

**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 :

NOM PRÉNOM : YETTOU AISSA

## Thème

---

**Transfert thermique non linéaire lors de l'interaction laser-matériau :  
analyse et modélisation**

---

Soutenu le 12/10/2020 devant le jury composé de:

Mr. SADAOUI

Président

Mr. N. BOUTALBI

Rapporteur

Mr. H. ALI AGHA

Examineur

ANNÉE UNIVERSITAIRE 2019-2020

**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 : INSTALLATION ÉNERGÉTIQUE ET TURBOMACHINE.

PAR :

NOM PRÉNOM : TOUAZI MOHAND AKLI

## Thème

---

**Transfert thermique non linéaire lors de l'interaction laser-matériau :  
analyse et modélisation**

---

Soutenu le .....2020 devant le jury composé de:

Mr. SADAOUI

Président

Mr. N. BOUTALBI

Rapporteur

Mr. H. ALI AGHA

Examineur

ANNÉE UNIVERSITAIRE 2019-2020

# *Dédicace*

*Je dédie ce travail :*

*A mes chers parents mon père et ma  
mère*

*Pour leur patience, leur amour, leur  
soutien et leur encouragement.*

*A mon chers frère et sœurs.*

*A mon grand-père et à la mémoire de  
ma grand-mère.*

*A toute la famille TOUAZI et tous mes  
amis et camarades.*

*Sans oublier toute la promotion  
2019/2020*

*De génie mécanique*

TOUAZI MOHAND AKLI

# Dédicace

*Je dédie ce travail :*

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

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

*À mes chères sœurs*

*À la mémoire de mon cher petit frère Adem.*

*À tous les membres de ma famille, ma grand-mère mes oncle*

*Et mes tantes.*

*À tout mes amis.*

*Et tous ceux qui m'aiment.*

*YETTOU Aissa*

# Remerciements

*Nous remercions toutes les personnes qui nous ont aidé tous le long de notre travail, particulièrement a notre encadreur Mr BOUTALBI N Pour avoir accepté de nous diriger afin de mener à bien ce mémoire. Pour ces conseils utiles, critiques fructueuses, nous tenons à exprimer ici nos profondes reconnaissances pour lui.*

*Nous tenons aussi à remercier les membres de jury qui ont acceptés de juger ce travail. Sans oublier toutes nos familles et amis (es).*

# Sommaire

<b>Liste des figures</b>	<b>I</b>
<b>Liste de tableaux</b>	<b>II</b>
<b>Introduction général</b>	<b>1</b>
<b>I.1 Généralités sur les lasers</b>	<b>3</b>
<b>1.1 Historique</b>	<b>3</b>
<b>1.2 Généralités sur les lasers</b>	<b>5</b>
<b>1.2.1 Source de terme laser</b>	<b>5</b>
<b>1.2.2 Composantes du laser</b>	<b>5</b>
<b>I.2 Principe de fonctionnement du laser</b>	<b>6</b>
<b>2.1 Principe</b>	<b>6</b>
<b>2.1.1 Phénomènes quantiques</b>	<b>6</b>
<b>2.1.2 L'émission</b>	<b>7</b>
<b>2.1.3 Absorption</b>	<b>8</b>
<b>2.2 Fonctionnement</b>	<b>8</b>
<b>I.3 Types de laser et mode de fonctionnement.</b>	<b>10</b>
<b>3.1 Lasers à gaz</b>	<b>10</b>
<b>3.1.1 Atomes neutres</b>	<b>11</b>
<b>3.1.2 Moléculaires</b>	<b>11</b>
<b>3.1.3 Ionique</b>	<b>12</b>
<b>3.1.4 Excimère</b>	<b>12</b>
<b>3.2 Lasers à solide</b>	<b>10</b>

# Sommaire

<b>3.2.1 YAG</b>	<b>13</b>
<b>3.2.2 Rubis</b>	<b>14</b>
<b>3.2.3 Néodyme</b>	<b>14</b>
<b>3.3 Lasers à semi-conducteurs</b>	<b>14</b>
<b>3.4.1 Chimique</b>	<b>16</b>
<b>3.4.2 Colorant</b>	<b>16</b>
<b>I.4 Les caractéristiques de la lumière laser</b>	<b>17</b>
<b>I.5 Interaction laser-matière</b>	<b>17</b>
<b>5.1 Paramètre de l'interaction</b>	<b>17</b>
<b>5.2 Effet de l'interaction laser-matière</b>	<b>18</b>
<b>5.2.1 Un effet thermique</b>	<b>18</b>
<b>5.2.2 Un effet photochimique</b>	<b>18</b>
<b>5.2.1 Un effet mécanique</b>	<b>18</b>
<b>I.6 Traitement de surface par irradiation laser</b>	<b>19</b>
<b>I.6.1 Place est enjeux du traitement thermique de surface par laser</b>	<b>21</b>
<b>I.6.2 MODIFICATION DE MICROSTRUCTURE SANS APPORT DE MATIERE</b>	<b>22</b>
<b>A. Trempe superficielle</b>	<b>22</b>
<b>B. Fusion superficielle</b>	<b>23</b>
<b>C. Traitement avec vaporisation</b>	<b>24</b>
<b>I.6.3. MODIFICATION DE COMPOSITION PAR APPORT DE MATIERE</b>	<b>24</b>
<b>3.1. Formation d'un revêtement</b>	<b>24</b>
<b>3.2. Formation d'un composite superficiel</b>	<b>26</b>
<b>3.3. Formation d'un alliage superficiel</b>	<b>26</b>
<b>I.6.4 FACTEURS INHERENTS AU PROCEDE</b>	<b>29</b>
<b>4.1 Coefficient d'absorption</b>	<b>29</b>

# Sommaire

<b>4.2 Temps d'interaction</b>	<b>29</b>
<b>4.3 Convection et radiation</b>	<b>29</b>
<b>I.7 Cycle thermique de la trempe superficiel</b>	<b>30</b>
<b>3.3.3 Conditions de trempe au laser</b>	<b>31</b>
<b>a) Vitesse d'avance</b>	<b>31</b>
<b>b) Angle d'incidence</b>	<b>31</b>
<b>c) Gaz environnant</b>	<b>31</b>
<b>I.8 Contrôle de processus de la TTL</b>	<b>32</b>
<b>CONCLUSION</b>	<b>34</b>
<b>II.1 Introduction</b>	<b>35</b>
<b>II.2 MODELISATION ET SIMULATION DE LA TRAMPE LASER</b>	<b>35</b>
<b>2.1 Conditions aux limites spatiales et temporelles</b>	<b>35</b>
<b>a) Conditions initiales</b>	<b>35</b>
<b>b) Conditions aux limites</b>	<b>36</b>
<b>II.3 La modélisation mathématique de tramp laser</b>	<b>37</b>
<b>3. 1 MODELE ANALYTIQUE</b>	<b>38</b>
<b>3.2 MODELISATION NUMERIQUE</b>	<b>39</b>
<b>3.3 Modèles de simulation</b>	<b>39</b>
<b>II.4 Analyse de modèle de A.M DEUS et VILAR</b>	<b>41</b>
<b>4.1 descriptions</b>	<b>41</b>
<b>4.2 hypothèse simplificatrice</b>	<b>42</b>
<b>4.3 Formulation des équations</b>	<b>42</b>
<b>3.1. Équation de base</b>	<b>42</b>
<b>3.2condition aux limites et initiales</b>	<b>42</b>

# Sommaire

<b>3.3 Résultat de modèle</b>	<b>43</b>
<b>II.5 Critique de modèle de deus et Vilar</b>	<b>44</b>
<b>II.6 conclusions</b>	<b>44</b>
<b>III .1 Introduction</b>	<b>45</b>
<b>III.2 Description du modèle</b>	<b>45</b>
<b>2.2 hypothèse simplificatrice</b>	<b>46</b>
<b>2.3 Formulation des équations</b>	<b>46</b>
<b>3.1 Equation de base</b>	<b>46</b>
<b>3.2 Conditions initiales et aux limites</b>	<b>47</b>
<b>2.4 descriptions de la méthode pdepe (Matlab)</b>	<b>47</b>
<b>III .3 Résultats et discussion</b>	<b>50</b>
<b>Conclusion</b>	<b>64</b>
<b>Conclusion général</b>	<b>65</b>

# LISTE DES FIGURES

<b>Figure I .1</b> Composantes du laser.....	6
<b>Figure I .2</b> Le phénomène d'émission stimulée. La désexcitation de l'atome est stimulée par l'arrivée du photon incident Le photon émis vient s'ajouter au champ incident : il y a amplification. ....	7
<b>Figure I .3</b> Le phénomène d'émission spontanée. La désexcitation de l'atome se produit de façon spontanée et s'accompagne de l'émission d'un photon dans une direction aléatoire.....	7
<b>Figure I .4</b> Le phénomène d'absorption. Le photon d'énergie $h\nu$ fait passer l'atome de son état fondamental 1 vers l'état excité 2.....	8
<b>Figure I .5</b> Voici donc un schéma qui illustre le phénomène de transition stimulée.....	10
<b>Figure I .6</b> schéma du LASER, représentant les trois éléments essentiels à son fonctionnement.....	10
<b>Figure I.7</b> Tube de laser HeNe en fonctionnement. La lumière rose n'est pas l'émission laser mais plutôt la lumière émise par fluorescence par l'hélium.....	11
<b>Figure I.8</b> Lumière émise par un laser à argon ionique. (Microsoft Encarta Encyclopédie 2000).....	12
<b>Figure I.9</b> Tiges de milieu actif pour lasers à solide.....	13
<b>Figure I.10</b> Tiges de Nd:YAG pour lasers.....	13
<b>Figure I.11</b> Diagrammes a) des bandes d'énergie d'un semi-conducteur avec la bande de valence presque entièrement remplie (1), la bande interdite (2) et la bande de conduction avec quelques électrons (3) b) des niveaux d'énergie d'un atome seul.....	14
<b>Figure I.12</b> Schéma d'un laser à semi-conducteur.....	15
<b>Figure I.13</b> Un laser à semi-conducteurs. Sa monture a 9 mm de diamètre. Le laser comme tel se trouve dans le trou, au entre.....	16
<b>Figure I.14.</b> Domaine d'application des lasers en fonction de leurs caractéristiques (durée d'impulsion et densité de puissance).....	19
<b>Figure I.15.</b> Régions du spectre électromagnétique.....	20

<b>Figure I.16.</b> Représentation des effets induits lors du nettoyage d'une surface métallique contaminée.....	21
<b>Figure I.17</b> principe de la trempe laser.....	22
<b>Figure I .18 :</b> Fusion superficielle par irradiation laser.....	23
<b>Figure I.19:</b> Formation d'un revêtement de surface avec pré dépôt d'un matériau d'apport.....	25
<b>Figure I.20 :</b> Formation de revêtement de surface avec injection de poudre pulvérulente sous le faisceau laser.....	25
<b>Figure I. 21 :</b> Formation d'un composite superficiel.....	26
<b>Figure I.22:</b> Formation d'un alliage de surface par injection de gaz réactif.....	27
<b>Figure I. 23 :</b> Formation d'un alliage de surface avec injection de poudres additives.....	27
<b>Figure I. 24 :</b> Formation d'un alliage de surface à partir d'un pré dépôt d'éléments d'addition.....	28
<b>Figure I.25 :</b> cycle thermique de la trempe superficielle.....	30
<b>Figure II.1:</b> Exemples de conditions aux limites.....	37
<b>Figure II.2</b> Résultats pour le cuivre.....	43
<b>Figure II.3</b> Résultats pour l'aluminium.....	43
<b>Figure III.1 :</b> Modèles physique et mathématique de la Trempe superficielle au laser.....	45
<b>Figure III-2</b> Polynômes d'absorptivité température dépendante pour l'acier.....	50
<b>Figure III-3</b> Polynômes d'absorptivité température dépendante pour le chrome.....	51
<b>Figure III-4</b> Polynômes d'absorptivité température dépendante pour le Nickel.....	52

<b>Figure III-5</b> Profils de température superficielle en phase d'échauffement en fonction du temps, obtenus à $A = \text{cst}$ et $(T)$ , pour l'acier sous l'effet thermique de laser CO.....	53
<b>Figure III-6</b> Profils de température superficielle en phase d'échauffement en fonction du temps, obtenus à $A = \text{cst}$ et $(T)$ , pour l'acier sous l'effet thermique du laser CO.....	54
<b>Figure III-7</b> Profils de température superficielle en phase d'échauffement en fonction du temps, obtenus à $A = \text{cst}$ et $(T)$ , pour le chrome sous l'effet thermique du laser CO.....	55
<b>Figure III-8</b> Profils de température superficielle en phase d'échauffement en fonction du temps, obtenus à $A = \text{cst}$ et $(T)$ , pour le chrome sous l'effet thermique du laser CO.....	55
<b>Figure III-9</b> Profils de température superficielle en phase d'échauffement en fonction du temps, obtenus à $A = \text{cst}$ et $(T)$ , pour le nickel sous l'effet thermique du laser CO.....	56
<b>Figure III-10</b> Profils de température superficielle en phase d'échauffement en fonction du temps, obtenus à $A = \text{cst}$ et $(T)$ , pour le Nickel sous l'effet thermique du laser CO.....	57
<b>Figure III-11</b> Profils de température superficielle en phase d'échauffement en fonction du temps, obtenus à $A = \text{cst}$ et $(T)$ , pour l'acier sous l'effet thermique du laser CO2.....	58
<b>Figure III-12</b> Profils de température superficielle en phase d'échauffement en fonction du temps, obtenus à $A = \text{cst}$ et $(T)$ , pour l'acier sous l'effet thermique du laser CO2.....	59
<b>Figure III-13</b> Profils de température superficielle en phase d'échauffement en fonction du temps, obtenus à $A = \text{cst}$ et $(T)$ , pour le chrome sous l'effet thermique du laser CO2.....	60
<b>Figure III-14</b> Profils de température superficielle en phase d'échauffement en fonction du temps, obtenus à $A = \text{cst}$ et $(T)$ , pour le chrome sous l'effet thermique du laser CO2.....	60

**Figure III-15** Profils de température superficielle en phase d'échauffement en fonction du temps, obtenus à  $A = \text{cst}$  et  $(T)$ , pour le nickel sous l'effet thermique du laser CO2.....61

**Figure III-16** Profils de température superficielle en phase d'échauffement en fonction du temps, obtenus à  $A = \text{cst}$  et  $(T)$ , pour le Nickel sous l'effet thermique du laser CO2.....62

# LISTE DE TABLEAU

<b>Tableau III-1</b> caractéristiques des matériaux étudiés.....	50
<b>Tableau III-2</b> variation de température pour A constante et A variable pour différentes profondeurs.....	54
<b>Tableau III-3</b> variation de température pour A constante et A variable pour différentes profondeurs.....	56
<b>Tableau III-4</b> variation de température pour A constante et A variable pour différentes profondeurs.....	58
<b>Tableau III-5</b> variation de température pour A constante et A variable pour différentes profondeurs.....	59
<b>Tableau III-6</b> variation de température pour A constante et A variable pour différentes profondeurs.....	61
<b>Tableau III-7</b> variation de température pour A constante et A variable pour différentes profondeurs.....	63
<b>Tableau III .8</b> variation de la température selon le type de laser.....	63

# Introduction générale

Le laser est devenu l'une des bases de la technique moderne, grâce à son importance et à son efficacité de réaliser des produits qui ne s'usent pas, résistent à la corrosion, conservent dans le temps leurs propriétés mécaniques, électriques, optiques ou thermiques... Les contraintes de plus en plus sévères auxquelles sont soumises les pièces mécaniques en service ont fait des traitements de surface des étapes souvent indispensables dans les gammes de fabrication, le traitement de surface est une opération effectuée sur un matériau qui a pour conséquence de modifier son aspect (texture, propriétés électriques ou optiques...) afin d'améliorer les propriétés superficielles du matériau et d'augmenter sa résistance aux sollicitations rencontrées (frottement, érosion, endurance, corrosion...) donc l'adapté à des conditions d'utilisation imposées.

Parmi les nombreuses techniques déjà existantes, le traitement superficiel par laser apparaît comme un procédé dont les spécificités offrent d'intéressantes perspectives comme le traitement localisés, le temps de traitement réduits, déformations faibles, possibilités d'automatisation du procédé.

Autrefois l'entreprise préfère les procédés de trempe conventionnelle (four, flamme, carburation) à cause des coûts élevés et le manque d'expertise et de contrôle de traitement thermique laser, durant ces dernières années grâce aux modèles développés par les chercheurs sur les développements technologiques des sources et des équipements laser ont permis une réduction des coûts d'acquisition, un allongement de la durée de vie des équipements et une amélioration du contrôle du procédé et surtout une augmentation de la qualité des pièces produites. La recherche a amené à une bonne maîtrise de la trempe au laser.

En effet, plusieurs facteurs influencent grandement le niveau d'énergie optique absorbée par la pièce : l'angle d'incidence, la longueur d'onde du laser, l'irradiance, la vitesse d'avance, le type de matériau et le fini de surface. L'impact réunie de ses facteurs prend part à la définition d'un coefficient d'absorption de la puissance optique du laser par la surface. La connaissance précise du coefficient d'absorption est fondamentale pour la réussite de la modélisation du procédé.

Dans notre travail on s'est intéressé à développer un modèle numérique pour résoudre l'équation de la chaleur non linéaire due à l'absorptivité température-dépendante sous

l'équation de BRAMSON en régime transitoire dans un domaine unidimensionnel sous l'effet du flux thermique laser imposé avec la commande pdepe sous Matlab.

## **I.1 Généralités sur les lasers**

### **1.1 Historique**

L'histoire du LASER commence dans les années 1800 avec la modification du concept de la lumière.

- En 1801, Thomas Young remet en question l'interprétation corpusculaire de la lumière. Grâce à sa célèbre expérience des fentes d'Young il met en évidence le comportement ondulatoire de la lumière.

- La théorie ondulatoire de la lumière va ensuite être appuyée par les travaux d'Augustin Fresnel et François Arago. En juillet 1849, Hippolyte Fizeau réalise une mesure la vitesse de la lumière dans l'air en utilisant une roue dentée tournant à vitesse constante. Il trouve une vitesse proche de 315 300 km/s.

- En 1864, James Clerk Maxwell publie la théorie de l'électromagnétisme. Ainsi il montre que la lumière est une perturbation électromagnétique qui se propage dans l'espace. Il trouve une vitesse de 310 740 km/s.

- Le caractère ondulatoire de la lumière semble alors admis lorsque Max Planck, en 1900, cherche à expliquer les phénomènes d'incandescence. Il montre que l'énergie lumineuse ne s'échange pas avec la matière d'une façon continue, mais par paquets d'énergie qu'il appelle quanta. L'énergie est donnée par la formule  $E = hv$  avec  $v$  la fréquence du rayonnement et  $h = 6,62.10^{34}$ , appelée de fait, constante de Planck. En 1905, Albert Einstein décrit l'effet photoélectrique. Il montre que chaque corpuscule de lumière a une énergie déterminée. Cette énergie est égale au produit de la fréquence de la lumière par la constante  $h$ .

- Max Planck va recevoir le prix Nobel de physique en 1918 pour ses travaux sur la théorie des quanta.

- 1917 Albert Einstein jette les bases de la technologie laser lorsqu'il prédit un phénomène « d'émission stimulée », qui forme la base de fonctionnement de tous les lasers.

- 1939 Valentin Fabrikant théorise l'utilisation de l'émission stimulée pour amplifier le rayonnement.

## CHAPITRE 1 : LES LASERS ET LEURS APPLICATIONS AU TRAITEMENT THERMIQUE SUPERFICIEL

---

• 1950 Charles Townes, Nikolay Basov et Alexander Prokhorov développent la théorie quantique d'émission stimulée et démontrent l'émission stimulée des micro-ondes. Le prix Nobel de physique leur est ultérieurement décerné pour ces travaux révolutionnaires.

• 1959 Gordon Gould, diplômé de l'université de Columbia, suggère que l'émission stimulée peut être utilisée pour amplifier la lumière. Il décrit un résonateur optique capable de créer un faisceau étroit de lumière cohérente et l'appelle LASER, acronyme de « Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation » (Amplification de la lumière par émission stimulée de rayonnement).

• 1960 Theodore Maiman construit le premier prototype fonctionnel de laser chez Hughes Research Laboratories à Malibu, Californie. Ce laser utilise du rubis synthétique comme milieu actif et émet un faisceau lumineux d'un rouge profond dont la longueur d'onde est de 694,3 nm. La première application du laser au rubis concernait des télémètres militaires et elle est toujours utilisée commercialement pour percer le diamant en raison de sa haute puissance de crête.

• 1963 Le laser au dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) est mis au point par Kumar Patel chez AT&T Bell Labs. Le laser CO<sub>2</sub> est beaucoup moins onéreux et beaucoup plus efficace que le laser au rubis. Ces facteurs en ont fait le type de laser industriel le plus plébiscité depuis plus de 50 ans. [1].

• 1966 Peter Sorokin construit le premier laser à liquide. [2]

• Les lasers trouvent très tôt des débouchés industriels. La première application fut réalisée en 1965 et consistait à usiner un perçage de 4,7 mm de diamètre et de 2 mm de profondeur dans du diamant avec un laser à rubis. Cette opération était réalisée en 15 min, alors qu'une application classique prenait 24 heures<sup>4</sup>.

• En 1963 des chercheurs américains tels que White et Anderholm montrent qu'il est possible de générer une onde de choc à l'intérieur d'un métal à la suite d'une irradiation laser impulsionnelle. Les pressions exercées sont de l'ordre de 1 GPa, ou 3 FPs.

• En 1967, Peter Holcroft découpe une plaque d'acier inoxydable de 2,5 mm d'épaisseur à une vitesse de 1 m/min, sous dioxygène avec un laser CO<sub>2</sub> de 300 W<sup>5</sup> et conçoit la première tête de découpe.

