UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA

2017-UYFM-LBMPT-……..

THÈSE DE DOCTORAT EN SCIENCES

Pour obtenir le grade de docteur en sciences de
l'Université Yahia Farès de Médéa
Spécialité : Génie des procédés

Présentée et soutenue publiquement par

Nadir BOUTALBI

Mars 2017

TRANSFERTS THERMIQUES NON LINEAIRES DES MATERIAUX PAR LASER

Directeur de thèse : **Mohamed Najib BOUAZIZ**

Jury

Dr. Salah HANINI	Professeur, Université Médéa	Président
Dr. Larbi LOUKARFI	Professeur, Université Chlef	Examinateur
Dr. Ali KHELIL	Maitre de conférences A, Université Chlef	Examinateur
Dr. Mohamed Najib BOUAZIZ	Professeur, Université Médéa	Directeur de Thèse

Laboratoire de Biomatériaux
et Phénomènes de Transport

THÈSE

DÉDICACE

.....À tous mes proches, ma famille et mes amis.

Nadir BOUTALBI

REMERCIEMENTS

Louange à ALLAH, Seigneur de l'univers, le tout Puissant, louange abondante, pure et bénie, qui m'a donné la force, le courage, l'endurance et la patience de bien mener ce travail.

Derrière ce travail se cache la présence, le support et l'ouverture d'esprit de mon directeur de thèse, le Professeur ***Mohamed Najib*** **BOUAZIZ**, à qui je dois énormément. Je tiens à le remercier de tout mon cœur de m'avoir sensibilisé à l'importance de la communication scientifique, et de m'avoir aidé et encouragé à réaliser ce travail.

C'est avec une certaine émotion et beaucoup de sincérité que je voudrais remercier toutes les personnes ayant soutenu et apprécié mon travail. Je remercie particulièrement et sincèrement du fond de mon cœur, Mr ***Salim*** **MESSAOUDI**, professeur à l'université de King Fahd of Petroleum and Minerals (Saudi Arabia), pour sa précieuse aide et pour ses conseils dans la réalisation de cette thèse.

Mes remerciements vont à :

- Monsieur : ***Salah*** **HANINI,** Professeur à Université Dr.Yahia Farès de Médéa, qui me fait l'honneur de présider mon jury de thèse.
- Au Professeur ***Larbi*** **LOUKARFI** et au Dr-Maitre de conférences (A) ***Ali*** **KHELIL**, de l'université Hassiba Benbouali de Chlef, pour avoir accepté de juger ce travail et de faire partie du jury, malgré leurs nombreuses obligations.

ملخص

النقل الحراري غير الخطي للمواد بواسطة الليزر

نظرا لدقة عملية المعالجة الحرارية بواسطة الليزر فإن لها استخدامات واسعة في الصناعة ، ولكون عملية التصنيع بالليزر ترافقها ظواهر فيزيائية و عملية معقدة ، فإن نمذجتها رياضيا تعطي مدخلا مساعدا للتحكم فيها ، بالإضافة لذلك فإن دراسات النمذجة تقلل من التكلفة المخبرية وتزود الدارسين بمعلومات وبيانات تقديرية لتحسين أداء عملية تسخين المعدن بدلالة المسافة و الزمن.

تنقسم هذه الدراسة إلى ثلاثة أقسام رئيسية :

- استعراض دراسة بلاكوول التي اعتمد فيها على حل تحليلي لأجل إيجاد دوال حقل الحرارة لعملية المعالجة الحرارية السطحية لجسم نصف لا محدود تحت تأثير منبع ليزري ثابت مع الزمن و شرط حدي للنقل الحراري بالحمل في اتجاه وحيد البعد ، وأتبع هذا العرض بدراسة موسعة لزوبير – شهودري لحالتين خاصتين للمنبع الطاقوي الليزري المرتبط بالزمن على شكلين، دالة أسية ونبضة ديراك .
- تطوير طريقة رقمية عامة تعتمد على التحويل العكسي للابلاس للحل المعقد الممثل بجداء الالتفاف المقترح في دراسة زوبير و شهودري ، وذلك بغية الحصول على الحلول في المجال الحقيقي للحرارة . تمكن هذه الطريقة من تحقيق ذلك عند المعالجة الحرارية لمجال واسع للأشعة الليزرية المرتبطة بالزمن خاصة الدورية منها، ذات الأهمية التكنولوجية في هذا المجال . تحققنا من تطابق النتائج مع الحالات الخاصة المشار إليها سابقا.
- تطوير النموذج القاعدي لبلاكوول للمعالجة الحرارية السطحية في الحالة الصلبة مع الأخذ بعين الإعتبار ارتباط الامتصاصية بالحرارة وفق نموذجين نظريين لـ هاجن روبنز باستخدام الليزر CO_2 و برامسون لكل الليزرات التي تبث في مجال الأشعة ما تحت الحمراء و كحالة خاصة Nd :YAG ، استخدمنا طريقة الفروق المنتهية لحل مشكلة الأثر اللاخطي الصريح لمعادلة الحرارة ، رفعت بعدها النتائج و نوقشت.

الكلمات المفتاحية : التفاعل ليزر– مادة ،المعالجة الحرارية السطحية ،المنبع الليزري المرتبط بالزمن ، النمذجة ، الإمتصاصية المرتبطة بالحرارة.

RÉSUMÉ

TRANSFERTS THERMIQUES NON LINEAIRES DES MATERIAUX PAR LASER

La technique du traitement thermique par laser est largement étendue dans l'industrie due à sa précision d'opération et de traitement local. Puisque l'usinage par laser comporte des phénomènes physiques complexes, la modélisation mathématique de ce processus donne une aide perspicace aux opérations d'usinage. D'ailleurs, la modélisation mathématique réduit le coût expérimental et prédit les meilleures données paramétriques pour l'optimisation du chauffage du matériau en temps et en espace.

La présente étude est divisée en trois sections et actions principales :

- L'analyse d'une solution analytique dérivée par Blackwell pour déterminer les profils de température du processus de traitement thermique superficiel d'un corps semi-infini recevant sur sa face latérale un faisceau Laser temporellement constant et soumis à une condition de frontière convective suivant une direction unidimensionnelle. Cet examen est complété par l'extension de Zubair et Chaudhry dédiée aux deux cas spécifiques de sources laser dépendantes du temps l'une de type exponentiel et l'autre sous forme de l'impulsion de dirac.
- Le développement d'une méthodologie numérique générale basée sur l'inversion des solutions se présentant en produits de convolution dans le domaine de Laplace, en solutions de températures réelles. Cette procédure a permis le traitement des signaux lasers périodiques , les résultats sont validés pour les cas précédents.
- L'extension du modèle de base de Blackwell pour le traitement thermique superficiel en phase solide en considération de la dépendance de l'absorptivité avec la température selon deux modèles empiriques de Hagen- Rubens pour le laser CO_2 et le modèle de Bramson pour les lasers émettant dans l'infrarouge en particulier le Nd : YAG. Le problème résultant est fortement non linéaire, et une approche numérique basée sur la méthode des différences finies est adaptée pour la résolution, L'effet de la dépendance de l'absorptivité en température est relevé et discuté.

Mots clés : Interaction laser-matière, traitement thermique superficiel, source Laser dépendante du temps, modélisation, absorptivité température-dépendante.

ABSTRACT

NONLINEAR HEAT TRANSFERS OF MATERIALS BY LASER

The laser heat treatment technique is widely spread in industry due to its precision of operation and local treatment. Since the laser machining includes complex physical processes, the modeling of laser induced heating gives insight into the involved physical processes. Moreover, mathematical modeling studies reduce experimental cost and provide parametric data for material heating optimization in time and place.

The present study is divided into three main sections:

- The analysis of an analytic solution derived by Blackwell to determine temperature profiles for the surface heat treatment process of a semi-infinite body receiving on its lateral side a laser beam temporarily constant and subjected to a convective boundary condition in a unidimensional direction. This examination is completed by the extension of zubair and chaudhry dedicated exclusively in two specific cases of laser sources dependent on time one of an exponential type and the other on Dirac delta function

- The development of a general numerical methodology based on the inversion of the solutions present in the Laplacian convolution product in solution of real temperatures. This procedure allowed the treatment of periodic laser signals and the results are validated for the previous cases.
- An extension of the basic model of BLACKWELL for the heat treatment of surface material in solid phase, with consideration of absorbtivity temperature dependence according to two empirical models, HAGEN- RUBENS in the case of CO_2 laser, followed by an extension depending on the Bramson's model for the laser emitted in the infrared, particularly the Nd:YAG , the result for the problem is strongly nonlinear. Therefore, a numerical approach based on the finite difference method is adapted to the resolution; the effect of absorptivity temperature-dependent is obtained and discussed.

Keywords: Laser-matter interaction, superficial heat treatment, laser source time-dependent, modeling, absorptivity temperature-dependent.

TABLE DES FIGURES

Figure *I .1*	Mécanisme d'un laser	**8**
Figure I .2	Applications du laser selon la densité d'énergie et le temps d'interaction	**12**
Figure I .3	Cycle de traitement thermique superficiel crée par un laser	**17**
Figure I .4	Evolution des microstructures et des duretés en fonction des températures lors d'un traitement laser	**18**
Figure I .5	Micrographie optique révélant la zone affectée par la trempe laser (× 100)	**18**
Figure I .6	Micrographie électronique à balayage de la martensite dans les trois zones (×10000)	**18**
Figure III .1	Schématisation du modèle de BLACKWELL	**31**
Figure III.2	Profil de température adimensionnel en fonction de χ pour différentes valeurs de Bi et τ [50].	**34**
Figure III.3	Profil de température adimensionnel en fonction de τ pour différentes valeurs de χ et ω	**35**
Figure IV.1	Commutation intra cavité	**43**
Figure IV.2	Organigramme de calcul	**47**
Figure V.1	Modèles d'absorptivité température-dépendante	**51**
Figure VI.1	Validation de notre modèle avec le modèle de BLACKWELL (Phase d'échauffement).	**61**
Figure VI.2	Validation de notre solution avec ZUBAIR et CHAUDHRY pour la source de type instantanée (impulsion de Dirac)	**61**
Figure VI.3	Validation de notre solution avec ZUBAIR et CHAUDHRY pour la source de type exponentiel (Phase d'échauffement)	**62**
Figure VI.4	Validation de notre solution avec celui de BLACKWELL (Phase de refroidissement)	**62**
Figure VI.5	Profils de température pour différentes sources laser pour x = 0.0 mm	**65**
Figure VI.6	Profils de température pour différentes sources laser pour x = 1 mm, x =2 mm et x = 3 mm	**66**
Figure VI.7	Profil de la température $T_{max}(1400°C, t_0)$ en rapport à la profondeur pour différentes sources laser	**68**
Figure VI.8	Approximation de l'épaisseur minimale du matériau traité pour les différentes sources laser	**69**
Figure VI.9	Approximations des profondeurs maximales austénisées, pour les différentes sources laser	**71**
Figure VI.10	Profils de température superficielle pour différentes valeurs de I_0 , pour une répartition énergétique laser type signal dents de scie	**73**

TABLE DES FIGURES

Figure VI.11	Effet de différentes valeurs de l'intensité sur la profondeur, à la fin de la phase d'échauffement	**75**
Figure VI.12	Approximation de l'épaisseur minimale du matériau traité pour les différentes I_0 pour un signal laser type dents de scie	**76**
Figure VI.13	Approximation de l'épaisseur maximale austénisée pour les différentes I_0 et pour un signal laser type dents de scie	**77**
Figure VI.14	Approximation de l'épaisseur maximale austénisée pour les différentes I_0 et pour un signal laser type dents de scie	**78**
Figure VI.15	Évolutions de températures en profondeurs pour différents matériaux à t=0.4s	**79**
Figure VI.16.a	Profils de température en fonction de χ , obtenus à partir de la solution analytique et la prédiction numérique	**80**
Figure VI.16.b	Profils de température en fonction de τ, obtenus à partir de la solution analytique et la prédiction numérique	**81**
Figure VI.17.a	Comparaison des profils de température en fonction de χ , obtenus à $A = cst$ pour les modèles H -R et BRAMSON sou laser CO_2	**82**
Figure VI.17.b	Comparaison des profils de température en fonction de τ, obtenus à partir de l'absorptivité constante selon les modèles H-R et BRAMSON	**83**
Figure VI.18.a	Profils de température en phase d'échauffement selon χ, à $A = cst$ et à $A(\theta)$, selon les modèles H-R et BRAMSON, sous laser CO_2	**84**
Figure VI.18.b	Profils de température en fonction de temps adimensionnel obtenus à $A = cst$ et $A(\theta)$ pour les modèles H-R et BRAMSON, sous laser CO_2	**84**
Figure VI.19.a	Profils de Température en phase d'échauffement en fonction de χ, obtenus à $A = cst$ et $A(\theta)$ selon le modèle de Bramson sous laser Nd : YAG	**85**
Figure VI.19.b	Profils de Température en phase d'échauffement en fonction de τ, obtenus à $A = cst$ et $A(\theta)$, selon le modèle de Bramson sous laser Nd : YAG.	**86**
Figure VI.20.a	Profils de température en fonction de temps adimensionnel, pour $A(\theta)$ selon les modèles H -R et BRAMSON pour le Laser CO_2.	**87**
Figure VI.20.b	Profils de température en fonction de χ , pour $A(\theta)$ selon les modèles H –R et BRAMSON pour le Laser CO_2.	**87**

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I .1	Les caractéristiques principales des lasers les plus utilisés dans l'usinage	***10***
Tableau I .2	Applications du laser selon la densité d'énergie et le temps d'interaction	**13**
Tableau I.3 a	Types de traitement thermique superficiel par laser	**14**
Tableau I.3 b	Schémas pour types de traitement thermique superficiel par laser	**15**
Tableau I.4	Quelques caractéristiques de traitement thermique superficiel par laser CO_2	**16**
Tableau IV.1	Différentes types des signaux lasers	**44**
Tableau V.1	Les propriétés du substrat utilisées dans la simulation [21]	**58**
Tableau VI.1	Les caractéristiques thermo physiques du substrat et du faisceau laser [98-99]	**60**
Tableau VI.2	Les caractéristiques thermo physiques du substrat Type acier [100]	**63**
Tableau VI.3	Caractéristiques de la source laser	**63**
Tableau VI.4	Valeurs du temps nécessaire pour différentes sources laser, pour atteindre la température $T_{x=0}$=1400°C	**67**
Tableau VI.5	Valeurs de la température pour quelques profondeurs, avec $T_{x=0}$=1400°C pour les différentes sources laser	**67**
Tableau VI.6	Valeurs Approximative de l'épaisseur minimale critique du matériau traité pour les différentes sources laser	**70**
Tableau VI.7	Valeurs de profondeur austénisée, pour les différentes sources lasers	**71**
Tableau VI.8	Représentation mathématique du signal laser type dents de scie	**72**
Tableau VI.9	Temps de l'interaction LM, lors de traitement thermique pour les différentes valeurs de l'intensité I_0	**73**
Tableau VI.10	Valeurs de température à quelque profondeur à la fin de la phase d'échauffement pour les différentes intensités I_0	**74**
Tableau VI.11	Approximation d'épaisseur critique exigée et l'épaisseur maximale austénisée du matériau traité	**77**
Tableau VI.12	Propriétés de différents matériaux utilisés dans la simulation [32].	**78**

LISTE DES SYMBOLES

Symboles Latins

A : *Absorptivité* $[-]$

a : *Coefficient de température* $\left[K^{-1}\right]$

Bi : *Nombre de Biot* $[-]$

Cp : *Capacité thermique* $[J/KgK]$

$erfc(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_x^{\infty} e^{-t}dt$: *Fonction d'erreur complimentaire*

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

I_0 : *Pic de l'intensité laser* $\left[W.m^{-2}\right]$

$\dot{I}_0$: *Intensité de la source laser* $\left[W.m^{-2}\right]$

k : *Conductivité thermique* $\left[W.m^{-1}K^{-1}\right]$

p : *Variable de transformée de LAPLACE* $[-]$

$\dot{q}$: *Source interne générée par laser* $\left[W.m^{-3}\right]$

R : *Réflectivité* $[-]$

t: *Temps* $[s]$

T: *Température* $[K]$

x : *Distance* $[m]$

w : *Énergie laser adimensionnelle absorbée à la surface* $[-]$

Symboles grecs

χ: *Distance réduite* $[-]$

α: *Diffusivité thermique* $\left[m^2/s\right]$

τ : *Temps réduit* $[-]$

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

$\overset{*}{\beta} = \beta t$, $\overset{*}{\gamma} = \gamma t$: *Paramètres adimensionnels de la pulsation laser* $[-]$

ρ: *Densité* $\left[Kg/m^3\right]$

θ : *Température adimensionnelle* $[-]$

μ: *Coefficient d'absorption* $[1/m]$

Abréviations

TTL : Traitement thermique par laser
LM :Laser-matière
H-R : HAGEN - RUBENS

INTRODUCTION GENERALE

1. Contexte de l'étude et problématique

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... Pour ce faire, et 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.

Il existe de multiples techniques de traitement de surface. Plusieurs font appel à une modification de la microstructure des matériaux même : grenaillage, fusion de surface, trempe superficielle…. D'autres impliquent un changement de composition de la surface, on pense ici à la nitruration cémentation, carbonitruration.

Le présent travail a pour contexte le durcissement superficiel à l'état solide qui est le traitement le plus étendu dans l'industrie de par les avantages de ce type de traitement par rapport aux autres employés, et que sont la faible distorsion relevée, les faibles contraintes thermiques induites dans le substrat, la définition exacte de la zone à traiter, une grande flexibilité et une bonne reproductibilité. Or, le durcissement superficiel de bonne qualité nécessite de contrôler l'évolution de la température spatiale et temporelle dans le substrat traité. Le besoin d'atteindre une haute température rend le contrôle de celle de la surface très important et toute modification de la zone traitée est sous la dépendance de cette température. C'est dire la sensibilité extrême de toute opération non couteuse et ciblée à la maitrise et à l'apport suffisant de chaleur.

En outre les traitements peuvent être introduits plus rapidement dans le sens de la recherche d'une précision rehaussée et d'une commande de contrôle de processus. Dans ce sens, le laser est devenu l'une des bases de la technologie moderne, grâce à son importance et à son efficacité de réaliser, ce que les autres sources d'énergie sont incapables de le faire, en particulier dans le traitement thermique des matériaux, combiné aux méthodes les plus efficaces de quantification, de contrôle et de mesure.

Plusieurs méthodes expérimentales utilisent des appareils et des méthodes techniques pour déterminer le profil de température, donnée essentielle, ainsi que la microstructure du

durcissement tel le thermocouple, le pyromètre ….Ces techniques expérimentales ont des inconvénients considérables :

- Ce sont des techniques coûteuses.
- Présentent des difficultés de mesure de la température en profondeur.
- Certaines grandeurs par ces techniques ne peuvent tout simplement pas être connues ou alors de manière très indirect par exemple, le gradient thermique, la vitesse locale de refroidissement, le temps local de solidification…
- Ne peuvent pas prédire les propriétés du substrat en cours et post-traitement, ce qui pose une difficulté de contrôle de procédé.

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

Plusieurs modèles existent pour l'obtention des profils de température, et elles sont plus ou moins complexes, avec une précision de prédiction plus ou moins satisfaisante, mais elles reposent en général sur des hypothèses non réalistes. Dans cette aire, le modèle de BLACKWELL **[50]** incorporant une condition convective à la surface d'interaction matériau-source de traitement a émergé puisqu'il permet d'expliquer l'enlèvement explosif de la matière sous un faisceau laser intense.

Ce modèle intéressant n'a pas reçu les extensions nécessaires aux multiples problèmes posés, telles les réponses aux sollicitations thermiques pour des impulsions lasers périodiques, actuellement en cours d'expérimentation, d'une part, et les multiples non-linéarités induites par les paramètres du laser, à l'instar de l'absorptivité considérée classiquement constante à ces hautes températures, d'autre part.

On se propose dans cette thèse, d'apporter les éclairages utiles à ces deux tendances, la première étant une nouveauté technologique qu'il est nécessaire de mesurer l'intérêt potentiel. La seconde constitue une correction de taille du modèle permettant de repérer les limites du choix d'une absorptivité indépendante de la température sur les profils.

2. Objectifs de la thèse et organisation du manuscrit

Dans cet essai, on a étudié le modèle de base développé par BLACKWELL **[50]** suivi d'une extension de ZUBAIR et CHAUDHRY **[55]**, construite à partir des mêmes hypothèses de modèle précédent. Ils se différencient dans le type de la source particulière. Les solutions analytiques seront exposées pour la bonne compréhension des résultats.

Cette étude préliminaire constitue notre base pour le développement d'une approche numérique et semi analytique suivant une gamme large de la source laser variable en temps, pour étudier l'influence de la répartition énergétique sur le traitement de surface, ainsi que d'autre paramètres tels que la densité énergétique, le coefficient de convection thermique, et enfin l'effet de la non linéarité de l'absorptivité du faisceau laser.

La validation de la démarche proposée nécessite une comparaison de nos résultats à ceux de la littérature. A cet effet, la solution de BLACKWELL est utilisée à bon escient pour tous les résultats numériques obtenus.

La thèse est structurée selon les chapitres suivants :

Ce document présente dans un premier temps deux chapitres décrivant l'état de l'art du sujet et les connaissances détaillées et fondamentales pour répondre à la problématique.

Le **premier chapitre** à caractère général fournit une généralité sur les lasers, leurs fonctionnements, leurs caractéristiques, leurs applications d'usinage, et enfin les différents procédés de TTL avec un aperçu sur le durcissement superficiel en phase solide. De même, les techniques de leur contrôle, soit expérimentales par les instruments, ou théoriques par la modélisation mathématique seront exposées.

Le **deuxième chapitre** contient une revue des modèles analytiques et numériques développés pour l'étude de TTL.

Le **troisième chapitre**, constitue un recueil détaillé du modèle de BLACKWELL, qui repose sur la résolution de l'équation de la chaleur pour une source laser d'intensité constante, selon des conditions initiales et aux limites convectives et qui représente l'effet de non linéarité de l'équation gouvernante de TTL, via la température de surface induite. Une résolution analytique de l'équation pour le profil de température est obtenue ainsi que la représentation graphique. Dans le même ordre, une description de l'étude de ZUBAIR et

CHAUDHRY est abordée, cette dernière représente une extension du modèle de BLACKWELL pour des sources laser temporellement dépendants, suivi par une critique relative aux limites d'analyse mathématique de cette étude, eu égard à la complexité des sources Lasers variables en temps disponibles et utile dans le TTL moderne.

Le **quatrième chapitre**, consiste en une contribution par extension du modèle de BLACKWELL via celle de ZUBAIR et CHAUDHRY, pour une large gamme de la source Laser variable en temps, en l'occurrence celle des signaux lasers périodiques. Il est développé une méthode semi analytique spécifique en relation à l'inversion des transformées de Laplace, image en temps irréel des températures incluant celles des sources complexes.

Dans le **cinquième chapitre**, une amélioration du modèle de BLACKWELL est introduite. Elle tient en compte de l'effet de la température sur l'absorptivité du matériau soumis à une incidence Laser. L'équation différentielle plus complexe de la chaleur qui décrit le phénomène de TTL devienne fortement non linéaire, et une approche numérique en différences finies est développée pour résoudre le problème plus réaliste posé.

Outre l'implémentation des approches mathématiques précédentes, le **sixième chapitre** est dédié aux discussions des résultats obtenus, tout en se focalisant sur :

- Les validations des résultats en accord avec ceux de base analytiques cités.
- Réponse de différentes sources périodiques en temps des impulsions laser.

De plus, on examine :

- Influence de la variation de l'intensité laser I_0 sur les profils.
- Influence de type de matériau sur l'opération de TTL.
- Influence du l'effet de la non linéarité due à l'absorptivité du faisceau laser suivant deux modèles empiriques, ceux de HAGEN-RUBENS et BRAMSON valables pour les types de lasers.

Une conclusion générale ainsi que les perspectives complémentaires à ce travail seront émises.

CHAPITRE I

Les lasers et leurs applications au traitement de surface

I.1 Généralités historiques sur les lasers

Dans cette thèse, nous nous sommes penchés sur la technologie récente du laser. Ces développements méritent une connaissance plus ou moins succincte de la chronologie ayant conduit à cette explosion des applications du laser.

L'histoire du laser est particulièrement intéressante. Elle débute, comme presque tout en physique du XX^{ème} siècle. En 1917, Einstein démontre qu'il existe trois types d'interaction entre la lumière et la matière, Les deux premiers types déjà connus sont l'absorption de la lumière par la matière et l'émission spontanée de la lumière par la matière excitée. Einstein découvre que le processus d'absorption peut être inversé pour devenir un second type d'émission : l'émission *stimulée* (production sur commande d'un photon par un électron) est la première application pratique et ne voit le jour qu'à la fin de l'année 1953, dans le domaine des micro-ondes : il s'agit du Maser (acronyme de *Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation*). Si le premier Maser est l'œuvre d'une équipe de physiciens américains, composée notamment de **Charles Townes** et **Arthur Schawlow**, les bases de cette technologie sont également développées parallèlement et indépendamment par une équipe russe constituée par **Aleksandr Prokhorov** et **Nicolaï Bassov**, qui réalisent à leur tour un Maser au début de l'année 1954. Cependant, la réalisation de Masers optique ou infrarouge, c'est-à-dire de Lasers, reste un défi pour la communauté scientifique.

En 1957, **Townes** commença à considérer les problèmes reliés à la fabrication d'un dispositif semblable au Maser, mais émettant du rayonnement infrarouge ou de la lumière visible. En collaboration avec **Arthur Schawlow**, il publia les premières propositions détaillées de Masers optiques. Ils considérèrent alors l'utilisation d'une cavité résonante pour amplifier la lumière. Ils déposèrent une demande de brevet en 1958.

En 1960, ils obtinrent enfin le premier brevet de laser, mais celui-ci ne fut construit que plus tard **[1-3]**.Le premier laser fonctionnel fut fabriqué par **Theodore Maiman** en 1960 **[1-4]**.

Le mot laser, est l'acronyme de l'expression anglaise ***Light Amplification by Stimulâtes Emission of Radiation,*** qui signifie « Amplification de la lumière par émission stimulée de rayonnement », alors le LASER est une source lumineuse pouvant produire des éclairs très intenses.

Actuellement, le laser fait partie intégrante de nos vies sans que nous en soyons particulièrement conscients. Pourtant, on parle sans cesse de lecteur au laser, de pointeur laser, de correction de la vue au laser, d'épilation au laser… Pour de nombreuses applications,

les lasers sont en effet les seules sources envisageables, car leur émission peut surpasser de loin celle de leurs concurrentes thermiques par ses caractéristiques spatiale, spectrale, temporelle ou énergétique. Leurs fonctionnements et leurs caractéristiques et applications au domaine de traitement thermique sont étudiés de façon exhaustive dans plusieurs ouvrages **[5-12]**.

I. 2 Description générale

1.2.1 Principes de fonctionnement du laser

Un système laser comporte trois principales composantes qui sont les suivantes : un milieu actif, un mécanisme de pompage et un résonateur optique, et qui peut être schématisé de la façon suivante, *figure I.1*.

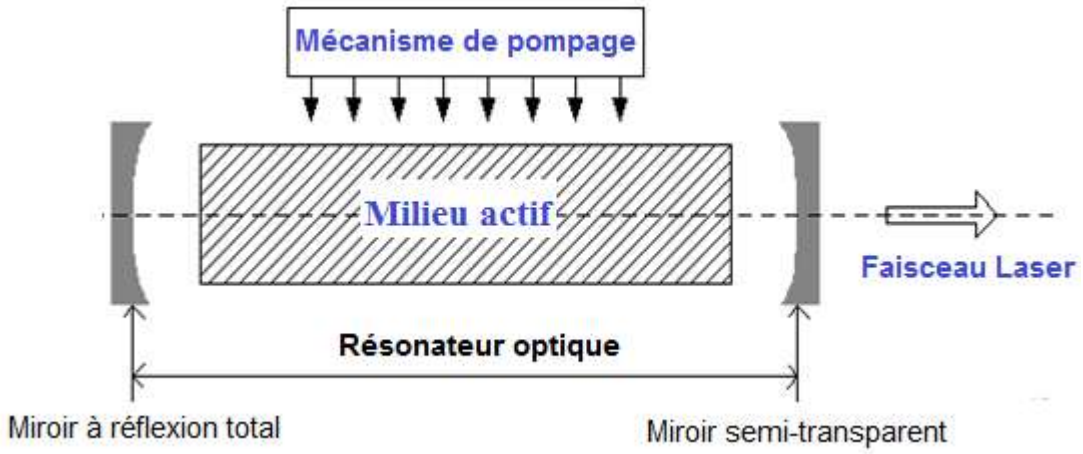


Figure I .1 : Mécanisme d'un laser

L'inversion de population favorise le processus d'émission stimulée. De cette manière, un photon se propageant dans le milieu actif a plus de chance de provoquer la désexcitation d'un atome excité que de se faire absorber par un atome au niveau inférieur. Il y a alors plus de photons produits par émission stimulée que de photons perdus dans différents processus d'absorption. Une réaction en chaîne peut alors se produire, entraînant une multiplication des photons dans le milieu actif. L'inversion de population contribue ainsi à l'amplification de la lumière dans le laser.

Cependant, ce processus n'est pas suffisant pour produire à lui seul un faisceau laser. C'est pourquoi le milieu actif est placé dans un résonateur optique, qui peut aussi être appelé cavité résonante. Le résonateur est constitué de deux miroirs parallèles entre lesquels est placé le milieu actif. Le premier miroir, le réflecteur, est totalement réfléchissant alors que le second, le coupleur, est semi-transparent. Il permet ainsi à la lumière de sortir de la cavité. Le résonateur contribue en grande partie à l'amplification de la lumière dans le laser. Les

photons, en étant réfléchis par les miroirs, peuvent traverser plusieurs fois le milieu actif et provoquer l'émission stimulée d'un plus grand nombre de photons. Lorsque le processus d'amplification se produit dans le laser, on dit qu'il oscille.

1.2.2 Caractéristiques remarquables de la lumière laser

Elles sont principalement :

· ***Mono chromaticité :*** La lumière issue d'un laser est pratiquement monochromatique (longueur d'onde très précise).

· ***Cohérence :***

- L'émission de lumière par un laser s'effectue par des trains d'onde très longs, beaucoup plus longs que ceux émis par une source ordinaire (bonne cohérence temporelle). Cela joue sur la mono chromaticité.

