

N° d'ordre : 35/2006-M/PH

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene

Faculté de Physique



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de : **MAGISTER**
En PHYSIQUE

Spécialité : Electronique Quantique

Par

BOUMIA OMAR

Sujet :

**MODELISATION DU RECHARGEMENT DES
MATERIAUX PAR LASER**

Soutenue publiquement le : 11/11/2006, devant le jury composé du :

M A. TALEB	Professeur	USTHB	Président
M E. H. AMARA	Maître de Recherche	CDTA	Directeur de Thèse
M S. HANCHI	Maître de Conférence	EMP	Examineur
M O. ZIANE	Maître de Conférence	USTHB	Examineur
M T. KERDJA	Maître de Recherche	CDTA	Examineur

À mes parents,

À mes soeurs et mes frères,

À mes Amis,

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé sous la direction de Monsieur E.H. AMARA de la Division des Milieux Ionisés & Lasers, du Centre de Développement des Technologies Avancées (C.D.T.A.).

Je tiens à le remercier pour son encadrement, son apport considérable en matière de mise à disposition de documentation et du soutien apporté en matière de compréhension des aspects physiques du sujet.

Je remercie tout particulièrement Monsieur A.TALEB, Professeur à l'U.S.T.H.B., pour avoir accepté et honoré la présidence du jury et consacrer une partie de son temps pour lire ce travail.

Je suis spécialement reconnaissant envers Monsieur S. HANCHI Maître de Conférence à l'E.M.P, pour son aide et ses conseils. Je le remercie sincèrement de prendre part au jury.

Mes remerciements vont également à Monsieur O. ZIANE, Maître de Conférence à l'U.S.T.H.B, pour avoir accepté de faire partie des membres du jury. Qu'il veuille trouver ici, l'expression de ma gratitude pour l'intérêt qu'il a porté à mon travail.

Que Monsieur T. KERDJA, Maître de Recherche au CDTA, trouve ici l'expression de ma reconnaissance pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail en acceptant de le juger.

Enfin, je ne saurais oublier mes collègues de la Division, et tous mes amis qui, en diverses circonstances, m'ont apporté leur aide dans le déroulement de ce travail, je suis heureux de leur témoigner ici toute ma reconnaissance et ma sympathie.

Pour finir, je voudrais insister sur ma profonde reconnaissance envers ma famille sans laquelle tout ce qui précède ainsi que tout ce qui va suivre, n'aurait même pas été évoqué.

Table des matières

Introduction	4
Chapitre I : TRAITEMENT DES MATERIAUX PAR LASER : TRAITEMENT DE SURFACE	8
I. INTRODUCTION.....	8
II. INTERACTION LASER-MATIERE	10
II.1. L'intensité	12
II.2. La longueur d'onde	13
II.3. La puissance moyenne	13
II.4. Le facteur d'absorption	14
III. TRAITEMENT DE SURFACE PAR LASER	16
III.1. Modification de microstructures sans apport de matière	16
III.1.1. Trempe superficielle	16
III.1.2. Fusion superficielle	17
III.1.3. Traitement avec vaporisation	18
III.2. Modification de composition par apport de matière	19
III.2.1. Formation d'un revêtement	19
III.2.2. Formation de composites et alliages superficiels	20
IV. CONCLUSION	22
Chapitre II : RECHARGEMENT PAR LASER	24
I. INTRODUCTION.....	24
II. LE REVETEMENT PAR LASER.....	26
II.1 Le revêtement par laser et les autres techniques.....	28
III. LE RECHARGEMENT PAR LASER (CLADDING)	30
III.1. Applicabilité du rechargement par laser	30
III.2. Les méthodes de rechargement par laser	31
III.2.1. Processus à deux étapes	31
III.2.2. Processus en une seule étape	32
III.2.2.1. Approvisionnement par fil	33

III.2.2.2. Injection de poudre	34
III.2.3. Propriétés de la couche plaquée	36
III.2.4. Dilution	37
III.2.5. Porosité	38
III.2.6. Propriétés du matériau	39
IV. MODELES PHYSIQUES	43
Chapitre III : MODELISATION DU RECHARGEMENT PAR LASER	
I. INTRODUCTION	48
II. MODELISATION	48
II.1. Mise en équations du procédé de rechargement par laser	49
II.1.1. Modèle mathématique	
II.1.1.1. Conditions aux limites et initiales	50
II.1.2. Puissance P_w absorbée par la pièce traitée	51
II.1.3. Effet de la convection thermocapillaire de Marangoni	53
II.2. Géométrie du problème et résolution des équations	54
II.2.1. Définition du champ de calcul	54
II.2.1.1. Effet de la température sur les propriétés physiques du matériau	55
II.2.2. Discrétisation par la méthode des volumes finis	56
II.2.3. Utilisation d'UDFs (User Defined Function)	60
II.3. Implémentation d'une forme gaussienne du faisceau laser	61
III. MODELISATION PAR LA METHODE VOLUME OF FLUID (VOF)	
III.1. Définitions	64
III.2. Modèle de la gouttelette	64
IV. MODELISATION PAR LA METHODE DE DEFORMATION DU MALLAIGE	66
Définition du maillage dynamique et l'implémentation dans le cas du parallélépipède ex :Elaboration d'une UDF	67
Chapitre IV: RESULTATS ET DISCUSSIONS	68
I. CHAMP DE TEMPERATURE OBTENU EN CONSIDERANT UN PROFIL GAUSSIEN DU FAISCEAU LASER.....	68
II. APPLICATION DE LA METHODE VOF	73

II.1 Modèle de la gouttelette	73
II.2. Modèle à deux gouttelettes	
III. APPLICATION LA METHODE DE DEFORMATION DU MALLAIGE.....	84
Conclusion	86
Références bibliographiques	88

INTRODUCTION

GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

La demande constante de l'industrie de pointe en pièces métalliques, possédant des caractéristiques exceptionnelles, incite les laboratoires de recherche au développement de nouveaux procédés d'élaboration de matériaux par la transformation de leurs propriétés. Pour une réaction adéquate aux différentes sollicitations que peut subir une pièce au niveau de son interface et dans sa masse (allongement, flexion), il est souhaitable que celle-ci présente simultanément des caractéristiques élevées de dureté, de résistance mécanique, et de ductilité. Parmi les procédés utilisés, les traitements de surface font l'objet d'une attention particulière. Ils ont pour but d'améliorer le comportement en surface de la pièce (dureté, résistance à l'usure ou à la corrosion), sans pour autant détériorer ces caractéristiques internes (ductilité, résistance, ...etc.).

Le développement continu des lasers de puissance a encouragé les applications expérimentales pour les traitements de surface des matériaux. Actuellement, des composants complexes tels que les pales d'une turbine ou les valves d'un moteur peuvent être traitées par laser que ce soit par re-fusion ou par rechargement ou cladding.

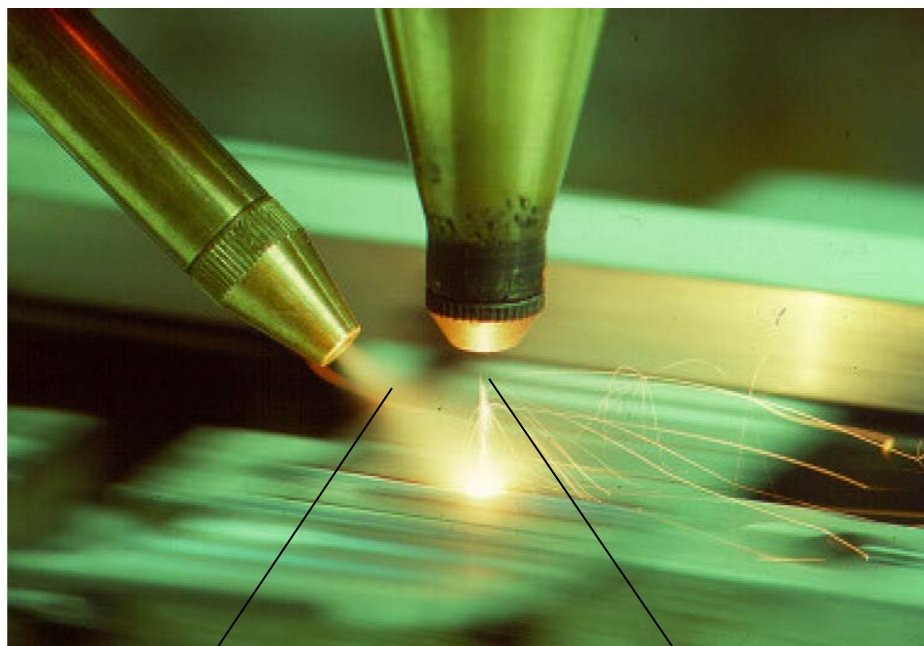
Le but de la re-fusion est d'induire des changements dans la microstructure de la surface, et ce procédé a déjà été intensivement étudié du point de vue modélisation. Des modèles se basant sur des résolutions analytiques de l'équation de transfert de chaleur ont été proposés depuis le milieu du vingtième siècle et ont permis une évaluation des paramètres des procédés. De plus, des modèles complexes nécessitant la résolution numérique des équations de transfert de chaleur et hydrodynamiques ont été développées pour prédire de façon plus précise la forme du bain fondu et les vitesses de re-solidification.

Dans le procédé de rechargement par laser ou cladding, le but est de déposer une couche de protection (de 0.1 à 1.5 mm) sur la pièce à traiter et sur deux pièces lorsqu'il s'agit de les joindre par une soudure. La trace du clad est obtenue par injection de particules de poudre sur le bain fondu produit pendant le mouvement du faisceau laser. Pour couvrir des régions plus larges que le diamètre du faisceau laser, des traces successives se recouvrant sont déposées.

Le cladding par laser est un procédé difficile à contrôler, contrairement au procédé de refusion, à cause de l'interaction entre le faisceau laser, les particules de poudre, et les régions fondues. En effet, même si la plus grande partie de la puissance laser atteint la pièce à traiter, une fraction est capturée par les particules de poudre, qui sont ainsi chauffées. De plus, seules les particules de poudre qui frappent le bain fondu y adhèrent, alors que les particules qui frappent la région solide subissent un ricochet et sont perdues. Un autre phénomène complexe est la modification de l'absorption de la pièce traitée (i.e., le rapport entre la puissance laser disponible sur la surface de la pièce et la puissance laser absorbée par la pièce) avec la forme de la région fondue.

Finalement, du fait de la géométrie complexe du clad sous le faisceau laser, il est difficile de prédire la puissance laser qui minimise la profondeur refondue dans la pièce mais qui continue à permettre la fusion de la poudre incidente.

Les paramètres du procédé sont nombreux. Ils concernent les propriétés du faisceau laser et la vitesse relative de la pièce traitée, la distance entre deux traces successives, la géométrie de la buse utilisée pour injecter la poudre, et les conditions d'injection elles-mêmes. Ces paramètres du procédé sont, évidemment, étroitement couplés. Par exemple, la modification de la largeur du faisceau requiert une correction de la distance séparant deux traces successives. Aussi, il est possible d'obtenir des clads de même hauteur à différentes vitesses de déplacement du faisceau en modifiant la quantité de poudre injectée dans le bain fondu.



jet de poudre

faisceau laser

On propose dans ce travail, une modélisation du procédé de rechargement par laser qui pourrait être utilisée comme support pour évaluer des conditions opératoires optimales. Le modèle assez réaliste pour prendre en compte les principaux phénomènes se produisant durant le traitement, peut fournir selon les capacités de la machine des résultats immédiats sur microordinateurs.

Les propriétés physiques du matériau telles que la densité, la capacité calorifique et la conductivité thermique peuvent varier en fonction de la température et atteindre des valeurs importantes relativement à celles que l'on pourrait considérer si on néglige l'effet de la température. Ces aspects sont pris en compte dans notre modélisation.

Pour ce qui est de la résolution du modèle mathématique composé essentiellement de l'équation de la chaleur accompagnée des conditions aux limites et initiales, c'est la méthode des volumes finis qui est utilisée à travers le logiciel de dynamique des fluides FLUENT. Cette méthode permet de discrétiser le système d'équations aux dérivées partielles en le transformant en système d'équations algébriques résolu par les méthodes numériques.

Pour mettre en évidence la formation du clad, deux approches sont proposées dans notre modélisation. La méthode de Volume de Fluide ou Volume Of Fluid dite (VOF) permettant le suivi d'interfaces, et la méthode de déformation de maillage ou maillage dynamique (Dynamic meshes) utilisée pour modéliser des écoulements où la forme du domaine varie au cours du temps à cause du mouvement des frontières du champ de calcul.

L'on citera enfin que pour la simulation du procédé de rechargement par laser, un des principaux apports durant la réalisation de ce travail est l'élaboration de programmes dits UDFs (User Defined Functions) qui sont des procédures écrites en langage C. Cette option est souvent nécessaire pour traiter un problème spécifique dont la prise en charge ne serait pas disponible dans la version standard de FLUENT.

Le premier chapitre de cette thèse est consacré à des rappels de principes de l'interaction laser-matière et à un passage en revue des principaux procédés de traitement de surfaces.

Au second chapitre, le principe du procédé de revêtement par laser ainsi que ses principales variantes sont développés. On insistera sur le procédé de rechargement par injection de poudre, et dans une partie du chapitre, les poudres utilisées sont présentées.

Dans le chapitre III, la modélisation développée pour l'étude du rechargement par laser est présentée avec les deux approches VOF et maillage dynamique.

Enfin, dans le chapitre IV, les principaux résultats sont reportés en commençant par la distribution des températures sur un échantillon soumis à un faisceau laser en déplacement. Par la suite l'application des modèles VOF et maillage dynamique permet d'observer la formation du clad et de ses caractéristiques concernant la distribution de la température au cours du temps. Les effets de variation de vitesse de déplacement sur la hauteur du clad sont particulièrement étudiés.

CHAPITRE I

CHAPITRE I

TRAITEMENT DES MATERIAUX PAR LASER : TRAITEMENT DE SURFACE

I. INTRODUCTION

La plupart des matériaux peuvent être traités par laser : le diamant, le tungstène, les tissus, le plastique, les tissus humain et animal, etc., et le meilleur exemple dans lequel on retrouve l'ingénierie des procédés par laser est la découpe de l'acier. Différents types de laser ont été développés pour différents procédés, et les applications du traitement des matériaux par laser peuvent être distinguées en catégories basées sur la puissance, l'intensité et la longueur d'onde. Tout faisceau, qu'il soit issu d'un laser ou de n'importe quel faisceau de lumière est soit réfléchi, soit absorbé, soit transmis. Exprimé plus simplement :

$$\text{Coefficient (Réflexion + Absorption + Transmission)} = 1 \quad (\text{I.1})$$

Dans la plupart des situations pratiques, comme montré sur la figure (I.1), les trois processus se produisent en même temps. Cependant l'influence relative de chacun de ces processus peut se manifester dans un procédé particulier.

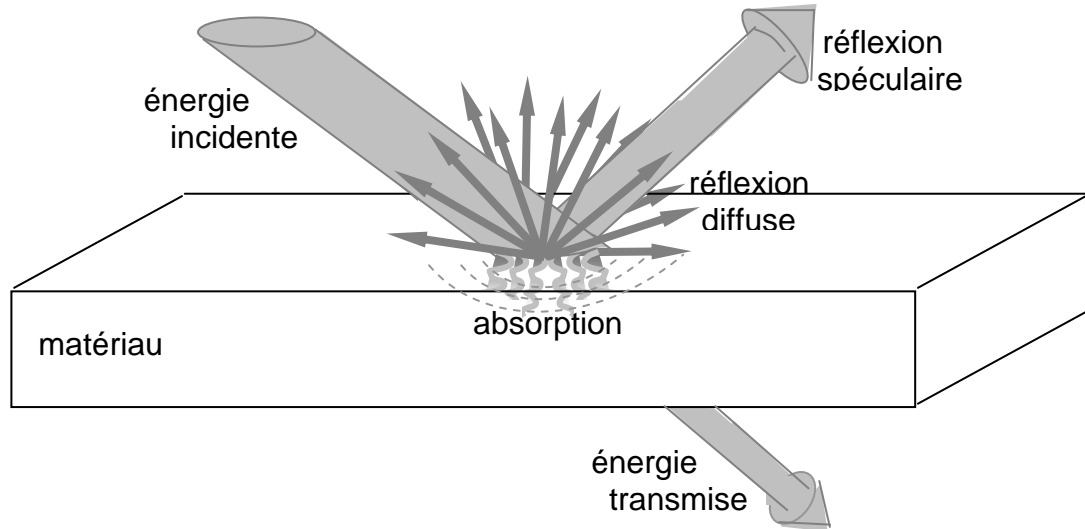


Fig. (I.1) représentation schématique de l'interaction rayonnement laser avec la matière.

Ainsi, tous les procédés laser peuvent être considérés de ce point de vue, et la compréhension de nombreux phénomènes de traitement par laser peut être initiée par cette approche.

Les effets particuliers des lasers sur la matière sont dus à la forte densité énergétique spectrale du rayonnement cohérent. Ils dépendent de la longueur d'onde laser, de la nature des matériaux irradiés et de l'état hydrodynamique de l'air ambiant. Il est possible de distinguer deux catégories d'effets, selon le mode d'application de l'éclairement ; les lasers dits continus (durée d'émission comprise entre quelques ms et quelques dizaines de secondes) produisent des effets purement thermiques dus à l'absorption du rayonnement par les matériaux. Le chauffage résultant conduit à la fusion, puis à la vaporisation des métaux et à la délamination des matériaux composites, donc à leur rupture. Les lasers impulsionnels (délivrant des puissances élevées, pendant des temps très courts) induisent, en amont des cibles, des phénomènes hydrodynamiques très violents (détente de plasma, vaporisation brutale) qui leur communiquent une impulsion mécanique susceptible de les endommager.

L'utilisation de plus en plus fréquente du laser dans le traitement des matériaux en vue d'applications industrielles tels que la soudure, la découpe, le perçage, le traitement de surface, etc. est due à la possibilité d'obtenir un traitement très localisé. Parmi les applications on se propose de développer l'utilisation dans le domaine du revêtement ou plus précisément du rechargement des matériaux.

II. INTERACTION LASER-MATIÈRE

Avec le développement des sources lasers de puissance, l'utilisation du faisceau qui en est issu occupe une place de plus en plus importante dans le domaine des industries manufacturières et de la transformation des matériaux. Cependant, une utilisation efficace et économique de cette technologie nécessite au préalable une bonne compréhension des phénomènes physiques se produisant lors des traitements, cela dans le but d'optimiser les paramètres du procédé ou autrement de fixer les conditions opératoires.

Quelle que soit l'application des lasers de puissances dans le traitement des matériaux, les phénomènes physiques fondamentaux mis en jeu consistent en l'interaction du rayonnement électromagnétique délivré par le système laser avec le matériau sur lequel le faisceau est appliqué. Selon que l'on soit en présence de l'irradiation d'un matériau métallique, semi-conducteur ou isolant, la réponse en terme d'énergie absorbée sera différente. L'énergie électromagnétique transmise à la matière est convertie en chaleur, laquelle engendre des changements d'états et des transformations métallurgiques dans le matériau irradié.

Les mécanismes d'interaction diffèrent selon la gamme de fréquence du rayonnement électromagnétique considéré. En effet, le spectre de fréquence s'étend des rayonnements de très faibles énergies ou de très basses fréquences (ondes radio), à ceux de très fortes énergies ou de très hautes fréquences (rayons γ), en passant par les micro-ondes, l'infrarouge, le visible, l'ultraviolet et les rayons X (figure I.2).

L'énergie du photon émis dépend de la fréquence ν (Hz), donc de la longueur d'onde λ (m) de propagation à travers la relation :

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (\text{I.2})$$

où c est la célérité de la lumière ($3 \cdot 10^8$ m/s). Le quantum d'énergie E_p , qui s'exprime à l'aide de la constante de Planck h ($6.625 \cdot 10^{-34}$ J.s), est donné par :

$$E_p = h\nu \quad (\text{I.3})$$

Ou bien exprimée en eV en fonction de la longueur d'onde donnée en nm:

$$E_p (eV) = \frac{1239,8}{\lambda(nm)} \quad (\text{I.4})$$

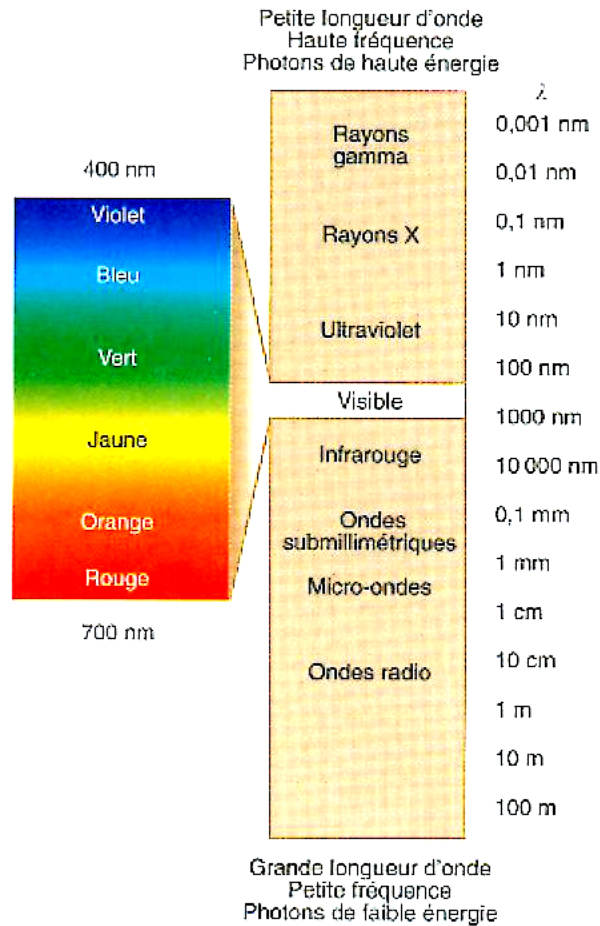


Fig. (I.2) Spectre électromagnétique.

Dans toutes les situations pratiques, quelques photons sont absorbés par la cible, et ces photons sont convertis dans le matériau traité en énergie thermique, ou en chaleur. Celle-ci peut être conduite, rayonnée ou convectée loin de la zone d'interaction. Les modèles mathématiques ainsi que l'expérience ont démontré que dans la plupart des situations, la convection et le rayonnement, ont une part très petite dans le processus de transfert de chaleur, et ainsi le transfert par conduction est le processus dominant. Si le taux d'apport de chaleur dans la cible est supérieur au taux de conduction de chaleur loin de la zone d'interaction, alors la température augmente localement et la fusion ou la vaporisation ou la combinaison des deux peut se produire.

En supposant qu'une proportion significative du faisceau est absorbée par la cible comme cela est le cas dans la majorité des procédés de traitement industriel par laser, il est communément admis qu'il y a quatre facteurs dominants :

- l'intensité du spot laser sur la cible,

- la longueur d'onde du faisceau laser,
- La puissance moyenne du faisceau laser,
- L'absorption du matériau.

II.1. L'intensité

L'industrie des systèmes laser a d'autres définitions techniquement plus correctes pour ce terme, mais l'intensité ou l'irradiance, représentant le flux d'énergie par unité de surface est habituellement calculée en divisant la puissance du faisceau par l'aire de la tâche focale. Un autre terme largement utilisé est la brillance. Les physiciens définissent ce facteur en général par la mesure de la capacité d'une source laser à être focalisée en une petite tâche. Evidemment certains lasers sont plus brillants que le sont d'autres. L'irradiance (module du vecteur de Poynting) pour une onde plane par exemple s'écrit :

$$I = |\vec{E} \times \vec{H}| = n \varepsilon_0 c E_0^2 \quad (\text{I.5})$$

En terme de physique quantique, une onde de fréquence ν (pulsation ω) et d'irradiance I correspond à un flux $\frac{I}{\hbar\omega}$ de photons d'énergie $\hbar\omega$ où $\hbar = h/2\pi$ et h est la constante de Planck. La lumière interagit avec la matière par portions de quanta. Mais le flux est si intense que les concepts classiques conviennent généralement à la description du processus d'interaction faisceau-solide.

Le concept de faisceau implique que l'irradiance est maximum près de l'axe optique et diminue latéralement. La description qui convient le mieux est une gaussienne à symétrie cylindrique,

$$I(r) = I_0 \exp(-r^2/w^2) \quad (\text{1.6})$$

Où $I_0 = I(0)$ et w le rayon du faisceau laser. Cette distribution s'applique aux lasers à faisceau monomodes TEM₀₀, mais reste une bonne approximation pour les autres cas.

II.2. La longueur d'onde

Le spectre électromagnétique contient un grand nombre de longueurs d'onde s'étalant des courtes longueurs d'onde de l'ultraviolet aux très grandes longueurs d'onde du radar. On peut donc considérer un faisceau laser comme un très pur flux de telles ondes ou particules (photons de lumière) venant toutes de la même direction.

A l'échelle atomique, quand ce flux de lumière pure ou de photons est absorbé par une surface, l'énergie est convertie en vibrations des atomes qui en fait augmente la chaleur du matériau, bien que dans quelques cas ceci peut être sur l'échelle de quelques millièmes de millimètres ou microns. Sous certaines conditions très spéciales, ces photons peuvent, si leur énergie est assez élevée, casser des liaisons atomiques. Cependant, la majorité des procédés laser sont de nature thermique, et ont pour résultat la génération de processus de fusion et de vaporisation très contrôlés. Plus important, le laser est contrôlable spatialement et temporellement ; cela veut dire qu'on peut contrôler exactement où et quand la chaleur est déposée sur la cible. Ainsi, dès que les paramètres opératoires sont définis pour un procédé particulier, la fiabilité et la répétabilité du laser devrait assurer que le processus ne varie pas.

La longueur d'onde du rayonnement émis par les lasers de puissance les plus communément utilisés se situe dans l'infrarouge ($\lambda_{\text{Nd-YAG}} = 1.06 \mu\text{m}$, $\lambda_{\text{CO}_2} = 10.6 \mu\text{m}$). Pour un faisceau laser CO_2 , l'énergie d'un photon égale 0.117 eV, tandis que pour un faisceau laser Nd-YAG, l'énergie photonique égale à 1.17 eV. A titre comparatif, et afin de situer des ordres de grandeur, les énergies des rayons X sont supérieures à 10^3 eV, et celles des rayons γ atteignent 10^6 eV.

II.3. La puissance moyenne

La puissance moyenne en Watts (W) d'un faisceau laser est facilement mesurée, spécialement dans le cas d'un faisceau continu (CW). Pour un faisceau pulsé, le produit de l'énergie du pulse avec le taux de répétition du pulse donne la puissance moyenne.

La relation entre la puissance ou l'intensité avec le temps d'interaction (qui détermine le temps durant lequel une partie de la surface est soumise au faisceau laser) est disponible à travers plusieurs figures (exemple : figure (I.3)) données dans la littérature scientifique, qui donne également un certain nombre de seuils d'intensité à atteindre pour obtenir un procédé donné. Pour une plage particulière d'intensité et pour certaines cibles, il a été observé que des comportements non-linéaires peuvent se produire, ayant pour conséquence des changements

brusques inattendus dans le procédé considéré. les propriétés physiques des matériaux telle que la conductivité varient en fonction de la température atteinte localement dans le matériau lors de l'absorption d'une quantité d'énergie délivrée par un laser de puissance est un facteur complexe est très important dans l'étude de l'interaction laser matière.

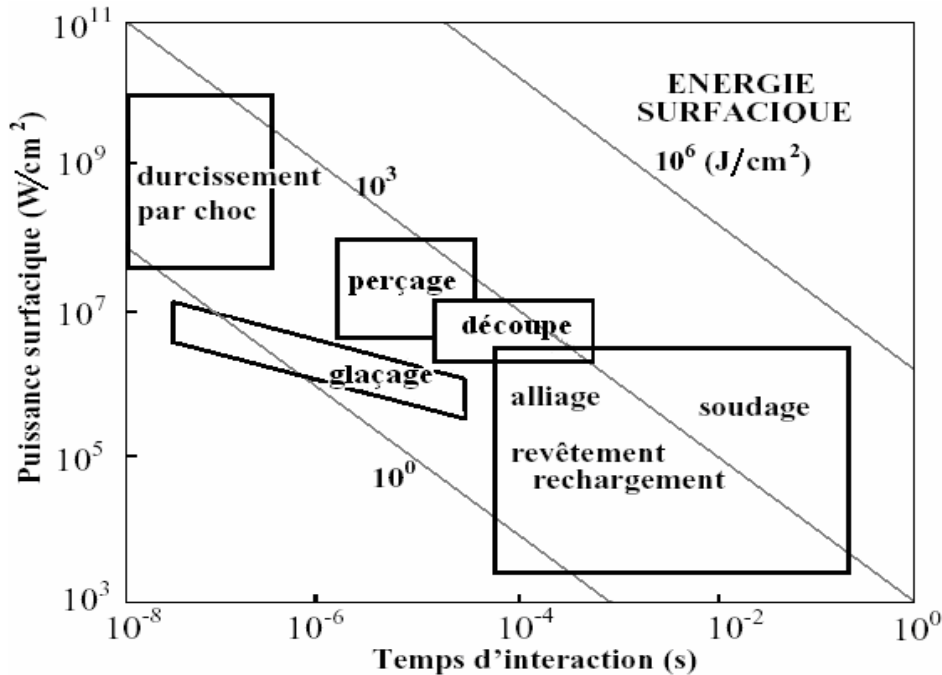


Fig. (I.3) Procédés laser en fonction de l'irradiance (W/cm^2) et du temps d'interaction.

I.4. Le facteur d'absorption

Un des paramètres important lors d'un traitement par laser est la réponse du matériau lors de son irradiation à une longueur d'onde laser donnée. Cette réponse est liée à l'absorption de l'énergie laser par le matériau. Malgré la compréhension des mécanismes gouvernant l'absorption d'un rayonnement électromagnétique par un solide parfait, il est impossible de définir avec certitude le coefficient d'absorption du rayonnement laser par le matériau. Ceci en raison de l'influence des défauts aléatoires présents à la surface du matériau traité, mais aussi en raison de l'interaction du faisceau laser avec le plasma pouvant être produit dans la plupart des procédés de traitement. En effet, il est difficile de quantifier l'influence de la formation du plasma sur le transfert d'énergie entre le faisceau laser et le matériau.

Le coefficient d'absorption A du matériau dépend de nombreux paramètres, notamment de la fréquence et de l'intensité du faisceau laser, ainsi que de son angle d'incidence. Et pour augmenter l'énergie absorbée, il serait préférable à priori, d'agir sur Le coefficient

d'absorption du matériau, en conditionnant sa surface par divers traitements (polissage, traitement chimique,...), plutôt que sur l'éclairement (flux d'énergie), car la mise en œuvre d'une source laser de puissance élevée nécessite des coûts d'investissement et de maintenance importants.