• Bien que les procédés soient démontrés, il faut attendre leurs associations à des machines adaptées pour qu'ils soient implantés en milieu industriel. Ces conditions sont

# CHAPITRE 1 : LES LASERS ET LEURS APPLICATIONS AU TRAITEMENT THERMIQUE SUPERFICIEL

---

remplies à la fin des années 1970. Et les premières plates-formes industrielles sont implantées en France dès les années 1980<sup>6</sup>. Dès lors le laser s'impose comme un outil de production industrielle dans le micro-usinage. Ses principaux avantages sont un usinage à grande vitesse de l'ordre de 10 m/min, sans contact, sans usure d'outil.

- Le laser devient un moyen de lecture en 1974, avec l'introduction des lecteurs de codes-barres. En 1978, les laser discs sont introduits, mais les disques optiques ne deviennent d'usage courant qu'en 1982 avec le disque compact. Le laser permet alors de lire un grand volume de données.

## 1.2 Généralités sur les lasers.

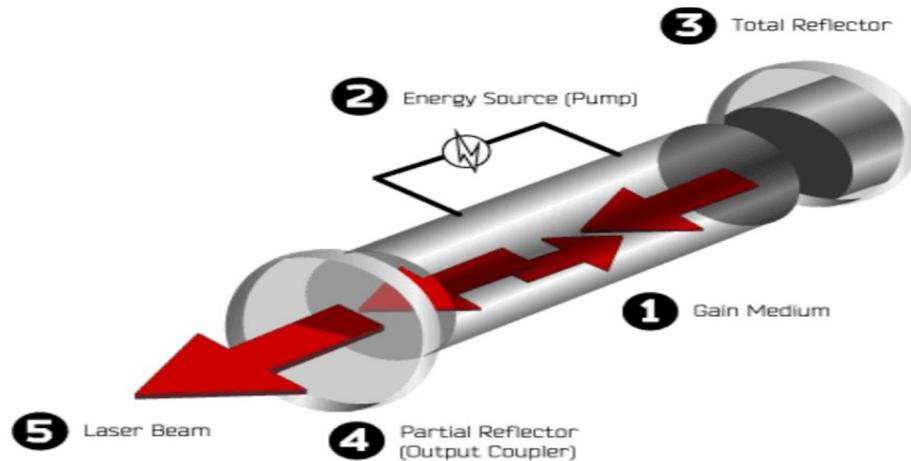
### 1.2.1 Source de terme laser

Issu de l'anglais light amplification by stimulated emission of radiation qui signifie « amplification de la lumière par émission stimulée de radiation ») est un système photonique. Il s'agit d'un appareil qui produit un rayonnement lumineux spatialement et temporellement cohérent reposant sur le processus d'émission stimulée. Descendant du maser, le laser s'est d'abord appelé « maser optique ». [3]

### 1.2.2 Composantes du laser

Le laser se compose d'un milieu de gain (1), d'une source énergisante (2) et d'un résonateur optique (3 et 4) qui offre un feedback optique. Le milieu de gain (1) est un matériau aux propriétés qui permettent le stockage de l'énergie. Cette énergie sera transformée en chaleur ou conduira à l'émission aléatoire de particules optiques, (les photons).

L'effet du laser repose sur émission stimulée qui oblige le milieu de gain (1) à émettre les photons initialement présents dans le médium. L'intégration du milieu de gain (1) entre les deux parties réfléchives (3 et 4) d'une cavité optique favorise l'amplification d'une longueur d'onde donnée. La longueur d'onde laser correspond à la couleur du laser ; les lasers industriels étant toutefois invisibles à l'œil nu. Pour une application industrielle, la longueur d'onde est choisie en fonction d'une interaction adaptée à un matériau donné.[4]



**Figure I .1** Composantes du laser [4]

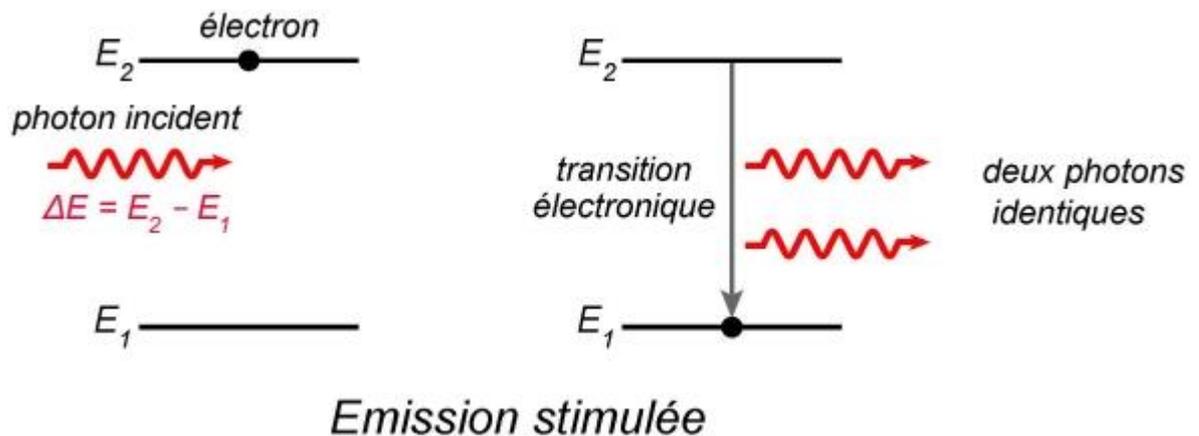
## **I.2 principe de fonctionnement du laser [5]**

### **2.1 Principe :**

Le principe utilisé dans le laser est l'émission stimulée, principe découvert par Einstein en 1917, qu'il appellera la théorie quantique du rayonnement. L'émission stimulée est similaire à deux autres phénomènes qui sont l'émission spontanée et l'absorption. Cette théorie quantique est basée sur la fréquence de bohr, qui est un modèle de l'atome, dans lequel l'atome qui est composé d'un noyau contenant des nucléons (à savoir des protons et des neutrons) et des électrons qui gravitent autour de ce noyau, sur des orbites définies. Ces électrons se trouvent sur ces orbites, auxquelles sont associées des niveaux d'énergie ( $E_1, E_2, E_3 \dots$ ). Également l'électron ne rayonne ou absorbe de l'énergie que lors d'un changement d'orbite. Ce qui nous amène à nous demander, quels sont les trois phénomènes quantiques.

#### **2.1.1 Phénomènes quantiques**

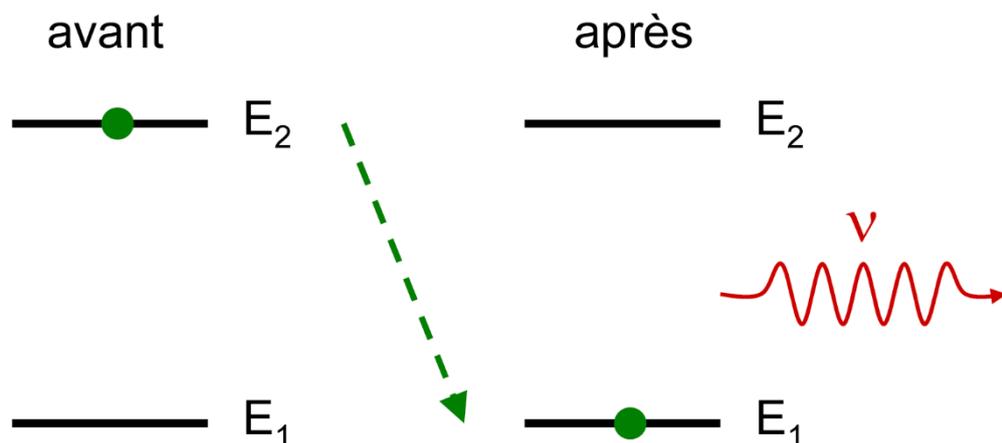
Le premier phénomène, est utilisé dans le LASER. On l'appelle l'émission stimulée. Ce phénomène correspond à un photon déjà excité, qui reçoit un photon. Il est alors « bousculé », il va donc libérer un deuxième photon pour retomber dans un état d'énergie inférieur.



**Figure I .2** Le phénomène d'émission stimulée. La désexcitation de l'atome est stimulée par l'arrivée du photon incident. Le photon émis vient s'ajouter au champ incident : il y a amplification.

### 2.1.2 L'émission

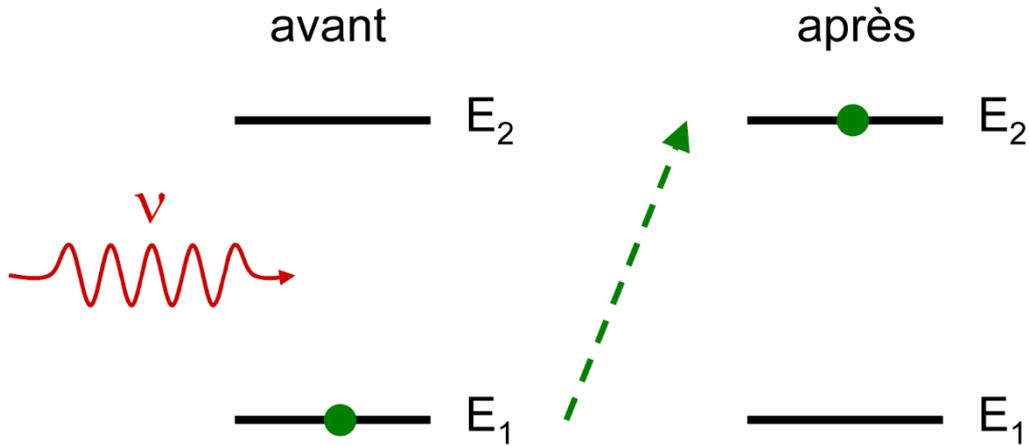
Le deuxième phénomène est l'émission spontanée qui correspond à un électron excité, qui peut perdre un état d'excitation en émettant un photon pour retrouver son état inférieur. Il passe donc d'un état  $n'$  à  $n$ , avec  $n < n'$ . Il est donc moins excité qu'au départ :



**Figure I .3** Le phénomène d'émission spontanée. La désexcitation de l'atome se produit de façon spontanée et s'accompagne de l'émission d'un photon dans une direction aléatoire.

### 2.1.3 Absorption

Enfin l'absorption correspond à un atome qui reçoit de l'énergie, il peut passer d'un état  $n$  à  $n'$ , avec  $n > n'$ . En effet l'électron reçoit un photon, il est donc plus excité et peut passer sur un niveau d'énergie supérieur.



**Figure I .4** Le phénomène d'absorption. Le photon d'énergie  $h\nu$  fait passer l'atome de son état fondamental 1 vers l'état excité 2.

On calcule le niveau d'énergie dans ces trois phénomènes quantiques, grâce à cette équation :

$$|\Delta E| = |\text{Etat final} - \text{Etat initial}|$$

Avec :

$\Delta E$  : énergie du photon.

Etat initial : énergie de la couche où se trouve l'électron avant l'absorption.

Etat final : énergie de la couche où se situe l'électron après l'absorption.

## 2.2 Fonctionnement [5]

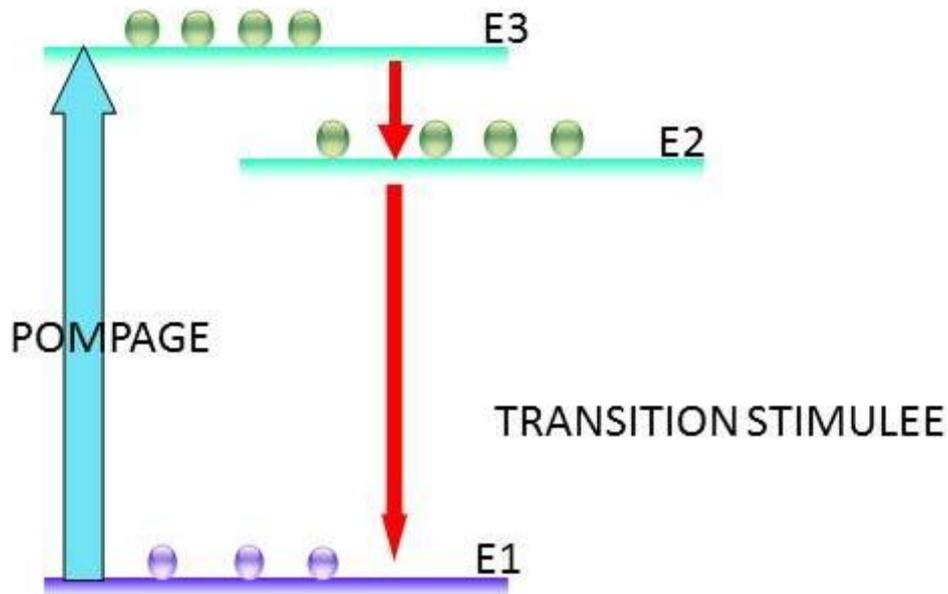
Il faut savoir, qu'un LASER est composé principalement de trois éléments essentiels à son fonctionnement, à savoir un milieu actif, un résonateur optique et enfin une source de pompage.

En effet, les LASERS sont tous composés d'un milieu actif. Il est composé d'atomes, que l'on va exciter ou pomper. C'est un milieu qui peut être solide, liquide ou gazeux :

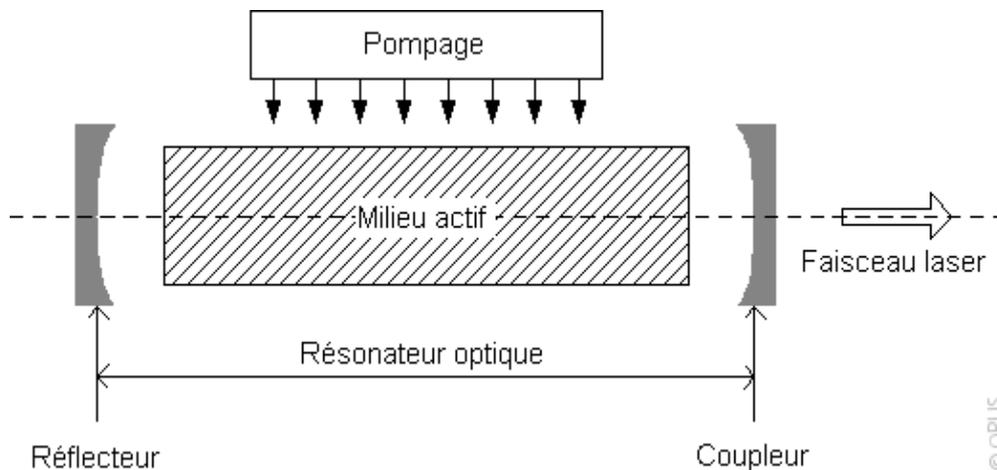
Le LASER est également composé d'un résonateur optique. C'est le dispositif, qui permet à la lumière de passer plusieurs fois dans le milieu actif, afin que les atomes soient de plus en plus excités. Ce système est composé de deux miroirs parallèles, entre lesquels est placé le milieu actif. Il est composé d'un miroir qui réfléchit tous les photons et un miroir qui laisse passer 1 à 10 % des rayons et qui réfléchit le reste. Voici un schéma représentatif du résonateur optique.

Mais le LASER fonctionne également grâce au phénomène d'inversement de population. En effet, afin d'augmenter le nombre d'émissions stimulées et donc d'augmenter la puissance de l'actif. Une source excitante va permettre d'élever ces électrons à un niveau d'énergie supérieur. On appelle donc ce phénomène l'inversement de population, qui sera réalisable grâce à la zone de pompage qui permet d'envoyer de l'énergie dans le milieu actif. Cette énergie peut être de source électrique ou lumineuse.

L'apport en énergie de cette zone de pompage va permettre aux électrons de passer de la couche E1 à la couche supérieur E3. Les électrons vont alors se désexciter vers le niveau E2 en émettant un photon d'énergie égale à la différence d'énergie entre les deux couches. Ce photon va permettre la désexcitation stimulée d'autres atomes et de créer d'autres photons. Or grâce au résonateur optique, les photons vont pouvoir donner lieu à un nombre important d'émissions stimulées. Ainsi, la fraction de lumière qui va s'échapper du milieu actif va ainsi former le rayon LASER.



**Figure I .5** Voici donc un schéma qui illustre le phénomène de transition stimulée.



**Figure I .6** schéma du LASER, représentant les trois éléments essentiels à son fonctionnement.

### **I.3 Types de laser et mode de fonctionnement. [6]**

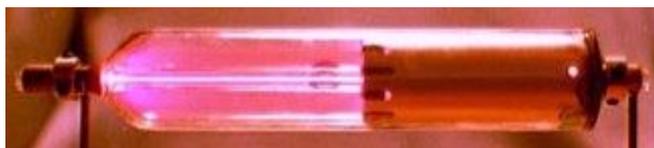
#### **3.1 Lasers à gaz**

Comme son nom l'indique, le milieu actif de ce type de laser est un gaz, pur ou en mélange. Le milieu est habituellement excité par une décharge électrique, mais le

Le pompage peut aussi être optique. Les lasers de ce type sont d'une efficacité moyenne, d'une directivité du faisceau exceptionnelle et d'une puissance variable.

### 3.1.1 Atomes neutres

Dans ce type de laser, le milieu actif est exclusivement constitué d'atomes neutres à l'état gazeux. Le meilleur exemple en est le laser hélium-néon (HeNe), connu pour la pureté de sa longueur d'onde d'émission et la directivité du faisceau obtenu. Il a été le premier laser à gaz construit. Il possède une petite puissance de sortie et est peu coûteux à produire. C'est pour ces raisons qu'il est utilisé pour le positionnement du patient pour des radiographies, pour la lecture des codes-barres ou pour des expériences en optique. Dans ce laser, l'hélium est excité par la décharge électrique. Ces atomes vont ensuite exciter les atomes de néon par collision. Finalement, le néon émet de la lumière. Le laser HeNe est particulièrement utilisé pour son émission dans le rouge, à 632,8 nm, bien qu'il émette à quelques autres longueurs d'onde.



**Figure I.7** Tube de laser HeNe en fonctionnement. La lumière rose n'est pas l'émission laser mais plutôt la lumière émise par fluorescence par l'hélium.

### 3.1.2 Moléculaires

Le laser à gaz moléculaire le plus connu est certainement le laser à dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ). Il est surtout reconnu pour sa forte puissance (1 W à 1 kW). Cette caractéristique exceptionnelle lui permet de sectionner un tissu organique et d'empêcher le saignement au cours de la découpe. La cicatrisation se fait alors dans de bonnes conditions suivant le processus naturel. Le milieu actif de ce laser est le plus souvent constitué d'un mélange d'hélium, d'azote et de dioxyde de carbone, mais c'est le  $\text{CO}_2$  qui produit le rayonnement laser. Il émet à de nombreuses longueurs d'onde dans l'infrarouge mais est surtout utilisé à 9,4 et à 10,4  $\mu\text{m}$ . D'autres gaz moléculaires sont utilisés couramment dans la fabrication de laser :  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$  et  $\text{N}_2\text{O}$ .

## 3.1.3 Ionique

Le milieu actif est dans ce cas-ci composé d'ions sous forme gazeuse. Le mieux connu d'entre eux est le laser à argon ionique ( $\text{Ar}^+$ ). Il peut émettre à une vingtaine de longueurs d'onde, allant du vert à l'ultraviolet, avec des puissances variant de 100 mW à 10 W. Les longueurs d'onde de faible puissance sont souvent utilisées dans des spectacles sons et lumière.



**Figure I.8** Lumière émise par un laser à argon ionique. (Microsoft Encarta Encyclopedia 2000)

## 3.1.4 Excimère

Le milieu actif d'un laser excimer est un gaz de molécules diatomiques excitées, comme le  $\text{Xe}_2$ , le  $\text{Kr}_2$  et le  $\text{Ar}_2$ . Ce type de laser a été développé pour sa grande puissance (10 à 100 MW) d'émission dans l'ultraviolet. Le laser excimer a de plus une grande efficacité (1,5 à 2 %) et produit de petites impulsions qui permettent de faire l'ablation des surfaces de tissus ou des incisions. C'est pourquoi il est utilisé pour les chirurgies de la cornée.

## 3.2 Lasers à solide

Les lasers à solide utilisent des verres ou des cristaux comme milieu actif. Le milieu actif se présente sous forme de tige dont les extrémités sont parfaitement parallèles et ont été recouvertes d'un matériau réfléchissant. De tous les lasers, ce sont ceux qui fournissent la plus grande puissance utile et sont généralement utilisés dans un mode à impulsions.

## CHAPITRE 1 : LES LASERS ET LEURS APPLICATIONS AU TRAITEMENT THERMIQUE SUPERFICIEL

---

Les lasers à solide fonctionnent généralement grâce à un pompage optique, que ce soit par la lumière émise par une lampe à décharge ou par un autre laser. Les lasers à solide couvrent une grande partie du spectre électromagnétique, de l'infrarouge à l'ultraviolet. Un désavantage des lasers à solide est que le milieu actif s'endommage si sa température devient trop élevée. Les défauts qui sont ainsi créés nuisent à la qualité du faisceau laser. C'est d'ailleurs pour cette raison que les lasers à solide fonctionnent généralement en mode à impulsions, ce qui permet de ménager le matériau.



**Figure I.9** Tiges de milieu actif pour lasers à solide. [6]

### 3.2.1 YAG

YAG est l'acronyme de Yttrium Aluminium Garnet et désigne le composé solide  $Y_3Al_5O_{12}$ . La lumière, dans ce type de laser, est émise par des impuretés (on dit alors que le cristal est dopé) de néodyme ( $Nd^{3+}$ ). Les lasers de ce type produisent du rayonnement infrarouge dont la puissance varie généralement de 10 à 100 W. Ils sont entre autres utilisés pour façonner des diamants et autres pierres précieuses et pour découper des métaux. Il existe aussi des lasers YAG dopés à l'erbium ( $Er^{3+}$ ), qui sont particulièrement utilisés en chirurgie plastique pour « effacer » des imperfections de la peau.