- Cette lumière laser a également une grande cohérence spatiale : deux points de la source placés normalement à la direction de propagation produisent des vibrations lumineuses en accord de phase.

· ***Directivité***

Les lasers émettent de par leur nature un rayonnement directif alors que les sources conventionnelles émettent dans toutes les directions de l'espace. Améliorer la directivité (par des composants optiques comme des lentilles) ne peut se faire qu'au détriment de l'intensité (ces composants absorbant une partie de la lumière).

La directivité d'une source est caractérisé par l'intensité énergétique I(W) définie par:

$$dI = I(W).dW$$

dI: Intensité lumineuse (en W. m^{-2}) émise dans l'angle solide dW en stéradians.

· ***Puissance***

La puissance des lasers est très variable. Faible (quelques mW) ou moyenne pour des lasers à fonctionnement continu (excités, par exemple, par une décharge électrique continue : DEC) elle peut devenir très grande pour des lasers fonctionnant par impulsion (excités par des décharges électriques impulsionnelles : DEI) et atteindre 10^6 W, voire 10^{15}W, pendant des durées très brèves (10^{-12} s).

1.2.3 Types du laser

Les lasers peuvent être divisés en groupes selon différents critères:

1. L'état du milieu actif : solide, liquide, gaz, ou plasma.
2. La gamme spectrale de la longueur d'onde de laser : spectre évident, spectre (IR) …

3. La méthode d'excitation (pompage) de milieu actif : pompage optique, pompage électrique, etc...
4. Selon les conditions de sécurité (classes 1, 2, 3 A et B).

Généralement la classification de la source laser est faite selon la nature du milieu actif

1.2.4 Modes de fonctionnement des lasers

Le laser peut fonctionner en continu ou en impulsionnel. Pour le mode impulsionnel, l'énergie est délivrée par une seule ou par une série d'impulsions répétitives. Étant donné que la durée d'une impulsion peut être très courte (10^{-9} s), la puissance crête est très grande (1 MW) même si l'énergie totale délivrée est très faible (10^{-3} J). Quelques caractéristiques sont données au *tableau I.1*

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

Caractéristique	**Lasers**		
	CO_2	**YAG-Nd^{+3}**	**Excimères**
Longueur d'onde(μm)	10,6 IR lointain	1,06 proche IR	0,193 - 0,351 proche UV
Nature du milieu actif	gaz : CO_2	solide : Nd :YAG	gaz : dimères
Mode de fonctionnement	continu impulsionnel	Impulsionnel continu	Impulsionnel
Puissance moyenne (W)	100 à 25 000	10 à 1200	30 à 750

I. 3 Interaction laser- matière et applications à l'usinage

D'une façon générale, un rayonnement laser intense induit, sur un matériau solide, de nombreux phénomènes complexes et interdépendants **[10-11]**. Ces phénomènes sont de nature :

- Thermique : chauffage, fusion, vaporisation de surface, ionisation du milieu environnement.

- Mécanique : impulsion mécanique du a la mise en mouvement d'ondes hydrodynamiques entretenues par le rayonnement laser.
- Photochimique : provoquant des perturbations des liaisons inter atomiques pouvant altérer les propriétés chimiques du solide, du gaz ou l'interface solide-gaz.
- Optique : réflexions spéculaires ou diffuses.
- Electromagnétique : génération de forts courants de retour et donc de champs électriques et magnétiques importants engendré par les écoulements à grande vitesse des gaz totalement ou partiellement ionisés.
- Radiative : absorption importante et rémission par plasma d'une partie de l'énergie laser.

L'existence et l'importance relative de chacun de ces phénomènes dépendent de nombreux paramètres **[7], [10-11] :**

- Paramètres liés au faisceau laser : (longueur d'onde, temps d'interaction, densité de puissance délivrée, vitesse de balayage du faisceau, angle d'incidence)
- Paramètres liés au matériau : nature (métal, semi-conducteur, diélectrique), phase (solide, liquide ou gazeuse), propriétés physiques (optiques, thermiques), état de surface (nature chimique, rugosité).
- Paramètres liés de l'environnement (nature et pression de l'atmosphère de traitement).

Les lasers ont de nombreuses applications dans des domaines aussi variés que la métrologie, la médecine ou la métallurgie. Après 30 ans de développement, le Laser a trouvé beaucoup d'applications industrielles, comme le perçage, le découpage, le soudage et les traitements superficiels **[12].**

Les applications des lasers peuvent être subdivisées d'après la densité d'énergie du faisceau laser et le temps de l'interaction avec la matière, comme indiquée sur la *figure I.2.*

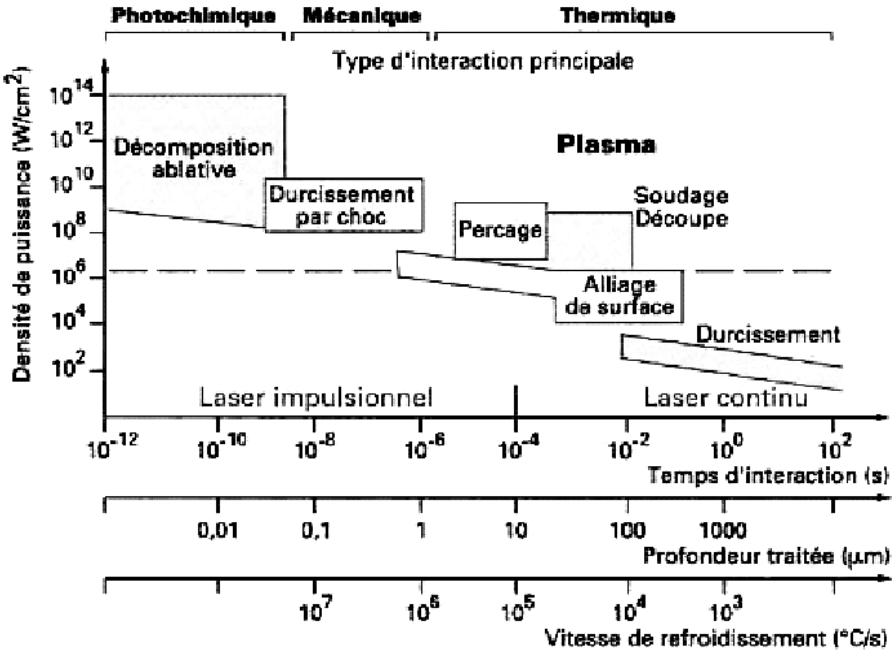


Figure I .2 : Applications du laser selon la densité d'énergie et le temps d'interaction **[11]**

I .4 Traitement thermique superficiel par laser

I.4.1 Place est enjeux de traitement thermique de surface par laser

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 **[13-14].**

Une étude récente, menée aux États-Unis, en Europe et au Japon sur les développements prioritaires dans le domaine des matériaux, classe en tête de liste la technologie des traitements superficiels **[15]**, Les enjeux techniques concernent :

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

Les sources de chaleur suffisantes pour permettre les traitements superficiels sont de deux types :

- ***Sources classiques*** : chalumeau, inducteur à courant …, qui présentent vraiment deux inconvénients remarquables :

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

Si parce que la nécessité d'apport rapide d'énergie thermique avec une limitation de la diffusion thermique et un confinement des effets structuraux imposent **[7]**, les chercheurs trouvent d'autres sources qui répondent aux problèmes.

- ***Sources nouvelles*** : faisceau laser, faisceau d'électrons, torche à plasma, constituent posent une solution à ces deux inconvénients, grâce à leurs extrême puissance et localisations énergétiques, elles permettent l'obtention de structures originales et nouvelles, difficiles ou impossibles à obtenir par d'autres moyens **[16].** Une comparaison est établie au *tableau I.2*

Tableau I.2 : Comparaison de sources conventionnelles et récentes **[17-18].**

Procédés	Avantages	Inconvénients
Induction	- Taux du processus rapides - Le coût des investissements inférieur à celui du Laser - Haute zone de couverture	- Les forces électromagnétiques peuvent gâter la surface. - Invention de bobines complexes pour les travaux spécifiques. (augmentent le coût).
Flamme	- Le coût des investissements inférieur à celui du laser. - Bon marché, flexible et mobile	- Puissance énergétique moyenne - Reproductibilité faible. - Un temps de mise en température relativement long. - Problèmes liés à l'environnement.
Laser	- Haute intensité d'énergie (10^8 –10^{10} W /cm^2) - Aucun contact mécanique entre le substrat et l'outil. - Pas d'exigence de vide (atmosphère, gaz …..) - Traitement rapide. - Durcissement sélectif. - Déformation minimal. - Le travail précis et local	- Haut coût d'investissement - Couches absorbantes nécessaire - Problème de sécurité. - la maintenance faite par les experts.
Faisceau d'électron	- Haute intensité d'énergie (10^8 –10^{10} W /cm^2) - la fraction de déformation est minimale. - Durcissement sélectif.	- Haut coût d'investissement - Exigence de vide. - Taux de rendement bas. - Hauts frais d'usinage.

L'utilisation des sources nouvelles réduit les risques de déformations et permet une bonne productivité et une grande flexibilité, notamment pour les lasers, où la technique de leur utilisation n'est pas compliqué, la conduite du faisceau par des systèmes optiques appropriés rend possible le traitement de zones difficilement accessibles par les autres sources **[7].**

I.4.2 Procèdes et types de traitement thermique superficiel par laser

Il existe de multiples techniques de traitement de surface. Plusieurs font appel a une modification de la microstructure de matériaux même : grenaillage, fusion de surface, trempe superficielle chez les aciers etc …, D'autres impliquent un changement de composition de la surface, on pense ici à la nitruration, cémentation, carbonitruration **[19-21].**

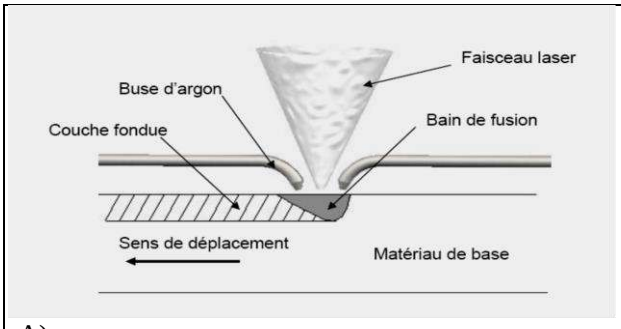
Deux catégories de traitements de surfaces par irradiation laser sont distinguées : les traitements sans apport de matière et les traitements avec apport de matière **[7] [12] [19]**, voir le *tableau I.3a et I.3b***.**

Tableau I.3a : Types de traitement thermique superficiel par laser

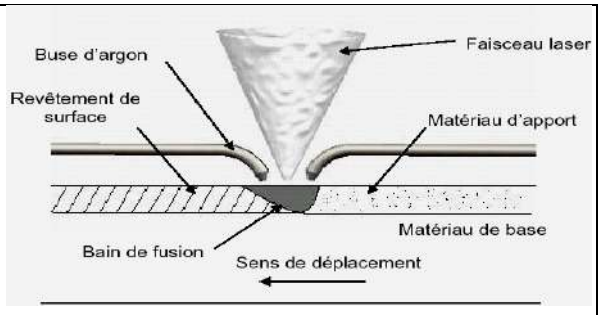
T°TL sans apport de matière	**Traitement superficielle en phase solide**	L'irradiation d'un laser de puissance en vue d'un durcissement par transformation structurale sans changement chimique, sans atteindre la fusion, a pour objet d'obtenir une couche superficielle de dureté élevée tout en conservant au cœur de la pièce une bonne ténacité **[12][19].**
	Fusion superficielle (phase liquide*)*	Va un peu plus loin en amenant la surface du matériau à son point de fusion visant à améliorer les propriétés de surface (propriétés mécaniques, et cristalline du matériau sans changement chimique) **[12][22].** 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 *(Tableau I.3b A).* la fusion superficielle par irradiation laser est mise en œuvre chez Volkswagen depuis 1993**[12].**
	Traitement avec vaporisation : (phase vapeur)	On utilise dans ce cas des lasers pulsés (CO_2, Nd :YAG, excimère), qui délivrent une densité de puissance instantanée très élevée (de 10^6 à 10^{11} $W.Cm^{-2}$) pendant des impulsions de courte durée (10^{-8} à 10^{-6} seconde). Ces impulsions répétées entraînent une vaporisation rapide de la surface. Ce traitement vise à modifier l'état de surface d'un substrat par une évaporation superficielle contrôlée on a reconnus pour : -Nettoyage (élimination de graisses ou de salissures diverses). -Décapage des surfaces (peinture revêtement, oxyde,…) modification d'états de surfaces (texture des surfaces, …..**[7] [11-12]** *(Tableau I.3b H).*

TTL avec apport de matière	***Fusion superficielle*** 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.
	Fusion superficielle et formation d'un revêtement 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 (*(Tableau I.3b B).*) ou bien il est injecté à l'état de poudre (*(Tableau I.3b* C) dans le bain de fusion **[12]**.
	Fusion superficielle et formation d'un alliage 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 (*(Tableau I.3b* D) ou bien l'élément d'addition pulvérulente injecté sous le faisceau (*(Tableau I.3b* E) ou déposé préalablement (*(Tableau I.3b* F), afin de former un alliage de surface après solidification **[12].**
	Fusion superficielle et 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 *(Tableau I.3b G).*

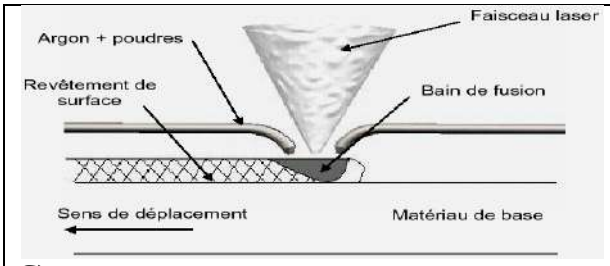
Tableau I.3b: Schémas pour types de traitement thermique superficiel par laser



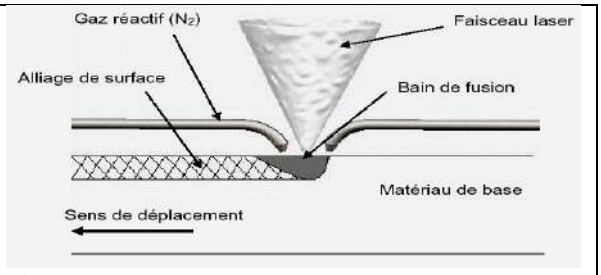
A)



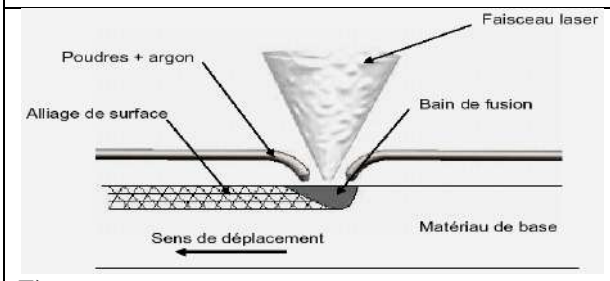
B)



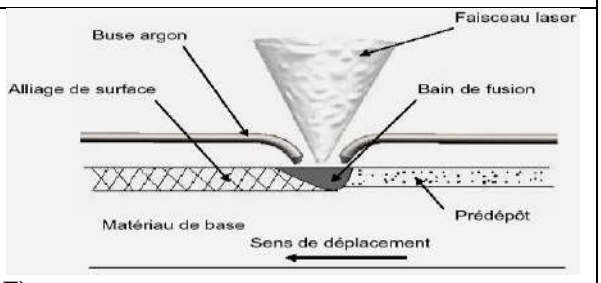
C)



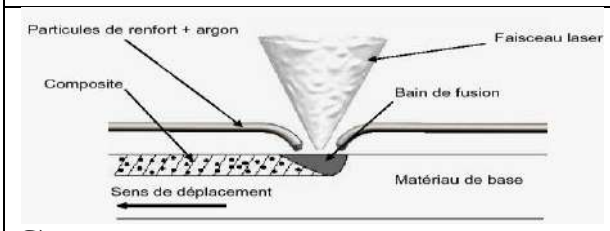
D)



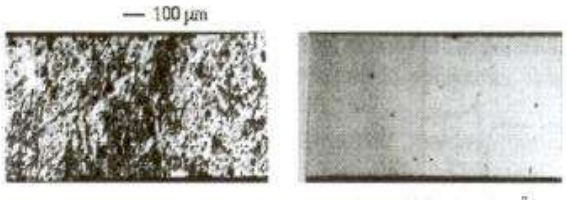
E)



F)



G)



H) **a)** avant le traitement **b)** après le traitement

Tableau I.4: Quelques caractéristiques de traitement thermique superficiel par laser CO_2 **[23]**

Type de procédé	***Puissance surfacique***	***Temps d'interaction***
-Le durcissement superficiel	10^3 *à* 10^4 W/cm^2	10^{-2} *s à quelques s*
- La fusion superficielle et la création d'alliages	10^4 *à* 10^6 W/cm^2	10^{-3} *s à* 10^{-1} *s*
- Le glaçage et la réalisation de structures superficielles micros cristallisées	10^6 *à* 10^8 W/cm^2	10^{-6} *s à* 10^{-8} *s*

On va s'intéresser dans ce qui suit à au traitement superficiel en phase solide, qui est l'objectif de notre travail, et ce sont les alliages ferreux qui répondent bien à ce traitement, grâce à leurs conductivités thermiques élevées **[24].**

Les avantages de ce type de traitement par rapport aux autres traitements employés sont la faible distorsion, les faibles contraintes thermiques induites dans le substrat, la définition exacte de la zone à traiter, une grande flexibilité et une bonne reproductibilité plus utilisable dans l'industrie très tôt par l'industrie automobile **[7]**. En effet dès 1975, Général Motors

utilisait le durcissement à l'état solide par laser pour traiter des pièces de la colonne de direction de ses voitures, depuis cette technique s'est généralisée et utile de façon routinière chez plusieurs constructeurs automobiles pour prévenir l'usure des pistons, des cylindres, du vilebrequin …

I.4.3 Cycle thermique de traitement superficiel en phase solide

Le mécanisme de traitement superficiels en phase solide par laser (transformation structurale) repose sur l'échauffement intense de la surface étudiée généralement pour les matériaux ferreux a une température *T* supérieur à la température de transformation structurale du matériau traité et légèrement inférieure à sa température de fusion. Seule une mince couche de surface du substrat est rapidement chauffé dans le champ de phase austénitique, le refroidissement de la zone traitée se fait par conduction thermique vers le cœur de la pièce (auto-trempe) voir le cycle thermique sur la *figure I .3.* Il en résulte la formation de martensite avec des grains d'austénite extrêmement fins et la zone traitée devient très résistante.

Ce type de traitement peut être caractérise par six paramètres principaux **[25] :**

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

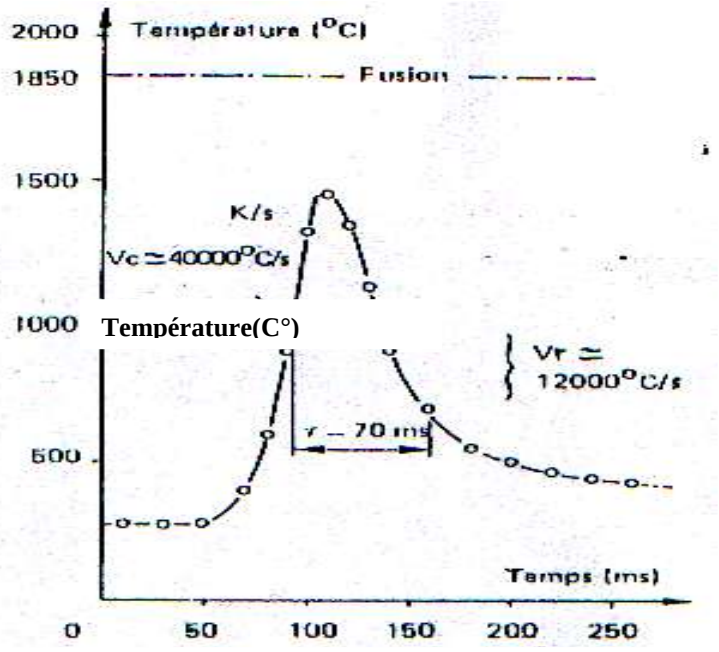


Figure I .3 : Cycle de traitement thermique superficiel crée par un laser **[26]**

Il est cependant utile de noter que la microstructure d'une pièce obtenu par une trempe après un chauffage laser pourrait être assez différente d'une autre obtenu par une trempe traditionnelle ; ce n'est pas simplement un problème du temps de l'austénitisation court mais aussi le fait qu'en chauffant de façon rapide, les températures de la transformation sont déplacées efficacement aux plus hautes températures **[7] [19] [24] [27-29].** Les *figures* suivantes *I.4-I.6* montrent l'évolution des microstructures, les différentes micrographies de la zone traitée.

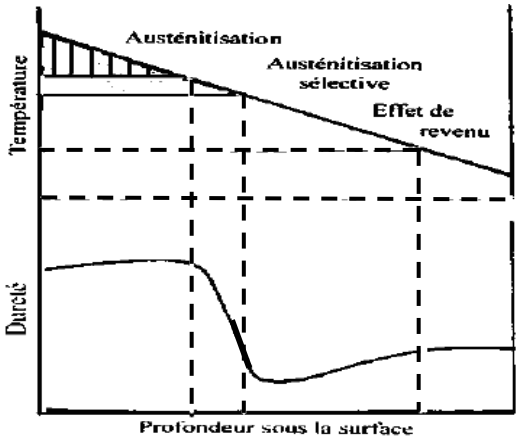


Figure I .4 : Evolution des microstructures et des duretés en fonction des températures lors d'un traitement laser **[19] [28-29]**

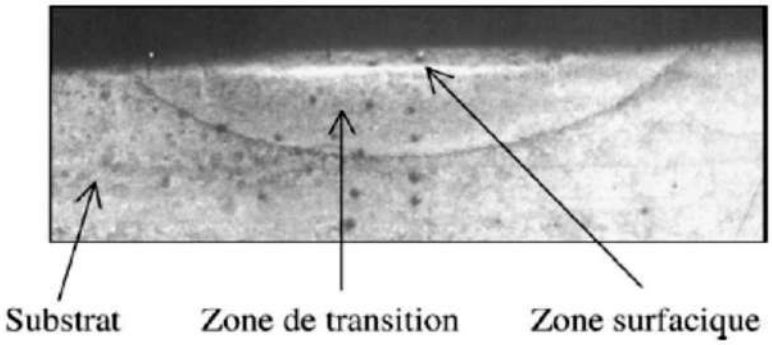


Figure I .5 : Micrographie optique révélant la zone affectée par la trempe laser (× 100)**[30]**

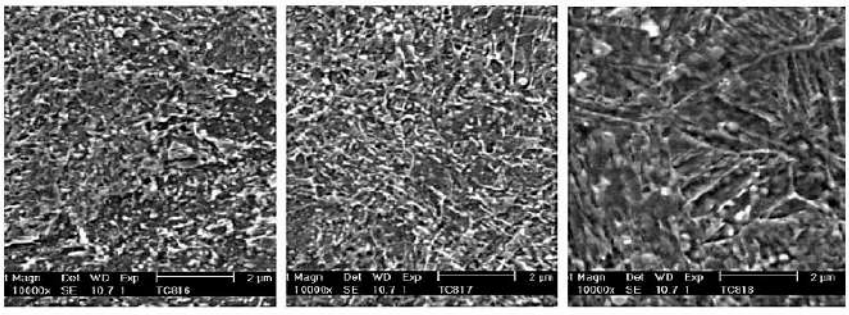


Figure I .6 : Micrographie électronique à balayage de la martensite dans les trois zones (×10000) **[30]**

I.4.4 Contrôle de processus

Pour obtenir le durcissement superficiel avec une bonne qualité, il est nécessaire de contrôler l'évolution de la température spatiale et temporelle, Le besoin d'atteindre rapidement la plus haute température sur la surface rend le contrôle de la température très important **[31]**.

En outre les applications peuvent être introduites plus rapidement dans le sens de la recherche avec une précision rehaussée à l'aide d'une commande de contrôle de processus.

Plusieurs méthodes expérimentales utilisent des instruments, appareils et des méthodes techniques pour déterminer le profil de température ainsi que la microstructure du durcissement.

L'une de ces méthodes est l'usage des thermocouples, le grand problème posé par cette technique est la modification des conditions de transfert thermique de la pièce lors du traitement, et d'autres nouvelles techniques développées par les métallurgistes permettent d'éliminer ce problème **[32].**

REED et al **[33]** présentent une technique capable de contrôler les changements structurels microscopiques sous conditions de chauffage et refroidissement rapide avec une puissance du faisceau Laser CO_2 de 1 KW sur un papier d'Aluminium (mince). Ils ont enregistré le cycle thermique à la surface d'échantillons du coté opposé en utilisant des thermocouples et un système de saisie des données.

XU et al **[34]** introduisent le pyromètre avec un temps de résolution de l'ordre de nano-seconde, 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.

IGNATIEV et al **[35]** 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.

Ces techniques expérimentales présentent des inconvénients considérables :

- Ceux sont des techniques coûteuses.
- 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 local de refroidissement, le temps local de solidification……..).
- Ne peuvent pas prédire les propriétés du substrat en cours du traitement, ce qui pose une difficulté de contrôle de procédé.

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 **[36-37].**

I.5 Conclusion

Les lasers trouvent des applications larges dans l'industrie de la métallurgie surtout le durcissement superficiel des métaux, le problème de contrôle de ce processus n'a pas pu trouvé une solution adéquate par les appareils de mesures expérimentales, ce qui encouragent les spécialistes à développer plusieurs modèles mathématiques, selon des hypothèses simplificatrices logiques avec une description probable des effets induits et gouvernantes des phénomènes de traitement thermique. Ceci a permis de calculer les profils spatiaux temporels de la température ainsi que d'autres grandeurs thermiques.

CHAPITRE II

Synthèse bibliographique

II.1 La Modélisation mathématique

La modélisation mathématique s'appuie principalement sur un (ou plusieurs) modèle(s). Le modèle est une représentation abstraite de la réalité au sens où il simplifie cette réalité en vue d'une utilisation précise, pour n'en conserver que les caractéristiques intéressantes par rapport au contexte ou au domaine dans lequel on se trouve. Le modèle est donc une vue subjective mais pertinente de la réalité [38].

Un bon modèle doit être prédictif, c'est-à-dire qu'il doit permettre de prévoir dans une certaine mesure le résultat d'une expérience. Cette prédictibilité peut avoir un caractère qualitatif ou quantitatif selon que le modèle se contente de prévoir un certain comportement ou qu'il permet de prédire la valeur de telle ou telle grandeur mesurable [39].

Le développement, l'optimisation et le contrôle de la qualité du procédé de T.T.L nécessitent l'évaluation des flux de chaleur et la répartition de température qui peuvent jouer un rôle essentiel dans la formulation des microstructures, dans la formation de phase à l'état solide ou encore dans les contraintes résiduelle [30] [37] [40].

Le but de ce chapitre est de présenter un revue de quelques modèles analytiques et numériques de traitement superficiel, en phase solide publies dans la littérature.

II .2 La Modélisation du TTL

La modélisation du TTL repose sur la représentation mathématique des phénomènes de transfert intervenant lors du procédé, alors que les modèles sont basés sur la résolution des équations qui décrivant la conservation de la masse, de l'énergie et de la quantité de mouvement [35] [38].

II. 2.1 Les modèles de TTL

Les modèles de TTL s'appuient sur la résolution de l'équation de chaleur dans les conditions du traitement laser [28][38], l'évolution spatio-temporelles des champs de température induits dans les matériaux dépendent des paramètres suivants [28] :

- La puissance du laser et la taille du faisceau.
- L'interaction du faisceau avec le matériau (l'absorption par la surface, la durée de l'interaction).

- Les transferts thermiques notamment a travers : les propriétés thermo-physiques du substrat (conductivité thermique, capacité thermique, chaleurs latentes de changement de phase, et les pertes en surface).

Les lasers trouvent des applications larges dans l'industrie de la métallurgie ce qui encourage le développement de plusieurs modèles de TTL selon les hypothèses simplificatrices et les descriptions probable des effets induit [28] [39-40].

Comme mentionné précédemment. On peut diviser les modèles établis selon la méthode de résolution en deux catégories essentielles, les modèles analytiques et les modèles numériques [38].

Les modèles de traitement superficiel a l'état solide dans le domaine de validité de la théorie de Fourier ont reçu une attention accrue ces derniers temps .Cette théorie et valable dans les conditions suivantes [41-42] :

- L'intensité des faisceaux laser ne dépasse pas 10^{12} W/m^2.
- Dans les pulsations laser courtes, La théorie de Fourier peut plus déterminer correctement le profil de la température dans le substrat si la duré de l'interaction et moins que la nanoseconde.

Les modèles basés sur d'autres théories (la théorie cinétique des électrons, la théorie de double retard de phase ….), sont étudié brièvement dans les articles [43 - 49].

II.2.2 Les modèles analytiques

BLACKWELL [50] à examiné analytiquement le phénomène de l'enlèvement explosif de matière traité, observé par DABBY et PAEK [51], et à calculé le profil de la température dans un corps semi infini durcit avec une source laser assumée comme une loi en décadence exponentielle avec la profondeur x. Une condition au limite convective est admise et la transformée de Laplace est utilisée pour résoudre l'équation différentielle de la conduction de la chaleur. Il a montré que la température maximale se déplace à l'intérieur du matériau quand le nombre adimensionnel *Bi* est plus grand que 0.05.

MARTIN G.T. et al [52] ont discuté des solutions exactes pour le régime permanent et transitoire du profil de température dans un corps semi infini traite superficiellement dans un système de cordonnés cylindrique, avec une source laser de forme Gaussienne indépendante du temps. La solution de l'équation de la conduction thermique est basée sur la méthode de

séparation des variables, cette solution à une application directe au traitement de surface dans le régime permanent pour les matériaux ayant un haut coefficient d'absorption au rayonnement laser.

ZUBAIR S. M et CHAUDHRY M. A [53-54] ont d'abord discuté la solution fondamentale au problème considéré par BLACKWELL [50]. Ils ont fourni une solution analytique au problème basé sur la transformée de Laplace, dans lequel la matière est soumise à une source laser instantanée, identifié par la pulsation de Dirac.

Dans les applications pratiques de TTL, la pulsation laser est dépendante du temps selon plusieurs formes. La pulsation de Dirac [53-54] et un cas.