Par comparaison entre le flux incident et le flux réfléchi, et pour un angle d'incidence de 45° du rayonnement par rapport à la surface du matériau, la puissance absorbée peut être évaluée et le facteur d'absorption du matériau déduit. La variation du facteur d'absorption étant faible sur une grande plage d'angles d'incidence [1], on considère que celui mesuré à 45° correspond à une valeur moyenne. Des mesures ont été réalisées sur des cibles à l'état solide et à l'état liquide (c'est-à-dire au niveau du bain de fusion), sur une surface d'échantillon préalablement polie, de façon à supprimer les rugosités pouvant entraîner des pertes par réflexions diffuse. Aussi, une oxydation peut survenir dans la zone d'interaction durant le processus de traitement par laser, et celle-ci est en général évitée par une protection gazeuse. Lors des mesures réalisées en dynamique, l'échantillon est en déplacement transverse par rapport au faisceau laser, ce qui permet d'obtenir un régime permanent. Par ailleurs, le faisceau incident est collimaté et la puissance laser ajustée de façon à ne pas produire de panache (plasma) au-dessus de la cible, ce qui rend possible de recueillir la totalité du faisceau réfléchi qui dans le cas contraire serait perturbé par la présence du panache.

Des mesures réalisées pour des puissances varient entre 0.5 et 1 kW [2] sur de l'acier inoxydable 304 L, montrent que le facteur d'absorption reste constant et une même valeur est obtenue à l'état solide et à l'état liquide (tableau (I.1)).

	Etat solide	Etat liquide
Facteur d'absorption	30 % \pm 7 %	30 % \pm 7 %

Tableau (I.1) valeurs du facteur d'absorption de l'acier inoxydable 304.

Par la méthode de la sphère intégrante, Sainte-Catherine [3] obtient un facteur d'absorption de 31 % pour une cible polie en acier au Carbone (à 0.47 % de carbone) et de 32 % pour une cible polie en Nickel. Par une méthode indirecte, Lemoine [4] trouve 36 % et 27 % pour des cibles en Fer et en Nickel respectivement. Ces valeurs sont proches de celles obtenues théoriquement [5].

Dans le cas des matériaux à l'état liquide, il est généralement admis qu'une augmentation du facteur d'absorption existe [6], mais cette augmentation serait plutôt liée à la présence d'oxydes dans le bain fondu. Stern [7] conclut sur une invariance du facteur d'absorption selon l'état du matériau (solide ou liquide).

III. TRAITEMENT DE SURFACE PAR LASER

Les lasers ont de nombreuses applications dans des domaines aussi variés que la métrologie, la médecine ou la métallurgie. Après 40 ans de développement, le laser se retrouve dans de nombreuses applications industrielles, telles que le perçage, la découpe, et le soudage des métaux ainsi que dans les traitements de surfaces. La densité de puissance et le temps d'interaction entre le laser et le substrat ont une importance fondamentale pour déterminer le type de procédé à choisir (figure (I.3)).

L'on notera que concernant les traitements de surface par laser, on peut distinguer deux catégories : les traitements sans apport de matière et ceux avec apport de matière. Les profondeurs traitées varient en générale entre quelques micromètres et quelques millimètres. Parmi les récents développements en traitement de surface par laser, la conception de nouveaux matériaux tels que les multi-matériaux tient une place privilégiée, car elle permet de concilier entre les propriétés incompatibles de divers matériaux dans un matériau unique. En général la réalisation de multi-matériaux performants est fréquemment obtenue par des traitements localisés ou superficiels à travers la modification des propriétés des surfaces.

III.1 Modification de microstructures sans apport de matière:

La modification de la microstructure d'un matériau peut résulter soit d'une transformation structurale à l'état solide, par suite d'un effet de trempe superficielle, soit d'une fusion superficielle, suivie d'une resolidification rapide du matériau irradié.

III.1.1. Trempe superficielle

L'irradiation d'un matériau par un faisceau laser de puissance en vue de l'obtention d'un durcissement par transformation structurale sans atteindre la fusion du matériau, a pour objet

d'obtenir une couche superficielle de dureté élevée tout en conservant les propriétés initiales au cœur de la pièce. Cette technique est très utilisée sur des surfaces métalliques pour lesquelles les propriétés métallurgiques et mécaniques peuvent être améliorées, notamment la résistance à l'usure et la tenue à la fatigue sous sollicitations cycliques. Cela confère au traitement des matériaux métalliques un intérêt commercial dans l'emploi des lasers pour le durcissement par transformation structurale. La trempe superficielle d'aciers martensitiques faiblement ou non alliée vise à améliorer leurs propriétés mécaniques de surface, ainsi que leur comportement tribologique (dureté, résistance à l'usure). Les vitesses de refroidissement élevées (plusieurs centaines de degrés par seconde) ont été atteintes et assurent un phénomène d'autotrempe de la zone superficielle par la masse du substrat restée froide. Ceci peut être efficace pour les aciers qui ont une concentration en carbone suffisante pour promouvoir une transformation martensitique, et pour les fontes afin de former une structure perlitique [8]. Cette structure dépend de la vitesse de refroidissement et du diagramme de phases, mais généralement pour ce type de matériau, la dureté est augmentée et la résistance à l'usure améliorée.

Le premier champ d'application concerne la construction automobile. En 1975, la compagnie General Motors utilisa la trempe par irradiation laser pour durcir certains éléments en fonte du système de direction. Fiat l'appliqua pour les traitements des blocs à cylindres et Nissan dans le traitement des éléments de transmission [8], cela afin d'améliorer la résistance à l'usure, d'obtenir un meilleur refroidissement des cylindres, et en conséquence, développer des pièces de moteurs plus compacts.

III.1.2. Fusion superficielle

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

Un gaz inerte, l'argon le plus souvent, est insufflé sur le bain de fusion, de manière à assurer une couverture empêchant l'oxydation au contact de l'air (figure (I.4)).

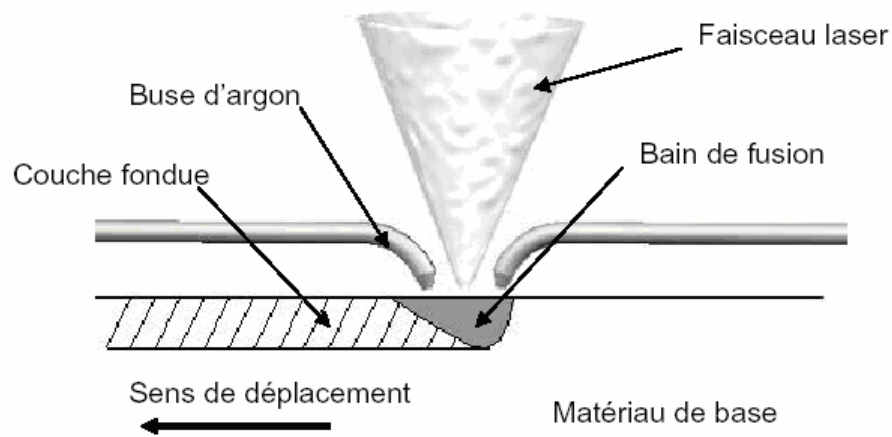


Fig. (I.4) *Fusion superficielle par irradiation laser.*

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

III.1.3. Traitement avec vaporisation ;

On utilise dans ce cas des lasers pulsés (CO_2 , Nd-YAG, Excimère) qui délivrent une densité de puissance très élevée (de 10^6 à 10^{11} W/cm^2) durant des impulsions de courte durée (10^{-8} à 10^{-6} secondes). Ces impulsions répétées entraînent une vaporisation rapide de la surface [9]. Les vapeurs métalliques s'ionisent entraînant la formation d'un plasma dont la durée de vie est de quelques millisecondes. Aux effets thermiques, sont associés des effets mécaniques dus aux ondes de choc générées durant l'expansion du plasma, lesquelles interagissent avec la surface, ou des effets explosifs se produisent du fait de l'absorption très importante d'énergie sur un temps très bref. Les applications concernent le nettoyage (élimination de graisses ou de salissures divers) ou la découpe des surfaces (peinture, revêtement, oxydes,...) ainsi que la modification de l'état des surfaces (texture des surfaces, marquage dans les industrie de la microélectronique, ou de l'automobile) sans altérer les propriétés du matériau en profondeur.

III.2. Modification de composition avec apport de matière

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

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 rajoutés soit à l'état gazeux en atmosphère contrôlée, soit sous forme solide, afin d'élaborer des revêtements ou bien des composites ou alliages superficiels.

III.2.1. Formation d'un revêtement

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

Dans le cas de l'élaboration d'un revêtement par fusion laser, le matériau ou les matériaux d'apport doivent d'abord 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.

Deux techniques peuvent être mises en œuvre :

- le matériau d'apport est déposé au préalable sur le matériau à revêtir (figure (I.6)),
- le matériau d'apport est injecté à l'état de poudre (figure (I.7)) dans le bain de fusion produit par le faisceau laser.

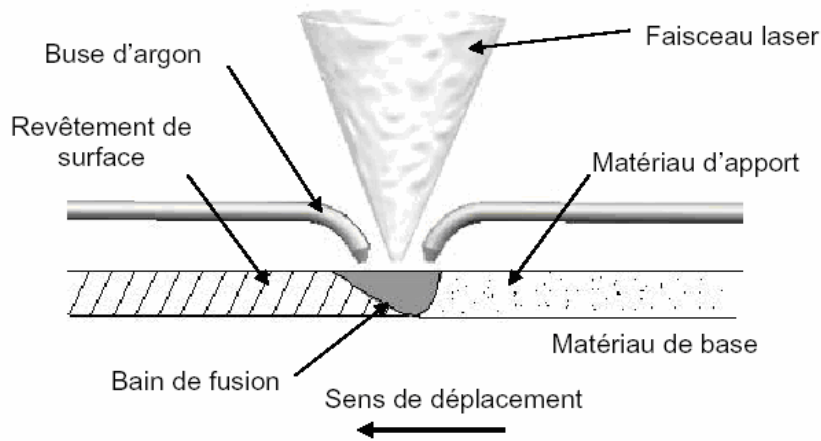


Fig. (I.5) Formation d'un revêtement de surface avec pré-dépôt d'un matériau d'apport.

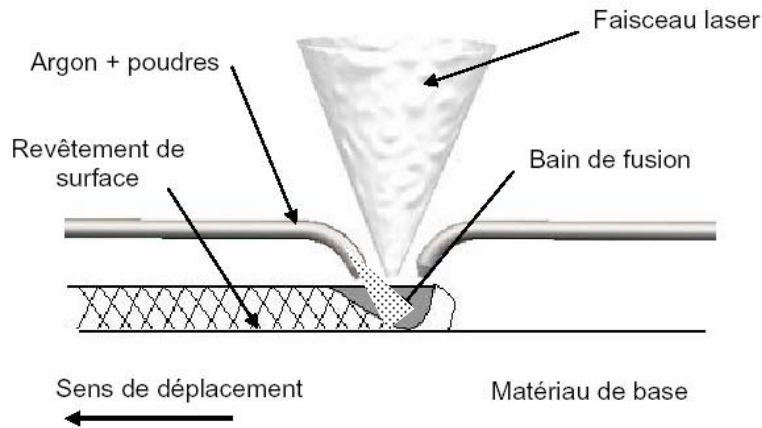


Fig. (I.6) Formation d'un revêtement de surface avec injection de poudre sous le faisceau laser.

Depuis 1981, ce procédé est utilisé en Grande Bretagne dans le domaine de l'aéronautique, et il a été introduit par la suite au Japon dans l'industrie de grande série pour le stellitage de soupapes ou le revêtement des sièges de soupapes directement sur bloc moteur.

III.2.2. Formation de composites et alliages superficiels

Des particules de renfort injectées superficiellement, s'incrusteront sans fondre, dans le métal en fusion. Après re-solidification du matériau, de telles particules de type carbure ou nitrure induisent une augmentation sensible de la dureté dans la zone traitée (figure (I.6)).

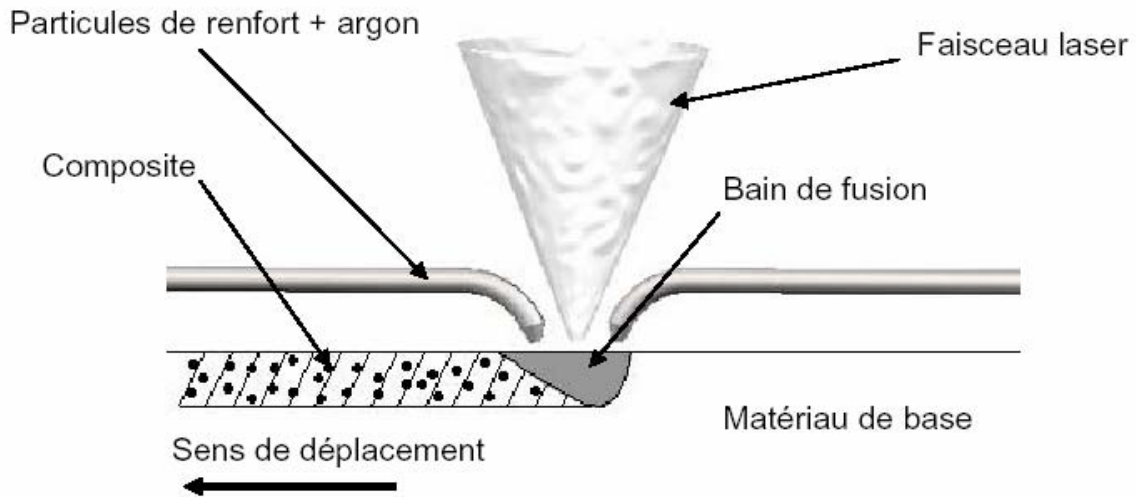


Fig. (I.7) Formation d'un composite superficiel.

Le procédé d'alliages superficiels 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 un gaz réactif (figure (I.7)) ou bien un élément d'addition injecté sous le faisceau (figure (I.8)) ou déposé préalablement (figure (I.9)), afin de former un alliage de surface après re-solidification.

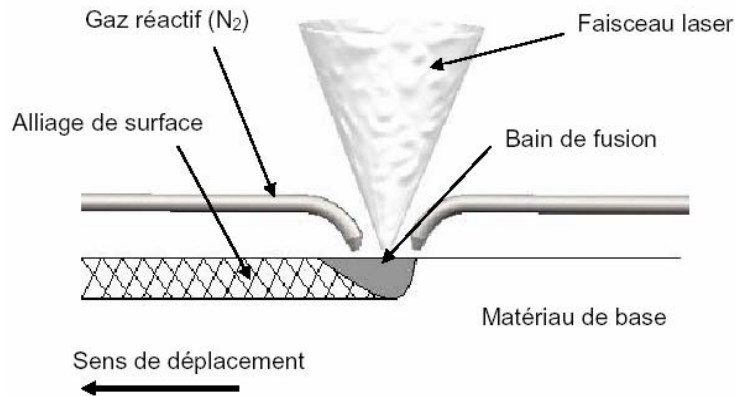


Fig. (I.8) Formation d'un alliage de surface par injection de gaz réactif.

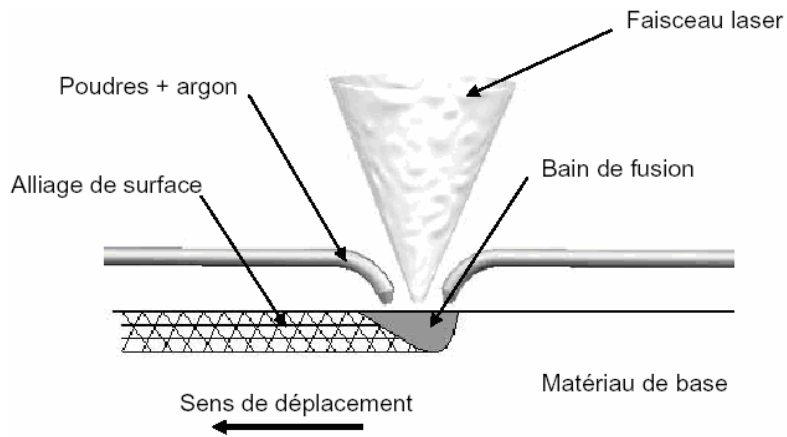


Fig. (I.8) Formation d'un alliage de surface par injection de poudres additives.

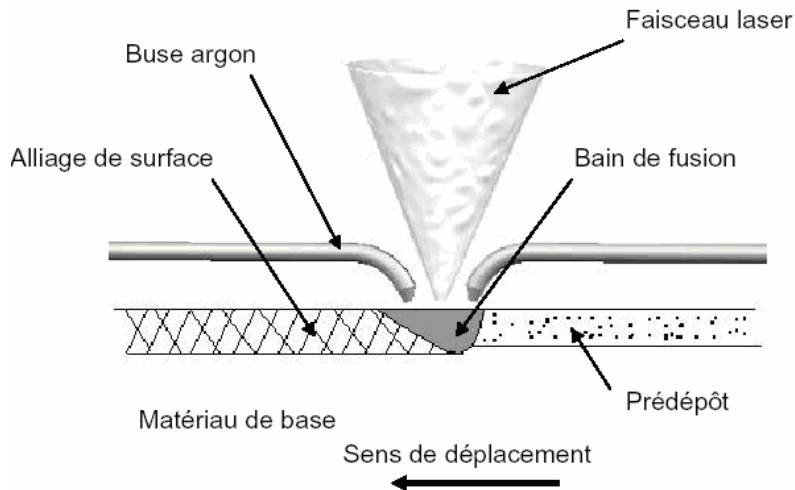


Fig. (I.9) Formation d'un alliage de surface à partir d'un prédépôt d'éléments d'addition.

IV. CONCLUSION

Dans le domaine spécifique des traitements de surface, l'utilisation des lasers de puissance offre d'importants avantages par rapport à d'autres procédés. L'intérêt de la technique laser par rapport aux autres techniques concurrentes (refusion par plasma ou procédé par arc TIG) réside principalement dans une réduction des déformations de surface des pièces qui nécessitent généralement une reprise d'usinage. Cependant, l'emploi du procédé TIG est encore souvent préconisé pour des raisons économiques. La possibilité de concentrer l'énergie laser sur une très petite surface rend cette technologie inégalée dans le cas des traitements localisés. Ainsi, la forte concentration d'énergie autorise des temps d'interaction très brefs, qui limitent l'étendue des zones affectées thermiquement et engendrent des microstructures très

fines, induites par des re-solidifications rapides. En outre, la grande souplesse d'application constitue une des principales caractéristiques intéressantes du faisceau laser. En effet, contrairement aux faisceaux d'électrons, le traitement par laser ne nécessite pas de procéder sous vide, et le transport du faisceau notamment de type Nd-YAG peut se faire par fibres optiques. Une excellente liaison, entre le substrat et la zone traitée par irradiation, est obtenue dans la majorité des cas.

Grâce à la diversité des effets induits dans l'ensemble des traitements de surface par laser, il apparaît que cette gamme de procédés est capable d'offrir des solutions variées en vue d'améliorer les propriétés de surface des matériaux (traitements thermiques ou thermo-chimiques de la surface, traitements mécaniques).

Les applications concernent des matériaux très divers soumis à différents types de sollicitations (usure, érosion, oxydation, fatigue,..). La localisation du traitement uniquement sur la zone de la pièce soumise aux sollicitations permet de réduire la durée de l'opération ainsi que la quantité d'énergie et de matière consommées. En outre, ces divers traitements superficiels préservent en profondeur les propriétés du matériau massif. Malgré des potentialités importantes, les procédés laser dans le domaine des traitements de surface ne connaissent pas encore le développement industriel qu'ils méritent, car il s'agit d'une technologie encore jeune, et relativement coûteuse. C'est pourquoi le monde industriel préfère encore l'utilisation de procédés peut-être moins performants, mais totalement maîtrisés et moins coûteux.

CHAPITRE II

CHAPITRE II

RECHARGEMENT PAR LASER

1. INTRODUCTION

Les traitements utilisant des faisceaux de haute densité de puissance sont aujourd'hui de plus en plus utilisés. Plusieurs procédés de traitements thermiques des matériaux sont disponibles, comme par exemple les techniques de pulvérisation par flamme et par plasma, ainsi que l'utilisation de l'arc électrique. Le but principal de ces techniques est d'appliquer une couche extérieure apportant au matériau des propriétés recherchées qu'il ne possédait pas auparavant [10]. Cependant ces techniques présentent quelques inconvénients dont essentiellement :

- faible liaison apparaissant entre le matériau enduit et le substrat.
- occurrence de la porosité.
- déformation thermique de l'objet.
- dilution élevée entre le matériau enduit et le substrat.
- incapacité d'un traitement très localisé [11].

Une des techniques qui s'est établie dans la pratique est l'utilisation du faisceau laser. Dans ce cas, les couches externes traitées produites sont de qualité élevée, et en ont fait un procédé plus intéressant [12] dans le traitement de surface des matériaux. La puissance minimale pour le traitement de surface des matériaux par laser est de 1 Kilowatt [13]. Pour la longueur d'onde $10.6\mu\text{m}$ (faisceau laser CO_2), des pertes significatives par réflexion sont subies, et à la température ambiante, seulement une portion de 6 à 10 % du rayonnement est absorbée par la surface solide d'un alliage d'acier [14,15]. L'absorption peut être améliorée en utilisant des enduits spéciaux (graphite), et l'on fait état [14] qu'en associant certains revêtements, l'absorption du rayonnement CO_2 par une surface d'acier doux peut être considérablement

améliorée et atteindre 30% environ. Cependant, le développement relativement récent des lasers solides de puissance de type Nd-YAG permet une meilleure absorption des matériaux. On démontre que la longueur d'onde 1.06 μm est plus efficace pour ce type d'applications puisque, par exemple, l'absorption d'une surface en acier atteint environ 30 %, et elle peut atteindre jusqu'à 60% en rajoutant des revêtements appropriés. Un autre avantage de l'utilisation d'un faisceau issu d'un laser Nd-YAG par rapport au laser à gaz CO_2 est la possibilité de transport du faisceau par fibres optiques.

La compréhension des phénomènes physiques impliqués lors des traitements est limitée par les difficultés de mesures (faibles dimensions du bain liquide, température élevées) rencontrées à diverses échelles.

A l'échelle macroscopique ou échelle de la pièce :

C'est l'étude de l'histoire thermique de la pièce lors du traitement, et la détermination des contraintes et déformations résiduelles après traitement.

A l'échelle mésoscopique ou échelle du bain liquide :

C'est l'étude des interactions intervenant directement sous l'effet du faisceau laser (mécanisme de fusion de la poudre, absorption et réflexion de l'énergie du laser, forme du bain liquide).

A l'échelle microscopique ou échelle du grain :

C'est l'étude de la structure microscopique de la surface de la pièce. Cette étude sous-entend la compréhension des phénomènes liés à la solidification rapide d'un matériau tels que la germination et la croissance de grains dendritiques ou eutectiques ainsi que certains changements de phase à l'état solide. [16]

Il existe principalement trois processus de traitement de surface par laser, décrits schématiquement sur la figure (II.1). Ces processus sont :

- le processus sans fusion de la surface à traiter (application au durcissement par laser, trempe superficielle),
- le processus avec fusion de la surface (application à la refusion par laser),
- le processus avec fusion de la surface et rajout d'un matériau additionnel (application au revêtement de surface par laser).

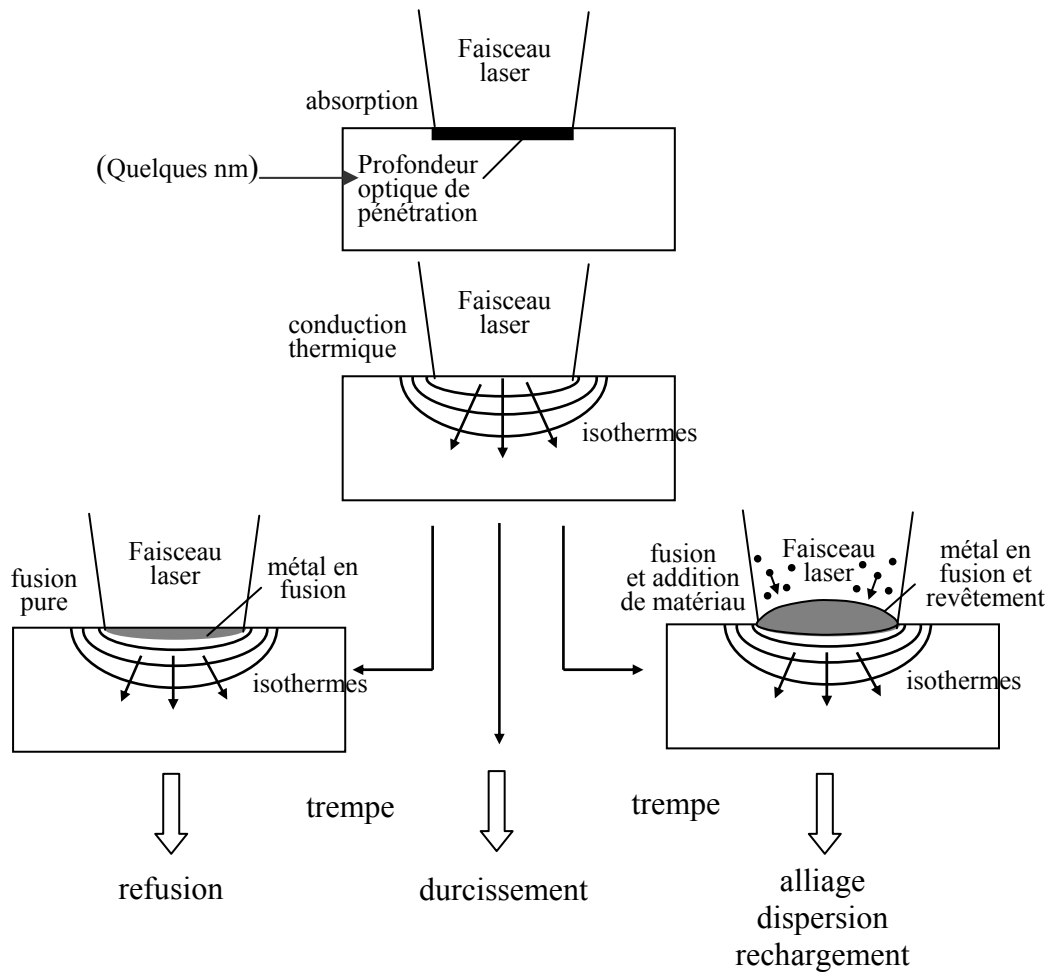


Fig. (II.1) schématisation du traitements de surface par laser.

Les effets de refusion par laser, et les transformations de durcissement par lasers sont basés sur un changement de la microstructure de la couche extérieure. Cependant, il peut être nécessaire ou peu coûteux d'un point de vue commercial d'appliquer une couche de composition différente sur la matière première si elle ne peut pas être améliorée suffisamment.

Dans l'étude développée dans le cadre de notre travail, on s'intéresse au procédé de traitement des surfaces par laser, pour l'obtention d'un revêtement sur le matériau de base. Ceci est effectué par la fusion superficielle de la pièce traitée avec apport d'un matériau additionnel. Ce qui est plus communément appelé ' rechargement par laser '.

II. LE REVETEMENT PAR LASER

On donne au procédé de revêtement par laser la définition suivante: "C'est un processus qui est utilisé pour fondre avec un rayon laser un autre matériau qui possède des propriétés métallurgiques différentes sur un substrat, par lequel seulement une couche très fine du

substrat devrait être fondue afin de réaliser une liaison métallurgique suivi d'une dilution minimale du matériau supplémentaire et du substrat, afin de maintenir les propriétés originales du matériau enduisant".

Les effets recherchés dans ce type de traitement sont le changement de la microstructure ou de la composition matérielle de la couche externe provoqué par un cycle thermique induit par la source laser mobile. De grandes surfaces peuvent être ainsi modifiées en répétant le traitement sur plusieurs voies adjacentes. Certains procédés exigent l'utilisation d'un gaz d'apport pour éviter la corrosion de la région traitée [11]. Le processus est schématiquement montré sur la figure (II.2).

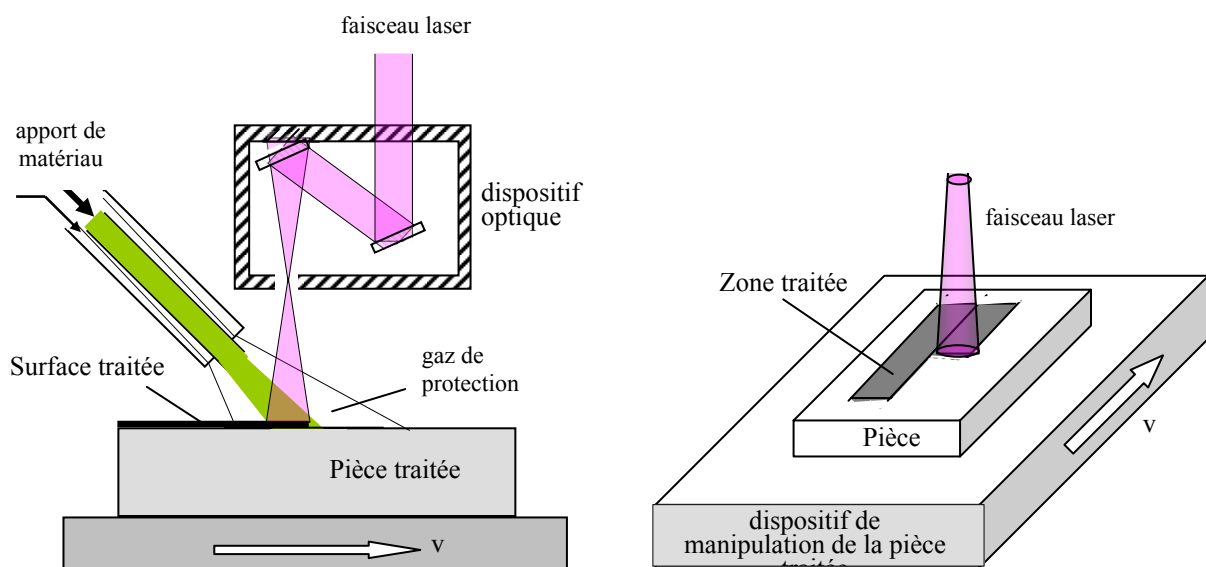


Fig. (II.2) le substrat effectue un mouvement relatif par rapport au rayon laser. Le secteur exposé par le rayon laser est traité. De plus grands secteurs peuvent être traités par l'application plusieurs voies adjacentes.

La région traitée est chauffée par absorption d'une énergie confinée et très intense fournie par le faisceau laser de puissance élevée, et en conséquence, les taux de chauffage dans la couche extérieure sont importants. La couche subit un refroidissement par diffusion de la chaleur vers le volume froid (partie non chauffée du substrat, air environnant...), après passage du faisceau laser. Le chauffage important et les taux de refroidissement élevés dans la couche extérieure produit un raffinement de grain, et par conséquent la formation de phases métastables et/ou de changement de microstructures.

