



Science Arts & Métiers (SAM)

is an open access repository that collects the work of Arts et Métiers Institute of Technology researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in: <https://sam.ensam.eu>
Handle ID: <http://hdl.handle.net/10985/9956>

To cite this version :

Jérémie GIRARDOT, Lounès ILLOUL, Laurent BERTHE, Philippe LORONG, Nicolas RANC, Matthieu SCHNEIDER, Véronique FAVIER - Simulation numérique du percage laser par la méthode C-NEM - In: Laserap'7, France, 2012-10 - Applications des Lasers de Puissance - 2012

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository

Administrator : scienceouverte@ensam.eu



Simulation numérique du perçage laser par la méthode C-NEM

J. GIRARDOT¹, **L. ILLOUL**¹, **P. LORONG**¹, **N. RANC**¹,
M. SCHNEIDER¹, **L. BERTHE**¹, **V. FAVIER**¹

¹ Arts et Metiers ParisTech, Laboratoire PIMM, umr CNRS 8006
151 Bd de l'Hôpital, 75013 Paris

Résumé

Ces travaux présentent une alternative numérique au problème de simulation du procédé de perçage par laser. L'utilisation des éléments finis pour modéliser la propagation du trou au cours du temps montre des limites face à un problème de frontières mobiles induit par un changement de phase rapide et des forts gradients thermiques. L'utilisation d'un code C-NEM a donc été testé avec comme objectif de résoudre ces difficultés numériques et d'utiliser le fort potentiel de cette méthode originale. Le principe physique du perçage laser sera rappelé et le modèle mathématique choisi pour le modéliser sera précisé. Un cas test de simulation a été réalisé avec les grandeurs physiques du fer pur afin de valider le choix du code C-NEM.

1. Introduction

La simulation d'un procédé d'usinage tel que le perçage laser en régime de percussion en fonction des paramètres procédés est d'un grand intérêt pour prédire la morphologie des trous ainsi que les effets induits sur la matière percée. Elle permettrait aussi de mieux comprendre les phénomènes physiques locaux au cours du perçage tels que l'absorption du faisceau laser. Pour des densités de puissance de 10 à 50 MW/cm², l'interaction principale entre le laser focalisé et le substrat consiste à chauffer la surface du matériau jusqu'à la température entraînant la fusion puis la vaporisation d'une partie de la matière. La partie qui reste fondue est éjectée par la pression de vapeur, créant ainsi l'enlèvement de matière. Cette interaction se poursuit tout au long de la pulsation laser et on obtient à la fin un trou complet. Il résulte donc de ce perçage des échanges thermiques entre le faisceau, la partie liquide en mouvement et la partie solide qui doivent être pris en compte dans notre simulation. La figure 1 présente le processus physique au cours d'un perçage en régime de percussion.

Plusieurs travaux de simulation du perçage laser ont déjà été proposés en utilisant des codes de calcul basés sur la méthode des éléments finis et sur des méthodes de suivi d'interface de type "front-capturing" (level set) [1] & [2] ou de type "front tracking" (ALE) [3] & [4]. Ces choix numériques comportent des inconvénients qui limitent le travail de simulation, notamment à cause de la présence d'un maillage et de la représentation volumique de conditions aux limites physiquement surfaciques sur les interfaces mobiles (liquide/vapeur et solide/liquide) [12].

Cet article présente une nouvelle approche de ce problème de simulation par l'utilisation de la méthode C-NEM (Constraint Natural Element Method [5]), une méthode à mi-chemin entre celle sans maillage et celle des éléments finis. La C-NEM nous permet de façon simple et sans hypothèse numérique simplificatrice lourde de suivre l'évolution des interfaces liquide/solide et liquide/vapeur. Elle facilite l'implémentation des équations de la chaleur et de Navier-Stokes. La non-linéarité induite par la vaporisation sera aussi pris en compte dans notre modèle. L'objectif premier de ces travaux est de proposer une nouvelle approche numérique basée sur les hypothèses et les équations communément utilisées dans les simulations avec la méthode des éléments finis. On rappellera d'abord le modèle physique choisi pour chaque domaine ainsi que les couplages multiphysiques avant de présenter brièvement la méthode C-NEM, utilisée pour discrétiser ces équations. Enfin, on discutera des résultats issus des premières simulations.