ZUBAIR S. M et CHAUDHRY M. A [55]ont développé un modèle qui se baser sur les modèles [50] [53], avec la même méthode de résolution ,soit la transformé de Laplace , mais cette fois discutent la résolution de l'équation de transfert pour une source laser dépendante du temps pour deux cas , pour une source laser instantanée modeler par l'impulsion de Dirac comme l'a vue traitée dans l'article [53-54] , et comme deuxième cas , une impulsion laser dépendante du temps de forme exponentiel de type $I = I_0 \exp(-\lambda^2 t)$, elle exprime une pénétration exponentielle dans le matériaux .

La température et le flux de la chaleur réduits comme des fonctions des paramètres adimensionnelles sont calculés et présentés sous formes graphiques. Quelques cas spéciaux d'intérêt pratique sont aussi discutés.

On peut consulter les modèles [53-55], groupés dans le chapitre *10* de la référence [56], ainsi qu'un développement des modèles [54-55] avec une condition initial de la température dépendante de x sous forme exponentielle.

YILBAS .B.S et SAMI. M [57], ont obtenu le profil de la température pour une surface du matériau admis comme semi infini, isentropique, avec une source laser dépendante du temps de forme exponentielle : $I = I_0 \exp(-\beta t)$ .La résolution est basée aussi sur la méthode de transformé de Laplace. Le profil de la température superficielle à été comparé au profil de la pulsation laser pour différente valeurs de β . Ils ont trouvé que pour β proche de zéro les deux profils concordent.

YILBAS .B.S [58-59] à présenté l'étude du processus de la conduction limitée sur une surface isentropique identique à celui décrit le modèle [57] lors de TTL, avec une source

laser de type CO_2 dépendante du temps de forme : $I = I_0(\exp(-\beta t) - \exp(-\gamma t))$, la solution pour $\beta = 0$ et $\gamma = 0$ est traiter analytiquement et expérimentalement dans l'article **[60]**.

YILBAS .B.S **[61]** avec les même hypothèses que les modèles **[58-59]** , traité l'influence des paramètres de la pulsation laser sur le profil de température d'une surface d'acier , pour deux valeurs spécifiques : $\frac{\beta^*}{\gamma^*} = 1.3$ et $\frac{\beta^*}{\gamma^*} = 1.5$, ainsi que pour différentes valeurs de t et x , il a montré dans ce cas que la température au voisinage de la surface augmente lorsque $\frac{\beta^*}{\gamma^*}$ tend à diminuer .

YILBAS .B.S et KAYLON .M **[62]** présentent dans une étude analytique, la solution exacte pour l'évolution de la température due à une source de même type que **[58-59]** avec une condition limite convective à la surface. L'effet conjugué des paramètres de la pulsation laser $\bar{\beta}$, $\frac{\bar{\beta}}{\bar{\gamma}}$, et le nombre *Bi* sur le profil de température, est également discuté.

La température augmente rapidement, et le temps d'équilibre diminue, lorsque $\bar{\beta}$, $\frac{\bar{\beta}}{\bar{\gamma}}$ et *Bi* est diminuent. Cet effet conjugué est considérable sur le profil de la température de surface.

YILBAS .B.S et KAYLON .M **[63]** ont utilisé le même modèle que **[62]** .Ils ont montré que l'effet du nombre de *Bi* devient considérable sur le profil de température lorsque $Bi \geq 0.202$.

YILBAS .B.S et KAYLON .M **[64]** s'appuyant sur le modèle **[63]**.Avec un traitement cette fois, fait avec des pulsations laser consécutives à des intensités décroissantes, dans l'intervalle de nombre *Bi* qui varie comme : $0.0002 \leq Bi \leq 0.02$. L'effet de *Bi*, sur les profils de la température de la surface du à des pulsations répétitives, devient considérable quand $Bi \geq 0.01$ .Ainsi, suivant cette série de travaux, on a pur montré que l'effet de *Bi* sur le profil de température est importais suivant le type de traitement.

CONDE J.C. et al **[65]** discutent la modélisation du TTL d'une surface mince, la distribution de la température spatiale et temporelle est calculée par la fonction de Green pour différents cas de radiation laser.

Deux descriptions mathématiques du processus physique sont considérées. Le premier considéré est relatif à un flux externe qui est incident à la matière, le deuxième est supposé que la chaleur est entreposée sur la surface matérielle en l'absence de source de la chaleur externe. L'équivalence des deux approches est démontrée.

BROCKMANN. R [66] à calculé le champ de la température pour une surface d'un matériau mince en mouvement traité par un faisceau laser de type gaussien. Sous l'effet refroidissant causé de la convection libre ou forcée dans le gaz ambiant.

Le problème devient bidimensionnel. Double transformations de type Fourier intégrants est appliquée pour résoudre le problème. Il donne une solution analytique du problème dans l'espace de Fourier. La transformée de Fourier inverse est accomplie et la solution est représentée par un intégrale ayant une asymptote exponentielle.

II. 2.3 Les modèles numériques

CHEUNG. N et al [67], ont développé un modèle mathématique pour prédire la profondeur de la zone traitée par une source laser de distribution gaussienne indépendante du temps. L'équation de Fourier de la conduction de la chaleur est résolue en utilisant la méthode des différences finies. Dans des coordonnées cylindriques, pour l'étude de la distribution de la température produit dans un matériau avec des propriétés thermo-physiques dépendantes du temps, ils ont obtenu la profondeur à laquelle le durcissement se produit. Les simulations théoriques sont comparées avec les résultats expérimentaux pour un laser CO_2 continu.

GUSTAVO G. et TIEN-CHEN J [68], ont présenté une étude numérique de la distribution de la température suivant le modèle de ZUBAIR et CHAUDHRY [55] ou la source laser est dépendante du temps exponentiellement, avec une dépendance des propriétés du matériau avec la température. Les effets de non-linéarité, sont étudiés.

L'équation de la conduction de la chaleur gouvernante, les conditions aux limites et la condition initiale sont présentées dans une forme adimensionnelle. La résolution de l'équation gouvernante est une approche de type volumes finis, avec une grille variable qui assure une plus grande résolution dans le domaine près de la limite où la source de la chaleur laser est appliquée. Les effets des s différents paramètres, ainsi que les propriétés thermiques température-dépendantes sont étudiées en détail. Les résultats calculés sont comparés avec les études analytiques pour les propriétés thermiques constantes obtenues, pour un matériau semi

infini et à dimension finie. De plus, les solutions numériques sont comparées et validées avec les résultats expérimentaux.

BESSROUR .J et al [28] l'étude proposée est une contribution à l'établissement d'un modèle instationnaire qui permet de simuler l'histoire thermique totale du traitement superficiel dans un domaine tridimensionnel, de frontière quelconque, jusqu'au retour à l'équilibre thermique après refroidissement. La formulation du problème intègre un code de calcul par éléments finis pour la résolution de l'équation de la chaleur en régime transitoire non linéaire. Le schéma numérique développé permet la résolution avec une condition de frontière mobile moyennant une discrétisation spatio-temporelle adaptée. Il tient compte des non-linéarités dues à la variation des caractéristiques thermo-physiques en fonction de la température et des pertes par rayonnement aussi que celles par convection.

SHUJA S .Z et YILBAS B. S [69] présentent dans leurs études, l'effet d'un jet de gaz qui agit coaxialement avec la pulsation répétitive du laser, et de façon orthogonale à la surface. Les champs de la température sont prédits numériquement, suivant une approche par volumes finis. L'étude est faite pour inclure trois types de pulsation et deux vitesses du jet du gaz. Ils ont trouvé que pour les pulsations répétitives de grand période de refroidissement, l'effet de la vitesse du jet du gaz n'est pas notable sur le profil de la température selon la face exposée du solide.

SHUJA S.Z et al [70] discutent avec plus de détail dans un modèle à deux dimensions l'effet de la vitesse du jet de gaz, et l'effet des propriétés variables du substrat et celles du gaz, sur le profil de température à la surface du solide pour une seule pulsation laser de traitement.

AMADO J.M. et al [71] dans ce travail, ils ont prouvé l'applicabilité de la méthode LT-DRBEM (Laplace transform dual reciprocity boundary element method) pour le traitement thermique par laser. Un modèle simple était développé basé sur l'équation de la conduction de la chaleur en régime transitoire et en deux dimensions, dans laquelle le faisceau laser est inclus comme une condition limite du flux de la chaleur de forme Gaussien. Les résultats pour une poutre stable et en mouvement sont présentés et discutés. Des formulations non linéaires du problème comme ceux données par la dépendance des propriétés thermo-physique en température sont aussi considérées. Des résultats concordants ont été obtenus pour l'approche

de la poutre stationnaire, alors que des limitations sévères ont été trouvées pour le cas de la poutre en mouvement.

ROZNIAKOWSKA .M et YEVTUSHENK Æ A. A [72] effectue un calcul numérique pour la solution de l'équation de la conduction de la chaleur unidimensionnelle linéaire pour un milieu semi infini. L'effet de structure de la source laser simulée comme une source thermique surfacique dépendante du temps d'une seule pulsation pour trois cas, source de type triangulaire, de type rectangulaire, et une source de type gaussien et ont discuté, l'évolution des paramètres adimensionnels de la : température, du flux de chaleur, de la profondeur de durcissement, et la durée de l'impulsion laser .

SHUJA S.Z et al [73-74], ont examiné l'influence du rapport cyclique due à l'effet répétitif des impulsions de la source laser sur l'évolution de profil de la température lors du traitement thermique du solide. Un modèle tridimensionnel est adapté pour simuler la phase d'échauffement, afin d'examiner les différences de températures à la surface due aux impulsions répétitives, l'impulsion laser est supposée à distribution de mode gaussien fondamental TEM_{00} selon une condition limite convective à la surface, une méthode numérique sous l'approche de volumes finis a été obtenu pour résoudre les équations gouvernantes sous un schéma implicite.

II. 3 Conclusion

En résume, on peut affirmer que peu de travaux dont consacrées à l'étude de l'effet d'une source laser dépendante du temps sur les profils de température lors de l'incidence sur le matériau. Cependant, quelques solutions analytiques et numérique ont été présentées, mais restent circonscrites à des formes de sources limitées et spécifiques.

Ci-après on explicitera les modèles [50] et [55] qui sont les modèles les plus pratique en industrie, et on développera ensuite un modèle semi analytique dans lequel on étudiera l'influence des différentes structure de la source laser dépendent du temps sur le traitement thermique de la surface, ainsi que la sensibilité à d'autres paramètres.

CHAPITRE III

Modèle de BLACKWELL et extension de ZUBAIR-CHAUDHRY

III.1 Introduction

Une explication possible pour le phénomène de l'enlèvement explosif de la matière traitée, observée par DABBY et PAEK **[49]**, quand la transmission de l'énergie de Laser près de la surface est suffisante, est que le point de température maximale (avant le changement de phase se produit sur la surface exposée) se trouve à l'intérieur du corps à cause des pertes de chaleur aux alentours.

Si le matériau présente une phase changeante et que le changement initial de phase se produit à l'intérieur du corps au lieu de l'extérieur, alors l'enlèvement explosif du matériau peut être possible, l'endroit de la température maximale est déterminé par un équilibre entre l'énergie du laser déposée dans le matériau et la conduction de la chaleur.

Le but de travail de BLACKWELL est de présenter un modèle mathématique pour déterminer le lieu de la température maximale avant le déclenchement du changement de phase.

III.2 Description du modèle de BLACKWELL

2.1 Hypothèses simplificatrices

- La source laser d'intensité constante.
- Le matériau traité est isotrope et semi infini.
- Les propriétés thermo physiques du substrat sont indépendantes de la température.
- Les pertes d'énergie par rayonnement sont négligeables.

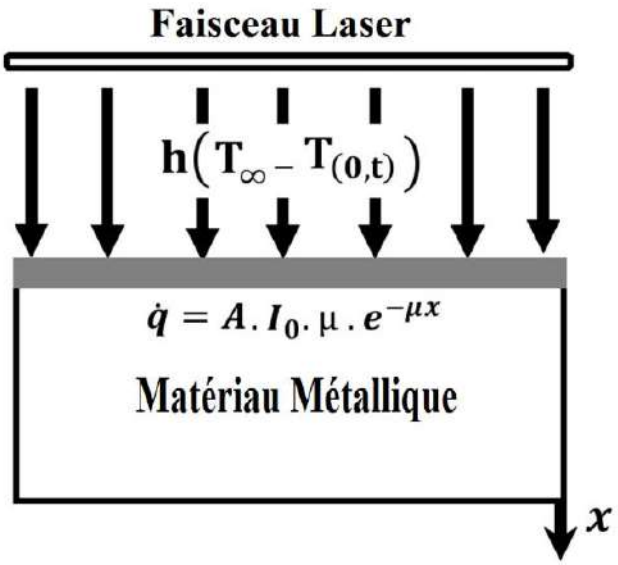


Figure III.1 : Schématisation du modèle de BLACKWELL

2.2 Formulation des équations

2.2.1 Equation de base

L'équation de Fourier descriptive de la conduction thermique en une dimension avec une source d'énergie interne voir *figure III.1*, est donnée par comme :

$$\rho.Cp\frac{\partial T}{\partial t}=k\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+q' \qquad \textbf{III.1}$$

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

$$q'=I_0(1-\mathrm{R})\mu.exp\left(-\mu.x\right) \qquad \textbf{III.2}$$

2.2.2 Conditions initiales et aux limites

$$\begin{cases} T(x,0) = T_0 \\ -k\,\dfrac{\partial T(0,t)}{\partial x} = h\left[T_\infty - T(0,t)\right] \\ \dfrac{\partial T(\infty,t)}{\partial x} = 0 \end{cases} \qquad \textbf{III.3}$$

2.3 Résolution analytique du modèle

Posons : $\Theta = T - T_0$ **III.4**

Avec une transformée de Laplace, les équations du modèle s'écrivent :

$$\begin{cases} \dfrac{d^2\overline{\Theta}(x,p)}{dx^2} - \dfrac{p}{\alpha}\overline{\Theta}(x,p) = -\dfrac{I_0(1-R)\mu exp(-\mu x)}{k}\dfrac{1}{p} \\ \dfrac{d\overline{\Theta}(0,p)}{dx} + \dfrac{h}{k}\left[\dfrac{(T_\infty - T_0)}{p} - \overline{\Theta}(0,p)\right] = 0 \\ \dfrac{d\overline{\Theta}(\infty,p)}{dx} = 0 \end{cases} \qquad \textbf{III.5}$$

La solution de l'équation **III.5** dans le domaine de Laplace et alors :

$$\overline{\Theta}(x,p) = \left[\frac{\dfrac{h(T_\infty - T_0)}{k}\dfrac{1}{p} + \dfrac{I_0(1-R)\mu\left(\mu + \dfrac{h}{k}\right)}{k}\dfrac{1}{p}\dfrac{1}{\mu^2 - \dfrac{p}{\alpha}}}{\sqrt{\dfrac{p}{\alpha}} + \dfrac{h}{k}}\right] exp\left(-\sqrt{\frac{p}{\alpha}}x\right) - \frac{I_0(1-R)\mu exp(-\mu x)}{k}\frac{1}{p}\frac{1}{\mu^2 - \dfrac{p}{\alpha}} \qquad \textbf{III.6}$$

Par la transformée inverse de Laplace, la solution dans le domaine réel est donnée par:

$$T-T_0=(T_\infty-T_0)\left[erfc\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right)-exp\left(\frac{h^2}{k^2}\alpha t+\frac{hx}{k}\right)erfc\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}+\frac{h}{k}\sqrt{\alpha t}\right)\right]$$

$$+\frac{I_0(1-R)}{\mu k}\left\{\begin{array}{l}\left(1+\frac{\mu k}{h}\right)erfc\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right)+\frac{1}{\frac{h}{\mu k}\left(\frac{h}{\mu k}-1\right)}exp\left(\frac{h^2}{k^2}\alpha t+\frac{hx}{k}\right)erfc\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}+\frac{h}{k}\sqrt{\alpha t}\right)\\ -\frac{1}{2}\left(\frac{\frac{h}{\mu k}+1}{\frac{h}{\mu k}-1}\right)exp\left(\mu^2\alpha t+\mu x\right)erfc\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}+\mu\sqrt{\alpha t}\right)-\frac{1}{2}exp\left(\mu^2\alpha t-\mu x\right)\\ erfc\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}-\mu\sqrt{\alpha t}\right)+exp\left(-\mu x\right)\left[exp\left(\mu^2\alpha t\right)-1\right]\end{array}\right\}$$

…….. **III.7**

Il y a plusieurs groupes adimensionnels qui paraissent visibles dans l'équation **III.7** l'étude de ce modèle est faite pour le terme $I_0(1-R)$ est plus grand que $h(T_\infty-T_0)$, pour ce cas un groupe de variables adimensionnels défini comme suit, facilite l'étude.

$$\left\{\begin{array}{l}\tau=\mu^2\alpha t\\ \chi=\mu x\\ \mathrm{Bi}=\frac{h}{\mu k}\\ \omega=\frac{\mathrm{I}_0(1-R)}{h(T_\infty-T_0)}\end{array}\right. \qquad \textbf{III.8}$$

Par suite, la solution **III.7** devient :

$$\frac{T(\chi,\tau)-T_0}{\frac{I_0(1-\mathrm{R})}{k\mu}} = \frac{1}{\mu \mathrm{Bi}}\left[\operatorname{erfc}\left(\frac{\chi}{2\sqrt{\tau}}\right) - exp\left(\mathrm{Bi}^2\tau+\mathrm{Bi}\chi\right)erfc\left(\frac{\chi}{2\sqrt{\tau}}\right)+\mathrm{Bi}\sqrt{\tau}\right]$$

$$+\left(1+\frac{1}{\mathrm{Bi}}\right)erfc\left(\frac{\chi}{2\sqrt{\tau}}\right)$$

$$+\frac{1}{\mathrm{Bi}(\mathrm{Bi}-1)}exp\left(\mathrm{Bi}^2\tau+\mathrm{Bi}\chi\right)erfc\left(\frac{\chi}{2\sqrt{\tau}}+\mathrm{Bi}\sqrt{\tau}\right) \qquad \textbf{III.9}$$

$$-\frac{1}{2}\left(\frac{\mathrm{Bi}+1}{\mathrm{Bi}-1}\right)exp\left(\tau+\chi\right)erfc\left(\frac{\chi}{2\sqrt{\tau}}+\sqrt{\tau}\right)$$

$$-\frac{1}{2}exp\left(\tau-\chi\right)erfc\left(\frac{\chi}{2\sqrt{\tau}}-\sqrt{\tau}\right)+exp\left(-\chi\right)\left[exp(\tau)-1\right]$$

2.4 Présentation graphique

Cette solution III.9 est visualisée à la *figure III.2* et la *figure III.3*

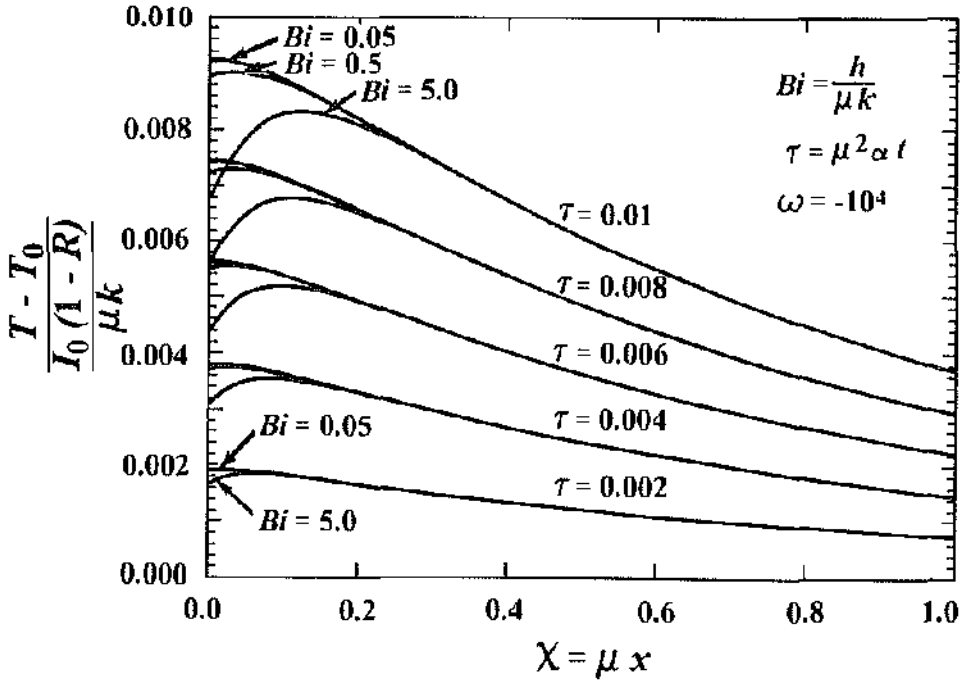


Figure III.2 : Profil de température adimensionnel en fonction de χ pour différentes valeurs de *Bi et* τ [50]

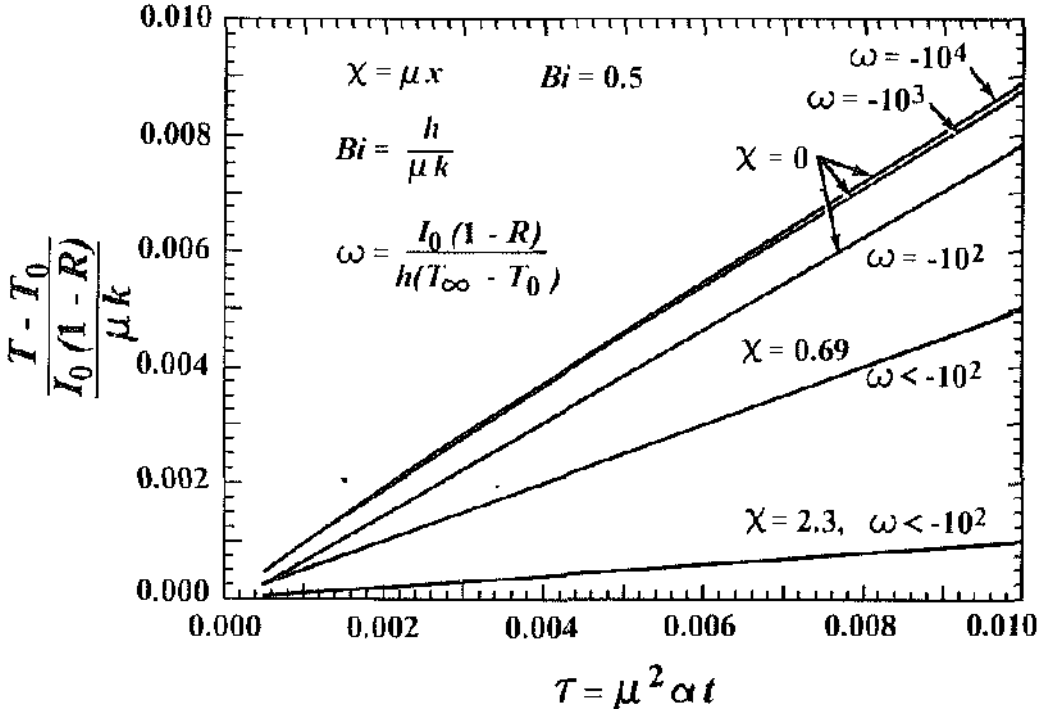


Figure III.3 : Profil de température adimensionnel en fonction de τ pour différentes valeurs de χ et ω **[50]**

La *figure III.2* présente le profil de la température adimensionnel pour une gamme de temps τ et pour différentes valeurs Bi et pour ω =-10 ^{4}, valeur constante.

Pour Bi = 0.05 , l'effet convectif externe est suffisamment petit sur le profil de la température et comme Bi ou τ est augmenté, les effets convectives causés sont plus prononcés, alors l'emplacement de la température maximale se déplace loin de x = 0.

Pour Bi = 5 et τ = 0.01, la température de la surface exposée est considérablement au-dessous de la température maximale. Le phénomène est aussi mis en évidence.

La *figure III.3* présente l'évolution du profil de température pour plusieurs profondeurs, pour plusieurs ω, et Bi = 0.5. Quand ω devient suffisamment grande en valeurs négatives, l'impact du refroidissement par convection sur la température de la surface devient moins prononcé. Quand la profondeur au-dessous de la surface devient suffisamment grande, le profil de température devient approximativement indépendant de l'effet du refroidissement convectif et en apparence l'effet de la condition à la limite convective n'a pas eu de temps suffisant pour diffuser en profondeur.

La température maximale qui se produit à un point intérieur et son emplacement relatif à la surface exposée, augmente avec l'augmentation de Bi et τ .

Cette température maximale à l'intérieur de la matière (par opposition à la surface exposée) est une explication possible pour l'enlèvement explosif de matière soumise à un faisceau laser intense

III.3 Description de l'étude de ZUBAIR et CHAUDHRY

ZUBAIR et CHAUDHRY ont discuté la solution fondamentale au problème considéré par BLACKWELL **[50]** qui présente des solutions limitées pour une source constante.

Ils ont fourni une solution analytique au problème dans lequel la matière est soumise à des sources laser dépendantes du temps évaluant en décadence exponentielle (avec la profondeur x) à la surface exposée. Des paramètres adimensionnels sont identifiés et l'étude de l'évolution de la température réduite comme une fonction de ces paramètres est discuté. Les résultats sont présentés sous une forme graphique.

3.1 Formulation des équations

3.1.1 Equation de base

L'équation de la conduction de la chaleur qui décrit la distribution de la température dans un matériau semi infini, homogène, avec un terme de la source d'énergie dépendante du temps est donnée par **[53-55]:**

$$\rho.Cp\frac{\partial T}{\partial t}=k\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+q'(x,t) \qquad \textbf{III.10}$$

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

$$q'=\dot{I}_0(t)(1-R)\mu.exp(-\mu x) \qquad \textbf{III.11}$$

3.1.2 Conditions initiales et aux limites

Les mêmes conditions initiales et aux limites, que celles du modèle de BLACKWELL**,** sont admises :

$$\begin{cases} \dfrac{\partial \Theta}{\partial t} = \alpha \dfrac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} + \dfrac{\dot{I}_0(t)(1-R)\mu exp(-\mu x)}{\rho.Cp} \\ \Theta(x,0) = 0 \\ \dfrac{\partial \Theta(0,t)}{\partial x} + \dfrac{h}{k}\left[\dfrac{(T_\infty - T_0)}{p} - \Theta(0,t)\right] = 0 \\ \dfrac{\partial \Theta(\infty,t)}{\partial x} = 0 \end{cases} \quad \textbf{III.12}$$

3.2 Résolution analytique

Par la transformé de Laplace**,** la solution de l'équation **III.12** dans le domaine non réel est obtenue, puis par la transformée inverse, la solution dans le domaine réel est donné sous forme compacte comme :

$$\Theta(x,t) = (T_\infty - T_0)\left[erfc\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right) - E\left(\frac{hx}{k}, \frac{\alpha t}{x^2}\right)\right] - \frac{\mu(1-R)}{\rho.Cp}\left[\frac{\left(\mu + \frac{h}{k}\right)}{\frac{h}{k}} \times \left\{erfc\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right) - E\left(\frac{hx}{k}, \frac{\alpha t}{x^2}\right) - \right\} * \left\{\frac{\partial}{\partial t}\left[exp\left(\alpha\mu^2 t\right) * \dot{I}_0(t)\right]\right\} - \left\{\exp\left(-\mu x + \alpha\mu^2 t\right)\right\} * \dot{I}_0(t)\right] \quad \text{..... III.13}$$

Avec la fonction particulière :

- $E\left(cx, \dfrac{\alpha t}{x^2}\right) = \exp\left[cx + c^2 x^2\left(\dfrac{\alpha t}{x^2}\right)\right] \times erfc\left(\dfrac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right) + cx\sqrt{\dfrac{\alpha t}{x^2}}$

Deux cas sont traités ultérieurement. Il s'agit d'abord d'une source laser instantanée, ensuite c'est lors d'une incidence laser variant exponentiellement avec le temps.

A / 1er cas : Source laser instantanée (impulsion de Dirac)

Dans ce cas, le terme de la source d'énergie et modelé comme :

$$\dot{I}_0(t) = I_0.\delta(t) \qquad \textbf{III.14}$$

On remplace **III.14** dans **III.13**, et on applique les propriétés du produit de convolution. Le profil de température, après simplification est donné comme :

$$\Theta_1(x,t) = (T_\infty - T_0)\left[erfc\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right) - E\left(\frac{hx}{k}, \frac{\alpha t}{x^2}\right)\right] - I_0 \frac{\mu(1-R)}{2\rho.Cp} \times \left[E\left(-\mu x, \frac{\alpha t}{x^2}\right) - \frac{\left(\mu + \frac{h}{k}\right)}{\left(\mu - \frac{h}{k}\right)} E\left(\mu x, \frac{\alpha t}{x^2}\right) + \frac{\frac{2h}{k}}{\left(\mu - \frac{h}{k}\right)} E\left(\frac{hx}{k}, \frac{\alpha t}{x^2}\right) - \quad 2.exp(-\mu x + \alpha\mu^2 t)\right] \qquad \textbf{III.15}$$

B / 2^{em} cas : Source laser type exponentiel

Le type exponentiel de faisceau laser est modelé comme :

$$\dot{I}_0(t) = I_0 \exp\left(\lambda^2 t\right) \qquad \textbf{III.16}$$

Selon la même méthodologie que le premier cas, le profil de la température peut avoir, après les simplifications, la forme suivante :

$$\Theta_2(x,t)=(T_\infty-T_0)\left[erfc\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right)-E\left(\frac{hx}{k},\frac{\alpha t}{x^2}\right)\right]-\frac{1}{(\lambda^2-\alpha\mu^2}\left[\frac{\mu(1-R)(\mu+h/k)I_0}{2\rho.Cp\left(\frac{\lambda}{\sqrt{\alpha}}+\frac{h}{k}\right)}\right.$$

$$\left\{E\left(\frac{-\lambda x}{\sqrt{\alpha}},\frac{\alpha t}{x^2}\right)-\frac{\left(\frac{\lambda}{\sqrt{\alpha}}+\frac{h}{k}\right)}{\left(\frac{\lambda}{\sqrt{\alpha}}-\frac{h}{k}\right)}E\left(\frac{\lambda x}{\sqrt{\alpha}},\frac{\alpha t}{x^2}\right)+\frac{2h/k}{\left(\frac{\lambda}{\sqrt{\alpha}}-\frac{h}{k}\right)}E\left(\frac{hx}{k},\frac{\alpha t}{x^2}\right)\right\}$$

$$-\frac{\mu(1-R)I_0}{2\rho.Cp}\left\{E\left(-\mu x,\alpha t/x^2\right)-\frac{(\mu+h/k)}{(\mu-h/k)}E\left(\mu x,\alpha t/x^2\right)+\frac{2h/k}{(\mu-h/k)}\right.$$

$$\left.\left.\times E\left(hx/k,\alpha t/x^2\right)\right\}\right]+\frac{\mu(1-R)I_0 exp(-\mu x)\left[exp\left(\lambda^2 t\right)-exp\left(\alpha\mu^2 t\right)\right]}{\rho.Cp\left(\lambda^2-\alpha\mu^2\right)}$$

……III.17

III.4 Conclusion

Le profil de température pour une source laser dépendante du temps, lors de traitement thermique de surface soumis à une condition limite de convection, est présenté analytiquement selon une forme fondamentale compacte en équation **III.13**, et comme exemples d'application, Les solutions sont discutées pour le cas d'une source laser en forme d'impulsion de Dirac, et l'autre en forme exponentielle.