Trois techniques laser pouvant augmenter les propriétés extérieures en changeant la composition du matériau en surface par apport de matière peuvent être distinguées :

- l'alliage par laser (assemblage),
- la dispersion par laser
- le rechargement par laser.

Ces techniques sont schématiquement représentées sur la figure (II.3).

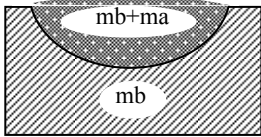
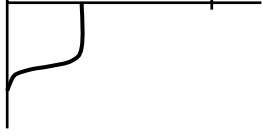
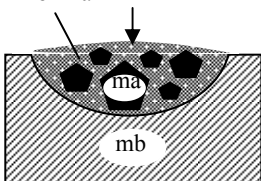
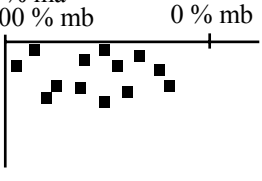
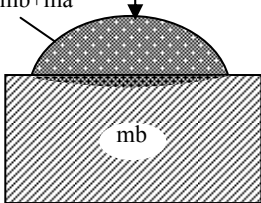
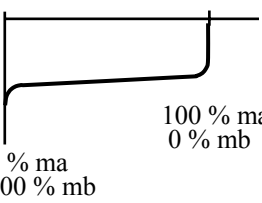
ALLIAGE		
DISPERSION		
RECHARGEMENT (CLADDING)		
mb: matériau de base ma: matériau additionnel		

Fig. (II.3) les traitement de surface par laser sont distingués par la température de surface (phase solide/bain de fusion) et le matériau additionnel.

Chacune des trois méthodes implique la formation d'un bain fondu sur lequel le matériau de revêtement est rajouté.

Selon le degré du mélange réalisé dans la couche extérieure entre la matière supplémentaire et le matériau de base, on peut distinguer : l'alliage par laser et la dispersion par laser d'une part, et le revêtement par laser d'autre part.

La première classe est caractérisée par un mélange élevé dû à une réaction entre les éléments supplémentaires et la matière de base (substrat). Par conséquent, les propriétés de la couche plaquée produite dépendent entièrement du matériel enduisant appliqué. [14]

II.1. Le revêtement par laser et les autres techniques

Outre l'utilisation du laser, les méthodes connues de revêtement sont : la pulvérisation par flamme, pulvérisation par plasma et la soudure à l'arc électrique. Ce sont des procédés qui appliquent une source de chaleur pour fondre le matériau enduisant et/ou la matière de base (substrat).

En général, l'utilisation d'un rayon laser pour les traitements de surfaces offre plusieurs avantages par rapport aux sources de chaleur conventionnelles [17-20].

- l'apport en énergie est mieux contrôlé.
- un traitement très local est possible ;
- la chaleur déposée permet d'obtenir une distorsion minimale ;
- le chauffage et les taux de refroidissement élevés, permettent l'obtention d'une microstructure fine et/ou des phases métastables ;
- le traitement est un processus sans contact. Il n'y a donc aucune usure d'outil, ni forces mécaniques appliquées sur l'objet ;
- la profondeur du traitement peut être définie à l'avance.

Atamert [21], Cai [22] et Li [23], Monson [24] décrivent encore plus les avantages du revêtement par laser par rapport aux techniques de revêtement conventionnelles. La combinaison d'une dilution minimale contrôlée du substrat par le matériau enduisant et d'une forte adhérence entre eux, est une caractéristique spécifique du revêtement par laser. La formation de porosités dans l'enduit peut être entièrement évitée et une distribution homogène des éléments peut être obtenue.

III. LE RECHARGEMENT PAR LASER (CLADDING)

III.1. Applicabilité du rechargement par laser

C'est une technique utilisée afin de produire un matériau dur [25-28], résistant contre l'usure [29-36] et/ou en formant une couche extérieure résistante à la corrosion [37-42] (figure (II.4)). Il peut également être soit appliqué pour produire des barrières thermiques [43-46], pour réaliser des couches appropriées à l'application dans les centrales électriques nucléaires [47, 48] ou pour obtenir des couches extérieures qui empêchent l'empilement [49]. La technique peut être utilisée pour produire des couches extérieures de haute qualité sur de nouvelles pièces, pour produire des pièces entières [50], ou pour rénover et réparer des pièces utilisées ou détériorées [51].

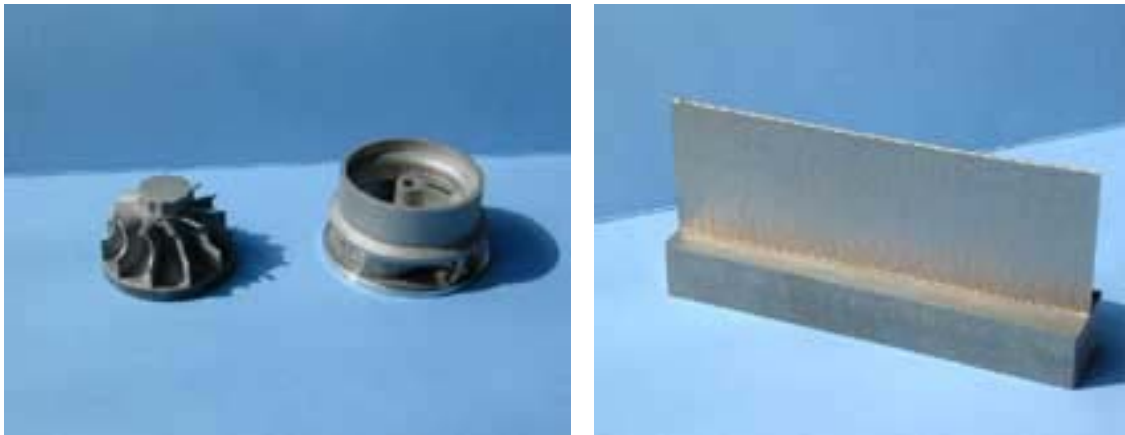


Fig. (II.4) réparation de pièces et élaboration de parois par rechargement laser

Le revêtement est appliqué sur les pièces mécaniques qui sont exposées à un environnement agressif : cycles thermiques avec un chauffage élevé et des taux de refroidissement, les gaz corrosifs, les températures élevées, les particules abrasives et/ou l'érosion de cavitation.

La plupart de ces pièces exigent seulement un traitement local qui peut être exécuté en un seul passage simple. Un exemple est le revêtement de la soupape d'échappement d'un moteur diesel avec une couche plaquée déposée de Stellite 6 qui a une largeur d'environ 2.5 mm et une épaisseur de 1 mm. De telles couches peuvent être appliquées avec un système laser CO₂ délivrant une puissance jusqu'à quelques dizaines de kilowatts.

D'autre part, on peut citer l'exemple du revêtement d'une vis d'extrudeuse caractérisé par une largeur de 10 mm, et couche d'épaisseur de 2 mm, sur une longueur de plus de 3 m ayant exigé l'utilisation d'un laser de 10 kilowatts. Le revêtement par laser n'est pas l'alternative la plus économique pour l'enduit d'une région aussi importante en termes de coûts de production. Cependant dans ce cas toute autre technique échouerait dans la réalisation d'une forte

adhérence entre enduit et matière première, ou aurait pour conséquence la déformation de la vis. Pour le revêtement de plus grandes régions, les lasers à CO₂ de puissance très élevée (plus de 20 kilowatts) sont disponibles. Ils peuvent être utilisés pour produire 44 mm de largeur et 5.5 mm de hauteur en une seule étape.

III.2. Les méthodes de rechargement par laser

On distingue deux techniques principales, représentée en figure (II.5), pour réaliser un rechargement de matériaux par laser :

- le processus à deux étapes,
- le processus à une seule étape.

Dans ces deux méthodes utilisées en pratique, le matériau enduisant est ajouté d'une manière prédominante sous forme de particules de poudre.

III.2.1. Processus à deux étapes

Le rechargement avec poudre préalablement déposée, figure (II.5), est le plus commun des deux techniques de la méthode de revêtement. Les poudres appliquées sont les mêmes que celles utilisées dans la pulvérisation par flamme et par plasma [28, 45, 48, 53, 54]. La poudre doit être mélangée [31, 51, 55, 58-60] à une substance chimique pour assurer son adhérence au substrat pendant le processus; afin de fournir une résistance aux forces imposées par les courants de gaz ou de la gravitation. L'apport chimique s'évapore pendant le processus. Cela peut produire la formation de quelques porosités dans la couche revêtue.

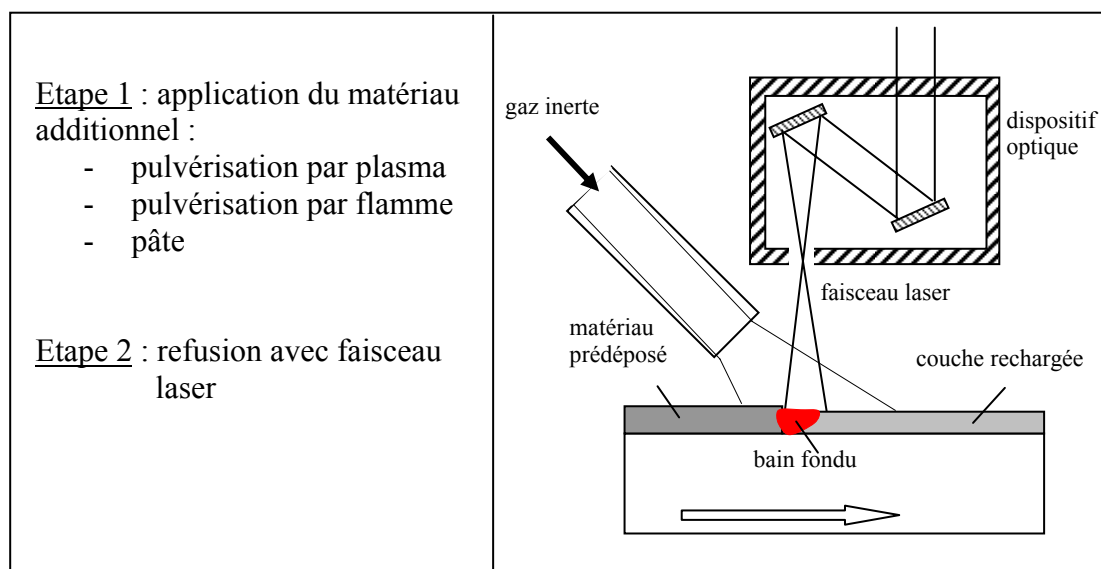


Fig. (II.5) Processus de rechargement par laser en deux étapes

La deuxième étape du processus commence avec la formation d'un bain fondu à la surface du matériau. L'apport d'énergie transformée en chaleur doit être contrôlée pour éviter la fusion relativement profonde du substrat, ce qui résultera en une forte dilution d'une part, et en l'obtention d'une forte liaison d'autre part. Les deux étapes de cette méthode sont particulièrement appliquées pour traiter des parties en un seul passage. Il est aussi possible d'appliquer cette technique sur plusieurs pistes (passage) adjacentes, mais cela résultera une augmentation de la dilution, comme illustré sur la figure (II.6). Avant la réalisation du revêtement de la première piste, la région entière est couverte de matière pré-déposée. Une partie de la couche est fondue par le faisceau laser. Après le passage du faisceau, le matériau fondu se contracte à cause à la tension superficielle, et par conséquent, le domaine de substrat situé juste à côté de la couche fraîchement produite n'est plus couvert de matière pré-déposée. Au moment de réaliser le dépôt sur la prochaine piste, une partie non couverte du substrat est directement irradié par le faisceau laser résultant en une fusion plus profonde du substrat dans cette région.

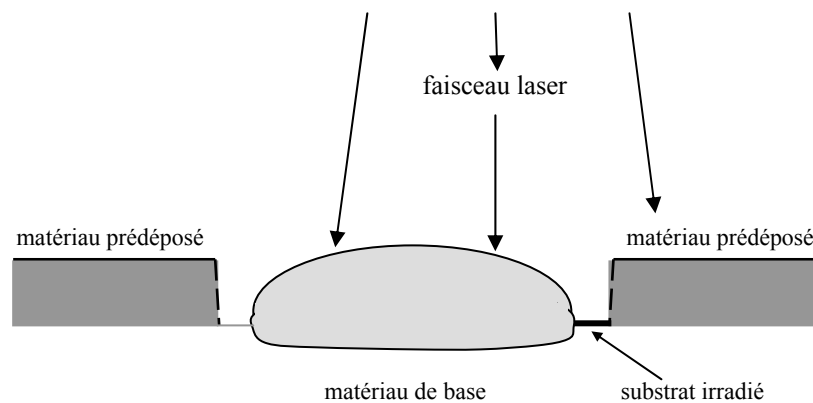


Fig. (II.6) *La contraction du bain de fusion durant la solidification.*

III.2.2. Processus en une seule étape

Le début du processus en une seule étape, représenté sur la figure (II.7), est la formation d'un bain fondu dans le substrat. Simultanément, le matériau enduisant est introduit dans ce bain et fondu ; une liaison forte de fusion est immédiatement réalisée entre le matériau enduisant et le substrat.

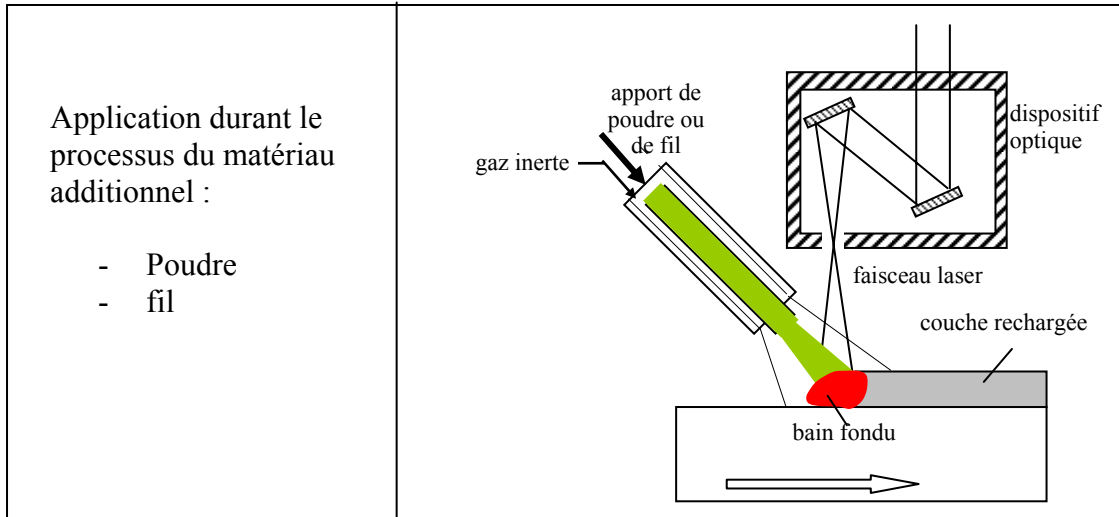


Fig. (II.7) *Processus de rechargement par laser en une seule étape.*

Le processus en une seule étape a plusieurs avantages par rapport au processus à deux étapes :

- De grandes surfaces qui exigent l'application sur plusieurs voies adjacentes peuvent être produites avec moins de dilution. La contraction des couches plaquées pendant le refroidissement se produit toujours, mais aucune partie du substrat n'est irradiée inutilement, parce que le matériau de déposition alimente le substrat à côté de la voie précédente.
- L'épaisseur du matériau enduisant peut être changée directement en contrôlant les taux d'apport du matériau à déposer.
- Des produits possédant une géométrie complexe peuvent être traités, car le matériau est apporté sans interruption dans la zone d'interaction. Cela évite la perte de matériau fondu due à l'attraction de la pesanteur.

Deux méthodes d'apport de matériau de rechargement sont disponibles :

- l'approvisionnement par fil
- l'injection de poudre.

III.2.2.1. Approvisionnement par fil

L'approvisionnement par fil [61] peut être utilisée pour le revêtement de pièces ayant une symétrie de rotation, et qui peuvent être plaqués en appliquant une piste continue. Le positionnement du fil sur le substrat constitue un aspect critique du processus, et cela pour deux raisons :

- Le fil est habituellement en contact direct avec le bain fondu dans le substrat, et pour ne pas perturber la fusion, le processus exige l'utilisation d'un système de positionnement précis du fil, et un contrôle plus précis de son taux d'entrée.
- Le substrat est partiellement protégé par le fil recevant le faisceau laser. Pour que la couche plaquée soit de bonne qualité, c.-à-d. avec une bonne liaison au substrat, et en dehors d'une surface lisse, un rapport entre le diamètre du faisceau et le diamètre du fil d'au moins un facteur trois doit être utilisé. Le fil doit être bien aligné sur le centre de la tache du laser pour assurer la formation d'une couche plaquée symétrique. La buse d'alimentation de fil doit être près de la région de traitement pour permettre une alimentation précise du fil dans le bain fondu. Donc en particulier, l'usinage des produits incurvés ou de formes concaves est difficile à réaliser.

L'utilisation d'une tête en rotation tenant le haut du fil permet un revêtement avec un angle constant entre le fil et le substrat, ainsi qu'un angle constant entre la direction d'injection et le mouvement relatif du substrat. L'efficacité du processus peut être augmentée par l'application d'une unité d'induction pour préchauffer le fil.

III.2.2.2. Injection de poudre

L'injection de poudre dans un bain fondu produit par laser est une méthode beaucoup plus répandue comparée au revêtement par fil [63]. Cette méthode est plus flexible [62]: elle permet la variation directe des dimensions et la composition de la couche plaquée et, beaucoup plus d'éléments et d'alliages sont disponibles comme poudre plutôt que dans le cas du fil.

Comparativement, l'injection par poudre est une méthode plus intéressante que le revêtement par fil, car il n'y a aucun contact direct avec le bain fondu, et le faisceau laser peut passer à travers le jet de particules de poudre au lieu d'être écranté par le fil.

Des conducteurs de poudre sont basés sur divers principes de fonctionnement. De tels conducteurs sont montrés sur figure (II.8). L'image gauche montre un conducteur se composant d'un récipient de poudre, qui coule par gravitation à l'intérieur d'une fente dans un disque rotatif. La poudre est dirigée vers une unité d'aspiration de laquelle elle est transportée par un jet de gaz vers la buse de poudre. Le taux d'entrée volumétrique de poudre est commandé par les dimensions de la fente et la vitesse du disque [64]. Une autre méthode pour le dosage en poudre est l'utilisation d'un conducteur pneumatique à vis [65]. La poudre est

collectée par un récipient de ramassage et est transportée vers la buse de poudre. Le taux d'entrée de poudre est contrôlé par la vitesse et les dimensions de rotation de la vis.

Une approche différente de l'alimentation en poudre est l'application d'un distributeur et d'une combinaison des forces pneumatiques et vibratoires. Un dispositif standard de nettoyage ultrasonique pourrait convenir pour la fourniture des effets vibratoires. La poudre est prise du distributeur au moyen d'une différence de pression et est transportée à la zone de traitement [66,67].

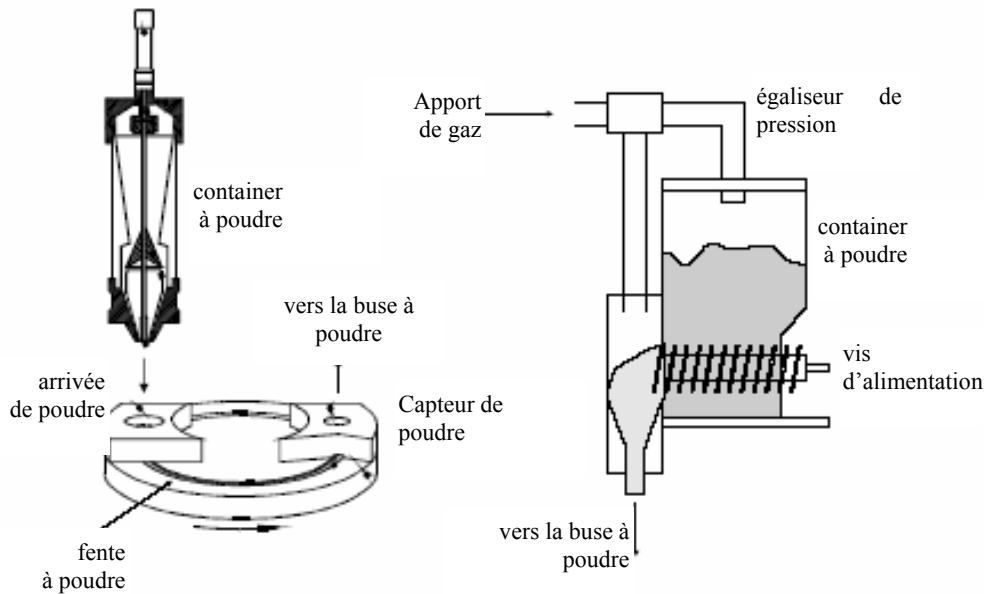


Fig. (II.8) Deux principes de dosage de poudre.

La tendance du développement de nouveaux conducteurs de poudre pour le rechargement par laser est la commande directe du débit : commande d'écoulement de la masse au lieu de l'écoulement volumétrique et des variations de flux instantanées [36, 64, 68].

La poudre doit être transportée du conducteur à la région du processus. Ceci peut être fait par l'utilisation d'un gaz porteur (argon, hélium, azote) ou simplement par attraction gravitationnelle, et par la suite, elle est dirigée vers le bain fondu par une buse d'injection de poudre. La buse de poudre peut avoir plusieurs configurations. Deux dispositifs de base sont montrés sur la figure (II.9). L'approvisionnement coaxial en poudre (figure (II.9a)) [36, 69, 87] peut être intégré avec le système optique du faisceau laser. Les avantages de l'approvisionnement coaxial de poudre sont l'indépendance de l'approvisionnement de la direction du mouvement de la pièce. D'autres avantages de l'approvisionnement coaxial sont: le chauffage commandé de la poudre avant qu'elle entre dans le bain fondu et l'efficacité élevée de poudre [69-72].

L'alimentation latérale en poudre (figure (II.9b)) permet le traitement de toutes sortes de formes en appliquant les buses livrer de poudre. Fondamentalement, les buses latérales de poudre sont tout simplement des tubes ayant une longueur, et un diamètre appropriés. [73] a développé une buse tubulaire incurvée aux diamètres intérieurs plaqués des tubes.

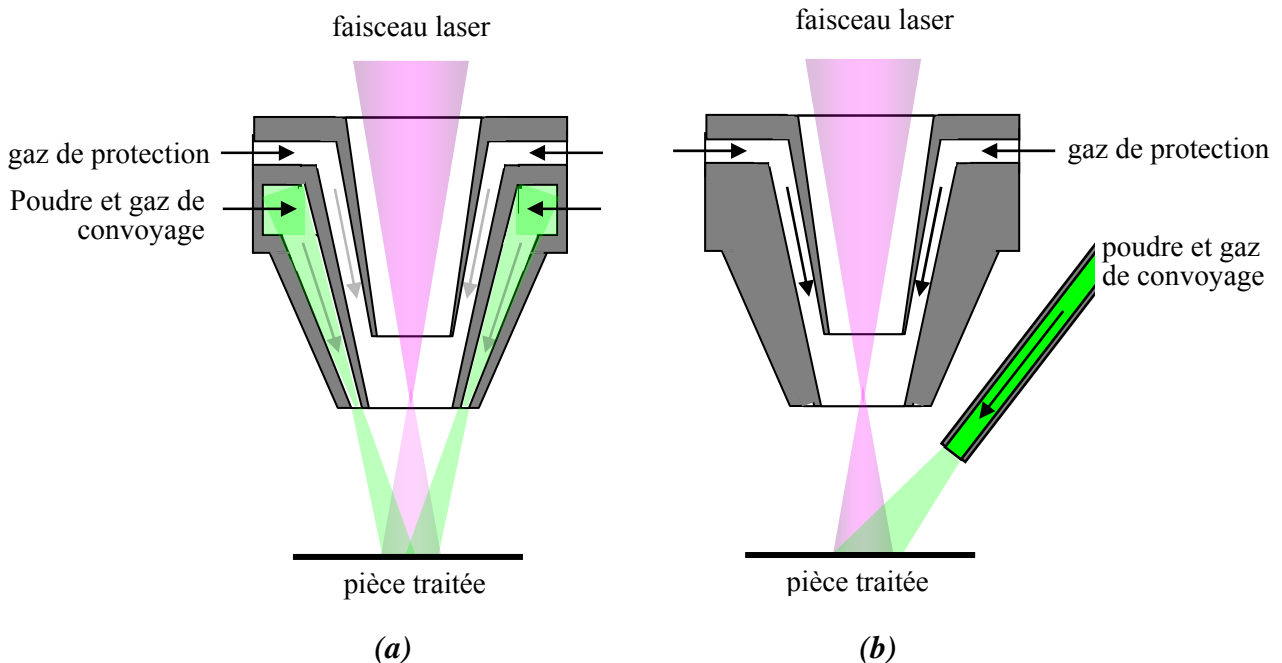


Fig. (II.9) *Approvisionnement coaxial et latéral de poudre.*

III.2.3. Propriétés de la couche plaquée

Les propriétés des couches plaquées sont classées en quatre groupes (tableau (II.1)).

Certaines de ces propriétés peuvent être reliées entre elles. La résistance à l'usure peut par exemple être affectée par la dureté, la microstructure, le nombre de fissures et leur profondeur et direction, la liaison entre la matière première et le substrat, etc....

Dans la pratique, il est difficile de produire une couche plaquée qui répond à toutes les exigences. Habituellement un équilibre doit être trouvé entre plusieurs propriétés. Un exemple est la réduction de formation des fissures dans la couche plaquée en préchauffant le substrat. Le préchauffage réduit les taux de refroidissement et l'effort résiduel résultant. Par conséquent, la formation de fente est évitée et, la dureté est aussi bien réduite [29]. L'empêchement des fissures est important, parce que les fissures lancent la rupture de corrosion et réduisent la force de contrainte supportée.

Propriétés géométriques	Propriétés mécaniques	Propriétés métallurgiques	Propriétés qualitatives
<ul style="list-style-type: none"> - dimensions de la couche plaquée - dilution - rugosité 	<ul style="list-style-type: none"> - distribution de la dureté - efforts résiduels - résistance à l'usage - résistance à la traction 	<ul style="list-style-type: none"> - microstructure - dilution - taille du grain - homogénéité - résistance à la corrosion 	<ul style="list-style-type: none"> - porosité - fente

Tableau (II.1) propriétés de la couche plaquée (rechargée).

III.2.4. Dilution

La dilution est également un facteur déterminant de la qualité des résultats du processus. La dilution du métal de revêtement, définie comme la proportion du métal de substrat dans la couche plaquée, est désignée généralement sous le nom de la contamination dans le métal plaqué, et peut par conséquent dégrader ses propriétés mécaniques. Il est donc essentiel de contrôler rigoureusement l'ampleur de la dilution pendant le processus de revêtement par laser. Habituellement il est permis jusqu'à 10 % mais une ampleur plus souhaitable de dilution peut être considérée lorsque l'on obtient 3 à 8 % [76].

Par le revêtement par laser on voudrait aboutir à la réalisation d'une forte adhérence entre le matériau enduit et le substrat, où le bain fondu est formé. Par conséquent, pour obtenir une qualité élevée de revêtement, la profondeur du bain de fusion doit être la plus petite possible pour obtenir une couche extérieure pure qui ne serait pas diluée dans la matière première constituée par le substrat.

La dilution de la couche produite par les éléments du substrat est utilisée pour caractériser la qualité de cette couche. Elle peut être mesurée de deux manières [37].

- La première méthode est basée sur la géométrie de la couche plaquée (figure (II.10)). La dilution est alors définie comme : le rapport entre la profondeur de la couche plaquée d_c enduit sur le substrat et l'épaisseur totale t_c . Cette approche géométrique assume une distribution homogène des éléments au-dessus de la section transverse de la couche plaquée .
- La deuxième méthode est basée sur l'analyse de la composition matérielle dans la couche plaquée ("produit chimique" ou "dilution volumétrique"). Une comparaison est

faite entre la composition du matériau enduisant pur et la composition du substrat. Cette méthode permet la détermination de la variation de la dilution au-dessus de la profondeur de la couche plaquée et elle est préférée par rapport à l'approche géométrique.

On peut citer deux exemples donnés dans la référence [11] pour illustrer l'effet de la dilution sur quelques propriétés de la couche enduite.

- Le premier exemple montre comment la dilution géométrique mesurée se relie à la distribution de dureté.
- Le deuxième exemple prouve que la dilution chimique est la plus utile des deux, car les couches plaquées n'ont pas toutes une distribution uniforme des éléments.

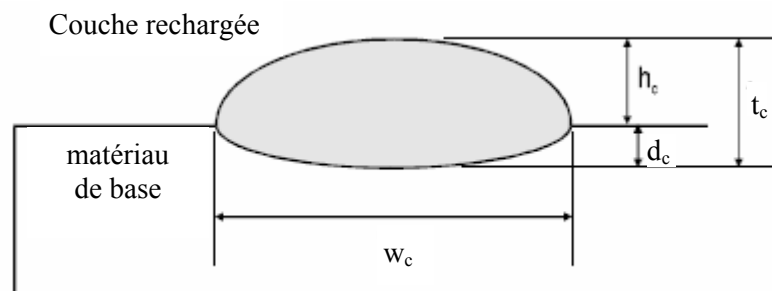


Fig. (II.10) Coupe transversale d'un seul passage de la matière rechargée.

III.2.5. Porosité

La présence de trous dans la couche plaquée est désignée par "porosité". La formation de porosités peut être provoquée par plusieurs raisons.

- D'abord, cela peut être le résultat de la formation de bulles de gaz qui auraient été emprisonnées dans le bain fondu après la re-solidification. Ce phénomène peut être réduit en provoquant une vibration de l'objet. A titre d'exemple, [76] cite une fréquence de vibration de 25 hertz et une amplitude de 20 μm . Il a été observé par Schneider [11] que le revêtement par laser "en vibration" ou le vibro- revêtement par laser réduit également les contraintes internes et les fissures.
- Deuxièmement, si le processus de re-solidification se fait dans différentes directions, quelques zones dans la région fondue peuvent être incluses ou enfermées. Une

contraction se produit lors de la re-solidification de ces régions incluses. Cette contraction provoque des contraintes dans la couche et peut même mener à la formation de trous.

Les deux types de porosités décrites ci-dessus peuvent être trouvées dans les couches plaquées. Deux autres genres de porosités peuvent être confinées à l'interface substrat-couche plaquée.