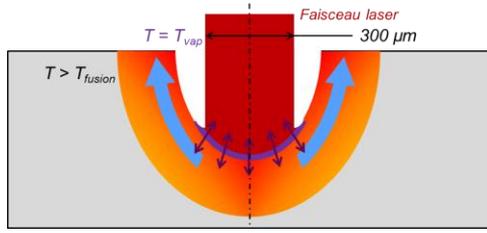


Figure 1: Processus physique du perçage laser

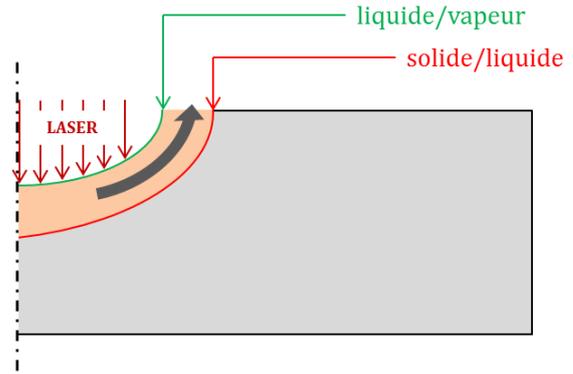


Figure 2: Domaine de calcul pour la modélisation

2. Modèle mathématique

Notre modèle se base sur une délimitation en deux domaines du système, solide et liquide (voir figure 2). On supposera par la suite les hypothèses suivantes :

- Le problème est un tir non incliné d'un faisceau laser sur un matériau homogène. Il sera traité avec une symétrie axiale ;
- Les grandeurs physiques seront prises constantes dans chaque domaine et indépendantes de la température ;
- La matière liquide éjectée ainsi que celle vaporisée ne sera pas suivi dans le calcul ;
- Le flux de chaleur appliqué sur la surface sera réparti spatialement suivant une gaussienne et temporellement suivant la montée en charge de la source laser. La valeur de cette intensité sur l'axe sera prise égale aux mesures expérimentales réalisées préalablement au moyen d'une sphère intégrante. Les lois d'absorptivité ne sont pas implémentées dans notre modèle ;
- Le comportement mécanique du métal liquide sera incompressible et newtonien ;
- La partie solide sera supposée rigide et seuls les échanges thermiques seront pris en compte ;
- Les phénomènes liés aux tensions superficielles de la surface libre sont négligés.

2.1. Domaine solide

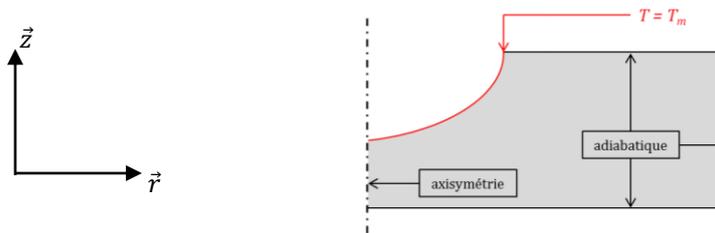


Figure 3: Domaine de la phase solide

Les échanges dans le domaine solide sont décrits par la diffusion de l'énergie thermique avec l'équation de la chaleur en tenant compte des hypothèses de notre modèle :

$$\rho_s C_{p_s} \frac{dT}{dt} = K_s \Delta T$$

où ρ_s , C_{p_s} et K_s sont respectivement la masse volumique, la capacité calorifique et la conductivité thermique du domaine solide. Les conditions limites appliquées au domaine sont représentées sur la figure 3 :

- une température est imposée sur l'interface liquide/solide égale à la température de fusion du matériau T_m :

$$T = T_m$$

- les parois extérieures sont adiabatiques :

$$\int_{\partial\Omega} -K_s \nabla T \cdot \vec{n} dS = 0$$

- une condition d'axisymétrie sur l'axe est appliquée :

$$\int_{\partial\Omega} -K_s \overline{\nabla T} \cdot \vec{n} dS = 0$$

2.2. Domaine liquide

2.2.1. Equations de conservation et conditions limites

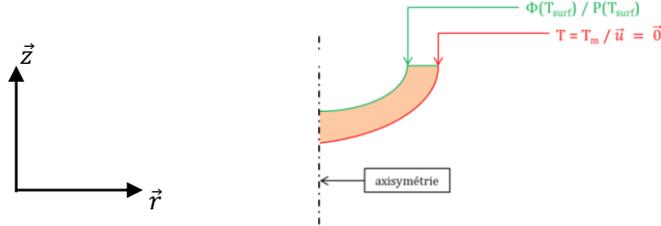


Figure 4: Domaine de la phase liquide

Les échanges dans le domaine liquide sont décrits par la diffusion de l'énergie thermique avec l'équation de la chaleur et par le mouvement du fluide avec l'équation de Navier-Stokes et la conservation de la masse écrites en tenant compte des hypothèses de notre modèle :