L'étude de ZUBAIR et CHAUDHRY est une extension du modèle de BLACKWELL, elle le ramène plus riche. Cette particularité est aussi bénéfique du fait de l'introduction d'une source variable en temps.

Cependant, les solutions analytiques obtenues sont limitées à cause de l'impossibilité à effectuer un retour de la température de Laplace par la voie des fonctions spéciales ou à l'aide des techniques connues.

CHAPITRE IV

Extension du modèle de BLACKWELL aux signaux périodiques

IV.1 Introduction

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

Dans les processus de TTL avec une seule impulsion de puissance énergétique, l'action du temps d'occupation au-dessus de la température de transformation dépend fondamentalement de la température de surface maximale atteinte .Par contre la possibilité de commander et modifier la distribution transitoire de la température pendant le chauffage par l'utilisation des impulsions énergétiques multiples permet :

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

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

La distribution gaussienne est la plus simple et la forme la plus souhaitable d'un faisceau fourni par une source laser notamment le mode transverse fondamental TEM_{00} , puis par l'utilisation des méthodes et des équipements techniques on peut obtenir des distributions quasi-harmonique et cela peut être convertis à des impulsions périodiques contrôlées couramment utilisé dans des procédés technologiques de traitement thermique en insérant dans la cavité résonante un commutateur optique (*Figure IV.1*) **[3][29][75].**

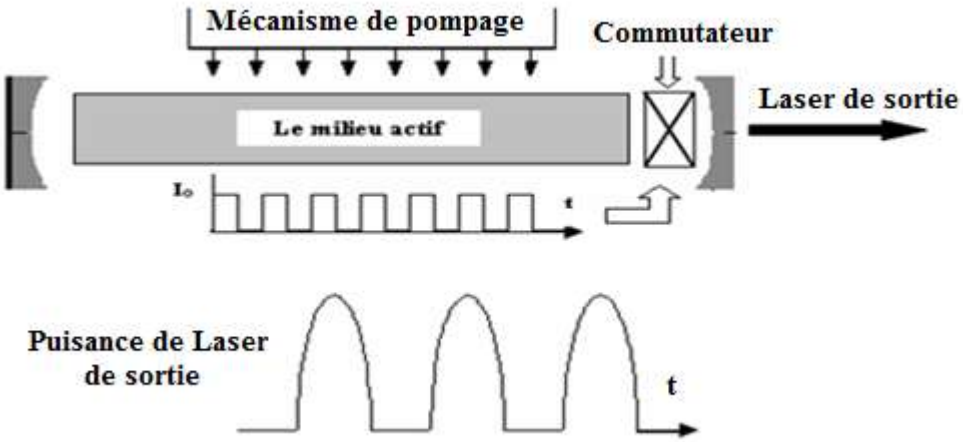
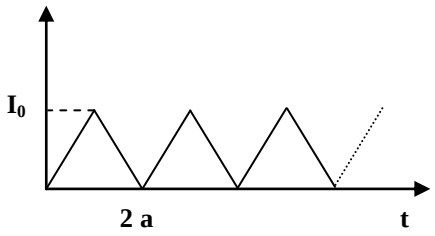
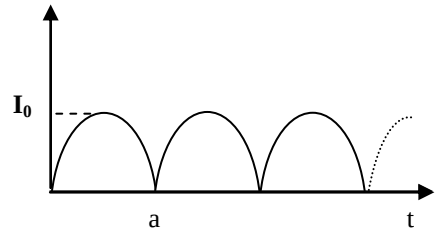
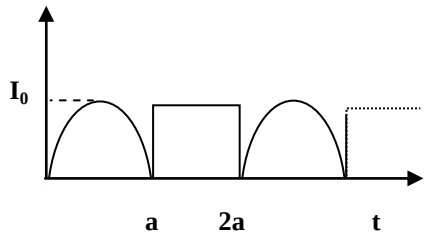
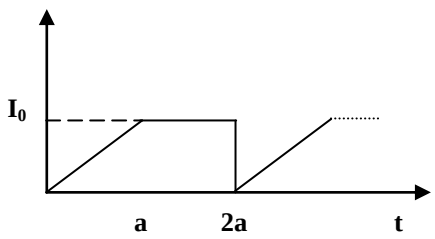


Figure IV.1 : Commutation intra cavité **[3]**

On peut avoir plusieurs formes de signaux périodiques laser selon le type d'application d'usinage. Dans le domaine du traitement thermique de surface la modélisation de ce processus exige de modéliser la source Laser.

Dans le tableau suivant, plusieurs formes sont considérées .Les signaux lasers sont accompagnés de leurs équivalents transformé **[76]**.

Tableau IV.1 : Différentes types des signaux laser **[76]**.

Type de signal	**Représentation graphique**	***Equation gouvernante dans le domaine de LAPLACE***
Triangulaire		$I(p)=\frac{I_0}{a.p^2}tangh\left(\frac{p.a}{2}\right)$
Sinusoïdal redressé		$I(p)=I_0\left(\frac{\pi a}{a^2.p^2+\pi^2}\right)cotangh\left(\frac{a.p}{2}\right)$
Rectangulaire + sinusoïdal semi redressé		$I(p)=I_0\left[\frac{\exp(-ap)(1-\exp(-ap))}{p(1-\exp(-2pa))}+\frac{\pi a(1+\exp(-ap))}{(a^2p^2+\pi^2)(1-\exp(-2ap))}\right]$
Signal de type trapèze		$I(p)=I_0\left[\frac{(1-\exp(-a.p)}{a.p^2.(1-\exp(-2.a.p))}-\frac{\exp(-2ap)}{p(1-\exp(-2ap))}\right]$

IV.3 Limite de l'étude de ZUBAIR - CHAUDHRY

Les lasers donnent des impulsions de plus en plus complexes et dépendant du temps, le modèle de ZUBAIR-CHAUDHRY **[54-55]** ne permettent que des solutions analytiques rarement pour des sources variables simples, en raison que l'équation **(III.13)** qui est présenté en forme de solution fondamentale compacte, dû au produits de convolution.

La résolution pour des sources comme ceux présentées au tableau V.1**,** ayant des formulations mathématiques compliquées dans le domaine réel, devient impossible, ou alors très longue dans le cas par exemple de la source utilisée par YILBAS **[58-59]**, qui est la superposition de deux fonctions exponentielle modelées comme :

$$I = I_0 \left(exp\left(-\beta t\right) - exp\left(-\gamma t\right) \right) \qquad \textbf{IV.1}$$

IV.4 Extension pour l'étude de ZUBAIR et CHAUDHRY

Dans notre travail, on développe un modèle avec une approche semi analytique, qui basé sur l'étude de ZUBAIR et CHAUDHRY**,** avec pour l'objectif l'obtention des solutions pour une large gamme de différentes sources laser dépendantes du temps.

La base de notre modèle repose sur la transformée de Laplace. La solution dans ce domaine est donnée par ZUBAIR et CHAUDHRY **[54-55]** , avec l'inconnue à développer y est relative à la source dépendante du temps non réel :

$$\theta\left(x,p\right) = \left(\frac{h\left(T_\infty - T_{\text{int}}\right)}{k} - \frac{\mu\left(1\text{-}\mathrm{R}\right)\left(\mu + h/k\right)}{\rho.Cp} \frac{p\bar{I}_0\left(p\right)}{\left(p - \alpha\mu^2\right)} \right) \cdot \left[\frac{exp\left(-x\sqrt{\left(\frac{p}{\alpha}\right)} \right)}{p\left(\sqrt{\left(p/\alpha\right)} + \left(h/k\right)\right)} \right] + \frac{\mu\left(1-\mathrm{R}\right)}{\rho.Cp} \frac{exp\left(-\mu x\right)\bar{I}_0\left(p\right)}{\left(p - \alpha\mu^2\right)} \qquad \textbf{IV.2}$$

Pour éviter le problème discuté en critique du modèle de ZUBAIR et CHAUDHRY dû à l'inversion analytique, et dans les cas de figures pour lesquels on ne peut pas trouver une solution analytique, on peut employer les méthodes numériques. L'une des méthodes numériques développée pour l'inversion est celle de STEHFEST **[77].**

4.1 Description de la méthode de STEHFEST

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

$$T(t) = \frac{\ln(2)}{t} \sum_{j=1}^{N} V_j \theta_i \left(\frac{j \ln(2)}{t} \right) \qquad \textbf{IV.3}$$

Pour une simple précision : $N = 10$

$V_1 = 1/12.$

$V_2 = -385/12.$

$V_3 = 1279.$

$V_4 = -46871/3.$

$V_5 = 505465/6.$

$V_6 = -473915/2.$

$V_7 = 1127735/3.$

$V_8 = -1020215/3.$

$V_9 = 328125/2.$

$V_{10} = -65625/2.$

L'équation **IV.3** est utilisée pour résoudre l'équation **IV.2**, suivant un programme en FORTRAN 77. Cette possibilité, nous permet en accord avec l'organigramme présenté, d'envisager plusieurs sources dépendantes du temps.

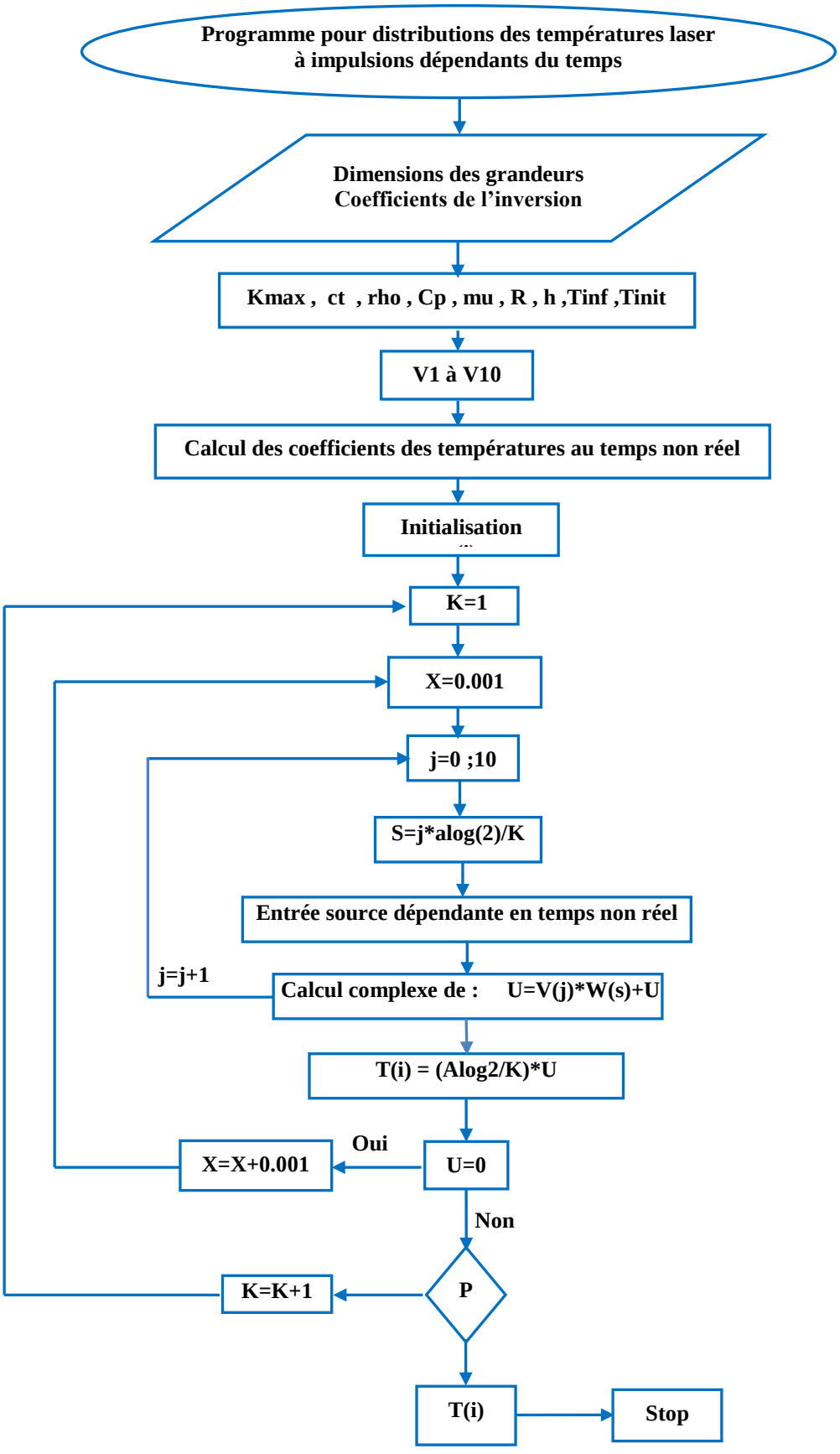


Figure IV.2 : Organigramme de calcul

IV.5 Conclusion

- Les lasers donnent des impulsions de plus en plus complexe et dépendant du temps
- Le modèle de Zubair-Chaudhry ne permet que des solutions analytiques pour des sources à forme particulière, rarement pour des sources variables.
- Le modèle de Zubair-Chaudhry donne des solutions analytiques dans le domaine d'un petit espace de x et de t dans le cas ou le coefficient d'absorption et très grand, par contre dans ces conditions et pour x et t soient relativement grandes, la solution analytique n'est plus possible que par un calcul précis, qui dépasse parfois les valeurs maximales des machines. .
- L'organigramme présenté a pour objectif le recueil des réponses aux impulsions diverses, ainsi il facilite l'étude de l'influence d'autres paramètres de traitement thermique de surface sur le profil de température et l'accès à l'épaisseur traitée de surface sans passer par les variables adimensionnelles.

CHAPITRE V

Amélioration du modèle de BLACKWELL pour l'effet non linéaire dû à l'absorptivité

V.1 Modèles théorique de L'absorptivité

Dans l'interaction thermique de laser-matériau, le paramètre le plus important qui affecte ce processus est la capacité du matériau pour absorber le rayonnement laser. On appelle absorptivité A , le rapport de la puissance convertie en chaleur dans le matériau traité à la puissance totale du faisceau laser incident **[7] [11-12]** , avec $A = 1 - R$

R : la réflectivité, définie comme le rapport des intensités incidentes et des intensités réfléchies, R et A sont fonction de la longueur d'onde λ et de la température T.

Cette absorptivité est fortement influencée par la température et les longueurs d'onde **[78-79]** , ainsi que d'autres paramètres**[80] ,**tels que la rugosité de la surface, la présence des oxydes, la polarisation et l'angle d'incidence qui sont plus contrôlé.

Pour un faisceau laser émiettant dans la gamme de l'infra rouge, incident perpendiculairement sur une surface peu rugueuse et chimiquement protégée l'absorptivité peut modéliser selon la formule de BRAMSON **[81-82]** comme suit:

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

Pour les métaux et les grandes longueurs d'onde, la formule de HAGEN-RUBENS est le développement limité au premier ordre de la relation précédente, le facteur d'absorption devient alors **[82-83]** :

$$A(T) = 0.365\sqrt{\frac{\delta(T)}{\lambda}} \qquad \textbf{V.2}$$

ARATA et MIYAMOTO **[84],** ont mesuré expérimentalement l'absorptivité des métaux pour un laser à CO_2, leurs résultats ont montré qui sont en bon accord avec celles développées en prédictions théoriques selon la loi empirique:

$$A(T) = 112.2\sqrt{\delta(T)} \qquad \textbf{V.3}$$

Tous les calculs de transfert de chaleur effectué lors de traitement des matériaux par laser exigent la connaissance de l'absorption du faisceau laser qui dépend de l'effet de la température. Une fois que le profil de température est connu, il est possible de prédire la profondeur de la zone thermiquement affectée et le profil de la dureté **[85].**

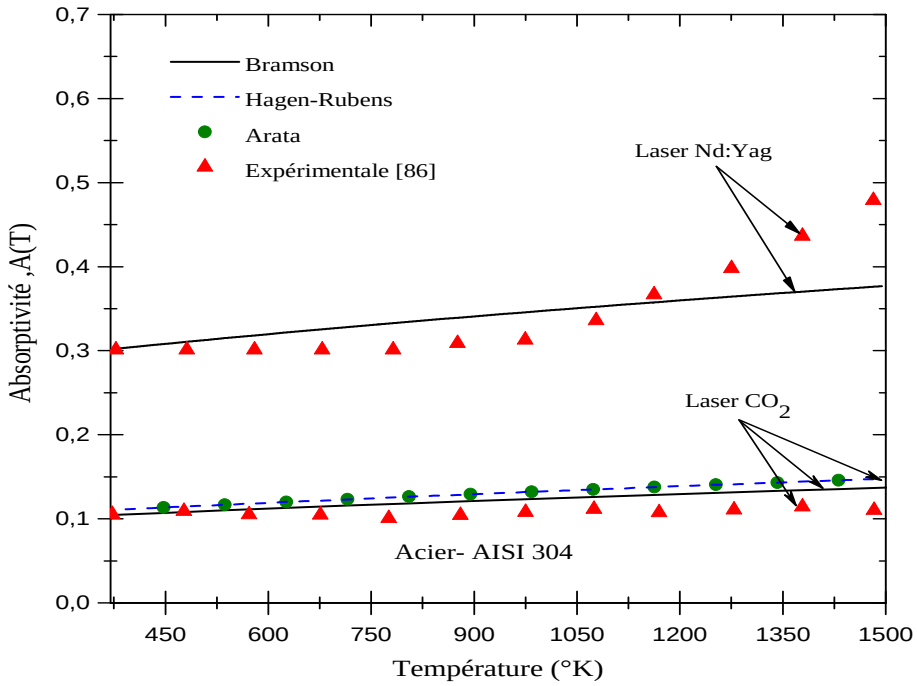


Figure V.1 : Modèles de l'absorptivité température-dépendante

La *Figure V.1*, représente une approche comparative entre les résultats expérimentaux déduits par Kwon H., et al **[86],** de l'absorptivité dépendante de la température pour l'acier inoxydable AISI 304 , et celles prédites théoriquement des modèles HAGEN-RUBENS et BRAMSON , pour les deux longueurs d'onde de laser CO_2 et Nd :YAG. Une vue simple montre que la prédiction théorique est en bon accord avec les résultats expérimentaux.

Dans ce qui suit de cette partie on s'intéresse à l'étude de l'influence de l'absorptivité température-dépendante sur le processus thermique de durcissement en phase solide. Il convient de noter l'existence des études préalables abordée ce problème.

HASSAN A. F.et al **[87],** ont développé une solution analytique pour l'évolution du profil de la température superficielle sous l'effet de l'absorptivité température-dépendante, modelée comme suit : $A\left(T\left(0,t\right)\right)=A_0+aT\left(0,t\right)$, A_0 : absorptivité à la température ambiante.

SHEN Z. H. et ZHANG S. Y. **[88]** , ont examiné le problème durcissement superficiel au laser d'une plaque mince avec une condition limite à la surface due à l'absorptivité dépendante du temps, des résultats sont relevés et discuter.

El-ADAWI M. K. et al. **[89-90],** ont proposé une solution exacte basée sur la transformée de Laplace pour un corps fini chauffé par laser tenant en compte l'absorptivité à la surface variable en fonction linéaire de la température superficielle, fondé sur une étude antérieure de WARREN R. E. et SPARKS M. **[91]** , leurs effets sont examinés et discutés.

La principale difficulté évoquée par plusieurs auteurs, concerne l'adoption des conditions aux limites, avec une absorptivité température dépendante, ce qui explique les travaux limités dans ce sens. L'estimation de l'absorptivité comme une fonction linéaire de la température superficielle citée par certains auteurs n'est pas une approximation adéquate dans la plupart des matériaux métalliques, en particulier pour les températures élevées.

Contrairement à ces travaux, nous avons traité dans ce qui suit, l'effet de l'absorptivité température - dépendante spatio-temporel sur le profil de température de TTL , à l'aide de deux approches théoriques de l'absorptivité plus généraux et précis . À cet effet nous nous sommes concentrés sur le modèle TTL de BLACKWELL, qui est le plus pratique. En raison de la condition convective prise à la surface due au gaz d'assistance qui est effectivement utilisée pour améliorer le processus de traitement thermique **[92].**

V.2 Analyse Mathématique

L'équation qui décrit la distribution de la température résulte de processus de TTL pour un matériau semi infini, homogène et isotopique recevant sur sa face latérale un faisceau laser avec une absorptivité dépendante en température, est donnée par l'équation différentielle suivante :

$$\begin{cases} \rho.Cp\,\dfrac{\partial T}{\partial t} = k\,\dfrac{\partial^2 T}{\partial x^2} + A(T)\,I_0\,\mu.exp(-\mu x)f(t) \\ f(t) = \begin{cases} 1 & t \le t_H \cdots Phase_d'échauffement \\ 0 & t > t_H \ldots Phase_de_refroidissement \end{cases} \end{cases} \qquad \textbf{V4}$$

Les conditions initiales et aux limites sont les mêmes que dans le ca du modèle de BLACKWELL

Dans cette étude, nous voulons examiner l'effet de l'absorptivité température-dépendante sur le processus de traitement thermique au laser, on focalise l'analyse sur la phase d'échauffement, car c'est dans cette phase que l'effet de l'absorptivité est observé.

Un cas de l'équation différentielle de la chaleur fortement non linéaire est considéré dans cette analyse en phase d'échauffement. Dans la phase de refroidissement l'analyse s'effectuer de la manière suivante : on annule l'intensité laser, et on considère comme condition initiale la température résultante a la fin de la phase d'échauffement, à cet effet la résolution du problème peut être simplifié à une solution analytique proposée par BLACKWELL **[50]** , pour $I_0 = 0 \quad \mathrm{W/m^2}$ comme suit :

$$T(x,t) - T_H = (T_\infty - T_H)\left[erfc\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right) - exp\left(\frac{h^2}{k^2}\alpha t + \frac{hx}{k}\right) erfc\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} + \frac{h}{k}\sqrt{\alpha t}\right)\right] \qquad \textbf{V5}$$

V.3 Analyse de la phase d'échauffement selon l'absorptivité en dépendance de la température

Dans cette étape, deux modèles théoriques de l'absorptivité température dépendant cité précédemment sont considérés, à savoir ceux de HAGEN- RUBENS et BRAMSON .Ces modèles sont tenus en compte dans le développent des équations de processus de durcissement superficiel par laser, émis dans la gamme de l'infrarouge, particulièrement pour le laser CO_2 et Nd : YAG qui sont les plus étendus dans l'industrie **[93-94]**.

A. Modèle de HAGEN - RUBENS

Le laser CO_2 est l'un des premiers lasers à gaz. Il est encore l'un des plus utiles dans l'industrie. Il émet une longueur d'onde de l'infrarouge lointain, principalement à 10,6 µm . L'absorptivité peut être écrite selon la loi de HAGEN- RUBENS comme :

$$A(T) = 0.365\sqrt{\frac{\delta(T)}{10,6.10^{-6}}} \qquad \textbf{V.6}$$

La résistivité électrique peut être modélisée dans les métaux en tant que fonction linéaire de la température comme suit **[95]**:

$$\delta(T) = \delta_0\left(1 + a\left(T(x,t) - T_0\right)\right) \qquad \textbf{V.7}$$

Nous offrons un ensemble de variables adimensionnelles, afin de réduire le nombre et l'ordre de grandeur pour une meilleure résolution de l' éq **V.4** .

$$\begin{cases} \theta = \dfrac{\left(T(x,t) - T_0\right)}{I_0}.k\,\mu \\ \chi = \mu x \\ \tau = \mu^2 \alpha t \\ \mathrm{Bi} = \dfrac{h}{\mu k} \end{cases} \qquad \textbf{V.8}$$

On base sur les équations **V.4**,**V.6**, **V.7** et **V.8**,puis après le développement et les simplifications, les équations du processus deviennent comme suit :

$$\frac{\partial\theta}{\partial\tau} = \frac{\partial^2\theta}{\partial\chi^2} + 112.2\sqrt{\delta_0(1+\beta\theta)}.exp(-\chi). \qquad \textbf{V.9}$$

Avec :

$$\beta = \frac{a.I_0}{k.\mu} \qquad \textbf{V.10}$$

Les conditions initiales et aux limites en domaine adimensionnel sont données par :

$$\begin{cases} \theta(\chi,0) = 0 \\ \left.\dfrac{\partial\theta(0,\tau)}{\partial\chi}\right|_{\chi=0} = \mathrm{Bi}\left[\theta(0,\tau) - \theta_\infty\right] \\ \dfrac{\partial\theta(\infty,\tau)}{\partial\chi} = 0 \end{cases} \qquad \textbf{V.11}$$

B. Modèle de BRAMSON

Les lasers Nd :YAG de longueur d'onde de 1.06 µm présentent l'avantage, par rapport aux lasers CO_2, d'être beaucoup plus compacts pour des puissances équivalentes et de pouvoir utiliser des fibres optiques pour le transport du faisceau , dans ce cas, la prédiction de l'absorptivité selon HAGEN- RUBENS divergent comparent aux résultats expérimentaux ; une extension dans la gamme de l'infrarouge a été développé par BRAMSON tel que cité ci-dessus. L'eq.**V. 4** sous la forme adimensionnelle peut être écrit comme :

$$\frac{\partial\theta}{\partial\tau}=\frac{\partial^2\theta}{\partial\chi^2}+\left[0.365\sqrt{\frac{\delta_0(1+\beta\theta)}{\lambda}}-0.667\left(\frac{\delta_0(1+\beta\theta)}{\lambda}\right)+0.006\left(\frac{\delta_0(1+\beta\theta)}{\lambda}\right)^{3/2}\right].e^{-\chi} \qquad \textbf{V.12}$$

Les conditions initiales et aux limites sont les mêmes que celles cité en **V.11**

V.4 Solution Numérique :

En utilisant les conditions initiales et aux limites citées dans l'équation **V.11**, en premier cas avec l'équation **V.9**, et dans le second cas avec **V.12**, les systèmes sont résolues numériquement, à cet effet une méthode de différence finie et utilisée. Cette méthode peut-être formulée pour contourner la difficulté de résolution de l'équation différentielle fortement non linéaire résulte de la dépendance en température de l'absorptivité, selon les deux modèles théoriques de Hagen - Rubens et Bramons, à la phase d'échauffement.

4.1 Méthode des différences finies

Les détails de cette méthode numérique sont donnés dans la Réf **[96]**. Un schéma de **CRANCK -NICHOLSON** est employé pour la discrétisation de l'équation de la chaleur, sur une grille uniforme en temps et en espace, de pas respectivement δt et h.
Ce schéma est inconditionnellement stable. Il est très populaire pour résoudre les équations paraboliques.

4.1.1 Discrétisation de CRANCK –NICHOLSON

A : Cas de HAGEN - RUBENS

$$\frac{\theta(\chi,\tau)}{s}-\frac{\theta(\chi,\tau-s)}{s}-56.05\sqrt{\delta_0+\beta\theta(\chi,\tau-s)}.e^{-\chi}$$

$$-\frac{1}{2}\frac{\theta(\chi-h,\tau-s)}{h^2}+\frac{\theta(\chi,\tau-s)}{h^2}$$

$$-\frac{1}{2}\frac{\theta(\chi+h,\tau-s)}{h^2}-56.05\sqrt{\delta_0+\beta\theta(\chi,\tau)}.e^{-\chi} \qquad \textbf{V.13}$$

$$-\frac{1}{2}\frac{\theta(\chi-h,\tau)}{h^2}+\frac{\theta(\chi,\tau)}{h^2}-\frac{1}{2}\frac{\theta(\chi+h,\tau)}{h^2}=0$$

Les conditions initiales et aux limites sont données comme suit :

$$\begin{cases}\theta(\chi,0)=0\\ \dfrac{\partial\theta(0,\tau)}{\partial\chi}=-\dfrac{1}{2}\dfrac{\theta(\infty-h,s)}{h}+\dfrac{1}{2}\dfrac{\theta(\chi+h,\tau)}{h}=\mathrm{Bi}\,[\theta(0,\tau)-\theta_\infty] \qquad \textbf{V.14}\\ \dfrac{\partial\theta(\infty,\tau)}{\partial\chi}=-\dfrac{1}{2}\dfrac{\theta(\infty-h,s)}{h}+\dfrac{1}{2}\dfrac{\theta(\infty+h,\tau)}{h}=0\end{cases}$$

B : Cas de BRAMSON

- **Pour le Laser CO_2**

$$\frac{\theta(\chi,\tau)}{s}-\frac{\theta(\chi,\tau-s)}{s}-\frac{1}{2}\Big(\ 112.2\sqrt{\delta_0+\beta\theta(\chi,\tau-s)}-6292.45283\,\delta_0$$

$$-6292.45283\beta\theta(\chi,\tau-s)+173857.11\left(\delta_0+\beta\theta(\chi,\tau-s)\right)^{\frac{3}{2}}\ \Big).e^{-\chi}$$

$$-\frac{1}{2}\frac{\theta(\chi-h,\tau-s)}{h^2}+\frac{\theta(\chi,\tau-s)}{h^2}$$

$$-\frac{1}{2}\frac{\theta(\chi+h,\tau-s)}{h^2}-\frac{1}{2}\Big(\ 112.2\sqrt{\delta_0+\beta\theta(\chi,\tau)}-6292.45283.\delta_0$$

$$-6292.45283.\beta\theta(\chi,\tau)+173857.11\left(\delta_0+\beta\theta(\chi,\tau)\right)^{\frac{3}{2}}\ \Big).e^{-\chi}$$

$$-\frac{1}{2}\frac{\theta(\chi-h,\tau)}{h^2}+\frac{\theta(\chi,\tau)}{h^2}-\frac{1}{2}\frac{\theta(\chi+h,\tau)}{h^2}=0$$

…….. **V.15**

- **Pour le Laser Nd :YAG**

$$\frac{\theta(\chi,\tau)}{s}-\frac{\theta(\chi,\tau-s)}{s}-\frac{1}{2}\Big(\ 352.8588185\sqrt{\delta_0+\beta\theta(\chi,\tau-s)}-62336.4486\ \delta_0$$

$$-62336.4486\ \beta\theta(\chi,\tau-s)$$

$$+5420952.275\left(\delta_0+\beta\theta(\chi,\tau-s)\right)^{\frac{3}{2}}\ \Big).e^{-\chi}$$

$$-\frac{1}{2}\frac{\theta(\chi-h,\tau-s)}{h^2}+\frac{\theta(\chi,\tau-s)}{h^2}\ -\frac{1}{2}\frac{\theta(\chi+h,\tau-s)}{h^2}$$

V.16

$$-\frac{1}{2}\Big(\ 352.8588185\sqrt{\delta_0+\beta\theta(\chi,\tau-s)}-62336.4486\ \delta_0$$

$$-62336.4486\beta\theta(\chi,\tau)+5420952.11275\left(\delta_0+\beta\theta(\chi,\tau)\right)^{\frac{3}{2}}\ \Big).e^{-\chi}$$

$$-\frac{1}{2}\frac{\theta(\chi-h,\tau)}{h^2}+\frac{\theta(\chi,\tau)}{h^2}-\frac{1}{2}\frac{\theta(\chi+h,\tau)}{h^2}=0$$

Pour les conditions initiales et aux limites sont les mêmes que celles données par l'équation **V.14** , Puis selon la méthode itérative de NEWTON RAPHSON, et un programme

développer en Maple, des résultats numériques sont relevés puis converties en graphes à l'aide de logiciel Origin.