- Le premier est provoqué par la présence de petits défauts, telles que les graisses qui ont une influence sur la tension superficielle, et par conséquent sur la liaison du matériau enduisant avec le substrat.
- Le deuxième type de porosités apparaît quand les voies ou pistes de recouvrement sont appliquées comme indiqué sur la figure (II.11). Il se forme ce que l'on appelle les porosités inter-course ou 'inter-run porosity', qui se produisent lorsque le taux de poudre injectée est élevée. Cela peut être évité en obtenant un rapport largeur par hauteur du revêtement supérieur à 5.

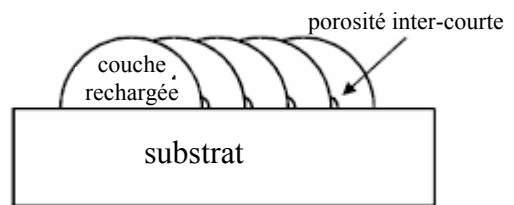


Fig. (II.11) Schématisation de la *porosité inter-course*.

III.2.6. Propriétés du matériau

Le revêtement par laser est utilisé pour améliorer les propriétés extérieures des pièces métalliques de machines. Une grande variété de poudres métalliques ou en céramique est disponible dans le commerce. Ces poudres ont principalement été développées pour l'utilisation dans la pulvérisation par plasma et par flamme. Elles sont également adaptées pour l'utilisation dans le revêtement par laser, car les propriétés fonctionnelles prévues sont identiques.

- Un aspect essentiel du revêtement par laser est la réalisation d'une forte adhérence au-dessus de l'interface entière entre le substrat et la couche plaquée ajoutée.

- Un bon mouillage entre le matériau enduisant et le substrat est exigé, et en raison de la faible mouillabilité des céramiques par rapport aux métaux, il est très difficile d'obtenir une couche plaquée en céramique sur un substrat métallique [77, 78]. L'application de couches en sandwich entre l'enduit et le substrat [45, 48] ou de reliures sont utilisées [36, 40, 78]. Le préchauffage peut également aider à augmenter la mouillabilité [79].
- La condition de base pour la soudure par fusion est que les deux matériaux d'accouplement soient solubles l'un dans l'autre et, doivent avoir un équilibre de phase entre eux. Pour la plupart des alliages cette condition ne pose aucune difficulté, mais pour les métaux purs, il peut être parfois difficile de les revêtir ou déposer 'clad' l'un sur l'autre. Par exemple, l'aluminium et le cobalt ne sont pas solubles l'un dans l'autre et il n'ont donc pas d'équilibre de phase entre eux. L'équilibre de phase existe seulement entre l'aluminium et certains intermétalliques ou entre le cobalt et tous les autres intermétalliques. Ainsi, la seule manière de les rassembler serait d'insérer des intermétalliques. Des multicouches peuvent également être appliquées pour des combinaisons métal-métal afin de réduire les contraintes résiduelles qui sont dues à l'apport continu de chaleur et pour former un gradient de couche ayant une faible dilution et les propriétés prévues ci-dessus [80,81]
- La convection est le facteur le plus important influant sur la géométrie du bain fondu, y compris la forme du bain et ses ondulations. La convection est également le mécanisme principal permettant de mélanger le matériau d'apport au substrat [82]. Puisque la microstructure et la composition chimique de la couche plaquée dépendent fortement du degré de mélange et des taux de refroidissement pendant la re-solidification et le refroidissement résultant, les paramètres qui contrôlent ces mécanismes sont importants pour le processus de revêtement par laser [12]. Les propriétés du matériau influençant ces mécanismes sont, entre autres : le point de fusion et la conductivité thermique.
- Le point de fusion du substrat doit de préférence être plus élevé que celui du matériau enduisant. Si ce n'est pas le cas, alors il est possible que pendant la re-solidification et le refroidissement de la couche plaquée enduite, la région juste au-dessous du substrat puisse être chauffée à un excédent de la température supérieure au point de fusion. Cette région perdra alors de sa dureté. Sous l'effet de tension au-dessus de la couche

plaquée, une larme chaude se produira le long de cette région [48]. Une telle situation dans tout les cas produit des porosités le long de l'interface.

- La formation des fissures dans la couche plaquée est principalement provoquée par l'effort thermique créé par le gradient élevé accumulé pendant l'étape de refroidissement et la différence entre les coefficients de dilatation thermique [49,78,83-85] .
- Particulièrement les couches sont caractérisées par la présence de particules dures et fragiles, telles que les carbures, qui ont tendance à fendre [85]. Les couches en céramique sont également vulnérables et ont tendance à fendre, en raison de leur ductilité limitée combinée avec la différence dans les coefficients de dilatation thermique par comparaison aux métaux [46].
- Les efforts résiduels peuvent être diminués par une réduction du taux de refroidissement. Ceci peut être réalisé par le préchauffage [29, 74].
- Les différentes matières de bases peuvent être classées en deux groupes. Le premier groupe concerne tous les aciers, et le second groupe concerne les matières à bases non ferreuses, telles que l'aluminium et le titane.

Effet des paramètres du processus

Les variables physiques du processus qui affectent les couches plaquées sont montrées sur la figure (II.12) [96]. Afin de pouvoir prévoir des résultats du revêtement, les rapports entre ces variables et les couches plaquées résultantes doivent être connus et résolus simultanément. A l'état actuel aucune solution exacte n'est disponible.

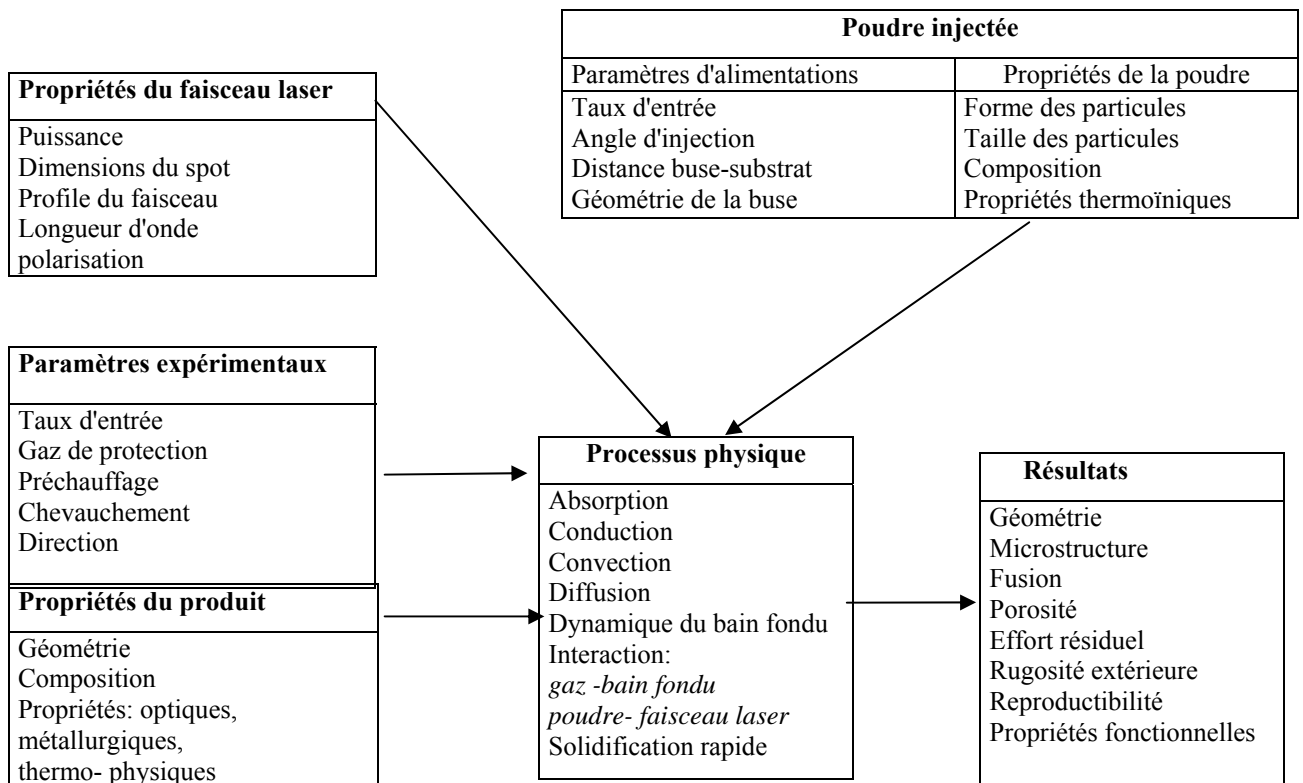


Fig. (II.12) Les différents variables dans le processus du rechargement par laser avec injection de poudre [Ollier, 1995].

IV. MODELES PHYSIQUES

Une alternative à l'analyse du processus par des méthodes expérimentales est le développement de modèles basés sur des lois physiques. Ces modèles contribuent à une meilleure compréhension du processus. Des expériences doivent être exécutées pour vérifier les prétentions sur lesquelles le modèle est basé et pour adapter les paramètres du processus. Un bon modèle soutient les recherches expérimentales nécessaires pour le développement de nouvelles applications.

Peu de modèles sont proposés pour le revêtement par laser. Ils peuvent se distinguer en deux groupes.

Le premier groupe de modèles est destiné à prévoir la quantité du matériau (poudre) qui peut être déposée. Ils sont basés sur l'hypothèse qu'une couche plaquée parfaite ne subit pas de dilution avec le substrat, et ne tiennent pas compte du profil de la température dans le

bain de fusion [70,71]. Des solutions analytiques pour la géométrie de la couche plaquée réalisée peuvent être obtenues lorsque la convection n'est pas prise en compte.

Un exemple typique de tels modèles est le travail présenté par Jouvard [71]. Dans un premier temps il détermine la puissance laser transmise par le nuage (vapeur) formé par les particules de poudre injectées $P_{at} - P$ (figure (16)) par l'application de la loi de Beer-Lambert. Pour le détail, cette loi est utilisée pour calculer l'élévation de la température de particules pendant leur traversée par le faisceau laser [11].

La deuxième étape implique le calcul de la puissance exigée pour produire un bain fondu dans le substrat. Combiné avec le facteur d'atténuation de puissance, la puissance laser exigée peut être déterminée (seuil 1 sur la figure (II.13)). Si la puissance est supérieure à ce premier seuil, une couche plaquée peut être accumulée sur le substrat. Durant le survol du faisceau laser par les particules, celles-ci sont chauffées mais non fondues. La fusion se produit quand la poudre atteint le bain fondu qui a été formé sur le substrat.

L'écoulement de la masse qui peut être fondu dépend seulement de la puissance laser jusqu'à ce que le deuxième seuil soit atteint. A ce seuil, les particules sont fondues par le faisceau laser avant qu'elles n'arrivent sur le bain fondu.

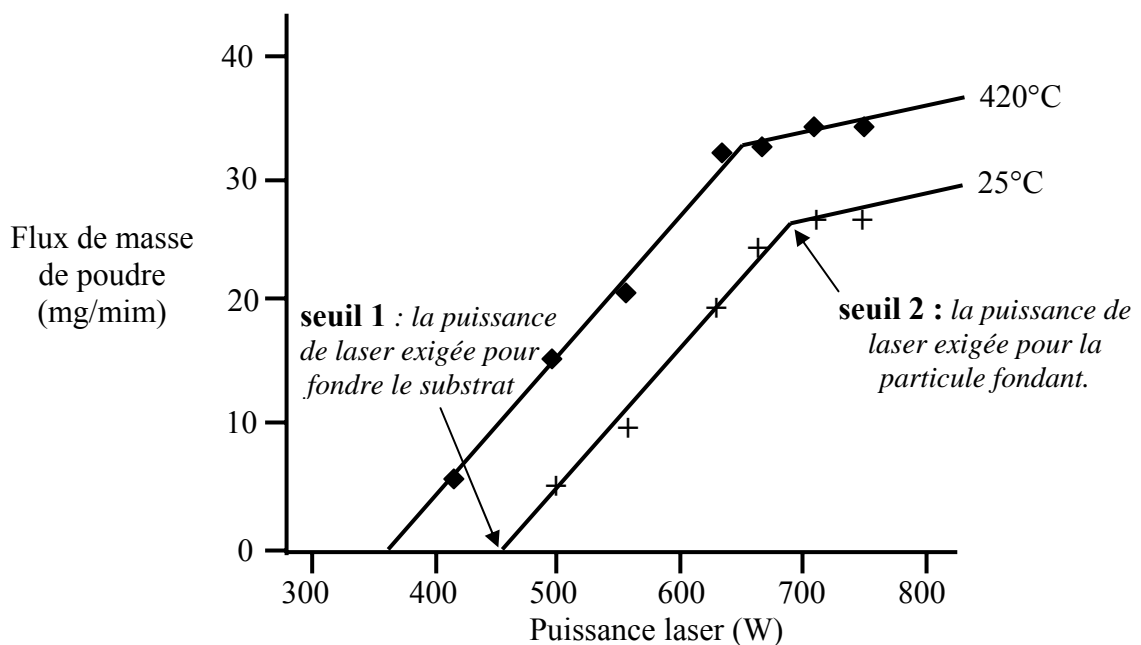


Fig. (II.13) Flux massique en fonction de la puissance laser pour deux températures différentes de substrat [Jouvard, 1997].

Le deuxième groupe de modèles est destiné à la description des principaux phénomènes qui se produisent pendant le revêtement par laser. Les modèles appartenant à ce groupe [96,97] permettent le calcul du champ de température et de vitesse dans le bain de fusion et dans le substrat solide, la forme de l'interface gaz-liquide et, naturellement, la géométrie de la couche plaquée. Les champs de température et de vitesse dans le bain de fusion sont importants, parce qu'ils déterminent la redistribution des éléments et des taux de refroidissement. Dans l'ensemble, ils sont responsables de la microstructure atteinte.

Une des premières tentatives pour expliquer la forme du bain fondu induit par laser a été faite par Cline et Anthony [99]. Ils pouvaient obtenir une solution analytique qui décrit la forme du bain fondu, en ne tenant pas compte de la convection dans le bain fondu, en négligeant la présence des forces visqueuses et d'inertie, et en supposant que les propriétés du matériau sont indépendantes de la température.

Picasso [16] a démontré que la convection est importante pour expliquer le champ de la température et de vitesse dans le bain fondu. La figure (II.14) montre une coupe dans la direction longitudinale d'un bain fondu typique sans convection (à gauche) et avec convection. Il apparaît clairement que les effets de convection dans le bain fondu ne peuvent pas être négligés.

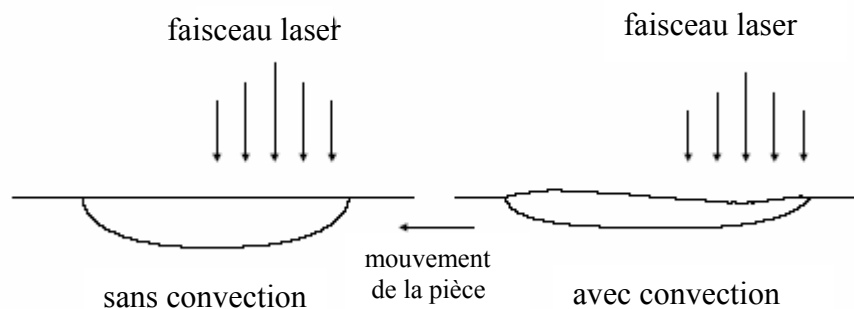


Fig. (II.14) *Effet de la convection sur la forme du bain de fusion [Picasso, 1994] (matériau : stellite 6 ; taux d'entrée 1mm/s)*

La forme du bain de fusion est régie par les écoulements convectifs qui sont principalement provoqués par des gradients de tension superficielle. Ces gradients sont induits par des différences de températures sur la surface due à l'absorption de l'énergie du faisceau laser. Il n'est plus possible d'utiliser une approche donnant des solutions analytiques si tous les aspects physiques sont incorporés dans le modèle. Pour cela, le flux fluide et le profil de température dans le bain fondu doivent être calculés par résolution numérique.

Le champ de la température T et de la vitesse dans la partie fondue sont régis par trois équations couplées : l'équation d'énergie (équation II.1) qui décrit au même temps le champ de la température et le changement de phase solide-liquide; l'équation de Navier-Stokes (équation II.2) qui décrit le champ de vitesse dans la partie fondue; et l'équation de continuité (équation II.3)

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \nabla \cdot (\rho v H) = \nabla \cdot (k \nabla (\rho T)) + q & (1) \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + (\rho v \nabla) v = \rho g - \nabla p + \mu \nabla \cdot (\nabla v) & (2) \\ \nabla v = 0 & (3) \end{cases}$$

H étant l'enthalpie, ρ la densité, μ la viscosité, q flux de chaleur (flux laser), g la gravité, k la conductivité thermique, t le facteur temps, v est la viscosité cinétique qui est égale à : μ / ρ .

Il est courant de simplifier les équations de Navier Stokes pour le flux de fluide incompressible au moyen de l'approximation de Boussinesq [100].

$$\rho = \rho_f [1 - \alpha(T - T_f)] \quad (4)$$

ρ_m est la densité à la température T_f au point de fusion du matériau, α est le coefficient d'expansion thermique. L'équation de Navier-Stokes peut être réduite à :

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \nabla v = g \alpha (T - T_m) - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla \cdot (\nabla v) \quad (5)$$

Tel que :

$$H = \int_{T_0}^{T_m} c_p dT + L_f + \int_{T_m}^T c_p dT \quad (6)$$

Telle que C_p est la capacité calorifique du matériau, et L_f est la chaleur latente de fusion.

Les équations (2, 3, 6) doivent être résolues simultanément avec des conditions aux limites appropriées. Les conditions les plus importantes impliquent l'effort de cisaillement sur la surface du bain fondu qui est due au jet des particules de poudre dans un écoulement de gaz, le faisceau laser et les particules injectées sont responsable de la chaleur introduite dans le

bain (figure (II.15)), et la loi de conservation de la masse est très importante parce que des particules sont rajoutées dans le bain fondu.

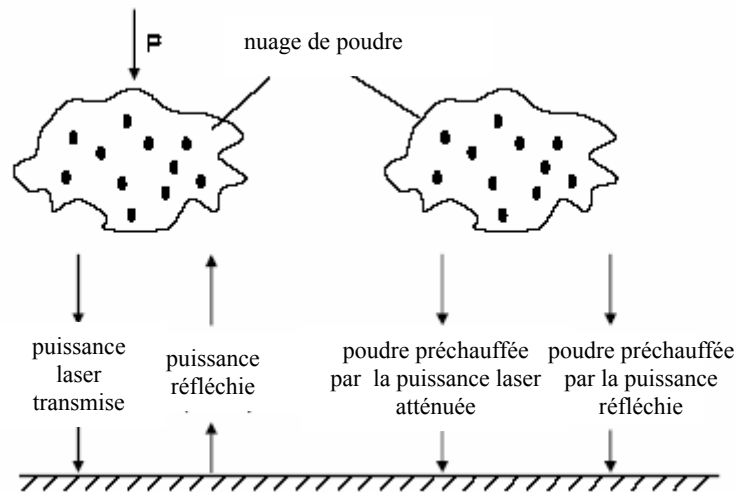


Fig. (II.15) Le transfert thermique dans le substrat est accompli par l'énergie laser et les particules de poudre chauffées. La puissance laser transmise par le nuage de poudre est responsable de la fusion du substrat.

La méthode des éléments finis [96] et la méthode des volumes finis [16] ont été appliquées pour résoudre ces équations couplées dans le cas d'une section transversale plaquée à deux dimensions. La méthode des volumes finis est limitée aux problèmes dans lesquels il est raisonnable de considérer que les propriétés du matériau sont indépendantes de température (ce qui n'est pas le cas pour le logiciel Fluent que nous avons utilisé comme on le verra par la suite). Les propriétés du matériau sont différentes seulement dans l'état solide et l'état liquide. Cette limitation n'existe pas dans la méthode des éléments finis. Cependant, jusqu'à 1998 aucune mise en application de cette dépendance de la température pour le revêtement par laser n'a été reportée.

Lorsqu'une solution numérique du processus est obtenue, il est possible d'atteindre les diagrammes du processus, tel que la figure (II.16). Le schéma à gauche montre la taille de la couche plaquée réalisée en fonction du taux d'entrée pour des couches plaquées de bonne qualité avec une dilution moins de 5 % pour deux densités de puissance différentes (faisceau laser de forme précise où la distribution radiale de l'intensité est aplatie). L'épaisseur de la matière plaquée est presque inversement proportionnelle au taux d'entrée de la poudre. Le jet de masse exigé de poudre peut alors être calculé à partir du calcul des dimensions de la matière plaquée et de l'efficacité de la poudre.

Sur le côté droit de la figure, on montre la dilution en fonction du jet de masse de poudre. La dilution diminue quand la poudre injectée dans le bain fondu est élevée, puisque pour fondre la poudre il faut plus d'énergie. Comme cela peut être observé, la dilution est presque une fonction linéaire du jet de masse de la poudre.

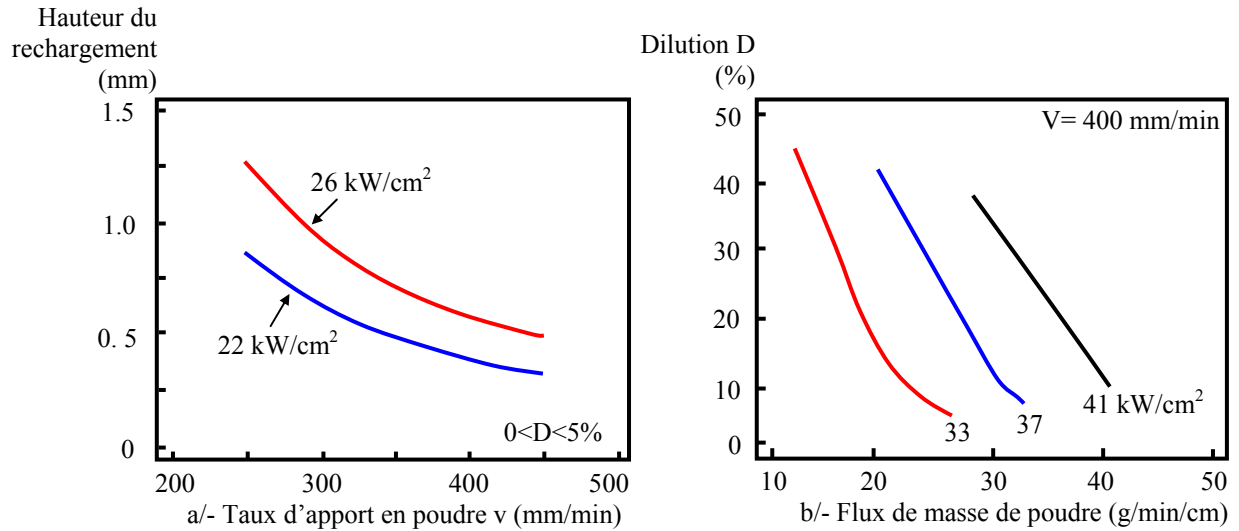


Fig. (II.16) : a/- variation de la hauteur de la recharge en fonction de taux d'injection de poudre.
b/- variation de la dilution en fonction du flux de masse de poudre.

CHAPITRE III

CHAPITRE III

MODELISATION DU RECHARGEMENT PAR LASER

I. INTRODUCTION

Jusqu'à la fin des années 90, peu de modèles traitant du revêtement par laser ont été proposés. En situation bidimensionnelle (2-D), la forme complexe de la zone fondue est calculée par les méthodes de discrétisation telles que les éléments finis ou les volumes finis. Dans certains modèles, l'équilibre énergétique est considéré et la poudre est supposée fondre de façon uniforme dans le bain fondu, alors que dans d'autres modèles le mouvement du fluide dans le liquide est aussi considéré mais la poudre est supposée fondre instantanément lorsqu'elle atteint le bain fondu. Ces modèles sont incomplets, puisqu'ils ne prennent pas en compte les interactions entre les particules de poudre et le faisceau laser, les modifications d'absorption avec la forme du bain fondu, ou les aspects tridimensionnels (3-D) du procédé. De plus, ils sont compliqués d'un point de vue numérique et sont conçus pour des spécialistes.

Dans ce travail, on propose un modèle qui peut être utilisé comme support pour évaluer des conditions opératoires optimales. Ce modèle doit être assez simple pour fournir des résultats immédiats sur microordinateurs, mais également assez réalistes pour prendre en compte les principaux phénomènes se produisant durant le traitement. L'équilibre global d'énergie entre le faisceau laser, les particules de poudre, et le substrat est considéré et la forme du bain fondu est calculée en utilisant un modèle analytique tridimensionnel.

II. MODELISATION

En général, la modélisation du procédé de rechargement par laser est une entreprise difficile, car, comme formulé par Picasso *et al.* [13], elle nécessite la compréhension des trois phénomènes couplés suivants :

- L'atténuation d'une partie du faisceau laser par les particules de poudre, qui sont chauffées, et soit entrent dans la partie fondue de la pièce ou subissent un ricochet.
- L'absorption de la pièce traitée qui varie en fonction de la forme de la zone fondue.
- La forme de la zone fondue qui dépend de la distribution de l'énergie à la surface de la pièce traitée.

II.1. Mise en équations du procédé de rechargement par laser

II.1.1. Modèle mathématique

Un faisceau laser de distribution gaussienne tombe sur la surface d'un échantillon métallique à l'instant $t=0$. Comme le montre la figure (III.1), le faisceau ou la pièce se déplace relativement au cours du temps suivant la direction x à une vitesse v dite vitesse du procédé.

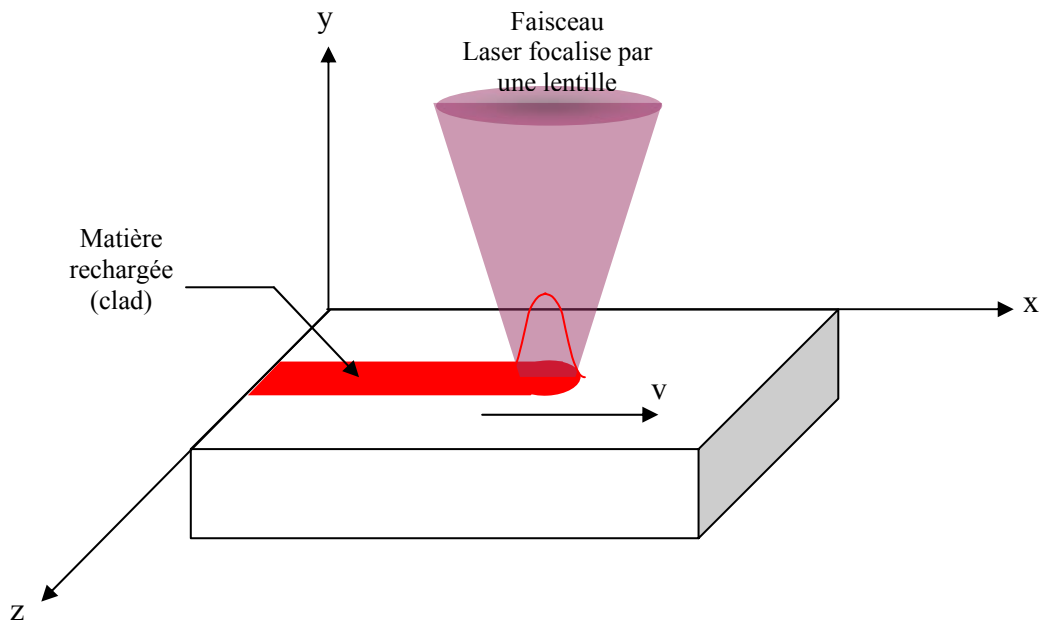


Fig. (III.1) représentation schématique du *principe de la modélisation de procédé du rechargement par laser*.

Par injection de poudre une couche constituée de matière rechargée (clad) se forme sur le substrat. La distribution de la température $T(x,y,z,t)$ est obtenue à partir de l'équation de conduction de la chaleur dans le cas tridimensionnel, telle que :

$$\frac{\partial(\rho C_p T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho C_p v T) - \nabla \cdot (K \nabla (\rho T)) = Q \quad (\text{III.1})$$

Où Q est la puissance générée par unité de volume du substrat, K la conductivité thermique du matériau, C_p la capacité de chaleur spécifique, ρ la densité, t le temps, et v la vitesse du procédé.

II.1.1.1. Conditions aux limites et initiales

On considère que le matériau absorbe l'énergie du faisceau laser tombant sur la surface traitée. La puissance totale absorbée par la pièce est P_w . Par ailleurs, on tient compte de l'effet de la convection thermique et du rayonnement sur la partie traitée et également sur les parties non traitées. Ainsi, les conditions aux limites s'écrivent :

$$-K (\nabla T \cdot \vec{n})_{\Omega} = \begin{cases} P_w - h_c T - \varepsilon \sigma (T - T_a)^4 & \text{si } \Omega \in \Gamma \\ -h_c T - \varepsilon \sigma (T - T_a)^4 & \text{si } \Omega \notin \Gamma \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

Où \vec{n} est le vecteur normal à la surface, h_c le coefficient de transfert de chaleur par convection, ε l'émissivité de la surface, σ la constante de Stefan-Boltzmann ($5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$), Ω les surfaces de la pièce traitée, et Γ la partie de surface irradiée par le faisceau laser à un instant t donné.

Dans notre modélisation, nous avons considéré un coefficient combiné h_c pour prendre en compte le transfert de chaleur par convection et par rayonnement, cela en se basant sur la relation donnée par Yang [101], telle que :

$$h_c = 24.1 \times 10^{-4} \varepsilon T^{1.61} \quad (\text{III.3})$$

Cette forme d'expression des pertes de chaleur par convection et par rayonnement permet outre l'allègement des équations un gain en temps de calcul. Dans le cas du Fer, on prend $\varepsilon = 0.4$.

Les conditions initiales qui doivent être satisfaites sont :

$$T(x, y, z, t=0) = T_a \quad (\text{III.4})$$

Où T_a est la température ambiante prise égale à 300K. Par ailleurs on considère qu'à des instants relativement long par rapport l'échelle du temps du procédé, la distribution de la température dans la pièce traitée redevient égale à la température ambiante, telle que :

$$T(x, y, z, t \rightarrow \infty) = T_a \quad (\text{III.5})$$

II.1.2. Puissance effective absorbée par la pièce traitée

La puissance laser absorbée par la pièce résulte de la compétition entre les trois aspects suivants :

1. avant que le faisceau laser n'atteigne la pièce traitée, il traverse le jet gaz-poudre qui en atténue une partie. En notant P_{at} la puissance atténuée, la quantité de puissance du faisceau laser directement absorbée par la pièce est :

$$\beta_w P_l \left(1 - \frac{P_{at}}{P_l} \right) \quad (\text{III.6})$$

β_w représente le facteur d'absorption de la pièce.

Le terme P_{at}/P_l correspond au rapport de l'aire projetée des particules de poudre dans le faisceau laser à l'aire du faisceau (figure (III.2)).