**Figure I.10** Tiges de Nd:YAG pour lasers.

### 3.2.2 Rubis

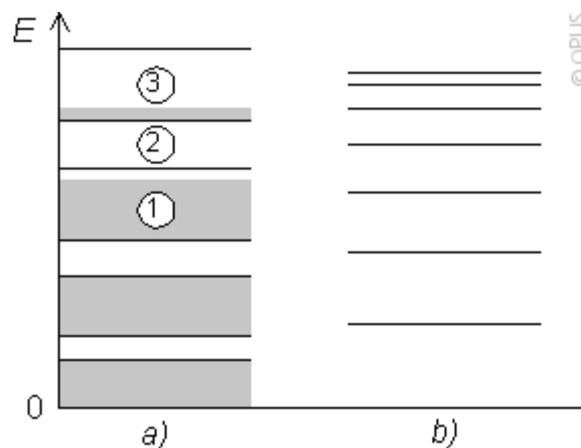
Le premier laser fonctionnel était un laser à rubis. Le rubis est un cristal d'oxyde d'aluminium ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) contenant des impuretés de chrome ( $\text{Cr}^{3+}$ ). Ce sont ces ions qui donnent au rubis sa couleur rouge et qui lui permettent d'émettre du rayonnement laser lorsqu'ils sont excités par la lumière émise par une lampe au xénon. Le laser à rubis émet à une longueur d'onde de 694 nm et est utilisé pour l'épilation au laser.

### 3.2.3 Néodyme

Le milieu actif pour ce type de laser est une petite plaquette (moins de 1 mm d'épaisseur) de composés contenant du néodyme, comme le NPP ( $\text{NdP}_5\text{O}_{14}$ ) et le LNP ( $\text{LiNdP}_4\text{O}_{12}$ ), qui est excitée par un laser à argon.

### 3.3 Lasers à semi-conducteurs

Le mode d'émission du rayonnement laser dans un matériau semi-conducteur est très différent de celui décrit précédemment. Dans un cristal, les énergies permises pour les électrons sont sous forme de bandes, plutôt que sous forme de niveaux discrets bien séparés les uns des autres, comme c'est le cas pour des atomes seuls. Cela est dû à la superposition des niveaux énergétiques de chacun des atomes constituant le cristal. Pour un semi-conducteur, les deux dernières bandes sont celles qui joueront un rôle dans l'émission laser. Ce sont les bandes de valence et de conduction, qui sont séparées par une zone d'énergie interdite. À température normale, une petite portion des électrons de la bande de valence a assez d'énergie pour passer à la bande de conduction, ce qui permet à un courant électrique de circuler dans le matériau.



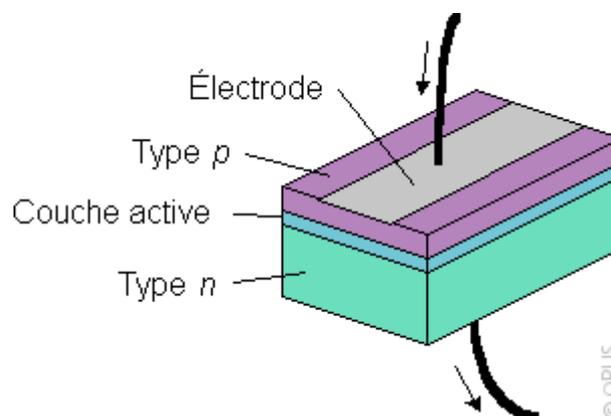
**Figure I.11** Diagrammes a) des bandes d'énergie d'un semi-conducteur avec la bande de

## CHAPITRE 1 : LES LASERS ET LEURS APPLICATIONS AU TRAITEMENT THERMIQUE SUPERFICIEL

valence presque entièrement remplie (1), la bande interdite (2) et la bande de conduction avec quelques électrons (3); b) des niveaux d'énergie d'un atome seul.

Les semi-conducteurs purs, comme le silicium ou le germanium, sont de peu d'intérêt pour la fabrication des lasers. En effet, on utilise plutôt des semi-conducteurs dopés, contenant des impuretés, comme l'arséniure de gallium (GaAs) dopé à l'aluminium. On peut alors fabriquer des semi-conducteurs de type n, qui ont un excès d'électrons de conduction et d'autres de type p, qui ont plutôt une déficience en électrons de conduction. Souvent, on considère que les semi-conducteurs de type p ont un surplus de « trous », qui se comportent comme des charges positives. Ces deux types de semi-conducteurs sont le plus souvent juxtaposés, pour former ce qu'on appelle une jonction p-n. Cette jonction est au cœur du fonctionnement d'un grand nombre de pièces électroniques comme les transistors.

Lorsqu'un potentiel positif est appliqué au semi-conducteur de type p et un potentiel négatif au type n, un grand courant peut traverser la jonction. Des électrons sont injectés dans le semi-conducteur de type p et des trous dans celui de type n. Il peut alors y avoir des recombinaisons trou-électron, qui se font avec l'émission de lumière. Lorsque le courant traversant la jonction p-n est faible, l'émission est peu directionnelle et n'est pas monochromatique. C'est de cette manière que fonctionnent les diodes électroluminescentes (aussi appelées LEDs), ces petites sources lumineuses que l'on retrouve sur bon nombre d'appareils électriques. Cependant, au-dessus d'un certain courant de seuil, la lumière devient plus intense, plus directionnelle et monochromatique. La jonction p-n, qui joue alors le rôle de milieu actif, produit un faisceau laser.



**Figure I.12** Schéma d'un laser à semi-conducteur.

## CHAPITRE 1 : LES LASERS ET LEURS APPLICATIONS AU TRAITEMENT THERMIQUE SUPERFICIEL

---

Les lasers à semi-conducteurs sont particulièrement compacts. Ils sont typiquement d'une longueur de 100 à 500  $\mu\text{m}$  et la couche active a une épaisseur entre 0,1 et 2  $\mu\text{m}$ . Ils possèdent également une efficacité très appréciable d'environ 50 %. Le faisceau résultant d'un tel laser est cependant peu directionnel, ayant une divergence de  $5^\circ$  à  $30^\circ$ , parce qu'il est émis par une petite surface de moins de 20  $\mu\text{m}$  de côté. Il est aussi peu puissant : entre 1 et 100 mW. Les lasers à semi-conducteurs sont notamment utilisés pour les imprimantes laser, les lecteurs de disques compacts et comme source lumineuse pour la fibre optique, principalement à cause de leur petite taille. Ce sont aussi eux que l'on retrouve dans les fameux pointeurs laser.



**Figure I.13** Un laser à semi-conducteurs. Sa monture a 9 mm de diamètre. Le laser comme tel se trouve dans le trou, au centre.

D'autres types de laser que ceux énumérés ci-dessus existent. En voici quelques-uns :

### 3.4.1 Chimique

Une réaction chimique produit des molécules excitées qui émettent une lumière laser en se désexcitant.

### 3.4.2 Colorant

Un colorant organique est pompé optiquement pour produire un rayonnement laser. Ce type de laser est peu pratique parce que le milieu actif est sous forme de liquide. Par contre, il peut produire un rayonnement puissant en mode à impulsions. Le spectre d'émission par fluorescence des colorants organiques étant large, il est possible de « syntoniser » le laser pour obtenir la longueur d'onde voulue.

## **I.4 Les caractéristiques de la lumière laser**

Le laser est une source lumineuse possédant des propriétés particulières :

C'est une lumière monochromatique : elle est constituée de rayonnements ayant tous la même longueur d'onde. Cette dernière, donc la couleur du faisceau lumineux dépend du milieu laser utiliser et des caractéristiques du pompage optique.

C'est une lumière directive : le faisceau obtenu possède un angle d'ouverture très faible (rectiligne) et se propage dans une seule direction.

C'est une lumière cohérente : le faisceau est constitué de photons dont les caractéristiques sont les mêmes. En particulier, les ondes lumineuses qui leurs sont associées sont en phases.

La lumière laser peut propager une importante puissance.

Ces caractéristiques opposent la lumière laser à celles des sources lumineuses classiques reposant sur des émissions spontanées qui se font dans toutes les directions, à des phases différentes et avec une puissance nettement inférieure.

## **I.5 Interaction laser-matière [7]**

L'étude de l'interaction laser-matière date de 1960 dès la création du premier laser. La base des phénomènes mis en jeu est l'interaction de l'onde électromagnétique du laser avec la matière. Selon que l'irradiation sera effectuée sur un matériau isolant ou semi-conducteur, La réponse du matériau à l'irradiation et les phénomènes physiques engendrés sera différente.

L'Energie électromagnétique transmise à la matière est convertie en chaleur laquelle engendre des changements d'état et des transformations métallurgiques dans le matériau irradié.[8]

### **5.1 Paramètre de l'interaction**

Les paramètres régissant l'interaction laser-matériau sont nombreux et les effets produits dépend des paramètres lie au :

- Faisceau laser : longueur d'onde, densité de puissance délivrée, angle d'incidence, vitesse de balayage du faisceau, durée d'impulsion

- Matériau : la nature de matériau (métal, semi-conducteur, diélectrique), phase (solide, liquide ou gazeuse), propriétés physiques (optiques, thermique), état de surface (nature chimique, rugosité).

- L'environnement : présence ou non d'un gaz environnant, valeur de la pression de ce gaz. [9]

## **5.2 Effet de l'interaction laser-matière : [8] [9]**

Les effets produits par l'interaction entre énergie laser et une matière dépendent fortement de la longueur d'ondes et de la puissance du laser et des caractéristiques d'absorption et de la composition chimique de la matière, elle induit trois effets :

**5.2.1 Un effet thermique** : c'est la propagation de la chaleur dans le matériau conduisant au chauffage, à la fusion ou à la vaporisation du matériau selon la densité de puissance pour des temps d'interaction variant de la microseconde à la seconde. Ces effets thermiques sont utilisés pour les traitements de surface réalisés en phase solide ou liquide (durcissement, formation d'alliage), la découpe, le soudage, le perçage. Dans le cas où l'énergie est très localisée en surface et imposée en un temps très court, on peut avoir la liquéfaction et vaporisation quasi instantanée du matériau induisant les phénomènes d'ablation et la formation d'un plasma sur la cible. Les effets thermiques sur le matériau sont alors faibles car l'énergie est principalement stockée dans les particules enlevées. Ces effets sont utilisés pour le nettoyage et le décapage de surface.

**5.2.2 Un effet photochimique** : Provoquant des perturbations des liaisons interatomiques pouvant altérer les propriétés chimiques du solide, du gaz ou l'interface solide - gaz. Dans le cas où l'énergie des photons est de l'ordre de l'énergie de liaison du solide, le traitement pourra induire des ruptures de liaison en surface.

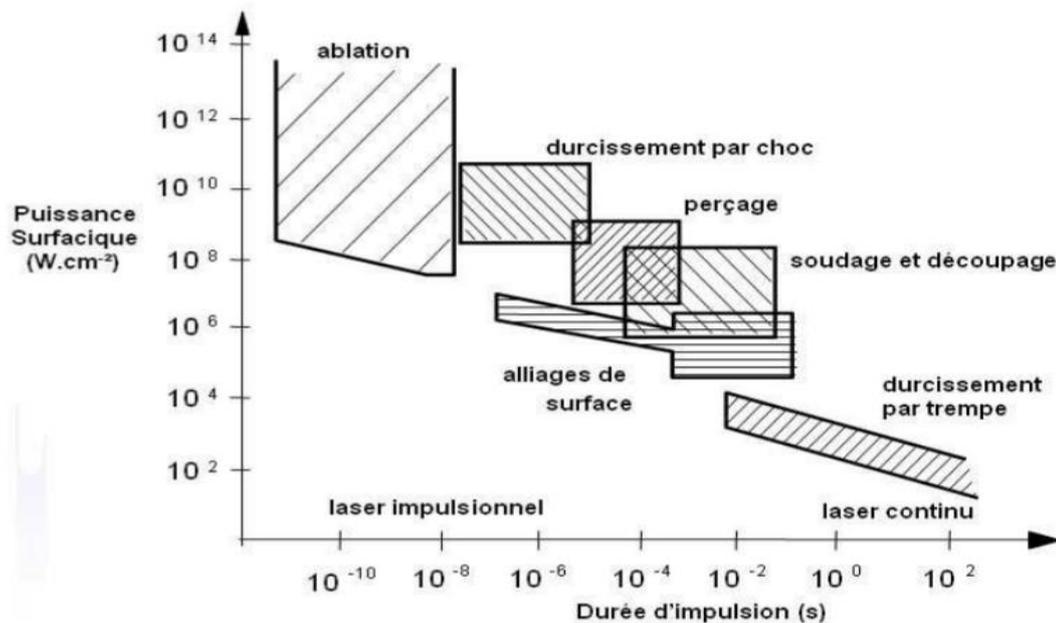
**5.2.1 Un effet mécanique** : c'est la formation d'un plasma c'est-à-dire d'un gaz fortement ionisé induit par la focalisation d'un grand nombre de photons sur une petite surface pendant un temps bref (de l'ordre de quelques nano ou pico secondes). Le plasma restitue l'énergie sous la forme d'une onde de choc. La formation de cette onde de choc correspond au claquage optique.

## I.6 Traitement de surface par irradiation laser

A partir des années 80, la technologie des lasers adaptée au traitement des matériaux a vu le jour. Leur utilisation varie suivant les différents domaines d'applications tels que les traitements thermiques, le perçage, la découpe, l'usinage, le soudage et le décapage...

Différents types d'interactions peuvent être attendus lors de l'irradiation laser sur une surface métallique. On peut trouver l'effet thermique dû à une élévation de la température et par ce fait entraînant un écaillage et/ou la fusion de la matière. Sinon l'effet athermique (photonique) qui est engendré par la création d'un plasma conduisant à l'ablation de la matière sans modification structurale de la surface.

Afin d'utiliser le bon laser, il faut identifier quel type d'état de surface final est nécessaire, quelle densité d'énergie ou longueur d'onde sont nécessaires. Pour cela, la figure I.14 présente les divers procédés qui existent en fonction des différents paramètres [.

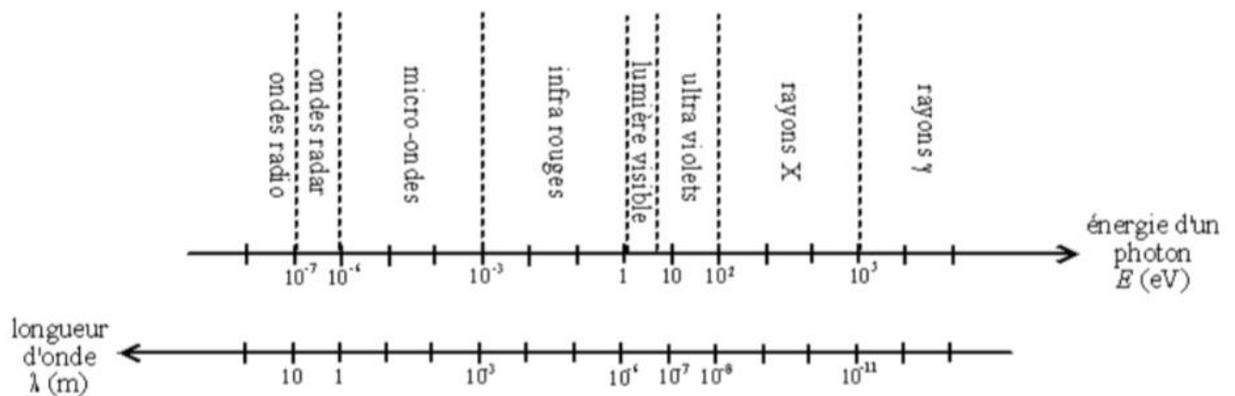


**Figure I.14.** Domaine d'application des lasers en fonction de leurs caractéristiques (durée d'impulsion et densité de puissance)

## CHAPITRE 1 : LES LASERS ET LEURS APPLICATIONS AU TRAITEMENT THERMIQUE SUPERFICIEL

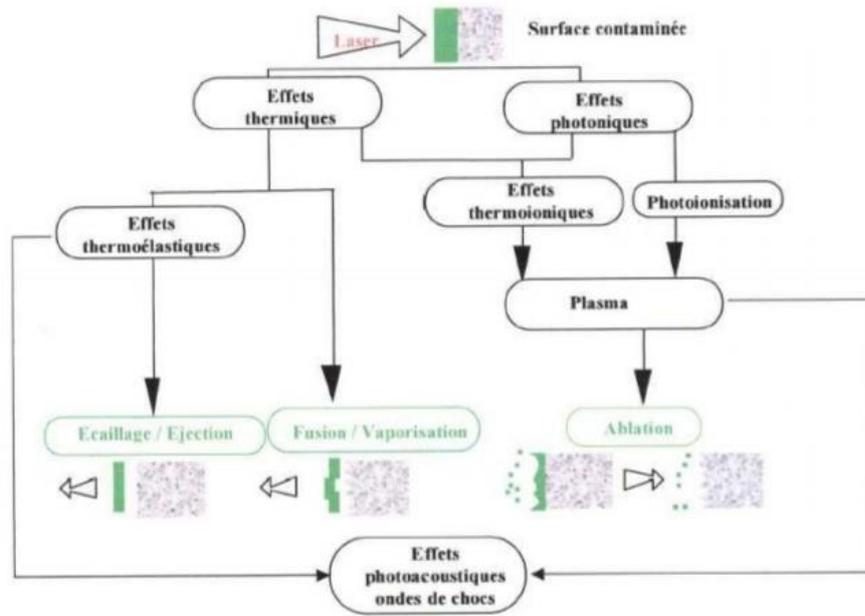
On dénombre tout d'abord :

La longueur d'onde : elle peut s'étendre des rayonnements de très faible énergie (ondes radio) à ceux de très forte énergie (haute fréquence) (rayons gamma) en passant par les micro-ondes, l'infrarouge, le visible, l'ultraviolet et les rayons X (Figure 1.15). Dans le cas des lasers les plus intéressants pour notre étude on distingue les lasers CO<sub>2</sub> ( $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$ ) et les lasers Nd-YAG ( $\lambda = 1,06 \mu\text{m}$ ) dont les énergies photoniques sont respectivement de 0,117 et 1,17 eV.



**Figure I.15.** Régions du spectre électromagnétique

Le type d'impulsion continue ou pulsée ainsi que la durée de l'impulsion sont aussi des paramètres très décisifs dans le comportement final lié au type d'interaction souhaitée. La figure I.16 présente les différents effets et interactions pouvant être provoqués lors d'une irradiation laser sur une surface métallique.



**Figure I.16.** Représentation des effets induits lors du nettoyage d’une surface métallique contaminée

L’effet thermique : dans ce cas un échauffement de la matière est produit. Si les températures de fusion et la limite d’élasticité ne sont pas atteintes, l’effet est thermoélastique. Dans le cas contraire, où la température de fusion est atteinte, la matière est alors fondue, voire si les températures atteintes sont vraiment très élevées, vaporisée ;

L’effet athermique (photonique) : dans ce cas, la quantité d’énergie apportée est plus importante provoquant un effet photonique jouant sur la formation de particules chargées et la formation d’un plasma. L’ablation de la matière n’engendre pas de modification structurale de la surface mais un effet chimique dû aux collisions d’atomes et à la photo ionisation de la surface se produit.

### **I.6.1 Place est enjeux du traitement thermique de surface par laser : [10]**

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 , 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 . Une étude récente, menée aux États - Unis, en Europe et au Japon sur les développements

## CHAPITRE 1 : LES LASERS ET LEURS APPLICATIONS AU TRAITEMENT THERMIQUE SUPERFICIEL

prioritaires dans le domaine des matériaux, classe en tête de liste la technologie des traitements superficiels. Les enjeux techniques concernent :

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

### I.6.2 MODIFICATION DE MICROSTRUCTURE SANS APPORT DE MATIERE [11]

Elle peut résulter, soit d'une transformation structurale à l'état solide, par suite d'un effet de trempe superficielle, soit d'une fusion superficielle, suivie d'une resolidifications rapide du matériau irradié.

