

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA BEJAIA
FACULTÉ DE TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE

MEMOIRE

PRÉSENTÉ POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME DE

MASTER

FILIÈRE : GÉNIE MÉCANIQUE

SPÉCIALITÉ : ÉNERGÉTIQUE

PAR :

HAMOUDI AISSA

ZOUAGUI IKHLEF

Thème

**Interaction thermique superficielle non linéaire, laser-matériau :
étude de l'effet non linéaire de l'absorptivité température-
dépendante**

Soutenu le 04/07/2019 devant le jury composé de:

Mr. Nait bouda

Président

Mr. N. Boutalbi

Rapporteur

Mr. Ali agha

Examineur

ANNÉE UNIVERSITAIRE 2018-2019

Remerciements

*Je remercie DIEU pour m'avoir donné le courage et la volonté
de mener à bien terminer ce travail.*

*Mes vifs remerciements à toutes les personnes qui m'ont aidé tout au
long de mon travail, particulièrement à:*

*mon encadreur Mr BOUTALBI N qu'il
trouve ici l'expression de mes sincères remerciements pour avoir
accepté de me diriger afin de mener à bien ce mémoire. Pour ces
conseils utiles, critiques fructueuses, je tiens à exprimer ici mes
profondes reconnaissance pour lui.*

*Je tiens aussi à remercier les membres de jury, qui ont acceptés de juger ce
travail, les enseignants du département de génie mécanique qui ont donné de
leur savoir.*

Sans oublier toute ma famille et mes amis (es).



Dédicace

On dédie ce travail :

Avant tout à nos chers parents, aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que vous méritez pour tous les sacrifices que vous n'avez cessé de nous donner depuis notre naissance, durant notre enfance et même à l'âge adulte.

A nos chers frères et chères sœurs.

A nos chers neveux et chères nièces

*A toute la famille **ZOUAGUI** et **HAMOUDI** et à la mémoire de nos grands-parents.*

A tous nos amis(es) sans exception

Et à toute la promotion 2018/2019 de génie mécanique.

Sommaire

Liste des figures	I
Liste des tableaux	II
Nomenclature	III
I Les lasers et leurs applications en traitement thermique superficielle	
Introduction générale	1
I.1 Historique	3
I.2 Généralités	6
I.2.1 La lumière	6
I.2.2 Les électrons	8
I.2.3 Principe de fonctionnement du laser	8
I.2.3.1 Absorption	8
I.2.3.2 Emission spontanée	9
I.2.3.3 Emission stimulée	9
I.2.4 Le pompage et l'inversion de population	10
I.2.5 Amplification du rayonnement	12
I.2.6 Schéma de principe du LASER	12
I.2.7 Caractéristiques de la lumière LASER	13
I.2.8 Différents types de laser	14
I.2.8.1 Lasers à solide	14
I.2.8.2 Lasers à liquide	15
I.2.8.3 Lasers à gaz	15
I.2.8.4 Laser à ions	16
I.2.8.5 Lasers chimiques	16
I.2.8.6 Laser excimer	17
I.2.8.7 Lasers à semi-conducteurs	18
I.2.8.8 Lasers à électrons libres	19
I.2.9 Domaine d'application	19
I.2.10 Laser et sécurité	21
I.3 Interaction laser-matière	22
I.3.1 Interaction Mécanique	22
I.3.2 Interaction photochimique	23

I.3.3 Interaction thermique	23
I.4 Traitement thermique superficielle par laser	25
I.4.1 Traitement thermique	25
I.4.2 Les type de traitement thermique	25
I.4.2.1 Traitements superficiels	25
I.4.2.2 Fusion superficielle	26
I.4.2.3 Traitement avec vaporisation	27
I.4.3 Traitements thermiques avec apport de matière	28
I.4.3.1 Traitement avec apport de matériau solide	29
I.4.3.2 Traitement avec apport de gaz réactif	29
I.5 Conclusion	29
II contrôle du processus TTL	
II.1 Introduction	30
II.2 Méthodes expérimentale	30
II.2.1 Le Pyromètre	30
II.2.1.1 Les mesure sans contact	31
II.2.1.2 Thermocouples	31
II.3 Modélisation numérique	32
II.4 Modélisation analytique	32
II.5 Modélisation de TTL	32
II.6 Modélisation mathématique	33
II.7 Modèles analytiques	33
II.8 Modèles Numériques	36
II.9 Modèles mathématique de TTL selon l'absorptivité température dépendent	38
II.10 Conclusion	39
III Etude de l'effet non-lineare de l'absorptivité température	
III.1 Introduction	40
III.2 Analyse mathématique	40
III.2 Description de la méthode de résolution (pdepe)	41
III.4 Données du problème	43
III.5 Résultats et discussion	45
III.6 Comparaison entre les deux lasers Nd :YAG et CO₂	56
III.7 Conclusion	57
Conclusion générale	58

Liste des figures

Figure I-1 : La longueur d'onde λ (lambda)	6
Figure I-2 : Détail du spectre visible	7
Figure I-3 : Schéma de principe du laser	13
Figure I-4 : Schéma d'un laser solide	14
Figure I-5 : Rendement d'un laser Nd :SeOCl ₂ pour différentes durée de l'impulsion [μ s]	15
Figure I-6 : Schéma laser He Ne	16
Figure I-7 : Laser chimique MIRACL	17
Figure I-8 : Laser excimer	18
Figure I-9 : Empilement de diodes laser	18
Figure I-10 : Principe du laser à électrons libres	19
Figure I-11 : Schéma des énergies potentielles d'une molécule excimère	23
Figure I-12 : Effet sur un matériau de l'exposition à un faisceau laser de densité de puissance et de durée d'interaction données	24
Figure I-13 : Fusion superficielle par irradiation laser	27
Figure I-14 : Principe d'un traitement thermique par laser avec apport de matériau (jet de poudre) et effets possibles sur les matériaux	28
Figure II.1 : Pyromètre infrarouge	30
Figure II.2 : Constitution d'un thermocouple industriel	31
Figure III-1 : Polynômes d'absorptivité température-dépendante, pour le Titane	46
Figure III-2 : Polynômes d'absorptivité température-dépendante, pour l'acier AISI304	47
Figure III-3 : Profils de température superficielle en phase d'échauffement en fonction du temps, obtenu à $A = cst$ et (T) , pour le TITANE sous l'effet thermique du laser Nd :YAG	48
Figure III-4 : Profils de température superficielle en phase d'échauffement en fonction du temps, obtenu à $A = cst$ et (T) ,	49

pour le TITANE sous l'effet thermique du laser Nd :YAG

Figure III-5 : Profils de température superficielle en phase d'échauffement en fonction du temps, obtenu à $A = cst$ et (T) ,

pour l'acier sous l'effet thermique du laser Nd :YAG

Figure III-6 : Profils de température superficielle en phase d'échauffement en fonction de la profondeur, obtenu à $A = cst$ et (T) ,

pour l'acier sous l'effet thermique du laser Nd :YAG

Figure III-7 : Profils de température superficielle en phase d'échauffement en fonction du temps, obtenu à $A = cst$ et (T) ,

pour le TITANE sous l'effet thermique du laser CO₂

Figure III-8 : Profils de température superficielle en phase d'échauffement en fonction de la profondeur, obtenu à $A = cst$ et $A (T)$,

pour le TITANE sous l'effet thermique du laser CO₂

Figure III-9 : Profils de température superficielle en phase d'échauffement en fonction du temps, obtenu à $A = cst$ et (T) ,

pour l'acier sous l'effet thermique du laser CO₂

Figure III-10 : Profils de température superficielle en phase d'échauffement en fonction de la profondeur, obtenu à $A = cst$ et (T) ,

pour l'acier sous l'effet thermique du laser CO₂

Liste des tableaux

Tableau I-1 : Les effets du faisceau LASER et ses applications différente suivant la longueur d'onde, l'intensité, la durée d'exposition	20
Tableau I-2 : les différentes classes de laser suivant la puissance et la longueur d'onde des radiations émises.	21
Tableau III-1 : Caractéristiques de titane et d'aisi 304	44
Tableau III-2 : Approximation polynomiale de l'absorption pour un faisceau laser de 1,07 mm	44
Tableau III-3 : Approximation polynomiale de l'absorption pour un faisceau laser de 10,6 mm	44
Tableau III-4 : variation de température pour A constante et A variable pour différentes profondeurs	49
Tableau III-5 : variation de température pour A constante et A variable pour différentes profondeurs	51
Tableau III-6 : variation de température pour A constante et A variable pour différentes profondeurs	54
Tableau III-7 : variation de température pour A constante et A variable pour différentes profondeurs	56
Tableau III-8 : variation de la température selon le type de laser	56

NOMENCLATURE

B_0 : Énergie laser adimensionnelle absorbée.

B_i : Nombre de Biot.

C_1 : Coefficient adimensionnel de la conductivité thermique réduite.

C_2 , C_3 : Coefficients adimensionnels de la capacité thermique réduite.

C_p : Capacité thermique [J / kg K].

h : Coefficient de convection thermique [$\text{Wm}^{-2} \text{K}^{-1}$]

I_0 : Puissance de la source laser [W/m^2]

k : Conductivité thermique [W /mK]

q' : Source interne générée par la source laser [W/m^3]

R : Réflectivité de surface.

t : Temps [s]

$T(x, t)$: Température [$^{\circ}\text{C}$].

T_F : température de fusion [$^{\circ}\text{C}$].

T_{∞} : température ambiante [$^{\circ}\text{C}$].

w : Énergie laser adimensionnelle absorbée à la surface.

X : Distance réduite

β, γ, λ^2 : Paramètres de la pulsation de la source laser [s^{-1}]

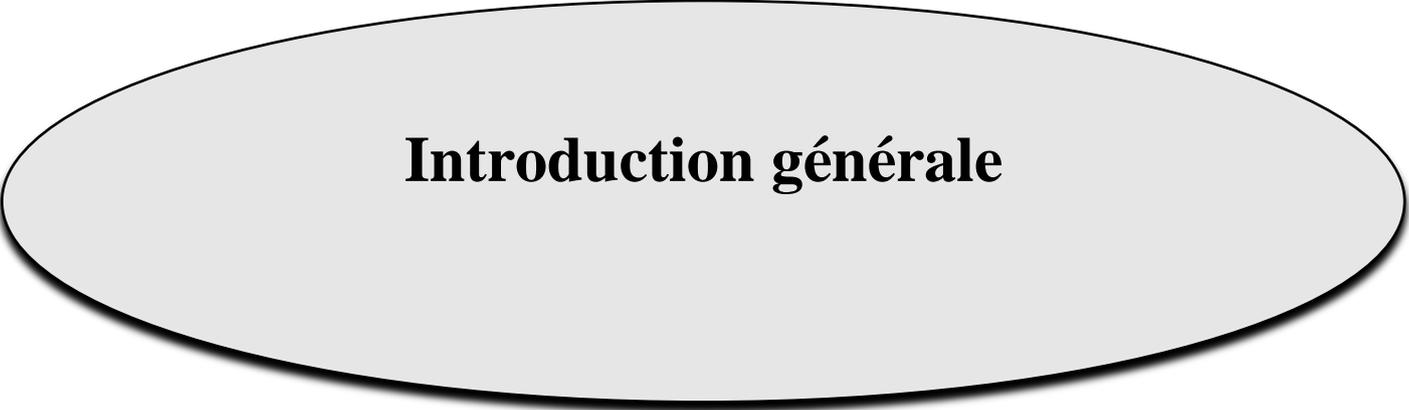
ρ :Densité [kg /m^3]

μ : Coefficient d'absorption [1/m]

Θ : Température adimensionnelle.

α : Diffusivité thermique [m^2/s]

TTL : Traitement thermique par laser.



Introduction générale

Introduction générale

Le laser est devenu l'une des bases de la technique moderne, grâce à son importance et à son efficacité de réaliser ce que les autres sources d'énergie sont incapables de faire, en particulier dans le traitement thermique 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... etc

Grâce aux réponses toujours plus précises qu'ils apportent à des situations industrielles toujours plus diversifiées et exigeantes, les traitements de surfaces sont devenus incontournables, et ont permis de répondre la plupart du temps à ce souci d'optimisation des propriétés superficielles.

Dans la plupart des applications pratiques du traitement au laser, les matériaux ne sont pas des éléments purs avec des surface propre, mais alliages en général la surface rugueuse et oxydée. Plus les conditions de surface techniques ne s'écartent des conditions de propreté physiques, plus la densité d'informations des constantes optiques disparaissent. Dans la littérature, seules quelques recherches sont concernées par l'influence de la rugosité comme facteur très important modifiant les propriétés de surface en ce qui concerne le processus des matériaux laser, la variation et l'évolution de l'absorptivité ainsi que l'émissivité doit être prise en compte dans la mesure de la température superficielle de la pièces traité .

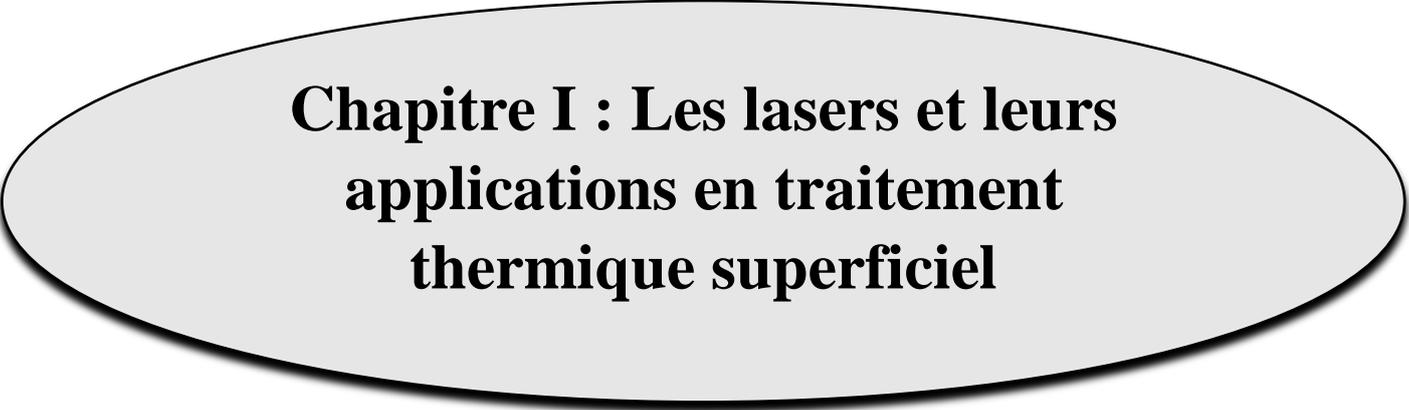
Le mémoire est structurée selon les chapitres suivants :

Le premier à caractère général fournit d'abord une généralité sur les lasers, leurs fonctionnements, leurs caractéristiques, leurs applications d'usinage, et enfin les différents procédés de TTL avec un aperçu sur le durcissement superficiel en phase solide.

Le deuxième chapitre se base sur les techniques de contrôle de TTL, soit expérimentales par les appareils, ou théoriques par la modélisation mathématique. Suivi d'une revue des modèles analytiques et numériques développés dans le cas où l'absorptivité est supposée constante ou dépendante de température superficielle sous forme d'un polynôme linéaire.

Le Troisième chapitre, qui est le but de notre étude, présente une étude de l'influence de l'absorptivité température dépendante sous un polynôme de l'ordre 3 pour un milieu unidirectionnel semi-infini recevant sur sa face latérale un flux laser variable imposé sur sa surface latérale. Qui provoque une EDP non linéaire en une dimension. À cet effet la commande pdepe sous Matlab a été utilisée pour résoudre le problème. Des résultats sont obtenus et discuter sur l'influence de la non-linéarité de transfert thermique dû à l'absorptivité température dépend pour deux cas de matériaux l'acier et le titane et pour deux types de laser Nd : YAG et CO2.

Finalement un aboutissement logique de cette démarche, nous amène à une conclusion générale.



**Chapitre I : Les lasers et leurs
applications en traitement
thermique superficiel**

I.1 Historique : [1]

En mai 1960, **Theodore MAIMAN** décrit le fonctionnement du premier laser à rubis. Depuis, le laser est devenu incontournable dans l'industrie, la médecine, notre vie quotidienne, mais aussi dans la recherche.

Dans un article publié en 1917, Albert Einstein introduit un troisième processus : l'émission stimulée. Il s'agit du processus inverse de l'absorption, se produisant, comme elle, en présence de rayonnement incident résonant avec la fréquence de transition des atomes.



Lors de l'émission stimulée, un photon d'énergie $h\nu$ induit la désexcitation d'un atome du niveau 2 vers le niveau 1. Celle-ci s'accompagne de l'émission d'un photon inducteur de même fréquence, même direction de propagation et même état de polarisation. Le faisceau incident de lumière « s'enrichit » en photons identiques pour venir créer une amplification de la lumière. Le photon créé par émission stimulée possède les mêmes propriétés que le photon « déclencheur » (fréquence, phase, direction de propagation, état de polarisation).

Cependant pour que le processus d'absorption ne cache pas le processus d'émission il est nécessaire qu'il y ait plus d'atomes dans l'état haut que dans l'état bas. Or, dans la matière les particules sont beaucoup plus nombreuses dans l'état fondamental que dans un état excité. Il a alors fallu trouver un moyen de renverser la tendance thermique pour obtenir, dans le milieu, plus de particules dans un état excité que dans un état fondamental, c'est-à-dire réaliser une inversion de population.

Cela semblait irréalisable car le coefficient de probabilité de retombée spontanée des atomes $A_{2 \rightarrow 1}$ est très grand : de 10^6 à 10^9 par seconde. Albert Einstein avait notamment montré que cette probabilité était proportionnelle au cube de la fréquence.

Finalement Charles Hard Townes a utilisé l'idée d'Einstein pour construire son premier appareil, en 1954. Il se sera passé presque 40 ans pour passer de l'imagination d'Einstein à la réalisation pratique de l'émission stimulée. Charles Townes travaillait sur la microscopie micro-onde des molécules à l'aide d'oscillateurs électroniques. Ainsi en passant de la lumière, c'est-à-dire des fréquences de 10^6 Ghz, aux micro-ondes, fréquences de l'ordre du GHz, la probabilité de retombée spontanée des atomes se trouve divisée par un million au cube !

Toute l'astuce de son appareil résidait dans le fait que les atomes dans les niveaux d'énergie E_1 et E_2 n'ont pas le même moment dipolaire électrique. Il a proposé de créer un gradient de champ électrique afin que les atomes dans ces deux niveaux d'énergie ne soient pas déviés de la même façon. Il a choisi de dévier les atomes qui se trouvent dans le niveau E_1 contre une paroi refroidie à l'azote liquide, pour les solidifier. Les atomes dans l'état E_2 étaient, par contre, dirigés vers un orifice pour venir tomber dans un guide d'onde, dans lequel se trouvait l'onde incidente. Par la suite, l'onde radar émise ressortait amplifiée. Charles Townes a appelé son appareil Microwave Amplifiery by Stimulated Emission of Radiation.



Enfin Charles Townes a utilisé l'idée d'Einstein pour construire son premier appareil, en 1954. Il se sera passé presque 40 ans pour passer de l'imagination d'Einstein à la réalisation pratique de l'émission stimulée. Charles Townes travaillait sur la microscopie micro-onde des molécules à l'aide d'oscillateurs électroniques. Ainsi en passant de la lumière, c'est-à-dire des fréquences de 10^6 Ghz, aux micro-ondes, fréquences de l'ordre du GHz, la probabilité de retombée spontanée des atomes se trouve divisée par un million au cube !

Toute l'astuce de son appareil résidait dans le fait que les atomes dans les niveaux d'énergie E_1 et E_2 n'ont pas le même moment dipolaire électrique. Il a proposé de créer un gradient de champ électrique afin que les atomes dans ces deux niveaux d'énergie ne soient pas déviés de la même façon. Il a choisi de dévier les atomes qui se trouvent dans le niveau E_1 contre une paroi refroidie à l'azote liquide, pour les solidifier. Les atomes dans l'état E_2 étaient, par contre, dirigés vers un orifice pour venir tomber dans un guide d'onde, dans lequel se trouvait l'onde incidente. Par la suite, l'onde radar émise ressortait amplifiée. Charles Townes a appelé son appareil Microwave Amplifiery by Stimulated Emission of Radiation.

Charles Townes a ensuite réfléchi à la manière de transposer son appareil utilisant les micro-ondes à des fréquences plus grandes. En 1958 il publie, avec son nouveau collaborateur Arthur Schawlow, un article qui présente une nouvelle idée pour réaliser l'inversion de population : le pompage optique. Charles Townes avait bénéficié, en 1955, d'une année sabbatique au cours de laquelle il avait passé plusieurs mois dans un laboratoire de l'ENS de la rue d'IUlm à Paris avec Albert Kastler. Dans ce laboratoire, Albert Kastler utilisait le pompage optique pour orienter le moment magnétique d'atomes avec de la lumière polarisée.

Les électrons d'un atome possèdent deux états quantiques, un spin up et un spin down. Ils n'ont pas la même énergie, on décrit ainsi deux niveaux d'énergie magnétique. À l'aide de la lumière polarisée Albert Kastler arrivait à transmettre de la rotation aux atomes. Il était ainsi capable de faire passer les atomes d'un niveau d'énergie à un autre en utilisant une sorte de pompage optique.

Charles Townes avait eu le pressentiment qu'il était possible de généraliser le pompage optique pour fabriquer le LASER.

Le premier LASER fabriqué en 1960 par Théodore MAIMAN. Il était réalisé à l'aide d'un rubis dopé avec des ions Chrome.