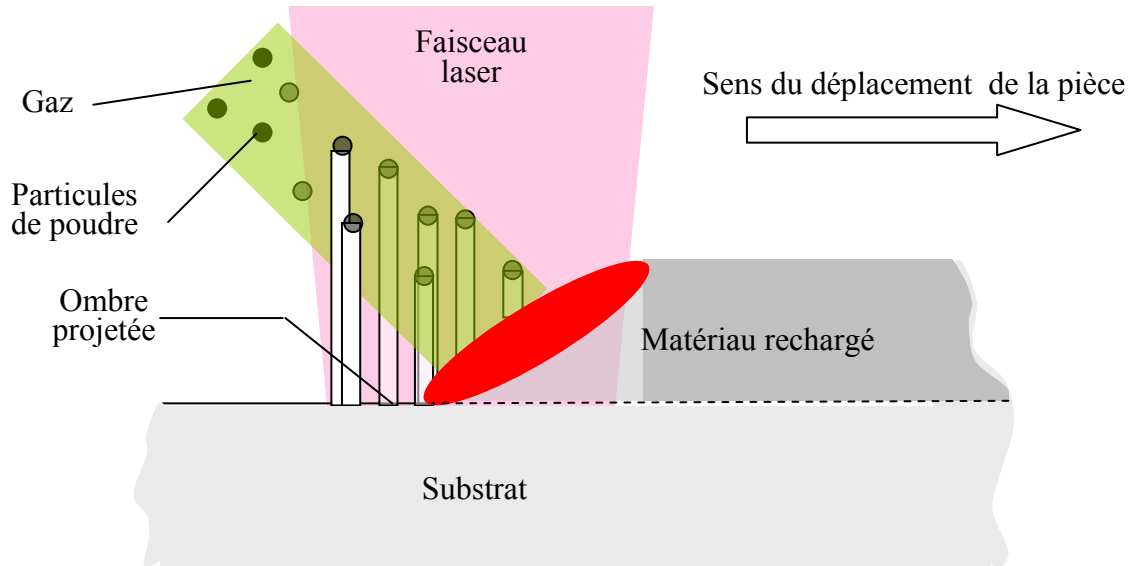


Fig. (III.2) L'atténuation de la puissance laser par les particules de poudre.

Ce rapport peut être déterminé par des considérations géométriques simples, en supposant que le faisceau laser et le flux de poudre sont deux cylindres se croisant et que les ombres produites par une particule de poudre sur une autre ou plusieurs particules de poudre sont négligées. Cette supposition est raisonnable puisque la fraction de volume de poudre dans le

jet de gaz est généralement plus petit que 1% [13]. Le terme d'atténuation P_{at}/P_l est donné par :

$$\frac{P_{at}}{P_l} = \frac{\dot{m}_p}{2 \rho r_l r_p v_p \cos(\theta_{jet})} \quad \text{si } r_{jet} < r_l \quad (III.7)$$

$$\frac{P_{at}}{P_l} = \frac{\dot{m}_p}{2 \rho r_{jet} r_p v_p \cos(\theta_{jet})} \quad \text{si } r_{jet} \geq r_l \quad (III.8)$$

\dot{m}_p représente le flux de masse de la poudre injectée, v_p vitesse de la pièce, r_p rayon moyen de chaque particule du jet de poudre, r_{jet} rayon du jet de poudre, r_l rayon du faisceau laser, θ_{jet} angle moyen d'application du jet de poudre

- 2- Les particules de poudre absorbent une partie de la puissance atténuée et la restitue à la pièce traitée seulement si elle heurte et pénètre le bain fondu. Si on représente le facteur d'absorption du jet gaz-poudre par β_p et par η_p l'efficacité de la poudre, la part de puissance atténuée restituée à la pièce traitée est :

$$\eta_p \beta_p P_l \frac{P_{at}}{P_l} \quad (III.9)$$

- 3- La puissance réfléchiée par la pièce traitée est importante, comme dans le cas de l'utilisation de laser de type CO₂, et elle encore atténuée par les particules de poudre incidentes, qui vont absorber une partie de cette puissance. La part de puissance réfléchiée qui est transférée par les particules de poudre à la pièce est alors :

$$\eta_p \beta_p (1 - \beta_w) P_l \left(1 - \frac{P_{at}}{P_l} \right) \frac{P_{at}}{P_l} \quad (III.10)$$

Ainsi, la quantité totale P_w de puissance absorbée par la pièce traitée par rapport à la puissance délivrée par le laser utilisé est :

$$P_w = P_l \left\{ \beta_w \left(1 - \frac{P_{at}}{P_l} \right) + \eta_p \beta_p \frac{P_{at}}{P_l} \left[1 + (1 - \beta_w) \left(1 - \frac{P_{at}}{P_l} \right) \right] \right\} \quad (III.11)$$

Toyerskani *et al.* [93] supposent que l'absorption d'un faisceau laser circulaire par un plan incliné plat dépend linéairement de l'angle d'inclinaison et de $\beta_w(0)$ qui est l'absorption de la pièce sur une surface plate. En fonction de l'angle d'inclinaison θ , montré sur la figure (III.3), l'absorption $\beta_w(\theta)$ est calculée par:

$$\beta_w(\theta) = \beta_w(0) (1 + \alpha_w \theta) \quad (\text{III.12})$$

α_w est le coefficient de proportionnalité, il est mesuré expérimentalement pour chaque matériau.

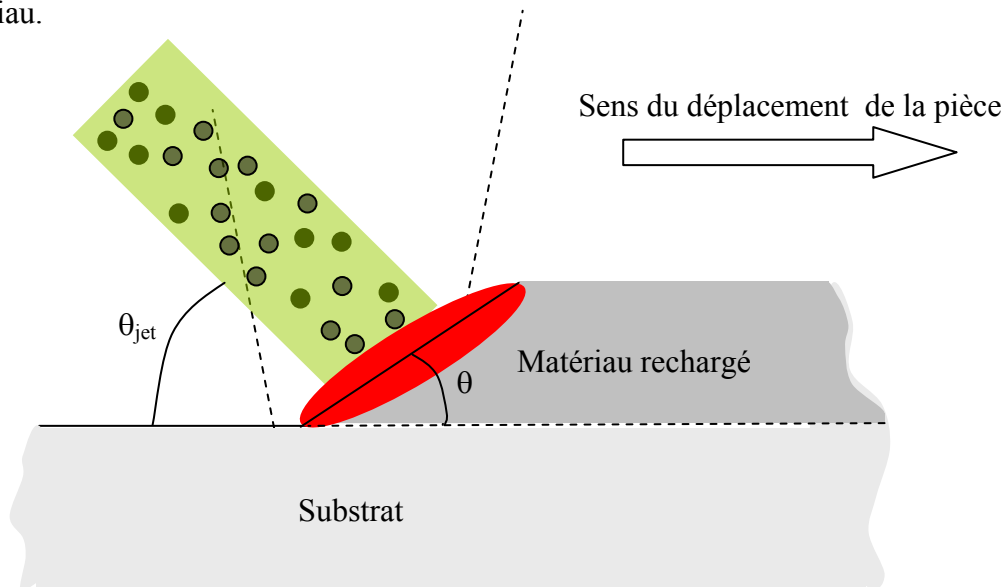


Fig. (III.3) Les caractéristiques géométriques proposées dans le modèle de la modélisation.

II.1.3. Effet de la convection thermocapillaire de Marangoni

Durant le procédé de rechargement par laser, comme c'est le cas également en soudage par laser, la chaleur est évacuée par les deux principaux processus suivants:

- La conduction thermique
- L'écoulement thermocapillaire de Marangoni

L'effet du mouvement du bain fondu dû aux phénomènes thermocapillaire peut être pris en compte en utilisant une conductivité thermique modifiée pour calculer les frontières du bain fondu. En général et tel que suggéré dans la littérature [94 voir C.Lampa], conformément aux travaux expérimentaux, la présence d'un écoulement thermocapillaire induit une conductivité thermique au moins égale à deux fois la valeur de la conductivité thermique d'un bain fondu stationnaire du matériau. Cet accroissement peut être exprimé par :

$$K^*(T) = a K(T_f) \quad \text{si } T > T_f \quad (\text{III.13})$$

Où $a = 2.5$ est le facteur de correction et K^* la conductivité thermique modifiée.

II.1. Géométrie du problème et résolution des équations

II.2.1. Définition du champ de calcul

On considère dans notre modélisation, et essentiellement pour la partie basée sur le maillage dynamique (que l'on définira au point (IV)), un échantillon parallélépipédique (représenté sur la figure (III.4)). Le matériau étudié est en Fer, et les dimensions de la pièce sont : 50 mm x 10 mm x 5 mm.

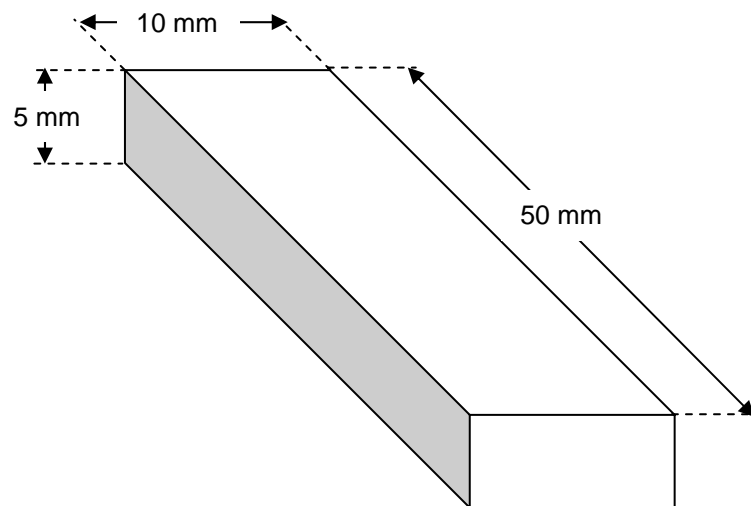


Fig. (III.4) La géométrie proposée dans la modélisation.

Les propriétés physiques du fer solide sont données sur le tableau (III-1)

Propriété	Valeur	en MKSA
Densité	7800	kg/m ³
Capacité calorifique	628	J/kg/K
Diffusivité thermique	$1.4 \cdot 10^{-5}$	m ² /s
Conductivité thermique	68.6	W/m/K
Température de fusion	1808	K
Température d'ébullition	3134	K

Tableau (III.1) Propriétés physiques du Fer à l'état solide

II.2.1.1. Effet de la température sur les propriétés physiques du matériau

Les propriétés physiques du matériau telles que la densité, la capacité calorifique et la conductivité thermique peuvent varier en fonction de la température et atteindre des valeurs importantes relativement à celles que l'on pourrait considérer si on néglige l'effet de la température. Dans notre modélisation, cet aspect est pris en compte.

On déduit les expressions de la densité, la capacité calorifique et la conductivité thermique en fonction de la température en s'inspirant des résultats reportés par Duley [95] qui sont pour le fer montrés sur le tableau (III.2) :

T (K)	K (W/m/K)	C _p (J/kg/K)	κ (m ² /s)
273	83.5	420	2.8 10 ⁻⁵
500	61.5	540	1.54 10 ⁻⁵
1000	32.5	980	
2000	42.5		

Tableau (III.2) valeurs des propriétés physiques du fer en fonction de la température.

κ est la diffusivité thermique du matériau. On déduit la densité à partir de la relation :

$$K = \frac{\kappa}{\rho C_p} \quad (\text{III.14})$$

La densité est déduite connaissant la conductivité thermique, la capacité calorifique et la diffusivité thermique pour différentes températures. On utilise ainsi dans notre modèle une densité évoluant avec la température donnée par:

$$\rho (T) = -0.4522 T + 7755.7 \quad \text{en } [\text{kg/m}^3] \quad (\text{III.15})$$

Par contre l'obtention d'une courbe d'évolution de la conductivité thermique est obtenue directement à partir du tableau (III.2) telle que :

$$K (T) = -0.0218 T + 76.307 \quad \text{en } [\text{W/m/K}] \quad (\text{III.16})$$

Lorsque la température devient supérieure à la température de fusion du matériau, les effets d'écoulement thermocapillaire de Marangoni se font ressentir et l'équation (III.16) est alors remplacée dans la procédure de calcul par l'équation (III.13).

Pour prendre en compte les effets de la chaleur latente sur la distribution de la température, on fait subir à la capacité calorifique un accroissement tel que donné par Toyerskani et al. [93]:

$$C_p^*(T) = \frac{1}{T_f - T_a} \left[L_f + \int_{T_a}^{T_f} C_p dT \right] \quad (\text{III.17})$$

Où L_f est la chaleur latente de fusion du matériau (pour le Fer, $L_f = 2.76 \cdot 10^5$ J/kg), et C_p^* la capacité calorifique modifiée. En développant l'expression (III.17) on obtient l'approximation de la capacité calorifique en fonction de la température, utilisée dans notre modélisation, et l'équation peut être alors donnée sous forme d'un polynôme du second degré tel que:

$$C_p^* = 2.6137 \cdot 10^{-4} T^2 + 0.12034621 T + 124 \quad [\text{J/kg/K}] \quad (\text{III.18})$$

II.2.2. Discrétisation des équations par la méthode des volumes finis

Le comportement d'un système discret est représenté par un système d'équations algébriques. Celui d'un système continu est le plus souvent représenté par un système d'équations aux dérivées partielles associé à des conditions aux limites en espace et en temps. Les équations algébriques des systèmes discrets peuvent être résolues par les méthodes numériques en fonction du systèmes d'équations à résoudre (élimination de Gauss, substitution, Newton-Raphson,...). Par contre les équations des systèmes continus ne peuvent pas, en général, être résolues directement. Il est nécessaire de discrétiser ces équations, c'est-à-dire de les remplacer par des équations algébriques. Les méthodes relativement récentes des éléments finis et des volumes finis sont parmi les méthodes puissantes qui permettent d'effectuer cette discrétisation.

Dans le cas de notre modélisation, c'est la méthode des volumes finis qui est utilisée à travers le logiciel de dynamique des fluides FLUENT [96].

La méthode des volumes de contrôle ou des volumes finis développée par Spalding et Patankar [97,98] consiste en des fonctions de pondération égales à l'unité dans des volumes

finis donnés et nulles partout ailleurs. Sa grande simplicité de mise en oeuvre a fait qu'elle a connu un essor fulgurant depuis les années 1970-1980. Elle est à l'origine de la majorité des codes de calculs en géométrie cartésienne (Fluent,Phoenics...).

Sur un domaine bidimensionnel discrétisé de façon cartésienne, les volumes finis de surface $\Delta x \Delta y$ ont l'allure de la figure (III.5). Le point P a 4 voisins suivant les 4 points cardinaux: E,W,N,S.

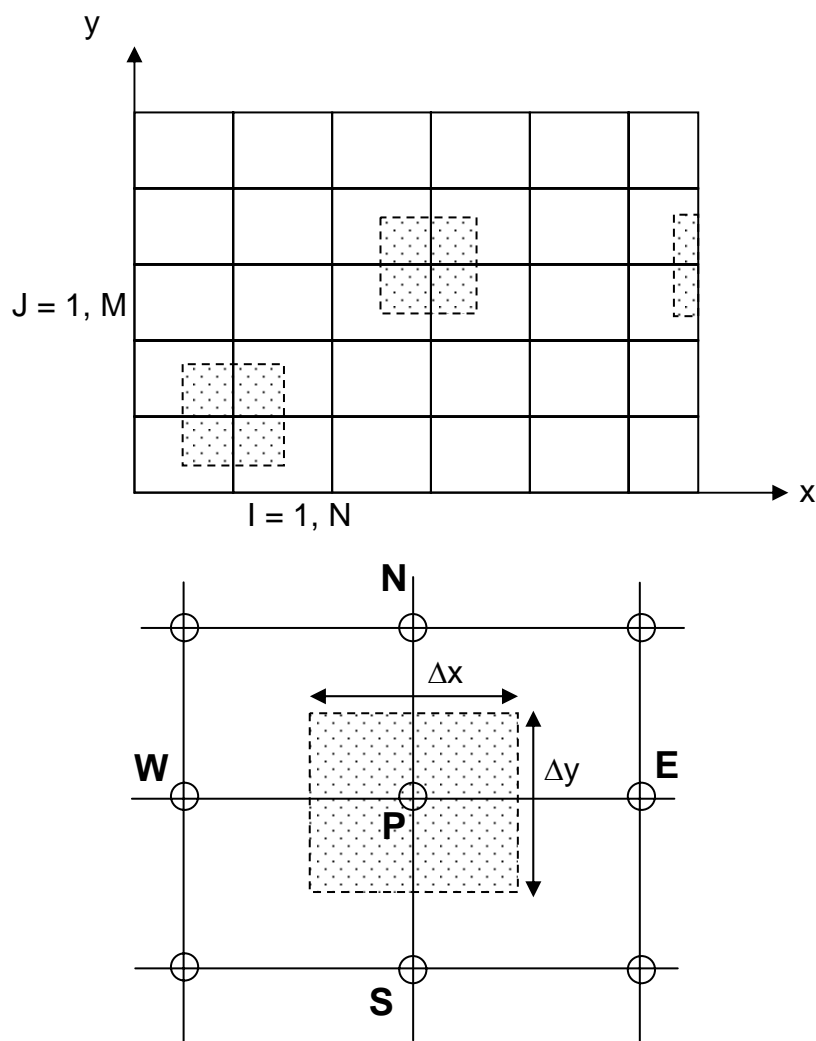


Fig. (III.5) *Discrétisation bidimensionnelle montrant les volumes finis*

Les flux sur les faces du volume de contrôle représentent la convection et la diffusion, le stockage/génération dans le volume de contrôle représentent les états non-stationnaires et les termes sources.

On obtient une équation du type :

$$a_P \phi_P = a_E \phi_E + a_W \phi_W + a_N \phi_N + a_S \phi_S + b \quad (\text{III.19})$$

FLUENT utilise une technique basée sur le volume de contrôle pour convertir les équations gouvernantes en équations algébriques pouvant être résolues numériquement. Cette technique consiste en l'intégration des équations gouvernantes avec chaque volume de contrôle, ce qui mène à la discrétisation des équations qui conserve chaque quantité sur la base d'un volume de contrôle. La discrétisation des équations gouvernantes peut être illustrée plus facilement en considérant l'équation de conservation du transport à l'état stationnaire d'une quantité scalaire ϕ . Ceci est démontré dans l'équation suivante écrite en formulation intégrale pour un volume de contrôle arbitraire V telle que :

$$\oint \rho \phi \vec{v} \cdot d\vec{A} = \oint \Gamma_\phi \nabla \phi \cdot d\vec{A} + \int_V S_\phi dV \quad (\text{III.20})$$

où ρ est la densité, \vec{v} le vecteur vitesse ($= u\vec{i} + v\vec{j}$ en 2D), \vec{A} le vecteur surface, Γ_ϕ le coefficient de diffusion pour ϕ , $\nabla \phi$ le gradient de ϕ ($= (\partial\phi/\partial x)\vec{i} + (\partial\phi/\partial y)\vec{j}$ en 2D), et S_ϕ la source de ϕ par unité de volume.

L'équation (III.20) est appliquée pour chaque volume de contrôle, ou cellule, dans le domaine de calcul. La cellule triangulaire bi-dimensionnelle, montrée sur la figure (III.6) est un exemple d'un tel volume de contrôle. La discrétisation de l'équation (III.20) sur une cellule quelconque donne :

$$\sum_f^{N_{faces}} \rho_f \vec{v}_f \phi_f \cdot \vec{A}_f = \sum_f^{N_{faces}} \Gamma_\phi (\nabla \phi)_n \cdot \vec{A}_f + S_\phi V \quad (\text{III.21})$$

où N_{faces} est le nombre de faces (côtés) entourant une cellule, ϕ_f la valeur de ϕ « convectée » à travers la face f , $\rho_f \vec{v}_f \cdot \vec{A}_f$ le flux de masse à travers la face, \vec{A}_f la surface de la face f : ($|\vec{A}| = |A_x\vec{i} + A_y\vec{j}|$ en 2D), $(\nabla \phi)_n$ la magnitude de $\nabla \phi$ normale à la face f , V le volume de la cellule.

Les équations résolues par FLUENT prennent la même forme générale que celle donnée ci-dessus et s'applique aux cas multi-dimensionnels, les maillages non-structurés sont composés de polyèdres arbitraires.

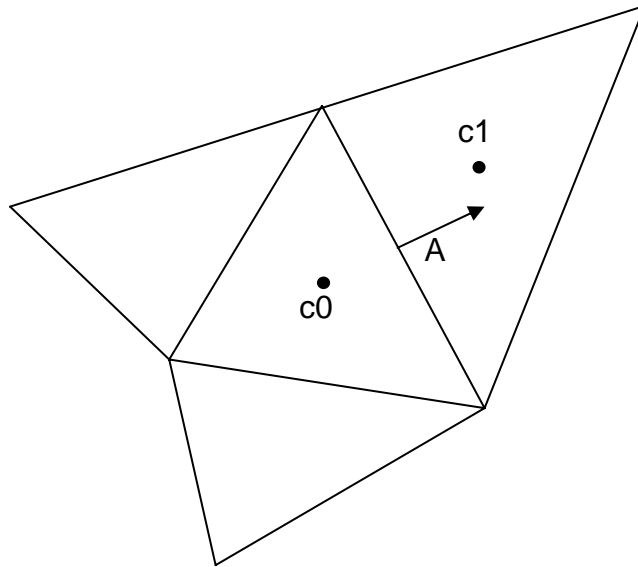


Fig. (III.6) *Volume de contrôle utilisé pour illustrer la discrétisation d'une équation de transport scalaire*

Par défaut, FLUENT mémorise des valeurs discrètes du scalaire ϕ au centre de la cellule (c_0 et c_1 sur la figure (III.6)). Cependant, les valeurs de faces ϕ_f sont nécessaires pour le terme de convection dans l'équation (III.21) et doivent être interpolées à partir des valeurs au centre de la cellule.

La figure (III.7) montre un maillage structuré en 3D qui a été généré pour représenter l'échantillon parallélépipédique traité. La mise en forme du problème, le maillage du domaine et la réservation des conditions aux limites sont réalisés par le pré-processeur Gambit. Ce dernier fournit le fichier *.msh utilisé par le processeur Fluent pour résoudre les équations par la méthode des volumes finis. Un post-processeur permet par la suite l'exploitation des résultats.

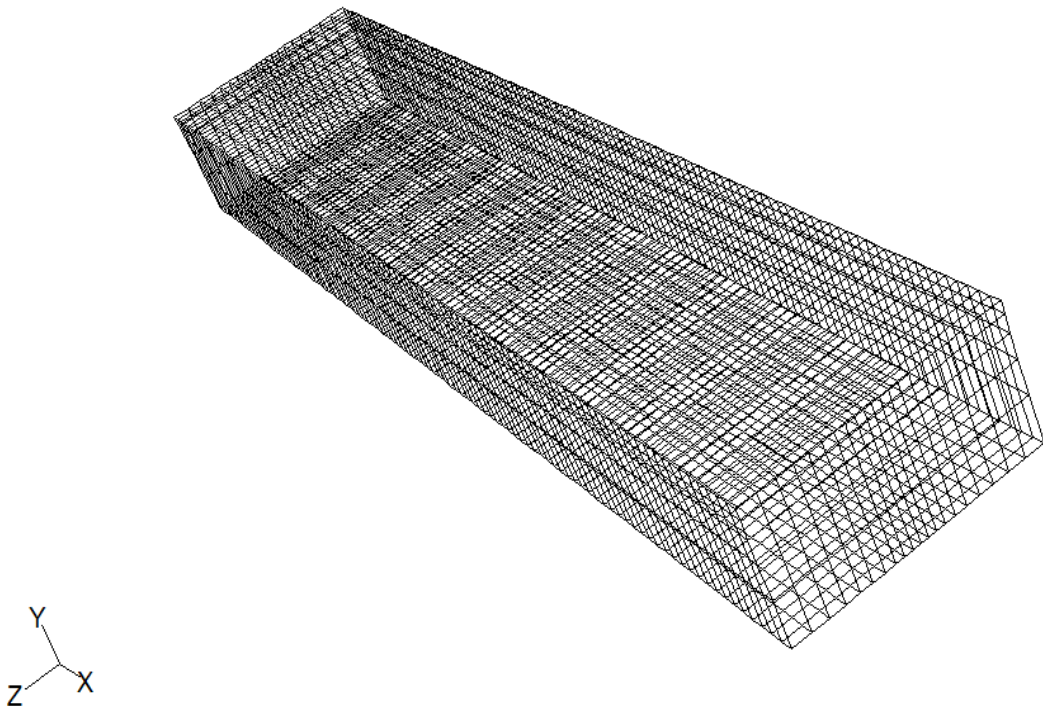


Fig. (III.7) le maillage structuré en 3-D dans le pré-processeur Gambit.

II.2.3. Utilisation des UDFs (User Defined Function)

Une fonction définie par l'utilisateur ou user-defined function, ou UDF, est une fonction qui est programmée par l'utilisateur et qui peut être chargée interactivement dans la procédure de calcul lors de la résolution numérique des équations du problème par le solveur Fluent. Cela permet d'améliorer les caractéristiques standard du code de calcul. Les UDFs sont écrites en langage de programmation C. Les valeurs qui sont transmises au solveur par l'UDF ou envoyées par le solveur à l'UDF doivent être exprimées dans le système d'unité SI.

Ainsi, les UDFs permettent de personnaliser Fluent pour l'adapter à un besoin particulier exigé dans la modélisation. Elles peuvent être utilisées dans diverses applications telles que :

- La personnalisation de conditions aux limites, la définition des propriétés physiques des matériaux, les taux de réaction des surfaces et volumes, les termes source dans l'équation de transport, les fonctions de diffusivité, ...etc.
- L'ajustement de valeurs calculées à chaque itération.

- L'initialisation d'une solution.
- Exécution asynchrone d'UDFs (sur demande)
- Amélioration des modèles de Fluent existant (modèle multiphasique, modèle de radiation...).

II.3. Implémentation d'une forme gaussienne du faisceau laser

La modélisation du rechargement par laser dans le cas de notre étude considère un faisceau laser dont la distribution spatiale est une gaussienne.

Dans la version standard de Fluent, l'apport d'énergie est introduit sous forme d'une condition aux limites représentée par un flux d'énergie en (W/cm^2) de valeur constante.

L'application d'une distribution gaussienne de l'énergie à la surface de la pièce traitée nécessite alors l'élaboration d'une UDF.

En considérant le déplacement du faisceau laser sur la pièce traitée, tel que représenté sur la figure (III.8), on distingue à la surface de l'échantillon, les régions soumises au rayonnement laser et celles qui ne le sont pas. La position du centre d'une face (dans le sens volume fini) est représentée par le rayon r . Celui-ci est donné en fonction de la position du faisceau sur l'axe de déplacement et qui est représentée par z_1 , et de la longueur $L = vt$ parcourue par le faisceau laser à la vitesse de déplacement v , tel que :

$$r^2 = (L-x[0])^2 + (z_1 - x[1])^2 \quad (III.22)$$

On peut alors situer la position de la face par rapport à la tache focale à partir de la séquence de test suivante :

$$\begin{array}{ll} \text{if } (r \leq r_1) & \text{then } I = A I_0 \exp(-2r^2/r_1^2) \\ & \text{else } I = 0 \end{array}$$

où r_1 est le rayon de la tache laser sur la surface de l'échantillon, I (W/cm^2) l'intensité laser ou l'irradiance, et A le coefficient d'absorption du matériau.

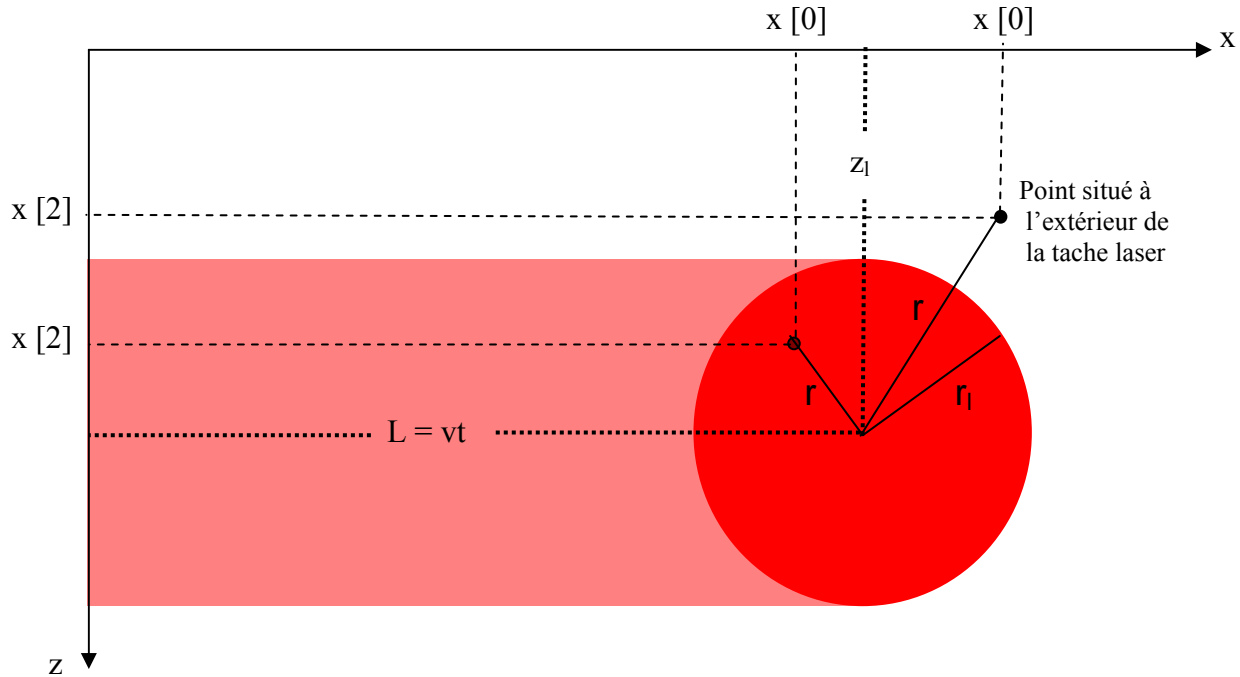


Fig. (III.8) Implémentation d'une forme gaussienne du faisceau laser.