#### A. Trempe superficielle

L'irradiation d'un laser de puissance en vue d'un durcissement par transformation structurale, sans atteindre la fusion, a pour objet d'obtenir une couche superficielle de dureté élevée tout en conservant au cœur de la pièce une bonne ténacité. La trempe superficielle d'aciers martensitiques faiblement ou non alliés vise à améliorer leurs propriétés mécaniques de surface, ainsi que leur comportement tribologique (dureté, résistance à l'usure). Les vitesses

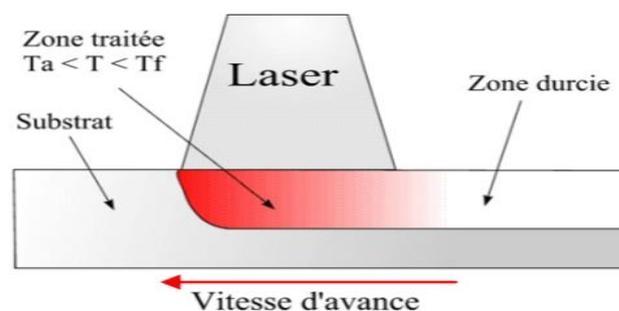


Figure 1 : Principe de la trempe laser

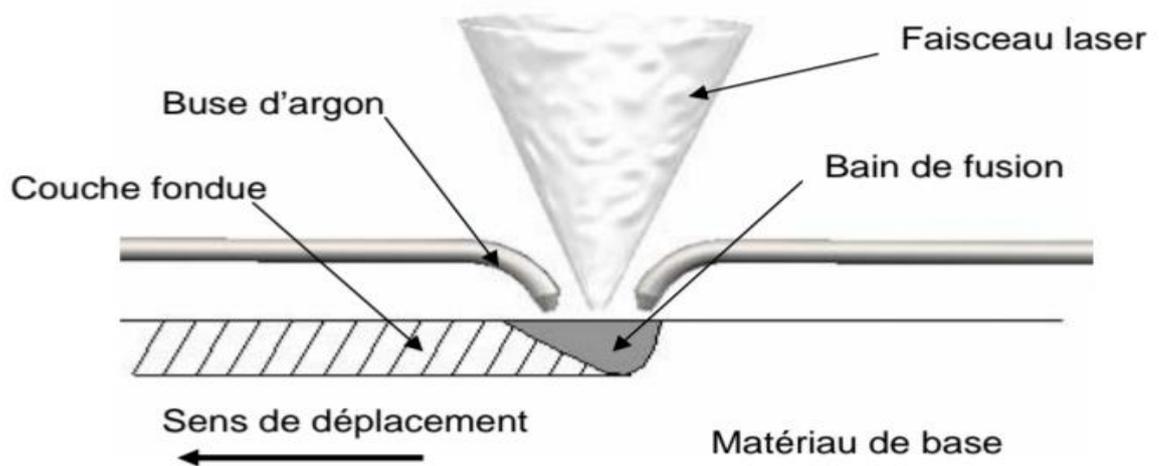
Figure I.17 principe de la trempe laser

De refroidissement élevées (plusieurs centaines de degrés par seconde) ont été atteintes et assurent un phénomène d'auto trempe de la zone superficielle par la masse du substrat restée froide. Ceci est efficace pour les aciers qui ont une concentration en carbone suffisante pour promouvoir une transformation martensitique, pour les fontes afin de former une structure perlitique. Cette structure dépend de la vitesse de refroidissement et du diagramme

de phases mais généralement, pour ce système, la dureté est augmentée et la résistance à l'usure est améliorée. Cette technique est très utilisée sur des surfaces métalliques pour lesquelles les propriétés métallurgiques et mécaniques peuvent être améliorées, notamment la résistance à l'usure et la tenue à la fatigue sous sollicitations cycliques. Cela confère à des matériaux métalliques un intérêt commercial dans l'emploi des lasers pour le durcissement par transformation structurale. Le premier champ d'application concerne la construction automobile. En 1975, General Motors utilisa la trempe par irradiation laser pour durcir certains éléments fonte de boîte de direction, Fiat pour les traitements des blocs à cylindres et Nissan pour les traitements des éléments de transmission, afin d'améliorer la résistance à l'usure, obtenir un meilleur refroidissement des cylindres et, en conséquence, développer les moteurs plus compacts.

### **B. Fusion superficielle**

Un traitement thermique avec fusion superficielle est un procédé visant à améliorer les propriétés de surface (propriétés mécaniques, tenue à la corrosion...) par une modification de la structure cristalline du matériau sans changement chimique. Un gaz inerte, l'argon le plus souvent, est insufflé sur le bain de fusion, de manière à assurer une couverture empêchant l'oxydation au contact de l'air (Figure I. 22).



**Figure I .18** : Fusion superficielle par irradiation laser

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.

### **C. Traitement avec vaporisation**

On utilise dans ce cas des lasers pulsés (CO<sub>2</sub>, Nd-YAG, excimère), qui délivrent une densité de puissance instantanée très élevée (de 10<sup>6</sup> à 10<sup>11</sup> W.cm<sup>-2</sup>) pendant des impulsions de courte durée (10<sup>-8</sup> à 10<sup>-6</sup> seconde). Ces impulsions répétées entraînent une vaporisation rapide de la surface. Les vapeurs métalliques s'ionisent entraînant la formation d'un plasma dont la durée de vie est de quelques millisecondes. Aux effets thermiques, sont associés des effets mécaniques par les ondes de choc générées par l'expansion du plasma, lesquelles interagissent avec la surface, ou des effets explosifs dus à une absorption d'énergie très importante sur un temps très bref. Les applications concernent le nettoyage (élimination de graisses ou de salissures diverses) ou le décapage des surfaces (peinture revêtement, oxyde...) ainsi que la modification d'états de surfaces (texture des surfaces, marquage dans les industries de la microélectronique, de l'automobile) sans modification des propriétés du matériau en profondeur.

### **I.6.3. MODIFICATION DE COMPOSITION PAR APPORT DE MATIERE [11]**

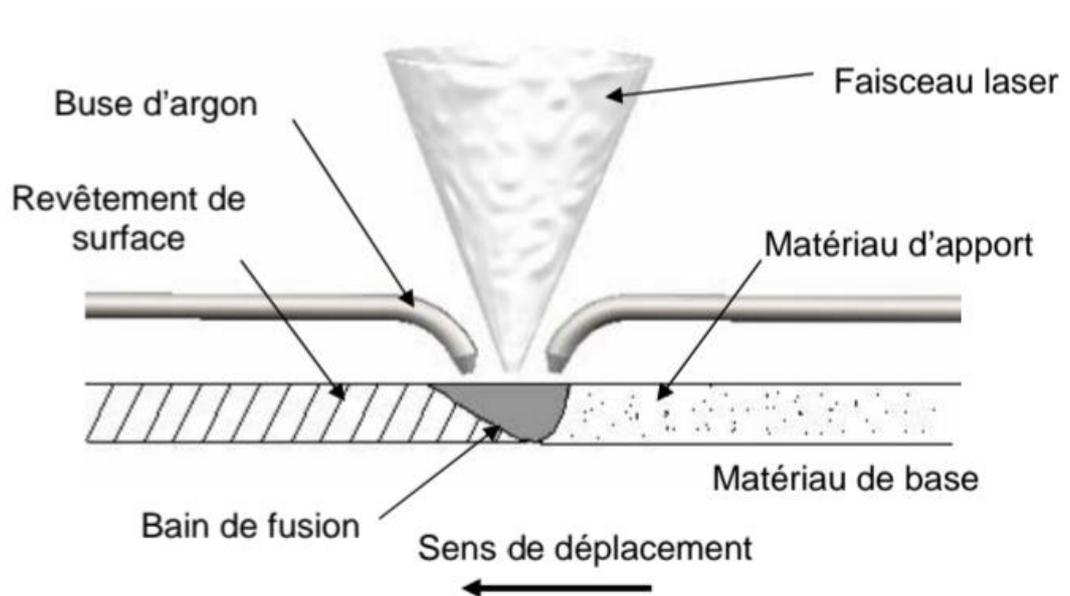
La fusion superficielle par irradiation laser avec apport de matière est un traitement visant à améliorer les propriétés de surface du matériau par une modification chimique. Pour cela, avant ou en cours de traitement, d'autres matériaux ou éléments d'apport sont ajoutés soit à l'état gazeux en atmosphère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

#### **3.1. Formation d'un revêtement**

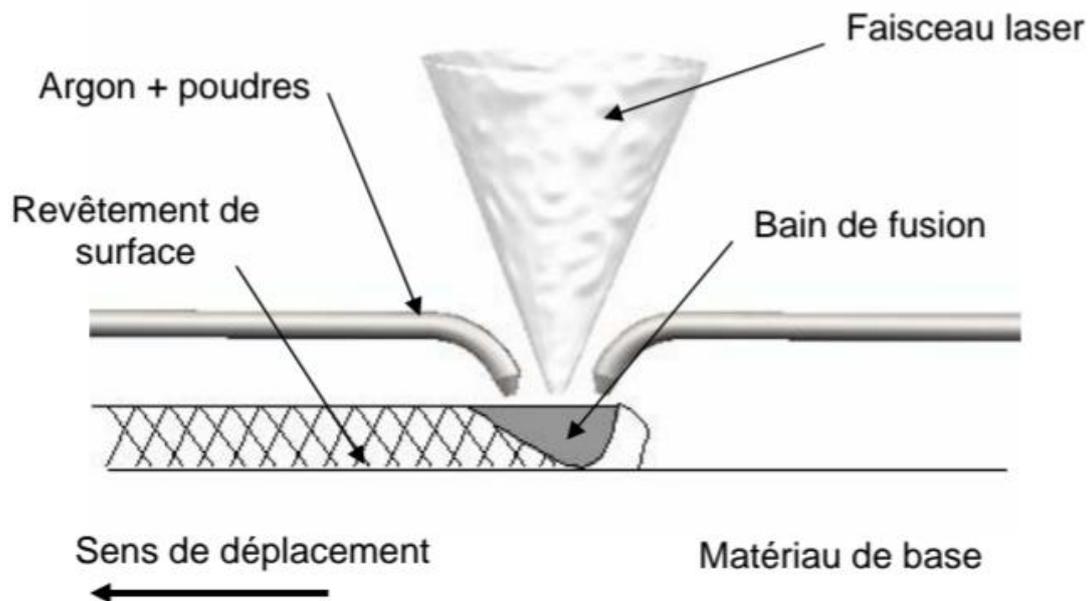
L'irradiation avec fusion du matériau d'apport est un procédé au cours duquel est incorporé au substrat superficiellement fondu, un matériau extérieur, afin d'améliorer les propriétés de surface du substrat initial (résistance à l'usure, à l'oxydation ou à la corrosion). Dans le cas de l'élaboration d'un revêtement par fusion laser, le matériau ou les matériaux d'apport doivent passer par l'état liquide tout en évitant la fusion du substrat sur une épaisseur trop importante afin de réduire le plus possible la dissolution du matériau du substrat dans le bain de fusion et d'altérer le moins possible le revêtement. Le matériau d'apport est déposé au préalable sur le matériau à revêtir (Figure I. 23) ou bien il est injecté à l'état de poudre (Figure

## CHAPITRE 1 : LES LASERS ET LEURS APPLICATIONS AU TRAITEMENT THERMIQUE SUPERFICIEL

I.24) dans le bain de fusion. Utilisé en production depuis 1981 dans l'aéronautique en Grande Bretagne, ce procédé a été introduit plus récemment par les Japonais dans l'industrie de grande série pour le stellite de soupapes ou le revêtement des sièges de soupapes directement sur bloc moteur.



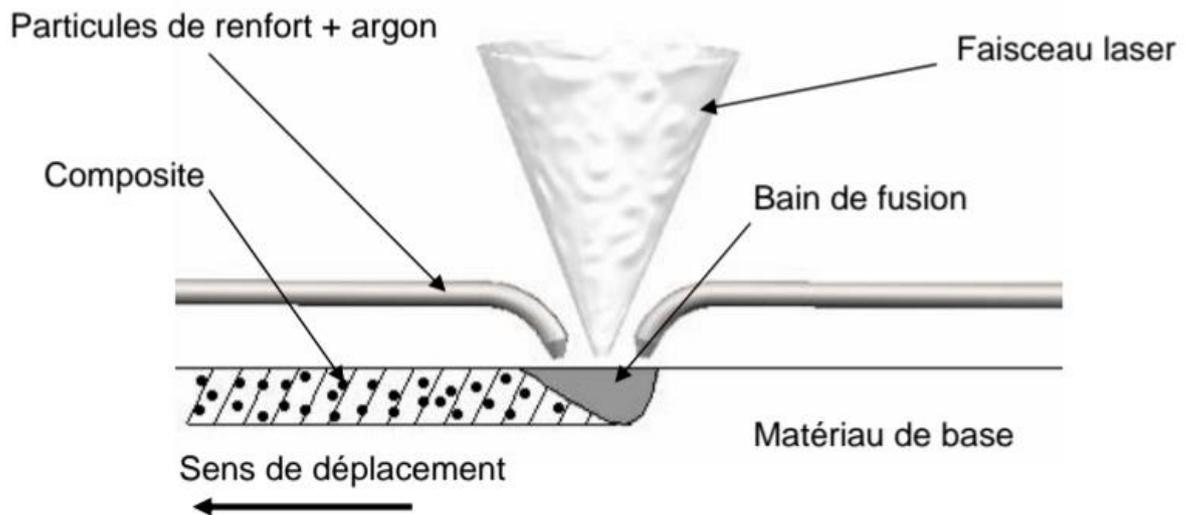
**Figure I.19** : Formation d'un revêtement de surface avec pré dépôt d'un matériau d'apport.



**Figure I.20** : Formation de revêtement de surface avec injection de poudre pulvérulente sous le faisceau laser.

### 3.2. Formation d'un composite superficiel

Des particules de renfort sont injectées dans le métal fondu superficiellement. Ces particules s'incrustent, sans fondre, dans le bain de fusion. Après solidification du métal, de telles particules de type carbure ou nitrure induisent une augmentation sensible de la dureté dans la zone traitée par fusion (Figure I.25).



**Figure I. 21** : Formation d'un composite superficiel.

### 3.3. Formation d'un alliage superficiel

Le procédé est sensiblement le même que dans le cas de la formation d'un revêtement, si ce n'est que la fusion d'une couche relativement épaisse du substrat est recherchée. Cette partie du substrat doit incorporer le gaz réactif (Figure I.26) ou bien l'élément d'addition pulvérulente injecté sous le faisceau (Figure I.27) ou déposé préalablement (Figure I.28), afin de former un alliage de surface après solidification.

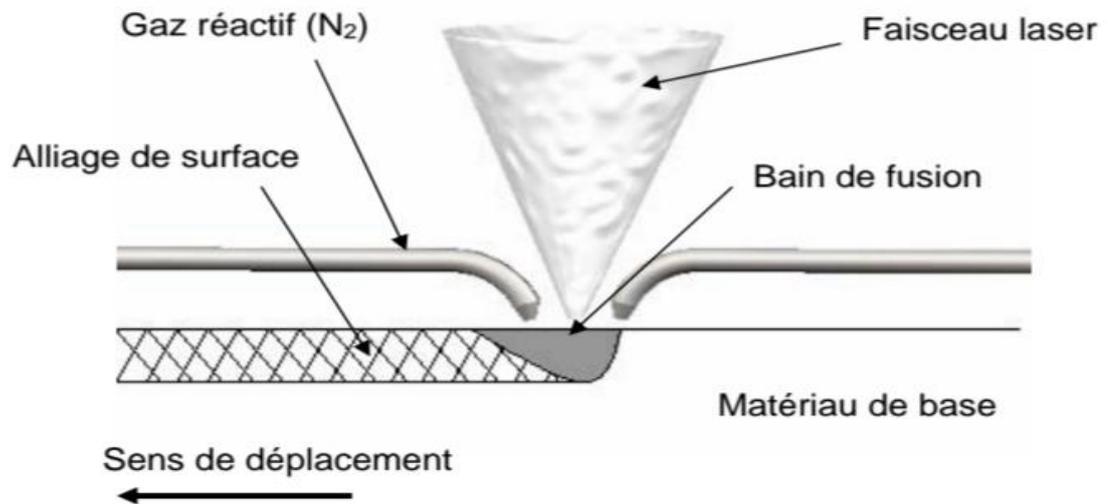


Figure I.22 : Formation d'un alliage de surface par injection de gaz réactif.

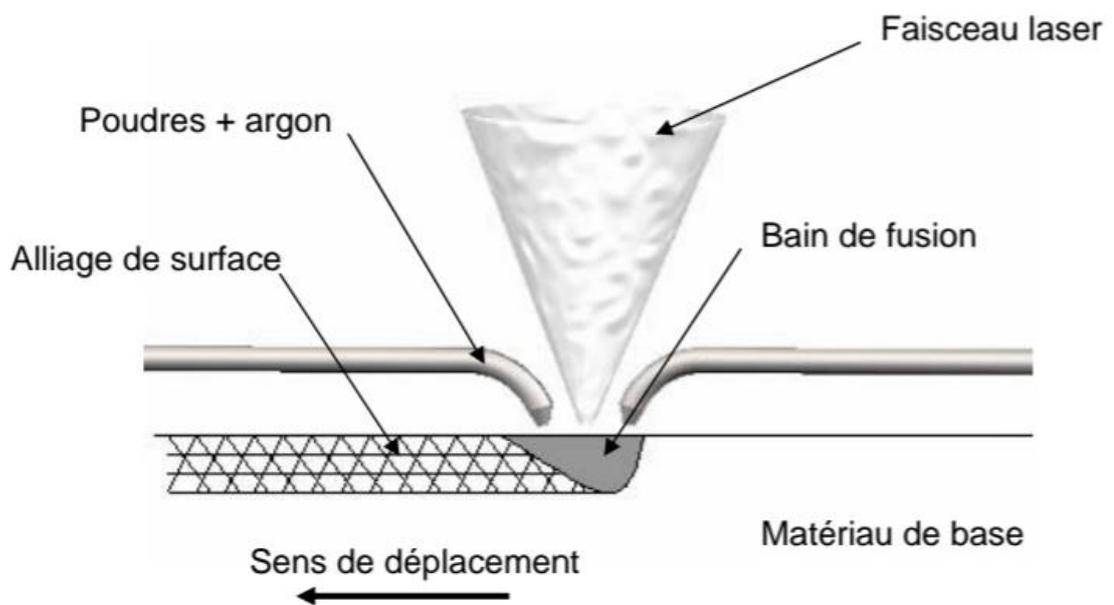
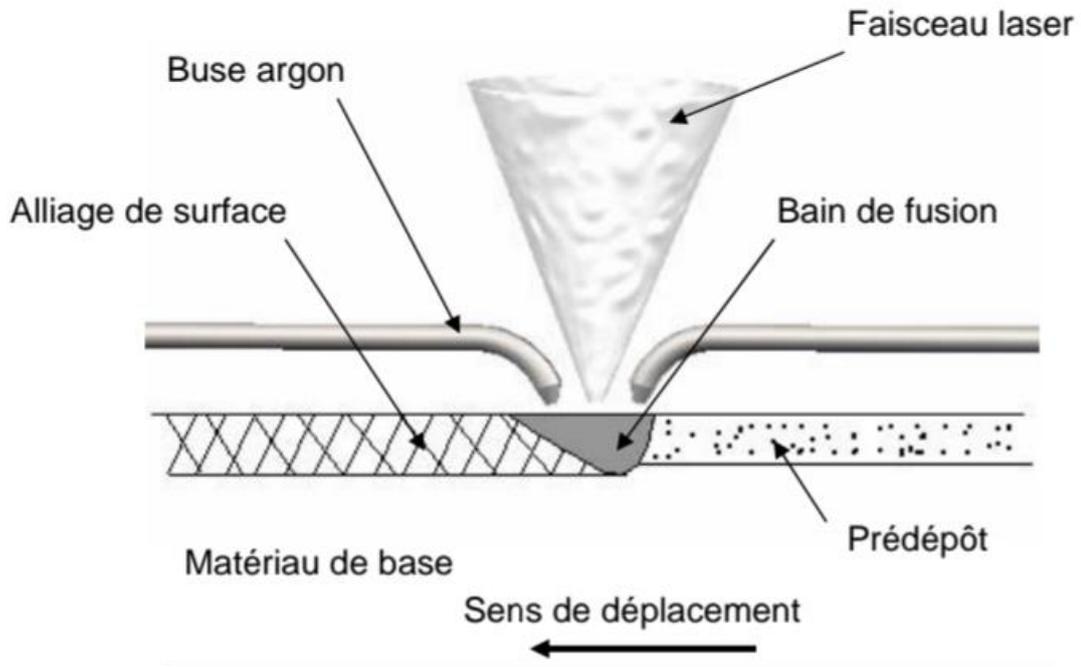


Figure I. 23 : Formation d'un alliage de surface avec injection de poudres additives.



**Figure I. 24** : Formation d'un alliage de surface à partir d'un pré dépôt d'éléments d'addition.

Les traitements de surface par fusion laser avec apport de matière intéressent de nombreux industriels essentiellement dans les secteurs de l'automobile et de l'aéronautique. Leur fonction est d'allonger la durée de vie de pièces mécaniques en renforçant leur résistance à l'usure et à la corrosion. Le procédé de projection thermique à la torche est fréquemment utilisé. La pièce est revêtue en projetant à grande vitesse un matériau sous forme de poudre partiellement fondue par le plasma. Le principal défaut de ce procédé est lié à l'absence de chauffage du substrat qui provoque un manque d'adhérence du revêtement ainsi que l'apparition de porosité et de fissuration. En revanche, le procédé de fusion laser évite ces inconvénients et permet en outre un traitement localisé aux seules zones soumises aux sollicitations. Les applications concernent, par exemple, l'élaboration de revêtements résistant à l'usure et à l'oxydation, sur les ailettes de compresseurs, sur les bords d'attaque d'aubes de turbines en acier ou sur les encoches de chapeaux d'aubes de turbine.

## **I.6.4 FACTEURS INHERENTS AU PROCEDE [10]**

### **4.1 Coefficient d'absorption**

L'absorption du laser est un phénomène complexe qui se produit à la surface du matériau. L'énergie optique absorbée est convertie en chaleur et distribuée par conduction dans la matière.

Le coefficient d'absorption varie en fonction de plusieurs facteurs notamment le type de matériau traité, la longueur d'onde du laser, le fini de surface et l'angle d'incidence. Il est possible de calculer le coefficient d'absorption en utilisant la règle de Fresnel.

Divers phénomènes prennent place durant le procédé de trempe et influencent le coefficient d'absorption. Si bien qu'il varie au court du traitement et que les estimations effectuées à basse température s'avèrent fortement dépassées. Les deux principaux acteurs sont la température et la formation d'oxyde.

La littérature rapporte que le coefficient d'absorption de l'acier augmente avec la température. Au point de fusion, il connaît une forte croissance et atteint près de 100 % lors des procédés de découpe. Wang et al. ont apporté des précisions quant à la dynamique du coefficient d'absorption en fonction de la température

### **4.2 Temps d'interaction**

Le temps d'interaction se calcule rapidement en divisant la longueur de la tache focale par la vitesse d'avance. Selon la forme de la tache focale. Le temps d'interaction peut varier sur la surface de la tache focale. Celui-ci peut également être modifié par la distorsion de la tache focale si le faisceau laser est projeté de manière oblique sur la surface. Ce temps d'interaction doit être respecté à la profondeur durcie souhaitée et non pas seulement en surface. C'est pourquoi la modélisation du procédé laser est très avantageuse.