Le pompage est déclenché par un flash de lumière blanche. Les radiations jaunes, vertes et violettes du flash sont absorbées par les ions Chrome qui changent de niveau d'énergie. On a donc une très grande partie du spectre de la lumière blanche qui est utilisée pour faire monter les atomes dans des niveaux électroniques plus élevés (le continuum).

Grâce à la largeur de bande offerte par le cristal dopé, seul 10% de la lumière blanche suffit à réaliser l'inversion de population. Les atomes dans le continuum redescendent spontanément par échange d'énergie avec les vibrations thermiques dans le cristal jusqu'à se retrouver très rapidement dans le bas de la bande d'énergie. C'est de cette manière qu'est réalisée l'inversion de population.

Le rubis est un cas particulier, pour la plupart des LASER, l'inversion de population est réalisée entre un niveau très excité et un niveau excité plus bas qui n'est pas l'état fondamental

Par la suite les LASER sont devenus accordables grâce à de nouveaux colorants élaborés par les chimistes afin de faire varier les longueurs d'onde.

I.2 Généralités

I.2.1 La lumière [2]

Le rayonnement lumineux est constitué d'ondes électromagnétiques qui se propagent à très grande vitesse (près de 300 000 km par seconde). Ces ondes transportent un champ électrique E et un champ magnétique B qui sont perpendiculaires l'un à l'autre. La longueur d'onde λ (lambda) est la distance qui sépare la crête de deux vagues (figure I.1). Ce rayonnement transporte de l'énergie sous forme de grains ou quanta lumineux. L'association onde-particule s'appelle un photon.

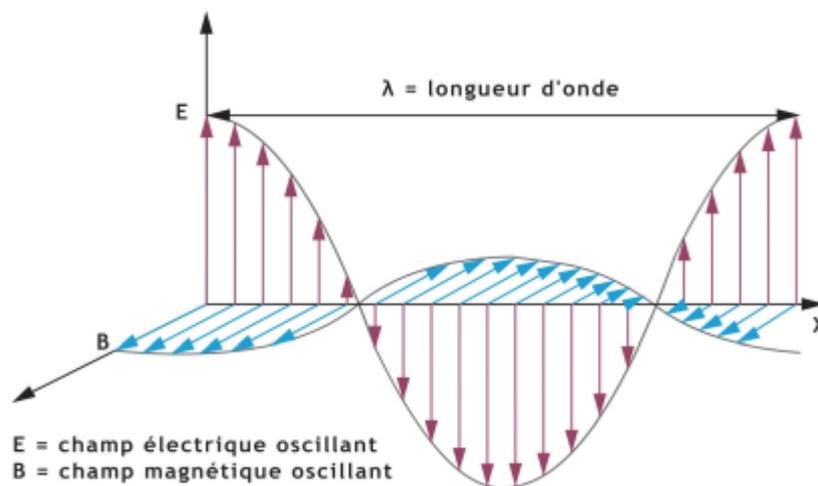


Fig. I-1 : La longueur d'onde λ (lambda) [2]

La lumière visible par l'œil humain est comprise entre les longueurs d'onde de 0,38 (violet) à 0,78 micromètre (rouge) (un micromètre correspond à un millionième de mètre ou encore à un

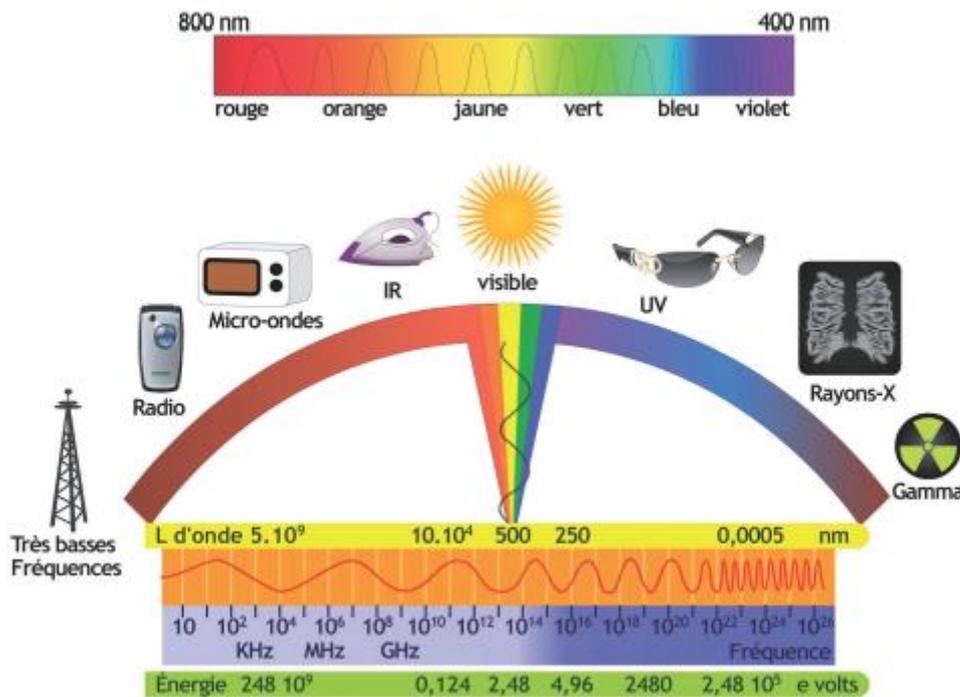


Fig I-2 : Détail du spectre visible [2]

millième de millimètre). La « couleur » est associée à une énergie. Cette énergie associée est inversement proportionnelle à la longueur d'onde : elle augmente du rouge au violet. Outre la lumière visible, par extension, on appelle parfois « lumière » d'autres ondes électromagnétiques, telles que celles situées dans les domaines infrarouge (IR, longueur d'onde supérieure à 0,78 micromètre) et ultraviolet (UV, longueur d'onde inférieure à 0,38 micromètre). Dans le spectre visible, le nombre de sept couleurs (rouge, orangé, jaune, vert, bleu, indigo, violet) a en partie été choisi à cause de l'analogie entre la lumière et le son, la gamme musicale comprenant sept notes par octave. Il correspond aussi approximativement au nombre de couleurs qu'un individu moyen peut discriminer dans le spectre lumineux. Le plus critiqué des choix de Newton est de faire de l'indigo une couleur principale, alors qu'il correspond à une gamme de fréquences très étroite. Souvent, dans les figurations symboliques des arcs en ciel, on préfère donc l'éliminer pour ne garder que six couleurs, qui ont l'avantage de consister en trois couleurs fondamentales (rouge, bleu, jaune) pouvant générer les trois autres par synthèse soustractive (fig. I-2).

I.2.2 Les électrons [2]

La plus petite partie d'un élément chimique est l'atome que l'on peut décrire de façon simplifiée comme l'assemblage d'un noyau, lui-même constitué de protons de charge positive et de neutrons non chargés, entouré d'électrons de charge négative. Le noyau concentre quasiment toute la masse. L'ensemble de l'atome est électriquement neutre. Tous les atomes qui possèdent le même nombre de protons ou de neutrons se comportent comme un même élément chimique : c'est le nombre d'électrons d'un atome qui détermine ses propriétés chimiques. Les électrons se déplacent dans l'atome, mais ils sont astreints à posséder certaines énergies très précises qui sont en nombre limité. Seuls ces états énergétiques sont accessibles aux électrons et ceux-ci peuvent passer de l'un à l'autre en gagnant ou perdant la différence d'énergie qui sépare les niveaux. Les états excités sont (plus ou moins) instables.

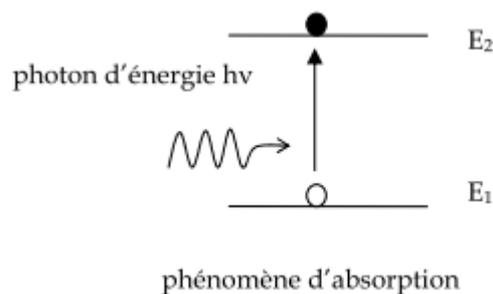
I.2.3 Principe de fonctionnement du laser [3]

On considère un atome soumis à un rayonnement électromagnétique. Les niveaux d'énergie accessibles aux électrons de cet atome sont notés $E_1, E_2, E_3 \dots$. E_1 correspondant au niveau fondamental.

Le rayonnement électromagnétique a une fréquence ν telle que $h\nu = E_2 - E_1$. Les photons de ce rayonnement peuvent alors interagir avec l'atome suivant 3 processus :

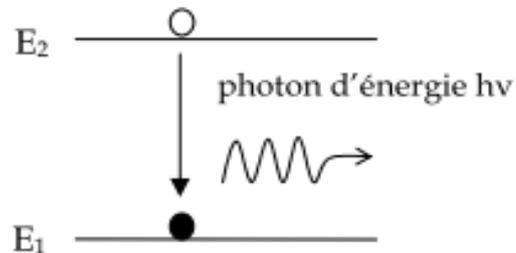
I.2.3.1 absorption [3]

Le photon d'énergie $E = E_2 - E_1$ peut être absorbé et permettre la transition d'un électron du niveau E_1 vers le niveau E_2 .



I.2.3.2 émission spontanée [3]

L'émission correspond à la transition inverse ; l'électron revient très rapidement à son niveau fondamental avec émission d'un photon de même énergie que le photon absorbé.

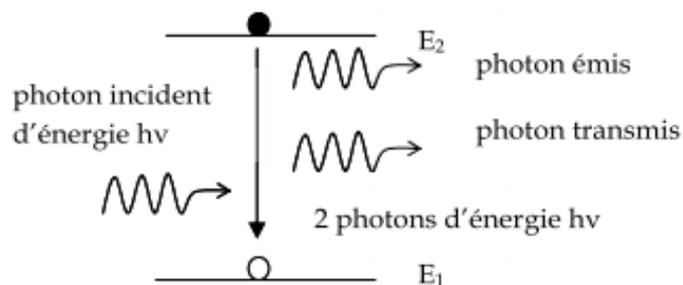


phénomène d'émission spontanée

Cette émission spontanée se fait dans des directions quelconques ; elle est dite isotrope.

I.2.3.3 émission stimulée [3]

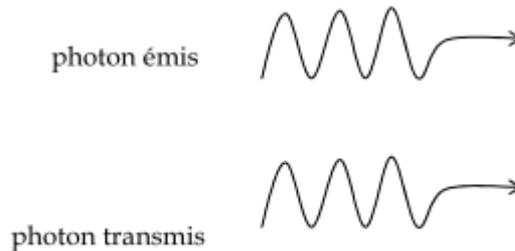
En 1917, EINSTEIN décrit le principe de l'émission stimulée. On considère que l'atome est excité et possède déjà un électron au niveau d'énergie E_2 . Sous l'action du rayonnement électromagnétique d'énergie $h\nu = E_2 - E_1$, la transition de l'électron vers le niveau 1 est alors déclenchée (stimulée) avec émission d'un photon.



phénomène d'émission stimulée

La particularité de ce type d'émission est que le photon émis (photon stimulé) prend strictement les mêmes caractéristiques que le photon incident ; à savoir :

- ils ont la même fréquence,
- ils ont la même trajectoire : l'émission n'est plus isotrope, elle est dite unidirectionnelle
- ils évoluent en phase



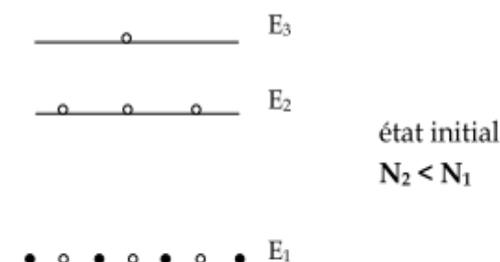
L'émission stimulée apparaît donc comme une duplication de la lumière ou un renforcement de l'onde incidente.

Pour qu'il y ait amplification du rayonnement suivant ce processus, il faut que le nombre d'émissions stimulées soit supérieur au nombre des absorptions. Il doit donc y avoir davantage d'électrons dans le niveau E_2 que dans le niveau E_1 : pour cela, on réalise une inversion de population par la méthode de pompage.

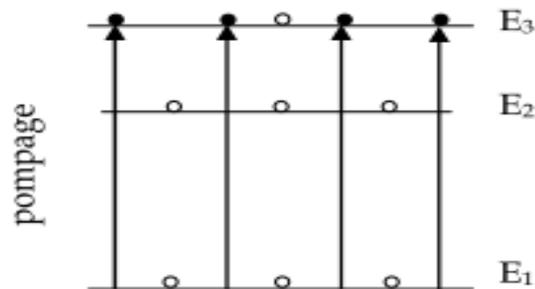
I.2.4 Le pompage et l'inversion de population [3]

Il s'agit d'un procédé mis au point en 1950 par Alfred KASTLER (1902-1984), physicien français. On considère le pompage à trois niveaux.

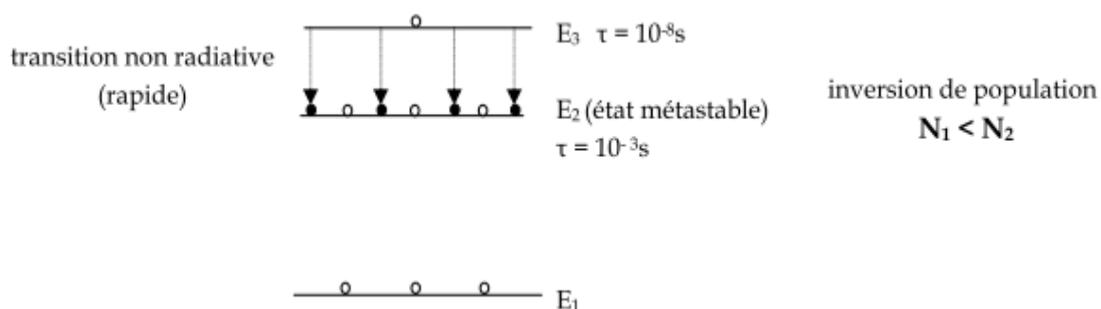
On considère un état initial caractérisé par cette répartition des électrons sur les différents niveaux d'énergie.



Une excitation du milieu (par décharge électrique, réaction chimique, courant électrique, lampe flash etc...), fait passer des électrons du niveau E_1 à un niveau supérieur E_3 :



Le niveau E_3 est caractérisé par une durée de séjour des électrons très courte (de l'ordre de 10^{-8} s) si bien que les électrons passent très rapidement vers le niveau E_2 sans émission de photons : on parle de transition non radiative (perte d'énergie par choc entre particules).

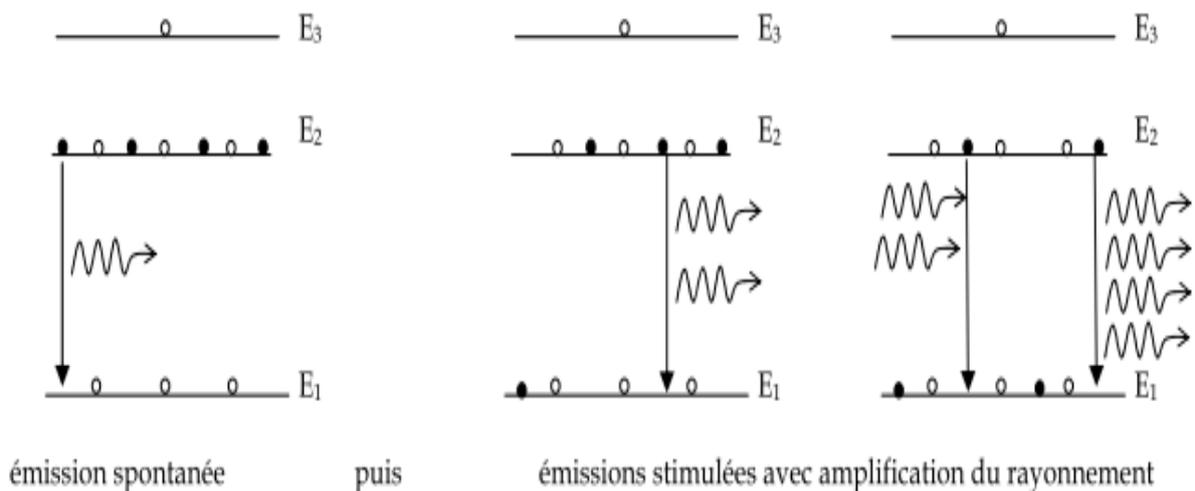


La durée de séjour des électrons sur le niveau E_2 est relativement « long » ; le niveau E_2 est dit métastable. Le niveau E_2 se « peuple » donc au détriment du niveau E_1 qui se dépeuple. On a réalisé une inversion de population.

L'inversion de population ne peut être réalisée que dans certains types de milieux. Le milieu qui a subi l'inversion de population est appelé milieu actif.

I.2.5 Amplification du rayonnement [3]

L'inversion de population étant réalisée, certains électrons passent spontanément du niveau E_2 vers le niveau E_1 avec émission de photons d'énergie $E_2 - E_1$. Ces photons vont alors interagir avec des électrons sur le niveau E_2 avec production d'autres photons suivant le phénomène d'émission stimulée. De la même manière, ces photons vont à leur tour provoquer une émission stimulée de photons et ainsi de suite. Le rayonnement s'amplifie alors. Lorsque les électrons sont revenus à l'état fondamental, ils sont de nouveaux excités par pompage optique.



I.2.6 Schéma de principe du LASER [3]

Cependant, le processus d'émission stimulée n'est pas suffisant pour produire à lui seul un faisceau laser. C'est pourquoi le milieu actif est placé dans un résonateur optique, aussi appelé oscillateur laser. Pour multiplier les émissions stimulées et amplifier le rayonnement, il faut que les photons émis effectuent plusieurs allers-retours dans le milieu actif. Ainsi ce milieu actif est placé entre deux miroirs plans parallèles, distants de L .

L'un des miroirs est partiellement transparent pour permettre à une partie de l'énergie du faisceau LASER de sortir du milieu actif.

L'espace entre les deux miroirs constitue une cavité résonante. Il se produit le phénomène de résonance (l'amplitude du rayonnement est maximale) lorsque la longueur de la cavité est un multiple de la demi-longueur d'onde soit $L = k \frac{\lambda}{2}$. Il est alors possible d'obtenir un rayonnement d'amplitude très importante même à partir d'un rayonnement extrêmement faible.

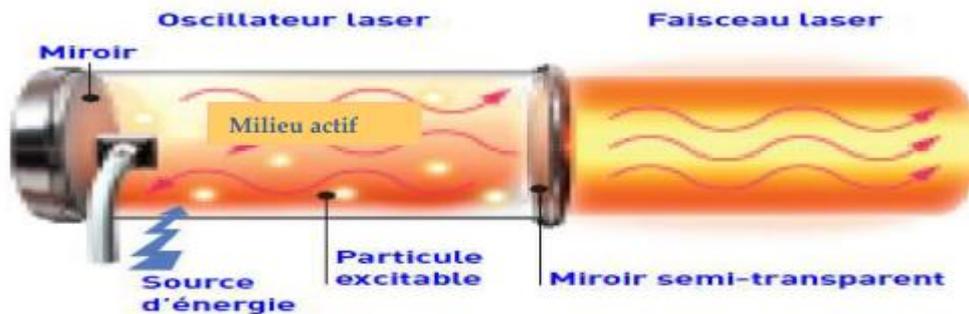


fig I-3 : schéma de principe du laser [3]

I.2.7 Caractéristiques de la lumière LASER [3]

- Le rayonnement laser est très directif (le faisceau diverge très peu). On parle aussi de lumière unidirectionnelle.
- Les photons produits par émission stimulée sont identiques et correspondent à des vibrations de même longueur d'onde : il s'agit d'une lumière monochromatique. On dit aussi que la lumière LASER est caractérisée par une très bonne cohérence temporelle.
- Les vibrations correspondant aux photons émis par émission stimulée sont en phase, on dit que la lumière LASER est caractérisée par une très bonne cohérence spatiale.
- On compare la lumière émise par une source classique de lumière blanche à une lumière LASER.

Cas d'une lumière émise par une source classique : Les lampes classiques émettent des rayonnements de longueur d'onde différentes et de phases indépendantes les unes des autres.

Dans les deux cas, le rayonnement résultant a une amplitude très atténuée.

I.2.8 Différents types de laser

On classe les lasers selon cinq familles, en fonction de la nature du milieu excité.

I.2.8.1 Lasers à solide [4]

Les lasers à solide utilisent des cristaux, des céramiques ou des verres dopés avec différents atomes comme milieu amplificateur de la lumière (le plus ancien est le laser à rubis). Ce sont les lasers les plus puissants. En effet, ils fonctionnent en général de manière discontinue (par exemple impulsions de 10^{-15} s). Ils sont capables d'émettre aussi bien dans le visible que dans l'UV ou les rayons X.

Les lasers les plus utilisées actuellement sont les lasers Nd : YAG dans lesquels le chrome est remplacé par du néodyme et une partie des atomes d'aluminium par de l'yttrium ($Y_3 Al_5 O_{12}$ au lieu de $4 Al_2 O_3$).

Le pompage optique se fait par une lampe flash. Leur rendement est nettement supérieur à celui du « vieux » laser à rubis.

On trouve maintenant pour quelques dizaines d'Euro des pointeurs laser vert, de la taille d'un gros stylo, formés d'une diode laser à 808nm qui « pompe » un cristal de YVO4 dopé au néodyme et émettant à 1064nm et dont la fréquence est doublée par un cristal KDP à 532nm.