$$\begin{cases} \rho_l C_{p_l} \frac{dT}{dt} = K_l \Delta T \\ \rho_l \frac{d\vec{u}}{dt} = \text{div}(\vec{\sigma}) \\ \text{div}(\vec{u}) = 0 \end{cases}$$

où ρ_l , C_{p_l} et K_l sont respectivement la masse volumique, la capacité calorifique et la conductivité thermique du domaine liquide. La loi de comportement du fluide est :

$$\vec{\sigma} = -p\vec{\delta} + \mu (\overline{\nabla \vec{u}} + \overline{\nabla \vec{u}}^T)$$

où μ est la viscosité dynamique du métal liquide. Les conditions limites appliquées au domaine sont représentées sur la figure 4 :

- un flux de chaleur Φ dont la valeur prend en compte l'intensité absorbée du faisceau et la perte par évaporation :

$$\int_{\partial\Omega} -K_l \overline{\nabla T} \cdot \vec{n} dS = \Phi(T_{surf})$$

- une température imposée sur l'interface liquide/solide égale à la température de fusion du matériau T_m :

$$T = T_m$$

- une condition d'axisymétrie sur l'axe :

$$\int_{\partial\Omega} -K_l \overline{\nabla T} \cdot \vec{n} dS = 0$$

- une pression de surface issue de la vaporisation locale du matériau et dépendante de la température de surface :

$$F = \int_{\partial\Omega} P(T_{surf}) \cdot \vec{n} dS$$

- le fluide est supposé immobile au moment de la fusion du matériau :

$$\vec{u} = \vec{0}$$

- une condition d'axisymétrie sur l'axe :

$$\begin{cases} u_r = 0 \\ \frac{\partial u_z}{\partial r} = 0 \end{cases}$$

2.2.2. Couplages multiphysiques sur les conditions limites de la surface libre

Nos hypothèses pour notre modèle ne tiennent pas compte d'un éventuel couplage thermomécanique dans le domaine liquide à savoir par exemple une viscosité dépendante de la température. Ces hypothèses pourront être discutées par la suite et ne constituent pas la plus grande difficulté numérique du problème globale. En effet, le processus physique de perçage a comme moteur d'avancement la température de surface. Ainsi, le flux de chaleur

réelle qui doit être appliqué correspond à l'intensité incidente et absorbée de notre faisceau laser diminué de la perte de d'énergie par évaporation. Il est communément pris comme modèle, l'équation d'Hertz-Langmuir issue d'une conservation adiabatique de la densité atomique sur un petit élément de l'interface de vaporisation, couplée au modèle de Clapeyron donnant la pression de saturation en fonction de la température de surface. Le phénomène de rétrodiffusion due à la présence d'une couche de Knudsen [6] est pris en compte par le coefficient β_r , [7], [8] & [9]. Notre flux de chaleur devient donc :

$$\begin{aligned}\phi(T_{surf}) &= \phi_{laser} - L_v \left[\sqrt{\frac{m}{2\pi k_B}} \frac{P_{atm} \exp\left(\frac{M_a L_v}{R} \left(\frac{1}{T_v} - \frac{1}{T_{surf}}\right)\right)}{\sqrt{T_{surf}}} (1 - \beta_r) \right] \\ &= \phi_{laser} - L_v [\dot{M}_{vap}]\end{aligned}$$

La pression de recul appliquée sur la surface libre est donc elle aussi dépendante de la température de surface et sa valeur est régie par la relation de Clapeyron en tenant compte des pertes par rétrodiffusion et diminuée de la valeur de la pression ambiante suivant la discussion de K. Hirano & R. Fabbro. [10]:

$$P(T_{surf}) = \left[P_{atm} \exp\left(\frac{M_a L_v}{R} \left(\frac{1}{T_v} - \frac{1}{T_{surf}}\right)\right) - P_{atm} \right] \left(\frac{1 + \beta_r}{2}\right)$$

Les grandeurs physiques sont décrites dans le tableau suivant :

| | | |
|----------------|---|---|
| ϕ_{laser} | Intensité laser absorbé | W.m ⁻² |
| β_r | Coefficient de rétrodiffusion | |
| M_a | Masse atomique | kg |
| L_v | Chaleur latente de vaporisation | J.kg ⁻¹ |
| T_v | Seuil de vaporisation à pression ambiante | K° |
| m | Masse molaire | kg.mol ⁻¹ |
| k_B | Constante de Boltzmann | m ² .kg.s ⁻² .K ⁻¹ |
| R | Constante des gaz parfait | J.mol ⁻¹ .K ⁻¹ |
| P_{atm} | Pression atmosphérique | Pa |