### **4.3 Convection et radiation**

Les pertes thermiques par convection et radiation sont d'une importance mineure et ne représentent que 1-2 % de la conduction thermique à l'intérieur du matériau. Cette proportion est faible parce que l'énergie thermique s'écoule beaucoup plus facilement dans les métaux que dans les gaz.

## I.7 Cycle thermique de la trempe superficielle [12]

Le traitement par trempe superficielle consiste en un chauffage à haute énergie de la région proche de la surface à la température d'austénitisation (comprise entre 750 et 1200°C) appliquant une vitesse de chauffage très rapide. Le temps de chauffage est le plus faible possible afin de bien localiser la chaleur à la périphérie des pièces (2 à 50s). Le refroidissement rapide effectué à une vitesse supérieure à une vitesse critique dite vitesse critique de trempe permet de transformer par trempe cette région en martensite de dureté élevée en relation avec la teneur en carbone de l'alliage (Fig.1).

Cette trempe est éventuellement suivie d'un revenu. Le gradient de dureté obtenu est décroissant à partir de la surface. La surface est mise en compression vers la sous-couche. Tous les procédés de trempe superficielle ont pour objectif de générer une surface dure et résistante à l'usure sans modifier les propriétés à cœur. Ces procédés permettent également d'augmenter la résistance mécanique, la rigidité ainsi que la résistance à la fatigue. Fig.1.

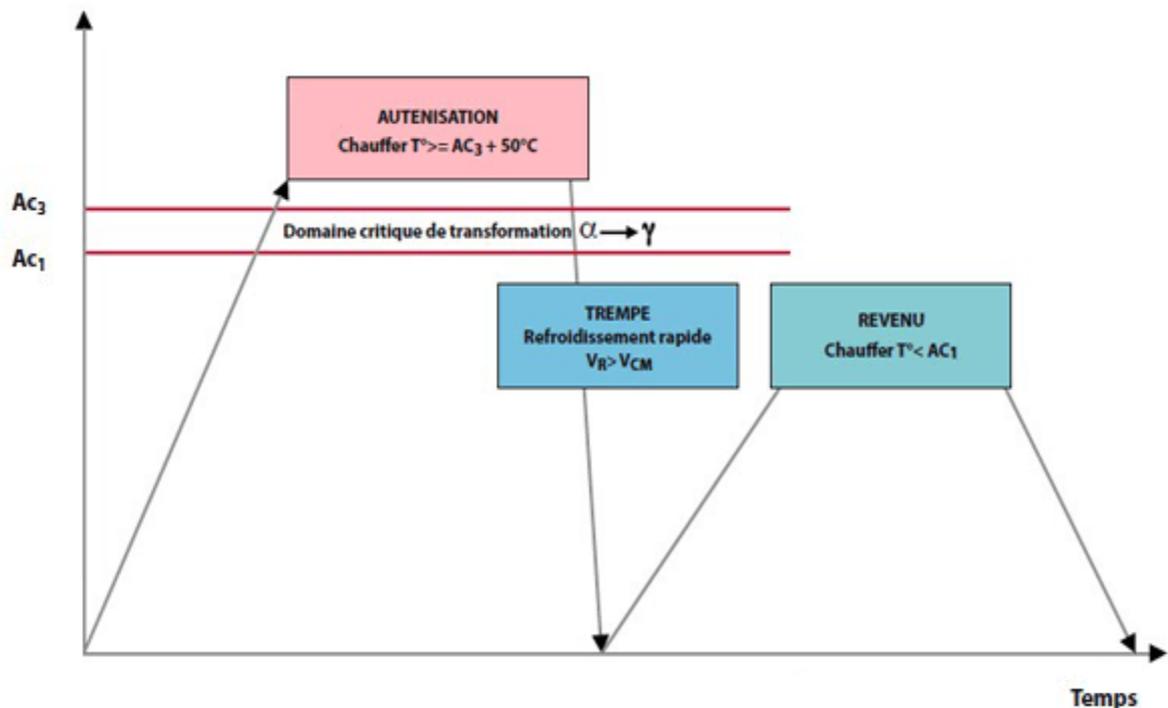


Figure I.25 : cycle thermique de la trempe superficielle

## **7.1 Conditions de trempe au laser.[10]**

### **a) Vitesse d'avance**

La vitesse d'avance et la taille de la tache focale déterminent le temps d'interaction, donc la durée des cycles thermiques. Les trempes effectuées à des vitesses élevées produisent des résultats moins profonds et munis d'une ZAT plus petite.

Certains auteurs ont constaté une variation du coefficient d'absorption en fonction de la vitesse d'avance (temps d'interaction). Cette variation pourrait être attribuée à la formation d'oxyde en surface.

### **b) Angle d'incidence**

L'angle d'incidence en optique et plus généralement en mécanique ondulatoire est l'angle entre la direction de propagation de l'onde incidente et la normale au dioptré ou à l'interface considéré.

Cet angle intervient notamment dans les lois de Snell-Descartes et les lois de la réflexion

Il existe un angle d'incidence pour lequel l'onde réfractée est confondue avec l'interface entre les deux milieux, donnant naissance à la réflexion totale. Cet angle d'incidence est nommé « angle de réfraction limite » ou plus simplement « angle limite ».

Un angle d'incidence de  $0^\circ$  avec la normale est appelé un angle d'incidence normal, et par simplification il est dit qu'on est en « incidence normale ». Dans ce cas, l'angle de réfraction est nul.

En optique physique, les ondes polarisées, l'angle d'incidence pour lequel le coefficient de réflexion s'annule pour une des polarisations est appelé angle de Brewster.

### **c) Gaz environnant**

Lorsqu'une pièce d'acier est traitée thermiquement dans une atmosphère non contrôlée (ex. : à l'air libre), il se produit des réactions chimiques avec les gaz ambiants. Ces réactions mènent à la formation d'une couche d'oxyde à la surface qui croît de façon exponentielle avec la température et le temps d'interaction avec les gaz environnants. Dans le cas de la trempe au laser, ce phénomène prend place dans la zone d'interaction, là où les températures sont très élevées.

## CHAPITRE 1 : LES LASERS ET LEURS APPLICATIONS AU TRAITEMENT THERMIQUE SUPERFICIEL

---

Plusieurs équipes rapportent l'utilisation de jets de gaz ponctuel, alors que d'autres utilisent une enceinte close dans laquelle on place la pièce et injecte un gaz inerte. Pour la première approche, des buses sont disposées de manière à obtenir un jet de gaz qui recouvre la zone d'interaction. Le débit dépend de la méthode employée pour protéger la surface, du type de buse et de l'angle d'approche. La littérature rapporte des débits allant de 15 à 50 l/min. L'argon et l'azote sont les plus employés. L'Hélium est plus dispendieux, mais son coefficient de transfert thermique est beaucoup plus élevé que l'azote : certains auteurs suggèrent que l'extraction de la chaleur à la surface pourrait être plus élevée et donc prévenir la fusion.

### Contrôle de processus de la TTL

Les laser offrent un moyen efficace et précis pour le traitement de surface en contrôlant les modifications des microstructures superficielles. Les effets du traitement thermique par laser dépendent essentiellement du degré de contrôle de la distribution spatio-temporelle de la température. Parmi les techniques de contrôle on trouve.

### Pyromètres

Le pyromètre est un appareil de mesure physique des hautes températures. La mesure pyrométrique est faite avec contact ou sans contact la mesure de température avec pyromètre utilise le rayonnement émis par la surface du matériau dont on souhaite connaître la température.

Généralement, la température des substrats est déterminée en utilisant un pyromètre optique monochromatique, car ils réalisent des mesures plus précises que ceux à radiation total.

### Caméra thermique

Pour mesure dynamique les caméras thermique pouvant être utilisée afin de déterminer l'évolution de température générée par le traitement thermique par laser, les caméras thermique les caméras thermiques peuvent saisir des images en milliseconde (dépend de la caméra utilisée), grâce à la grande fréquence d'échantillonnage des caméras thermique il est possible de détecter et mesurer l'élévation de température induit par le préchauffage de laser.

### Thermocouple

Les thermocouples sont des capteurs utilisés pour la mesure de la température. Ils sont de faible coût et permettent la mesure dans une grande gamme de température. Le principale

## CHAPITRE 1 : LES LASERS ET LEURS APPLICATIONS AU TRAITEMENT THERMIQUE SUPERFICIEL

---

limite est la précision obtenue .il est relativement difficile d'obtenir des mesures avec incertitude inferieur a 0.1°C.

Le grand problème posé par cette technique est la modification des conditions de transfert thermique de la pièce lors du traitement, d'autres nouvelles techniques développées par les métallurgistes permettent d'éliminer ce problème.

**REED et al** présentent une technique capable de contrôler les changements structuraux microscopiques sous conditions de chauffage et refroidissement rapide avec une puissance du faisceau Laser CO2 de 1 KW sur un papier d'aluminium (mince). Ils ont enregistré le cycle thermique à la surface d'échantillons côté opposé, utilisent des thermocouples et un système de saisie des données. [13]

**XU et al** introduisent le pyromètre avec un temps de résolution de l'ordre de nanoseconde, employé pour mesurer la température de la surface transitoire de matière solide chauffé par un faisceau laser excimère. Ils ont employé des diodes au Germanium rapides pour capturer l'émission thermique transitoire du signal et à tirer la température de la surface de cette émission mesurée. [14]

**IGNATIEV et al** utilisent un ensemble de pyromètres pour contrôler le cycle thermique dans le temps réel, illustré sur l'exemple de laser Nd:YAG agissant sur les matériaux métalliques et céramiques.

A côté de ces techniques expérimentales, qui présentent des inconvénients considérables :

- Ce sont des techniques coûteuses (problèmes économiques).
- Difficile de mesurer la température en profondeur.
- Certaines grandeurs ne peuvent tout simplement pas être connues ou alors de manière très indirect (gradient thermique, la vitesse locale de refroidissement, le temps local de solidification...).
- Ne peut pas prédire les dernières propriétés du substrat avant le traitement, qui pose une difficulté de contrôle de procédé.[15]

La modélisation mathématique trouve la solution pour ces problèmes, avec un bas coût et une prédiction des connaissances des meilleures propriétés qui peuvent résulter au stade de développement du produit.[7]

**CONCLUSION :**

Le laser est utilisé d'une manière différente dans plusieurs domaines comme la médecine l'industrie les applications militaires ... mais nous ce qui nous intéresse c'est le traitement thermique superficielle par laser donc on va juste considérer le laser comme source de chaleur.

Dans ce chapitre on a présenté quelques généralité sur les lasers et leurs domaines d'application et comment la lumière laser interagit avec la matière et on a vu aussi les différents types de traitements thermique superficielle d'une manière bref il s'agit de bombarder la surface de la matière avec une énorme densité provoquant ainsi une augmentation très importante de température en une fraction de seconde suivi d'un refroidissement très rapide qui nous permet de traité la surface son atteindre l'intérieur de la pièce.et on a vu aussi le contrôle de traitement thermique .

### II.1 Introduction

Les lasers sont des outils idéaux pour le traitement de divers matériaux. Les caractéristiques inhérentes à l'énergie lumineuse permettent un contrôle facile de la livraison et fournissent ainsi des résultats de haute qualité. En raison des récentes avancées technologiques, le durcissement de la transformation au laser suscite un intérêt croissant. Chaque pièce à traiter thermiquement par laser nécessite l'élaboration de recettes afin d'obtenir les résultats souhaités. La modélisation numérique permet de simuler le processus avec une grande précision, réduisant ainsi le besoin d'expériences. Cette étude se concentre sur la modélisation et la simulation des flux thermiques résultant de l'interaction entre le faisceau laser et la pièce. Une fonction numérique est développée pour modéliser avec précision et automatiquement un faisceau laser traversant des surfaces

### II.2 MODELISATION ET SIMULATION DE LA TRAMPE LASER :[10]

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

La modélisation du procédé de trempé au laser est le développement d'un outil numérique (une fonction) qui permet d'effectuer une modélisation juste et précise. Il fait état des étapes concourantes nécessaires au développement d'un tel outil de modélisation tout en s'appuyant sur les paramètres de matériau et le laser étudié. On y élabore le modèle numérique de base en posant les hypothèses de travail et les équations qui gouvernent les phénomènes physiques.

#### 2.1 Conditions aux limites spatiales et temporelles [16]

##### a) Conditions initiales :

C'est la distribution des températures à  $t=0$  :  $T(x, y, z, t=0) = T_0(x, y, z)$ . Dans le cas général, la température initiale est homogène, constante est bien définie dans le matériau bicouche. Dans le cas d'un matériau multicouche, chaque couche peut avoir sa propre température initiale.

##### b) Conditions aux limites

Ces conditions dépendent évidemment du problème étudié. Elles traduisent le lien entre le milieu étudié et le milieu extérieur. Comme l'équation de la chaleur est de premier ordre en temps et de second ordre en espace, on rappelle que deux conditions aux limites dans chaque direction et une condition temporelle (condition initiale) sont exigées pour aboutir à une solution de l'équation de départ (cf. figure II-1).

Les trois types de conditions aux limites souvent rencontrées dans les transferts de chaleur sont :

i. Les conditions aux limites de première espèce dites aussi conditions aux limites de type température imposée (problème de Dirichlet), la température à la surface est connue à tout instant.  $T_s = f_s(M_s, t)$  avec  $M_s$  point de la surface du système (1.12) Cas particulier : surface isotherme ( $T_s = \text{cte}$ ).

ii. Condition aux limites de deuxième espèce dites aussi conditions aux limites de type flux imposée (problème de Neumann), dans ce cas, la densité de flux à la frontière du domaine étudié, est connue à tout instant.

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

Cas particulier : surface adiabatique ou système isolé.  $-k \left( \frac{\partial T}{\partial n} \right)_s = 0$

iii. Condition aux limites de troisième espèce dites conditions de Fourier ou aussi de Newton ; transfert linéaire (problème de Fourier).

$$k \left( \frac{\partial T}{\partial n} \right)_s = h (T_s - T_{amb})$$

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

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

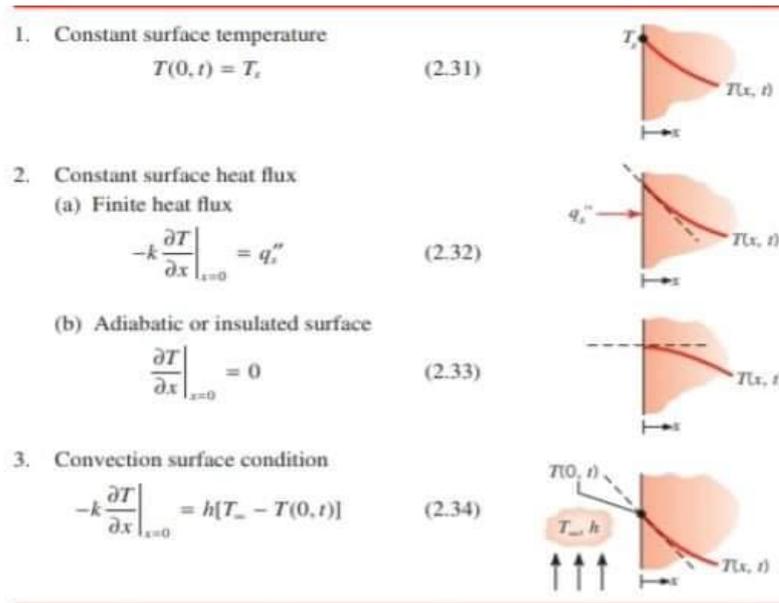


Figure II.1: Exemples de conditions aux limites

### II.3 La modélisation mathématique de tramp laser [17]

L'efficacité du traitement passe, en premier lieu, par capacité à maîtriser les évolutions spatio-temporelles des champs de températures induits dans le matériau. Ces évolutions, qui conditionnent la cinétique de chauffe ainsi que la profondeur et la largeur de la zone traitée, dépendent des paramètres suivants : non linéaire, portant sur la face éclairée par la source Laser. Les variations importantes des paramètres, bien que très localisées autour de la zone d'impact du faisceau, sont directement influencées par les conditions aux limites imposées sur l'ensemble du domaine. Devant les aspects complexes de la modélisation de ce problème, plusieurs auteurs ont émis des hypothèses simplificatrices et se sont contentés d'une description probable des effets induits. Pour des résultats approchés, moyen-

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

analytiques ont été sélectionnées pour décrire le régime quasi-stationnaire qui s'établit après un temps relativement court autour de la zone d'interaction Laser-matériau.

En fait, la plupart des auteurs ont adopté des méthodes analytiques qui permettent, grâce à leur simplicité de programmation, de cerner les ordres de grandeur et les tendances principales des solutions. Ces méthodes supposent que le domaine est un espace semi-infini et que le problème admet un régime établi asymptotique solution d'un modèle stationnaire dans un repère lié au faisceau.

La multiplicité des paramètres ainsi que leur sensibilité aux variations de température en cours de processus, conduit fatalement à une expérimentation longue et coûteuse. Une optimisation des variables de processus serait fortement simplifiée par la mise en place d'un outil de simulation numérique fiable qui, de plus, offrirait des possibilités de prédiction des grandeurs finales recherchées. La modélisation du traitement thermique s'appuie sur la résolution de l'équation de la chaleur dans les conditions du traitement Laser. La principale difficulté réside dans la non-monotonie de la condition aux limites en chargement.

### 3. 1 MODELE ANALYTIQUE

La base des flux thermiques réside dans l'équation générale de conduction thermique proposée par Fourier. Quelques années avant la découverte du laser.

Carslaw et Jaeger ils ont modéliser les flux thermiques issus de différentes sources on développe une équation mathématique que l'on adapta pour simuler les flux de températures dans les trois dimensions (1D, 2D et 3D) tout en y intégrant le déplacement de la source. [18]

Il existe plusieurs approches analytiques provenant de différentes écoles de pensée et chacune d'elles comporte leurs hypothèses. Les travaux d'Ashby et al, Davis et al, Cline et Anthony ainsi que Kar et Mazumder comptent parmi les plus grands apports dans le domaine, tel que rapporté par les ouvrages de référence. [11]

Récemment, Komanduri et Hou après avoir revisité les équations proposées par plusieurs équipes de chercheurs et sur tout steen et country. Ils ont mené leurs études sur la modélisation par équation analytique de la trempe au laser, ils ont développé une approche analytique tridimensionnel sur l'acier AISI 1036 et valide pour l'état transitoire du procédé. Et ont comparons leurs résultats avec celle de steen et country ils ont conclu que leur approche était plus fiable. [19.20]

### 3.2 MODELISATION NUMERIQUE

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 thermo physiques 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. Ses modèles numériques incluent la distribution de l'irradiance de la tache focale, la dépendance des propriétés thermo physiques à la température, la chaleur latente issue des transformations métallurgiques ainsi que les pertes par convection et par radiation. [11]

**Jamal Bessrou, Mohamed Jemmali [21]** ont proposé une étude est une contribution à l'établissement d'un modèle instationnaire qui permet de simuler l'histoire thermique total du traitement superficiel dans un domaine 3D, de frontière quelconque, jusqu'au retour à l'équilibre thermique au refroidissement.

**D. KECHMAIR et E. LUNEVILLE [22]** ont mis en œuvre des codes de calcul pour rendre l'équation non linéaire instationnaire de conduction pour décrire la trempe superficielle des aciers par laser CO<sub>2</sub> continue. Le modèle adopté néglige l'interface solide/solide et considéré que le dépôt d'énergie a lieu en surface.

### 3.3 Modèles de simulation

En 1997, **Ion et Anisdahl [23]** ont publié le développement du logiciel Pro LASER, qui permet de déterminer les paramètres laser à utiliser en fonction des résultats de trempe désirés. Par exemple, l'utilisateur fournit au logiciel les dimensions des trempes à obtenir, le type d'acier, le type de laser et le logiciel retourne la taille de la tache focale, la vitesse d'avance et la puissance optique nécessaire. En se basant sur le type de laser, le coût de l'électricité et le coefficient d'absorption, le logiciel inclut une estimation des coûts de la trempe par unité de surface (\$/cm<sup>2</sup>). Le coefficient d'absorption utilisé par le logiciel est fixé à 62 %, donnée obtenue empiriquement via des essais appliqués sur différents aciers avec un laser CO<sub>2</sub>. En

analysant les résultats, on s'aperçoit que les résultats prédits par le logiciel ont une erreur relative moyenne de 25 % sur la profondeur durcie et de 23 % quant à la dureté atteinte.

En 2010, l'équipe de **Martínez et al.[24]** développe un simulateur afin de prédire les résultats de trempe au laser sur une pièce à géométrie complexe. Il permet de modéliser le passage du laser (mouvement sur trois axes) et les flux thermiques en découplant. De plus, il intègre un modèle de transformation métallurgique basé sur l'équation proposée Par Johnson-Mehl-Avrami, permettant de modéliser le changement de phase de l'acier, donc la portion d'acier transformé en austénite. L'outil numérique développé, nommé LATHERM, couple l'utilisation de MATLAB pour la programmation et Visual Studio pour le développement de l'interface.

**Gabriel C. Guillemette et j. Brousseau [25]** ont fait une modélisation du flux thermique laser à l'aide de programme COMSOL. Ils ont simulé le chauffage par laser d'une pièce plate (100\*40\*5 mm) en acier AISI.4340. Ils ont pris en compte les propriétés du matériau ainsi que les pertes par convection et du rayonnement et le coefficient d'absorption et ajusté mais fixe, les résultats trouvés ont été comparé à des résultats expérimentaux ils ont conclu que les erreurs relatives et de 2% entre les deux testes.

Comme on l'as vu plein de model ont été développée par des chercheurs sans prendre en compte la variation de l'absorptivité en fonction de la température, il las prennent tjr constante, peut de chercheur se sont consacrer à étudie l'influence de l'absorptivité qui varie en fonction de la température et parmi ces modelés on trouve :

**Khou, Sun, le [26]** : ont présenté un model numérique tridimensionnelle du tramp avec laser CO2, ils ont inclus les pertes thermiques par convection et rayonnement et aussi la variation de coefficient d'absorption et les propriété thermo physique de la matière en fonction de la température, le modèle est fait par la méthode des différence finie et validé par des essaie expérimentaux sur l'acier AISI1018.

