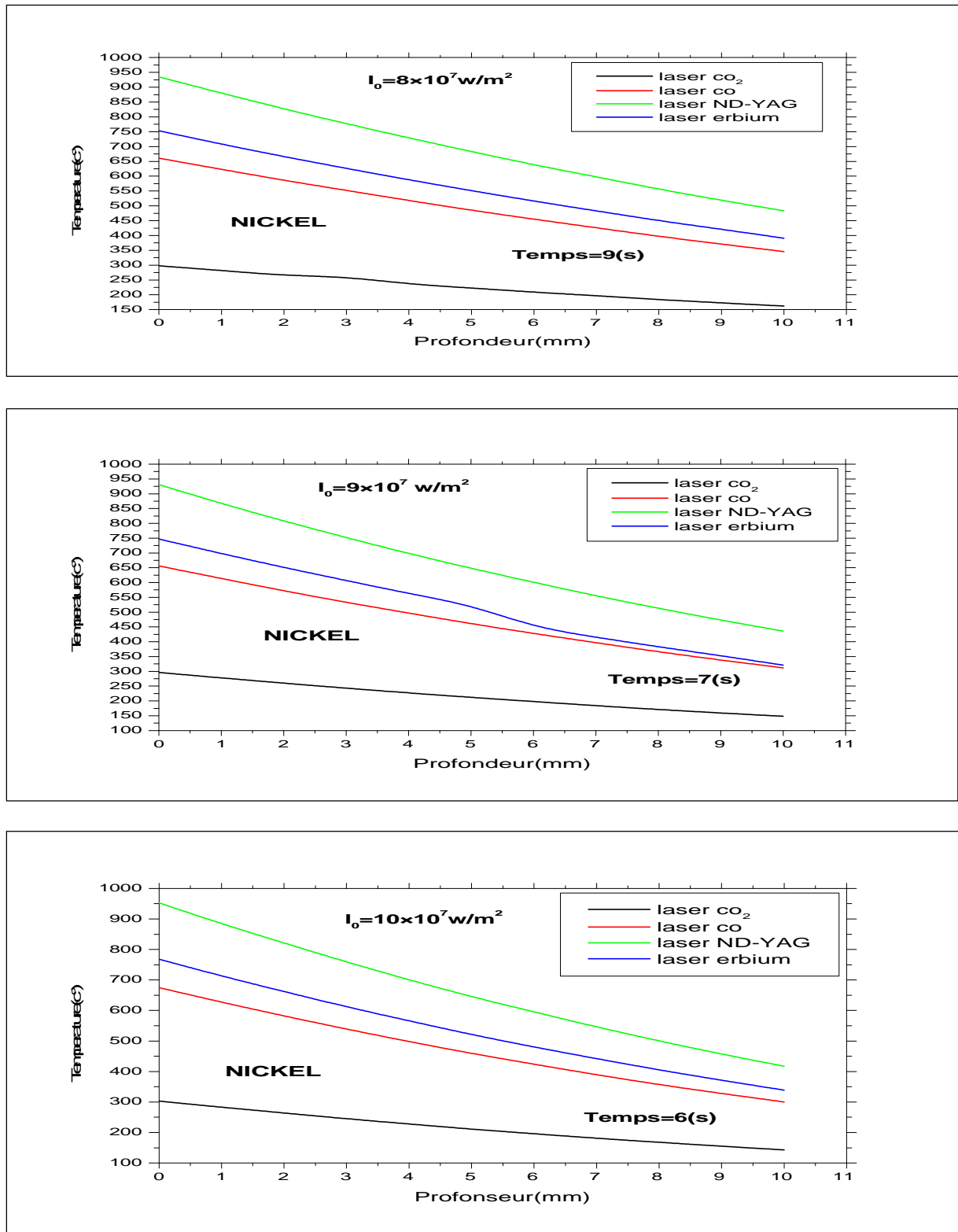


Figure IV.7 : évolution de la température superficielle maximale Nickel en profondeur, pour différents lasers à des différentes intensités.