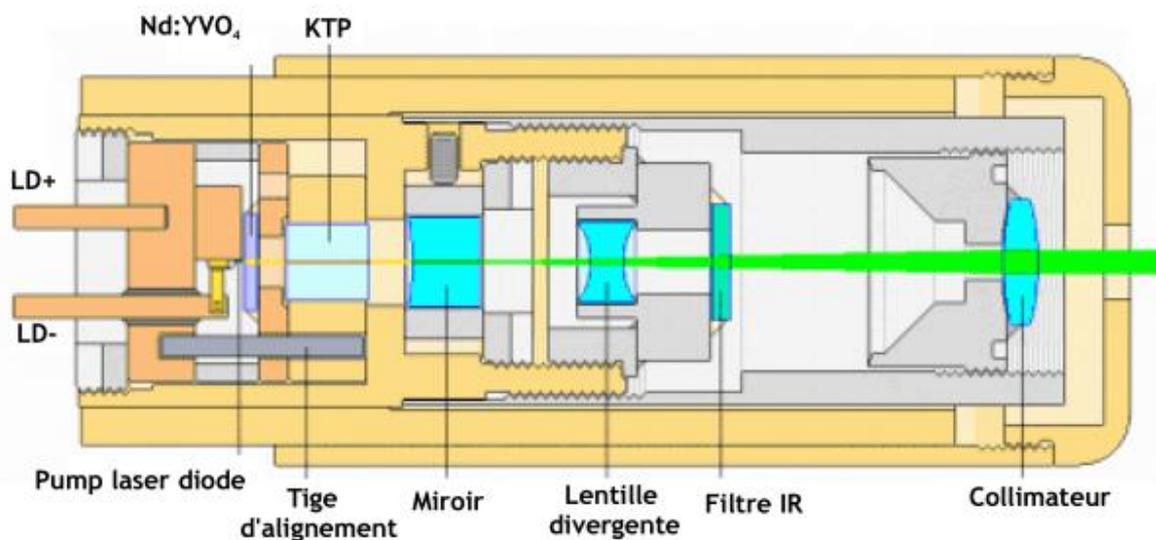


Fig I-4: schéma d'un laser solide [4]

I.2.8.2 Lasers à liquide [4]

Dans les lasers à liquide, le milieu d'émission peut être un colorant organique (dye laser). Le rayonnement émis peut aussi bien être continu que discontinu suivant le mode de pompage. Les fréquences émises peuvent être réglées à l'aide d'un prisme. Il existe un grand nombre de colorants possibles qui étendent la gamme des longueurs d'onde de l'ultraviolet à l'infrarouge.

Une autre classe de laser liquide utilise un liquide aprotique polaire SeOCl_2 ou POCl_3 comme cage enfermant des terres rares de façon analogue au laser solide. Un rendement plus élevé peut être obtenu, car il est possible de dissoudre une bien plus grande quantité de terre rare, par exemple 3,75% Nd^{3+} dans SeOCl_2 que dans un cristal Nd :YAG (généralement pas plus de 1,2%). Toutefois ces liquides sont très corrosifs.

I.2.8.3 Lasers à gaz [4]

Le milieu générateur de photons est ici un gaz contenu dans un tube isolant (verre, quartz ou céramique). Le faisceau émis est particulièrement cohérent et la fréquence d'émission est très pure. Les exemples les plus connus sont les lasers hélium – néon et les lasers à ions argon. Les lasers au dioxyde de carbone CO_2 sont capables de produire de très fortes puissances à une longueur d'onde de 10μ .

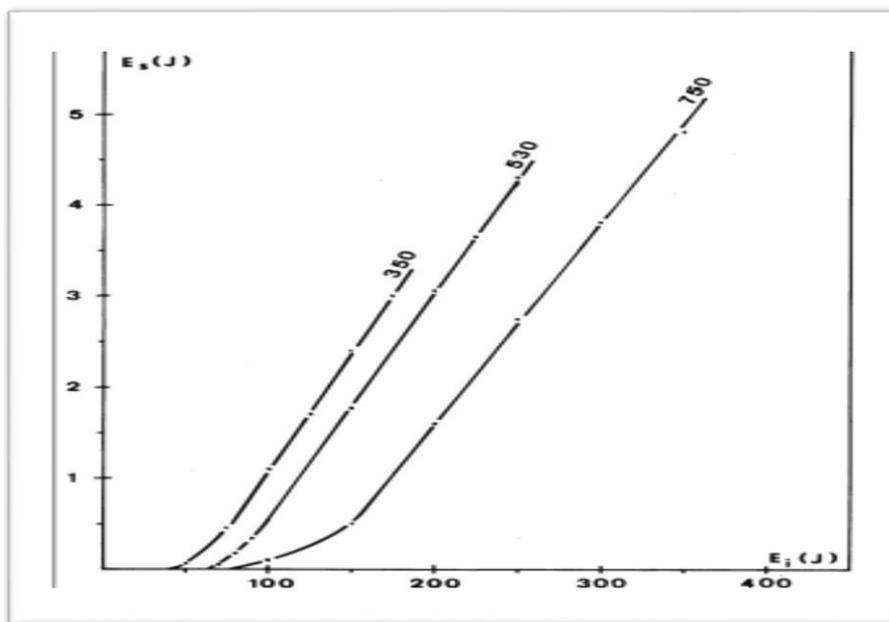


Fig I-5 : Rendement d'un laser Nd :SeOCl₂ pour différentes durée de l'impulsion [μs] [4]

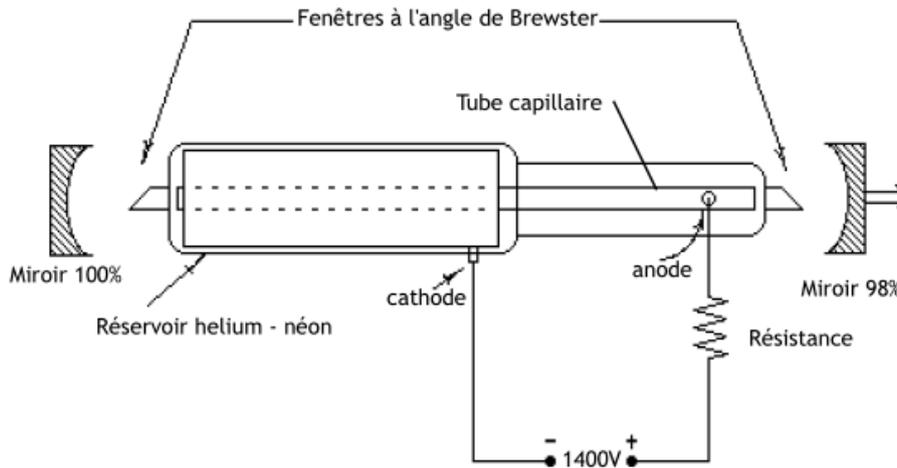


Fig I-6 : Schéma laser He Ne [4]

I.2.8.4 Laser à ions [4]

Les lasers à gaz rares ionisés (argon-ion, krypton ion) produisent un grand nombre de longueurs d'onde. Ils sont compacts et ont une longue durée de vie par rapport à leur puissance.

I.2.8.5 Lasers chimiques [4]

Les premiers lasers chimiques ont été développés par l'armée américaine. Ils étaient basés sur la réaction du fluor avec l'oxygène. Ces premiers lasers étaient très puissants, mais encombrants, horriblement corrosifs, polluants et très peu fiables.

En fait, n'importe quelle réaction chimique qui émet à froid de la lumière peut être utilisée pour construire un laser.

Actuellement des lasers extrêmement puissants sont basés sur l'oxydation de l'iode. Un mélange d'eau oxygénée et de chlore gazeux produit des molécules excitées d'oxygène. Ces molécules sont mélangées avec des molécules d'iode et produisent des molécules excitées d'iode gazeux qui est le milieu amplificateur de la lumière. On verra plus loin à quoi ils peuvent servir.

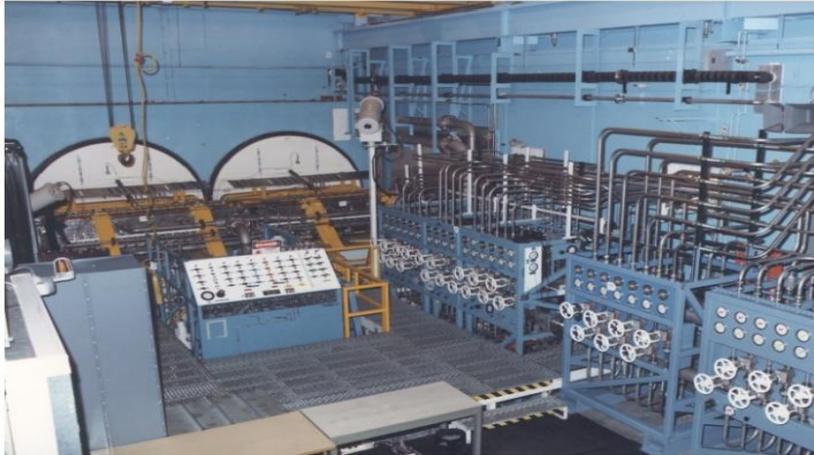


Fig I-7 : Laser chimique MIRACL [4]

I.2.8.6 Laser excimer [4]

Le laser excimer est une forme de laser chimique qui est utilisé principalement dans la chirurgie de l'oeil et la fabrication des semi-conducteurs. Le terme « excimer » vient de la contraction de « excited dimer » qui se réfère au milieu amplificateur chimique du laser.

Un gaz rare et un gaz halogène sont mélangés avec un gaz inerte tel que l'hélium. Une forte décharge électrique de courte durée excite ce mélange. Le gaz rare et le gaz halogène se combine alors chimiquement. Ce mélange étant instable, la décomposition produit l'état excité du milieu amplificateur de lumière. Une intense impulsion ultra-violettes de quelques ns de durée est produite. Ce sont des appareils encombrants, mais qui produisent une puissance importante dans l'ultraviolet.

C'est un laser à 2 niveaux. Le fait que l'halogénure de gaz rare n'existe qu'à l'état excité fait que le niveau de base est « dépeuplé » : chaque molécule excitée participe à l'effet laser et le rayonnement laser n'est pas absorbé par le milieu.



Fig I-8 : Laser excimer [4]

I.2.8.7 Lasers à semi-conducteurs [4]

Les lasers à semi-conducteurs utilisent principalement des diodes afin de produire un faisceau lumineux. Le système de pompage est légèrement différent des autres types de lasers. Ce sont les lasers les plus petits, produits en très grande série, c'est pour cela qu'ils sont utilisés pour les imprimantes ou les lecteurs optiques.

Les diodes peuvent être empilées dans des ensembles ayant plusieurs dizaine de watt de puissance. Ces ensembles peuvent être groupés pour pomper des lasers continus de puissance destinés au découpage de plaques d'acier.

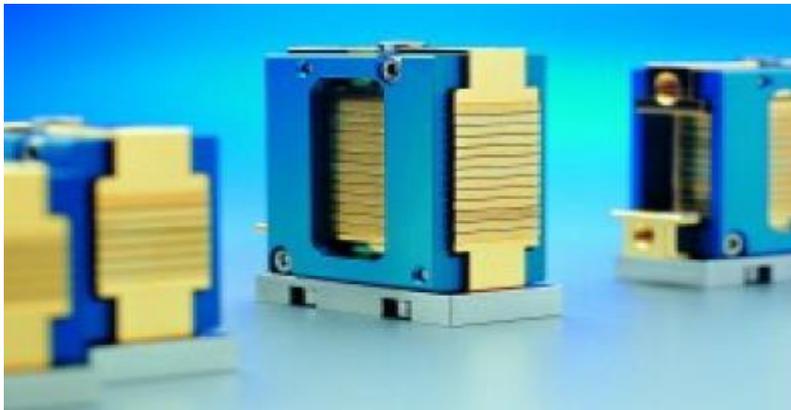


Fig I-9 : Empilement de diodes laser [4]

I.2.8.8 Lasers à électrons libres [4]

Ce sont des machines gigantesques dérivées de la recherche nucléaire. Ils sont essentiellement utilisés pour la recherche car leur longueur d'onde peut être ajustée, allant de l'infrarouge aux rayons X. Il peut délivrer des impulsions très courtes (picosecondes) de grande puissance de crête et sont accordables en longueurs d'onde sur une très large échelle. Ils sont basés sur le fait que lorsqu'un faisceau d'électrons est dévié, il émet une onde électromagnétique (lumière synchrotron).

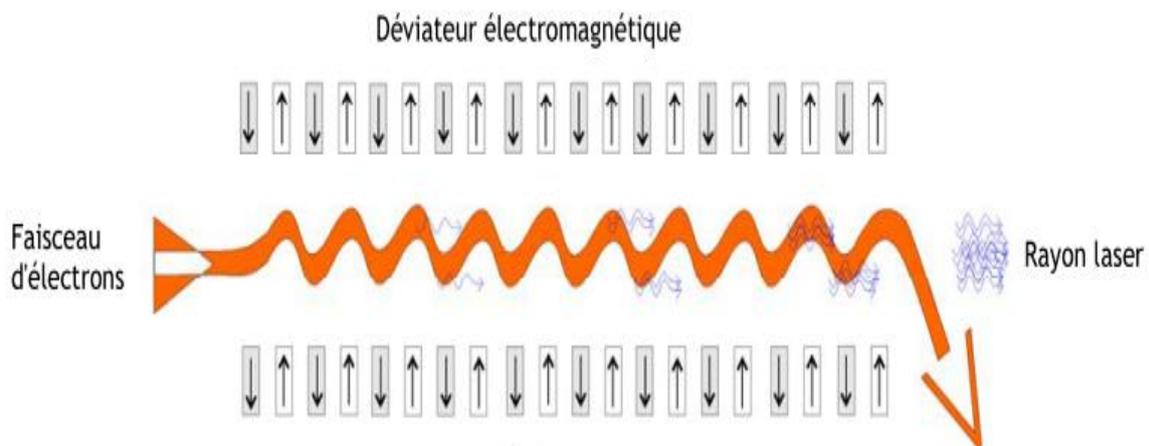


Fig I-10 : Principe du laser à électrons libres [4]

I.2.9 Domaine d'application [3]

Tableau 1 : Les effets du faisceau LASER et ses applications différentes suivant la longueur d'onde, l'intensité, la durée d'exposition ...

Types de LASER	Milieu actif	Mode d'émission	Puissance	Domaine du rayonnement	Quelques applications
LASER à rubis	Rubis (solide)	Emission Pulsée	10 MW	Visible ($\lambda = 694 \text{ nm}$)	Epilation LASER
LASER He-Ne	Mélange gazeux hélium-néon	Emission continue	3 mW	Visible ($\lambda = 633 \text{ nm}$)	Laser d'alignement, lecture des code-barres, positionnement des patients en radiographie, pointeur laser.
Laser Nd-YAG	Grenat d'Aluminium d'Yttrium $Y_3Al_5O_{12}$ dopé au néodyme Nd^{3+} (solide)	Emission Pulsée	10 MW	Infra-rouge ($\lambda = 1,06 \mu\text{m}$)	Soudage des métaux, découpage des matériaux
Laser CO₂	Mélange gazeux constitué d'azote, d'hélium et de CO ₂ .	Emission continue	1kW	Infra-rouge ($\lambda = 10,6 \text{ mm}$)	Applications médicales : traitement de tumeurs, de décollements de la rétine, coupe des tissus. découpage de matériaux, soudage de métaux
Laser à Excimères	Gaz de molécules diatomiques	Emission Pulsée	10 à 100 MW	Invisible (UV)	Chirurgie de la cornée (incision, ablation des surfaces de tissus). Nettoyage et préparation de surface

I.2.10 Laser et sécurité [3]

Tableau 2 : les différentes classes de laser suivant la puissance et la longueur d'onde des radiations émises.

Classe	Puissance du LASER	Effets
Classe I		Pas de danger dans les conditions normales d'utilisation Laser de faible puissance (exemples : imprimantes, lecteurs de CR-ROM, lecteurs de DVD).
Classe II	Puissance faible $P < 1 \text{ mW}$	Gêne pour l'œil, pas de danger sur de courtes périodes d'exposition.
Classe III a	Puissance moyenne $P < 5 \text{ mW}$	Vision directe dangereuse - si le temps d'exposition est supérieur à 0,25s ou - à travers un instrument d'optique
Classe III b	$P < 500 \text{ mW}$	Vision directe toujours dangereuse Vision de sources diffuses sans danger si temps d'exposition inférieur à 10s
Classe IV	$P > 500 \text{ mW}$	Danger en cas de vision directe ou diffuse, risques de lésions cutanées et oculaires. Risques d'incendies

I.3 interaction laser-matière [5]

L'ablation laser est une technique d'enlèvement de matière à partir d'un substrat par un faisceau laser sans endommager la structure du matériau. Ce mécanisme est d'un grand intérêt de par ses nombreux usages. En effet, les interactions spécifiques d'une lumière laser avec un matériau peuvent conduire à des changements permanents des propriétés du matériau, qui ne peuvent être obtenus facilement par d'autres procédés. Le principe du processus d'interaction laser-matière se résume à concentrer un faisceau laser de puissance donnée sur une cible, où l'énergie lumineuse absorbée sera alors convertie en énergie thermique à la surface du matériau. On obtient ainsi une zone restreinte de la cible qui sera soumise à un chauffage, ce qui peut conduire à la fusion très localisée d'une couche fine du solide, une fois que ce dernier atteint le seuil d'ablation. Pour les métaux, ce seuil est compris pour des fluences entre 1 et 10 J/cm², pour les isolants il est situé entre 0.5 et 2 J/cm², et pour les matériaux organiques il est entre 0.1 et 1 J/cm² [6]. Lors de l'ablation laser, le matériau se vaporise quasi-instantanément. Nous pouvons observer la formation d'un plasma qui résulte de l'interaction de la matière évaporée avec le faisceau laser, et par la suite son expansion dans le milieu ambiant [7]. Ce mécanisme diffère selon les caractéristiques du faisceau laser à savoir : la fluence, la longueur d'onde, la durée et la puissance de l'impulsion ainsi que le diamètre d'impact du faisceau sur la cible.

I.3.1 interaction Mécanique [8]

Dans le cas de l'utilisation de lasers impulsionnels (laser à CO₂ et YAG-Nd³⁺) et dans des gammes de densité de puissance élevées (> 10⁸ W/cm²) et de temps d'interaction très courts (< 1 μs), les effets prédominants induits par l'interaction sont mécaniques.

Dans ce type d'interaction, le principal intervenant est le plasma qui se forme par vaporisation d'une partie de la surface du matériau irradié et qui, lors de sa détente, engendre un faisceau d'ondes de compression à l'intérieur du matériau, ondes qui se transforment rapidement en une onde de choc pouvant modifier la microstructure et susceptible de générer des contraintes résiduelles dans le matériau.

I.3.2 interaction photochimique [9]

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).

I.3.3 interaction thermique [8]

Dans le cas de l'utilisation de lasers émettant dans l'IR (lasers à CO₂ et YAG-Nd³⁺) et dans des gammes de puissances modérées (< 10⁴ W/cm²), les effets induits par l'interaction sont essentiellement thermiques

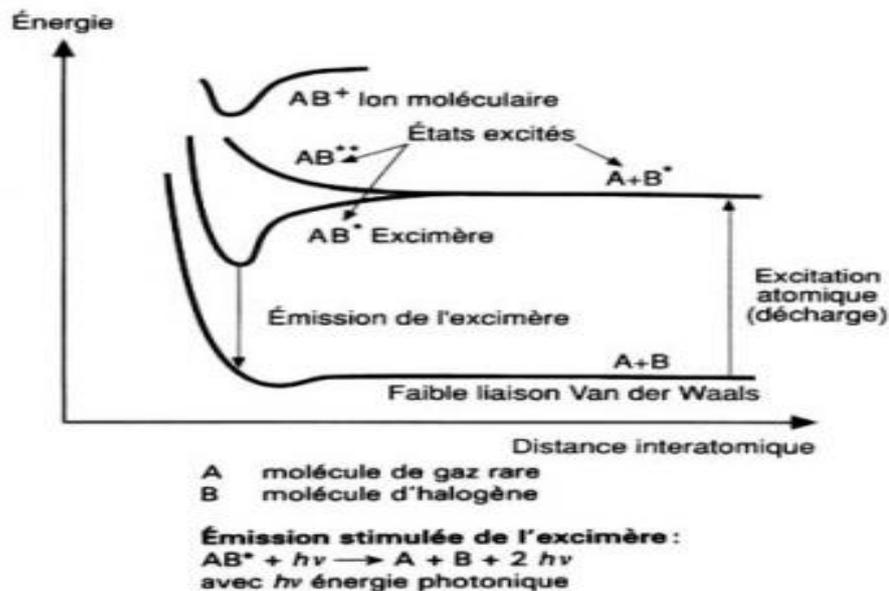


Fig I-11 : Schéma des énergies potentielles d'une molécule excimère [8]

L'absorption joue un rôle très important dans le traitement de surface par laser, car elle détermine, pour une puissance donnée du faisceau, le flux de chaleur absorbé par la pièce traitée.

L'absorption est fonction des paramètres qui sont liés :

- au faisceau laser.
- à l'environnement.
- au matériau.