**Know .H et al [27]** ont fait des essais expérimentaux pour déterminer le coefficient d'absorption en fonction de température pour les aciers (AL, Ti, SS304), avec deux types de laser (fibre 1.07um, CO2 10.6mm).

**Boutalbi. N, Bouaziz.M.N et Allouche.M [28]** ont proposé un model analytique sur l'influence de la température sur le coefficient d'absorptivité pour les laser CO2 et ND-YAG . Ils ont utilisé deux théories avec utilisation des variables adimensionnelle :

1. Le coefficient d'absorptivité varie avec la température selon l'équation de Hagen-Rubens :

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + 112.2 \sqrt{\delta_0(1 + \beta\theta)} * e^{-x}$$

• L'équation est valable juste pour le laser CO2

2. Le coefficient d'absorptivité varie avec la température selon l'équation de Bramons :

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + [0.365 \sqrt{\frac{\delta_0(1 + \beta\theta)}{\lambda}} - 0.667 \left(\frac{\delta_0(1 + \beta\theta)}{\lambda}\right) + 0.006 \left(\frac{\delta_0(1 + \beta\theta)}{\lambda}\right)^{\frac{3}{2}}] * e^{-x}$$

**Hassan A.F. et all** [29] ont développé une solution analytique pour l'évolution du profil de la température superficielle sous l'effet de l'absorptivité température-dépendent, modélisée comme suit :  $A(T(t, 0)) = A_0 + a * T(t, x)$  ,  $A_0$ =l'absorptivité a la température ambiante

Dans notre travail on s'intéresse à étudier le modèle de Deus et Vilar comme suit :

## **II.4 Analyse de modèle de A.M DEUS et VILAR [30]**

### **4.1 descriptions**

**A.M DEUS ET VILAR** [83] ont développé une expression analytique de la température à la surface d'un matériau irradié par laser dans laquelle la variation de l'absorbance avec la température suit l'équation de Hagen-Rubens. Le régime de conduction thermique sera considéré comme unidimensionnelle, une approximation valable lorsque la caractéristique la distance de conduction thermique est négligeable par rapport au diamètre du faisceau laser. De plus, ils appliqueront la présente analyse à l'estimation de la durée d'impulsion conduisant à fondre la surface d'un matériau irradié par laser, pour une densité de puissance constante

### **4.2 hypothèse simplificatrice**

a)  $r \gg 2\sqrt{at}$  → conduction thermique unidimensionnelle

b)  $L \gg 2\sqrt{at}$  → matériau semi infini

- c)  $\delta \ll \sqrt{at_p}$  → chauffage de la surface
- d) la surface est polie et propre.
- e) la résistance électrique varie linéairement avec la température.
- f) la conductivité et la diffusion thermique sont considérées comme des constantes.
- g) l'absorptivité varie avec la température selon l'équation de Hagen-Rubens.
- h) la forme de l'impulsion laser est carrée.

### 4.3 Formulation des équations

#### 3.1. Équation de base

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad 0 \leq x < \infty$$

#### 3.2 condition aux limites et initiales

$$T(x, t=0) = 0 = T(x=\infty, t)$$

$$-K \frac{\partial T}{\partial x} = A(T(x=0, t))I$$

3.3 Résultat de model :

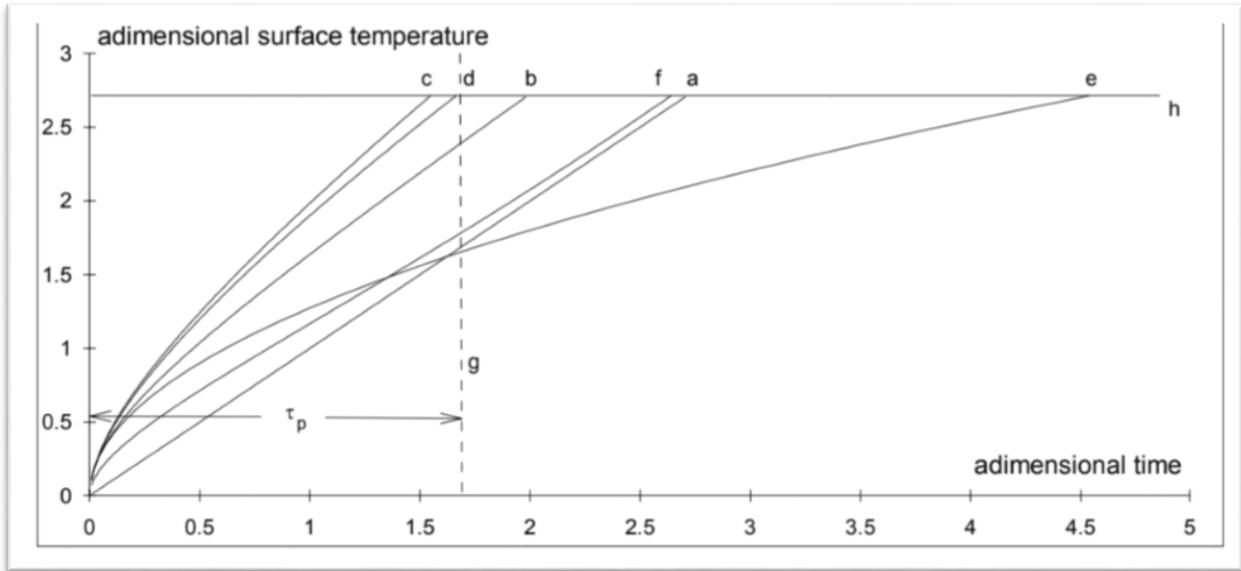


Figure II.2 Résultats pour le cuivre.

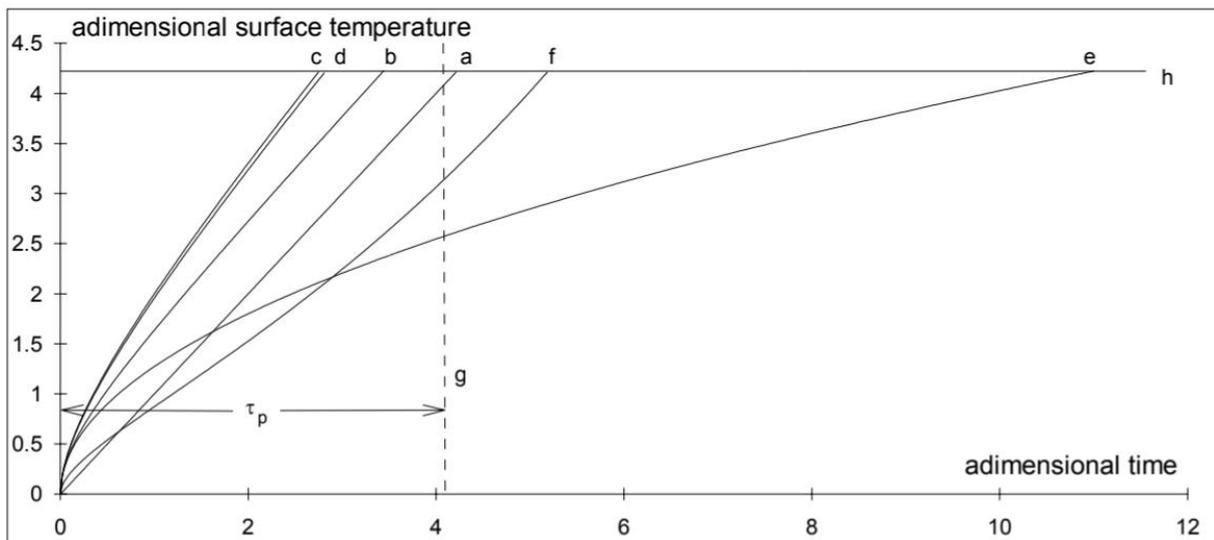


Figure II.3 Résultats pour l'aluminium.

Les valeurs expérimentales de la température de fusion adimensionnelle et de la durée d'impulsion adimensionnelle sont représentées par des lignes horizontales et verticales, respectivement, pour une meilleure comparaison avec les résultats obtenus par les modèles a-f. On voit que les solutions approchée (a) et linéaire (b) correspondent bien aux résultats expérimentaux (g), contrairement à l'expression de Carslaw et Jaeger (e). Les solutions (a) et (b) prédisent des valeurs de durée d'impulsion similaires à celles obtenues par les calculs numériques (c) et (d) ainsi qu'aux résultats de Sparks et Loh (f), tout en montrant une plus grande simplicité. Nous voyons dans les deux cas que la dépendance à la température des propriétés thermiques influence également les résultats, mais pas autant que l'absorption. Ainsi,

la solution linéaire donne un moyen particulièrement simple d'estimer les seuils de fusion, en évitant les grandes erreurs qui surviennent habituellement en utilisant l'approximation d'absorption constante.

### II.5 Critique de modèle de deus et Vilar

Comme on l'a vu, Deus et Vilar ont pris dans leur modèle l'absorptivité qui varie avec la température selon l'équation de Hagen-Rubens qui permet juste l'étude sur le laser CO<sub>2</sub> qui est faible d'intensité par rapport aux autres lasers infrarouges.

### II.6 conclusions

Dans ce chapitre, nous avons vu que grâce aux outils de calculs d'aujourd'hui, la modélisation numérique est l'approche à favoriser pour simuler le procédé de trempe au laser. Toutefois, les logiciels de modélisation sont rares, coûteux et n'incluent pas l'ensemble des paramètres et variations pour modéliser adéquatement le passage du laser sur des surfaces complexes. Plusieurs approches de modélisation de la trempe au laser ont été proposées par diverses équipes de recherche. Toutefois, aucune d'entre elles n'intègre à la fois la gestion du coefficient d'absorption, la déformation de la tache focale et la variation de l'irradiance en fonction des conditions d'interaction entre la surface de la composante et le laser. Ce projet de recherche s'attarde directement à cette problématique, permettant alors de modéliser adéquatement le passage du laser sur des surfaces 1D 2D 3D complexes.

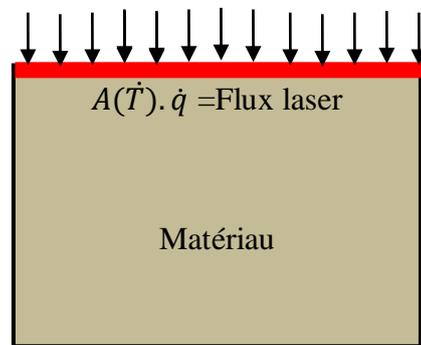
Comme nous l'avons vu, le paramètre de modélisation principal, le coefficient d'absorption, doit être déterminé à l'aide d'essais expérimentaux, car il varie grandement en fonction des conditions d'interactions et d'opérations.

# Chapitre III : : EXTENSION DU MODELE Pour les lasers infrarouges

## III .1Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter une extension de model de Deus et Vilar [30] en remplaçant l'absorptivité au laser qui dépend de la température selon la loi de Hagen-Rubens par la loi de BRAMSON pour couvrir les lasers dans le domaine de l'infrarouge, pour cela on va étudier trois types de matériau (acier, nickel, chrome) avec deux types de laser (CO2 et CO) avec la commande pdepe de logiciel Matlab.

## III.2 Description du modèle



Modele physique de trempe superficielle

Représentation mathématique

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

Le mécanisme de traitement thermique en phase solide se compose de chauffer localement et rapidement le matériau de surface supérieur à la température critique du changement structurel, et légèrement inférieure à son point de fusion. Le refroidissement de la zone traitée se fait par trempe vers le noyau de la pièce.

En général, le traitement thermique de surface au laser et la trempe sont impliqués dans un processus de chauffage limité par conduction. Le champ de température associé au chauffage limité par conduction peut être obtenu en utilisant la loi de Bramson.

# Chapitre III : : EXTENSION DU MODELE Pour les lasers infrarouges

---

## 2.2 hypothèse simplificatrice

- Le modèle est considéré en 1D.
- La source laser indépendante du temps (constante)
- Le matériau traité est isotrope homogène supposé comme semi infini.
- Les propriétés thermo physiques du substrat sont indépendantes de la température.
- Les pertes d'énergie par convection et rayonnement sont négligeables.
- l'absorptivité au laser et dépend de la température selon la loi de BRAMSON comme suit ;

$$A(T) = 0.365 \sqrt{\frac{\delta(T)}{\lambda}} - 0.667 \left( \frac{\delta(T)}{\lambda} \right) + 0.006 \left( \frac{\delta(T)}{\lambda} \right)^{3/2} \quad \text{III.1}$$

$\delta(T)$ : résistivité électrique ds

$$\delta(T) = \delta_0 (1 + a(T(x, t) - T_0)) \quad \text{III.2}$$

$\delta_0(T_0)$ : résistivité électrique à  $T_0$

## 2.3 Formulation des équations

### 3.1 Equation de base

$$\frac{\partial x}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad , \quad 0 \leq x \quad \text{III.3}$$

### 3.2 Conditions initiales et aux limites

## Chapitre III : : EXTENSION DU MODELE Pour les lasers infrarouges

---

$$\left\{ \begin{array}{l} T(x, t = 0) = 0 \\ T(x = \infty, t) = 0 \\ -k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = [0.365 \sqrt{\frac{\delta(T)}{\lambda}} - 0.667 \left(\frac{\delta(T)}{\lambda}\right) + 0.006 \left(\frac{\delta(T)}{\lambda}\right)^{3/2}] \cdot \dot{q} \end{array} \right. \quad \text{III.4}$$

### 2.4 descriptions de la méthode pdepe (Matlab) :

Sol = pdepe(m,pdefun,icfun,befun,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 a 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 :

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

La cale d'équation 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 a la dalle, cylindrique ou symétrie sphérique, respectivement. Si  $m > 0$ , alors  $\alpha$  doivent être  $\geq 0$ .

Dans l'équation 1,  $f(x, t, u, \frac{\partial u}{\partial x})$  est un terme de flux et  $s(x, t, u, \frac{\partial u}{\partial x})$  est un terme source. L'accouplement des dérivées partielles par rapport au temps est limité à la multiplication par une matrice diagonale  $c(x, t, u, \frac{\partial u}{\partial x})$ . Les éléments diagonaux de la matrice sont identiquement nuls ou positif. Un élément qui est identiquement zéro correspond à une équation elliptique ou non a une équation 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 matricielles sont autorisées sous réserve qu'un point de filet est placé à chaque interface.

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

## Chapitre III : : EXTENSION DU MODELE Pour les lasers infrarouges

---

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

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  $\frac{\partial u}{\partial x}$ . En outre, des deux coefficients, seulement  $p$  peut dépendre de  $u$ .

Dans l'appel `sol = pdepe(m, pdefun, icfun, 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  $u$  et  $dudx$  qui se rapprochent de la solution  $u$  et sa dérivée partielle 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  $x_r$ .

## Chapitre III : : EXTENSION DU MODELE Pour les lasers infrarouges

---

ul est la solution approximative à la limite de gauche  $x_l = u_n$  et  $u_r$  est la solution approximative à la limite droite  $v_r - t_e$  al et el cent les vecteurs coloanes correspondant à p et q ont évalué à  $x_l$ , de même pr el gr correspondant aux  $x_r$ .

Lorsque  $m > 0$  et  $a = 0$ , boundedness de la solution près de  $x = 0$  exige que le flux  $f$  s'annule en  $a = 0$ , pdepe impose cette condition limite automatiquement et il ignore les valeurs retournées en  $p_l$  et  $q_l$ . pdepe retourne la solution comme un tableau multidimensionnel sol.  $U_j'ai = u_i = \text{sol}(:, :, i)$  est une approximation au composant  $i$ th avec la solution vecteur  $u$ . L'élément  $u_i(j, k) = \text{sol}(j, k, i)$  se rapproche  $u_j'ai$  à  $(t, x) = (\text{tspan}(j), \text{xmesh}(k))$ .

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

$\text{Sol} = \text{pdepe}(m, \text{pdefun}, \text{icfun}, \text{bcfun}, \text{xmesh}, \text{tspan}, \text{options})$  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 disponible dans pdepe : RelTol, AbsTol NormControl, InitialstepetMaxStep. Les valeurs par défaut obtenues en laissant l'argument d'entrée options off sera généralement satisfaisantes.

$[\text{Sol}, \text{tsol}, \text{sole}, \text{te}, \text{ie}] = \text{pdepe}(m, \text{pdefun}, \text{icfun}, \text{bcfun}, \text{xmesh}, \text{tspan}, \text{options})$

Avec les 'Events' propriété dans options définis à une poignée de fonction Events, a résolu comme indiqué ci-dessus, tout en trouvant également ou 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 :

$[\text{Value}, \text{isterminal}, \text{direction}] = \text{évents}(m, t, \text{xmesh}, \text{umesh}). \text{xmesh}$

Contient le maillage spatial et  $\text{umesh}$  est la solution aux points de maillage. Utilisation de pdeval pour évaluer la solution entre mesh points. Pour la fonction d'événements de jeth, valeur (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

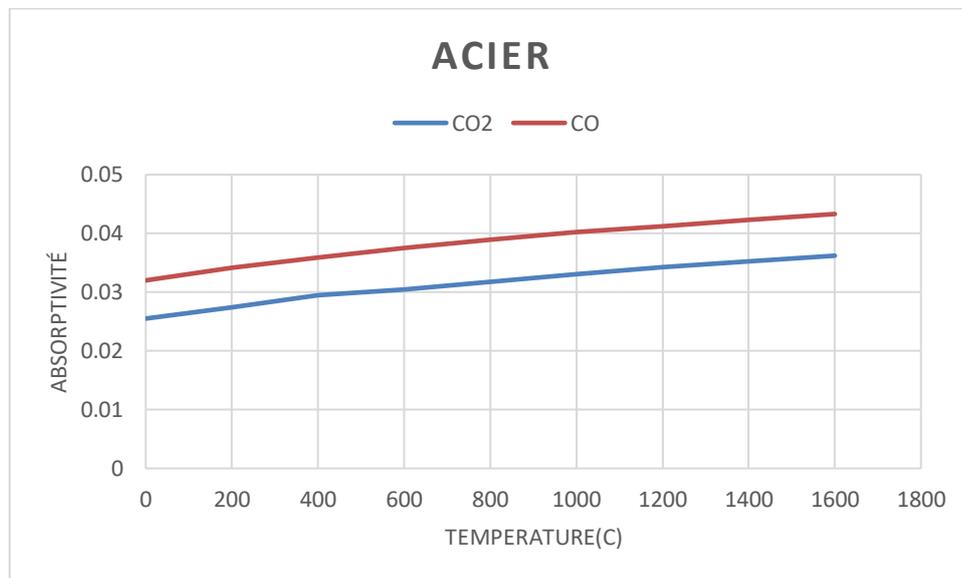
## Chapitre III : : EXTENSION DU MODELE Pour les lasers infrarouges

d'être calculés (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 .3 Résultats et discussion

MATRIEAU	$C_p$ [J / KgK]	$k$ [W / mK]	$\rho$ [Kg / m <sup>3</sup> ]	$\delta_0$ [ $\Omega \cdot m$ ] *10 <sup>-8</sup>	$a$ [K <sup>-1</sup> ] *10 <sup>-4</sup>	Point de fusion [ <sup>0</sup> K]
ACIER	477	15.1	7900	7.2	9.4	1800
NICKEL	447	90.7	8900	13	5.5	1720
CHROME	450	94	7190	10	21.4	2180

**Tableau III-1 caractéristiques des matériaux étudiés.**



**Figure III-2** Polynômes d'absorptivité température dépendante pour l'acier.

## Chapitre III : : EXTENSION DU MODELE Pour les lasers infrarouges

---

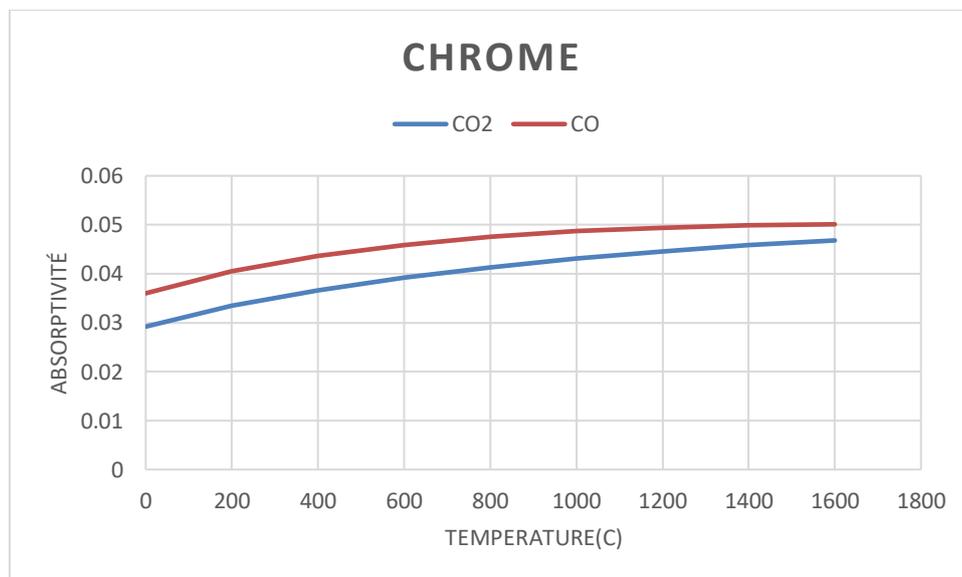
**Equation de l'absorptivité pour l'acier :**

**CO :**

$$A(T) = (0.365 \cdot \sqrt{(\delta_0 \cdot (1 + (a \cdot T))) / 6 \cdot 10^{-6}} - 0.667 \cdot ((\delta_0 \cdot (1 + (a \cdot T))) / 6 \cdot 10^{-6}) + 0.006 \cdot ((\delta_0 \cdot (1 + (a \cdot T))) / 6 \cdot 10^{-6})^{3/2})$$