Dans cette partie en utilise une intensité laser constante de $I_0 = 10^{12}$ W.m^{-2} , pour calculer l'évolution de la température dans un substrat en type acier , soit *initialement* porté à la température ambiante de 20 °C , les valeurs des propriétés du matériau utilisé sont indiquées dans le *tableau V.1* , le nombre de *Bi* est fixé à 0,01 inferieur au nombre critique *Bi* discuté par BLACKWELL, pour éviter le problème de l'enlèvement explosif du matériau.

Tableau V.1 : Les propriétés de substrat utilisées dans la simulation **[97]**

Matériau	ρ $\left[Kg/m^3\right]$	Cp $\left[J/KgK\right]$	k $\left[W/mK\right]$	μ $\left[1/m\right]$	δ_0 $\left[\Omega.m\right]$	a $\left[K^{-1}\right]$
AISI 304	**7900**	**477**	**15.1**	**6.17×10^7**	**7.2×10^{-7}**	**9.4×10^{-4}**

CHAPITRE VI

Résultats et discussions

PARTIE 1 : *EXTENSION DU MODELE DE BLACKWELL POUR LES SIGNAUX LASERS PERIODIQUES*

VI. 1 Validation du modèle étendu

Pour la validation de notre extension du modèle, une comparaison est faite avec les modèles analytiques de BLACKWELL **[50]** et le modèle de ZUBAIR et CHAUDHRY **[54-55]** selon les données de calcul illustrées dans le *tableau VI.1*. Ceci représente les propriétés thermo physiques du substrat traité et les caractéristiques du faisceau laser utilisé.

Les résultats de la température :$T(x,t)=\theta(x,t)+T_0$, obtenus numériquement par notre modèle adapté est traité par le logiciel ORIGIN. Par suite, les équations analytiques des modèles concernés sont rappelées et les résultats sont présentés sous forme de graphes.

Tableau VI.1 : Les caractéristiques thermo physiques du substrat et du faisceau laser **[98-99]**

Substrat	ρ $\left[Kg/m^3\right]$	Cp $\left[J/KgK\right]$	k $\left[W/mK\right]$	$\mu\times10^{-3}$ $\left[1/m\right]$	I_0 $\left[W/m^2\right]$	λ^2 $\left[s^{-1}\right]$
Céramique Technique (MgO)	3580	870	40	1,00	2×10^7	0,2

Conditions et données initiales de calcul

On se propose que l'étude soit faite dans les conditions suivantes :

- Le traitement pendant la phase d'échauffement s'effectue avec un gaz (l'air par exemple), avec la convection libre. On prend dans ce cas le coefficient de convection thermique h $\left[Wm^{-2}K^{-1}\right]$ de l'ordre de 10 **[100].**

-Dans la phase de refroidissement, on utilise un liquide, avec la convection forcée .Dans ce cas le coefficient h est de l'ordre de 1000 (l'eau par exemple) **[100].**

- La température initiale du substrat : $T_0 = 25^{\circ}C$

- La température de l'environnement : $T_\infty = 25^{\circ}C$

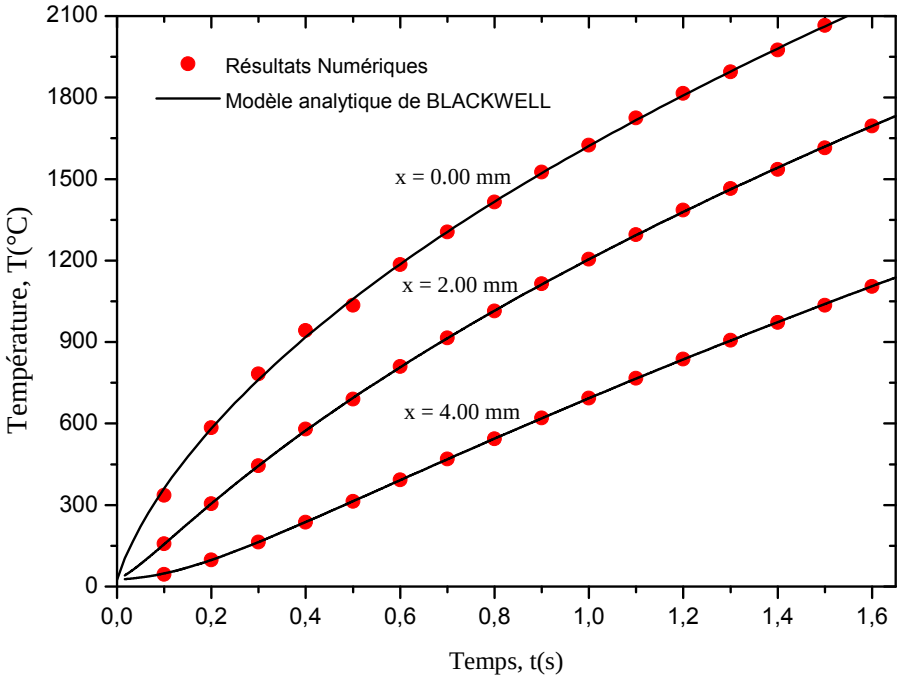


Figure VI.1 : Validation de notre modèle avec le modèle de BLACKWELL (Phase d'échauffement)

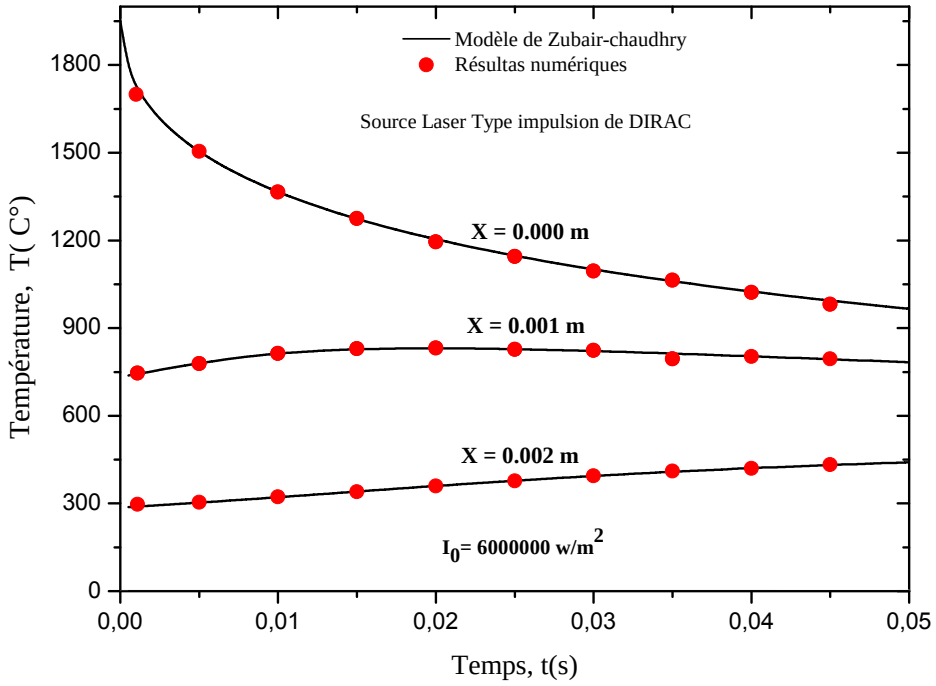


Figure VI.2 : Validation de notre solution avec celui de ZUBAIR et CHAUDHRY pour la source de type instantanée (impulsion de Dirac)

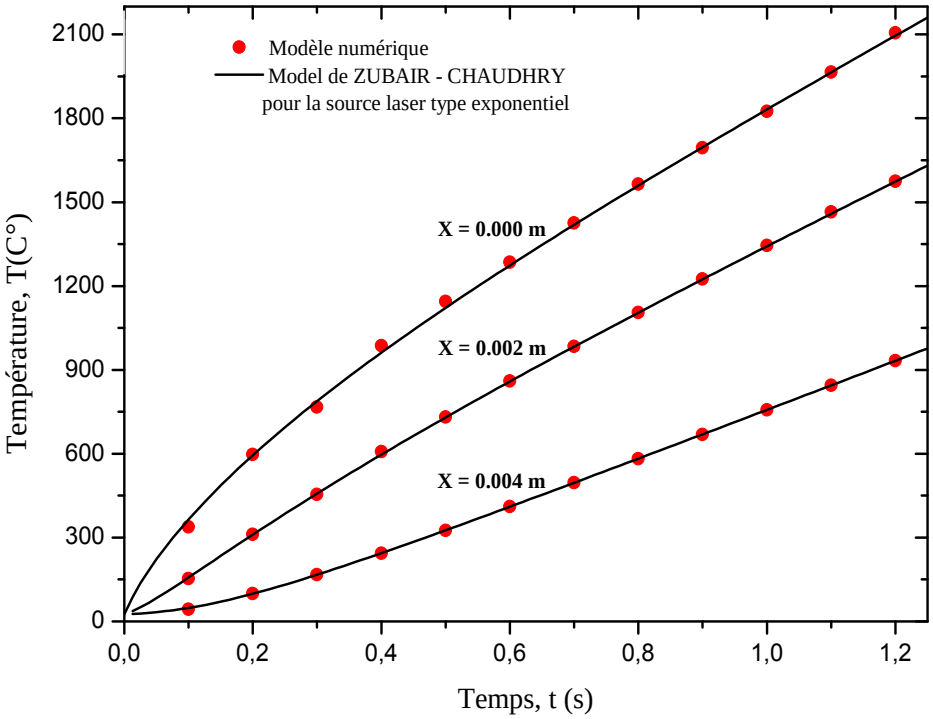


Figure VI.3 : Validation de notre modèle avec celui de ZUBAIR et CHAUDHRY pour la source type exponentiel

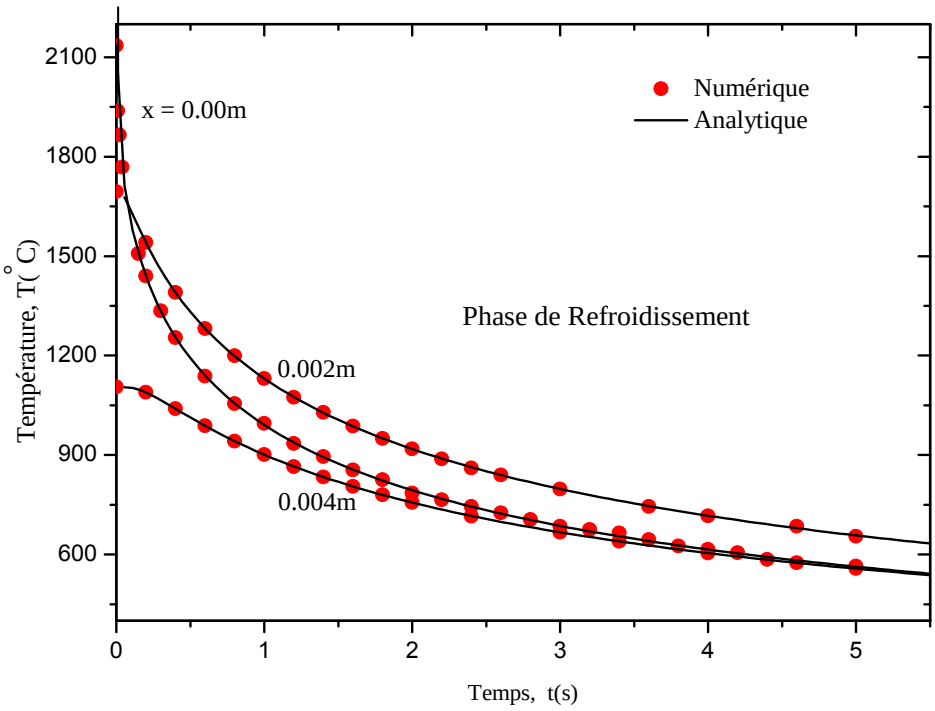


Figure VI.4 : Validation de notre solution avec celui de BLACKWELL (Phase de refroidissement)

VI. 2 Réponses à différentes sources laser dépendantes du temps

2.1 Données générales de calcul

a) Données sur le matériau traité

Le *tableau VI.2* représente les propriétés thermo physiques, pour un acier. Il s'agit d'un acier fréquemment utilisé en pratique industrielle.

Tableau VI.2 : Les caractéristiques thermo physiques du substrat Type acier **[100]**

Substrat	ρ $\left[Kg/m^3\right]$	Cp $\left[J/KgK\right]$	k $\left[W/mK\right]$	T_{fusion} $\left[^{\circ}C\right]$
Acier	**7850**	**660**	**38.3**	**1470**

b) Données sur la source laser

Différentes types de sources sont utilisés ensuite pour le traitement de l'acier. Le *tableau V.1*, montre l'allure de ces sources et le *tableau VI.3* en donne les caractéristiques. Pour des raisons évidentes de comparaison, on admet la même période pour la charge du signal thermique.

Tableau VI.3 : Caractéristiques des sources laser

Type de source laser	I_0 $\left[W/m^2\right]$	a $\left[s\right]$	β $\left[s^{-1}\right]$	γ $\left[s^{-1}\right]$
$I = I_0\left(exp\left(-\beta t\right) - exp\left(-\gamma t\right)\right)$ **[58-59]**	1000	/	1	20
Signal triangulaire Tableau V.1	1000	0.005	/	/
Signal Sinusoïdal redressé Tableau V.1	1000	0.005	/	/
Signal (Rectangulaire + sinusoïdal Semi redressé) Tableau V.1	1000	0.005	/	/
Signal de type trapèze Tableau V.1	1000	0.005	/	/

De même, et en prenant des réalisations pratiques, on se propose que l'étude soit faite avec un laser CO_2, dont le coefficient d'absorption dans les aciers est de l'ordre de $6\times10^7\left[1/m\right]$, alors que le coefficient de réflexion R et tend vers zéro.

C) Conditions et données initiales de calcul

Les conditions de traitement sont :

- Le traitement pendant la phase d'échauffement ce faite avec un gaz de protection qui entre en coaxial avec le faisceau laser, généralement utilisé pour protéger le métal contre l'oxydation **[92]**, avec une convection libre ou forcée. Dans notre calcul nous avons évalués de prendre la valeur du coefficient de convection thermique $h\left[Wm^{-2}K^{-1}\right]$ de l'ordre de 10, dans la gamme de la convection libre **[100].**

-Dans la phase de refroidissement on utilise un liquide en convection forcée. Le coefficient h est alors de l'ordre de 10000 (l'eau par exemple) **[100].**

- La température initiale du substrat : $T_0 = 20^{\circ}C$

- La température de l'environnement : $T_{\infty} = 30^{\circ}C$.

2.1) Procédure de calcul

Pour la phase d'échauffement, on applique une intensité laser non nulle de l'une des sources du *tableau VI.3***,** modelée en temps non réel. Notre programme de calcul nous donne les températures du substrat en temps réel à chaque pas du temps Δt et de profondeur Δx choisie. Le calcul dans cette phase est arrêté pour une $T_{\max} = 1400^{\circ}C$.

Pour la phase de refroidissement qui suit le traitement, on annule le flux laser et on considère comme condition initiale le champ de température résultant de la phase d'échauffement, c'est à dire qu'on prend $T_0 = 1400^{\circ}C$. De même le profil de la température dans cette phase est obtenu à chaque pas du temps Δt et à la profondeur Δx ciblée.

Les résultats numériques sont de peu d'utilité s'ils ne sont pas exploitables, donc il est préférable de les présenter sous forme visuelle, c'est à dire sous forme de graphe .On est aidé dans cette tâche par le logiciel ORIGIN 6.0

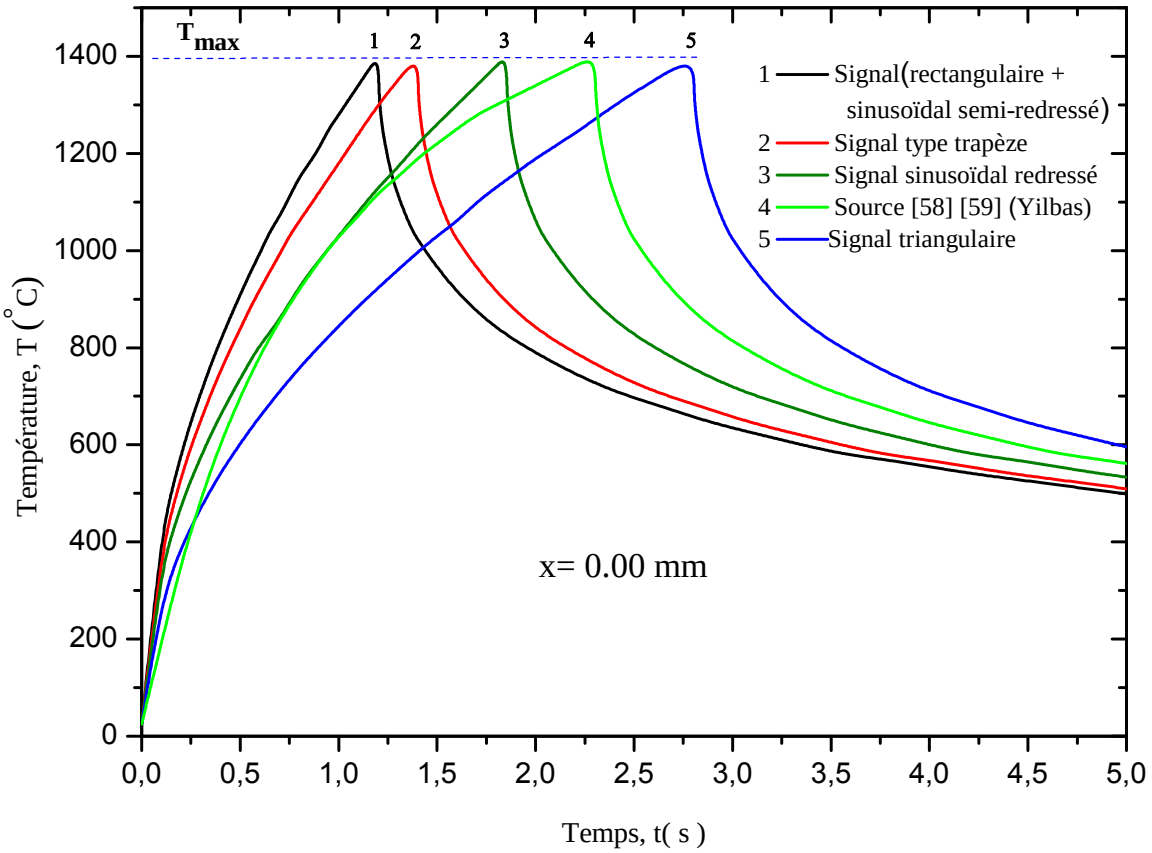


Figure VI.5 : Profils de température pour différentes sources laser pour x = 0.0mm

La *figure VI.5* représente l'évolution temporelle de la température sur la surface de l'acier (x = 0.000 m). Il est clair que chaque profil obtenu par une source donnée diffère de l'autre. *Le tableau VI.4* met en évidence le temps nécessaire d'utilisation de chaque source pour atteindre la température maximale $T_{x=0} = 1400\,^{\circ}C$.

Comme résultat remarquable, une quantité d'énergie peut se traduire par plusieurs profils de température .Selon la distribution de la source, lors de traitement thermique de surface. On remarque que le signal le plus condensé en termes de répartition thermique peut mener rapidement à la température superficielle maximale. Cependant ce n'est pas le critère unique pour préférer une source à l'autre. On pourra s'articuler sur l'évolution de la température suivant la profondeur.

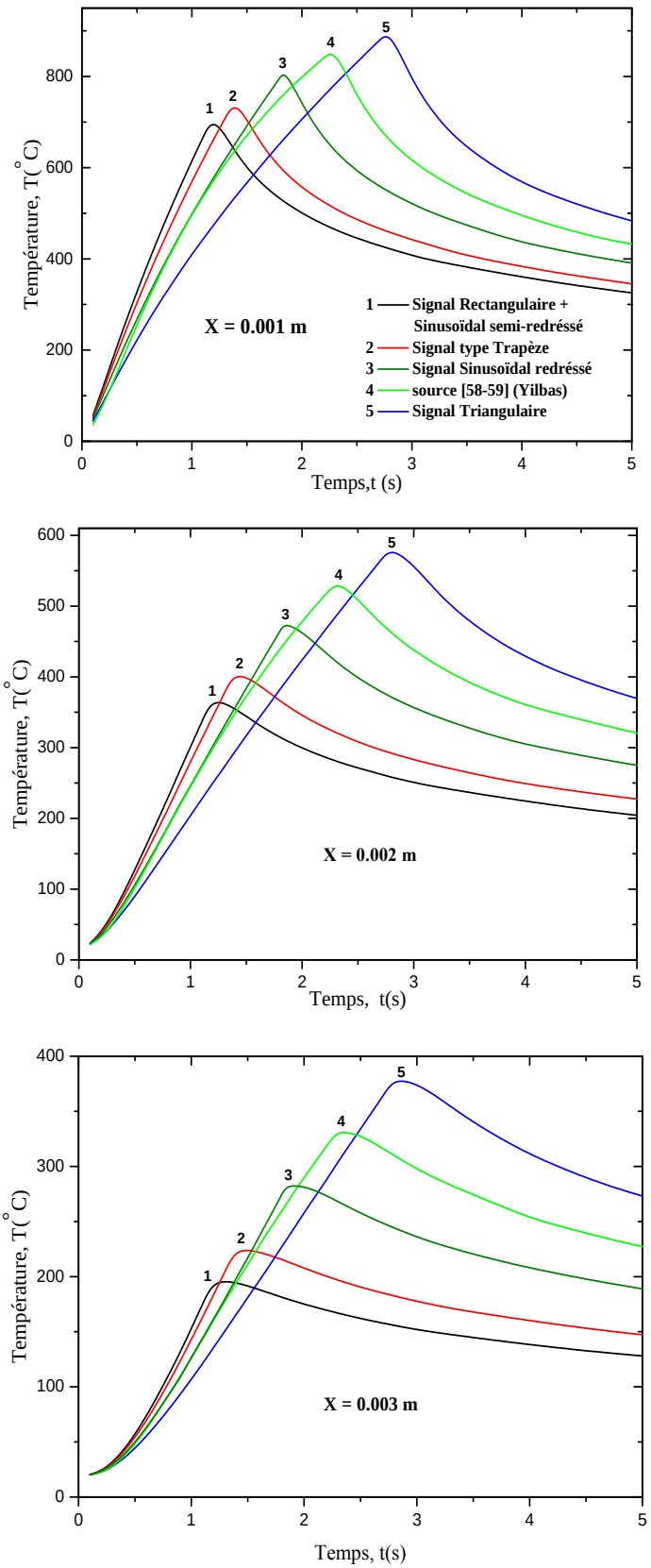


Figure VI.6 : Profils de température pour différentes sources laser pour x = 1 mm , x =2mm et x = 3 mm

Tableau VI.4 : Valeurs du temps nécessaire pour différentes sources, pour atteindre la température $T_{x=0} = 1400^{\circ}C$

Type de la source Laser	$T_{x=0}\left[^{\circ}C\right]$	$t\left[s\right]$
Signal (Rectangulaire + sinusoïdal semi redressé)	1400	1.20
Signal de type trapèze	1400	1.40
Signal Sinusoïdal redressé	1400	1.85
Source de type : $I = I_0(\exp(-\beta t) - \exp(-\gamma t))$ **[58-59]**	1400	2.30
Signal triangulaire	1400	2.80

La *figure VI.6* représente l'évolution de la température pour des profondeurs différentes de zéro, et pour les différentes sources laser, en maintenant une température superficielle identique $T_{x=0} = 1400^{\circ}C$. L'évolution de la température maximale selon la profondeur $\left(x \neq 0.00m\right)$ du matériau - *Tableau VI.5* – n'est pas la même. De ce fait, on note tout l'intérêt d'une source variable en temps pour le traitement thermique.

Tableau VI.5 : Valeurs de la température pour quelques profondeurs, avec $T_{x=0} = 1400^{\circ}C$ pour les différentes sources laser.

Type de source laser	$T_{\max}, x = 0.00$ $\left[^{\circ}C\right]$	$T_{\max}, x = 0.001$ $\left[^{\circ}C\right]$	$T_{\max}, x = 0.002$ $\left[^{\circ}C\right]$	$T_{\max}, x = 0.003$ $\left[^{\circ}C\right]$
Signal (Rectangulaire + sinusoïdal semi redressé)	1400	716	371	197
Signal de type trapèze	1400	751	408	226
Signal Sinusoïdal redressé	1400	814	478	284
Source de type **[58-59]** : $I = I_0(\exp(-\beta t) - \exp(-\gamma t))$	1400	860	524	332
Signal triangulaire	1400	901	583	380

Pour bien illustrer cette influence des types de source, sur les caractéristiques du traitement, on analyse la pénétration du flux thermique. On choisit comme repère, précisément la température superficielle $T_{\max} = 1400^{\circ}C$

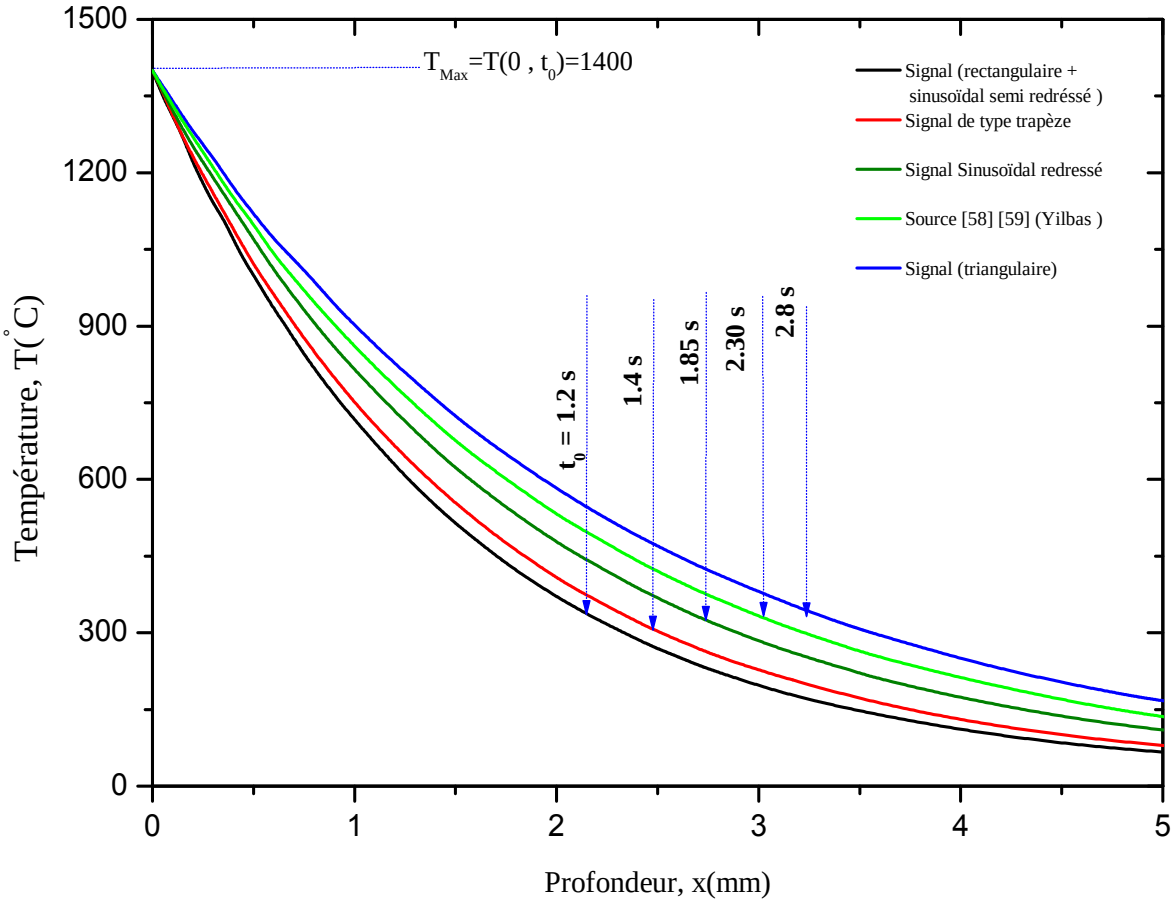


Figure VI.7 : Profil de la température $T_{\max}\left(1400^{\circ}C, t_0\right)$ en rapport à la profondeur pour différentes sources laser

La *figure VI.7***,** montre la répartition de la température $T_{\max}\left(1400^{\circ}C, t_0\right)$ en rapport à la profondeur du matériau traité, pour différentes sources Laser. Une simple vue des graphes, nous mène à la conclusion que la température maximale se situe à la surface. Ceci n'est pas controversé à l'analyse de BLACKWELL car la condition, $h \langle\langle 10^8 \left[Wm^{-2}K^{-1}\right]$ **[62-63],** est respectée.