Table I. Grandeurs physiques dans les couplages aux conditions limites

2.3. Evolutions des interfaces

Le suivi du front de fusion est l'une des raisons de notre choix numérique qui sera brièvement discuté dans le chapitre suivant. Notre modèle suppose un front non diffusé dont la propagation est décrite par la relation de Stefan, issue d'un bilan énergétique à l'interface en tenant compte des pertes thermiques de chaque côté du domaine et de la chaleur latente de fusion L_m . La vitesse d'avance du front de fusion \vec{V}_m est :

$$\vec{V}_m = \frac{1}{\rho_s L_m} (K_l \vec{\nabla} T_l - K_s \vec{\nabla} T_s) \cdot \vec{n}$$

Le front de vapeur est composé de deux termes correspondants à 1) : l'enfoncement mécanique du à l'éjection de matière liquide, 2) : la perte de masse vaporisée. Le premier terme est la vitesse de surface issue de l'équation de Navier Stokes et le deuxième provient du débit de masse vaporisée donné par la relation d'Hertz-Langmuir. La vitesse du front de vaporisation \vec{V}_v est :

$$\vec{V}_v = \vec{u}_{surf} + \frac{\dot{M}_{vap}}{\rho_l} \vec{n}$$

3. Implémentations numériques

3.1. Discrétisation C-NEM

La méthode C-NEM (Constraint Natural Element Method) est une technique alternative à la méthode des éléments finis [5] & [11]. Elle est une adaptation de la méthode NEM à des domaines non-convexes et présente deux atouts fondamentaux qui vont être utilisés dans notre modèle pour l'implémentation des équations précédentes :

- (1) L'interpolation des champs est définie en tout point grâce aux informations fournies par les seuls nœuds environnants et n'est pas dépendante de la qualité du maillage. Ainsi, nos équations de conservations écrites dans une formulation lagrangienne et nécessitant un déplacement des nœuds n'entraînera pas de distorsion de la maille dans la zone liquide, zone où la matière se déplace. Dans le cas de la mécanique des fluides on pourra se référer aux travaux de Gonzales & al. [12] qui utilisent cette formulation dite "lagrangienne actualisée" ;
- (2) Des discontinuités mobiles pourront être insérées dans un nuage de nœuds fixes quelconques de manière triviale, par simple insertion ou suppression d'une nouvelle frontière intérieure. On peut retrouver dans [13] des travaux sur la simulation de la propagation d'un front de fusion par cette méthode.

3.2. Détails d'implémentation

Les dérivées temporelles seront discrétisées par un schéma aux différences finis implicite. Pour un champ V quelconque, on a donc entre l'instant n et l'instant $n + 1$;

$$\left(\frac{dV}{dt}\right)^{n+1} = \frac{V^{n+1} - V^n}{\Delta t}$$

où Δt est le pas de temps considéré.

Le couplage aux conditions limites correspondant au flux de chaleur perdu par vaporisation entraîne une non-linéarité de l'équation de la chaleur dans la zone liquide. Sa résolution est traitée au moyen d'une méthode simple de substitution qui aboutit à une convergence au bout de moins de trois itérations. Le critère de convergence est inférieur au millième de Kelvin.

Les propriétés physiques des phases liquides et solides sont celles du fer pur et la boucle de calcul est explicitée ci-après :

- 1) Discrétisation des deux domaines liquides et solides contraints par l'interface de fusion ;
- 2) Calcul des champs thermiques dans chaque phase et obtention de la pression de recul en surface ;
- 3) Calcul des champs de vitesses dans la zone liquide ;
- 4) Calcul des vitesses \vec{V}_m et \vec{V}_v ;
- 5) Actualisation des domaines via les vitesses d'interfaces et du champ de vitesse.

4. Résultats

Les premiers résultats confirment bien la pertinence du choix de la C-NEM par rapport à la méthode des éléments finis et décrivent bien le début du perçage. La figure 3 présente le champ de température au bout de 13.6 μs , pour un flux absorbé de 13 MW/cm². Les valeurs de température de surface, épaisseur de zone fondue et de vitesse d'éjection sont du même ordre que les mesures expérimentales accessibles dans les travaux de Schneider & al [14]. La figure 5 présente le champ de température dans la phase liquide et solide ainsi que des flèches représentant le champ de vitesse, non nul uniquement dans la phase liquide. On notera que la matière éjectée au-delà d'un certain seuil n'est plus modélisée. La figure 6 montre la zone d'éjection et la densité de nœuds correspondante pour le même calcul au même temps. On voit que la répartition non homogène due au déplacement des nœuds dans la zone liquide et à la frontière mobile de fusion ne compromet pas la qualité des résultats obtenus avec la C-NEM.