**CO2:**

$$A(T) = (0.365 \cdot \sqrt{(\delta_0 \cdot (1 + (a \cdot T))) / 10.6 \cdot 10^{-6}} - 0.667 \cdot ((\delta_0 \cdot (1 + (a \cdot T))) / 10.6 \cdot 10^{-6}) + 0.006 \cdot ((\delta_0 \cdot (1 + (a \cdot T))) / 10.6 \cdot 10^{-6})^{3/2})$$



**Figure III-3** Polynômes d'absorptivité température dépendante pour le chrome.

**Equation de l'absorptivité pour le chrome :**

**CO :**

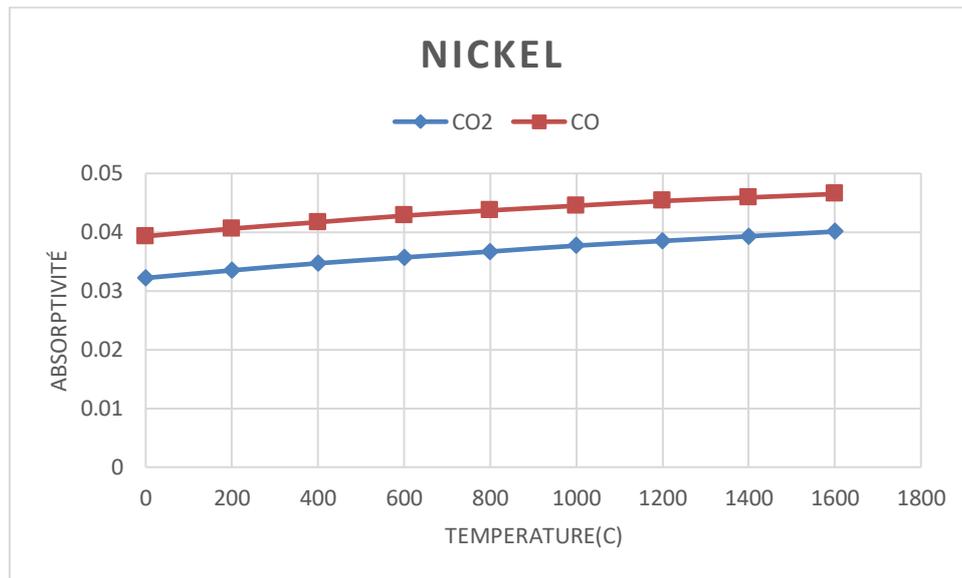
$$A(T) = (0.365 \cdot \sqrt{(\delta_0 \cdot (1 + (a \cdot T))) / 6 \cdot 10^{-6}} - 0.667 \cdot ((\delta_0 \cdot (1 + (a \cdot T))) / 6 \cdot 10^{-6}) + 0.006 \cdot ((\delta_0 \cdot (1 + (a \cdot T))) / 6 \cdot 10^{-6})^{3/2})$$

## Chapitre III : : EXTENSION DU MODELE Pour les lasers infrarouges

---

**CO2 :**

$$A(T) = (0.365*\sqrt{(\delta_0*(1+(a*T)))/10.6*10^{-6}}-0.667*((\delta_0*(1+(a*T)))/10.6*10^{-6})+0.006*((\delta_0*(1+(a*T)))/10.6*10^{-6})^{(3/2)})$$



**Figure III-4** Polynômes d'absorptivité température dépendante pour le Nickel.

**Equation de l'absorptivité pour le Nickel :**

**CO :**

$$A(T) = (0.365*\sqrt{(\delta_0*(1+(a*T)))/6*10^{-6}}-0.667*((\delta_0*(1+(a*T)))/6*10^{-6})+0.006*((\delta_0*(1+(a*T)))/6*10^{-6})^{(3/2)})$$

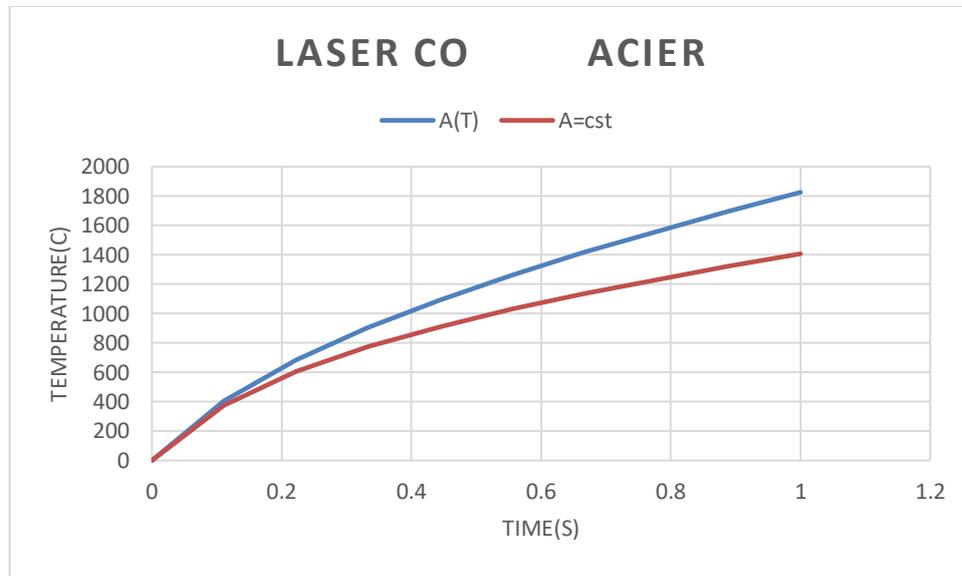
**CO2:**

$$A(T) = (0.365*\sqrt{(\delta_0*(1+(a*T)))/10.6*10^{-6}}-0.667*((\delta_0*(1+(a*T)))/10.6*10^{-6})+0.006*((\delta_0*(1+(a*T)))/10.6*10^{-6})^{(3/2)})$$

Les figures III-2, III-3 et III-4 représente les résultats de l'absorptivité-température dépendante selon l'équation de Bramson pour l'acier le chrome et le nickel sous l'effet des lasers CO et CO2.

## Chapitre III : : EXTENSION DU MODELE Pour les lasers infrarouges

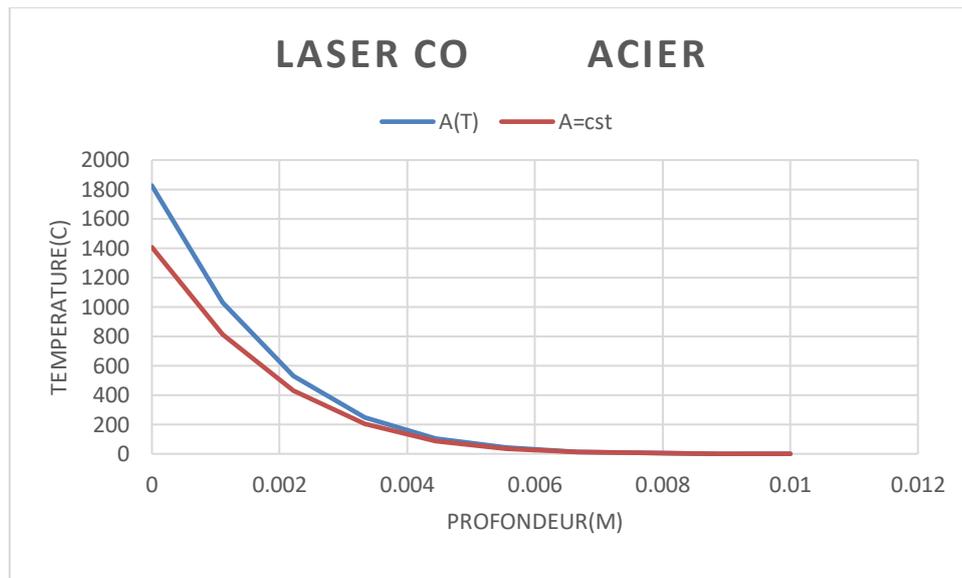
### POUR LE LASER CO



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

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 CO. Une simple analyse à la fin de la phase d'échauffement correspond à  $t = 1s$  la température superficielle maximale dans le cas de l'absorptivité variante augmente de 22.94% par rapport au cas où elle est constante.

## Chapitre III : : EXTENSION DU MODELE Pour les lasers infrarouges



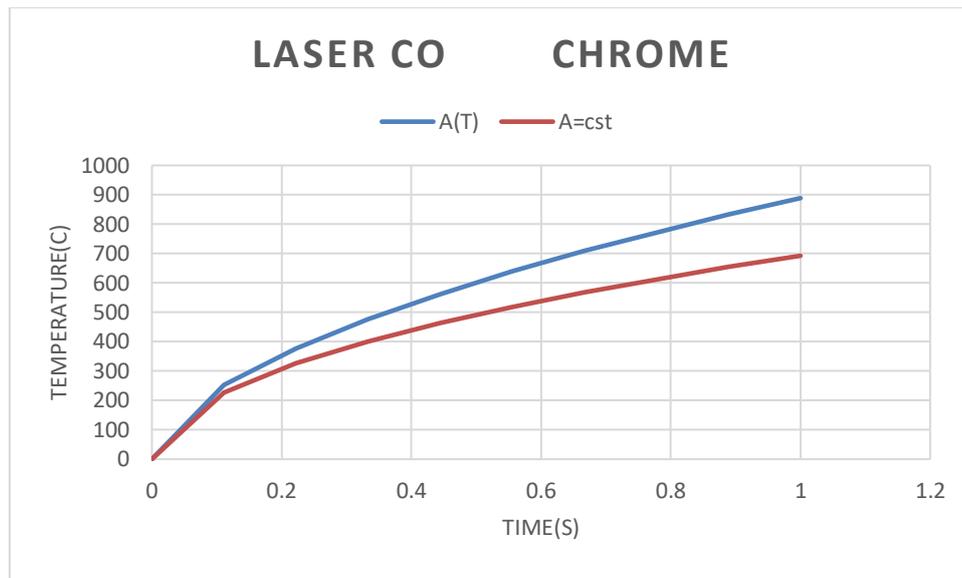
**Figure III-6** Profils de température superficielle en phase d'échauffement en fonction du temps, obtenus à  $A = cst$  et  $(T)$ , pour l'acier sous l'effet thermique du laser CO

La figure III-6, représente l'évolution de la température dans l'épaisseur de la pièce traitée en domaine à la fin de la phase de l'échauffement pour les deux modèles de l'absorptivité constante et variable en température dans le cas du laser CO la température superficielle maximale dans le cas de l'absorptivité variante augmente de 22.94 % par rapport au cas où elle est constante cet valeur diminuent de plus en plus que les profils pénètre la profondeur de la pièce voir le tableau III-2 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 traité.

ACIER ND	A constante	A variable	Augmentation en %
Température (C°) x=0mm	1407	1826	22.94%
Température (C°) x=1.1mm	813.7	1029	20.92%
Température (C°) x=4.5mm	88.63	105.4	15.91%

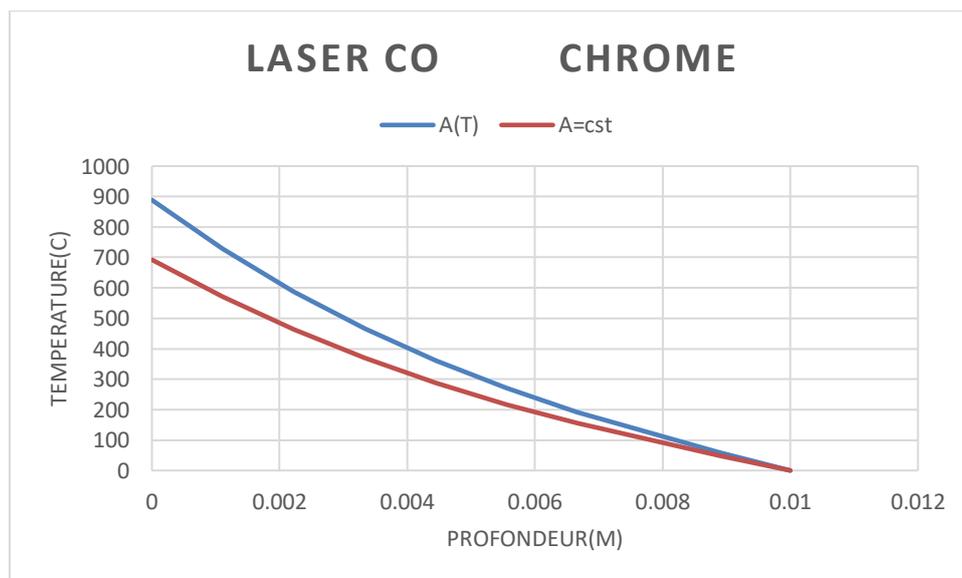
**Tableau III-2** variation de température pour A constante et A variable pour différentes profondeurs.

## Chapitre III : : EXTENSION DU MODELE Pour les lasers infrarouges



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

La figure III-7, représente l'évolution de la température en fonction du temps pour le chrome selon deux cas de l'absorptivité constante et variable selon la température superficielle pour le laser CO. Une simple analyse à la fin de la phase d'échauffement correspond à  $t = 1s$  la température superficielle maximale dans le cas de l'absorptivité variante augmente de 22.08% par rapport au cas où elle est constante.



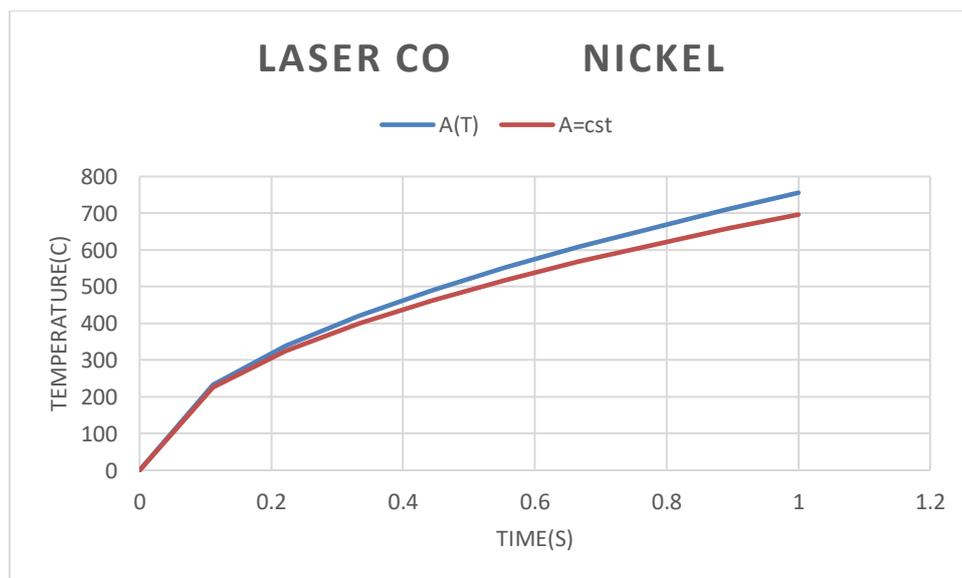
**Figure III-8** Profils de température superficielle en phase d'échauffement en fonction du temps, obtenus à  $A = cst$  et  $(T)$ , pour le chrome sous l'effet thermique du laser CO

## Chapitre III : : EXTENSION DU MODELE Pour les lasers infrarouges

La figure III-8, représente l'évolution de la température dans l'épaisseur de la pièce traitée en domaine à la fin de la phase de l'échauffement pour les deux modèles de l'absorptivité constante et variable en température dans le cas du laser CO la température superficielle maximale dans le cas de l'absorptivité variante augmente de 22.08 % par rapport au cas où elle est constante cet valeur diminuent de plus en plus que les profiles pénètre la profondeur de la pièce voir le tableau III-3 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 traité.

CHROME	A constante	A variable	Augmentation en %
Température (K°) x=0mm	692.4	888.7	22.08%
Température (K°) x=1.1mm	571.6	728.5	21.53%
Température (K°) x=4.5mm	288.7	360.9	20%

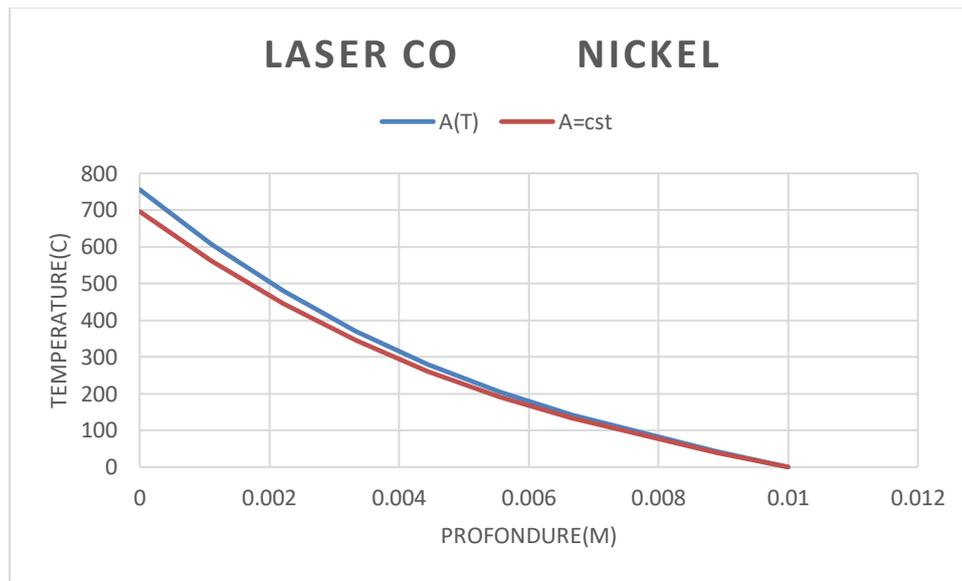
**Tableau III-3** variation de température pour A constante et A variable pour différentes profondeurs.



**Figure III-9** Profils de température superficielle en phase d'échauffement en fonction du temps, obtenus à A = cst et (T), pour le nickel sous l'effet thermique du laser CO

## Chapitre III : : EXTENSION DU MODELE Pour les lasers infrarouges

La figure III-9, représente l'évolution de la température en fonction du temps pour le nickel selon deux cas de l'absorptivité constante et variable selon la température superficielle pour le laser CO. Une simple analyse à la fin de la phase d'échauffement correspond à  $t = 1s$  la température superficielle maximale dans le cas de l'absorptivité variante augmente de 7.87% par rapport au cas où elle est constante.



**Figure III-10** Profils de température superficielle en phase d'échauffement en fonction du temps, obtenus à  $A = cst$  et  $(T)$ , pour le Nickel sous l'effet thermique du laser CO

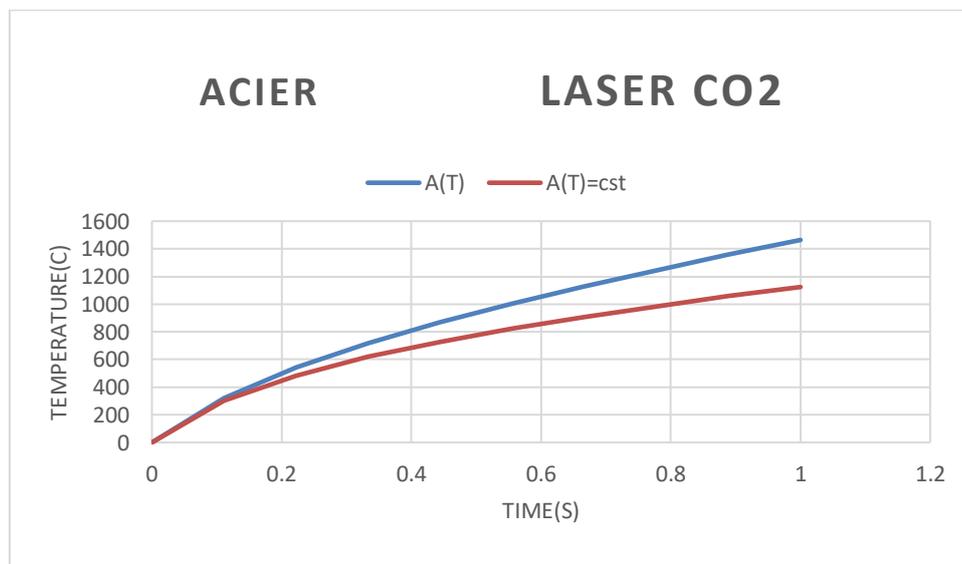
La figure III-10, représente l'évolution de la température dans l'épaisseur de la pièce traitée en domaine à la fin de la phase de l'échauffement pour les deux modèles de l'absorptivité constante et variable en température dans le cas du laser CO la température superficielle maximale dans le cas de l'absorptivité variante augmente de 7.87 % par rapport au cas où elle est constante cet valeur diminuent de plus en plus que les profiles pénètre 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 traité.