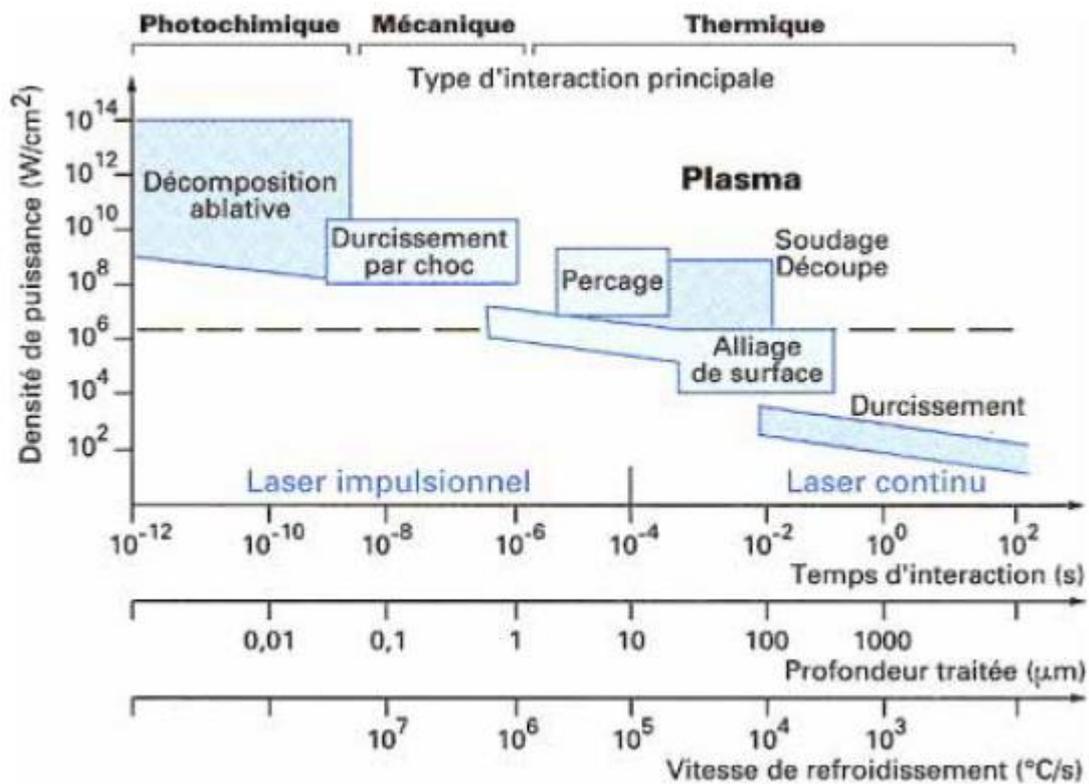


Fig I-12 : Effet sur un matériau de l'exposition à un faisceau laser de densité de puissance et de durée d'interaction données [8]

I.4 Traitement thermique superficielle par laser

I.4.1 traitement thermique [9]

Pour maîtriser l'effet d'un traitement thermique (en phase solide, liquide ou avec vaporisation) sur les transformations induites dans le matériau, différents aspects liés à l'éclairement, au matériau, au couplage et à l'environnement de la zone d'interaction doivent être pris en compte. Il est avant tout nécessaire de contrôler la forme de l'éclairement ainsi que la répartition spatiale de l'énergie dans la zone d'interaction. Pour cela, différentes techniques de mise en forme du faisceau incident ont été développées [10] (optique oscillante, miroir à facettes, kaléidoscope). Par ailleurs, le contrôle du cycle thermique, induit en profondeur dans le matériau, nécessite de prendre en compte le comportement dynamique du couplage laser-matière en cours de traitement et les paramètres thermo-physiques du matériau. Dans le cas de traitement en phase solide (trempe des aciers), la stabilité et l'efficacité du couplage laser-matière sont améliorées en déposant sur la surface à traiter un revêtement absorbant (graphite, peinture, phosphate,...) [11] [12]. Enfin, l'environnement gazeux au voisinage de la zone d'interaction est également un paramètre important pour la qualité du traitement (protection particulière contre l'oxydation qui influe sur le couplage et sur les propriétés du matériau). Dans ce domaine, différents dispositifs de protection sont utilisés : soufflage d'argon par buse, maintien en surpression d'argon sous un dispositif en cloche recouvrant l'ensemble de la zone chauffée au cours du traitement. [13]

I.4.2 Les type de traitement thermique

I.4.2.1 Traitements superficiels [8]

Dans ce cas, il s'agit de chauffer par un faisceau à haute densité d'énergie une couche superficielle du matériau à traiter, sans atteindre la fusion en surface. Ce chauffage et le refroidissement rapide qui le suit conduisent à créer des transformations telles que la transformation martensitique dans le cas des alliages ferreux et des alliages de titane, le durcissement structural superficiel (suivi d'un revenu) dans le cas des alliages légers, la restauration et le recuit. La diffusion des éléments constituant le matériau, pendant la phase de chauffage est responsable de ces traitements. Le traitement en phase solide est utilisé principalement dans le cas des alliages ferreux (aciers et fontes) qui subissent la transformation martensitique permettant d'obtenir une dureté très élevée en surface. Dans ce cas de traitement, il s'agit d'une trempe superficielle. Avec l'apport et la diffusion d'un élément extérieur (carbone ou azote), ce traitement est appliqué aux aciers et surtout aux

alliages de titane. Par contre, dans le cas des alliages légers, la diffusion des éléments constitutants étant plus lente que celle du carbone des alliages ferreux (transformations diffusionnelles très limitées), les traitements par FHDE à l'état solide sont peu intéressants. Le durcissement par transformation de phases peut être effectué avec les trois types de laser et le faisceau d'électrons. La différence des profondeurs traitées que l'on observe est due aux différents ordres de grandeurs du temps d'interaction faisceau-matière et de la densité d'énergie utilisés.

I.4.2.2 Fusion superficielle [14]

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.

On peut modifier la nature des phases initiales (apparition de phases métastables), la taille des grains, leur morphologie (structure cellulaire ou dendritique) et leur distribution. Dans certains cas, on peut obtenir une amorphisation de la surface se traduisant par une nette amélioration des propriétés mécaniques et de la tenue à la corrosion. Des travaux effectués en Allemagne ont conduit à la réalisation d'une machine de traitement superficiel des arbres à cames ; la refusions par irradiation laser est mise en œuvre chez Volkswagen depuis 1993.

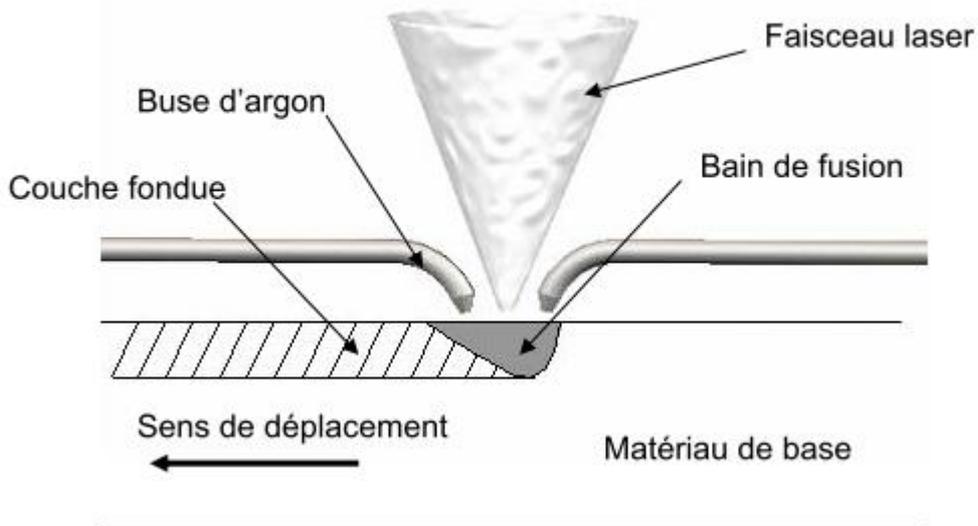


Fig I-13 : Fusion superficielle par irradiation laser [14].

I.4.2.3 Traitement avec vaporisation [14]

On utilise dans ce cas des lasers pulsés (CO₂, Nd-YAG, excimère), 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 [15]. 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.4.3 Traitements thermiques avec apport de matière [9]

Un traitement thermique avec apport de matière est un traitement visant à améliorer les propriétés de surface par une modification de la nature chimique de celle-ci. Pour cela, on ajoute avant ou en cours de traitement d'autres éléments soit à l'état gazeux en atmosphère contrôlée (traitement thermodiffusionnel, LCVD), soit sous forme solide (pré dépôt, poudres), en vue de la création d'alliages ou de dépôts de surface. Au cours de l'opération, le substrat est maintenu en phase solide (traitement thermodiffusionnel, LCVD, LPVD) ou en phase liquide (alliage, incrustation). Le laser est alors utilisé soit pour chauffer principalement le substrat (traitement avec apport de gaz réactif, dépôt chimique), soit pour fondre l'ensemble substrat-matériau d'apport (dépôt de poudre, formation d'alliage par pré dépôt), soit pour vaporiser une cible à déposer sur le substrat (LPVD).

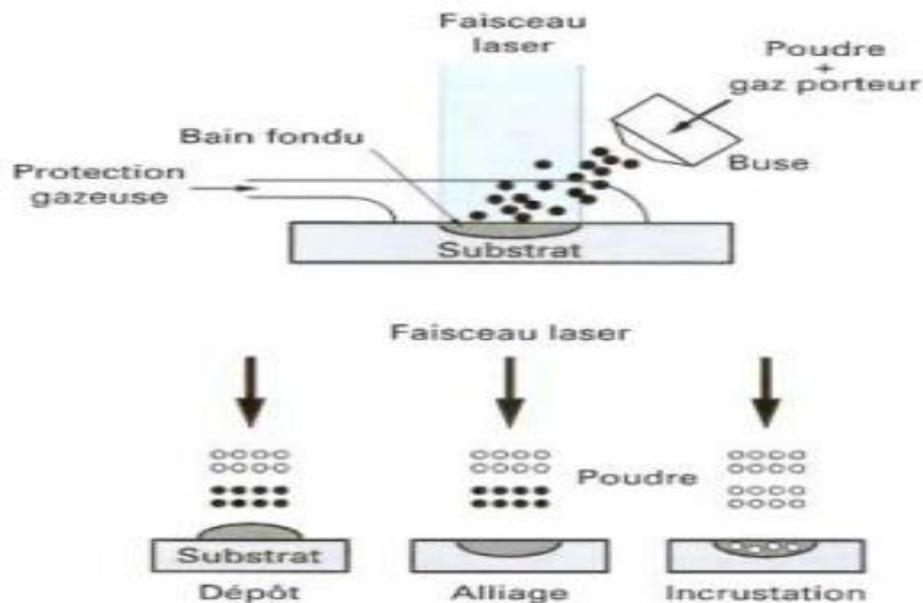


Fig I-14 : Principe d'un traitement thermique par laser avec apport de matériau (jet de poudre) et effets possibles sur les matériaux [9]

I.4.3.1 Traitement avec apport de matériau solide [9]

Dans ce cas, le matériau d'apport à allier ou à déposer est initialement sous forme solide et doit être généralement soit fondu pour la création d'alliage ou de dépôt de surface, soit vaporisé pour réaliser un dépôt LPVD (Laser Physical Vapor Déposition).

I.4.3.2 Traitement avec apport de gaz réactif [9]

Au cours d'un traitement avec apport de gaz réactif, le laser est utilisé pour chauffer superficiellement le matériau en phase solide ou le porter à l'état liquide. Les espèces chimiques réactives vont alors s'adsorber sur la surface, se dissocier et soit diffuser dans la matrice du substrat en phase solide ou liquide (traitements thermo-diffusionnels assisté par laser), soit s'accumuler et conduire à la formation d'un dépôt sur la surface [dépôt chimique en phase vapeur assisté par laser (LCVD)]. Dans les deux cas, ces traitements visent à modifier les propriétés de surface du substrat (propriétés mécaniques, tribologiques, optiques, électriques, thermiques...) et peuvent donc s'appliquer à de nombreux domaines.

I.5 Conclusion :

Le laser est utilisé d'une manière différente dans plusieurs domaines comme le médecin, l'industrie, des applications militaires, la télémétrie ... mais ce qui nous intéresse c'est le traitement thermique superficiel par une source laser donc en va juste considérer le laser comme une source de chaleur.

Dans ce chapitre on a présenté quelques généralités sur les lasers et les domaines d'application et on a vu comment la lumière laser interagit avec la matière et on a vu les différents types de traitement thermique superficiel d'une manière brève il s'agit de bombarder la surface avec une densité énorme provoquant ainsi une augmentation très importante de température en une fraction de seconde suivie d'un refroidissement très rapide qui nous permet de traiter la surface sans atteindre l'intérieur de la pièce.



**Chapitre II : Contrôle du
processus de TTL**

II.1 Introduction [16]

Au cours des trois dernières décennies, les lasers ont été largement utilisés pour le traitement des matériaux. De nombreuses applications s'appuyant sur les effets thermiques de l'interaction laser-matériau, il devient très important d'obtenir des informations sur le champ de température en fonction des paramètres de traitement et des propriétés des matériaux. A cet effet, plusieurs modèles ont été proposés, à la fois analytiques et numériques. Malgré le fait qu'extrêmement des modèles numériques sophistiqués sont devenus disponibles, les expressions analytiques continuent à être utilisées. Cela est souvent dû à la simplicité mais aussi au fait qu'ils permettent d'obtenir des résultats simples. Les relations entre les paramètres de processus qui donnent une meilleure idée du phénomène impliqué.

Dans certains cas, les modèles analytiques peuvent prendre en compte le fait que les paramètres affectant le champ thermique dépendent eux-mêmes de la température. Par exemple, la transformation de Kirchoff est effectuée pour tenir compte de la dépendance de la conductivité thermique sur la température. Néanmoins, pour de nombreux matériaux, la variable qui affecte le plus fortement le résultat final est l'absorptivité, car elle contrôle directement la quantité d'énergie qui est transférée dans le matériau. Considérant que le pouvoir absorbant varie linéairement avec la température, un modèle unidimensionnel a été proposé par Sparks et Loh.

II.2 Méthodes expérimentales

II.2.1 LE Pyromètre [17]

Le pyromètre infrarouge est un système instrumental servant à mesurer la température d'un objet à distance. Le principe de fonctionnement est basé sur la mesure des radiations de l'objet dans le domaine de l'infrarouge d'où le nom de pyromètre infrarouge.



Fig II-1 : Pyromètre infrarouge [17]

II.2.1.1 Les mesure sans contact [17]

Pour mesurer des températures supérieures à 200 °C (métallurgie, fonderies, verreries...), on utilise des **pyromètres optiques** ou pyromètres infrarouges, qui mesurent l'énergie émise dans l'infrarouge.

Le choix d'un capteur de température doit se faire selon le type d'application, en tenant compte des conditions ambiantes, des plages de température et de la précision de mesure souhaitée.

Le **pyromètre monochromatique**, aussi nommé pyromètre spectral, mesure l'énergie radiative à une longueur d'onde (en réalité une bande spectrale plus ou moins étroite). On trouve parmi ces modèles des dispositifs portables particulièrement basiques comme des instruments particulièrement élaborés avec dispositif de visée, fonction de mémorisation ou de PID. Des fibres optiques, des pointeurs laser, des dispositifs de refroidissement, de protection ou de scanner peuvent compléter la configuration. On trouve aussi des instruments intégrant une caméra vidéo qui permet la visualisation de l'objet depuis une salle de contrôle. À chaque application correspond un dispositif de mesure et il faudra spécifiquement s'interroger sur le choix du détecteur, la gamme de température, les optiques, le temps de réponse et l'émissivité.

Le **pyromètre bi-couleur**, à quotient ou bi-chromatique travaille à deux longueurs d'ondes. L'état de surface peut modifier l'émissivité et par conséquent la précision de la mesure. Cela est aussi vrai pour l'ensemble des obstacles présents sur le trajet optique. Une manière de s'affranchir en partie de ces inconvénients est de mesurer la température simultanément à 2 longueurs d'ondes et d'en extraire le rapport d'intensité.

II.2.1.2 Les thermocouples [18]

Un thermocouple est un capteur qui permet de mesurer la température. Les thermocouples sont largement utilisés dans de nombreuses applications industrielles et scientifiques du fait de leur faible coût, de leurs larges plages de températures, de leurs limites de température élevées et de leur grande variété de types et de tailles. Ils sont utilisés quasi par tous les secteurs industriels, y compris les secteurs de l'énergie, du pétrole et du gaz, des semi-conducteurs, pharmaceutiques, biotechnologiques, alimentaires et métallurgiques.

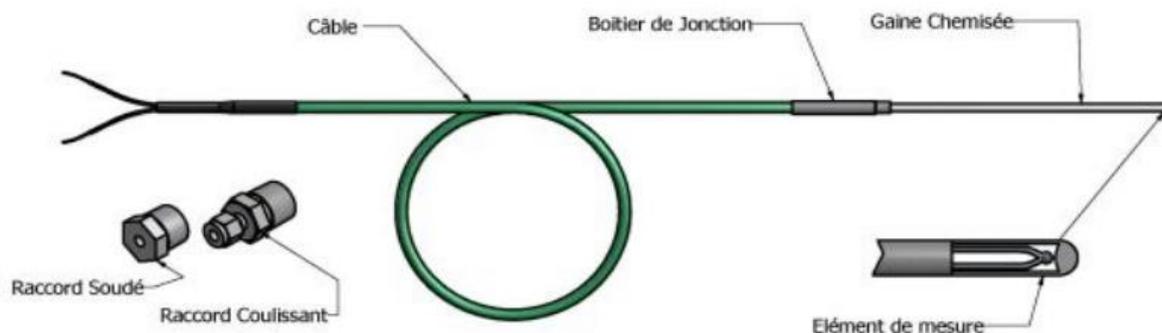


Fig II-2 : Constitution d'un thermocouple industriel[18]

Il existe des centaines de types de thermocouples fabriqués à base de différentes combinaisons de métaux purs et d'alliages, chacun avec ses caractéristiques uniques et ses applications. Des lettres permettent d'identifier les différents types de thermocouple. Les thermocouples de type E, J, K, N et T sont à base de métaux usuels. Il s'agit des types les plus communs à base de fer, de constantan, de Nicrosil, de Chromel et d'Alumel. Les thermocouples de type B, R et S sont à base de métaux nobles (principalement de platine et de rhodium) et sont donc plus chers. Ils sont utilisés dans des applications à haute température.

II.3 Modélisation mathématique [21]

Dans un solide, la diffusion de chaleur d'une zone chaude vers une zone froide, est régit par la loi de Fourier, qui stipule qu'il existe une relation linéaire entre la densité de flux et le gradient de température. Dans le cas d'un milieu isotrope, la densité de flux est proportionnelle au gradient de température et des solutions analytiques de l'équation générale de Fourier existent, mais généralement pour des conditions aux limites homogènes.

Dans le domaine des traitements de surfaces par laser ou projection plasma, la modélisation du transfert de chaleur et de masse est indispensable, car la mesure expérimentale de certaines grandeurs s'avèrent coûteuses, difficiles, voir même impossible. C'est le cas par exemple de la cartographie des températures à un instant donné, l'évaluation des flux de chaleur, la résistance thermique de contact et l'évolution des propriétés thermo physiques en fonction de la température et du temps.[29][30].

II.4 Résolution numérique [19]

Durant les années 1990, les développements informatiques apportèrent aux équipes de recherche des outils de calculs plus performants. Plusieurs progiciels de modélisation numérique firent leurs apparitions et accélèrent grandement les développements des techniques. De nombreux modèles numériques simulant la trempe au laser furent développés et validés avec succès. La modélisation numérique comporte plusieurs avantages comparativement aux approches analytiques. Des problèmes beaucoup plus complexes peuvent être modélisés et calculés en intégrant, par exemple, les propriétés phénomophysiques du matériau. Mazumder est l'un des pionniers de la modélisation numérique des procédés laser et le premier à avoir présenté des modèles tridimensionnels complets (Mazumder et Steen, 1980, Chande et Mazumder, 1981, Kar et Mazumder, 1989, Mazumder et al., 1996). Ses modèles numériques incluent la distribution de l'irradiance de la tache focale, la dépendance des propriétés thermophysiques à la température, la chaleur latente issue des transformations métallurgiques ainsi que les pertes par convection et par radiation.

II.5 Modélisation analytique [20]

Une première approche de la simulation de phénomènes physiques est la modélisation analytique. C'est l'approche qui requiert le moins de ressources informatiques puisqu'elle cherche à approcher le phénomène et/ou la structure étudiés de façon à avoir le modèle le plus simple possible. Pour cela, les modèles analytiques se basent sur les équations de base de la

théorie régissant un phénomène et les étudient sur une représentation abstraite du système réel, prenant en compte tout ou partie de la géométrie de la structure analysée.

II.6 Modélisation de TTL [21]

Les modèles de TTL s'appuient sur la résolution de l'équation de chaleur dans les conditions du traitement laser, l'évolution spatio-temporelles des champs de température induits dans les matériaux 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, la durée de l'interaction)
- Les transferts thermiques notamment à travers : les propriétés thermo-physiques du substrat (conductivité thermique, capacité thermique, chaleurs latentes de changement de phase, et les pertes en surface).

Les lasers trouvent des applications larges dans l'industrie de la métallurgie ce qui encourage le développement de plusieurs modèles de TTL selon les hypothèses simplificatrices et les descriptions probables des effets induits [22] [23]. Comme mentionné précédemment, on peut diviser les modèles établis selon la méthode de résolution en deux catégories essentielles, les modèles analytiques et les modèles numériques [24].

Les modèles de traitement superficiel à l'état solide dans le domaine de validité de la théorie de Fourier ont reçu une attention accrue ces derniers temps. Cette théorie est valable dans les conditions suivantes : [25]

- Si l'intensité des faisceaux laser ne dépasse pas 10^{12}W/m^2 .
- 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. [26] [27]

Un bon modèle doit être prédictif, c'est-à-dire qu'il doit permettre de prévoir dans une certaine mesure le résultat d'une expérience. Cette prédictibilité peut avoir un caractère qualitatif ou quantitatif selon que le modèle se contente de prévoir un certain comportement ou qu'il permet de prédire la valeur de telle ou telle grandeur mesurable [28].