Comme il est montré sur le programme donné par la suite, l'UDF élaborée pour représenter l'énergie laser déposée lors du déplacement est construite autour de la macro DEFINE-PROFILE implémentée dans Fluent. Cette macro a pour objectif d'injecter au cours du calcul, une condition aux limites variant dans l'espace et le temps. Dans l'UDF écrite, on détermine les faces se situant à l'intérieur de la tache focale à une position et un instant donnés, à travers les coordonnées $x[0]$ et $x[2]$ du centroïde ou centre de la face (du volume de contrôle). L'on précisera aussi que $x[0]$ représente la direction x, $x[1]$ la direction y, et $x[2]$ la direction z. Les données insérées dans l'UDF concernent la puissance du faisceau laser, la longueur et la largeur de l'échantillon, le rayon de la tache focale, la vitesse de déplacement de la source laser, le coefficient d'absorption du matériau. Dans le cas du Fer, et en considérant un faisceau issu d'un laser Nd-YAG, le coefficient d'absorption est pris égal à 0.6.

```

/*****
/*
/* DETERMINATION OF THE FACES BELONGING TO THE LASER BEAM SPOT BY
/* COMPARING CELL'S RADIUS WITH THE BEAM RADIUS,AND DEDUCTION OF
/* THE RELATED LASER INTENSITY IN THE CASE OF A GAUSSIAN SHAPE.
/*
/* BY E.H. AMARA - CDTA/DMIL/TML - FEBRUARY 2005
/*
*****/

```

```
#include "udf.h"
```

```

#define PLASER 350      /* Laser beam power W */
#define L 0.05         /* Sample length m */
#define W 0.01         /* Sample width m */
#define rl 0.001      /* Laser spot radius m */
#define v 2.0e-03     /* Source velocity m/s */
#define abs 0.5       /* Absorption coefficient */

```

```
DEFINE_PROFILE(heat_flux1, thread, position)
```

```

{
  real x[ND_ND];
  face_t f;
  real l, r, zl, AI0;
  real t = RP_Get_Real("flow-time");

  AI0 = 2.*PLASER/3.1416/(rl*rl);

  l = v * t;

  begin_f_loop(f, thread)
  {
    F_CENTROID(x, f, thread);
    zl = W/2.;
    r = sqrt (pow((l-x[0]),2) + pow((zl-x[2]),2));

    if(r < rl)
    {
      F_PROFILE(f, thread, position) = abs*AI0*exp(-2*pow(r,2)/pow(rl,2));
    }

    else
    {
      F_PROFILE(f, thread, position) = 0.0;
    }
  }
  end_f_loop(f, thread)
}

```

III. MODELISATION PAR LA METHODE VOLUME OF FLUID (VOF)

III.1. Définitions

La modélisation des écoulements multiphasiques à phases séparées porte principalement sur le développement de méthodes numériques pour le suivi d'interface entre un liquide et un gaz (par exemple : métal liquide et air ambiant), avec prise en compte de tension de surface et des transferts de masse et de chaleur entre les phases.

Deux grandes familles de méthodes permettent de simuler des écoulements en présence d'interfaces :

- Les méthodes dites de suivi d'interface utilisent des marqueurs qui se déplacent avec le fluide, et à chaque pas de temps l'interface peut être reconstruite à partir de la position des marqueurs.
- Les méthodes dites de capture d'interface ont recours à un marquage en volume. Elles s'adaptent à des topologies compliquées.

La méthode volume de fluides ou VOF est utilisée comme outil de simulation d'écoulements multiphasiques complexes où la topologie des interfaces évolue dans le temps. Elle a été développée à Los-Alamos par Hirt et Nichols, puis améliorée par Zaleski. C'est une méthode basée sur la construction d'interfaces par morceaux. Les équations du modèle d'écoulement sont obtenues par filtrage spatial et sommation des équations de Navier-Stokes locales et instantanées de chaque phase.

Dans notre cas on applique la méthode VOF en tenant compte de l'interaction poudre-bain de fusion. On tient compte également dans notre modélisation de la solidification qui est un mécanisme très important dans le revêtement par laser et les autres méthodes de traitement de surface ou traitement profond comme la soudure par laser.

III.2. Modèle de la gouttelette

On considère une gouttelette de poudre fusionnée (la poudre est de même nature que le matériau constituant le substrat), qui soumise à la gravitation, tombe dans le bain fondu et s'y solidifie formant ainsi une couche de matériau ou clad. Ce modèle puissant et simple permet de prédire de façon précise la hauteur de la couche déposée qui adhère au matériau de

base après la re-solidification. Cependant, on ne tient pas compte dans cette partie de la vitesse de déplacement du faisceau laser.

En premier lieu, le substrat solide chauffé par le faisceau laser subit la fusion d'une zone, dont on déduit la forme approximative à un instant donné.

Dans le modèle proposé, la méthode de VOF est couplée avec une procédure de Fusion/Solidification.

Les hypothèses du modèle sont :

- 1- on suppose deux régions 'deux domaines en langage numérique', telles que montrées sur la figure (III.9). La première région représente l'air et la seconde le substrat solide en Aluminium, ce qui explique le modèle VOF utilisé.
- 2- On suppose qu'une partie de la région du substrat est à une température proche de la température de fusion, et que sa forme est également proche de celle du bain de fusion à un instant donné. Celui-ci subira une re-solidification rapide, ce qui explique l'utilisation d'un modèle de fusion/solidification.
- 3- Une gouttelette du matériau (de même nature que le matériau de base) est positionnée à une hauteur donnée, elle est à une température proche de la température de fusion du matériau de base
- 4- La gouttelette est soumise à la force d'attraction gravitationnelle, d'où la prise en compte de la gravité dans notre modèle.
- 5- On considère un écoulement laminaire pour les deux fluides.
- 6- On utilise un schéma numérique qui résout les équations séparément 'segregated model' dans le cas instationnaire.
- 7- On néglige la vitesse de déplacement du jet de poudre.
- 8- Les paramètres utilisés dans le modèle sont : le rayon de la gouttelette r , les dimensions du bain de fusion sont l_x la longueur, et l_y la profondeur.

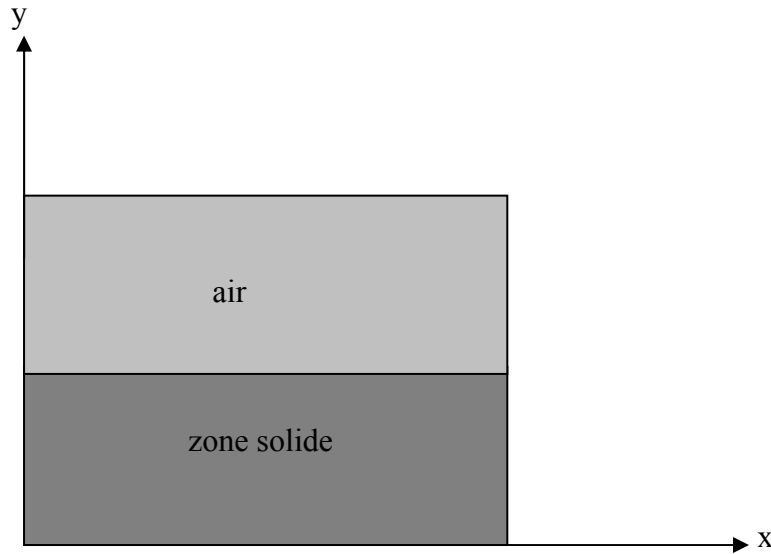


Fig. (III.9) Géométrie proposée dans le model VOF.

IV. MODELISATION PAR LA METHODE DE DEFORMATION DU MAILLAGE

- **Définition du maillage dynamique et l'implémentation dans le cas du parallépipède**
ex: Elaboration d'une UDF

Le modèle de maillage dynamique dans FLUENT peut être utilisé pour modéliser des écoulements où la forme du domaine varie au cours du temps à cause du mouvement des frontières du domaine. La mise à jour du volume est faite automatiquement à chaque étape de temps sur de nouvelles positions des limites. Pour mettre en oeuvre le modèle de maillage dynamique, le maillage initial doit être connu ainsi qu'une description du mouvement d'une zone quelconque dans le modèle. La description du mouvement peut être donnée connaissant le profil des frontières ou par l'élaboration d'une UDF.

Ainsi le mouvement peut être décrit que ce soit sur les zones constituant les faces ou les cellules. Si le modèle contient des régions fixes et d'autres en déplacement, on a besoin d'identifier ces régions en les regroupant dans leurs zones respectives de faces et de cellules dans le maillage généré au départ. De plus, les régions qui se déforment à cause du mouvement dans les régions qui leur sont adjacentes, doivent être également groupées en zones séparées dans le maillage de départ.

Dans le cas de l'application de la technique du maillage dynamique à notre modélisation, on montre sur la figure (III.10) l'évolution à un instant donné du maillage donnée sur la figure

(III.7). La déformation du maillage est fonction de paramètres liés au faisceau laser, au matériau, et à la poudre injectée.

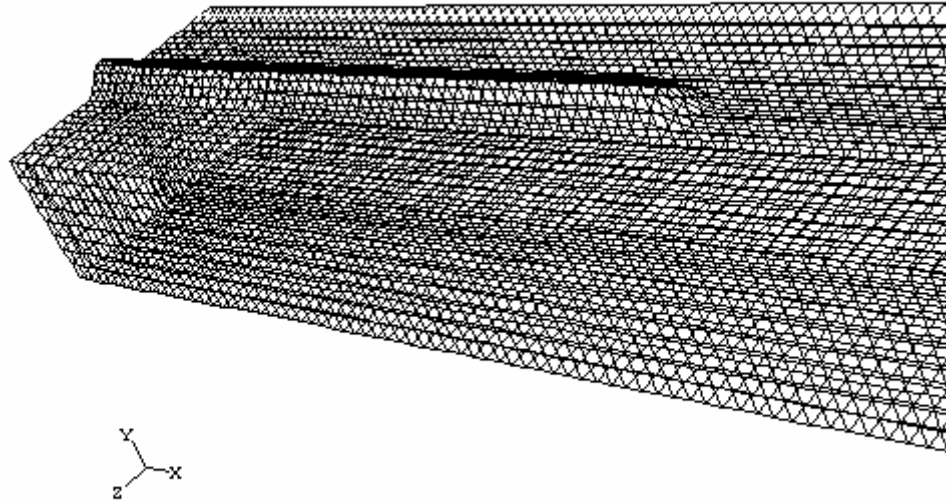


Fig. (III.10) la déformation du maillage à un instant donné.

L'UDF élaborée est une procédure constituée de celle utilisé dans le cas du calcul du déplacement d'un faisceau gaussien sur le parallélépipède avec la prise en compte des pertes par convection et rayonnement ainsi que la dépendance des propriétés du matériau en fonction de la température. On rappelle que l'UDF en question est constituée des macros `DEFINE_PROFILE` et `DEFINE_PROPERTY`.

La partie qui tient compte de la déformation du maillage est insérée dans la macro définie dans FLUENT par `DEFINE_GRID_MOTION`.

CHAPITRE IV

CHAPITRE IV

RESULTATS ET DISCUSSIONS

I. CHAMP DE TEMPERATURE OBTENU EN CONSIDERANT UN PROFIL GAUSSIEN DU FAISCEAU LASER

Dans cette partie VOF de la modélisation, on considère un substrat en Aluminium dont les propriétés physiques considérées :

$$\rho = 2385 \text{ kg/m}^3$$

$$C_p = 1067 \text{ J/kg K}$$

$$K = 225 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

$$L_f = 395000 \text{ J/kg}$$

Le matériau étudié étant un métal pur, les températures de fusion et de solidification sont égales, c'est-à-dire que : $T_{\text{solidus}} = T_{\text{liquidus}} = 933 \text{ K}$.

Pour déplacer la source de chaleur qui dans notre cas est un faisceau laser une UDF spécifique pour ce type de problème est écrite. Dans le cas bidimensionnel 2-D ou tridimensionnel 3-D, les paramètres donnés ci-dessus sont considérés. Dans le cas 3-D, nous avons considéré un faisceau à forme spatiale gaussienne. En prenant les propriétés du faisceau laser telles que : le rayon du faisceau $r = 1.25 \text{ mm}$, le flux laser $I = 7 \cdot 10^7 \text{ W/m}^2$, et la vitesse de déplacement de la source $v_d = 3 \text{ mm/s}$. On donne à la suite quelques résultats de l'étude 2-D de la distribution de la température dans la pièce traitée.

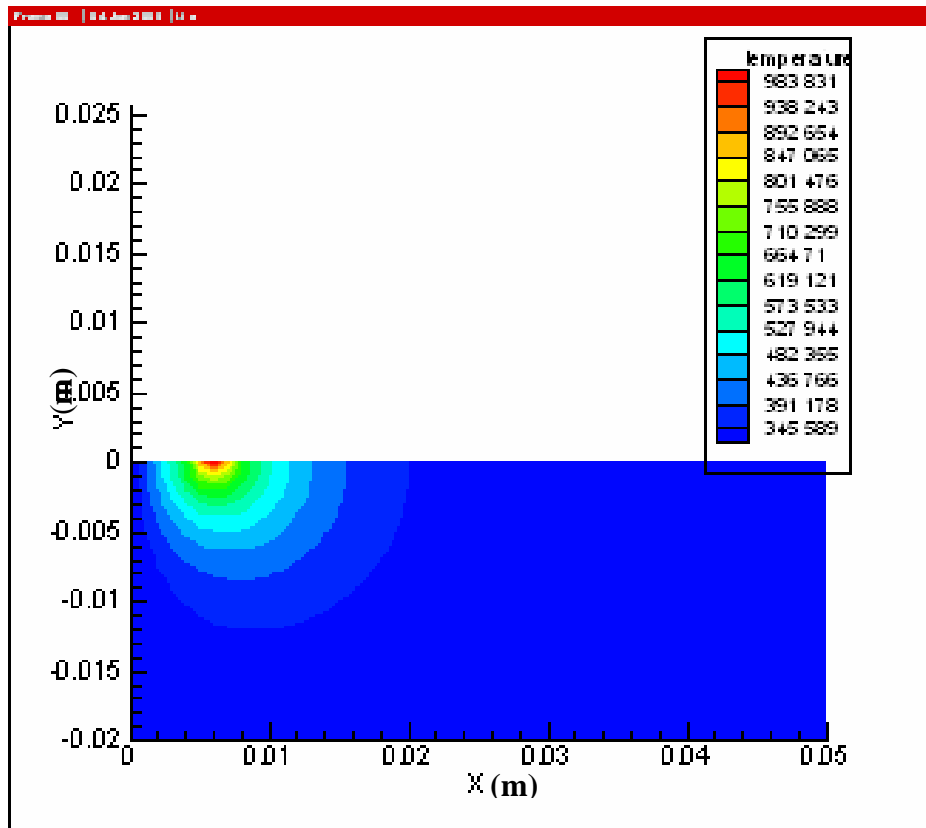


Fig. (IV.1) contour de la température à un instant t_1 .

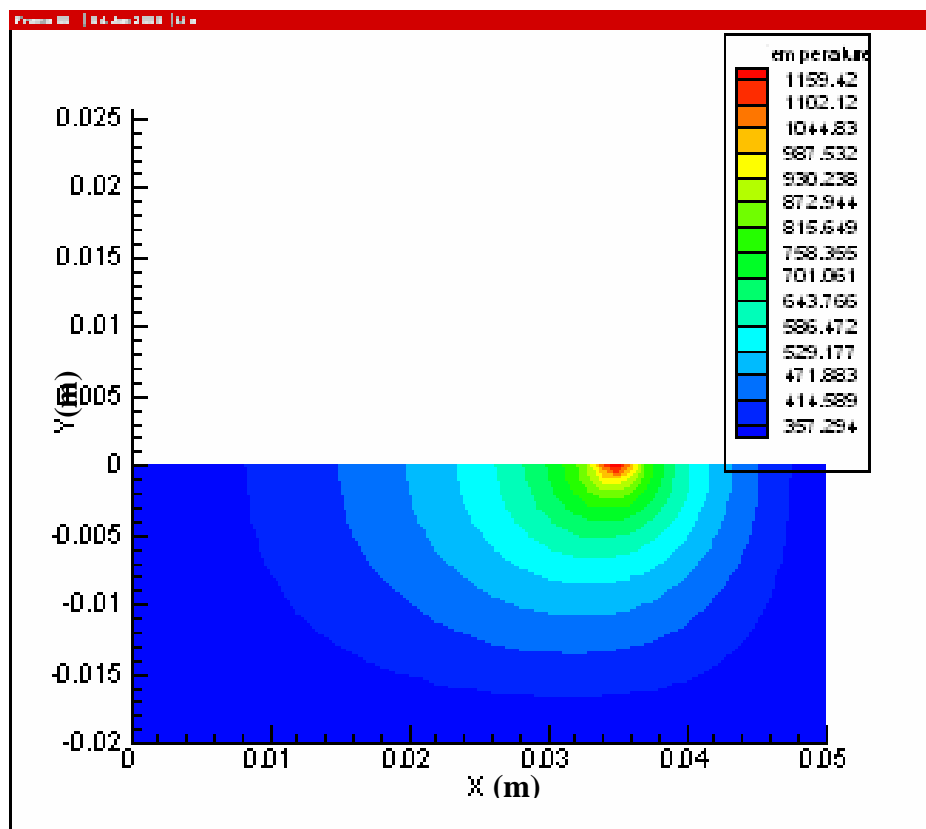


Fig. (IV.2) contour de la température à un instant $t_2 > t_1$.

Les figures (IV.1) et (IV.2) donnent le contour de la température à un autre instant. Elles représentent l'évolution du bain de fusion en fonction du temps, lors du déplacement de la source laser suivant l'axe des x pour une vitesse constante et un flux laser constant.

Les figures (IV.3) et (IV.4) représentent l'évolution de température pour différents plans z le long de l'axe des x .

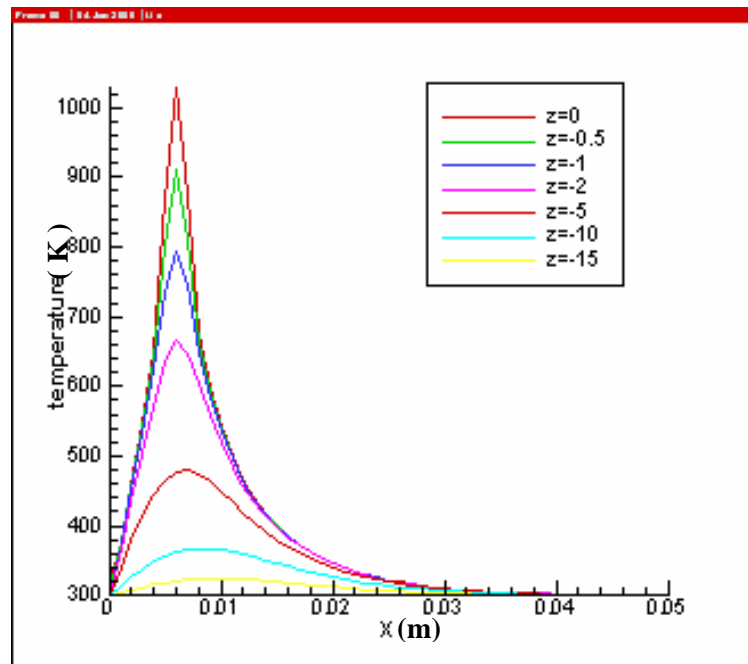


Fig. (IV.3) contour de la température en fonction de la position de la source à un instant donné t_1

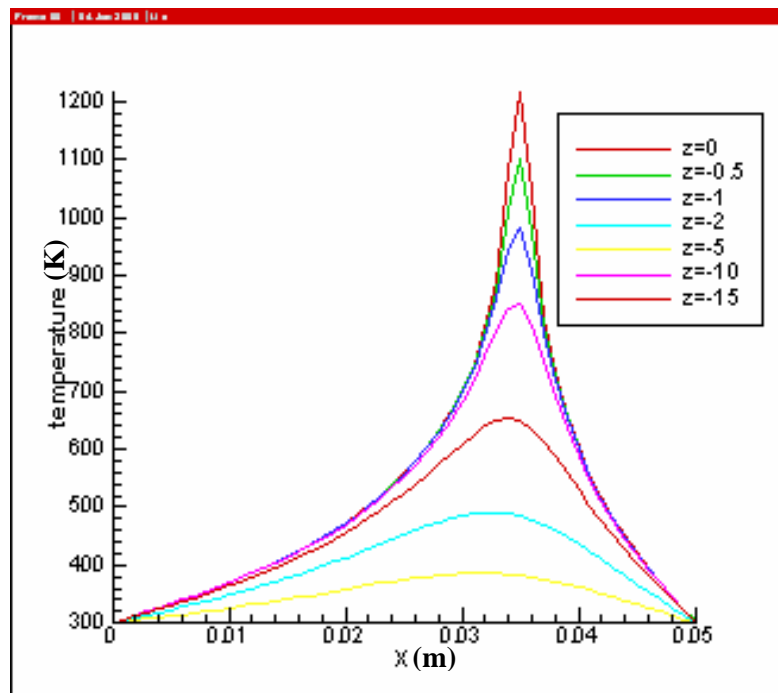


Fig. (IV.4): contour de la température en fonction de la position de la source à un instant donné $t_2 > t_1$.

Enfin concernant cette première série de résultats sur la distribution de la température sur une pièce soumise à une source laser telle que décrite précédemment, on donne sur les figures (IV.5) et (IV.6) la croissance de la température selon z en des plans $x = 6.05$ mm, et $x = 34.85$ mm respectivement.

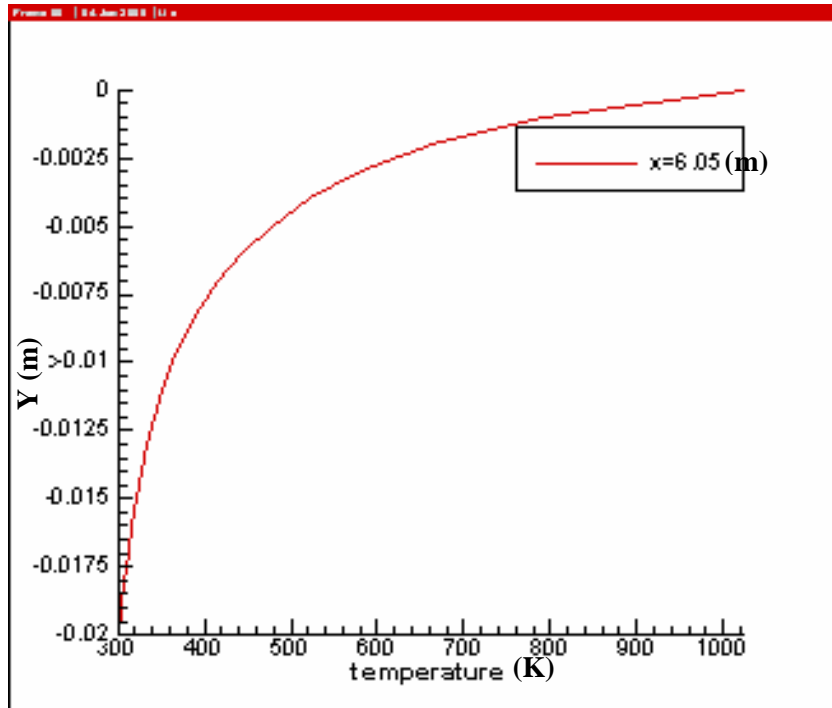


Fig. (IV.5) Température en fonction de la position z à un instant donné t_1 sur un plan $x = 6.05$ mm.

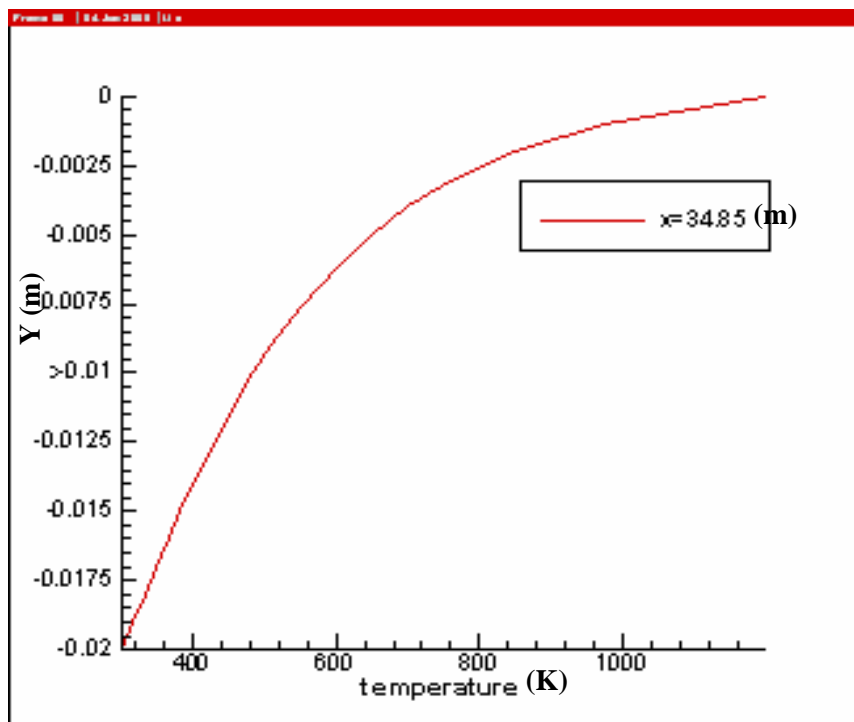


Fig. (IV.6) Température en fonction de la position z à un instant donné $t_2 > t_1$ sur un plan $x = 34.86$ mm.

Ces résultats coïncident avec ceux reportés dans la littérature [IV.1]. Le modèle du déplacement relatif de la source par rapport au substrat permet de déduire les limites ou frontières du bain métallique.

Outre l'UDF élaboré pour obtenir les résultats précédents, un des principaux résultats de ce travail est l'utilisation d'une UDF qui permet d'une part de simuler le déplacement d'un faisceau laser de profil spatial gaussien et d'autre part de prendre en compte l'effet des pertes par convection et par rayonnement. On s'intéresse dans cette partie, à la distribution de la température sur l'échantillon pour un faisceau laser se déplaçant relativement par rapport à la pièce à une vitesse de 1 mm/s, et déposant sur la surface de l'échantillon de fer une puissance effective de 213 W. La figure (IV.7) montre à l'instant $t = 10$ s la distribution de la température dans le cas où l'on considère les pertes par rayonnement et par convection comme étant nulles. Cela revient à ne pas tenir compte du terme donné par l'équation (III.3).

Pour les mêmes conditions concernant l'instant d'observation, les paramètres du faisceau laser, et du matériau, la figure (IV.8) montre la distribution de la température dans le cas où les pertes par rayonnement et par convection sont prises en compte, c'est-à-dire que l'équation (3) est insérée dans les conditions aux limites (sur les faces de l'échantillon).

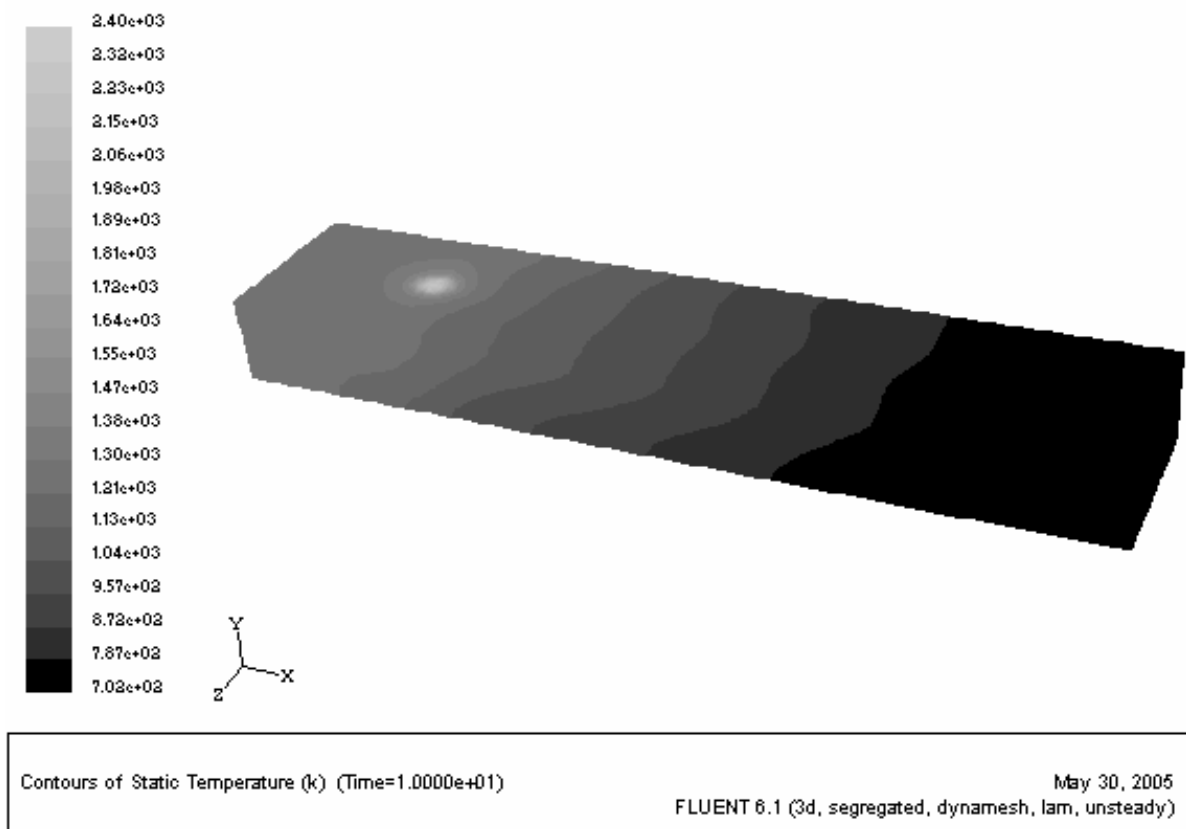


Fig. (IV.7) Champ de température sans prise en compte des pertes par convection et par rayonnement

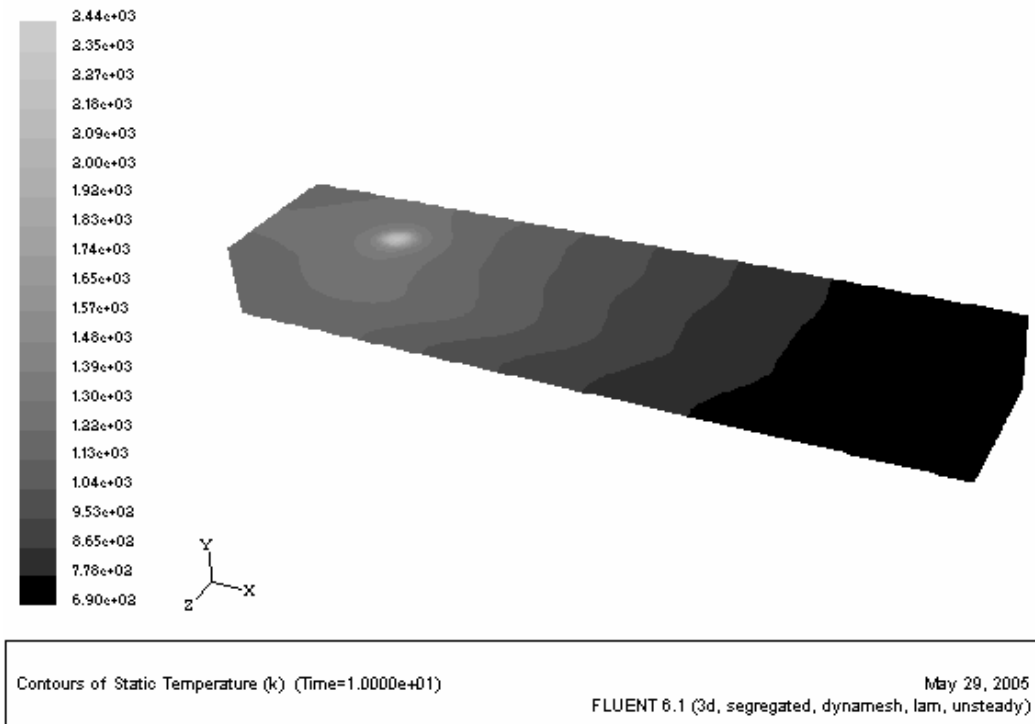


Fig. (IV.8) *Champ de température avec prise en compte des pertes par convection et par rayonnement*

II. APPLICATION DE LA METHODE VOF

On considère deux domaines (figure (IV.9)) dont l'un représente l'air, et l'autre une gouttelette de poudre à une température égale ou légèrement supérieure à la température de fusion de la poudre, qui est la même que celle du substrat.