## Chapitre III : : EXTENSION DU MODELE Pour les lasers infrarouges

NICKEL	A constante	A variable	Augmentation en %
Température (C°) x=0mm	696.2	755.7	7.87
Température(C°) x=1.1mm	561.1	606.6	7.5
Température(C°) x=4.5mm	260.9	279.2	6.87

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

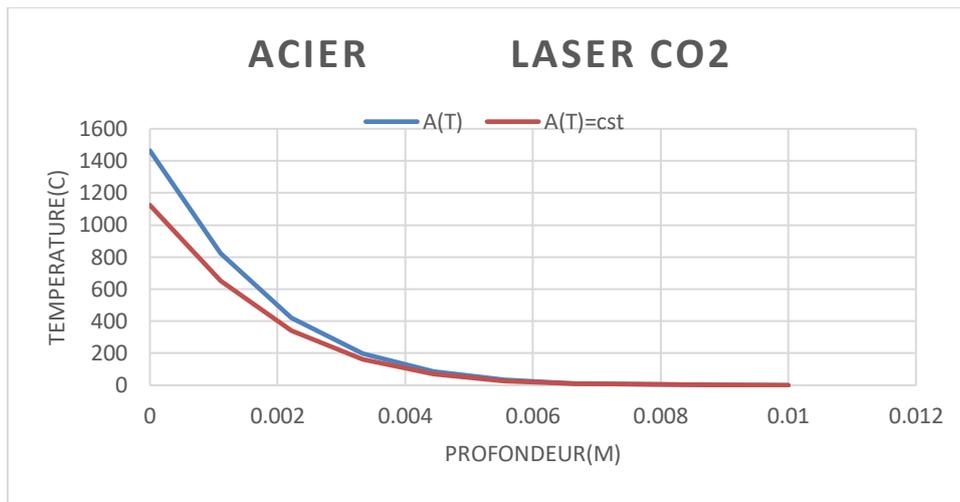
**Pour le laser CO2 :**



**Figure III-11** Profils de température superficielle en phase d'échauffement en fonction du temps, obtenus à A = cst et (T), pour l'acier sous l'effet thermique du laser CO2.

La figure III-11, représente l'évolution de la température en fonction du temps pour le nickel 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 = 1s la température superficielle maximale dans le cas de l'absorptivité variable augmente de 23.22% par rapport au cas où elle est constante.

## Chapitre III : : EXTENSION DU MODELE Pour les lasers infrarouges



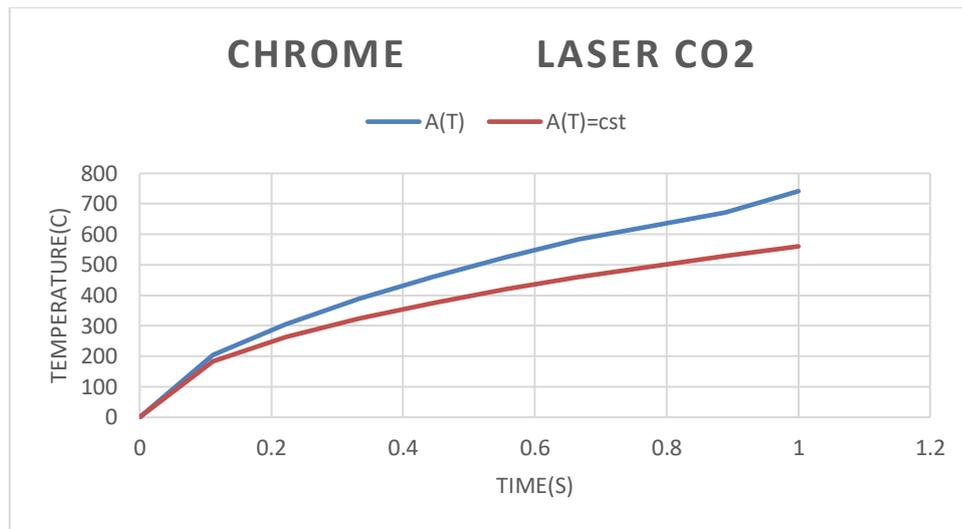
**Figure III-12** Profils de température superficielle en phase d'échauffement en fonction du temps, obtenus à  $A = \text{cst}$  et  $(T)$ , pour l'acier sous l'effet thermique du laser CO2.

La figure III-12, représente l'évolution de la température dans l'épaisseur de la pièce traitée en domaine a la fin de la phase de l'échauffement pour les deux modèles de l'absorptivité constante et variable en température dans le cas du laser CO2 la température superficielle maximale dans le cas de l'absorptivité variable augmente de 23.22 % par rapport au cas ou elle est constante cet valeur diminuent de plus en 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 a une influence directe sur la détermination de l'épaisseur de la couche traité.

ACIER CO2	A constante	A variable	Augmentation en %
Température (K°) $x=0\text{mm}$	1124	1464	23.22
Température (K°) $x=1.1\text{mm}$	650.11	822.1	20.92
Température (K°) $x=4.5\text{mm}$	70.81	83.83	15.63

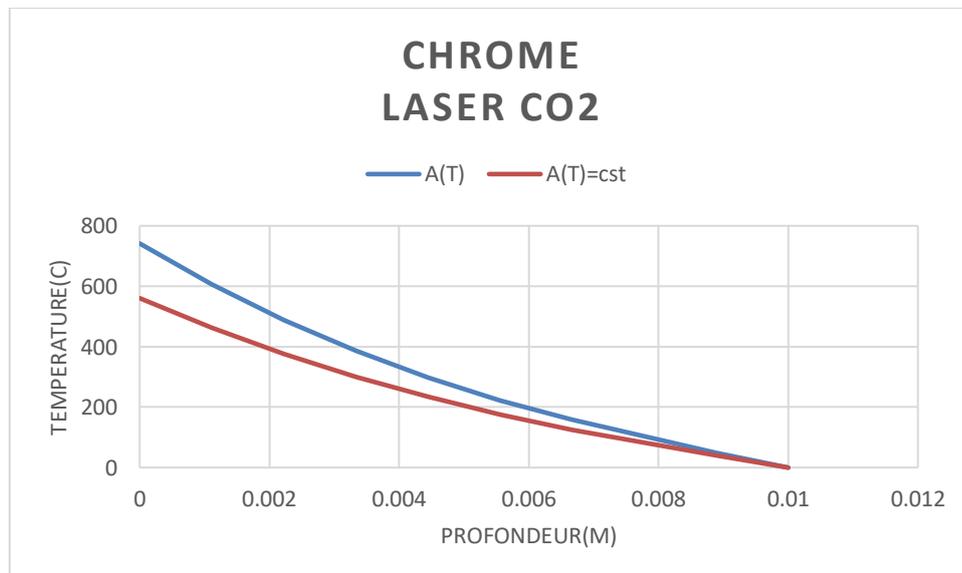
**Tableau III-5** variation de température pour A constante et A variable pour différentes profondeurs.

## Chapitre III : : EXTENSION DU MODELE Pour les lasers infrarouges



**Figure III-13** Profils de température superficielle en phase d'échauffement en fonction du temps, obtenus à  $A = \text{cst}$  et  $A(T)$ , pour le chrome sous l'effet thermique du laser CO2.

La figure III-13, représente l'évolution de la température en fonction du temps pour le nickel 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  $t = 1\text{s}$  la température superficielle maximale dans le cas de l'absorptivité variable augmente de 24.4% par rapport au cas où elle est constante.



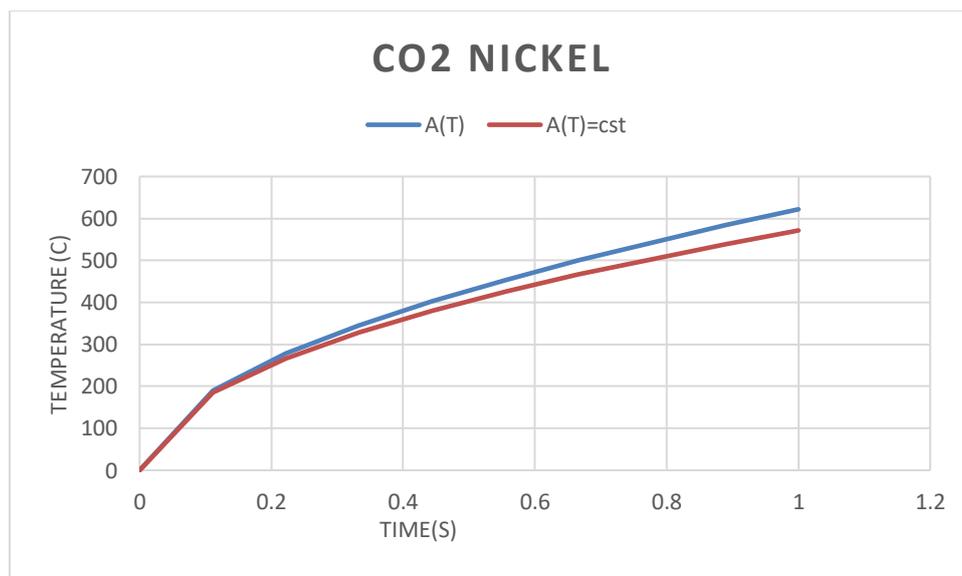
**Figure III-14** Profils de température superficielle en phase d'échauffement en fonction du temps, obtenus à  $A = \text{cst}$  et  $A(T)$ , pour le chrome sous l'effet thermique du laser CO2.

## Chapitre III : : EXTENSION DU MODELE Pour les lasers infrarouges

La figure III-14, représente l'évolution de la température dans l'épaisseur de la pièce traitée en domaine à la fin de la phase de l'échauffement pour les deux modèles de l'absorptivité constante et variable en température dans le cas du laser CO2 la température superficielle maximale dans le cas de l'absorptivité variable augmente de 24.4 % par rapport au cas où elle est constante cet valeur diminuent de plus en plus que les profiles 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 a une influence directe sur la détermination de l'épaisseur de la couche traité.

CHROME	A constante	A variable	Augmentation en %
Température (K°) x=0mm	560.6	741.6	24.4
Température (K°) x=1.1mm	462.9	606.1	23.62
Température (K°) x=4.5mm	233.7	298.1	21.6

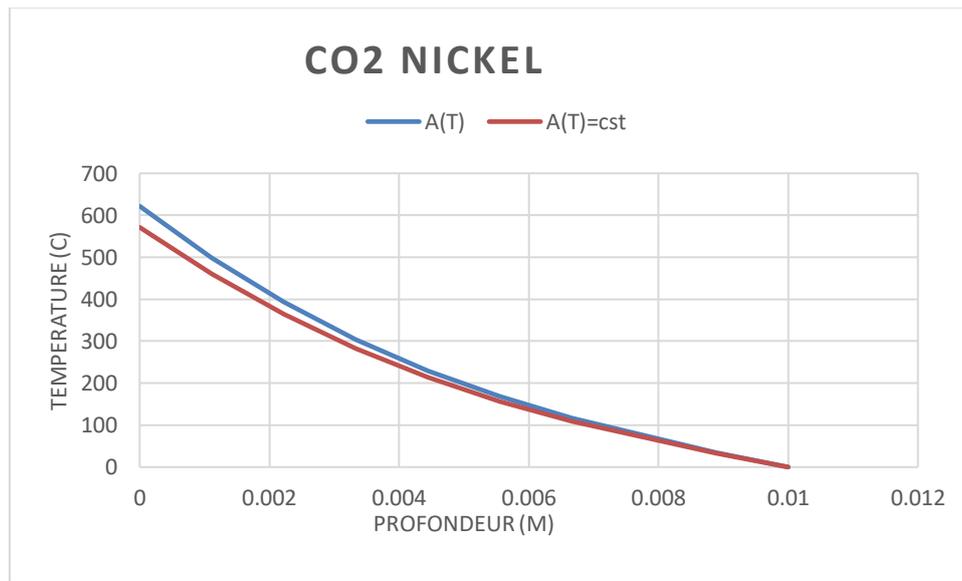
**Tableau III-6** variation de température pour A constante et A variable pour différentes profondeurs.



**Figure III-15** Profils de température superficielle en phase d'échauffement en fonction du temps, obtenus à A = cst et (T), pour le nickel sous l'effet thermique du laser CO20

## Chapitre III : : EXTENSION DU MODELE Pour les lasers infrarouges

La figure III-15, représente l'évolution de la température en fonction du temps pour le nickel 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  $t = 1s$  la température superficielle maximale dans le cas de l'absorptivité variable augmente de 8.1% par rapport au cas où elle est constante.



**Figure III-16** Profils de température superficielle en phase d'échauffement en fonction du temps, obtenus à  $A = cst$  et  $(T)$ , pour le Nickel sous l'effet thermique du laser CO2.

La figure III-16, représente l'évolution de la température dans l'épaisseur de la pièce traitée en domaine à la fin de la phase de l'échauffement pour les deux modèles de l'absorptivité constante et variable en température dans le cas du laser CO2 la température superficielle maximale dans le cas de l'absorptivité variable augmente de 8.1 % par rapport au cas où elle est constante cet valeur diminuent de plus en plus que les profiles 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 a une influence directe sur la détermination de l'épaisseur de la couche traité.

## Chapitre III : : EXTENSION DU MODELE Pour les lasers infrarouges

NICKEL	A constante	A variable	Augmentatio n en %
Température e (K°) x=0mm	571.4	621.8	8.1%
Température e (K°) x=1.1mm	460.5	499	7.71%
Température e (K°) x=4.5mm	214.1	229.5	6.7%

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

### III. comparaison entre les deux laser CO2 et CO

TEMPERAT URE a x= 0	LaserCO2	LASER CO	Pourcentage %
<b>ACIER</b>	<b>1464</b>	<b>1826</b>	<b>19.82</b>
<b>NICKEL</b>	<b>621.8</b>	<b>755.7</b>	<b>17.71</b>
<b>CHROME</b>	<b>741.6</b>	<b>888.7</b>	<b>16.55</b>

**Tableau III .8** variation de la température selon le type de laser

Dans le tableau III-8 on a comparé les deux lasers CO2 et CO sur le même matériau et condition, comme on le voit sur l'acier la température de laser CO est supérieure de 19.82% que celle de laser CO2, la même chose pour le Nickel la température de laser CO est supérieure de 17.71 % que celle de laser CO2. Et aussi pour le Chrome la température avec le laser CO augmente de 16.55%qu'avec le laser CO2

Et on constate que le laser CO est plus puissant que le laser CO2 comme on l'a vu sur le tableau III-8.

## Chapitre III : : EXTENSION DU MODELE Pour les lasers infrarouges

---

### Conclusion

Dans ce chapitre on a proposé un modèle qui permet de résoudre l'équation de la chaleur non linéaire due à l'absorptivité dépendante de la température sous l'équation de Bramson dans un domaine unidimensionnel sous l'effet de flux thermique imposé.

Pour cela on a utilisé la commande pdepe sous Matlab pour résoudre notre modèle mathématique, on étudier trois types de matériau (Acier, Nickel, Chrome) sous l'effet de deux types de lasers (CO<sub>2</sub>, CO).

On a réalisé grâce au résultat obtenu que la température superficielle maximal sous l'effet des deux laser (CO<sub>2</sub>, CO) dans le cas de l'absorptivité variable augmente par rapport au cas où elle est considérée constante et l'écart entre les deux cas diminue de plus en plus que le profil pénètre dans la profondeur de la pièce étudié.

On a conclu que le laser CO est plus puissant que le laser Co<sub>2</sub>.

## Conclusion générale

Plusieurs facteurs dans le traitement thermique par laser influencent sur l'énergie optique absorbée par le matériau : l'angle d'incidence, la longueur d'onde du laser, l'irradiance, la vitesse d'avance, le type du matériau et ses paramètres thermiques (capacité, conductivité, densité, diffusivité, et la résistivité électrique) et le fini de surface. L'impacte réuni de ses facteurs prend part a la définition d'un coefficient d'absorption de la puissance optique du laser par la surface.

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

Peut de travaux ont considéré l'absorptivité comme paramètre variable sous une forme non linéaire.

Dans notre travail on a proposé un modèle numérique qui permet de résoudre l'équation de chaleur non linéaire due à l'absorptivité dépendante de la température sous la loi de BRAMSON dans un domaine unidimensionnel sous l'effet du flux thermique laser imposé. On a utilisé trois types de matériaux l'acier, le chrome et le nickel sous l'effet de deux types de laser CO<sub>2</sub> et CO

Pour résoudre notre problématique on a utilisé la commande pdepe sous Matlab qui résout les équations paraboliques et elliptiques. Les résultats sont relevés et discutés.

## Références Bibliographique

- [1] centre de traitement de matériaux avancés livres blancs techniques et publications.
- [2] **Nicolas treps**, fabien bretenaker, le laser : 50 ans de découvertes, EDP Science, 2010
- [3] Animation applications et recherches liées au laser et a la physique quantique (Université paris Sud).
- [4] laserex2020.com
- [5] TPE LASER, en quoi le laser constitue-t-il une grande avancée technologique et médicale 2014.
- [6] **SEWAY, Raymond A.** (1992). Physique III : optique et physique moderne, 3<sup>ème</sup> édition, Laval, édition études vivantes.
- [7] **AZOUT Samir. KHOULALENE Khaled.** Modélisation superficielle du durcissement D'ingénieur, Vol. MD1, N°. M1180, (1999). Superficiel par un faisceau laser pulser. 2012.2013
- [8] **Laurens P, et al.**, « Application des lasers aux traitements de surface », Techniques d'ingénieur, Vol. COR2, N°. M1643, (1996)
- [9] **AMINA LAMRAOUI**<<TRAITEMENT DE SURFACE PAR TEXTURATION LASER>>THESE DE DOCTORAT À l'université de technologie de Belfort Montbéliard.
- [10] **Gabriel c. guillemette** MODÉLISATION DU PROCÉDÉ DE TREMPE AU LASER APPLIQUÉ À DES COMPOSANTES MÉCANIQUES COMPLEXES, Mémoire présenté dans le cadre du programme de maîtrise en ingénierie à l'université de Rimouski.
- [11] **Ludovic avril**, élaboration de revêtement sur acier inoxydable, thèse de doctorat a lecole national d'arts et métiers centre d'Angers, 2003.
- [12] Cours de Génie de Surfaces : Traitements par trempe superficielle.
- [13] **Reed R.C et al.**, «Laser pulse heat treatment: Application to reustenitisation from ferrite cementite mixtures », material science and engineering, A232, (juin 1997), pp. 140-149

[14] **Xu X. et al.**, «Nanosecond time resolution thermal emission measurement during pulsed laser interaction with materials », *Applied Physics A*, Vol.62, (1996), pp.51-59

[15] **Ignatiev M.B. et al.**, «Surface temperature measurements during pulsed laser action on metallic and ceramic materials », *Applied Surface science*, (1996), pp.505-512

[16] **Theodore L. and all**, « Fundamentals of heat and mass transfer » seventh edition, JOHN WILEY & SONS, (2011), pp.1047

[17] **pashby I.R et al** surface hardening of steel using a hight power diode laser. *Journal of Materials processing technology* 2003.

[18] **Carslaw et Jeager 1959**. *Conduction of Heat in solids*. 2e édition oxford university press. 510 p.

[19] **KOMANDURI, R. et Z.B. HOU**. 2001. « Thermal analysis of the laser surface transformation hardening process ». *International Journal of Heat and Mass Transfer*, volume 44, numéro 15, pp. 2845-2862.

[20] **KOMANDURI, R., Z. B. HOU**. 2004. Thermal analysis of laser surface transformation hardening optimization of process parameters. Oxford : Elsevier. 18 p.

[21] international journal of thermal science volume 41, issue 11, November 2002 p1055-1066

[22] **D. KEHEMAIRE er E. LUNEVILLE** simulation numérique et contrôle de la trempe superficielle des aciers par laser CO2

[23] **ION, J. C. et L. M. ANISDAHL**. 1997. « A PC-based system for procedure developement in laser transformation hardening ». *Journal of Materials Processing Technology*, volume 65, numéro 1-3, pp. 261-267.

[24] **S. MARTÍNEZ, E. UKAR, A. LAMIKIZ et F. LIEBANA**. 2010 « Laser hardening prediction tool based on a solid-state transformations numerical model ».

Dans *International Conference on Advances in Materials and Processing Technologies*.

(Paris, France, 24-27 Octobre 2010), pp. 1594-1599. Melville, New York: American Institute of Physics.

[25] **G .C.Guillemette et J.Brousseau** modeling of heat durind laser transformation hardening of steel A basic approach using COMSOL. University Rimouski, Quebec. 2012

[26] **KOU, Sindo, D. SUN et Y. LE.** 1983. « A Fundamental Study of Laser Transformation Hardening ». *Metallurgical and Materials Transactions A*, volume 14, numéro 3, pp. 643-653

[27] **Know H, et al** school of mechanical and aerospace engineering, Seoul national university, Seoul 151-742, republic of Korea agency for defense development, daejeon305-600, Republic of Korea

[28] **N,Boutalbi, Bouaziz et M. Allouche** influence of temperature-dependent absorptivity on solid surface heated by CO2 and ND:YAG lasers ,journal of laser applications ,volume28,number3.

[29] **A.hamoudi er I.Zeouagui** interaction thermique superficielle non linéaire, laser-matériau ,Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de master université de Bejaia

[30]**A.M.deus et Villar** one-dimensional thermal model including dependence of absorptivity on temperature using Hagen-Rubens, institut supérieur technique de Lisbonne Portugal .

## **Résumé :**

Le laser est devenu l'une des bases de la technique moderne. Grâce à son importance et à son efficacité à réaliser des produits qui ne s'usent pas, résistent à la corrosion, conservent dans le temps leurs propriétés mécaniques, électriques, optiques ou thermiques...

Afin d'améliorer les propriétés superficielles du matériau le traitement superficiel par laser apparaît comme un procédé dont les spécificités offrent d'intéressantes perspectives comme le traitement localisé, le temps de traitement réduit, déformation faible, possibilité d'automatisation du procédé.

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

On a utilisé la commande pdepe sous Matlab où des résultats sont relevés et discutés pour trois types de matériaux l'acier le chrome et le nickel sous l'effet de deux types de lasers CO<sub>2</sub> et CO.

## **Abstract :**

The laser has become one of the foundations of modern technology. Thanks to its importance and efficiency, it is possible to produce products that do not wear out, are corrosion resistant and retain their mechanical, electrical, optical or thermal properties over time...

In order to improve the surface properties of the material, laser surface treatment is a process whose specificities offer interesting perspectives such as localized treatment, reduced treatment time, low deformation, possibility of process automation.

The numerical model we are talking about allows to solve the equation of non-linear heat due to temperature absorptivity dependent on the BRAMSON equation in a one-dimensional domain under the effect of the imposed laser heat flux.

The pdepe control under Matlab was used where results are recorded and discussed for three types of materials steel chromium and nickel under the effect of two types of CO<sub>2</sub> and CO lasers.