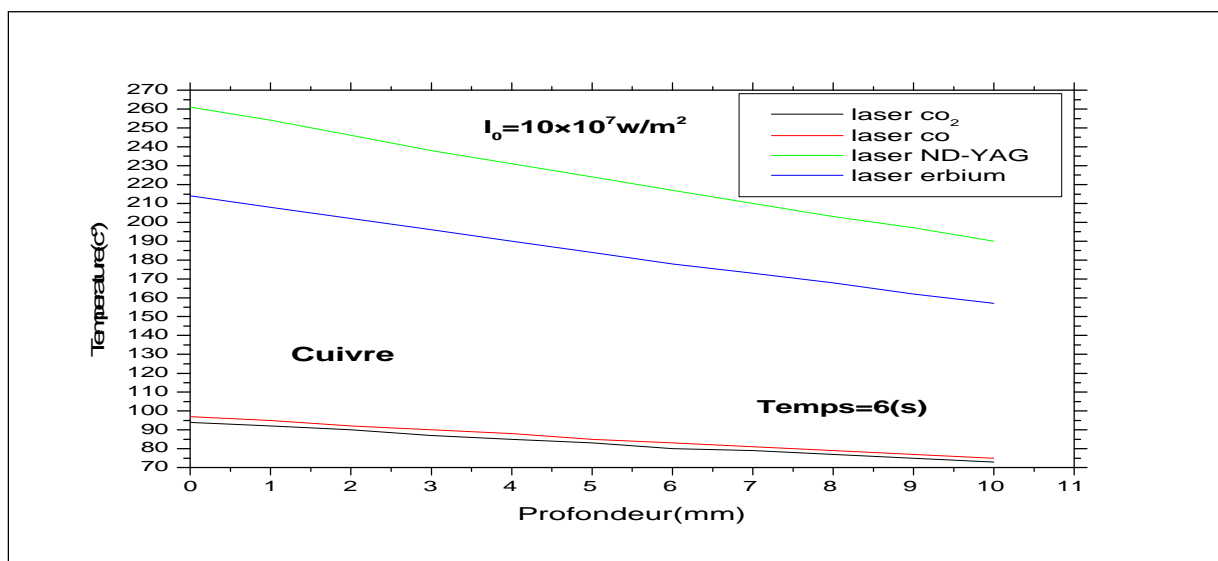
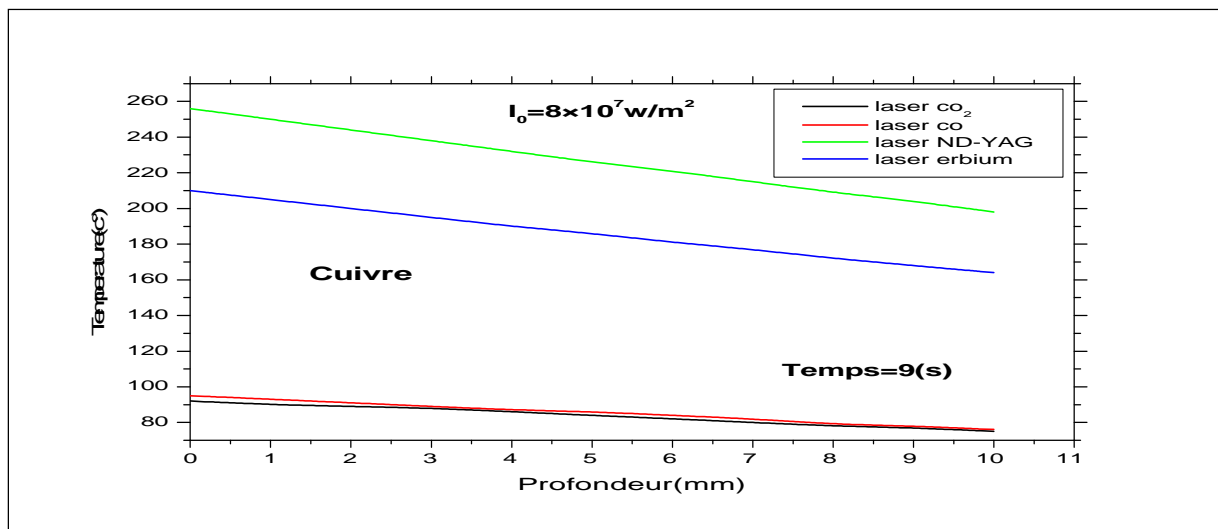
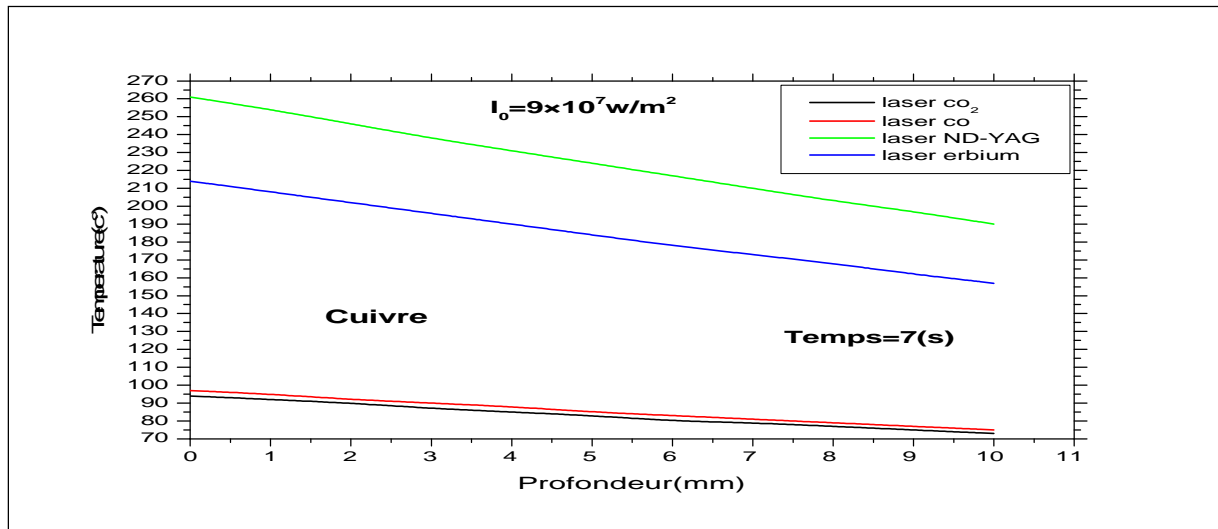