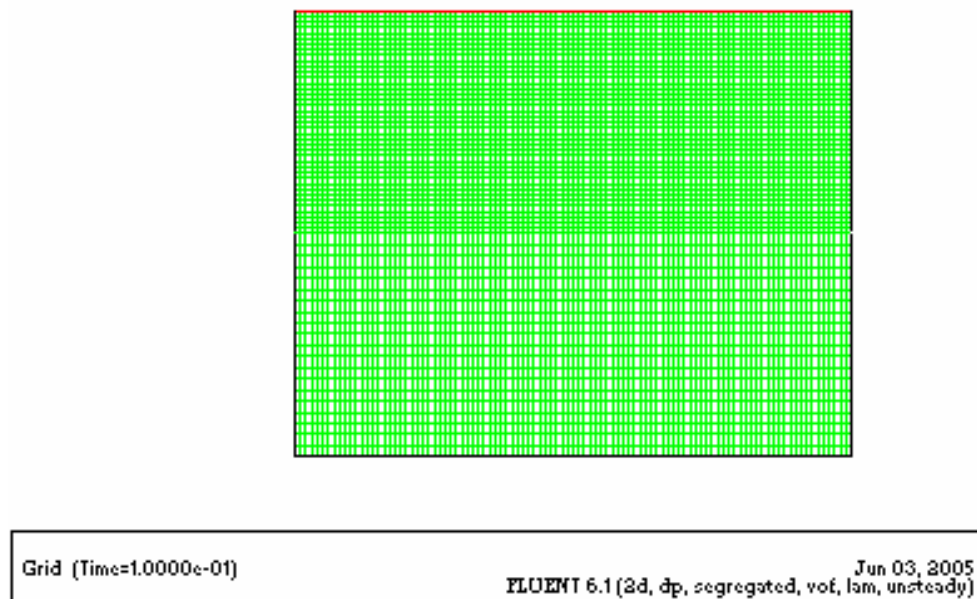


Fig. (IV.9) *Représentation du domaine de calcul et du maillage utilisé pour l'application de la méthode*

VOF

Après avoir obtenu les limites approximatives du bain de fusion, on utilise notre modèle de la gouttelette injecté dans ce dernier. On obtient la couche rechargée après la re-solidification rapide qui se produit dans le bain liquide et la matière qui y est injectée.

On considère les paramètres suivants concernant le faisceau laser :

La puissance laser : $P = 500 \text{ W}$

La vitesse du faisceau laser : $v_d = 5 \text{ mm/s}$

Le rayon du faisceau laser : $r_l = 1 \text{ mm}$

La profondeur du bain de fusion est proche de 2.5mm, et la dimension de la zone liquide dans le matériau substrat est dans ce cas approximativement égale à $3r_l$ soit environ 3 mm. On déduit alors les dimensions du bain de fusion dans notre modèle de la gouttelette telles que 2.5 et 3 mm. La température initiale du bain de fusion et de la gouttelette est égale à une moyenne de 1200 K.

II.1. Modèle de la gouttelette

Cas 1 :

Pour $r_l = 1\text{mm}$, $l_{x1} = 22.75 \text{ mm}$ et $l_{x2} = 27.25 \text{ mm}$, le bain de fusion est à la température $T_{\text{moyenne}} = 1366 \text{ K}$. La profondeur du bain dans ce cas égale à 3.5 mm.

On représente sur la figure (IV.10) la position initiale et la température initiale du bain liquide et de la gouttelette injectée, et sur la figure (IV.11) on montre la fraction du volume à l'instant initiale.

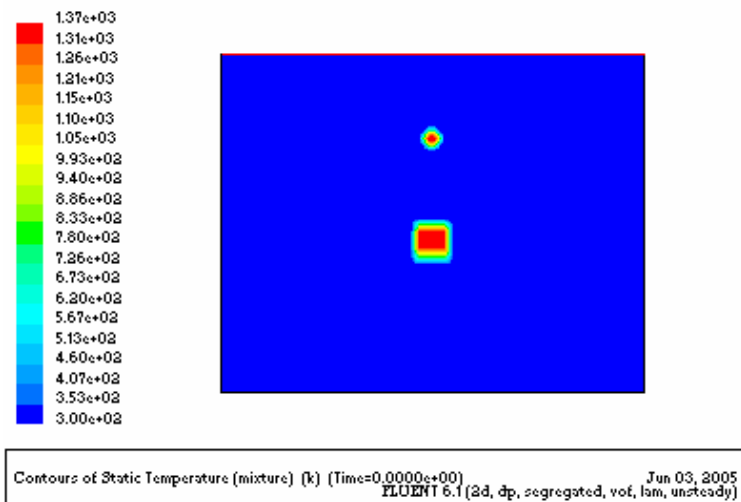


Fig.(IV.10) Représentation initiale du contour de la température.

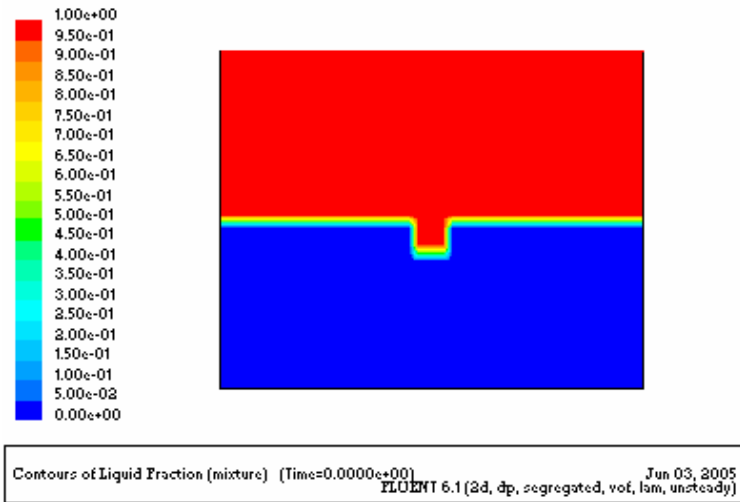


Fig. (IV.11) Représentation du contour initiale fusion/solidification.

Sur la figure (IV.12) le contour des phases à l'instant initiale est représenté. On montre l'état initial de la distribution des deux phases qui existent dans le modèle. Ce qui est en rouge représente le matériau de base et la matière approvisionnée, et ce qui en bleu représente l'air.

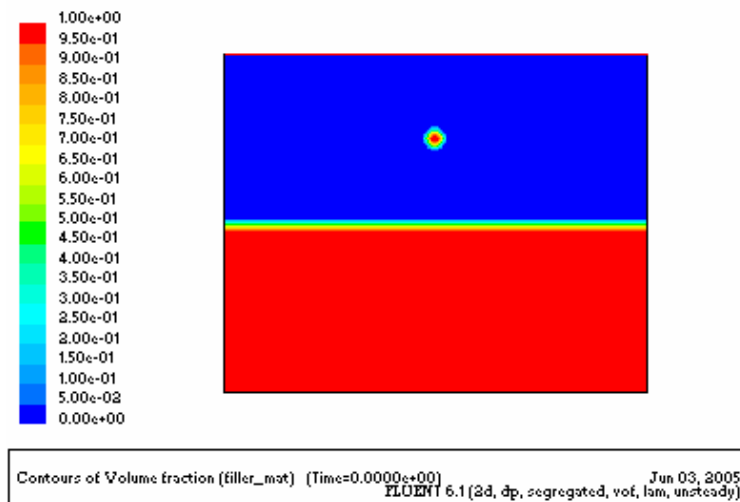


Fig. (IV.12) Représentation du contour initial des phases.

On montre sur la figure (IV.13) une re-solidification très rapide après 0.3 s. La gouttelette injectée et la zone du bain liquide sont totalement solidifiées.

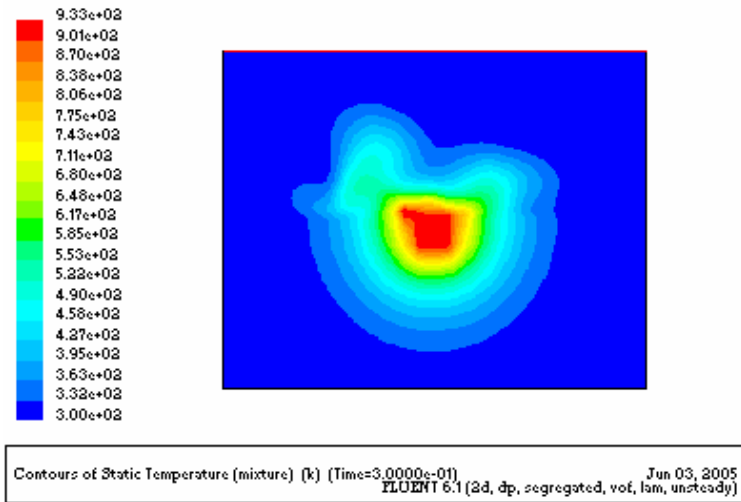


Fig. (IV.13) Représentation du contour de la température à $t= 0.3 s$.

Sur la figure (IV.14) on remarque la formation de la couche de revêtement après la resolidification, et le contour des phases sur la figure (IV.15). On note que la hauteur du clad obtenue à côté du bain de fusion est supérieure à celle du milieu, et ceci est expliqué par l'effet de la gouttelette sur la surface libre. Cependant, on peut modifier cette approche par l'injection d'une même quantité de matière de la gouttelette mais en plusieurs petites gouttelettes, en diminuant le choc entre la grande surface de la gouttelette et la surface libre. Cela minimise évidemment le facteur de dilution.

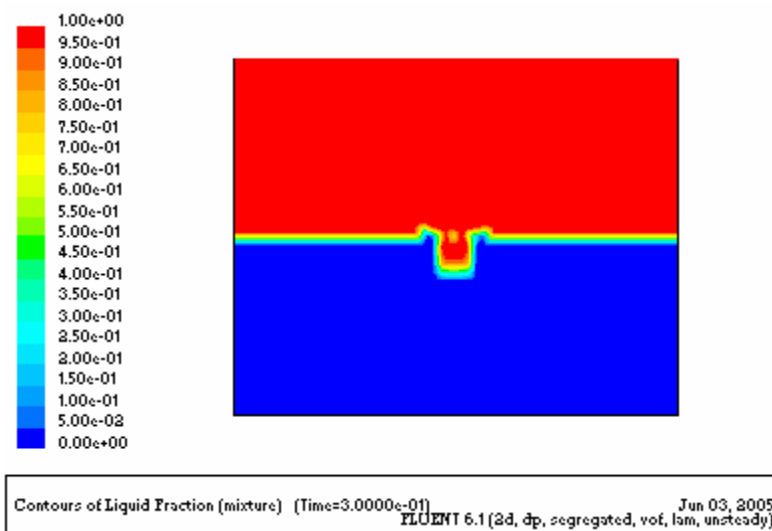


Fig. (IV.14) Représentation du contour de la fusion/solidification à $t=0.3s$.

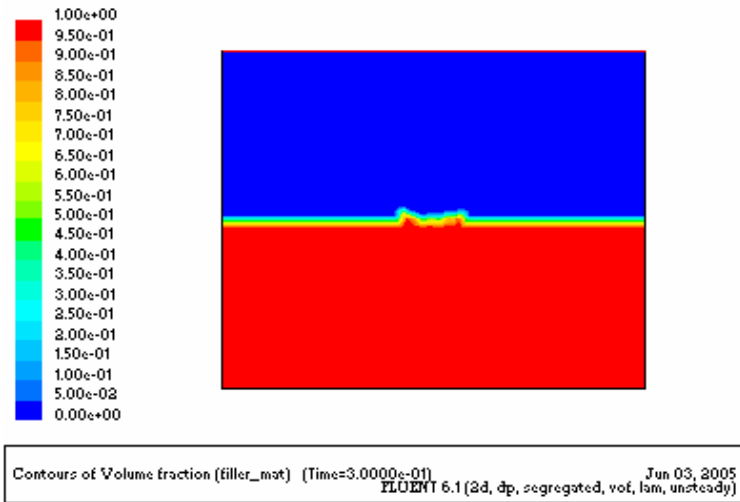


Fig. (IV.15) Représentation du contour des phases à $t=0.3s$.

Les mêmes résultats que précédemment décrits sont donnés sur les figures (IV.16- IV.18) pour l'instant $t=1s$.

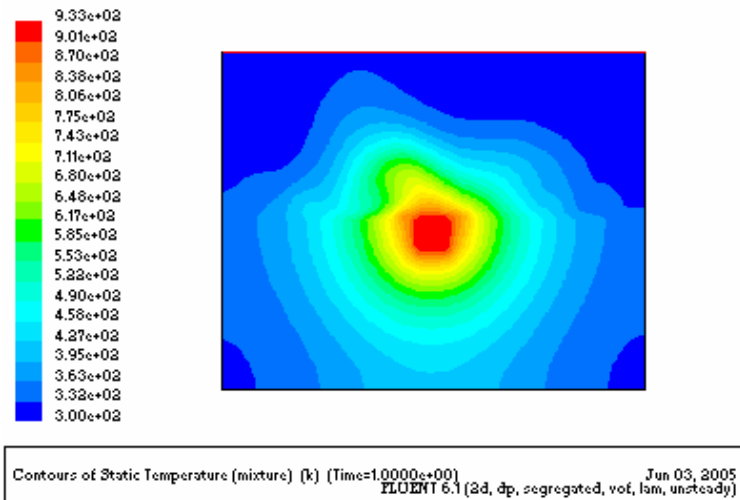


Fig. (IV.16) Représentation du contour de la température à $t=1 s$.

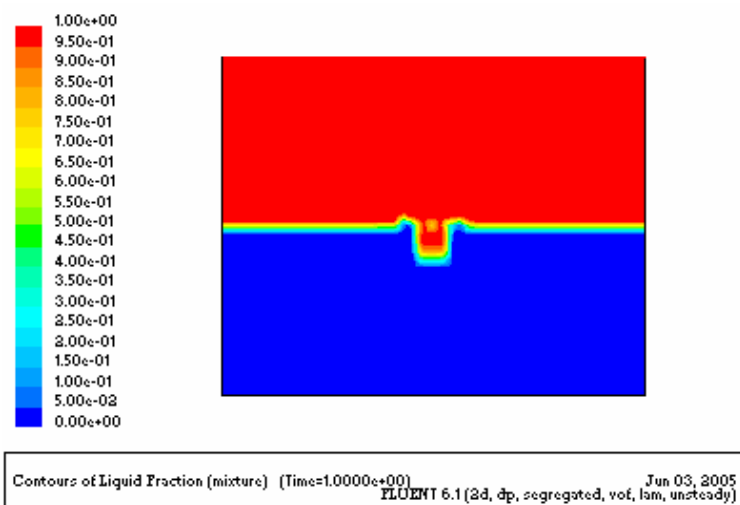


Fig. (IV.17) Représentation du contour de la fusion/solidification à $t=1s$.

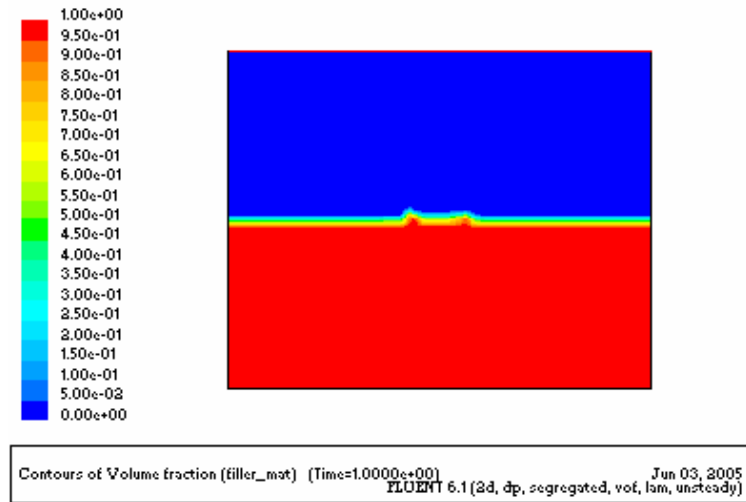


Fig. (IV.18) Représentation du contour des phases à $t=1s$.

Cas 2:

Dans ce deuxième cas on reprend les mêmes démarches pour les calculs concernant les frontières du bain de fusion, la position du gouttelette et leurs température initiale.

La puissance laser : $P = 400 \text{ W}$

La vitesse du faisceau laser : $v_d = 2 \text{ mm/s}$

Le rayon du faisceau laser : $r_l = 1 \text{ mm}$

Les frontières du bain de fusion prennent approximativement les valeurs suivantes $r = 1\text{mm}$, $l_x = 23 \text{ mm}$ et $l_y = 27 \text{ mm}$, et le bain de fusion est à la température moyenne $T_{\text{moyenne}} = 1266 \text{ K}$. La profondeur du bain est dans ce cas égale à 2.5 mm .

Les figures (IV.19-IV.21) montrent respectivement les contours de la température autour de la zone d'interaction entre la matière injectée et le bain liquide, du front de fusion/solidification, et des phases.

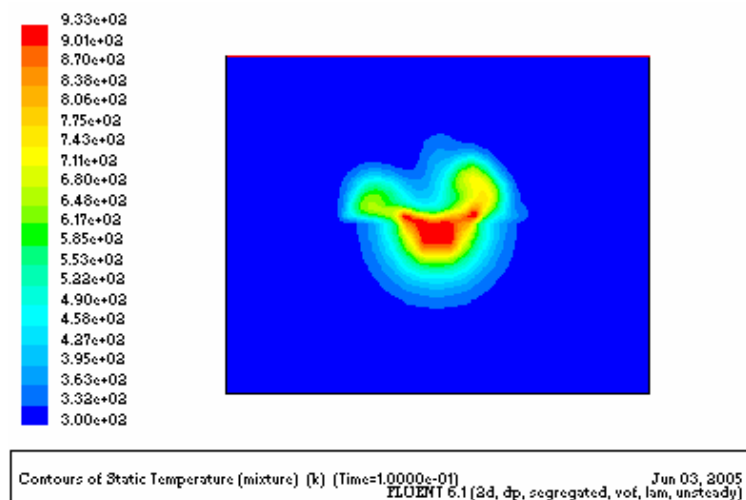


Fig. (IV.19) Représentation du contour de la température à $t= 0.1 s$.

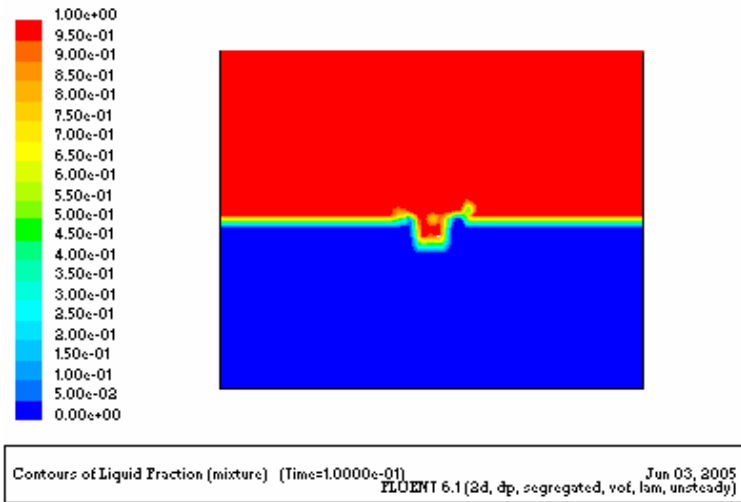


Fig. (IV.20) Représentation du contour de la fusion/solidification à $t=0.1s$

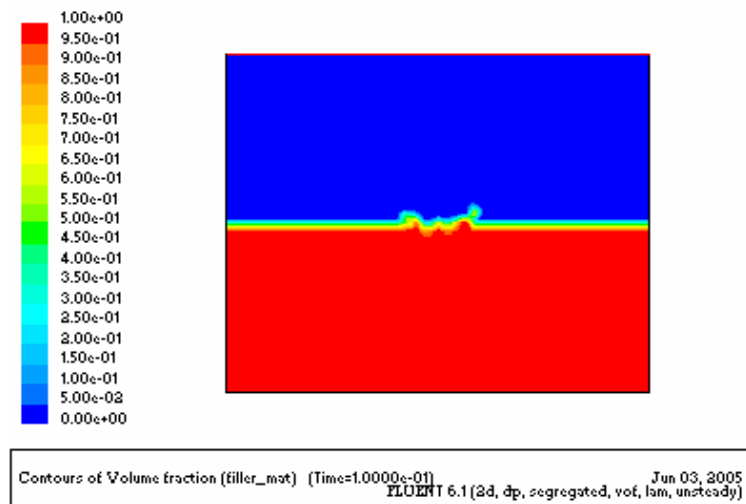


Fig. (IV.21) Représentation du contour des phases à $t=0.1s$.

On signalera que pour les deux cas traités, la hauteur de la gouttelette est de 10mm.

A l'instant $t = 1 s$, on donne sur les figures (IV.22-IV.25) les distributions de l'enthalpie, de la température, de la fraction liquide et du contour de phase.

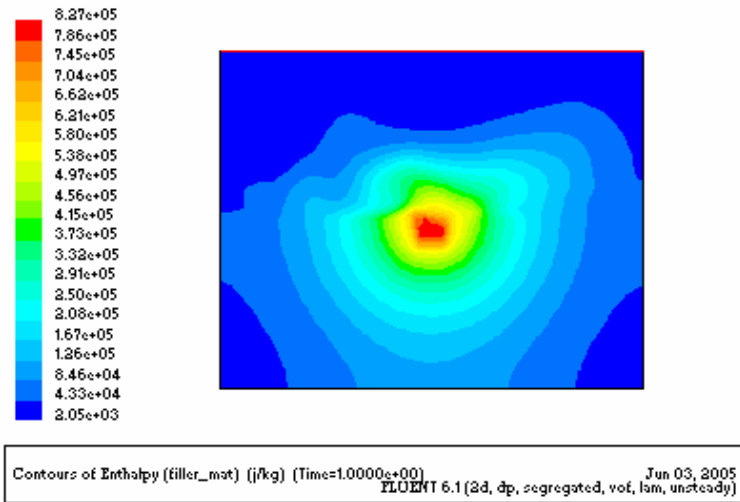


Fig. (IV.22) Représentation du contour de l'enthalpie $t=1s$

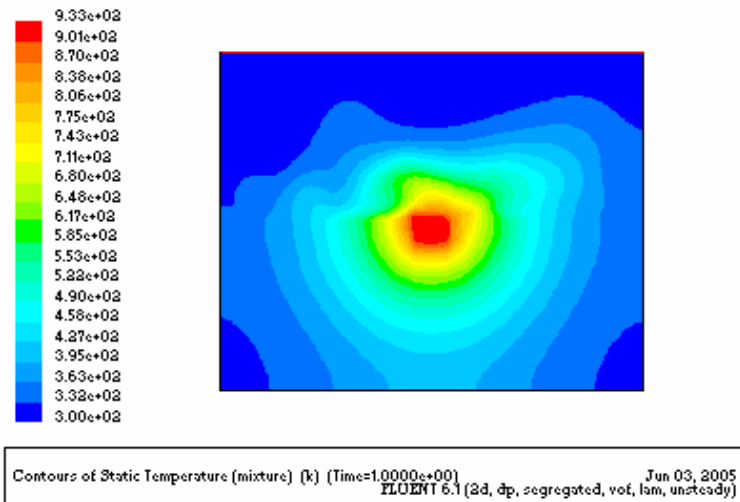


Fig. (IV.23) Représentation du contour de la température à $t= 1 s$.

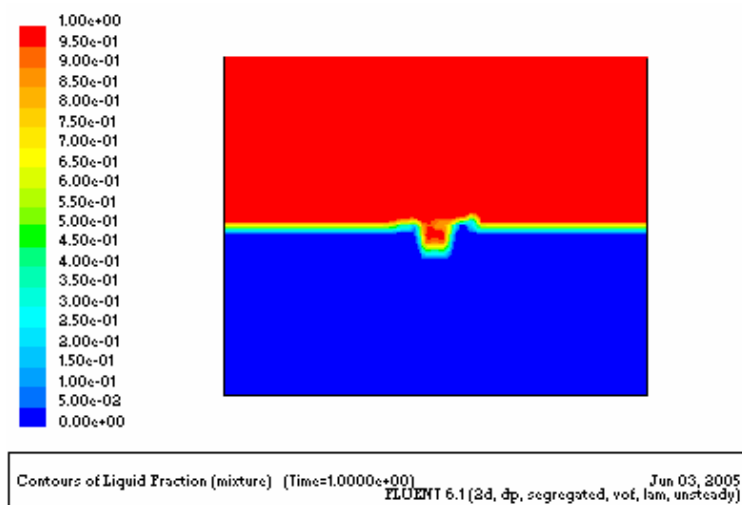


Fig. (IV.24) Représentation du contour de la fusion/solidification à $t=1s$

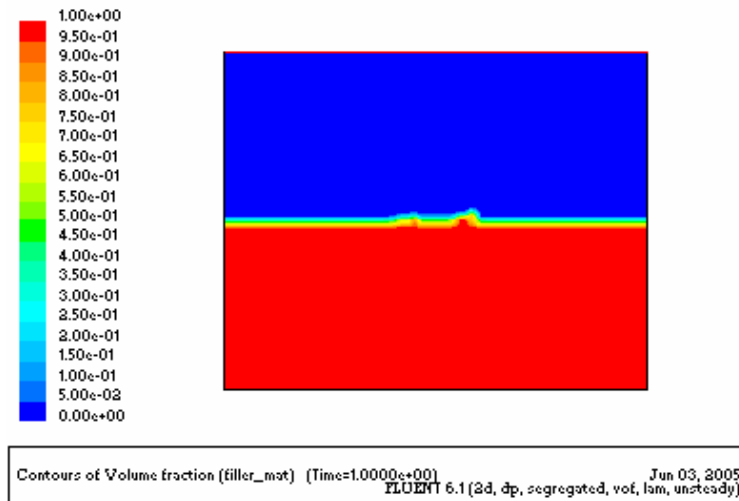


Fig. (IV.25) Représentation du contour des phases à $t=1s$.

II.2. Modèle à deux gouttelettes

On peut considérer dans ce cas le déplacement du dépôt de matière mais il nous faut une géométrie plus grande pour le domaine représentant l'air.

Avec $h = 1/2gt^2$, on a $t = \sqrt{2h/g}$ qui est le temps au bout duquel la gouttelette de poudre atteint le bain de fusion.

Donc pour considérer le déplacement du jet de poudre il faut calculer la différence Δt qui est égale à $t_2 - t_1$.

$$\Delta t = \sqrt{\frac{2}{g}} \times [\sqrt{h_2} - \sqrt{h_1}]$$

$$\Delta t \approx 1.42 \times 10^{-2} [\sqrt{h_2} - \sqrt{h_1}]$$

Tel que $\sqrt{h_2} - \sqrt{h_1}$ est donné en millimètres.

Par exemple, pour $h_2 = 11.5 \text{ mm}$ et $h_1 = 1.5 \text{ mm}$ représentant les positions des deux gouttelettes à $t=0 \text{ s}$, et si on prend l'axe $x = 25 \text{ mm}$ comme axe de symétrie, on aura : $\Delta t \approx 0.026 \text{ s}$. Et si $\Delta x \approx 0.09 \text{ mm}$, on obtient la vitesse de déplacement du jet de poudre qui est :

$$v = \Delta x / \Delta t \approx 0.09 / 0.026 \approx 3.4 \text{ mm/s}$$

En faisant un calcul élémentaire, on obtient le diamètre de la gouttelette de poudre qui est $d=1.54 \text{ mm}$ (rayon=0.77 mm). En utilisant cette approximation, la densité de déposition de la poudre par seconde est de $0.2g/s$.

Cas 1:

Les dimensions approximatives du bain de fusion sont : $r = 1\text{ mm}$, $l_{x1} = 22.75\text{ mm}$, et $l_{x2} = 27.25\text{ mm}$. Le bain de fusion est à la température de $T_{\text{moyenne}} = 1366\text{ K}$. La profondeur du bain dans ce cas est de 3.5 mm .

On remarque qu'on a rajouté 3 mm au bain de fusion par rapport au premier cas du modèle à une gouttelette.

Les résultats qui sont données sur les figures (IV.26-IV.28) concernant les mêmes contours représentés sur les figures précédentes, à l'instant $t = 1\text{ s}$.

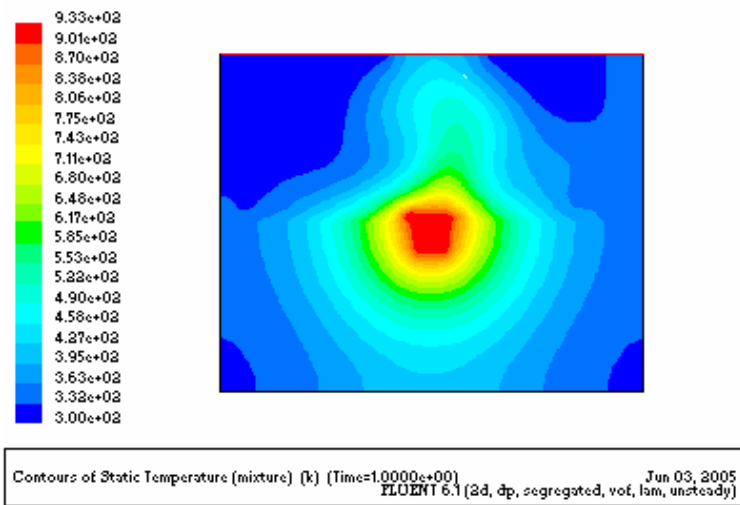


Fig. (IV.26) Représentation du contour de la température à $t = 1\text{ s}$.