Les signaux lasers les plus condensés, suivant la répartition de l'énergie, ont un effet faible suivant la pénétration dans la surface traitée, à cause de l'atteinte de la température superficielle maximale plus rapide. Dans ces conditions, le temps de traitement et l'interaction laser-acier et le plus court, ce qui a une influence directe sur la force de pénétration de la chaleur dans le matériau.

Cet effet différent de la pénétration de la chaleur dans le matériau, ayant une influence relative à l'épaisseur minimale critique du matériau traité, est conforme à la condition du milieu semi infini, qui reste valable, et aussi sur l'épaisseur maximale austénisé.

Le critère de milieu semi infini implique que l'épaisseur de la profondeur traitée et très petite devant l'épaisseur du matériau, précisément lorsque la surface exposée atteinte la température maximale en phase d'échauffement, et la surface opposée reste toujours à la température environnante ou à la température initiale.

2.2) Approximation de l'épaisseur minimale critique du matériau traité

Dans notre cas, la température maximale se situe sur la surface latérale et $T_{x=0} = 1400^{\circ}C$ et la température de l'environnement est $T_{\infty} = 30^{\circ}C$ .Pour approximé l'épaisseur minimale du matériau traité dans notre cas, en considère la plus proche profondeur ayant la même température de l'environnement, ce qui est bien schématiser sur la *Figure VI.8* et les valeurs trouvées sont reportées au tableau VI.6.

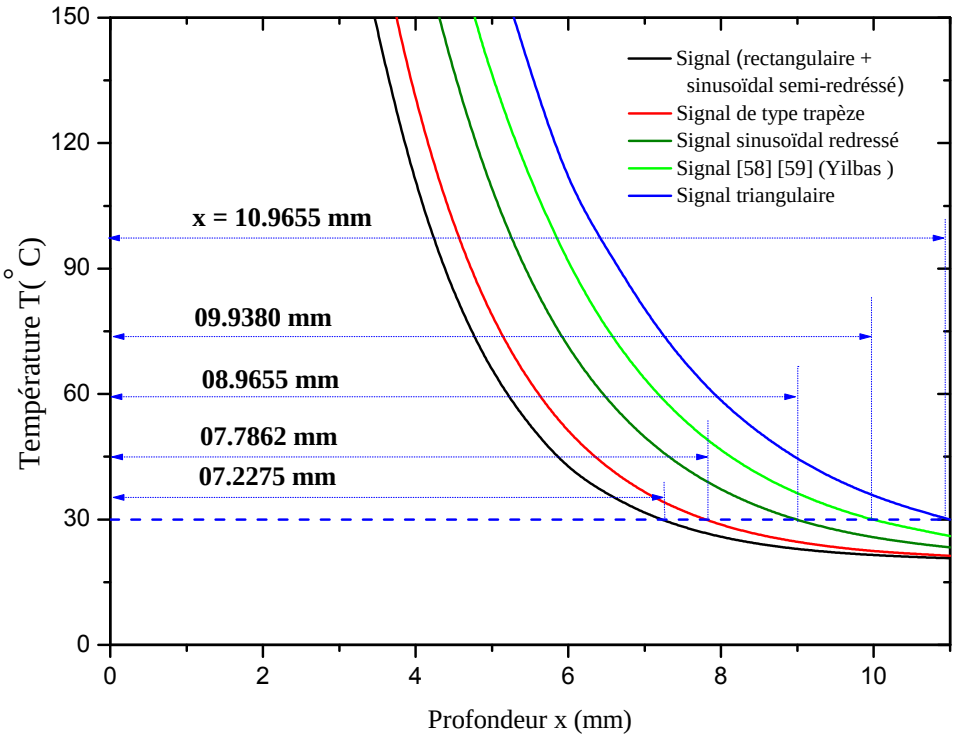


Figure VI.8: Approximation de l'épaisseur minimale du matériau traité pour différentes sources laser

Tableau VI.6 : Valeurs Approximative de l'épaisseur minimale critique du matériau traité pour les différentes sources lasers.

Type de source Laser	$T_{\max}(x = 0.00)$ $[m]$	Epaisseur minimale $x\,[m]$ exigé du matériau traité
Signal (Rectangulaire + sinusoïdal semi redressé)	1400 °C	07.2275×10^{-3}
Signal de type trapèze	1400 °C	07.7862×10^{-3}
Signal Sinusoïdal redressé	1400 °C	08.9655×10^{-3}
Source de type : **[58-59]** $I = I_0\left(exp(-\beta t) - exp(-\gamma t)\right)$	1400 °C	09.9380×10^{-3}
Signal triangulaire	1400 °C	10.9655×10^{-3}

2.4 Approximation de l'épaisseur austénisée

Dans notre cas le matériau traité et de type acier, et généralement, subie des transformations structurales à partir de $T = 800^{\circ}C$, (austénisation de l'acier dans la phase d'échauffement) **[15]** .Les profondeurs maximales atteintes, à la fin de phase d'échauffement, avec une température du surface $T_{x=0} = 1400^{\circ}C$, et pour toutes les sources laser , sont montrées à la *figure VI.9* et indiquées au *tableau VI.7.*

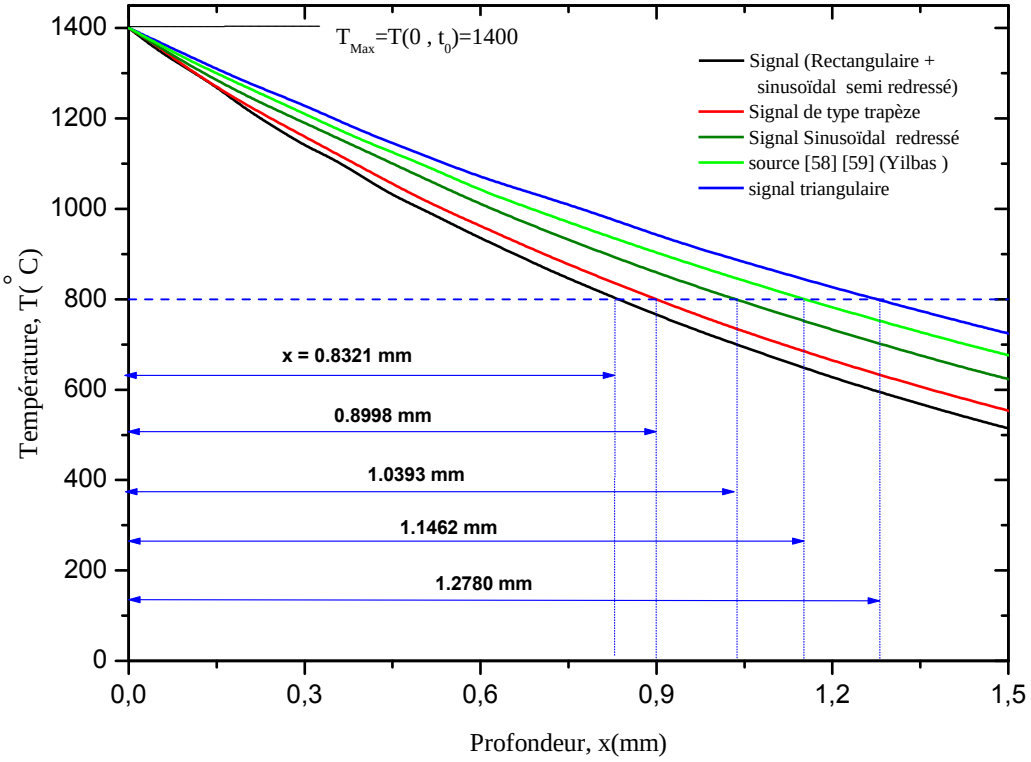


Figure VI.9 : Approximations des profondeurs maximales austénisée, pour ≠ sources laser

La *figure VI.9* représente l'approximation des profondeurs ayant le changement de structure (austénitisation), lors de phase d'échauffement. On remarque que la profondeur austénisée est de plus en plus augmente selon la décroissance de la répartition énergétique de la source utilisée, et qui est liée directement au temps de l'interaction entre le faisceau laser et le matériau traité.

Tableau VI.7 : Valeurs de profondeur austénisée, pour les différentes sources laser

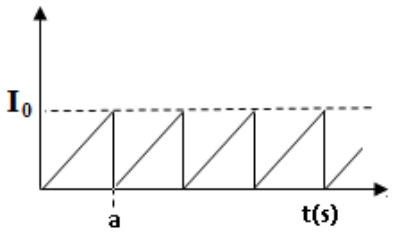
Type de source laser	$T_{x=0}\left[^{\circ}C\right]$	Temps de l'interaction	Approximation de profondeur austinisée $\times 10^{+3}\left[m\right]$
Signal (Rectangulaire + sinusoïdal semi redressé)	1400 °C	1.20 s	0.8321
Signal de type trapèze	1400 °C	1.40 s	0.8998
Signal Sinusoïdal redressé	1400 °C	1.85 s	1.0393
Source de type **[58-59]** : $I = I_0\left(\exp(-\beta t)-\exp(-\gamma t)\right)$	1400 °C	2.30 s	1.1462
Signal triangulaire	1400 °C	2.80 s	1.2790

VI. 3 Influence de la variation de l'intensité laser I_0

Dans cette étude on fixe la répartition énergétique de la source laser, et on considère une répartition de type signal périodique en dents de scie *tableau VI.8,* pour le même matériau traité avec les propriétés citées dans le *tableau VI.2,* et on varie l'intensité de $I_0\left[W/m^2\right]$. Comme exemple en prend les quatre valeurs suivantes :1000, 1500, 2000, 2500, de l'intensité Laser.

On évalue les profils de température temporelle surfacique, l'effet en profondeur, pour l'estimation de la profondeur austénisée, estimation de l'épaisseur minimale critique exigé du matériau traité, et pour ces valeurs on discute leurs influences.

Tableau VI.8 : Représentation mathématique du signal laser type dents de scie

Type de source	**Schématisation dans le domaine réel**	**Equation de la source**
Signal périodique type dents de scier		Dans le domaine réel $I(t)=\sum_{n=0}^{\infty} I_0 \frac{t}{a}\left[u(t-na)-u\left(t-(n+1)a\right)\right]$
		Dans le domaine de Laplace $I(p)=\frac{I_0}{p^2.a}-\left(\frac{I_0 exp(-p.a)}{p.(1-exp(-p.a))}\right)$

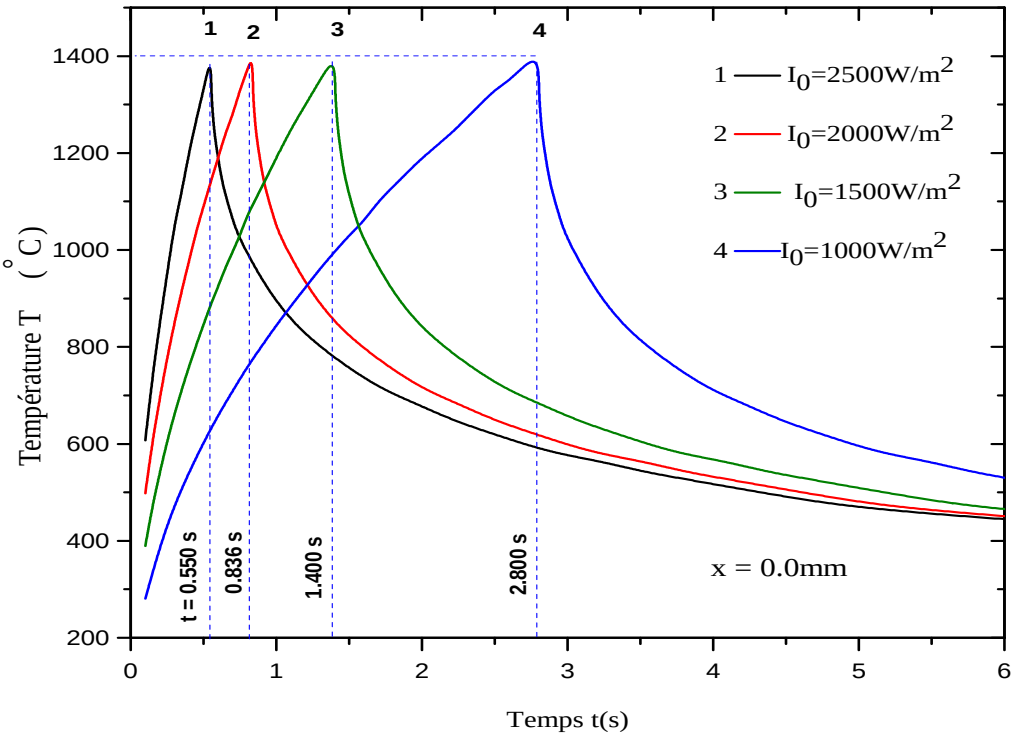


Figure VI.10 : Profils de température superficielle pour différentes valeurs de $I_0\left[W/m^2\right]$ pour un laser type signal dents de scie.

La *figure VI.11* représente l'évolution de la température de surface du matériau traité pour les différentes valeurs de l'intensité $I_0\left[W/m^2\right]$, la surface du matériau peut avoir la température superficielle maximale du traitement en phase solide de plus en plus rapidement dans le sens de l'augmentation de l'intensité.

Tableau VI.9 : Temps de l'interaction LM**,** lors de traitement thermique pour les différentes valeurs de l'intensité $I_0\left[W/m^2\right]$

Valeur de l'intensité $I_0\left[W/m^2\right]$	Valeur maximale $T_{x=o}\left[^\circ C\right]$ dans la phase d'échauffement	Temps $t\,[s]$ de l'interaction L.M lors de phase d'échauffement
1000	1400	2.800
1500	1400	1.400
2000	1400	0.836
2500	1400	0.550

Pour discuter de plus l'effet de l'intensité, il est préférable d'avoir la pénétration de la température $T\left(0,t_0\right)=1400^{\circ}C$ dans le matériau. Le *tableau VI.10* représente quelques valeurs de température en profondeur à la fin de la phase d'échauffement pour les différentes intensités $I_0\left[W\ /m^2\right]$.

Tableau VI.10 : Valeurs de température à quelque profondeur à la fin de la phase d'échauffement pour les différentes intensités I_0

$I_0\left[W\ /m^2\right]$	$T\ (x=0.0002m)$ $\left[^{\circ}C\right]$	$T\ (x=0.0004m)$ $\left[^{\circ}C\right]$	$T\ (x=0.0008m)$ $\left[^{\circ}C\right]$	$T\ (x=0.001m)$ $\left[^{\circ}C\right]$
1000	1280	1170	984	902
1500	1240	1090	852	753
2000	1190	1017	738	630
2500	1150	941	635	523

Selon les résultats du *tableau VI.10,* on peut affirmer que la force de pénétration de la chaleur pour une même position de profondeur, évolue de plus en plus dans le sens de diminution de l'intensité dans l'objectif d'avoir la même température superficielle à la fin d'échauffement.

Pour généraliser cette remarque on va étudier les profils de températures par rapport à la profondeur x pour chaque intensité.

La *figure VI.11* représente l'évolution des profils des températures dans le matériau, pour les différentes valeurs de l'intensité I_0 pour un même type de source laser, dans la température maximale de surface atteint et la même pour ces valeurs à la fin de phase d'échauffement, qui ce diffère en durées d'une densité à l'autre.

Toujours, la condition discutée par BLACKWELL est respectée**,** à savoir que la température maximale du traitement est située à la surface, alors que la température diminue selon la profondeur x.

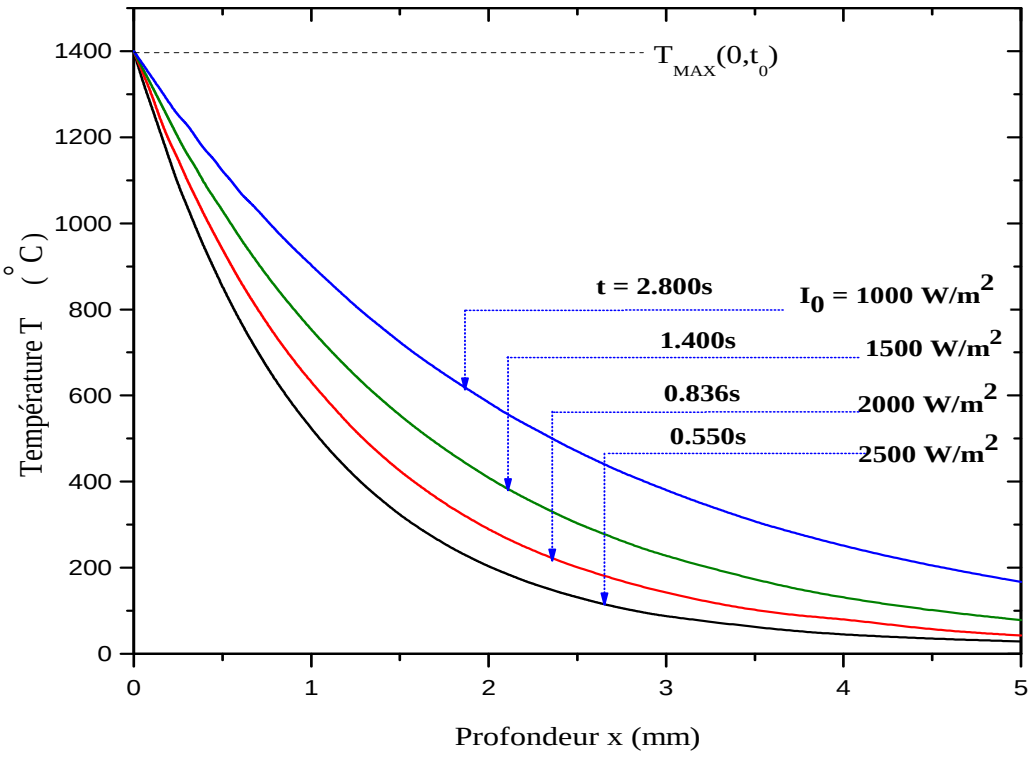


Figure VI.11 : Effet de différentes valeurs de l'intensité sur la profondeur, à la fin de la phase d'échauffement

- **Approximation de l'épaisseur critique minimale du matériau traité**

Comme on a discuté précédemment lors de l'analyse de l'effet de la répartition énergétique sur l'épaisseur minimale critique du matériau traité pour conserver la condition du milieu semi infini valable.

Pour les mêmes raisons, et par la même méthode, on cherche à quantifier l'effet de l'intensité des faisceaux Laser sur cette condition.

Les résultats sont représentés sur la *figure VI.12* .Dans le *tableau VI.11* les épaisseurs significatives sont indiqués.

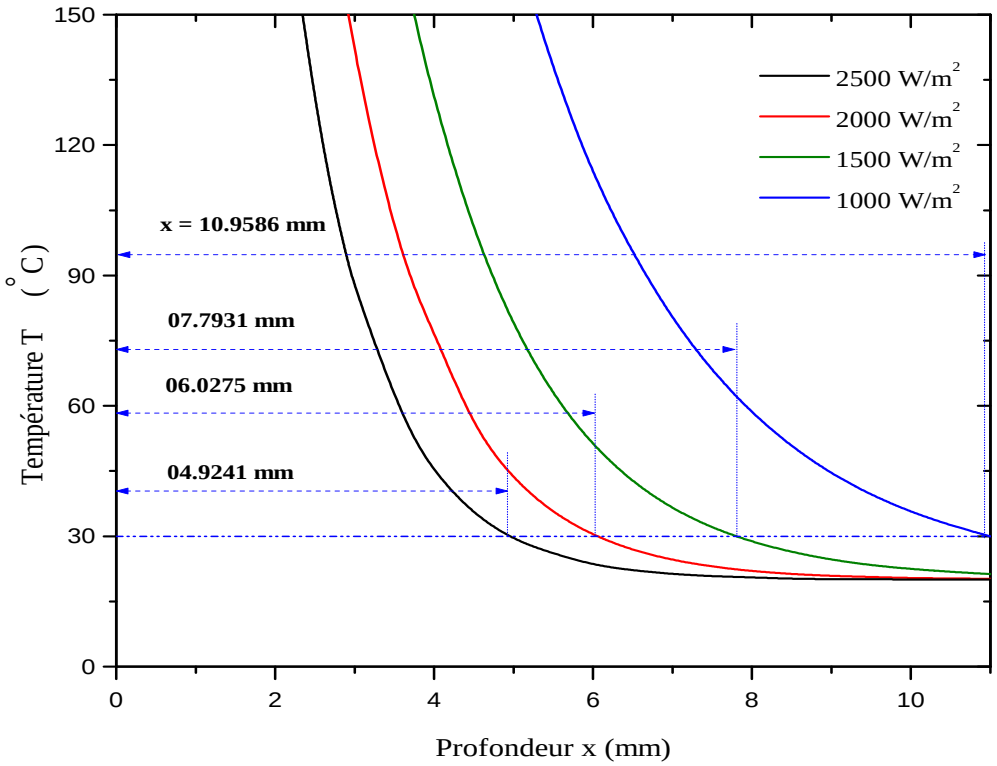


Figure VI.12: Approximation de l'épaisseur minimale du matériau traité pour $\pm I_0 \left[W / m^2 \right]$ pour un signal laser type dents de scie

Approximation de l'épaisseur maximale austénisée

De même on cherche à quantifier l'effet de l'intensité sur l'épaisseur maximale austénisée, du matériau traité lors de phase d'échauffement. Les résultats sont représentés sur la *figure VI.13*, ainsi dans le *tableau VI.11* les épaisseurs significatives sont indiquées.

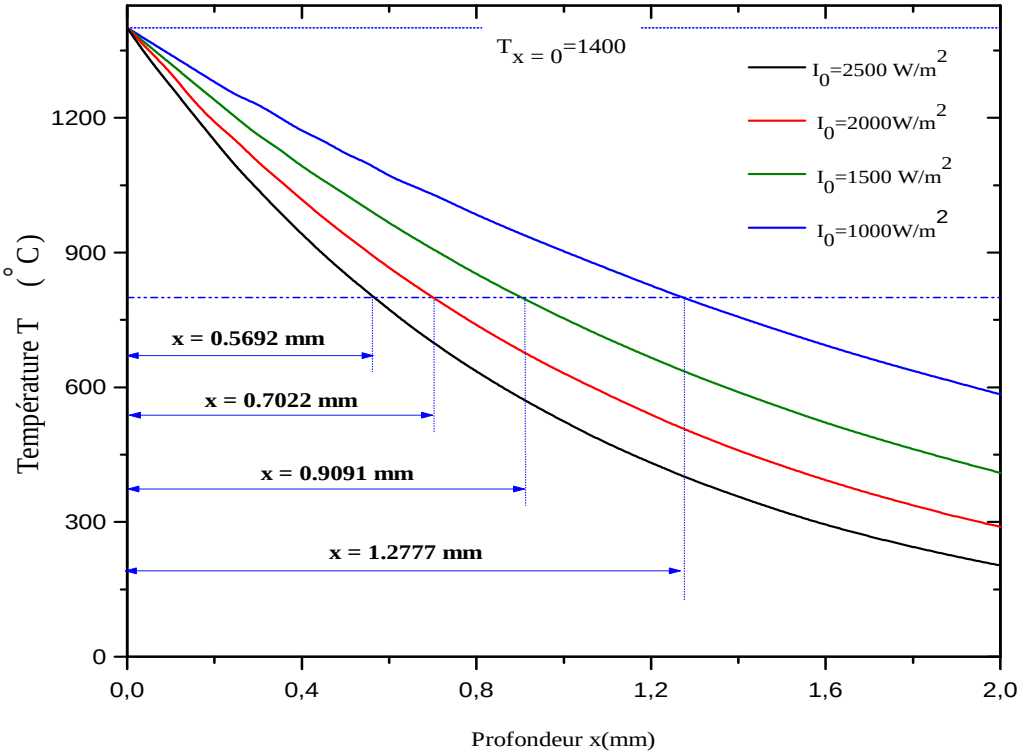


Figure VI.13 : Approximation de l'épaisseur maximale austénisée pour $\pm I_0\left[W/m^2\right]$ pour un signal laser type dents de scie

Tableau VI.11:Approximation d'épaisseur critique exigée et l'épaisseur maximale austénisée du matériau traité

Intensité $I_0\left[W/m^2\right]$	Epaisseur critique minimale exigée du matériau traité $[mm]$	Epaisseur maximale austénisée $[mm]$
1000	10.9586	1.2777
1500	7.7931	0.9091
2000	6.0275	0.7022
2500	4.9241	0.5692

VI. 4 Influence de type de matériau

Dans cette étude on fixe la répartition énergétique de la source laser, et on considère une répartition de type triangulaire *tableau VI.8*, Les résultats sont relevés pour quatre types de matériaux *tableau VI.12***,** avec pour objectif d'étudier leurs influences sur le profil de température.

Tableau VI.12 : Propriétés de différents matériaux utilisés dans la simulation [32].

Matériau	Cp $[J/KgK]$	k $[W/mK]$	ρ $[Kg/m^3]$	α $[m^2/s]$ $\times 10^{+6}$	μ $[1/m]$ $\times 10^{-7}$	Point de fusion $[^0K]$
Acier	**460**	**80.3**	**7880**	**22.15**	**6.16**	**1800**
Nickel	**447**	**90.3**	**8900**	**22.696**	**6.75**	**1726**
Cuivre	**383**	**386**	**8954**	**112.5576**	**6.7**	**1356.6**
Chrome	**450**	**94**	**7190**	**29.0527**	**6.7**	**2130**

La *figure VI.14* montre l'évolution des profils de températures diffère d'un matériau à l'autre cependant toutes ces matériaux sont maintenir dans les mêmes conditions de traitement, le matériau ayant le plus bas coefficient d'absorption et diffusivité thermique (*Tableau VI.12*) affiche le profil de température superficiel le plus évolué, dans l'ordre suivant, le L'acier, Chrome, le Nickel et enfin le cuivre.

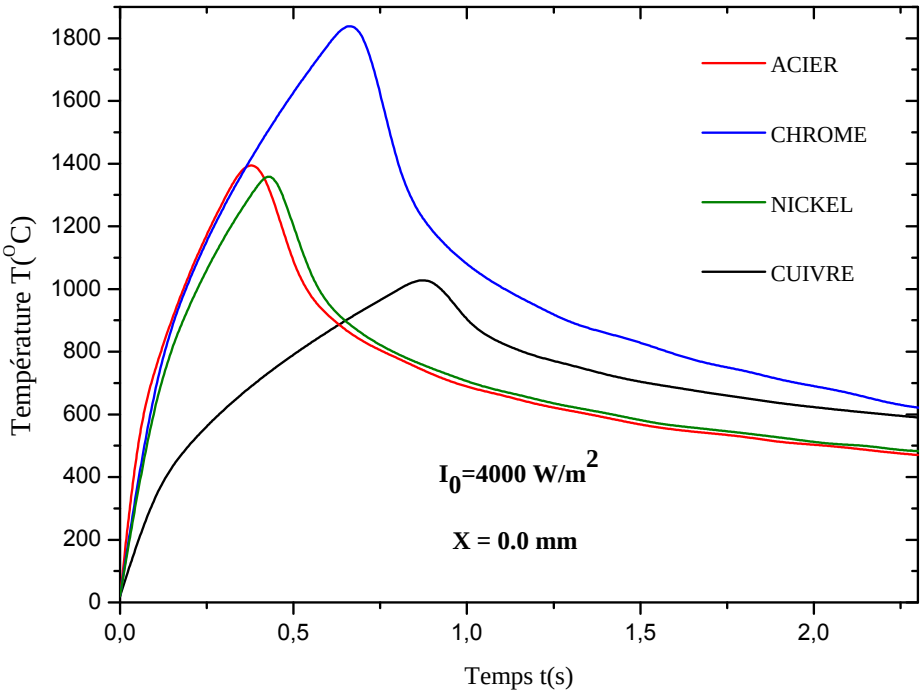


Figure VI.14 : Cycles de TT superficielles pour différents matériaux

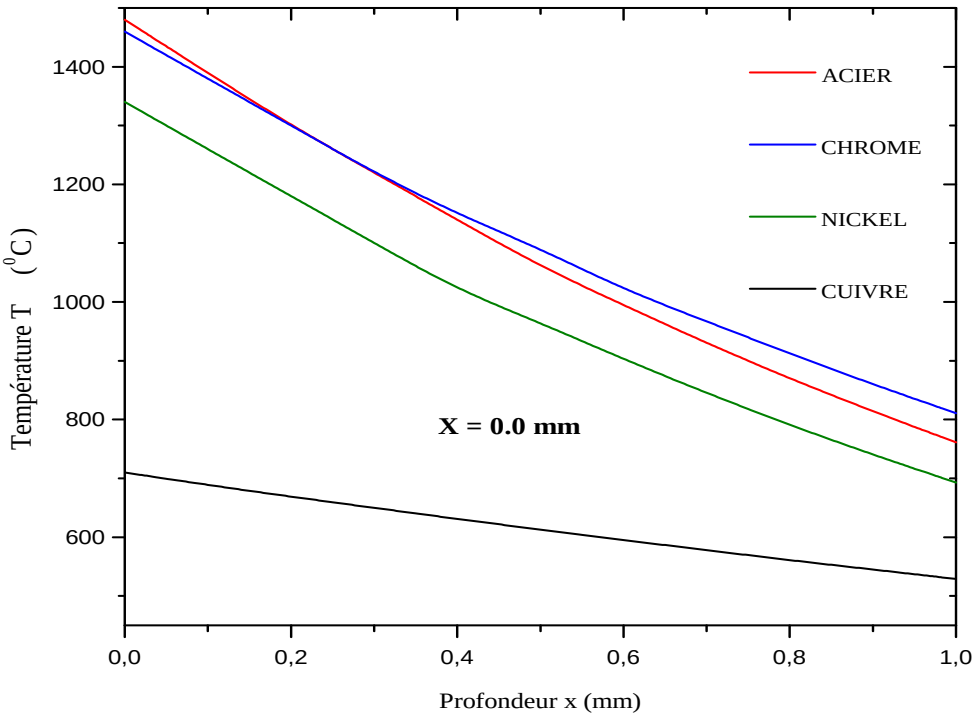


Figure VI.15 : Évolutions de températures en profondeurs pour différents matériaux à t=0.4s

Par contre la *figure VI.15* montre que le gradient de la température pour les matériaux devient de plus en plus important dans le sens de décroissement de la conductivité thermique **,** voir le *tableau VI.12* , alors que l'effet de pénétration de température dans les différent matériaux devient quant à lui important dans l'ordre suivant, le Cuivre, Chrome, le Nickel et enfin l'Acier, dans le sens de l'augmentation de la conductivité thermique. Si pour ces raisons qu'il est concilié d'utiliser des lasers puissants dans la trempe superficielle des matériaux qui ayants des conductivités thermique élever pour éviter le durcissement en volume.