Le développement, l'optimisation et le contrôle de la qualité du procédé du T.T.L nécessitent l'évaluation des flux de chaleur et la répartition de température qui peuvent jouer un rôle essentiel dans la formulation des microcontrôleurs, dans la formation de phase à l'état solide ou encore dans les contraintes résiduelles.

II.7 Etat de l'art

Ahmet Z. Sahin [31] à donner Une solution analytique du profil de température transitoire et de la variation du flux de chaleur pour un corps semi-infini avec une génération de chaleur diminuant de manière exponentielle avec la position est obtenue. La condition de température

initiale est supposée constante tandis que la limite de surface transfère la chaleur à la température ambiante par convection, est maintenue à une température constante ou isolée.

S. M. Zubair and M. A. Chaudhry [32] La quantité de chaleur libérée dans un volume dont l'étendue peut être ignorée par rapport aux dimensions de l'environnement intéressant peut être classée comme (i) la source de chaleur ponctuelle, (ii) la source de chaleur de la ligne, et (iii) la source de chaleur plane. Les solutions en température de ces problèmes de conduction transitoire dans un milieu étendu, homogène et isotrope, sont discutées sous forme fermée. Ces solutions analytiques sont présentées pour le cas d'une source de chaleur de forme continue en fonction du temps et fonctionnant en temps constant ($\sim 0 (t / t^*)^{-1}$, où v est un nombre réel positif. Les solutions de température sans dimension car tous les problèmes sont présentés en fonction de la fonction de Whitaker, la présente analyse couvrant des solutions bien connues (classiques) ainsi que de nouvelles solutions.

M.A. Chaudhry and S. M. Zubair [33] ont donné Une solution analytique pour la distribution de la température et du flux thermique dans le cas d'un solide semi-infini à propriétés constantes est étudiée. Les solutions sont présentées pour des températures de surface, en fonction du temps, des formes : (i) $T_1(t) = T_0 (1 + \cos \cos)$ et (ii) $T_2(t) = T_0 (1 + bt \cos) \cdot \cos t$, où a et b sont des facteurs de contrôle des oscillations périodiques autour de la température de surface constante T_0 . Les solutions de température et de flux de chaleur sans dimensions (ou réduites) sont présentées en termes de décompositions C_r et S_r de la représentation généralisée de la fonction gamma incomplète. Il a été démontré que la présente analyse couvrait le cas limite des temps longs qui est traité dans plusieurs manuels, dans le cas des températures de surface de type périodique constantes.

B. F. Blackwell [34] à donner Une solution analytique pour le profil de température dans un corps semi-infini avec une source à décroissance exponentielle (avec position) et une condition aux limites de convection est obtenue à l'aide de transformées de Laplace. Les paramètres sans dimension appropriés sont identifiés et la température en fonction de ces paramètres est présentée sous forme graphique. Avec un refroidissement à la surface exposée, la température maximale est atteinte à l'intérieur de la dalle plutôt qu'à la surface exposée. L'emplacement du maximum de température en fonction des différents paramètres du système est présenté sous forme graphique. Des relations approximatives sont présentées pour de petites valeurs de temps sans dimension.

S. M. ZUBAIR and M. ASLAM CHAUDHRY [35] ont donné Un modèle analytique pour le calcul de la distribution de la température et du flux de chaleur dans un solide semi-infini lorsqu'il est soumis à une source laser dépendant du temps et se désintégrant dans le temps est

étudié. Les paramètres appropriés sans dimension sont identifiés et la température et le flux de chaleur réduits en fonction de ces paramètres sont présentés sous forme graphique. Quelques cas particuliers d'intérêt pratique sont également discutés. Il est démontré que la présente analyse couvre à la fois les cas de source laser instantanée et de force constante en fonctionnement continu, ainsi que certaines nouvelles solutions.

B S Yilbas and M Kalyon [36] Les impulsions laser répétitives déposent une énergie suffisante pour fournir un chauffage uniforme à la surface d'un substrat. Ceci améliore les propriétés de surface du substrat ainsi traité. Dans la présente étude, une solution analytique pour la distribution de la température due au chauffage répétitif par impulsions laser avec une condition limite convective à la surface est obtenue. Une méthode de transformation de Laplace est utilisée lors de l'obtention de la solution analytique pour l'équation de transfert de chaleur. Les effets du paramètre d'impulsion (β / γ) et du nombre de Biot (Bi) sur les profils de température résultants pour l'obtention possible d'une température constante à la surface lors du chauffage par impulsions laser répétitives sont explorés. Les impulsions consécutives d'intensité décroissante sont utilisées dans l'analyse, tandis que Bi varie de 2×10^{-4} à $0,2$. On constate qu'il est peu probable que le profil de température suive le profil d'impulsions. L'effet de Bi sur les profils de température résulte du fait que les impulsions répétitives deviennent significatives lorsque $Bi > 10^{-2}$.

M Kalyon and B S Yilbas [37] La modélisation du processus de chauffage au laser donne un aperçu de l'interaction de la pièce au laser et minimise le coût expérimental. Dans la présente étude, une solution analytique pour le processus de chauffage par impulsions laser est considérée et la solution sous forme fermée pour l'élévation de température due à une impulsion variant de manière exponentielle dans le temps est obtenue. Dans l'analyse, l'évaporation de la surface est prise en compte. Une méthode de transformation de Laplace a été utilisée lors de la formulation de la solution sous forme fermée pour les profils de température. L'effet des paramètres d'impulsion sur les profils de température est examiné en détail. On constate que la solution sous forme fermée dérivée de la présente étude se réduit à la solution analytique obtenue précédemment lorsque la vitesse de récession de surface est fixée à zéro dans la solution sous forme fermée. De plus, les prédictions de la simulation numérique et de la solution sous forme fermée sont en bon accord.

B.S. Yilbas and M. Kalyon [38] Le chauffage par impulsions laser offre des avantages considérables par rapport aux méthodes de chauffage classiques dans l'industrie. Dans les applications industrielles laser, en général, un gaz auxiliaire est utilisé, ce qui entraîne un refroidissement par convection de la surface pendant le processus de chauffage. De plus, la

modélisation du processus de chauffage réduit le coût expérimental et améliore la compréhension des processus physiques impliqués. Dans la présente étude, le chauffage par impulsions laser de substrats métalliques présentant une condition limite à la convection à la surface est pris en compte. L'impulsion laser variant de manière exponentielle dans le temps est utilisée dans l'analyse. En utilisant une méthode de transformation de Laplace, on obtient une solution de forme fermée pertinente pour les impulsions à variation exponentielle du temps laser. On constate que la solution analytique devient identique à celle obtenue précédemment pour une intensité d'impulsion d'entrée pas à pas lorsque les paramètres d'impulsion (b et c) sont mis à zéro. L'effet du nombre de Biot (Bi) sur les profils de température devient significatif en tant que $BiP_0 : 202$. De plus, le paramètre d'impulsion ($b = c$) a une influence considérable sur les profils de température, auquel cas la température atteint des valeurs basses lorsque $b = c$ devient élevé.

B. S. YILBAS [39] Dans l'application du chauffage laser pulsé, tel que le durcissement au laser de surfaces métalliques, le processus à conduction limitée est le mécanisme dominant lors de l'interaction laser-pièce. En conséquence, une analyse instable de ce problème devient nécessaire. La présente étude examine l'analyse instable dans le temps du processus limité de conduction pour une intensité de puissance d'impulsion laser dépendant du temps. Il est montré que les conditions pour que l'intégration thermique se produise nécessitent une fréquence de pouls minimum de 100 kHz et dans la limite la solution obtenue dans le cas présent se réduisent à celle obtenue pour une entrée pas à pas.

II.8 Modèles Numérique :

Gustavo Gutierrez, Tien-Chen Jen [40] ont présenté une étude numérique de la distribution de la température dans un corps soumis à une source laser en décroissance exponentielle dans l'espace. L'équation régissant la conduction thermique, les conditions aux limites et la condition initiale sont présentées sous une forme sans dimension en fonction d'un groupe de paramètres sans dimension, à savoir, w , t , Bi , w , c_1 , c_2 et c_3 : Trois ensembles différents La présente étude étudie les conditions limites thermiques imposées à la limite "éloignée", notamment les conditions de convection, de température de surface isolée et constante, L'équation directrice est discrétisée en utilisant une approche de volume de contrôle, avec une grille variable pour augmenter la résolution du domaine près de la limite où la source de chaleur laser est appliquée. Les effets des différents paramètres et les propriétés thermiques dépendant de la température sont étudiés en détail. Les résultats calculés sont comparés aux

études analytiques précédentes pour les propriétés thermiques constantes obtenues à la fois pour les domaines semi-infini et infini. Enfin, les solutions numériques actuelles sont comparées aux données expérimentales existantes.

G. Palumbo*, S. Pinto, L. Tricarico [41] Un traitement de gaine au laser utilisant une couche de bague soufflée à la poudre (une seule piste) a été analysé selon une approche numérique. En particulier, les analyses de la distribution de la température et des contraintes dans le procédé de gaine au laser ont été effectuées au moyen d'un élément fini thermomécanique 3D (FE) modèle (ABAQUS / Standard). Le modèle thermique FE a été étalonné en utilisant le profil de revêtement et la taille du bain de fusion mesurés dans le substrat ; des expériences ont été réalisées avec un faisceau laser CO2 de 6 kW utilisant un alliage Al – Si comme substrat et un alliage à base de Cu comme matériau de gainage. Le but de l'analyse thermique était de déterminer les cycles thermiques, les variations de la dilution et de la forme du bain de fusion au cours du processus. Le modèle mécanique FE a permis d'évaluer la distribution des contraintes et des contraintes à la fin du traitement. Toutes ces variables ont été analysées à l'interface revêtement-substrat en fonction des paramètres de traitement (comme la puissance du faisceau laser, l'épaisseur du revêtement, la vitesse de traitement), les conditions aux limites et la géométrie de la zone traitée.

Jamel Bessrou*, Mahmoud Bouhafs, Ridha Khadrani, Mohamed Jemmali [42] Les méthodes de simulation numériques permettent de contrôler l'influence de tous les paramètres du traitement thermique superficiel par Laser et constituent des outils prédictifs d'optimisation des conditions du traitement. 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 au 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 thermophysiques en fonction de la température et des pertes par rayonnement et celles par convection. La chaleur de changement de phase solide est introduite comme une source dans la zone affectée thermiquement. Comparé à d'autres travaux, basés sur des formulations analytiques, ce modèle apporterait une approche plus fine qui permet de s'affranchir de plusieurs hypothèses simplificatrices adoptées jusqu'à présent. Une étude expérimentale basée sur l'identification microstructurale

de l'éprouvette traitée et des mesures de dureté confirme la précision des résultats du modèle numérique.

B. S. Yilbas [43] Les lasers trouvent de nombreuses applications dans le traitement thermique des pièces d'ingénierie. La modélisation et l'analyse énergétique du processus de chauffage peuvent réduire considérablement le temps nécessaire à l'optimisation et au contrôle du processus. Dans la présente étude, un modèle de chauffage laser tridimensionnel est introduit en utilisant une approche de la théorie cinétique électronique, une analyse énergétique est réalisée pour prédire les rendements de la première et de la deuxième loi, et le nombre de génération d'entropie est calculé au cours du processus. L'équation obtenue pour la conduction thermique est sous la forme d'une équation intégral-différentielle, qui ne donne pas de solution analytique. Par conséquent, une méthode numérique utilisant un schéma explicite est introduite pour discrétiser l'équation de transfert de chaleur qui gouverne. On constate que la collision entre atomes et site de réseau électronique est le processus déterminant pour le gain en énergie interne du substrat au voisinage de la surface. De plus, le nombre total de générations d'entropie calculé dans le cycle de chauffage est inférieur à celui du cycle de refroidissement du processus de traitement thermique.

Nigel G. Bean·Malgorzata M. O'Reilly· Peter G. Taylor [44] Nous déduisons plusieurs algorithmes, y compris des algorithmes de convergence quadratique, qui peuvent être utilisés pour calculer les transformées de Laplace – Stieltjes du temps nécessaire pour revenir au niveau initial dans le modèle de flux de fluide stochastique de Markov. Nous donnons des interprétations physiques des algorithmes et considérons leur analyse numérique. Les performances numériques des algorithmes, qui dépendent des propriétés physiques du processus, sont discutées et illustrées à l'aide d'exemples simples. Outre les algorithmes puissants, cet article fournit des résultats théoriques intéressants. En particulier, la méthodologie de construction de ces algorithmes constitue une contribution précieuse à la théorie des modèles de flux de fluide. De plus, des interprétations physiques utiles des algorithmes et des expressions associées, données en termes de modèle de flux de fluide, peuvent aider à une analyse plus approfondie et à une meilleure compréhension du modèle.

II.9 Modèles mathématique de TTL selon l'absorptivité température dépendent

Peux de travaux de la modélisation de traitement thermique du matériau sont consacrer à l'étude de l'influence de l'absorptivité température dépendante.

Tous les calculs de transfert de chaleur effectué lors de traitement des matériaux par laser exigent la connaissance de l'absorption du faisceau laser. Une fois que le profil de température est connu, il est possible de Prédire la profondeur de la zone thermiquement affecté et le profil de la dureté. Ainsi, l'effet de la température sur l'absorption est très important.

On a ici quelque model qui son consacrer a l'étude de l'influence de l'absorptivité température dépendante.

HASSAN A. F. et al [45], ont développé une solution analytique pour l'évolution du profil de la température superficielle sous l'effet de l'absorptivité température-dépendante, modélée comme suit : $A(T(t, 0)) = A_0 + a \cdot T(t, 0)$, A_0 : l'absorptivité à la température ambiante,

SHEN Z. H. et ZHANG S. Y. [46], ont examiné le problème durcissement superficielle au laser d'une plaque mince avec une condition limite à la surface du à l'absorptivité dépendante du temps, des résultats sont relever et discuter.

El-ADAWI M. K. et al. [47], ont proposé une solution exacte basée sur la transformée de Laplace pour un corps fini chauffé par laser tenant en compte l'absorptivité à la surface variable en fonction linéaire de la température superficielle.

Kwon H., et al, [48] ont mesuré l'absorption des métaux en fonction de la température (Al, Ti, SS304) pour des faisceaux continus de 1,07 mm de fibre au laser et de 10,6 mm de CO₂ CO₂ à l'aide de capteurs de puissance et de pyromètres à infrarouge (IR). Les mesures d'absorbance ont été répétées pour les métaux à trois revêtements de peinture. Pour les mesures à des températures élevées jusqu'au point de fusion, l'intégration de la sphère n'est pas pratique dans la mesure où le rayonnement à haute température d'une cible chauffée perturbe considérablement le faible rendement de la sphère. Nos résultats indiquent comment chaque métal, qu'il soit revêtu ou non, absorbe les faisceaux infrarouges lorsque la température atteint un point de fusion. Une approximation polynomiale de l'absorption mesurée de chaque cible est fournie pour la modélisation de l'interaction laser-métal à des températures élevées.

II.10 Conclusion

Le contrôle de processus de traitement thermique est un problème qui n'a pas trouvé une solution correct par des méthodes expérimentale qui utilise des appareils expérimentale c'est pour ça que beaucoup de model analytique et numérique ont été inventé pour résoudre ce problème.

On a cité dans ce chapitre quelque model analytique et numérique qui considère que l'équation de l'absorptivité constante. Peu de travaux sont consacrés à l'étude de l'influence de température sur l'absorbance laser par le matériau

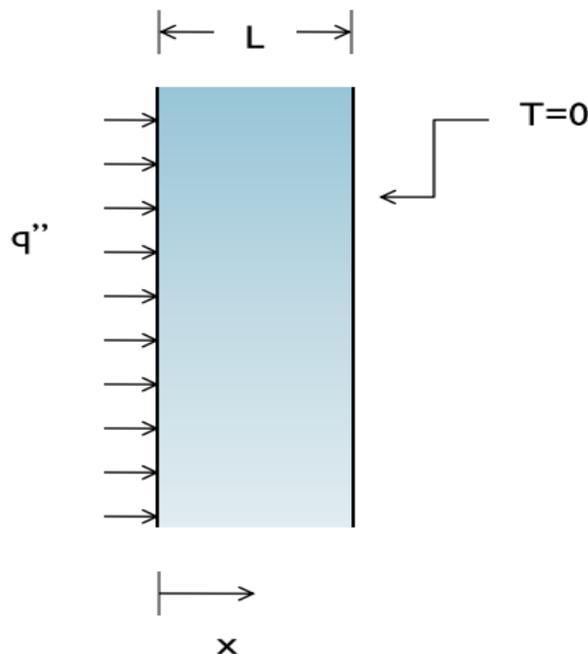
**Chapitre III : Etude de l'effet non
linéaire de l'absorptivité
température**

III.1 Introduction

Les équations aux dérivées partielles paraboliques, sont rencontrées dans des nombreuses applications scientifiques. Par mes ces applications le traitement thermique superficiel non linéaire dans les modelés mathématiques qui utilise une équation différentiel parabolique Considère-les comme un problème dépendant du temps dans une dimension spatiale. Pour résoudre cette équation différentielle on repose sur la commande de (pdepe) de Matlab.

Dans ce chapitre on va étudier la dépendance de la température de deux matériaux différents le AISI 304 et le titan pour cela en se base sur la commande pdepe de logiciel Matlab

III.2 analyse mathématique



Equation de chaleur :

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (4)$$

Condition initial :

$$T(x, 0) = 0^\circ\text{C} \quad (5)$$

Condition aux limite

$$-k \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = q'' A(T) \quad (6)$$

$$T(L, t) = 0^\circ\text{C} \quad (7)$$

Hypothèses :

- ❖ La propriété thermo-physique supposée constantes.
- ❖ L'effet de la convection et du rayonnement est négligeable

III.3 Description de la méthode de résolution (pdepe) [49]

sol = pdepe(m,pdefun,icfun,bcfun,xmesh,tspan) résout les problèmes de valeur d'initial-frontière pour les systèmes d'équations aux dérivées partielles paraboliques et elliptiques dans un espace variable x et de temps t . pdefun, icfun et bcfun sont des poignées de fonction. Les équations différentielles ordinaires (ODEs) résultant de discrétisation en espace sont intégrées pour obtenir des solutions approximatives à des moments spécifiés dans tspan. La fonction pdepe retourne des valeurs de la solution sur un maillage fourni dans xmesh.

pdepe résout les équations aux dérivées partielles de la forme :

$$c\left(x, t, u, \frac{\partial u}{\partial x}\right) \frac{\partial u}{\partial x} = x^{-m} \frac{\partial}{\partial x} \left(x^m f\left(x, t, u, \frac{\partial u}{\partial x}\right) \right) + s\left(x, t, u, \frac{\partial u}{\partial x}\right) \quad (1)$$

La cale d'équations aux dérivées partielles pour $t_0 \leq t \leq t_f$ et $a \leq x \leq b$. L'intervalle $[a, b]$ doit être finie. m peut être 0, 1, ou 2, correspondant à la dalle, cylindrique ou symétrie sphérique, respectivement. Si $m > 0$, alors a doivent être ≥ 0 .

Dans l'équation 1, $f(x, t, u, \partial u / \partial x)$ est un terme de flux et $s(x, t, u, \partial u / \partial x)$ est un terme source. L'accouplement des dérivées partielles par rapport au temps est limité à la multiplication par une matrice diagonale $c(x, t, u, \partial u / \partial x)$. Les éléments diagonaux de la matrice sont identiquement nuls ou positif. Un élément qui est identiquement zéro correspond à une équation elliptique ou non à une équation parabolique. Il doit y avoir au moins une équation parabolique. Un élément de c , qui correspond à une équation parabolique peut disparaître à valeurs isolées de x , si les valeurs de x sont les points de maillage. Discontinuités dans c ou s , en raison des interfaces matérielles sont autorisées sous réserve qu'un point de filet est placé à chaque interface.

Pour $t = t_0$ et tous les x , les composants de la solution satisfont les conditions initiales de la forme :

$$u(x, t_0) = u_0(x) \quad (2)$$

Pour tous les t et soit $x = a$ ou $x = b$, les composants de la solution satisfaisant une condition aux limites de la forme :

$$p(x, t, u) + q(x, t) f\left(x, t, u, \frac{\partial u}{\partial x}\right) = 0 \quad (3)$$

Éléments de q sont identiquement nuls ou jamais zéro. Notez que les conditions aux limites sont exprimées dans le flux f plutôt que $\partial u / \partial x$. En outre, des deux coefficients, seulement p peut dépendre de u .

Dans l'appel `sol = pdepe(m, pdefun, icfun, bcfun, xmesh, tspan)`:

- `m` correspond à m .
- `xmesh(1)` et `xmesh(end)` correspondent aux a et b .
- `tspan(1)` et `tspan(end)` correspondent à t_0 et t_f .
- `pdefun` calcule les termes c , f et s (équation 1). Il a la forme `[c,f,s] = pdefun(x,t,u,dudx)`

Les arguments d'entrée sont scalaires x et t et vecteurs u `dudx` qui se rapprochent de solution u et sa dérivée partielle par rapport à x , respectivement. c , f et s sont des vecteurs colonnes. c stocke les éléments diagonaux de la matrice c (équation 1).

- `icfun` évalue les conditions initiales. Il a la forme `u = icfun(x)`

Lorsqu'elle est appelée avec un argument x , `icfun` évalue et retourne les valeurs initiales des composants de la solution à x dans la colonne vecteur u .