Figure IV.8 : évolution de la température superficielle maximale de Cuivre en profondeur, pour différents lasers à des déferentes intensités.

A une simple vue des figure(5678) la température maximal se situe sur la surface des matériaux $T_{X=0}=T_{MAX}$.

Tableau IV.3 : Evaluation de la temérature en profondeur pour un temps $t=6(s)$.et une puissance laser de $I_0=10^8$.

Type de laser	Matériau	Absorptivité (A=1-R)	Diffusivité	Conductivité Thermique [w/m k]	Température superficielle X=0 (mm)	Température en profondeur X=4 (mm)	ΔT
ND-YAG	Acier	0.1461	22.74	88	1435	1055	380
	Fer	0.1217	22.29	80	1265	917	348
	Nickel	0.0952	23.38	92	953	700	253
	Cuivre	0.0470	116.32	401	261	231	30
ERBIUM	Acier	0.1117	22.74	88	1245	916	329
	Fer	0.0930	22.29	80	1055	768	287
	Nickel	0.0727	23.38	92	768	566	202
	Cuivre	0.0353	116.32	401	214	190	24
CO	Acier	0.0938	22.74	88	976	711	265
	Fer	0.0781	22.29	80	849	618	231
	Nickel	0.0611	23.38	92	675	498	177
	Cuivre	0.0298	116.32	401	97	88	9
CO ₂	Acier	0.0464	22.74	88	486	382	128
	Fer	0.0386	22.29	80	437	323	114
	Nickel	0.0152	23.38	92	303	228	75
	Cuivre	0.0146	116.32	401	94	85	9

Pour une même intensité laser et une même tempe de l'interaction laser matériau en remarque que la température superficielle ou à la profondeur atteints les plus grandes valeurs dans le sens de l'augmentation de l'absorptivité thermique tendu que le gradient de température devient plus en plus important dans le sens de diminution de la conductivité et la diffusivité thermique alors que l'effet de pénétration de température dans les différent matériaux devient quant à lui important dans l'ordre suivant, dans l'ordre suivant des matériaux : cuivre, nickel, fer , acier , dans le sens de augmentation de la conductivité thermique la diffusivité thermique. Cette remarque reste vérifier quelque soit le type du laser et l'intensité laser.