PARTIE 2 : *AMELIORATION DU MODELE DE BLACKWELL POUR L'EFFET NON LINEAIRE DÛ À L'ABSORPTIVITE*

VI. 5 Validation du code de calcul

Pour valider le code proposé dans le cas de la non linéarité dû à l'effet de absorptivité température-dépendante, les évolutions des profils de température obtenu par le présent procédé sont comparés aux ceux obtenu analytiquement par BLACKWELL pour une absorptivité supposée constante, dans la phase de chauffage.

Les profils de température en fonction de temps à différentes profondeurs en domaine adimensionnel sont représentés graphiquement aux *figures VI.16 : a et b.*

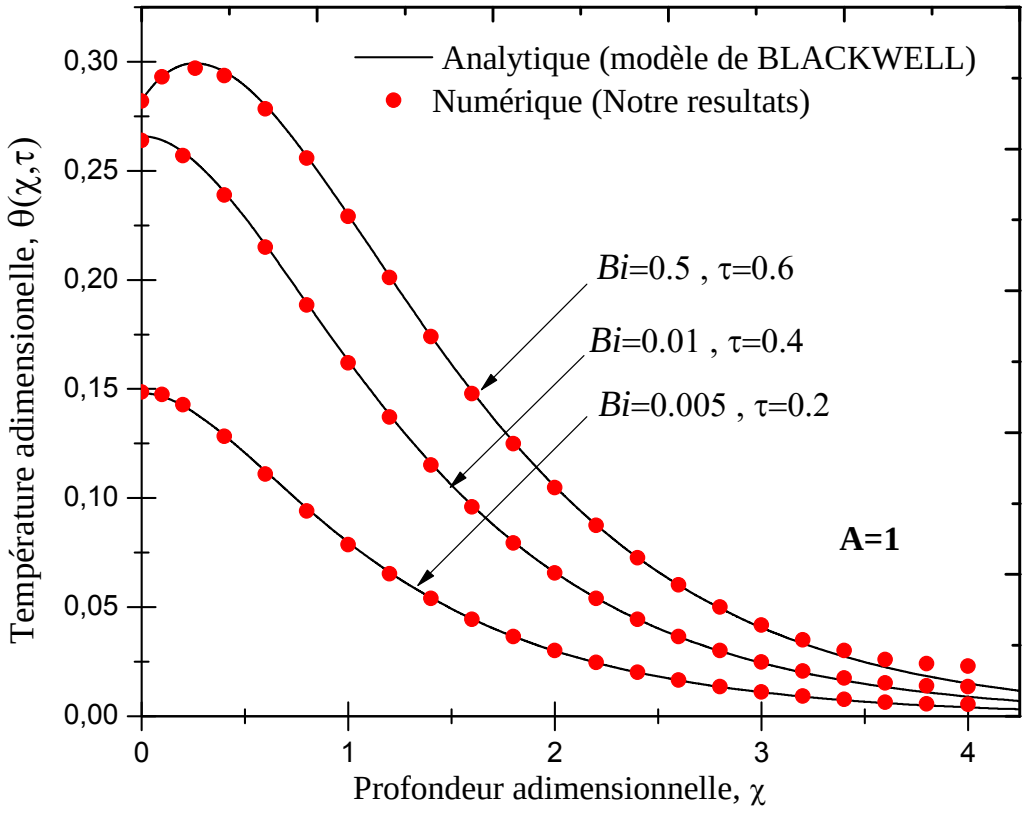


Figure VI.16.a : Profils de température en fonction de χ , obtenus à partir de la solution analytique et la prédiction numérique.

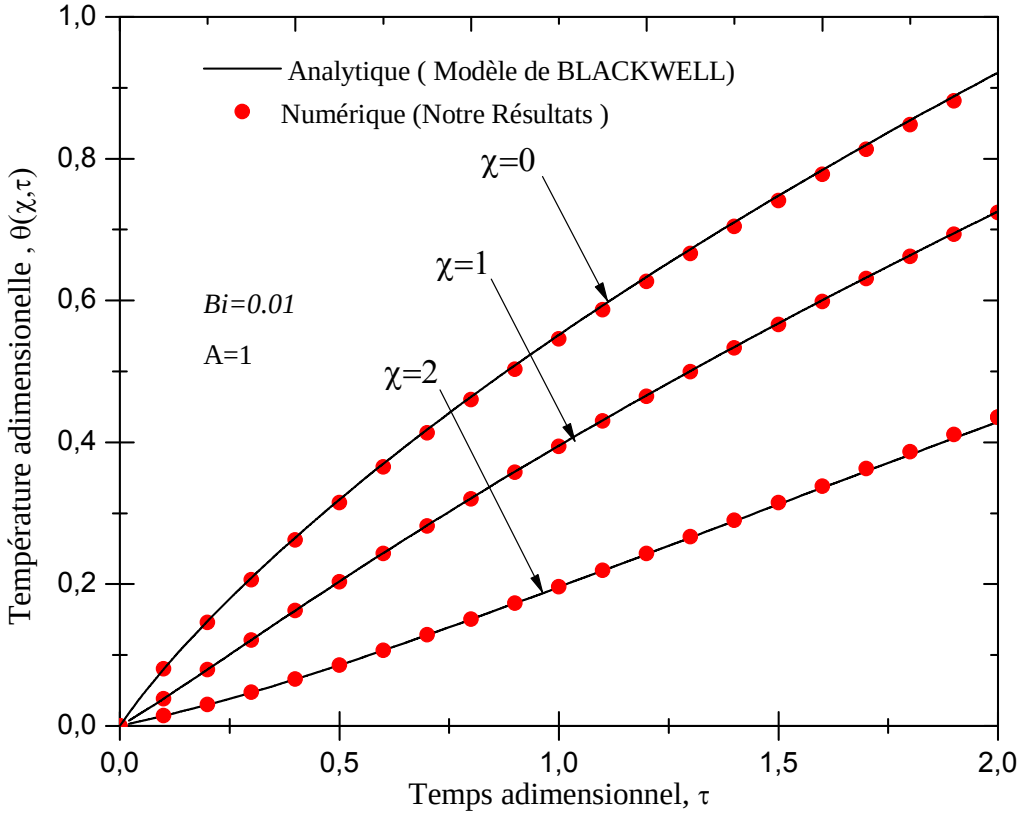


Figure VI.16.b : Profils de température en fonction de τ, obtenus à partir de la solution analytique et la prédiction numérique.

Le déplacement de la température maximale en profondeur en fonction de la variation du nombre de Bi est considéré et présenté. BLACKWELL atteste que la température maximale se déplace à l'intérieur du matériau lorsque le nombre adimensionnel Bi est supérieur à 0,05 , ce qui explique le phénomène connu sous le nom enlèvement explosif de la matière, observée expérimentalement par DABBY et PAEK, une simple vue aux *figures VI.16.a* , *VI.16.b* montre qu'il est évident que les résultats prévus et ceux obtenus par des méthodes analytiques sont en bon accord.

VI. 2 : Analyse de l'influence de l'absorptivité température-dépendante

La *figure VI.17.a*, représente l'évolution de la température dans la profondeur du matériau métallique traité, pour différentes valeurs de temps selon une absorptivité supposée constante pour les deux modèles théoriques de HAGEN- RUBENS et BRAMSON, tester par le laser CO_2. Une simple analyse à la fin de la phase d'échauffement correspond à $\tau = 90$. Évaluer avec les deux modèles, révélé une différence de températures superficielle estimée à 4,58%, cette valeur représente la différence maximale entre les deux profils de température et elle diminue dans plus que le profil de température pénètre la profondeur, la *Figure VI.17.b*, montre que les profils de température est légèrement différents dans les deux approximations

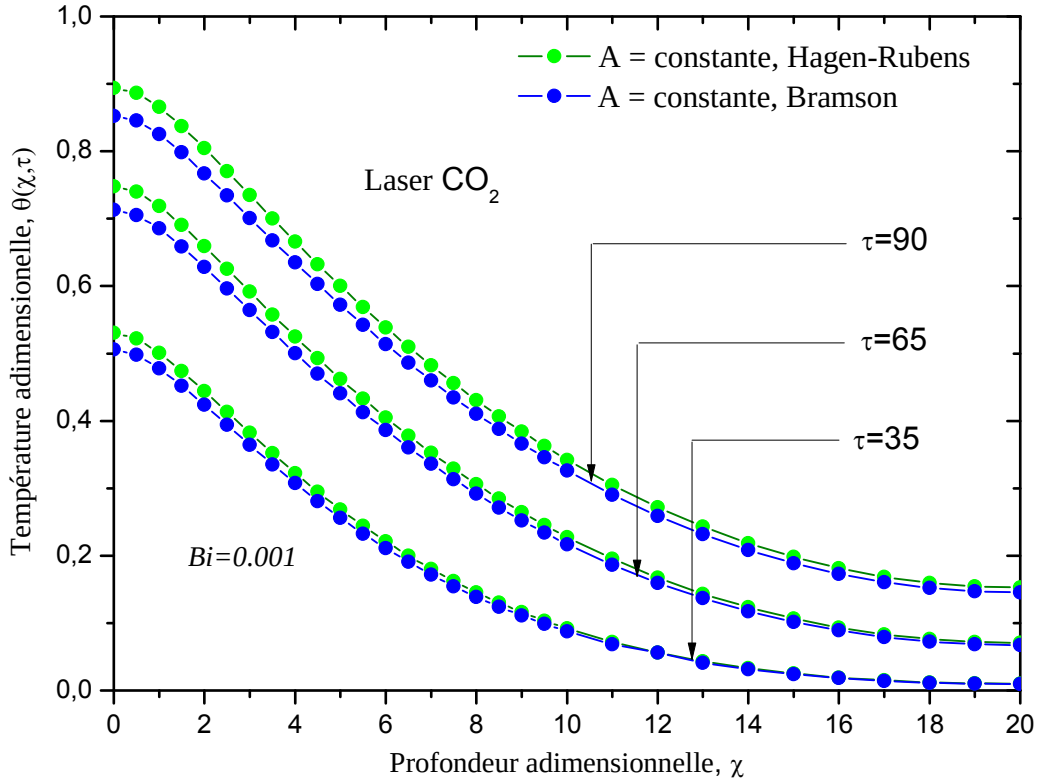


Figure VI.17.a : Comparaison des profils de température en fonction de χ , obtenus à $A = cst$ pour les modèles H -R et BRAMSON sou laser CO_2

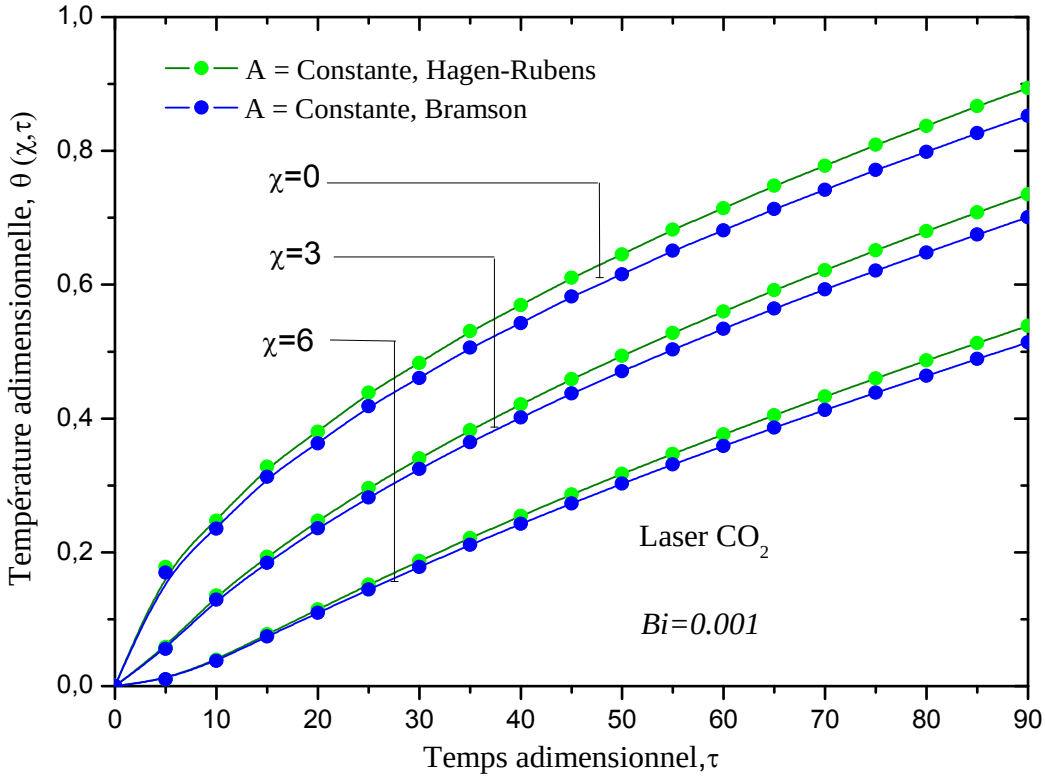


Figure VI.17.b : Comparaison des profils de température en fonction de τ, obtenus à partir de l'absorptivité constante selon les modèles H-R et BRAMSON

Les *figures VI.18 : a et b* représentent une comparaison entre l'évolution des profils de température en fonction du temps et en profondeur dans le domaine adimensionnel résultant de l'équation de la chaleur fortement non linéaire due à l'effet de la dépendance de l'absorptivité en température et celui de cas ou l'absorptivité est constante, selon les deux modèles cités précédemment dans le cas de laser CO_2.

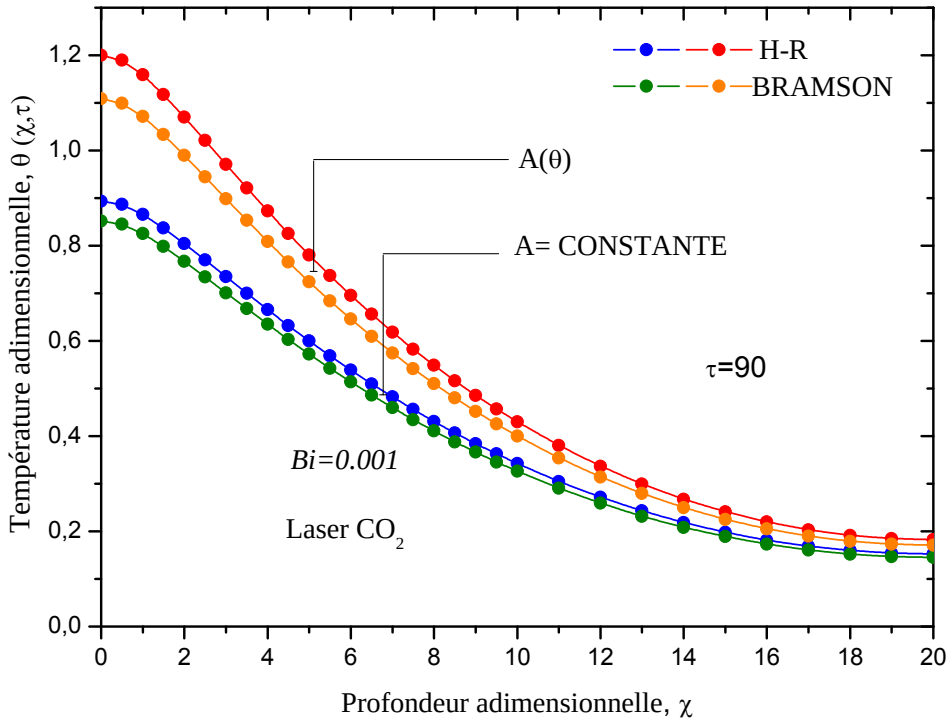


Figure VI.18.a : Profils de température en phase d'échauffement selon χ, à $A = cst$ et à $A(\theta)$, selon les modèles H-R et BRAMSON, sous laser CO_2

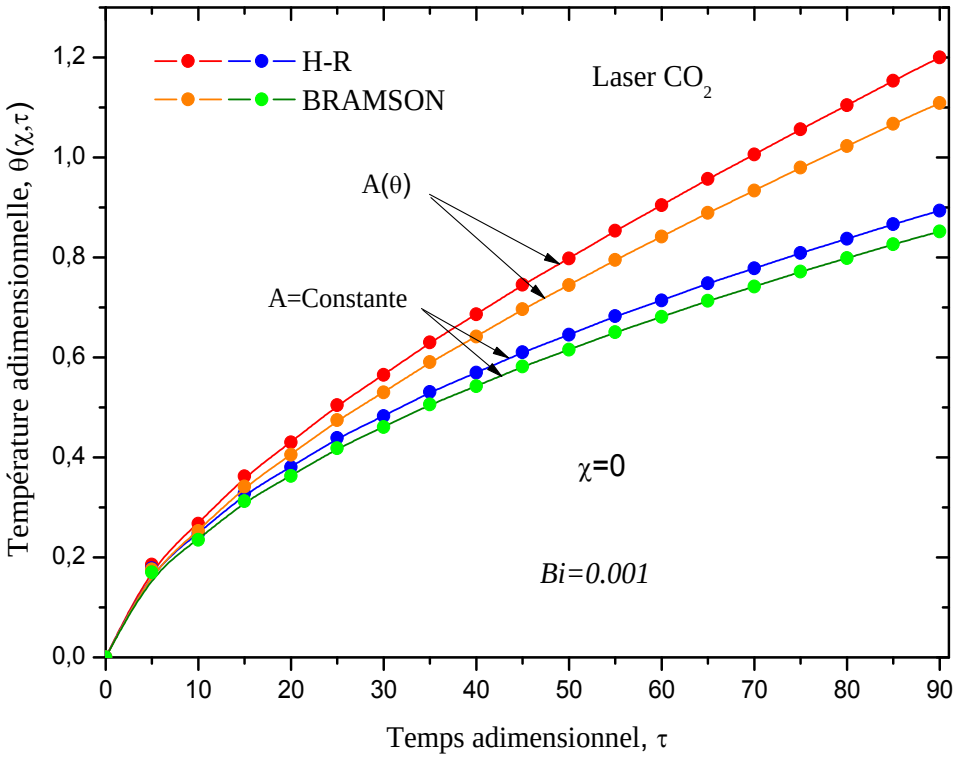


Figure VI.18.b : Profils de température en fonction de temps adimensionnel obtenus à $A = cst$ et $A(\theta)$ pour les modèles H-R et BRAMSON, sous laser CO_2

Une simple vue de chaque modèle séparément sur la *figure VI.18.a* montre l'effet de l'absorptivité température- dépendante sur les profils de température, par exemple, à $\tau = 90$, qui représente la fin de la phase d'échauffement , la température superficielle maximale dans le cas de l'absorptivité variable augmente de 25,53 % par rapport au cas où elle considérer constante , pour le modèle de HAGEN - RUBENS, et augmente de 23,18 % dans le cas de modèle de BRAMSON , c'est des proportions considérables pour chaque modèle séparé, et presque concourante entre les deux modèles.

Ces valeurs diminuent plus que les profils pénètrent la profondeur de la pièce. En comparant les résultats des deux modèles ensemble, pour la température maximale de surface on constate que la différence maximale entre les deux modèles est estimée à 7,58 %, est démunie de moins 2,99 % pour l'ensemble de la pièce. Cette différence est faible pour la quelle on peut considérer que les deux modèles sont très uniformément dans une large gamme, en particulier dans le cas des métaux qui présentent une faible sensibilité à la chaleur. La *figure VI.18.b,* montre que ces modèles sont bien rapprochés, en fonction de la diminution de la température superficielle.

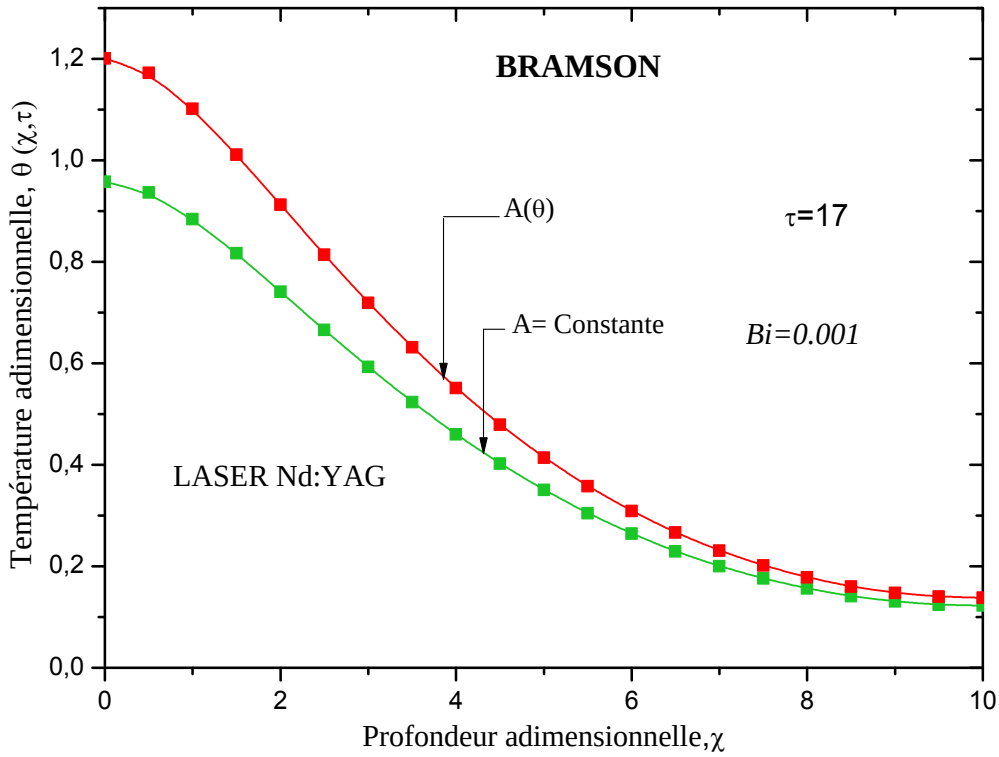


Figure VI.19.a : Profils de Température en phase d'échauffement en fonction de χ, obtenus à $A = cst$ et $A(\theta)$ selon le modèle de Bramson sous laser Nd : YAG

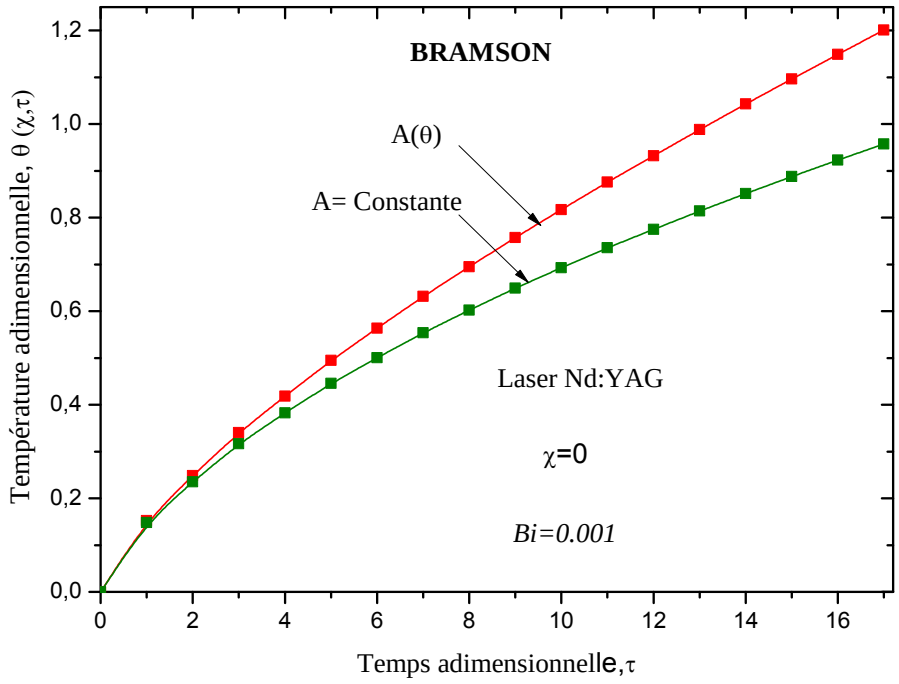


Figure VI.19.b : Profils de Température en phase d'échauffement en fonction de τ, obtenus à $A = cst$ et $A(\theta)$, selon le modèle de Bramson sous laser Nd : YAG.

.

Les *figures VI.19* : a et b, montrent l'évolution de la température dans l'épaisseur de la pièce traitée en domaine adimensionnel à la fin de la phase d'échauffement, et la variation en temps de la température de surface dans le cas d'un laser Ndr: YAG. L'étude a été limitée ici pour l'absorptivité température dépendante, et dans le cas constant selon le modèle de BRAMSON. Le modèle de HAGEN-RUBENS ne peut pas être applicable dans ces conditions.

On remarque une augmentation de la température superficielle en cas de l'absorptivité dépendante de la température avec une différence de 20,2 % par rapport au cas d'absorption constante. Cette valeur est toujours importante lors de la pénétration de la température en profondeur, cet effet est clair dans la *figure VI.19 b*.

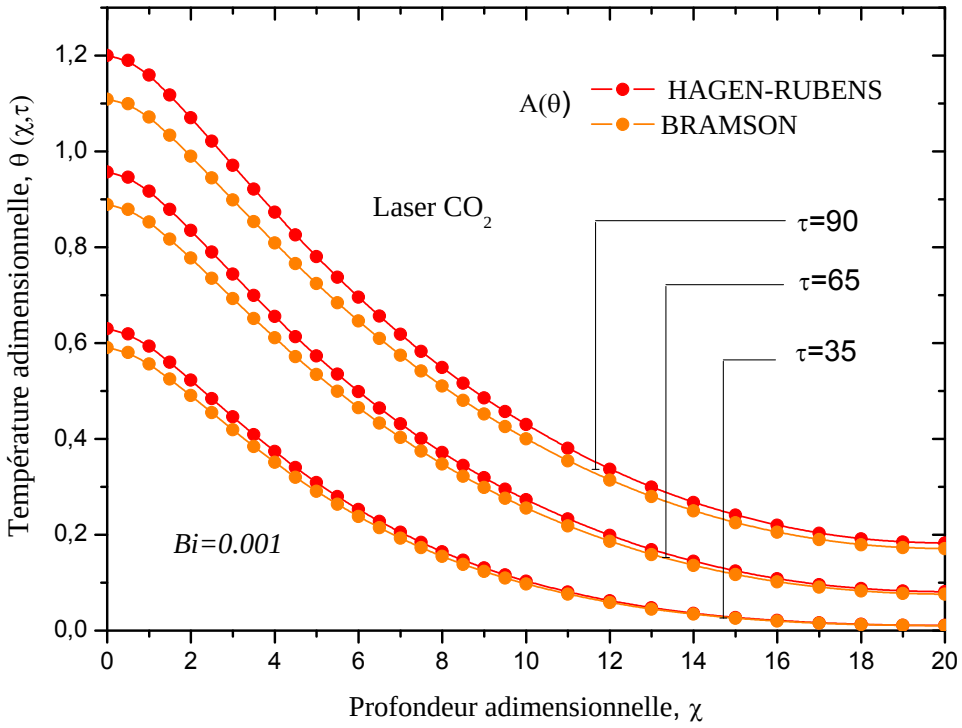


Figure VI.20.a : Profils de température en fonction de χ , pour $A(\theta)$ selon les modèles H –R et BRAMSON pour le Laser CO_2.

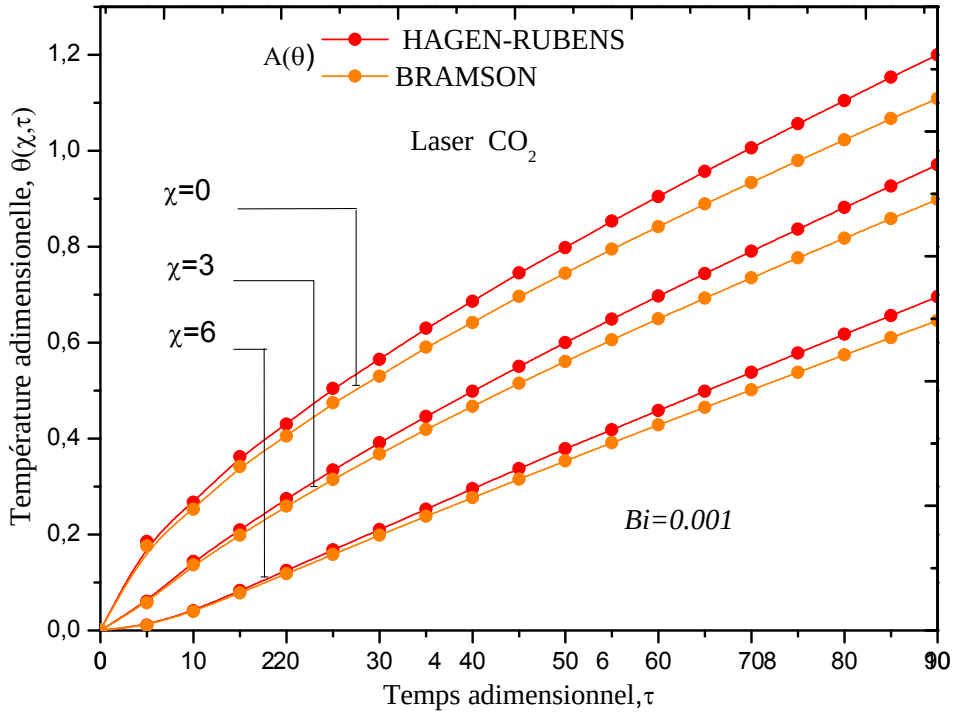


Figure VI.20.b : Profils de température en fonction de temps adimensionnel, pour $A(\theta)$ selon les modèles H -R et BRAMSON pour le Laser CO_2.

Pour la même valeur de la température maximale de la surface avec les deux lasers Nd : YAG et CO_2, on a un temps d'interaction adimensionnelle qui diminue de 90 à 17. Cela permet de réduire l'épaisseur de la couche traitée. Ceci est l'avantage de laser Nd: YAG pour le durcissement superficiel.