- `bcfun` évalue les conditions de p et q des conditions aux limites. Il a la forme

$$[pl,ql,pr,qr] = bcfun(xl,ul,xr,ur,t)$$

`ul` est la solution approximative à la limite de gauche $x_l = a$ et `ur` est la solution approximative à la limite droite $x_r = b$. `pl` et `ql` sont les vecteurs colonnes correspondant à p et q ont évalué à x_l , de même `pr` et `qr` correspondent aux x_r . Lorsque $m > 0$ et $a = 0$, boundedness de la solution près $x = 0$ exige que le flux f s'annule en $a = 0$. `pdepe` impose cette condition limite automatiquement et il ignore les valeurs retournées en `pl` et `ql`.

`pdepe` retourne la solution comme un tableau multidimensionnel `sol`. $u_{j,ai} = u_i = \text{sol}(:, :, i)$ est une approximation au composant i th de la solution vecteur u . L'élément $u_i(j,k) = \text{sol}(j,k,i)$ se rapproche $u_{j,ai}$ à $(t,x) = (\text{tspan}(j), \text{xmesh}(k))$.

`u_i = sol(j,:,i)` se rapproche de composant i de la solution à la fois `tspan(j)` et des points de maille `xmesh(:)`. Utiliser `pdeval` pour calculer le rapprochement et ses dérivées partielles $\partial u_{j,ai} / \partial x$ à points non compris dans `xmesh`.

`sol = pdepe(m, pdefun, icfun, bcfun, xmesh, tspan, options)` résout comme ci-dessus avec les paramètres d'intégration par défaut remplacés par des valeurs dans les options, un argument créé avec la fonction `odeset`. Seules certaines options du solveur ODE sous-jacents sont

disponibles dans pdepe: RelTol, AbsTol, NormControl, InitialStepetMaxStep. Les valeurs par défaut obtenus en laissant l'argument d'entrée options off sera généralement satisfaisantes.

`[sol,tsol,sole,te,ie]=pdepe(m,pdefun,icfun,bcfun,xmesh,tspan,options)`

avec les 'Events' propriété dans options définies à une poignée de fonction Events, a résolu comme indiqué ci-dessus, tout en trouvant également où les événements fonctions $g(t,u(x,t))$ sont nuls. Pour chaque fonction, vous spécifiez si l'intégration est de mettre fin à un zéro et qu'importe la direction du passage par zéro. Trois vecteurs colonnes sont retournées par les événements :

`[value,isterminal,direction] = événements (m,t,xmesh,umesh). xmesh`

contient le maillage spatial et umesh est la solution aux points de maillage. Utilisation de pdeval pour évaluer la solution entre mesh points. Pour la fonction d'événements de jeth, value(i) est la valeur de la fonction, ISTERMINAL(I) = 1 si l'intégration est de mettre fin à un zéro de cette fonction d'événement et 0 sinon. Direction(i) = 0 si tous les zéros sont d'être calculé (par défaut), + 1 si ce n'est des zéros où la fonction événement augmente, et -1 si ce n'est des zéros où la fonction de l'événement est en baisse. Sortie tsol est une vectrice colonne de temps spécifiés dans tspan, avant la première épreuve terminale. SOL (j,:,:) est la solution à T(j). TE est un vecteur de fois au cours de laquelle les événements se produisent. SOLE (j,:,:) est la solution à TE(j) et indices en vecteur IE spécifient quel événement s'est produit.

III.4 Données de problème

La principale difficulté évoquée par plusieurs auteurs, concerne l'adoption des conditions aux limites ou seulement l'absorptivité est prise comme fonction variable selon l'évolution de la température superficielle sous forme linéaire, par contre dans ce travail, nous avons traité dans ce qui suit, l'effet de l'absorptivité température - dépendante sous forme d'un polynôme de l'ordre trois sous comme suit ;

$$A(T) = a + b.T + c.T^2 + d.T^3$$

basé sur des résultats expérimentaux selon l'étude de **Kwon H., et al, [48]**. On s'intéresse à étudier deux matériaux (Titane, acier inoxydable AISI 304) dont l'absorptivité et température **dépendante.**

échantillons	Température	a	b	c	d
Aisi 304	373–823	2.95×10^1	5.79×10^{-3}	-1.08×10^{-5}	6.53×10^{-9}
titane	373–963	3.51×10^1	2.88×10^{-2}	-4.79×10^{-5}	2.64×10^{-8}

Tableau III-1 caractéristiques de titane et de aisi 304

Tableau III-2 Approximation polynomiale de l'absorption pour un faisceau laser de 1,07 mm (Nd : YAG)

Matériau	Capacité thermique C_p [J / KgK]	Conductivité Thermique k [W / mK]	Densité ρ [Kg / m ³]	Diffusivité thermique α [m ² / s] _{10⁺⁶}	Température de fusion(TF) [°C]
Titane	522	22	4500	9.365	1668
AISI 304	468	16.3	8238	4.228	1450

Tableau III-3 Approximation polynomiale de l'absorption pour un faisceau laser de 10,6 mm (CO₂)

échantillons	Température	a	b	c	d
Aisi 304	373–1723	9.55	6.62×10^{-3}	-8.76×10^{-6}	3.72×10^{-9}
Titane	373–1073	9.21	2.68×10^{-2}	-4.09×10^{-5}	2.06×10^{-8}

III.5 Résultats et discussion

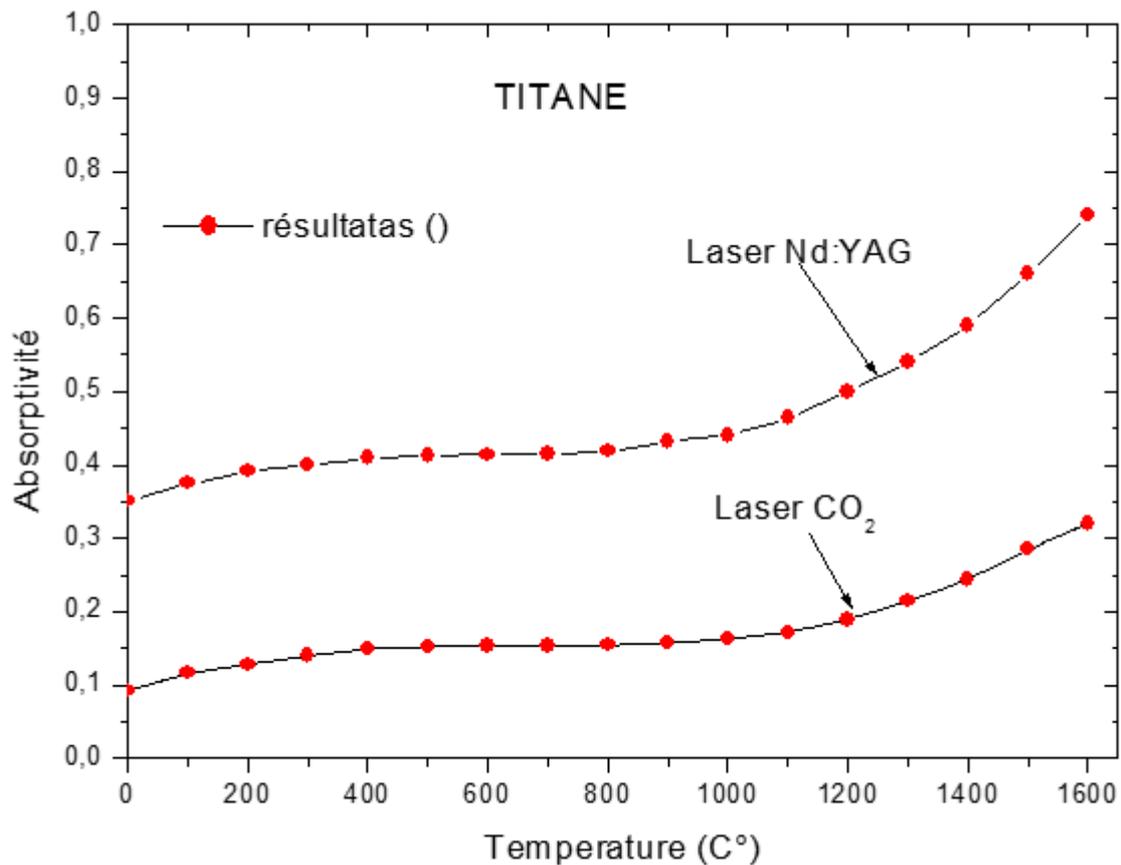


Figure III-1 Polynômes d'absorptivité température-dépendante, pour le Titane

Equation de l'absorptivité Pour le titane :

Nd: YAG:

$$A(T) = 0.351 + 2.88 \times 10^{-4} \times T - 4.79 \times 10^{-7} \times T^2 + 2.64 \times 10^{-10} \times T^3$$

CO₂:

$$A(T) = 0.0921 + 2.68 \times 10^{-4} \times T - 4.09 \times 10^{-7} \times T^2 + 2.06 \times 10^{-10} \times T^3$$

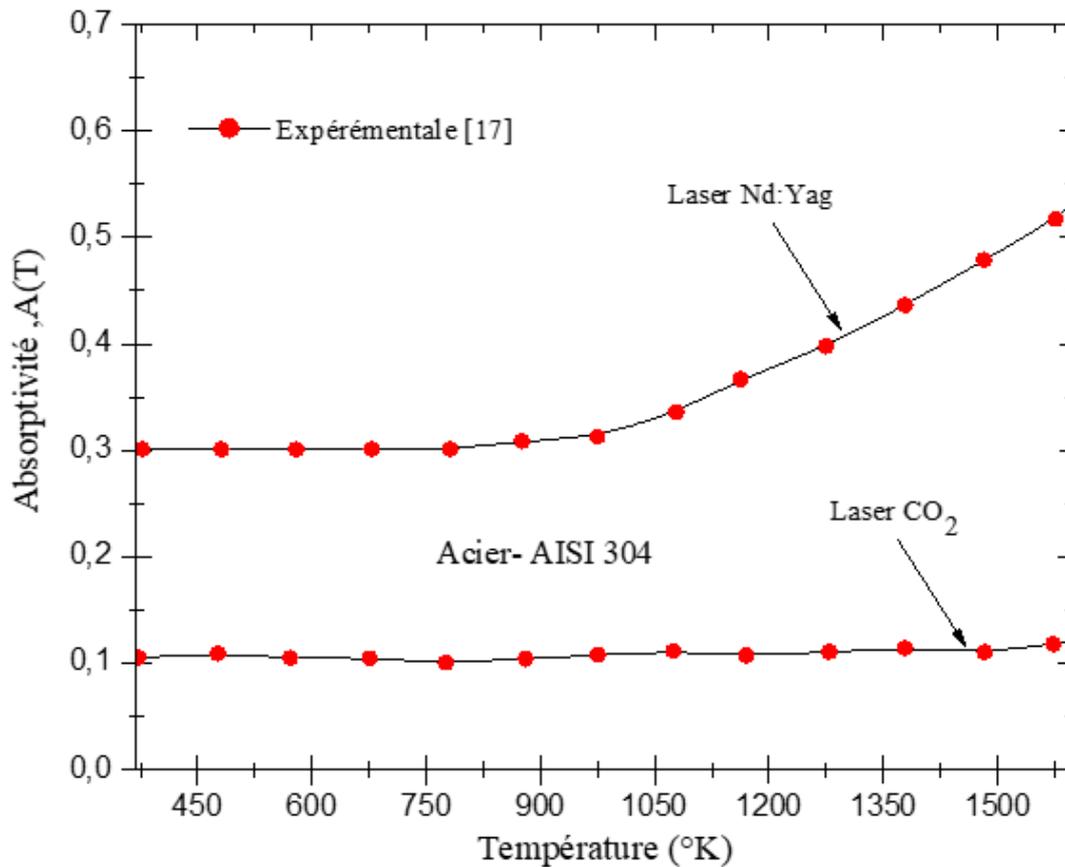


Figure III-2 Polynômes d'absorptivité température-dépendante, pour l'acier AISI304

Equation de l'absorptivité Pour l'acier AISI 304 :

Nd : YAG :

$$A(T) = 0.295 + 5.79 \times 10^{-5} \times T - 1.08 \times 10^{-7} \times T^2 + 6.53 \times 10^{-11} \times T^3$$

CO₂ :

$$A(T) = 0.0955 + 6.62 \times 10^{-5} \times T - 8.76 \times 10^{-8} \times T^2 + 3.72 \times 10^{-12} \times T^3$$

Les Figures III-1 et III-2, représente une approche théorique sous forme des polynômes entre les résultats expérimentaux déduire par [48] de l'absorptivité pour l'acier inoxydable AISI 304, et le Titane sous l'effet des lasers Nd :YAG et CO₂

Pour le laser Nd : YAG

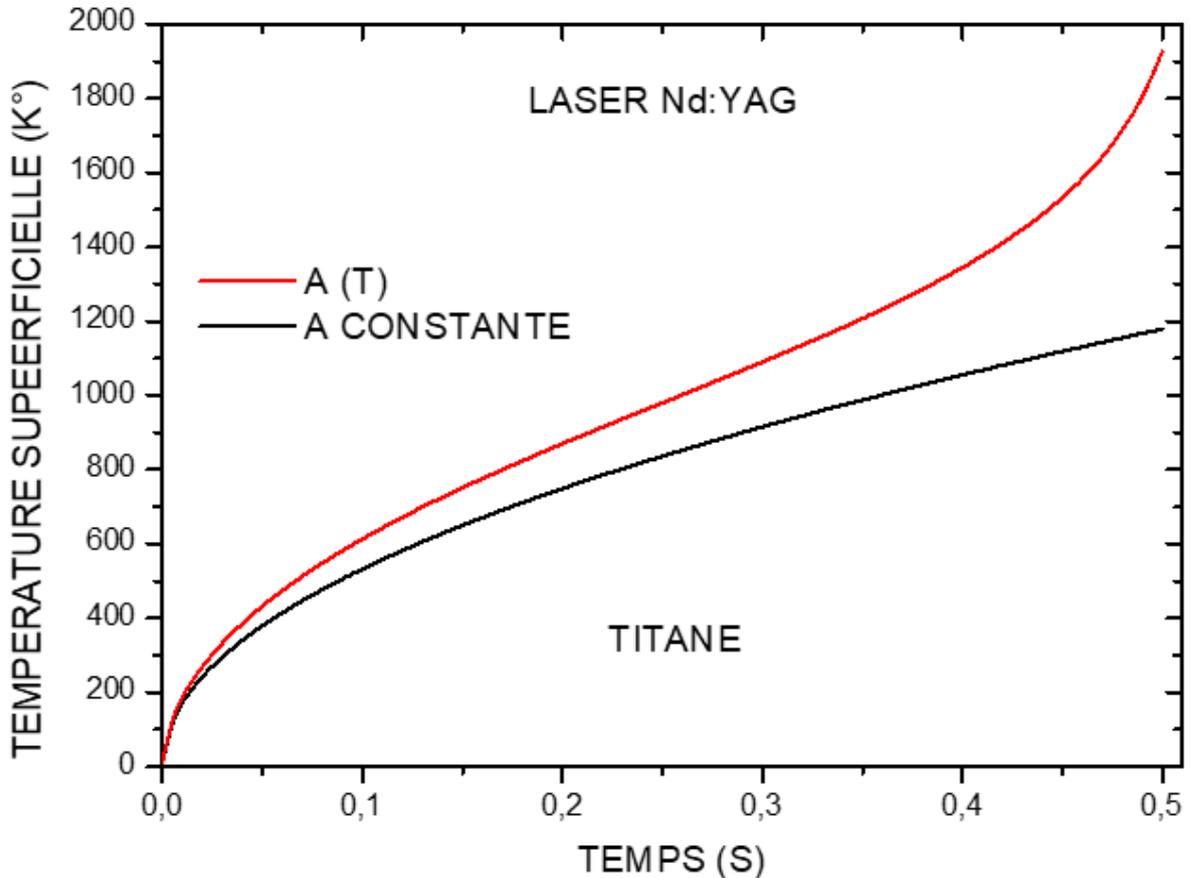


Figure III-3 Profils de température superficielle en phase d'échauffement en fonction du temps, obtenu à $A = cst$ et (T) , pour le TITANE sous l'effet thermique du laser Nd :YAG

La Figure III-3, représente l'évolution de la température en fonction du temps pour le titane selon deux cas de l'absorptivité, constante et variable selon la température superficielle pour le laser Nd ;YAG. Une simple analyse à la fin de la phase d'échauffement correspond à $t = 0.5$ s la température superficielle maximale dans le cas de l'absorptivité variable augmente de 63,51 % par rapport au cas où elle considère constante, c'est une proportion importante comme il semble qui peut voir un effet direct et efficace, le résultat final du traitement thermique et surtout sur la Structure de la surface souhaité.

Et à cet effet la distribution thermique dans la profondeur de la pièce est également importante pour déterminer l'épaisseur de la couche traitée. Voir la figure III-4.

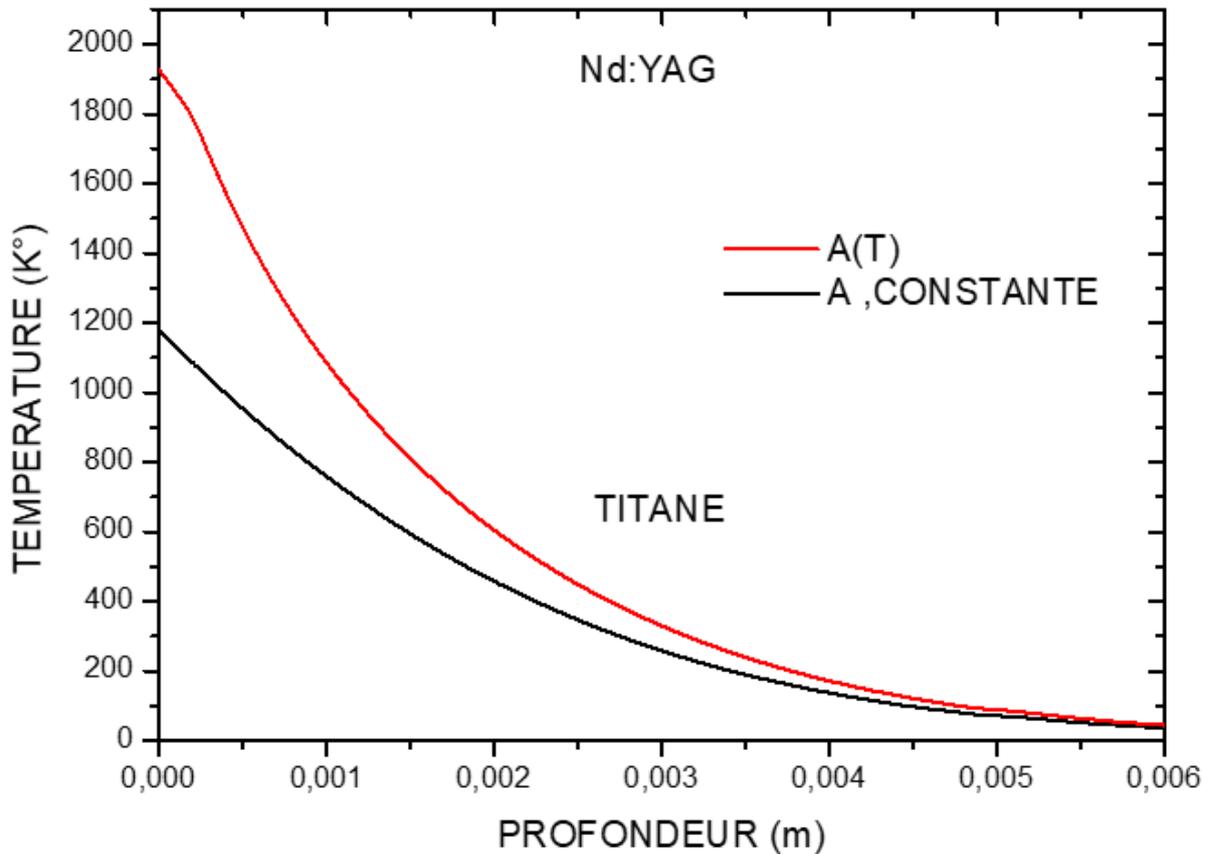


Figure III-4 Profils de température superficielle en phase d'échauffement en fonction du temps, obtenu à $A = cst$ et (T) , pour le TITANE sous l'effet thermique du laser Nd :YAG

La figure III-4 montrent l'évolution de la température dans l'épaisseur de la pièce traitée en domaine à la fin de la phase de d'échauffement pour les deux modèles de l'absorptivité, constante et variable en température dans le cas du laser Nd ;YAG, la température superficielle maximale dans le cas de l'absorptivité variable augmente de 63,51 % par rapport au cas où elle considère constante cette valeur diminue plus que les profils pénètrent la profondeur de la pièce. Voir le tableau III-4. Cette variation de l'effet de pénétration de la température en profondeur de la pièce a une influence directe sur la détermination de l'épaisseur de la couche traitée.