Si pour ces raisons qu'il est concilié d'utiliser des lasers puissants dans la trempe superficielle des matériaux qui ayants des conductivités thermique élever pour éviter le durcissement en volume.

Conclusion

On conclut que la variation des paramètres du laser et des matériaux jouent un rôle très important sur les caractéristiques de la texturation obtenue. Pour avoir un bon traitement thermique superficiel il faut bien choisir un laser à un coefficient d'absorption et une réflectivité moins élevés qui sont liés à la longueur d'onde du laser et la conductivité électrique des matériaux traités.

Et pour le cuivre en raison de sa faible absorptivité et sa réflectivité et diffusivité thermique élevées le cuivre ne peut pas être découpé à l'aide d'une machine laser sans quelque adaptation spécialement conçues pour cet usinage.

Pour une meilleure utilisation laser, il est préférable de préparer la surface avant le traitement, par un coulage de couches absorbantes minces dans le but d'améliorer l'absorptivité de la surface, d'une part, et d'assurer la stabilité du couplage faisceau laser matière, d'autre part. Ces dépôts sont choisis de manière à présenter une excellente absorptivité vis-à-vis de la longueur d'onde du Laser, ils sont en général de couleur noire ou grise.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le processus de traitement thermique par laser est très compliqué vu la variété des propriétés physiques et chimiques qui sont nombreuses est complexe et dans la plupart des cas l'accès à la mesure de certains paramètres essentiels est très difficile, elle devient même impossible lorsqu'il s'agit par exemple de mesurer la température dans une couche mince, si pour ces raisons que l'intérêt de la modélisation est majeur, devant ces difficultés expérimentales, elle nécessite d'avoir des modèles ou des solutions analytiques (solution exacte) au problème du transfert de chaleur et de masse simples, fiables économes en investissement (matériel, humain, temps de calcul) en réponse à la principale difficulté évoquée par plusieurs auteurs, concernant l'adoption des conditions aux limites qui traduisent réellement les phénomènes physiques, ce modèle permet, moyennant le schéma numérique proposé, de résoudre l'équation de la chaleur en régime transitoire dans un domaine unidimensionnel avec une condition convective.

Le traitement d'un substrat supposé comme un milieu semi infini, à condition convective à la limite et recevant sur sa face latérale une source laser variable en temps ne peut pas être simulée directement par les formulations analytiques, à cet effet on a développé en première partie une étude basée sur la résolution semi analytique nécessite toutefois une inversion numérique de la place.

On a étudié l'influence de type de laser spécifiquement, Nd : YAG, EBRUIM ; CO ; CO₂, sur le traitement thermique des matériaux Acier ; fer ; Titane et en enfin le cuivre à l'état solide en vue de se substituer aux procédés classiques ; par la détermination de l'évolution des profils de températures en temps et en profondeurs.

En perspective, on souhaite que ce travail soit poursuivi et enrichi par l'influence d'autres lasers qui émettent de l'énergie dans les gammes différents de l'infrarouge tel que le visible et l'ultraviolet.