Les *figure VI.20 : a et b,* représentes une comparaison entre les profils de température dans le cas d'un laser CO_2-Acier, en tenant compte de la dépendance de l'absorptivité en température pour les deux modèles considérés. Effet de la température sur l'absorptivité semble évident. Les résultats obtenus sont presque identiques dans les deux modèles dans l'intervalle de $\tau = 0$ à $\tau = 35$, puis commence à l'espacement légèrement.

Si la température d'un métal augmente, ses ions vont s'agiter plus fortement. La conséquence en est que les électrons passent encore moins bien à travers le conducteur : la résistance augmente, donc l'absorptivité aux rayonnements électromagnétiques aussi, cela vaut pour la plupart des métaux.

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

De nombreux revêtements absorbants ont été utilisés : Peinture noire, poudre d'oxydes métalliques, graphite colloïdal, phosphate de zinc et de manganèse, etc.

De plus, l'utilisation d'une couche absorbante diminue l'influence de l'angle d'incidence du faisceau laser sur l'absorptivité.

Malgré les avantages offerts du processus de la préparation de surface pour élever l'absorptivité lors de couplages laser-matériau, pour atteindre une valeur fixe et idéale en profondeur du matériau, reste pratiquement impossible. Il est donc nécessaire de prendre en compte l'impact de la température dans la modification des paramètres de la fonction d'absorption résultant de revêtement de surface. La prise en considération de cette influence conduit une estimation adéquate de la modélisation de TTL.

CONCLUSION GENERALE

En réponse à la principale difficulté évoquée par plusieurs auteurs, concernant l'adoption des conditions aux limites qui traduisent réellement les phénomènes physiques, ce modèle permet, moyennant le schéma numérique proposé, de résoudre l'équation de la chaleur en régime transitoire dans un domaine unidimensionnel avec une condition convective.

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

Il exige de ce fait, une puissance de calcul relativement moins importante et permet de décrire les fortes variations des champs de température dans tout le domaine se modèle directement et sans passer par les variables adimensionnelles ainsi, l'effet de la sensibilité des paramètres de traitements est traduit variable par variable primitive.

Les effets de la répartition énergétique du laser, la sensibilité à l'intensité du laser, ainsi que l'effet de type de matériau sur le traitement thermique de surface posé comme semi infini sont bien élucidés.

On deuxième partie on a accueilli le problème de la modélisation du traitement thermique des matériaux en prenant en compte l'effet *de la* dépendance de l'absorptivité en température, afin de réduire les coûts expérimentaux utilisés dans certains travaux.

La plupart des travaux publiés considèrent l'absorptivité, comme paramètre constant, après le processus de préparation de la surface, dépendant la température de surface ou bien déterminer à l'aide des outilles expérimentaux coûteux.

On a basé sur le modèle BLACKWELL , qui est la plus pratique en tenant compte de l'effet de convection en raison de la présence de convection forcée résultant du gaz d'assistance utilisé pour améliorer le processus , comme une condition aux limites sur la surface .Compte tenu de l'absorptivité en tant que fonction dépendante de la température selon deux modèles théoriques : HAGEN- RUBENS valable pour laser CO_2 , suivi par une extension de BRAMSON qui est valable pour tous les lasers émis dans l'infrarouge , en particulier pour le CO_2 et Nd : YAG.

Une équation de la chaleur fortement non linéaire, est résolue en utilisant la méthode des différences finies, qui sert mieux ce genre de problèmes, en particulier pour la géométrie simple et régulière de la matière traitée. La stabilité des calculs numériques est approuvée par le schéma de CRANK - NICHOLSON.

En perspective, on souhaite que ce travail soit poursuivi et enrichi dans le cadre de développement d'un programme de calcul global pour la résolution Numérique d'une modélisation de TTL, qui tient en compte l'effet de la non linéarité de transfert thermique du matériau traité sous l'effet des différentes répartitions énergétiques temporelles. Ce cas de figure, ouvre la voie au traitement multiple et pulsé des matériaux, suivant des cycles bien définis.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] Silfvast W. T.,« Lasers »,Encyclopaedia of Physical Science and Technology,3em edition, California, U.S.A(2004),pp.267-281

[2] Prenel J.P.,«Physique du laser », Techniques d'ingénieur ,Vol.AFP1, N°.AF3270, (1999) .

[3] Brassart G. et al., «Sources laser », Techniques d'ingénieur ,Vol. E7, N° E4020, (1996).

[4] Hecht, Jeff. «Short history of laser development. « Optical Engineering 49.9 (2010): pp.091002-091002.

[5] Maillet H. , «Le laser : principes et techniques d'application » , 2eme édition,Lavoisier Tec et doc , (1986) , p. 556

[6] Pantelis D., «Laser de puissance (interaction ; traitement et utilisation)», Techniques d'ingénieur ,Vol. AF3, N° A1095,(1992).

[7] Pantelis D., «Traitements superficiels par faisceaux à haute densité d'énergie », Techniques d'ingénieur ,Vol. MD2, N° M1240,(1993) .

[8] Bertrand L., «Les lasers : une approche d'ingénieur physicien »,5eme édition,école polytechnique Montréal, (Janvier 2004),p.262

[9] Des Forges C.D., «Laser heat treatment »,Tribology international, Vol. 11, No. 2,(1978), pp. 139-143

[10] Prat C. et al., «Bilan phénoménologique d'énergie dans l'interaction rayonnement laser impulsionnel -matériaux »,dans : Laser de Puissance et Traitements des Matériaux, École de Printemps CNRS-EPFL, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Sireuil, (1991) , pp.58-73

[11] Laurens P, et al ., «Application des lasers aux traitements de surface », Techniques d'ingénieur ,Vol. COR2, N°. M1643,(1996) .

[12] Avril L,. «Elaboration de revêtement sur acier inoxydable, simulation de la fusion par irradiation laser, caractérisation structurale, mécanique et tribologique», thèse de docteur, école Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Centre d'Angers, (décembre 2003),p.242

[13] Terrat J. P., et Cartier M., «Comment poser un problème de traitement de surface », Techniques d'ingénieur ,Vol. AGC4 (Conception et Production) ou bien Vol. MD2 (Traitement des métaux) , N°. M1423,(Mars 2000) .

[14] Fouquet F., «Corrosion et traitements laser »,dans : Laser de Puissance et Traitements des Matériaux, École de Printemps CNRS-EPFL, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Sireuil, (1991) , pp.250-276

[15] Barralis J. et al., «Précontrainte et traitements superficiels », Techniques d'ingénieur ,Vol. MD1, N°. M1180,(1999) .

[16] Desalos Y. et Lestart F., «Traitements thermiques superficiels des acier », Techniques d'ingénieur ,Vol. MD1, N°. M1205,(1996).

[17] Pashby I.R. et al.,« Surface hardening of steel using a high power diode laser », Journal of Materials Processing Technology ,Vol.139, (2003),pp. 585–588

[18] Naqavi I.Z., «Conduction and non-conduction limited laser heating process-mathematical simulation », thèse de master, king FAHD university of petroleum and minerals , Dhahran SAUDI ARABIA ,(November 2001),pp.169

[19] Savard S., «Microstructure et résistance à l'usure d'un revêtement créé par traitement de surface par laser du titane en atmosphère réactive», thèse du grade maître es sciences (M.Sc), université de LAVAL , CANADA ,(octobre 2001),pp.158

[20] Leveque R., «Traitement superficiels des aciers à outils», Techniques d'ingénieur ,Vol. MD1, N°. M1135,(2003).

[21] Majumdar J. D., & Manna I., « Laser-assisted fabrication of materials », Vol. 161. Springer Science & Business Media, 2012.

[22] Frenk A. et Kurz W ., «Formation du microstructure dans le traitement laser »,dans : Laser de Puissance et Traitements des Matériaux, École de Printemps CNRS-EPFL, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Sireuil, (1991) , pp.195-216

[23] Copley S.M., «Laser materials transformations», .LIA, vol. 31, lcaled (1982).

[24] Farias D.et al, «Modélisation de transfert de phases des aciers en cycles thermiques rapides »,dans : Laser de Puissance et Traitements des Matériaux, École de Printemps CNRS-EPFL, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Sireuil, (1991) , pp.402-437

[25] Rozsenich N., « developpement and the priority research program: industriel laser technology »,laser in engineering , Vol.4,O.P.A, (1995).

[26] Girardeau-montaut C. et Girardeau-montaut J-P., «Interaction laser matière »,dans : lasers et industries de transformation, éditeur lavoisier ,Tec et doc, paris(1986), pp. 98-145

[27] Cooper K.P.,« Laser Surface Processing », friction , Lubrication , and wear Technology,Vol.18 , ASM Handbook , ASM International ,(1992),pp.861-872

[28] Mordik B.M.,« surface treatment with high power lasers »,Laser in engineering , Vol.4,O.P.A ,(1992).

[29] Mordik B.M., «Surface treatment by laser »,dans : Laser de Puissance et Traitements des Matériaux, École de Printemps CNRS-EPFL, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Sireuil, (1991) , pp.176-193

[30] Bessrour. J et al., « Modèle thermique instationnaire d'un traitement superficiel par une source laser mobile » Int.J of thermal science, 41 (2002),pp.1055-1066

[31] Yilbas. B.S, and Shuja S.Z. « Laser surface processing and model studies». Springer, 2013.

[32] Shuja S.Z., «Simulation of three-dimensional laser gas-assisted heating of solid substance the FOURIER heat conduction theory approch», thèse de doctorat, king FAHD university of petroleum and minerals , Dhahran SAUDI ARABIA ,(juin 1998),pp.319

[33] Reed R.C et al., «Laser pulse heat treatment : Application to reastenitisation from ferrite cementite mixtures », material science and engineering , A232 ,(juin 1997),pp.140-149

[34] 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

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

[36] Alberg H et al ., «Material modelling for simulation of heat treatment licentiate thesis, lulea university of technology ,(2003),pp.22

[37] Rapaz M., «Les donnés générales de la simulation dans le traitement laser »,dans : Laser de Puissance et Traitements des Matériaux, École de Printemps CNRS-EPFL, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Sireuil, (1991) , pp.375-401

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

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

[40] Hoaldley. A. et Drezet J.M., «Modélisation thermique de la refusions et du revêtement de surface par laser »,dans : Laser de Puissance et Traitements des Matériaux, École de Printemps CNRS-EPFL, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Sireuil, (1991) , pp.568-589

[41] Yilbas. B.S. et al.,« 3-dimensional modelling of laser repetitive pulse heating: a phase change and a moving heat source considerations »,Applied Surface Science, Vol.134 ,(1998),pp.159–178

[42] Yilbas. B.S.,« 3-dimensional modelling of laser repetitive pulse heating: a phase change and a moving heat source considerations »,Int .J.Engng Sci, Vol. 24, No. 8,(1986) ,pp. 1325-1334

[43] Yilbas. B.S., « Laser short-pulse heating: moving heat source and convective boundary considerations »Physica A , Vol.293 ,(2001),pp. 157–177

[44] Qiu. T.Q. et Tien. L.,« Short-pulse heating on metals », Int. J. Heat Mass Transfer,vol. 35, N0 3 (1992),pp. 719–726

[45] Yilbas. B.S et Arif. A.F.M., « material response to thermal loading due to short pulse laser heating », Int. J. Heat Mass Transfer ,Vol.44 (2001),pp 3787-3798

[46] Yilbas. B.S et al., « Material response to laser pulse heating: a kinetic theory approach », Optics and Lasers in Engineering, Vol.30, (1998),pp. 327–350

[47] Yilbas. B.S et al ., « Laser short-pulse heating of surfaces »,J. Phys. D: Appl. Phys. ,Vol.32 ,(1999),pp. 1947–1954

[48] Paul J. A., « solution for non FOURIER dual heat conduction in semi-infinit slab with surface heat flux », Int. J. Heat Mass Transfer,vol. 41, N0 14 (1998),pp. 2253–225

[49] Sami M., «Heat transfer mechanisms governing laser metal interactions», thèse de master, king FAHD university of petroleum and minerals , Dhahran SAUDI ARABIA ,(juin 1993),pp.139

[50] Blackwell B.F .,« Temperature profile in semi-infinite body with exponential source and convective boundary condition », ASME J. Heat Transfer, Vol.112 ,(1990),p. 567-571

[51] Dabby. F.W et Paek. U.,« High-intensity laser-induced vaporization and explosion of solid materials », IEEE J. Quantum Electron, vol. QE-8, N02, (fubruary1972),pp. 106-111

[52] Martin G T and Bowman H F .,« The temperature distribution in a semi infinite body due to surface absorption of laser », Int. Comm. Heat Mass transfer, Vol. 17,N°1, (1990),pp . 93-104

[53] Zubair. S. M et Chaudhry. M.A,.« Heat conduction in a semi-infinite solid when subjected to spatially decaying instantaneous laser source », Wfirme- undStofffibertragung Vol.28, (1993),pp. 425-431

[54] Zubair. S. M et Chaudhry M.A.,« Conduction of heat in a semi-infinite solid with an exponential-type initial temperature profile: temperature and heat flux solutions due to an instantaneous laser source », Wfirme- undStofffibertragung , Vol. 30, (1994),pp. 41-46

[55] Zubair. S. M et Chaudhry. M.A., «Heat conduction in a semi-infinite solid due to time-dependent laser source »,Int. J. Heat Mass Transfer. Vol. 39, No. 14, (1996), pp. 3067 -3074

[56] Chaudhry M .A. and Zubair S. M., « On a class of incomplete gamma functions with applications », PUBLISHER: Boca Raton, Fla. ; London : Chapman & Hall/CRC, c2002, pp.493

[57] Yilbas. S.B. et Sami M., «Convergence of time exponential decaying pulse to intensity step input pulse for laser heating of semi-infinite body »,Int. Comm. Heat Mass Transfer. Vol. 24, No. 6, (1997), pp. 785 -791

[58] Yilbas. S.B., «Analytical to the solution for the heat conduction mechanism appropriate to the laser heating process»,Int. Comm. Heat Mass Transfer,Vol. 20, (1993), pp.545-555

[59] Yilbas.S. B., «Analytical solution for time unsteady laser pulse heating of semi-infinite solid »,Int. J. Mech. Sci. Vol. 39, No. 6, (1997), pp. 671-682

[60] Yilbas.S. B et Shuja S.Z., « Heat transfer analysis of laser heated surfaces – conduction limited case », Applied Surface Science ,Vol. 108 ,(1997),pp. 167-175

[61] Yilbas.S. B., « A closed form solution for temperature rise inside solid substrate due to time exponentially varying pulse », International Journal of Heat and Mass Transfer ,Vol.45,(2002) ,pp.1993–2000

[62] Yilbas. S. B. et Kalyon. M., « Analytical solution for pulsed laser heating process: convective boundary condition case », International Journal of Heat and Mass Transfer ,Vol.45 ,(2002),pp. 1571–1582

[63] Kalyon. M. et Yilbas. S. B., « Exact solution for time exponentially varying pulsed laser heating: convective boundary condition case», Proc Instn Mech Engrs ,Vol. 215 Part C ,(2001),pp. 591–606

[64] Yilbas. B.S et Kalyon. M.,«Repetitive laser pulse heating with a convective boundary condition at the surface», J. Phys. D: Appl. Phys, 34 (2001),pp. 222–231

[65] Conde J.C et al.,« Temperature distribution in a material heated by laser radiation: modelling and application », Vacuum ,Vol.64 ,(2002),pp. 359–366

[66] Brockmann R.,« Temperature distribution in a material heated by laser radiation: modelling and application », International Journal of Heat and Mass Transfer,Vol. 46 ,(2003) ,pp.717–723

[67] Cheung N. et al.,« Mathematical Modeling and Experimental Analysis of the Hardened Zone in Laser Treatment of a 1045 AISI Steel », Mathematical Research,Vol. 7, No. 2, (2004),pp. 349-354

[68] Gustavo G. et Tien-Chen J .,« Numerical simulation of non-linear heat conduction subjected to a laser source: the effects of variable thermal properties»,International Journal of Heat and Mass Transfer ,Vol.43 ,(2000) ,pp.2177-2192

[69] Shuja S.Z et Yilbas. B.S.,« Pulsative heating of surfaces », International Journal of Heat and Mass Transfer ,Vol.41,(1998),pp.3899-3918

[70] Shuja S.Z et al.,« Laser pulse heating of steel surfaces including impinging gas effect and variable properties », International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow,Vol. 12 ,No. 2, (2002) pp. 195–219

[71] Amado J.M et al.,« Application of the Laplace transform dual reciprocity boundary element method in the modelling of laser heat treatments », Engineering Analysis with Boundary Elements ,Vol.29 ,(2005),pp. 126–135

[72] Rozniakowska. M. et Yevtushenko A. A.,« Influence of laser pulse shape both on temperature profile and hardened layer depth », Heat Mass Transfer ,Vol. 42 ,(2005),pp.64–70.

[73] Shuja, S.Z.et al., « Laser repetitive pulse heating influence of pulse duty on temperature rise », Heat and mass transfer, vol. 43, N09 (2007): pp. 949-955.

[74] Yilbas. B.S. et Shuja, S.Z., « Laser surface processing and model studies ». Springer, (2013),p.147.

[75] Li, J. C et al ., « Etude comparative de différents dispositifs permettant de transformer un faisceau laser de puissance avec une répartition énergétique gaussienne en une répartition uniforme », Revue de Physique Appliquée , vol. 21, no 7, p. 425-433.

[76] Murray R.Spiegel., Série Shaum « Transformées de LAPLACE » cours et problèmes, 8eme tirage ,McGraw-Hill Inc .,Paris ,(1993),pp.272

[77] Stehfest H., « Numerical inversion of LAPLACE transform », Communications of the ACM, Vol.13, (1970),pp.47-49

[78] Dahotre N. B. and Harimkar S., « Laser Fabrication and Machining of Materials », Springer Science and Business Media, New York, NY, (2008).

[79] Ready J. F., « Industrial Applications of Lasers » , Academic Press, San Diego, CA, (1997).

[80] Langlade-Bomba. C. et al .,« Lasers de puissance et traitements superficiels », Techniques d'ingénieur ,Vol. COR2 (Corrosion. Vieillissement) ou bien Vol. MD3 (Traitement des métaux) , N°. M1642,(Mars 2002).

[81] Bramson M. A., « Infrared Radiation: A Handbook for Applications » . Optical Physics and Engineering Plenum Press, New York, (1968).

[82] Charton, S. « Contribution a l'étude du contrôle en ligne des opérations de soudage par laser Nd: yag impulsionnel ». Thèse de doctorat, Dijon (1999).

[83] Mazumder, J., et al., « Laser processing: surface treatment and film deposition ». Vol. 307. Springer Science & Business Media,(2012).

[84] Arata Y. and Miyamoto I., « Laser welding, »Technocrat , N°11 vol.5, 33–42 .(1978).

[85] Porokhovrov A. M. P, et al., « Laser Heating of Metals », Adam Hilger, New York, (1990).

[86] Kwon H., et al, « Temperature-dependent absorptance of painted aluminum, stainless steel 304, and titanium for 1.07 lm and 10.6 lm laser beams » , Opt. Lasers Eng. 50, 114–121 (2012).

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

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

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

[90] El-Adawi M. K. et al , «Laser heating of a slab with temperature dependent absorptance in relation to the cooling Conditions », Vacuum 47, 1167–1173 (1996).

[91] Warren R. E. and Sparks M., « Laser heating of a slab having temperature-dependent surface absorptance » J. Appl. Phys. 50, 7952–7957 (1979).

[92] Yilbas, Bekir Sami. , « Laser heating applications: analytical modelling » , Elsevier, (2012).

[93] Carpene E, et al ., « Fundamentals of Laser-Material Interactions » , dans : « Laser processing of materials: fundamentals, applications and developments ». Springer Science & Business Media, pp: 21-47 , (2010).

[94] Davis, J. R. « Surface hardening of steels ». ASM International, Materials Park, OH, vol. 227.P: 319 , (2002).

[95] Rudnev V., « Handbook of Induction Heating », CRC Press, Basel, Switzeland, (2002).

[96] Ozisik .N , «Finite Difference Methods in Heat Transfer », CRC Press, Boca Raton, FL, (1994).

[97] Bergman, Theodore L., et al. « Fundamentals of heat and mass transfer ». John Wiley & Sons, (2015).

[98] Site internet : http://www.ceramic-center.com/alumine.php , C.T.T.C. centre de transfert de technologie céramique , 2003 .

[99] Ramous E., «treatment of ceramics by laser principles and exemples»,dans : Laser de Puissance et Traitements des Matériaux, École de Printemps CNRS-EPFL, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Sireuil, (1991) , pp.600-610

[100] Devrient A.B ., «La transmission de la chaleur » , Tome 2 , édition Gaetan morin, (1982) .

ANNEXE

Productions scientifiques



Influence of temperature-dependent absorptivity on solid surface heated by CO2 and Nd:YAG lasers

Nadir Boutalbi, Mohamed Najib Bouaziz, and Moussa Allouche

Citation: Journal of Laser Applications **28**, 032004 (2016); doi: 10.2351/1.4947311
View online: http://dx.doi.org/10.2351/1.4947311
View Table of Contents: http://scitation.aip.org/content/lia/journal/jla/28/3?ver=pdfcov
Published by the Laser Institute of America

Articles you may be interested in

Experimental investigation of remote welding with CO 2 and Nd:YAG laser-based systems
J. Laser Appl. **20**, 50 (2008); 10.2351/1.2832400

Comparative study on emission characteristics of extreme ultraviolet radiation from CO 2 and Nd : YAG laser-produced tin plasmas
Appl. Phys. Lett. **87**, 041503 (2005); 10.1063/1.1989441

Demining with Nd:YAG laser
Rev. Sci. Instrum. **75**, 1078 (2004); 10.1063/1.1666990

Nd:YAG laser cutting and drilling of PSTZ—Influence of substrate heating temperature on recast layer microcracking
J. Laser Appl. **11**, 128 (1999); 10.2351/1.521882

Energy requirements for ablation or decomposition of ceramics during CO 2 and Nd:YAG laser machining
J. Laser Appl. **10**, 212 (1998); 10.2351/1.521854

This article is copyrighted as indicated in the article. Reuse of AIP content is subject to the terms at: http://scitation.aip.org/termsconditions. Downloaded to IP: 105.103.13.50 On: Fri, 22 Apr 2016 16:21:14

Influence of temperature-dependent absorptivity on solid surface heated by CO_2 and Nd:YAG lasers

Nadir Boutalbi[a)]
Department of Mechanical Engineering, University of Abderrahmane Mira, Bejaia, 06000, Algeria

Mohamed Najib Bouaziz[b)]
Biomaterials and Transport Phenomena Laboratory, U.Y.F. Medea, BP 164, 26000 Medea, Algeria

Moussa Allouche
Department of Mechanical Engineering, University of Abderrahmane Mira, Bejaia, 06000, Algeria

(Received 25 November 2015; accepted for publication 11 April 2016; published 21 April 2016)

The most widely used high power industrial lasers are the Nd:YAG and CO_2 lasers, especially in the cutting process and also in the field of surface engineering, due to their precision of operation, short processing time, localized treatment, low thermal distortion, and their precise control of depth treatment. One of the most important parameters affecting the laser–surface interaction is the material's ability to absorb laser energy. This absorptivity is an unknown parameter for which experimental data at high temperatures are currently unavailable. A finite difference method is used to solve numerically the derived nonlinear heat equation taking into account the temperature-dependence absorptivity, input intensity laser pulse heating of a semi-infinite solid material including a convective boundary condition at the surface. Absorptivity was modeled as a temperature-dependent variable function, for the theoretical Hagen-Rubens, and Bramson relationships. Their influence on temporal and spatial evolution of the temperature profile in the material during laser heating is investigated and discussed. In case of constant absorptivity, underestimated temperature is found mainly at the surface of the material. © *2016 Laser Institute of America*. [http://dx.doi.org/10.2351/1.4947311]

Key words: solid phase, laser heating, absorptivity temperature-dependent, mathematical modeling

I. INTRODUCTION

Today's industrial competitiveness helps manufacturing products that do not wear out, resist corrosion, and keep in time their electrical, optical, or thermal properties. They bring more precise answers even to the most demanding and diverse industrial situations. Laser heating materials have become indispensable. It has more advantages compared to the conventional methods such as precision of operation, local treatment, and the simplicity to accomplish the heat treatment operation. In addition, it helps most of the time solving problems related to the optimization of surface properties, this can be quickly introduced in a sense to reach an enhanced precision using a command control of the process of heating. However, the control of the spatial and temporal evolution of the material's temperature is essential during the operation.

For this, many experimental measurements were conducted. For example, Xu *et al.*[1] introduced the pyrometer with a time resolution of the order of nanoseconds. They used to measure the temperature of the transitional area of solid material heated by an excimer laser beam. Ignatiev *et al.*[2] used a set of pyrometers to control the thermal cycle in real time, as shown in the example of Nd:YAG laser acting on metallic and ceramic materials.

The problem of the control process has not yet found an adequate solution through experimental measurement devices. Moreover, mathematical modeling reduces the experimental cost and predicts the best parametric data and their influence on the optimization of the processing operation. This has encouraged more specialists and researchers to develop several mathematical models solved in various ways, analytical or numerical or semianalytical, based on the simplified hypothesis in accordance with a description of the probable induced effects and phenomena which govern heat treatment. Blackwell[3] examined analytically the problem of explosive removal of material in laser heating, observed by Dabby and Paek,[4] using Laplace transform of the temperature profile in a semi-infinite body heated by a constant laser intensity decaying exponentially with position, including a convective boundary condition at the surface. He showed that the maximum temperature moves inside the material when the Bi number is greater than 0.05. Zubair and Chaudhry[5,6] provided an analytical solution for the model proposed by Blackwell for an instantaneous source identified by the Dirac delta function based on the Laplace transform. In the other paper,[7] they developed a fundamental compact solution for general source time dependent which they simplified for two cases, an instantaneous and exponential

a)Electronic mail: boutalbinadir@gmail.com
b)Author to whom correspondence should be addressed. Electronic mail: mn_bouaziz@email.com

1938-1387/2016/28(3)/032004/7/$28.00 032004-1 © 2016 Laser Institute of America

This article is copyrighted as indicated in the article. Reuse of AIP content is subject to the terms at: http://scitation.aip.org/termsconditions. Downloaded to IP: 105.103.13.50 On: Fri, 22 Apr 2016 16:21:14

Journal of New Technology and Materials
JNTM
Vol. 04, N°01 (2014)147-150

OEB Univ. Publish. Co.

Modeling of surface tempering by a pulsed laser beam: Study of the material type's influence

Nadir Boutalbi[1], Mohamed Najib Bouaziz[2] and Hamza Ali Agha[1,2]
[1]*Department of Mechanics Engineering, University of Abderrahman MIRA BEJAIA*
boutalbinadir@yahoo.fr
[2]*Laboratory of Biomaterials and Transport Phenomena, U.Y.F. Medea, BP 164, 26000, Medea*
Received: 26 April 2014, accepted 19 June 2014

Abstract

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

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

Keywords: *Surface tempering, pulsed laser beam, modeling:*

1. Introduction

With the ever more precise answers they provide to increasingly diverse and demanding industrial situations, the laser surface tempering has become essential due to its extreme power and energetic localization. It allows obtaining more preferment structures that are difficult or impossible to obtain by classical energetic sources, and helps most of the time solving problems related to the optimization of surface properties**[1-2]**. Surface Tempering by laser can be more quickly introduced in a sense to reach an enhanced precision using a command control of the process .However, the control of the spatial and temporal evolution of temperature in the material is essential during the operation. **[3]**

In the field of metallurgy, particularly in surface tempering of metals by the laser technique, the problem of the process control has not yet found an adequate solution through experimental measures

which encouraged researchers to develop several analytical, numerical and mathematical models**[3-9]**, based on simplified and realistic hypothesis in accordance with a description of the probable induced effects and phenomena which govern heat treatment .Mathematical modeling reduces the experimental cost and enhances the understanding of the implied physical processes. **[4]**

The main problem mentioned by several authors, concerns the adoption of the boundary conditions while using the time-dependent laser source which explains the limited works in this sense. The experience shows that the use of periodic laser pulses allows getting several forms resulting from the evolution of the transitory temperature's profile that develops inside the material during the treatment. This makes it possible to modify the action's period of the thermal process, this is on one hand. On the other hand, the reached temperature is higher than the temperature of structural transformation related to the processed material's type, without reaching very high surface temperatures and with a better use of energy. **[10]**

The temperature profile of surface hardening for material considered as semi-infinite medium, with a convective boundary condition and receiving a laser source of periodic pulses on its lateral face cannot be simulated directly by the analytical formulations. Among the mathematical models which have received particular attention are those of **Zubair** and **Chaudhry [6]**, are reported and discussed in this paper. It is on the basis of this development that a semi-analytical model is developed .And the effect of

Int J Thermophys (2011) 32:1047–1059
DOI 10.1007/s10765-011-0958-2

Laser Heating of a Material with Time-Dependent Laser Source

M. N. Bouaziz · N. Boutalbi

Received: 1 June 2010 / Accepted: 4 March 2011 / Published online: 17 March 2011
© Springer Science+Business Media, LLC 2011

Abstract Hardening depths must be determined accurately when a material is subjected to laser heat treatment. In this paper, a semi-analytical method taking into account a time-dependent pulse shape is performed. A comparison between temporal temperatures is shown for five laser shapes. The distribution temperature and surface temperature during time processing are predicted based on a significant variety of material properties. The main result obtained is that an important time shift is observed from one temperature profile to another. It can be inferred that a hardened layer may be produced by using a time-dependent pulse shape instead of a time-independent pulse.

Keywords Convective heat transfer · Laplace transform · Laser · Time-dependent pulse

1 Introduction

One method for enhancing the surface characteristics of metallic or non-metallic materials is the application of lasers. Lasers are used for surface heat treatment because of their practicality, versatility, and ability to produce intense pulses of radiation and they are relatively more economical than traditional methods when overall cost is considered. In order to obtain improved surface properties, such as hardness, a small amount of heat is introduced into the work-piece by the laser. Then, the appropriate processing time and efficient energy of the designed laser should be selected to accurately make a desired hardened layer depth. Therefore, a knowledge of the temperature distribution in the medium is of great importance, because the hardened depth and maximum

M. N. Bouaziz (✉) · N. Boutalbi
Laboratory of Biomaterials and Transport Phenomena, University of Medea,
BP 164, 26000 Medea, Algeria
e-mail: mn_bouaziz@email.com