Tableau III-4 ; variation de température pour A constante et A variable pour différentes profondeurs

	A .constante	A .variable	Augmentation en %
Température (K°) à x=0mm	1178.5	1927	63,51
Température (K°) à x=0.4mm	995.3	1568.9	57.63
Température (K°) à x=0.8mm	832.3	1221.1	46.71

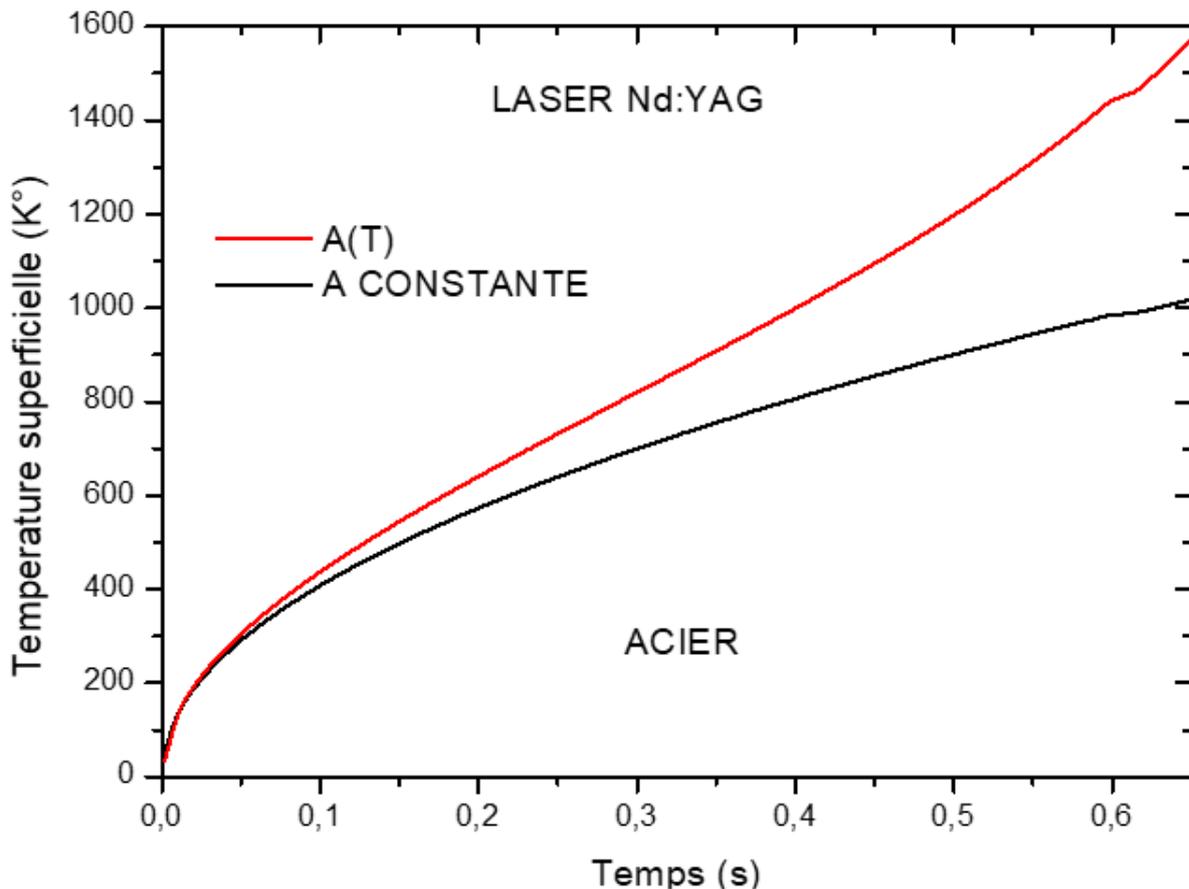


Figure III-5 Profils de température superficielle en phase d'échauffement en fonction du temps, obtenu à $A = cst$ et (T) , pour l'acier sous l'effet thermique du laser Nd :YAG

La Figure III-5, représente l'évolution de la température en fonction du temps pour l'acier selon deux cas de l'absorptivité, constante et variable selon la température superficielle pour le laser Nd :YAG. Une simple analyse à la fin de la phase d'échauffement correspond à $t = 0.5$ s la température superficielle maximale dans le cas de l'absorptivité variable augmente de 54,92 % par rapport au cas où elle considère constante, c'est une proportion importante comme il semble qu'il peut voir un effet direct et efficace, le résultat final du traitement thermique et surtout sur la Structure de la surface souhaité.

Et à cet effet la distribution thermique dans la profondeur de la pièce est également importante pour déterminer l'épaisseur de la couche traitée. Voir la figure III-6.

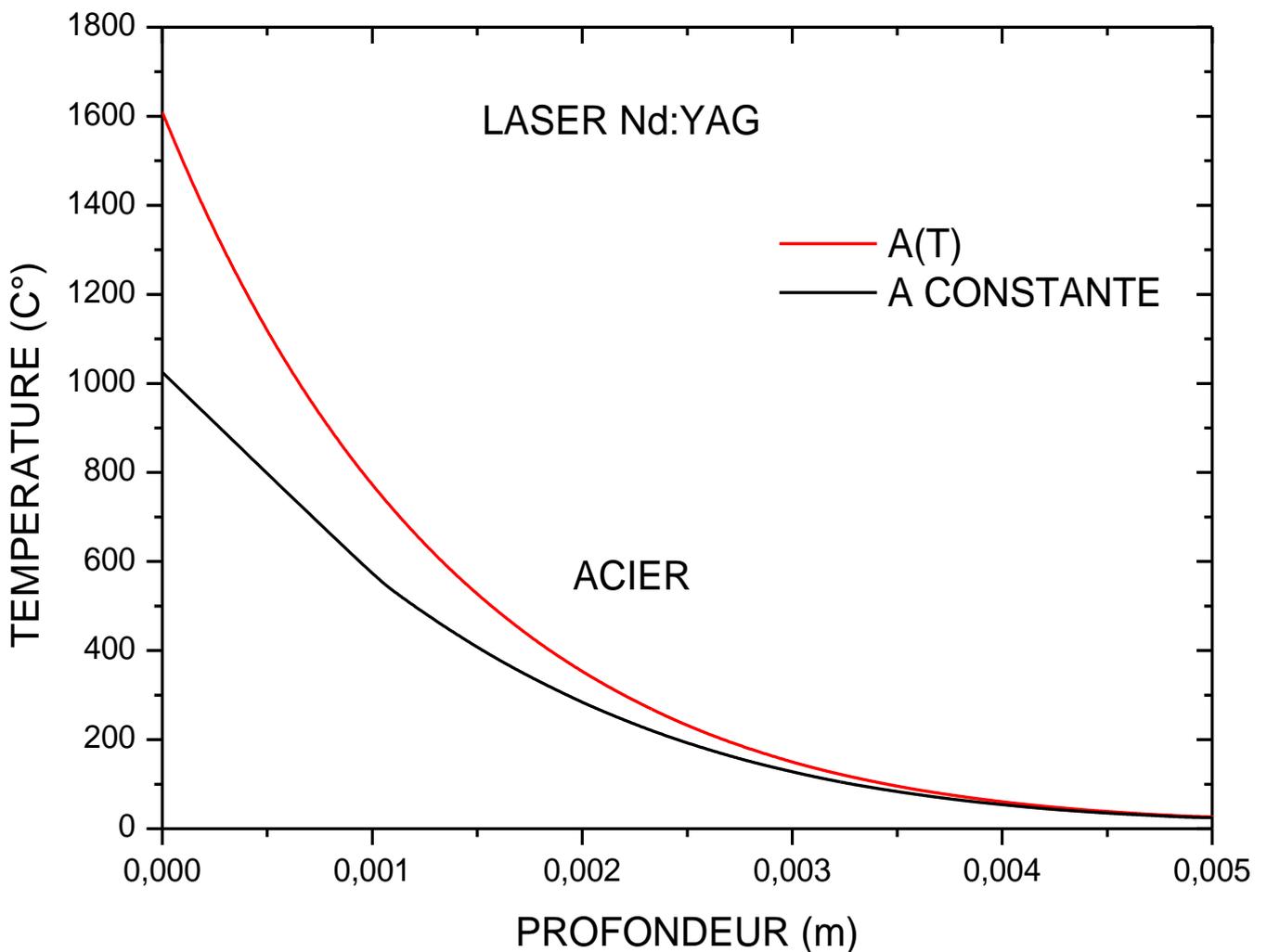


Figure III-6 Profils de température superficielle en phase d'échauffement en fonction de la profondeur, obtenu à $A = cst$ et (T) , pour l'acier sous l'effet thermique du laser Nd :YAG

La figure III-6 montrent l'évolution de la température dans l'épaisseur de la pièce traitée en domaine à la fin de la phase de d'échauffement pour les deux modèles de l'absorptivité , constante et variable en température dans le ca du laser Nd ;YAG, la température superficielle maximale dans le cas de l'absorptivité variable augmente de 54,92 % par rapport au cas où elle considérer constante cet valeur diminuent plus que les profils pénètre la profondeur de la pièce . Voir le tableau III-5

Cette variation de l'effet de pénétration de la température en profondeur de la pièce à une influence directe sur la détermination de l'épaisseur de la couche traité

Tableau III-5 variation de température pour A constante et A variable pour différentes profondeurs

	A .constante	A .variable	Augmentation en %
Température (K°) à x=0mm	1036.4	1605.6	54.92
Température (K°) à x=0.4mm	988.7	1467.3	48.4
Température (K°) à x=0.8mm	695.1	920.5	32.42

Pour le laser CO₂

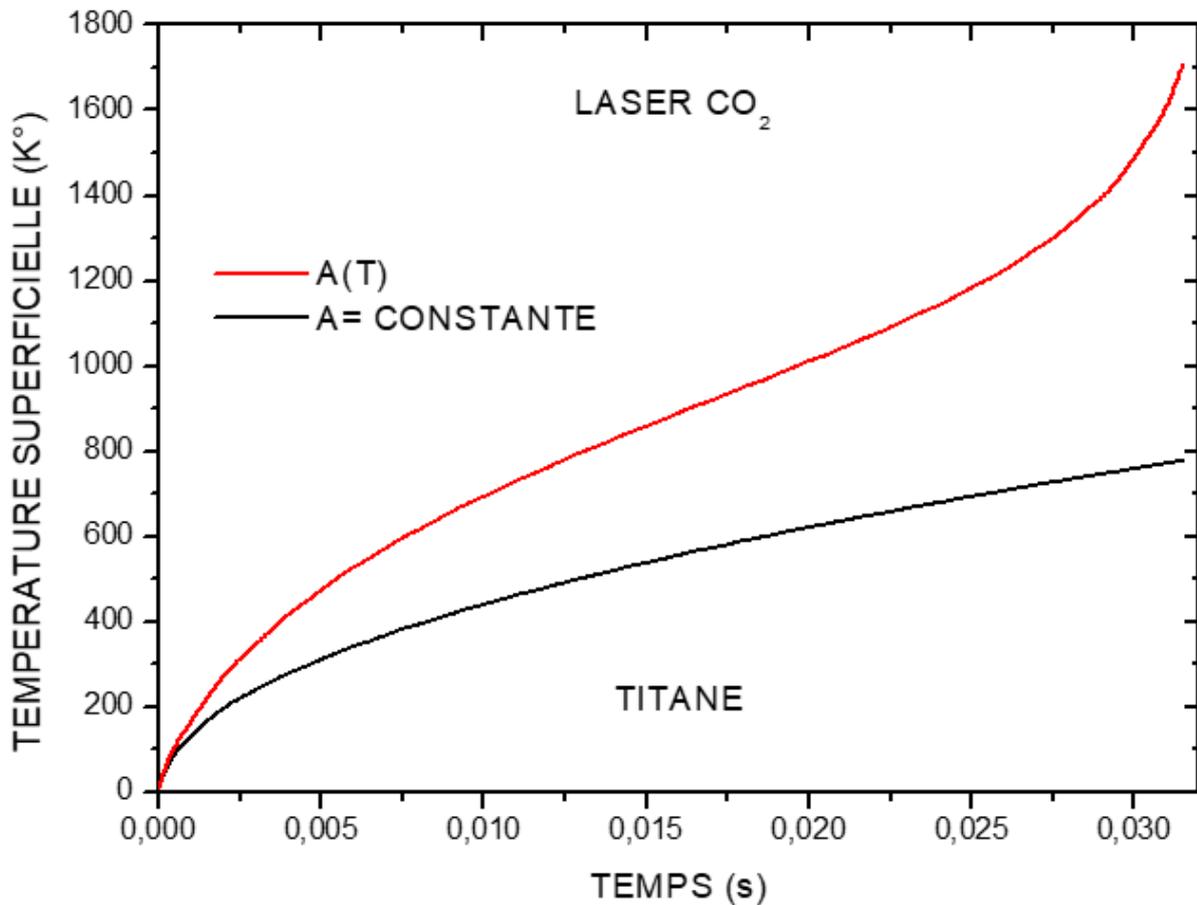


Figure III-7 Profils de température superficielle en phase d'échauffement en fonction du temps, obtenu à $A = cst$ et (T) , pour le TITANE sous l'effet thermique du laser CO₂

La Figure III-7, représente l'évolution de la température en fonction du temps pour le titane selon deux cas de l'absorptivité, constante et variable selon la température superficielle pour le laser CO₂. Une simple analyse à la fin de la phase d'échauffement correspond à $t = 0,5$ s la température superficielle maximale dans le cas de l'absorptivité variable augmente de 115.74 % par rapport au cas où elle considère constante, c'est une proportion importante comme il semble qui peut voir un effet direct et efficace, le résultat final du traitement thermique et surtout sur la Structure de la surface souhaité.

Et à cet effet la distribution thermique dans la profondeur de la pièce est également importante pour déterminer l'épaisseur de la couche traitée.

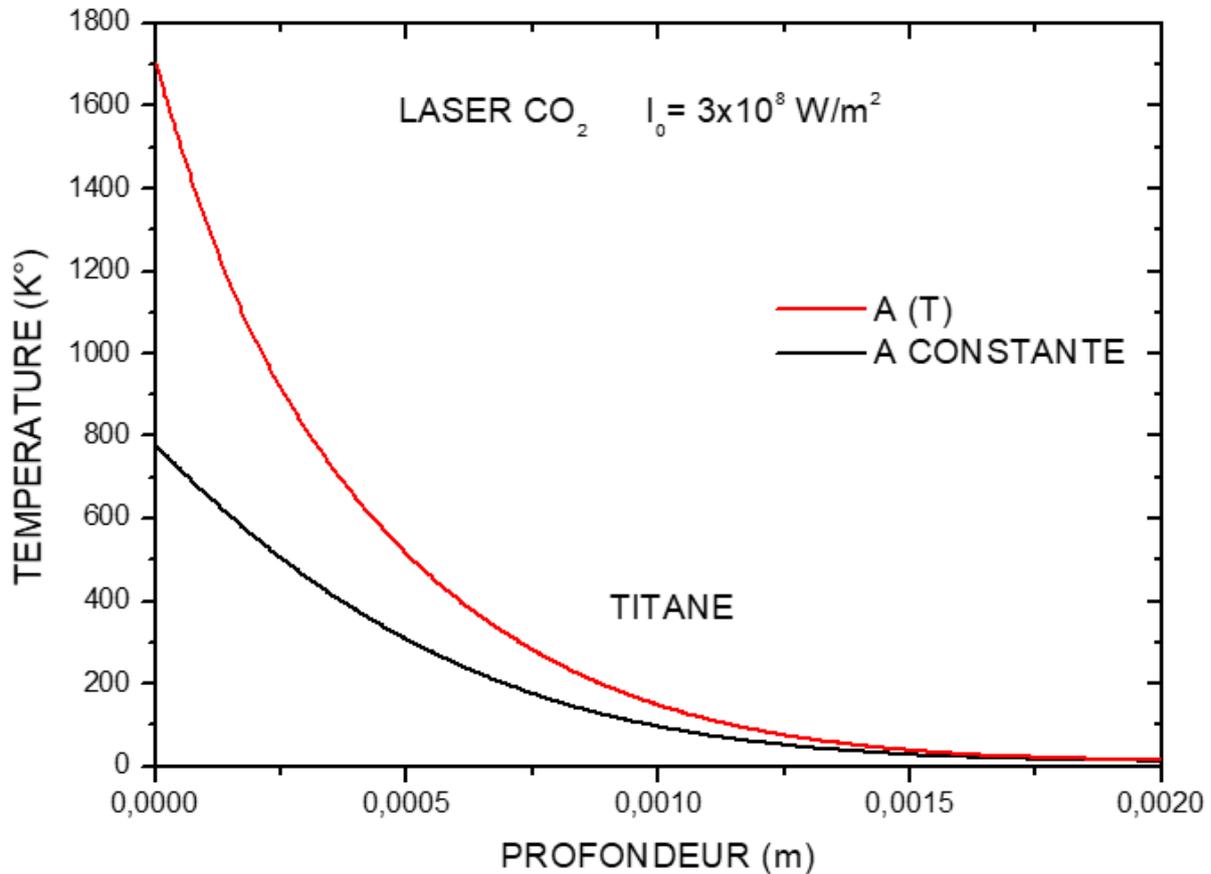


Figure III-8 Profils de température superficielle en phase d'échauffement en fonction de la profondeur, obtenu à $A = cst$ et $A(T)$, pour le TITANE sous l'effet thermique du laser CO₂

La figure III-8 montrent l'évolution de la température dans l'épaisseur de la pièce traitée en domaine à la fin de la phase de d'échauffement pour les deux modèles de l'absorptivité , constante et variable en température dans le ca du laser CO₂, la température superficielle maximale dans le cas de l'absorptivité variable augmente de 115.74 % par rapport au cas où elle est considérée constante cet valeur diminuent plus que les profils pénètre la profondeur de la pièce . Voir le tableau III-6

Cette variation de l'effet de pénétration de la température en profondeur de la pièce à une influence directe sur la détermination de l'épaisseur de la couche traité

Tableau III-6 variation de température pour A constante et A variable pour différentes profondeurs

	A .constante	A .variable	Augmentation en %
Température (K°) à x=0mm	788.2	1700.5	115.74
Température (K°) à x=0.4mm	387.4	690.6	78.26
Température (K°) à x=0.8mm	195.8	300.2	53.31

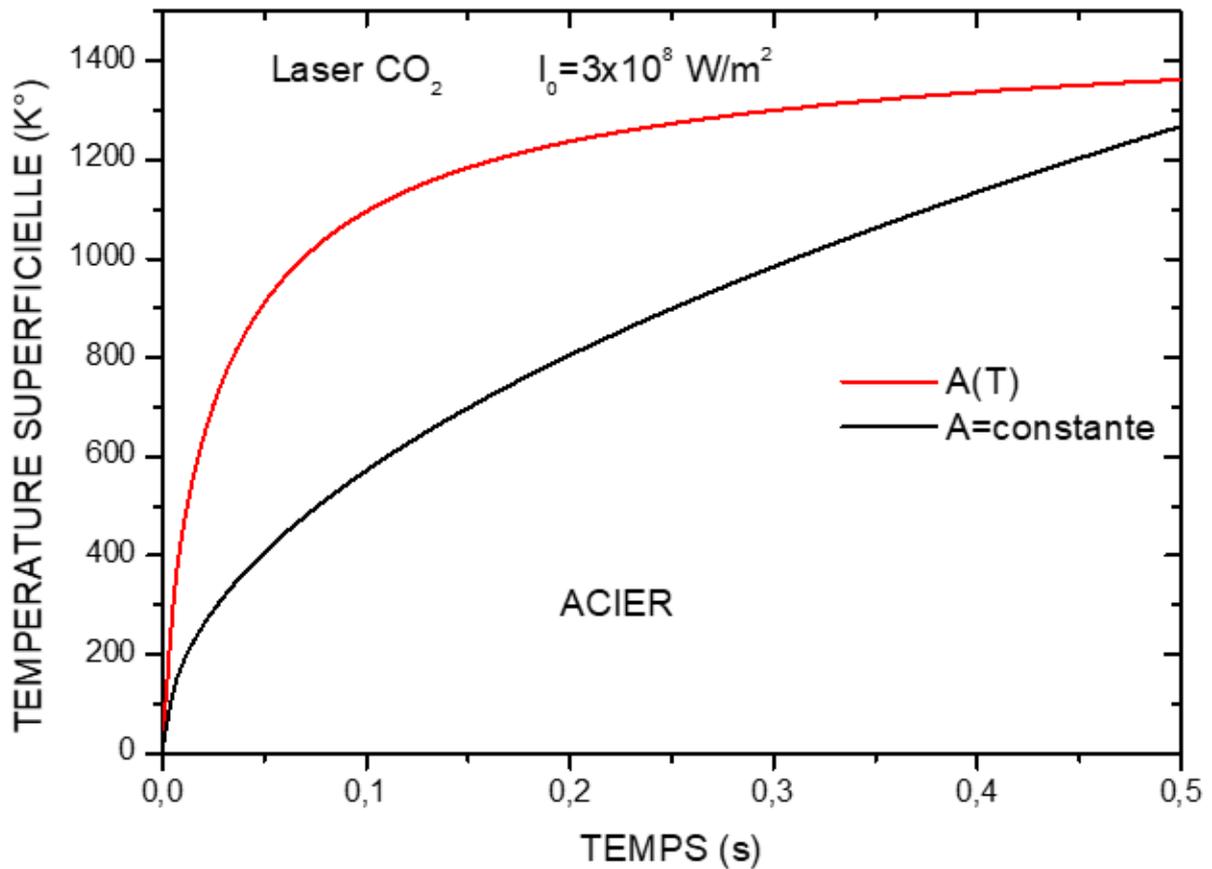


Figure III-9 Profils de température superficielle en phase d'échauffement en fonction du temps, obtenu à $A = cst$ et (T) , pour l'acier sous l'effet thermique du laser CO₂

La Figure III-9, représente l'évolution de la température en fonction du temps pour le acier selon deux cas de l'absorptivité , constante et variable selon la température superficielle pour le laser CO₂ . Une simple analyse à la fin de la phase d'échauffement correspond à t = 0.5 s la température superficielle maximale dans le cas de l'absorptivité variable augmente de 7.39 % par rapport au cas où elle considérer constante, c'est une proportion importante comme il semble qui peut voir un effet direct et efficace, le résultat final du traitement thermique et surtout sur la Structure de la surface souhaité.