Bibliographie

Références bibliographique

[1]	Gilles BRASSART et Jean-Louis MEYZONNETTE et Jean-Paul POCHOLLE « Sources laser» Techniques de l'Ingénieur, traité Électronique (2013) E 4020
[2]	Sabine peyrou « le laser ses principe application en dermatogie » thèse pour le diplôme d'état de docteur en pharmacie Le 16/12/1996
[3]	CEA « le laser : un concentré de lumière » Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives,(2014) ISSN 1637-5408.
[4]	DJAOUANI Nedjwa Thème « Etude d'un plasma produit par ablation laser »le20-mai-2014
[5]	Dimitris PANTELIS « Traitements superficiels par faisceaux à haute densité d'énergie » Techniques de l'Ingénieur, traité Matériaux métalliques (1993) M 1 240 – 1
[6]	John C. Ion Eur. Ing., CEng, FIMMM,«principles, procedure and industrial application», Laser Processing of Engineering Materials (2005).
[7]	Cécile LANGLADE-BOMBA et Dominique GREVEY « Lasers de puissance et traitements superficiels » Techniques de l'Ingénieur, traité Matériaux métalliques (2002) M 1 642 -2
[8]	PATRICIA LAURENS et CATHERINE DUBOUCHET et Didier KECHEMAIR « application des lasers aux traitements de surface » Techniques de l'Ingénieur, traité Matériaux métalliques (1996) M 1 643
[9]	Terrat J. P., et Cartier M., «Comment poser un problème de traitement de surface », Techniques d'ingénieur, Vol. AGC4 (Conception et Production) ou bien Vol.MD2 (Traitement des métaux), N°. M1423, Mars 2000 .
[10]	Fouquet F., «Corrosion et traitements laser », dans : Laser de Puissance et Traitements des Matériaux, École de Printemps CNRS-EPFL, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Sireuil, (1991), pp.250-276.
[11]	Barralis J. et al, Précontrainte et traitements superficiels », Techniques d'ingénieur, Vol. MD1, N°. M1180, (1999)
[12]	GE Totten, L Xie, K Funatani –« Handbook of Metallurgical Process Design », edited by George E.Totten G.E.Totten & Associates, LLC Seattle, Washington, U.S.A.(2003)
[13]	Avril L «Elaboration de revêtement sur acier inoxydable, simulation de la fusion par irradiation laser, caractérisation structurale, mécanique et tribologique», thèse de docteur, école Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Centre d'Angers, décembre 2003

[14]	Yves DESALOS et Florence LE STRAT « Traitements thermiques Superficiels des aciers » Techniques de l'Ingénieur, traité Matériaux métalliques (2000) M 1 205
[15]	R. Fayolle B. Courtois « Ateliers de traitement thermique» Cahiers de notes documentaires - Hygiène et sécurité du travail - N° 183, 2e trimestre (2001)
[16]	BOUAZIZ M. N. et BOUTALBI, N. «Laser heating of a material with time-dependent laser source». International journal of thermophysics, vol. 32, no 5, (2011), pp .1047-1059
[17]	Jean-François Peyrucat « Le travail du laser sous contrôle du pyromètre infrarouge » mesures 780 - decembre 2005.
[18]	GEORGES « spinnler conception des machines principes et applications volume 2 « Chapitre13 »ISBN 2-88074-302-8© (1997), Presses polytechniques et universitaires Romandes
[19]	GREGOIRE ALLAIRE « analyse numérique et optimisation : une introduction a la modélisation et simulation numérique » IBNS 273021(2005)
[20]	FRANK et INCROPERA et DAVID P. DEWITT « Fundamentals of Heat and Mass Transfer » Boundary and Initial Conditions p 91
[21]	Jamel Bessrou, Mahmoud Bouhafs, Ridha Khadrani, Mohamed Jemmali « modèle thermique instationnaire d'un traitement superficiel par une source laser mobile » Laboratoire de génie mécanique, École nationale d'ingénieurs de Tunis, B.P. 37 le 13 novembre 2001
[22]	S. M. ZUBAIRT M. ASLAM CHAUDHRY « Heat conduction in a semi-infinite solid due to time-dependent laser source » tMechanical Engineering Department and Mathematical Sciences Department, King Fahd University of Petroleum and Minerals, Dhahran 31261, Saudi Arabia (Received 27 November 1992 and in final form 21 March 1995)
[23]	B S Yilbas et M Kalyon « Repetitive laser pulse Heating with a convective boundary condition at the surface » journal of physics d: applied physics j. phys. d: appl. phys. 34 (2001) 222–23
[24]	Gustavo Gutierrez, Tien-Chen Jen « Numerical simulation of non-linear heat conduction subjected to a laser source: the effects of variable thermal properties » International Journal of Heat and Mass Transfer vol 43 (2000) 2177±2192
[25]	S. Z. Shuja et B. S. Yilbas et S. Z. Shazli « Laser repetitive pulse heating influence of Pulse duty on temperature rise » Received: 6 January 2006 / Accepted: 29 June 2006 / Published online: 5 August 2006