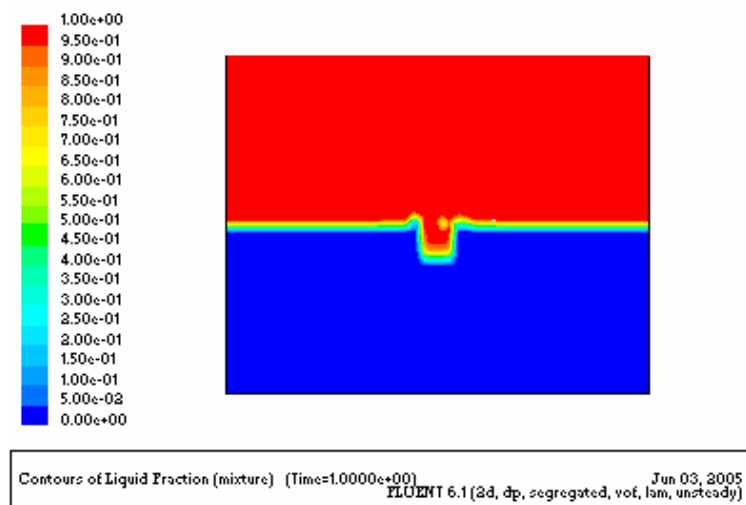


Fig. (IV.27) Représentation du contour de la fusion/solidification à $t = 1\text{ s}$

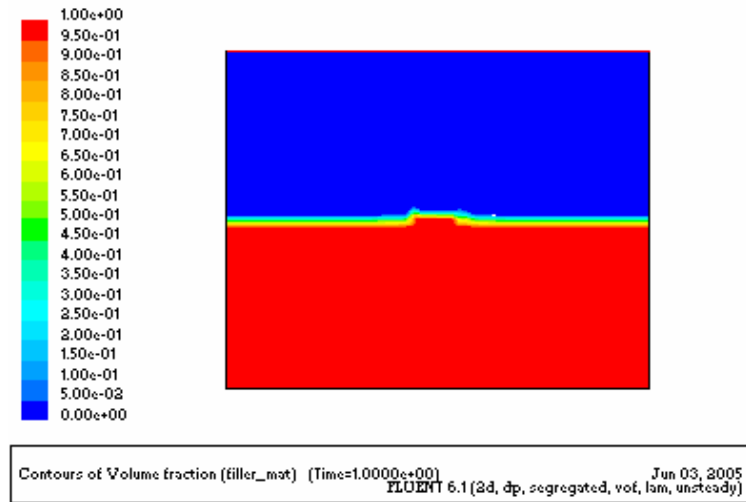


Fig. (IV.28) Représentation du contour des phases à $t=1s$.

L'épaisseur de la couche approvisionnée est $h_c \approx 0.85 \text{ mm}$. Ce résultat est très proche de ceux des modèles numériques existants, et en accord avec les résultats expérimentaux.

Cas 2:

Le même cas que précédemment, mais en changeant le taux d'injection de la poudre.

$$r = 1 \text{ mm}, l_{x1} = 22.75 \text{ mm} \quad \text{et} \quad l_{x2} = 27.25 \text{ mm}$$

Le bain de fusion est à la température de $T_{\text{moyenne}} = 1366\text{K}$. La profondeur du bain dans ce cas est de 3.5 mm , et le taux d'injection égale à 0.1 g/s . La vitesse de déplacement est $v_d = 3.4 \text{ mm/s}$.

Dans ce cas la hauteur de la couche approvisionnée est diminuée par ce que le taux d'injection de la poudre est moins que le premier cas .cela justifié cette diminution.

En conclusion de cette partie consacrée à l'application de la méthode VOF, on peut dire que les limites du bain du bain de fusion ont une grande importance pour prédire la hauteur approximative de la couche de revêtement, soit en utilisant le terme source (masse source, dynamique du maillage,...), soit le modèle utilisé qui repose sur la méthode de VOF et de la fusion/solidification. Ce modèle peut être généralisé et modifié pour avoir des résultats plus intéressants, en tenant compte des phénomènes existants lors du chauffage du substrat ou du déplacement du bain liquide, ou lors de l'approvisionnement en matière, pour obtenir la hauteur de la couche rechargée par laser.

III. APPLICATION DE LA METHODE DE DEFORMATION DU MALLAIGE

On présente par ailleurs, quelques résultats [6] de la simulation de la formation d'une paroi ou clad par l'utilisation du modèle de maillage dynamique grâce à l'UDF élaborée correspondante. La figure (IV.28) montre la formation du clad lors du rechargement par une poudre de même nature que le substrat et pour puissance absorbée effective de 213 W, telle que calculée par le modèle de Picasso [13] qui tient compte de l'effet de l'écrantage dû à la traversée du nuage de poudre par le faisceau laser. Dans le cas présenté sur la figure (IV.28), la vitesse de déplacement est de 1 mm/s.

Pour mettre en évidence de façon plus illustrative, la souplesse et l'efficacité de la modélisation rendue possible grâce à l'élaboration et l'utilisation d'UDFs dans le processeur FLUENT, on montre sur la figure (IV.29) l'effet de la vitesse de déplacement du faisceau laser sur la formation du clad. On note clairement que plus la vitesse est petite plus la hauteur du clad est importante, ce qui est évidemment un résultat prévisible.

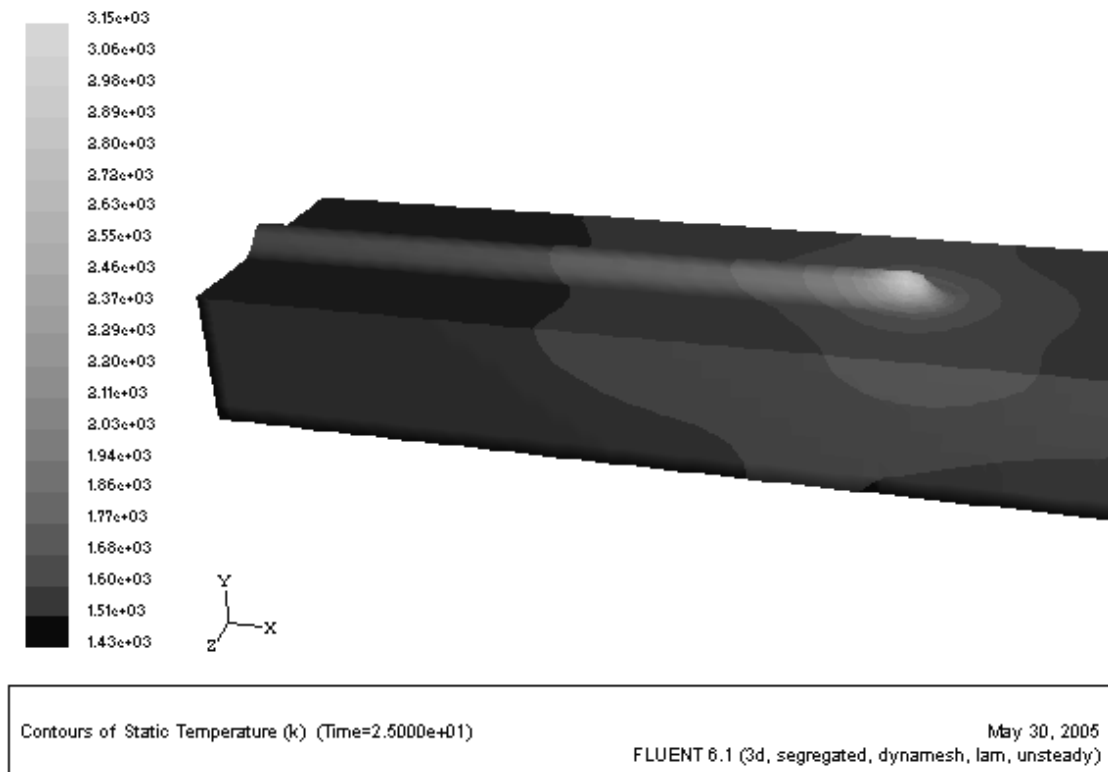


Fig. (IV.29) Formation du clad sur un échantillon en Fer par injection de particules de poudre en Fer à $v=1\text{mm/s}$

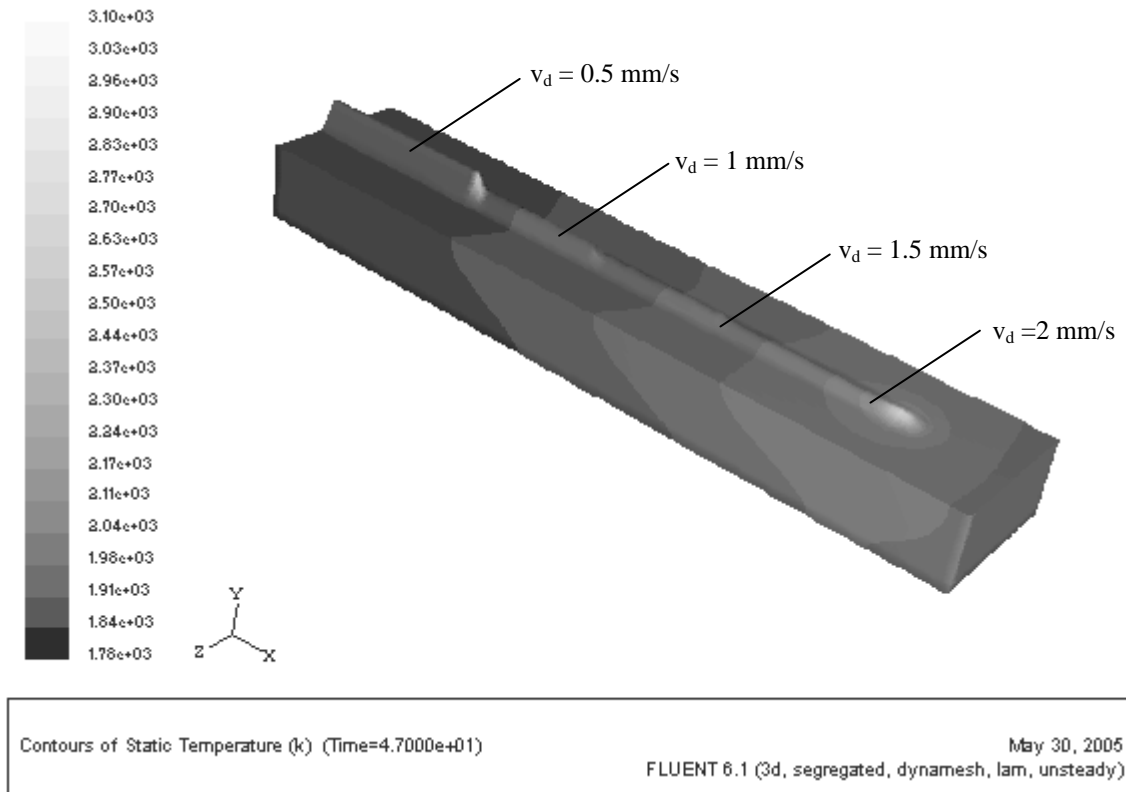


Fig. (IV.30) Variation de la hauteur du clad en fonction de la vitesse de déplacement du faisceau laser

CONCLUSION
GENERALE

CONCLUSION GENERALE

D'un point de vue technologique, la maîtrise de nombreux procédés industriels (moulage, soudage, dépôt et revêtement (coating)...), repose souvent sur la compréhension de problème d'interfaces. En effet, en raison de la formation d'un bain liquide, une des difficultés majeures du problème est liée à la coexistence d'une interface mobile liquide-gaz (surface libre du bain) et d'un front mobile de fusion/solidification. Du point de vue mathématique, peu de solutions analytiques ont pu être développées pour ces problèmes en raison de leur caractère très fortement non linéaire.

Ce dernier est induit par les faits suivants :

- la position des interfaces est une inconnue du problème.
- les propriétés physiques de la plupart des matériaux dépendent fortement de plusieurs paramètres, tels que par exemple la température, la cinétique de changement de phase, la forme de l'interface.
- les transferts thermiques sont, dans nombreux cas, donnés par la convection qui se développe dans la phase liquide : en effet, outre les mouvements de convection forcée, il peut aussi apparaître des mouvements de convection naturelle dus à un gradient de densité provenant, d'une part de la dépendance de la densité à la température du fluide, et d'autre part de la dépendance de la densité à la concentration du fluide ou un gradient de tension superficielle en présence d'une surface libre.
- Des solutions analytiques ont néanmoins été proposées dans le cadre d'hypothèses simplificatrices, aussi bien dans le cas d'interface fluide-fluide que dans le cas de problèmes de changement de phase. Par exemple, le problème de conduction pure avec changement de phase isotherme a initialement servi de problème modèle à frontière mobile. En effet, les travaux précurseurs de Neumann (1860) et de Stefan (1891) ont

abouti à une solution analytique en cas d'un changement de phase isotherme. Cependant, l'application pratique des quelques solutions analytiques existantes demeure limitée aux domaines géométriques académiques (semi fini) ,soumis à des conditions aux limites et initiales des plus simples.

Dans ce contexte, les méthodes numériques ont contribué à la résolution de problème plus généraux et plus complexes que ceux qui étaient jusque-la résolus par les méthodes analytiques .pour cette raison, elles ont fait l'objet de très nombreux publications au cours des dernières années.

REFERENCES

REFERENCES

- [1] Dowden J. and Kapadia P., 'The penetration depth in keyhole welding with pseudo-continuous Nd-YAG and CO₂ lasers investigated mathematically', Proceeding of the 11th Meeting on Mathematical Modeling of Material Processing with Lasers, Marseille (France), 27-28 September 1995, Eds. A. Kaplan , D.Shuocker , Vienna University of Technology.
- [2] Dumord E., Jouvard J.M., Grevey D., Druetta M. et Ottavi P., 'Etude expérimentale de l'interaction laser-matiere dans le cas du soudage d'un acier inoxydable austénitique par laser Nd-YAG continu de 2kW' , J.Phys. III France 7 (1997) 1079-1096.
- [3] Sainte-Catherine, 'Etudes des possibilités d'applications des lasers Nd-YAG de forte puissance aux traitements de surfaces', Thèse de Doctorat, (1990) Paris.
- [4] Lemoine F., Grevey D and Vannes A.B., 'Indirect determination of the absorbance during Nd-YAG laser-matter interaction', Lasers in Engineering 4 (1995) 273-279.
- [5] Handbook of Chemistry and Physics, 69th Ed, CRC Press (1988).
- [6] Vannes A.B, 'Lasers et industries de transformation', Tech.et doc. (Lavoisier).
- [7] Stern G., 'Absorption des rayonnements lasers CO₂ et Nd-YAG en traitements de surface', Revue de mécanique 4 (1995) 225-263.
- [8] Folkes J.A., Surf. Coat. Techn., 63(1994) 65-71.
- [9] Pantelis D., 'Techniques de l'Ingénieur, Traités Matériaux Métalliques'
- [10] www.irepa-laser.com .
- [11] Schneider M.F., 1998 These.
- [12] Komvopoulos K., Nagarathnam K., 'Processing and Characterization of Laser Cladded Coating Materials', J. of Eng. Materials and Technology, vol. 112, (1990) pp. 131-143
- [13] Picasso M., Marsden C.F.,Wagniere J.D , Frenk A., and Rappaz M., 'A Simple But Realistic Model for Laser Cladding', Metallurgical and Materials Transactions B, Vol. 25, (1994) pp. 281-291.
- [14] Grünenwald B., et al., ,Laser Cladding with a Heterogeneous Powder Mixture of WC/Co and NiCrBSi', Proc. ECLAT '92, (1992) pp. 411-416
- [15] Stern G., , 'Absorptivity of CW CO₂, CO and YAG-Lasers by Different Metallic Alloys', Proc. ECLAT '90, (1990) pp. 25

- [16] Picasoo.M Simulation numérique des traitements de surface par laser .thèse N^o 1011 Lausanne, EPFL 1992.
- [17] König W., et al., 'Surface Treatment with the Laser Beam:A Discussion of Various Machining Methods', Annual Industrial Laser Handbook (1989) pp. 117-121
- [18] Molian P.A., 'Principles and Applications of Lasers for Wear-Resistant Coatings', 1st International Conference on Surface Modification Technology, (1988) pp. 237-265
- [19] Oberländer B.C., Lugscheider E., 'Comparison of Properties of Coatings Produced by Laser Cladding and Conventional Methods', Materials Science and Technology, vol. 8, (1992) pp. 657-665
- [20] Webber T., 'Advances in the Applications of Laser Cladding of Multi-Dimensional Part Geometries', Lasers in Motion for Industrial Applications, vol. 744, (1987), 137-143
- [21] Atamert S., and Bhadeshia H.K.D.H., 'Comparison of the Microstructures and Abrasive Wear Properties of Stellite hardfacing Alloys Deposited by Arc Welding and Laser Cladding', Metall. Trans. A, vol. 20A, no. 6, (1989) pp. 1037-1054
- [22] Cai G., and Molino G., 'Comparison Between Cladding by Means of Plasma Spray and the More Recent Technologies of Plasma Transferred Arc, Plasma Semi-Transferred Arc and Laser on Traditional Filler Material and New Nickel Base Boron-Free Alloys', Proc. Laser-6, (1990) pp. 79-90
- [23] Li J., Yuan L., 'Mathematical Method for Optimizing the Process of Heat Treatment with Powerful Lasers', Lasers in Engineering, vol. 2, (1994) pp. 239-245
- [24] Monson P.J.E., Steen W.M., 'Comparison of Laser Hardfacing with Conventional Processes', Surface Engineering, vol. 6, no. 3, (1990) pp. 185-193
- [25] Amende W., and Nowak G., 'Hard Phase Particles in Laser Processed Cobalt Rich Claddings', Proc. ECLAT '90, (1990) pp. 417-428
- [26] Folkes, J.A., Shibata, K., Laser Cladding of Ti-6Al-4V with Various Carbide Powders, J. of Laser Applications, vol. 6, (1994) 88-94
- [27] Lang, A., Waldmann, H., Bergmann, H.W., Cladding of Metallic Substrates with Diamonds and Cubic Boron Nitride, Proc. ECLAT '94, (1994) 456-461
- [28] Lugscheider, E., Oberländer, B.C., Meinhardt, H., Laser Cladding and Laser Surface Remelting of Nickel-base Hardfacing Alloys, Proc. ECLAT '90, (1990) 555-568
- [29] Brenner, B. Reitzenstein, W., Laser Hardening of Turbine Blades, Industrial Laser Review, (1996) 17-20
- [30] Choi, J., Mazumder, J., Non-equilibrium Synthesis of Fe-Cr-C-W Alloy by Laser Cladding, J. of Materials Science, vol. 29, (1994) 4460-4476

- [31] Eiholzer, E., Cusano, C., Mazumder, J., Wear Properties of Laser Alloyed and Clad Fe-Cr-Mn-C Alloys, Proc. ICALEO '84, (1985) 159-167
- [32] Fischer, A., Lensch, G., Technical Application of Laser Surface Treatment - Hardening, Alloying, Cladding, Proc. ECLAT '96, (1996) 399-405
- [33] Fishman, M., Sherbaum, N., Zahavi, J., Laser Cladding and Alloying for Refurbishing Worn Machine Parts and Improving their Surface Properties, SPIE, vol. 2426, (1995) 181-187
- [34] Gassmann, R., et al., Laser Cladding of Hard Particles Rich Alloy, Proc. ICALEO '92, (1992) 288-300
- [35] Liu, Y., et al., 1994, Processing, Microstructure, and Properties of Laser-Clad Ni Alloy FP-5 on Al Alloy AA333, Metallurgical and Mat. Trans. B, vol. 25B, (1994) 425-434
- [36] Nowotny, S., et al., Influences on the Wear Resistance of Carbide Laser Claddings, Proc. ECLAT '94, (1994) 252-259
- [37] Bruck, G.J., Fundamentals and Industrial Applications of High Power Laser Beam Cladding, Laser Beam Surface Treating and Coating, Proc. SPIE, vol. 957, (1988) 14-28
- [38] Fellowes, F.C.J., Steen, W.M., Coley, K.S., Ceramic Coating for High Temperature Corrosion Resistance by Laser Processing, Key Eng. Materials Vols 46 & 47, (1990) 435-446
- [39] Fouquet, F., et al., Microstructural and Electrochemical Characterization of Laser Deposited 18-10 Austenitic Stainless Steel Clad Layers, J. de Physique IV, Colloque C7, (1993) 991-994
- [40] Singh, J., Mazumder, J., Effect of Extended Solid Solution of Hf on the Microstructure of the Laser Clad Ni-Fe-Cr-Al-Hf Alloys, Acta Metall., vol. 35, no. 8, (1987) 1995-2003
- [41] Wang, A.A., Sircar, S., Mazumder, J., Laser Cladding of Mg-Al Alloys, J. of Materials Science, vol. 28, (1993) 5113-5122
- [42] Damborenea, J. de, Vázquez, A.J., Laser Cladding of High Temperature Coatings, J. of Materials Science, 1993, vol.28, (1993) 4775-4780
- [43] Pei, Y.T., et al., 1995, Microstructure of Laser-Clad SiC-(Ni Alloy) Composite Coating, Mat. Sci. and Eng. A, vol. A194, (1995) 219-224
- [44] Smurov, I., Covelli, L., Synthesis of Nitride and Carbide Compounds on Titanium by Means of a Solid State Laser Source, Proc. ECLAT '92, (1992) 251-256
- [45] Smurov, I., et al., 1992, Pulsed Laser Treatment of Plasma-Sprayed Thermal Barrier Coatings: Effect of Pulse Duration and Energy Input, J. of Materials Science, vol. 27, (1992) 4523-4530

- [46] VandeHaar, et al., 1988, Effect of Process Variables on the Laser Cladding of Zirconia, Proc. ICALEO '87, (1988) 189-193
- [47] Corchia, M., et al., 1987, Microstructural Aspects of Wear-Resistant Stellite and Colmonoy Coatings by Laser Processing, Wear, vol. 119, (1987) 137-152
- [48] Li, Y., Steen, W.M., Laser Cladding of Stellite and Silica on Aluminium Substrate, Proc. ICLOE '92, SPIE, vol. 1979, (1992) 602-608
- [49] Frenk, A., Wagnière, J.-D., Laser Cladding with Cobalt Based Hardfacing Alloys, J. de Physique IV, vol. 1, (1991) 65-68
- [50] [Kreutz, 1995] Kreutz, E.W., et al., 1995, Rapid Prototyping with CO₂ Laser Radiation, Applied Surface Science, 86, pp. 310-316
- [51] Flinkfeldt, J.E., Pedersen, Th.F., Laser Cladding in Pre-Made Grooves: Guide-lines for Groove Design, Materials Science Forum, vols. 163-165, (1994) 423-428
- [52] Riabkina-Fishman, M., Zahavi, J., Laser Alloying and Cladding for Improving Surface Properties and Refurbishing Worn Machine Parts, Lasers in Engineering, vol. 5, (1996)31-41
- [53] Cuetos, J.M., et al., Plasma-Sprayed Coatings Treated with Lasers: Tribological Behaviour of Cr₂O₃, Wear, vol. 169, (1993) 173-179
- [54] Mordike, B.L., , Industrial Applications of Laser Surface Treatment, Proc. ECLAT '94, (1994) 173-187
- [55] Arlt, A.G., Müller, R., Technology for Wear Resistant Inside Diameter Cladding of Tubes, Proc. ECLAT '94, (1994) 203-212
- [56] Belmondo, A., Castagna, M., Wear-resistant coatings by Laser Processing, Thin Solid Films, vol. 64, (1979) 249-256
- [57] Hirose, A., Kobayashi, K.F., Formation of Hybrid Clad Layers by Laser Processing, ISIJ Int., vol. 35, (1995) 757-763
- [58] Matthews, S.J., Laser Fusing of Hardfacing Alloy Powders, Lasers in Materials Processing, (1983) 138-148
- [59] Nurminen, J.I., Smith, J.E., Parametric Evaluation of Laser/Clad Interactions for Hardfacing Applications, Lasers in Materials Processing, (1983) 94-107
- [60] Sakamoto, T., et al., , Laser Clad Lubricant Layer with Graphite/BN, (1995) 359-368
- [61] Draugelates, U., et al., Corrosion and Wear Protection by CO₂ Laser Beam Cladding Combined with the Hot Wire Technology, Proc. ECLAT '94, (1994) 344-354
- [62] Hensel, F., Binroth, C., Sepold, G., A Comparison of Powder and Wire-Fed Laser Beam Cladding, Proc. ECLAT '92, (1992) 39-44

- [63] Pelletier, J.M., et al., Influence of Processing Conditions on Geometrical Features of Laser Claddings Obtained by Powder Injection, *J. of Materials Science*, vol. 28, (1993) 5184-5188
- [64] Carvalho, P.A., et al., Automated Workstation for Variable Composition Laser Cladding - Its Use for Rapid Alloy Scanning, *Surface and Coatings Technology*, vol. 72, (1995) 62-70
- [65] Weerasinghe, V.M., Steen, W.M., Laser Cladding by Powder Injection, *Proc. Lasers in Manufacturing*, (1983) 125-132
- [66] Metzbower, E.A., Pierpoint, E.R., Hartman, K., Hardfacing Using a CW laser, *Proc. ICALEO '86*, (1986) 177-184
- [67] Mordike, B.L., , Industrial Applications of Laser Surface Treatment, *Proc. ECLAT '94*, (1994) 173-187
- [68] MacIntyre, R.M., Laser Hardsurfacing of Gas Turbine Blade Shroud Interlocks, *LIM-1*, (1983) 253-261
- [69] Tucker, T.R., et al., , Laser-Processed Composite Metal Cladding for Slurry Erosion Resistance, *Thin Solid Films*, vol.118, (1984) 73-84
- [70] Vetter, P.-A., Engel, T., Fontaine, J., Laser Cladding: The Relevant Parameters for Process Control, *Proc. Laser Materials Processing: Industrial and Microelectronics Applications*, SPIE, vol. 2207, (1994) 452-462
- [71] Jouvard, J.-M., et al., , Continuous Wave Nd:YAG Laser Cladding Modeling: A Physical Study of Track Creation During Low Power Processing, *J. of Laser Applications*, vol. 9, (1997) 43-50
- [72] Lemoine, F., Grevey, D.F., Vannes, A.B., Cross-section Modelling of Pulsed Nd:YAG Laser Cladding, *Laser Materials Processing and Machining*, *Proc. SPIE*, vol. 2246, (1994) 37-44
- [73] Li, W.-B., et al., Modelling of the Laser Cladding Process, Preheating of the Blown Powder Material, *Lasers in Engineering*, vol. 4, (1995) 329-341
- [74] Eigenmann, B., Residual Stresses due to Thermal, Thermo-Chemical and Mechanical Surface Treatments: Generation, Determination, Evaluation, *Proc. Surface Treatment '95*, (1995) 17-25
- [75] Freitas, M. de, et al., Analysis of Residual Stresses Induced by Laser Processing, *Materials Science and Engineering*, vol. A167, (1993) 115-122
- [76] Li Y MA J. Study on overlapping in laser cladding process. *Surface Coating Technology*; 90(1), (1997) 1-5.
- [77] Powell, J., Steen, W.M., Vibro Laser Cladding, *Proc. Lasers in Metallurgy*, (1981) 93-104

- [78] De Hosson ,J.Th..M., Fundamental and applied Aspects of Laser Processed Ceramic Coatings of Metals , Proc.Surface Treatment 95. (1995)1-15
- [79] Zhou, X.B., De Hosson, J.Th.M., Dependence of Surface Residual Stress on Laser Power and Laser Scan Velocity, ScriptaMetall. et Mat., vol. 25, (1991) 2007-2010
- [80] Ellis, M., et al., , Processing Aspects of Laser Cladding an Aluminium Alloy onto Steel, J. of Materials Processing Technology, vol. 52, (1995) 55-67
- [81] Jasim, K.M., West, D.R.F., Laser Cladding of Carbon Steel with a Ceramic Metallic Composite, High Power Lasers and Laser Machining Technology, Proc. SPIE, vol. 1132, (1989) 237-245
- [82] Sepold, G., Becker, R., Laser Powder Coating by Multi-Thin-Layer Technics, Proc. First International School on Laser Surface Microprocessing, SPIE, vol. 1352, (1989) 125-131
- [83] Chan, C., Mazumder, J., Chen, M.M., A Two-Dimensional Transient Model for Convection in Laser Melted Pool, Metall.Trans. A, vol. 15A, (1984) 2175-2184
- [84] Pilloz, M., et al., Study of the Parameters of Laser Coatings and Residual Stress Fields Created by These Coatings, Key Engineering Materials, Vols 46 & 47, (1990) 387-414
- [85] Vasauskas, V., et al., Investigation of Surface Layers Properties in Laser Cladding, Proc. ECLAT '96, (1996) 391-398
- [86] Zhang, N., Ekambaranathan, G., Willemsse, P.F., Residual Stresses and Cracking in a Laser-Deposited Co-Cr-Ni-Mo Alloy on Steel, Proc. LANE '94, (1994) 317-324
- [87] Ricciardi, G., et al., , Laser Assisted Formation of a Wear Resistant SiC-metal Composite on the Surface of a Structural Aluminium Alloy, Key Engineering Materials Vols 46 & 47, (1990) 415-424
- [88] Ollier, B., et al., Cladding with Laser Radiation: Properties and Analysis, Proc. ECLAT '92, (1992) 687-692
- [89] Hoadley, A.F.A, Rappaz, M., A Thermal Model of Laser Cladding by Powder Injection, Metall. Trans. B, vol. 23B, (1992) 631-642
- [90] Cline, H.E., Anthony, T.R., Heat Treating and Melting Material with a Scanning Laser or Electron Beam, J. of Applied Physics, vol. 48, no. 9, (1977) 3895-3900
- [91] Basu, B., Date, A.W., Rapid Solidification Following Laser Melting of Pure Metals II: Study of Pool and Solidification Characteristics, Int.J. Heat Mass Transf., vol. 35, (1992)1059-1067
- [92] Yang L., Peng X., and Wang B., Int. J. Heat and Mass Transfer, 44, (1986) 4465
- [93] Toyerskani E., Khajepour A., and Corbin S., 'A 3-D transient finite element model for laser cladding by powder injection', ICALEO 2002, Scottsdale, Arizona, USA (2002)

- [94] Lampa C., Kaplan A.F.H., Resch M., and Magnusson C., Lasers in Engineering , Vol.7, (1998) pp. 241-252
- [95] Duley C., ‘Theory of laser heating of solids’
- [96] www.fluent.com
- [97] Patankar S.V., and Spalding D.B., Int. J.of Heat and Mass Transfer, Vol.15, (1972) 1787
- [98] Patankar S.V., ‘Computational analysis of fluid flow and heat transfer’, Ecole d’été GUT-CET, Cargèse–Corse, 1992.
- [99] E.H. Amara, O. Boumia, and L. Achab, ‘Modeling of Laser Cladding with Powder injection’, *accepté pour présentation à l’International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers*, 12-17 September 2005, Yalta, Ukraine.