Et à cet effet la distribution thermique dans la profondeur de la pièce est également importante pour déterminer l'épaisseur de la couche traitée. Voir la figure III-10

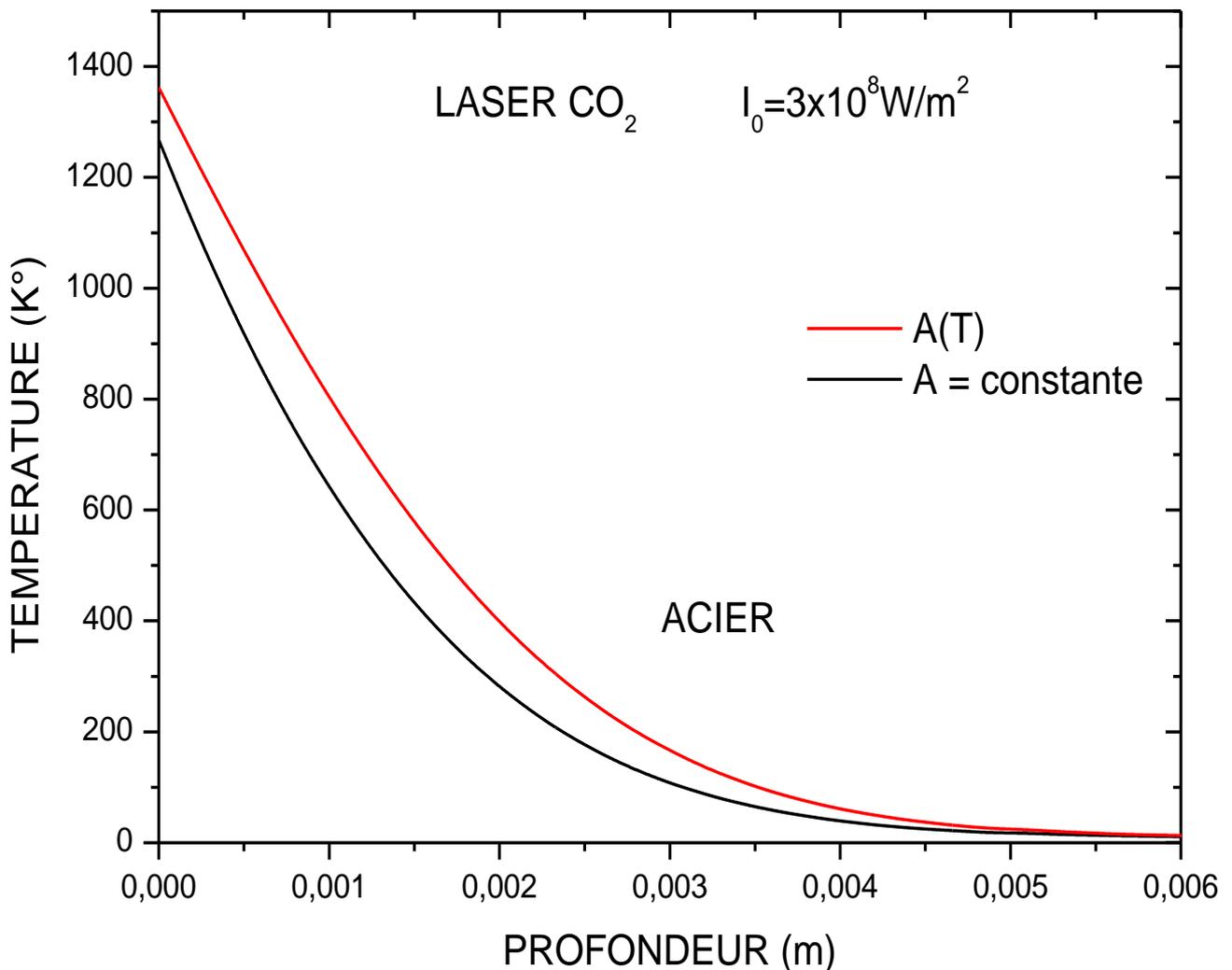


Figure III-10 Profils de température superficielle en phase d'échauffement en fonction de la profondeur, obtenu à $A = \text{cst}$ et (T) , pour l'acier sous l'effet thermique du laser CO₂

La figure III-10 montrent l'évolution de la température dans l'épaisseur de la pièce traitée en domaine à la fin de la phase de d'échauffement pour les deux modèles de l'absorptivité , constante et variable en température dans le ca du laser CO₂, la température superficielle maximale dans le cas de l'absorptivité variable augmente de 7.39 % par rapport au cas où elle considérer constante cet valeur dans ce cas augmente plus que les profils pénètre la profondeur de la pièce . Voir le tableau III-7

Cette variation de l'effet de pénétration de la température en profondeur de la pièce à une influence directe sur la détermination de l'épaisseur de la couche traité.

Tableau III-7 ; variation de température pour A constante et A variable pour différentes profondeurs

	A .constante	A .variable	Augmentation en %
Température (K°) à x=0mm	1262.3	1355.7	7.39
Température (K°) à x=0.4mm	1022.8	1105.4	8.07
Température (K°) à x=0.8mm	720.1	914.9	27.05

Remarque

Dans tous les cas de traitement thermique superficiels qu'on a vu on constat que lorsque on considère que l'équation de l'absorptivité A variable, le traitement est plus efficace que dans le cas où l'équation A est constante.

III.6 Comparaison entre les deux laser Nd :YAG et CO₂

Tableau III-8 variation de la température selon le type de laser

	Laser CO ₂ température (K) a x=0	Laser Nd :YAG température (K) a x=0	Pourcentage d'augmentation
Acier	1355.7	1605.6	18.43 %
Titane	1700.5	1927	13.31 %

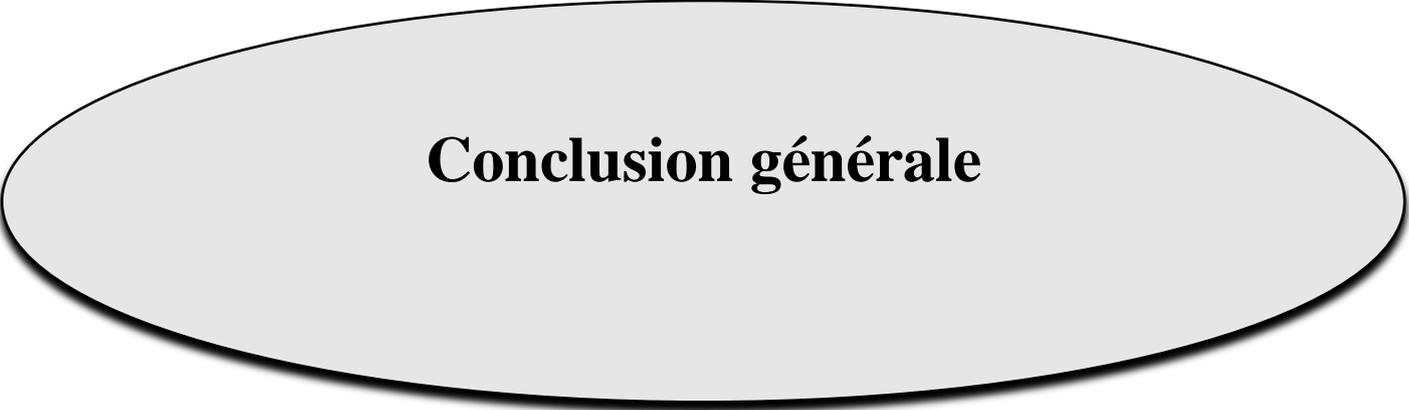
Dans le tableau III-8 on a comparé les deux lasers Nd :YAG et CO₂ dans les mêmes conditions pour pouvoir évaluer leur puissance. On voit bien que la température de laser Nd :YAG est bien supérieur de 18.43 % par rapport au laser CO₂ dans les mêmes conditions

c'est à dire le même acier et la même profondeur, aussi au cas de titane le laser Nd :YAG fournie une température supérieur à celle de CO₂.

Bien évidemment en conclue que le laser Nd :YAG est beaucoup plus puissant que le laser CO₂

III.7 Conclusion

Dans ce chapitre on a proposé un modèle qui permet de résoudre l'équation de la chaleur non linéaire due à l'absorptivité température-dépendante sous un polynôme de l'ordre 3 en régime transitoire dans un domaine unidimensionnel sous l'effet de flux thermique laser imposé. Pour cela on a utilisé la commande pdepe sous Matlab pour résoudre notre model mathématique, on a étudié deux type de matériaux l'acier et le titane sous l'effet de deux type de laser Nd :YAG et CO₂ , on a réalisé grâce au résultat obtenue que la température superficielle maximale dans le cas de l'absorptivité variable augmente par rapport au cas où elle est considérée constante l'écart entre lest deus cas diminuent plus que les profils pénètre la profondeur de la pièce, et on comparée les deux laser sous les mêmes condition et on a vu que le laser Nd :YAG est beaucoup plus puissant que le laser CO₂.



Conclusion générale

Conclusion générale

En réponse à la principale difficulté évoquée par plusieurs auteurs, concernant l'adoption des conditions aux limites qui traduisent réellement les phénomènes physiques de l'interaction thermique laser matériau, on a traité le problème de la modélisation du traitement thermique des matériaux en prenant en compte l'effet de la dépendance de l'absorptivité en température, afin de réduire les coûts expérimentaux utilisés dans certains travaux.

La plupart des travaux publiés considèrent l'absorptivité, comme paramètre constant, après le processus de préparation de la surface, ou bien dans certains travaux limités, où l'absorptivité dépendante, la température superficielle est utilisée sous une forme linéaire simple.

Le modèle numérique qu'on a proposé permet, de résoudre l'équation de la chaleur non linéaire due à l'absorptivité température-dépendante sous un polynôme de l'ordre 3, en régime transitoire dans un domaine unidimensionnel sous l'effet du flux thermique laser imposé.

la température superficielle maximale dans le cas de l'absorptivité variable augmente par rapport au cas où elle est considérée constante l'écart entre les deux cas diminue plus que les profils pénètrent la profondeur de la pièce, et on compare les deux lasers sous les mêmes conditions et on a vu que le laser Nd :YAG est beaucoup plus puissant que le laser CO₂.

On a utilisé la commande `pdepe` sous Matlab, qui sert mieux ce genre de problème, en particulier pour la géométrie simple et régulière de la matière traitée.

Des résultats sont obtenus et discutés pour deux types de matériaux l'acier et le titane sous l'effet de deux types de laser Nd : YAG et le laser CO₂.

Références bibliographiques

- [1] Histoire et principe de fonctionnement du MASER et du LASER, **Bernard Cagnac**
Laboratoire Kastler Brossel, Paris IV Delphine **Chareyron** ENS de Lyon.
- [2] Fondation Internationale de la Maison de la Chimie Union des Industries Chimiques
- [3] LE LASER. I- Principe de fonctionnement du LASER, **Marie-Paule Germain**
- [4] Ecole Nationale Vétérinaire d'Alfort (Notes de cours du Professeur Gilbert Mouthon et Professeur Pierre Ravussin)
- [5] Modele a deux temperatures pour l'étude de l'ablation du molybdene par impulsion laser femtoseconde , universite mouloud mammeri de tizi-ouzou ,mémoire de fin d'étude présenté par Fatma BIRECHE
- [6] Matthew S. Brown, Craig B. Arnold. Fundamentals of Laser-Material Interaction and Application to Multiscale Surface Modification, chapter 4. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, P. 91-120, 2010.
- [7] SOVEJA, Adriana-Florina. Modélisation du processus de texturation par faisceau laser : Approches expérimentale et numérique. Thèse de doctorat, U. Bourgogne, "Politehnica" Timisoara (2007).
- [8] Traitement superficiels par faisceaux à haute densité d'énergie 'par dimitris PANTELIS docteur de l'école central de paris)
- [9] Application des lasers aux traitement de surfaces (par Patricia LAURENS docteur de l'université paris VI, Catherine DUBAUCHET docteur de l'université de paris XI et Didier KECHAMAIR docteur de l'université de paris XI)
- [10] PANTELIS (D)-laser de puissance –traitement et utilisation.technique de l'ingénieur,traité sciences fondamentales.
- [11] TRAFFORD (D.N.H)-traitement thermique avec un laser de haute puissance.heat treatment 79 ,(261),P.32(1986).
- [12] DUBOUCHET (C) –traitement thermo-mecanique de surfaces métalliques à l'aide de laser CO2.continuos et de laser impulsionnel.thèse,universitéparis XI(1993).
- [13] Bevets EP174915,EP206080(1986).
- [14] Ludovic Avril. Elaboration de revêtements sur acier inoxydable: simulation de la fusion par irradiation laser, caractérisation structurale, mécanique et tribologique.. Sciences de l'ingénieur [physics]. Arts et Métiers ParisTech, 2003. Français.

- [15] J. Barralis, G. Maeder, « Précis Métallurgie : Elaboration, structures-propriétés, normalisation », p. 102-113, éd. Nathan (1997)
- [16] Stéphane Valette. Effets thermiques dus à l'interaction laser-matière dans les métaux en régime femtoseconde. Physique Atomique [physics.atom-ph]. Université Jean Monnet - Saint-Etienne, 2003. Français.
- [17] Mesure de champs de températures vraies par thermo-réfectométrie proche infrarouge par **Remi Gilblas**
- [18] guide technique « Making Sense of Thermocouples » du laboratoire de métrologie de Nouvelle-Zélande
- [19] Gabriel C.-Guillemette, MODÉLISATION DU PROCÉDÉ DE TREMPÉ AU LASER APPLIQUÉ À DES COMPOSANTES MÉCANIQUES COMPLEXES
- [20] TIMC-IMAG-GMCAO - Gestes Medico-chirurgicaux Assistés par Ordinateur TIMC-IMAG - Techniques de l'Ingénierie Médicale et de la Complexité - Informatique, Mathématiques et Applications, Grenoble - UMR 5525
- [21] Modelisation du durcissement superficiel par faisceau laser pulsé :etude de l'influence de type de materiau,mémoire réalisé par AZOUT samir et KHOULALEN khaled.
- [22] **Yilbas. B.S. et al.**,« 3-dimensional modelling of laser repetitive pulse heating: a phase change and a moving heat source considerations »,Applied Surface Science, Vol.134 ,(1998),pp.159–178
- [23] **Yilbas. B.S.**,« 3-dimensional modelling of laser repetitive pulse heating: a phase change and a moving heat source considerations »,Int .J.Engng Sci, Vol. 24, No. 8,(1986) ,pp. 1325-1334
- [24] **Hoaldley. A. et Drezet J.M.**, «Modélisation thermique de la refusions et du revêtement de surface par laser »,dans : Laser de Puissance et Traitements des Matériaux, École de Printemps CNRS-EPFL, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Sireuil, (1991) , pp.568-589
- [25] **Qiu. T.Q. et Tien. L.**,« Short-pulse heating on metals », Int. J. Heat Mass Transfer,vol. 35, N0 3 (1992),pp. 719–726
- [26] **Yilbas. B.S et al .**, « « Laser short-pulse heating of surfaces »,J. Phys. D: Appl. Phys. ,Vol.32 ,(1999),pp. 1947–1954
- [27] **Paul J. A.**, « solution for non FOURIER dual heat conduction in semi-infinif slab with surface heat flux », Int. J. Heat Mass Transfer,vol. 41, N0 14 (1998),pp. 2253–225
- [28] **Legay. J.M.**, « L'expérience et le modèle, un discours sur la méthode» , INRA Editions, Paris, (1997) , pp.112

[29] Sylvie. D ., « La modélisation : pourquoi l'intégrer dans les systèmes d'information documentaire » , Sciences de l'information, vol. 40, N° 3 (juin 2003) , p. 226-231

[30] Legay. J.M., « L'expérience et le modèle, un discours sur la méthode» , INRA Editions, Paris, (1997) , pp.112

[31] TRANSIENT HEAT CONDUCTION IN SEMI-INFINITE SOLID WITH SPATIALLY DECAYING EXPONENTIAL HEAT GENERATION

Ahmet Z. ~ahin Department of Mechanical Engineering King Fahd University of Petroleum and Minerals Dhahran 31261, Saudi Arabia].

[32] Some analytical solutions of time-dependent, continuously operating heat sources
S. M. Zubair and M. A. Chaudhry, Dhahran, Saudi Arabia

[33] Temperature and heat flux solutions due to steady and non-steady periodic-type surface temperatures in a semi-inf'mite solid

M.A. Chaudhry and S. M. Zubair, Dhahran, Saudi Arabia]

[34] Temperature Profile in Semi-infinite Body With Exponential Source and Convective Boundary Condition, B. F. Blackwell Sandia National Laboratory, Aerothermodynamics Division 1553, Albuquerque, NM 87185

[35] Heat conduction in a semi-infinite solid due to time-dependent laser source

S. M. ZUBAIRt and M. ASLAM CHAUDHRY\$ tMechanical Engineering Department and :~MathematicalS ciences Department, King Fahd University of Petroleum and Minerals, Dhahran 31261, Saudi Arabia

[36] Repetitive laser pulse heating with a convective boundary condition at the surface

B S Yilbas¹ and M Kalyon^{1,2}

¹ ME Department, KFUPM, Dhahran, Saudi Arabia ² AE Department, Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey

[37] laser evaporative heating process: time exponentially decaying pulse case M Kalyon¹ and B S Yilbas AE Department, Istanbul Technical University & ME Department, KFUPM, Dhahran, Saudi Arabia ² ME Department, KFUPM, Dhahran, Saudi Arabia]

[38] Analytical solution for pulsed laser heating process: convective boundary condition case **B.S. Yilbas a,***, **M. Kalyon**, a,b a ME Department, KFUPM, Dhahran, Saudi Arabia b AE Department, Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey

[39] ANALYTICAL SOLUTION FOR TIME UNSTEADY LASER PULSE HEATING OF SEMI-INFINITE SOLID,**B. S. YILBAS** Mechanical Engineering Department, King Fahd University of Petroleum and Minerals, P.O. Box 1913, Dhahran 31261, Saudi Arabia

[40] **Gustavo Gutierrez, Tien-Chen Jen** * le service de construction mécanique, université du Wisconsin, Milwaukee, WI 53211, Etats-Unis a reçu 26 mars 1999; reçu dans l'abrégé sur révisé 3 septembre de forme 1999

[41] Numerical finite element investigation on laser cladding treatment of ring geometries **G. Palumbo*, S. Pinto, L. Tricarico**, Department of Mechanical and Management Engineering, Division of Production Technologies, Politecnico of Bari, Bari, Italy

[42] Modèle thermique instationnaire d'un traitement superficiel par une source Laser mobile, **Jamel Bessrou*, Mahmoud Bouhafs, Ridha Khadrani, Mohamed Jemmali**, Laboratoire de génie mécanique, École nationale d'ingénieurs de Tunis, B.P. 37 Le Belvédère, 1002 Tunis, Tunisie

[43] Three-Dimensional Laser Heating Model and Entropy Generation Consideration, **B. S. Yilbas** King Fahd University of Petroleum and Minerals, Dhahran 31261, Saudi Arabia

[44] Algorithms for the Laplace–Stieltjes Transforms of First Return Times for Stochastic Fluid Flows **Nigel G. Bean·Malgorzata M. O'Reilly· Peter G. Taylor**

[45] **Hassan A. F. et al.** « A general problem of pulse laser heating of a slab, », *Opt. Laser Technol.* 25,155–162 (1993).

[46] **Shen Z.H. and. Zhang S. Y.**, « Laser heating of thin plate with time dependent absorptance », *Microwave Opt. Technol. Lett.* 28, 364–367 (2001).

[47] **El-Adawi M. K. et al** , « Laser heating of a slab having temperature dependent surface absorptance », *Vacuum* 45, 65–70 (1994).

[48] **Kwon H., et al** School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Republic of Korea Agency for Defense Development, Daejeon 305-600, Republic of Korea

[49] Skeel, R. D. and M. Berzins, "A Method for the Spatial Discretization of Parabolic Equations in One Space Variable," *SIAM Jo*

Résumé :

Les lasers ont été largement utilisés pour le traitement des matériaux. De nombreuses applications s'appuyant sur les effets thermiques de l'interaction laser-matériau, il devient très important d'obtenir des informations sur le champ de température en fonction des paramètres de traitement et des propriétés des matériaux. A cet effet, plusieurs modèles ont été proposés, à la fois analytiques et numériques, des solutions adéquates n'ont pas été trouvées 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.

Le modèle numérique qu'on a proposé permet, de résoudre l'équation de la chaleur non linéaire due à l'absorptivité température-dépendante sous un polynôme de l'ordre 3, en régime transitoire dans un domaine unidimensionnel sous l'effet du flux thermique laser imposé.

On a utilisé la commande `pdepe` sous Matlab, qui sert mieux ce genre de problème, en particulier pour la géométrie simple et régulière de la matière traitée.

Des résultats sont relevés et discutés pour deux types de matériaux l'acier et le titane sous l'effet de deux types de laser Nd : YAG et le laser CO₂.

Abstract :

Lasers have been widely used for the treatment of materials. Since many applications rely on the thermal effects of the laser-material interaction, it becomes very important to obtain information on the temperature field according to the processing parameters and properties of the materials. To this end, several models have been proposed, both analytical and numerical, adequate solutions have not been found by experimental measures, which encourages researchers to develop several mathematical models. Moreover, mathematical modeling reduces the experimental cost and predicts the best parametric data and their influences for optimization of the processing operation.

The proposed numerical model allows us to solve the nonlinear heat equation due to temperature-dependent absorptivity under a polynomial of the order 3, in transient state in a one-dimensional domain under the effect of the flux thermal laser imposed.

We used the `pdepe` command under Matlab, which is better used for this kind of problem, especially for the simple and regular geometry of the treated material.

Results are recorded and discussed for two types of steel and titanium materials under the effect of two types of Nd: YAG laser and the CO₂ laser