[26]	H. Al-Qahtani « Laser Step Input Pulse Heating of a Finite Thickness Solid: Closed Form Solution of Temperature Rise » Lasers in Eng., Vol. 38, pp. 369–384 Reprints available directly from the publisher Photocopying permitted by license only
[27]	GABRIEL CARON-GUILLEMETTE « modélisation du procédé de trempe au laser Appliqué à des composantes mécaniques complexes » Mémoire présenté dans le cadre du programme de maîtrise en ingénierie en vue de l'obtention du grade de maître ès sciences appliquées université du QUÉBEC À RI MOUSKI(2013)
[28]	Agus Kartono « A Crank–Nicolson Scheme with ADI to Compute Heat Conduction in Laser Surface Hardening » Heat Transfer—Asian Research, 43 (6), 2014
[29]	NADIR Boutalbi « transferts thermiques non linéaires des matériaux par laser » Pour obtenir le grade de docteur en sciences de l'Université Yahia Farès de Médéa Spécialité Génie des procédés(2017)
[30]	Q Raymond « Cours de Mathématiques du signal » Options Eln & RLI Septembre 2012
[31]	O. ARFI et E. MEZAACHE « Transfert conductif instationnaire : Solution semi-analytique par la méthode de la transformée de Laplace » Actes de la Conférence Internationale de 2014 sur l'Énergétique Appliquée et la Pollution, organisée par le laboratoire LEAP, Décembre 14-15, 2014, Constantine, Algérie

Résumé

Le laser est devenu l'une des bases de la technologie moderne, grâce à son importance et à son efficacité de réaliser, ce que les autres sources d'énergie classique sont incapables de faire, en particulier dans la trempe superficielle des matériaux. Dans la compétitivité industrielle d'aujourd'hui, c'est un atout considérable que de pouvoir réaliser des produits qui ne s'usent pas, résistent à la corrosion, conservent dans le temps leurs propriétés mécaniques, électriques, optiques ou thermiques.

Le traitement thermique superficiel par laser peut être introduit plus rapidement dans le sens de la recherche d'une précision rehaussée nécessite une commande de contrôle de processus, ce procédé n'a pas trouvé une solution adéquate par mesures expérimentales, ce qui encourage les chercheurs à développer plusieurs modèles mathématiques. D'ailleurs, la modélisation mathématique réduit le coût expérimental et prédit les meilleures données paramétriques et leurs influences pour l'optimisation de l'opération de traitement.

Nous proposons dans ce travail une solution semi analytique de l'équation de la conduction thermique résultante du processus de trempe superficielle pour des matériau semi infini en 1D , avec une condition de frontière convective recevant sur sa face latérale un faisceau laser périodique type carré. Une approche semi analytique, basée sur l'algorithme de GAVER-STEHFEST pour l'inversion de la solution en domaine réel est adoptée. Et l'effet de type de matériau sur le profil de température relevé et discuté

Mots-clés: traitement thermique Superficiel, faisceau laser pulsé, modélisation

Abstract

Laser has become one of the bases of modern technology thanks to its importance and its effectiveness to achieve what other classical energy sources are unable do, especially in the process of heat treatment of surface. During the current industrial competitiveness, it is too hard to realize products that would stay intact, resistant to corrosion, and preserve by time their mechanical, electrical, optical or thermal properties. Laser surface tempering of materials can be introduced more quickly, in the sense of reaching high accuracy, requires a control of processes. The latter has not provide experimentally a proper solution, which encouraged researchers to develop several mathematical models. Moreover, mathematical modeling reduces the experimental cost and predicts the best parametric data and their influence on the optimization of the processing operation

In this work, we suggest a semi-analytic solution for the equation of heat conduction resulting from laser surface tempering of semi-infinite material, in 1D, with a convective boundary condition and receiving a periodical laser beam triangular type in its lateral face. A Semi-analytical approach, based on GAVER-STEHFEST algorithm for the inversion of the solution in real domain is adopted. And the effect of the material's types on the temperature profile is obtained and discussed .

Keywords: heat treatment of surface, pulsed laser beam, modeling :