5. Conclusion

Au vu des derniers résultats, les travaux d'ordre numérique ont presque aboutis et il faut maintenant tester le code de calcul sur des conditions réelles de perçage laser. Les résultats seront ensuite comparés aux données expérimentales à notre disposition à savoir la géométrie des trous (profondeur, largeur, épaisseur de zone resolidifiée) et les valeurs de vitesses d'éjection liquide. Cette comparaison nous permettra de discuter de la validité des hypothèses dans le but de mieux comprendre l'effet des propriétés thermiques des matériaux percés au cours du

procédé. On pourra notamment discuter du modèle d'absorption choisi et de l'hypothèse de paramètres physiques constants avec la température dans chaque phase (liquide et solide).

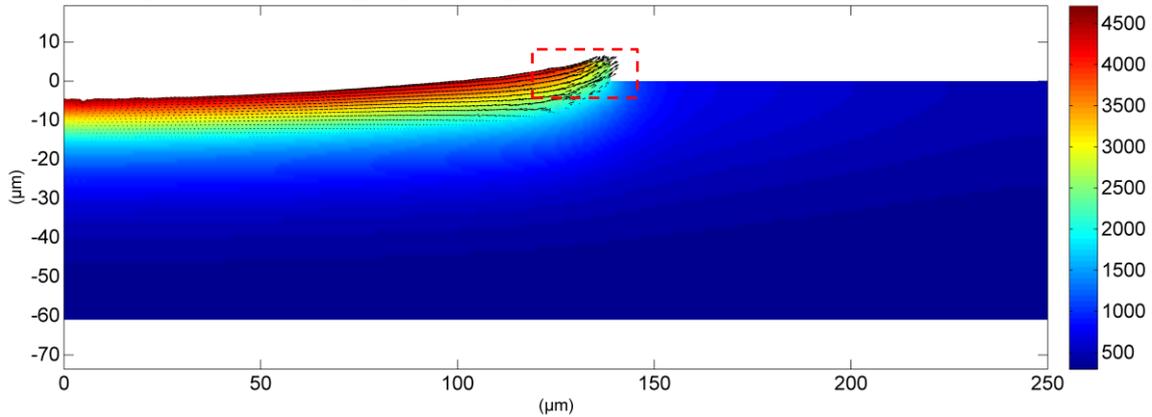


Figure 5: Champs: température (K°), Flèches: vitesse, $t = 13.6 \mu s$

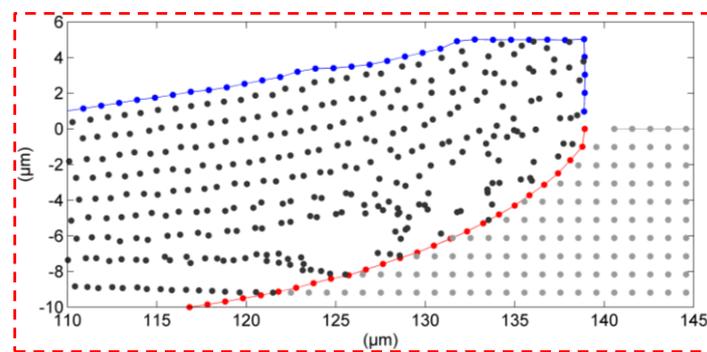


Figure 6: Répartition des nœuds dans les deux domaines, $t = 13.6 \mu s$

Références

- [1] H. Ki, P. S. Mohanty, J. Mazumder, "Modelling of high-density laser-material interaction using level set method", *Journal of Physics D: Applied Physics*, 34 (2000), 364-372.
- [2] Z. Ge, G. Yu, X. He, G. Lu, S. Li, "Three-dimensional transient numerical simulation of Gaussian laser beam drilling process", *Proceedings of the 23rd ICTAM* (2012).
- [3] N. Revuz, "Etude de l'endommagement d'un superalliage monocristallin à base de nickel induit par perçage laser", *Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris*, 2010.
- [4] D. F. de Lange, A. Schoonderbeek, J. Meijer, "Melt ejection during laser drilling", *Proceedings of the 23rd ICALEO* (2004).
- [5] F. Chinesta, S. Cescotto, E. Cueto, P. Lorong, "Natural Element Method for the simulation of Structures and Processes", *Wiley* (2011).
- [6] T. Ytrehus, S. Ostmo, "Kinetic theory approach to interphase processes", *Int. J. Multiphase Flow*, 22 (1996), 133-155.
- [7] C. J. Knight, "Theoretical modeling of rapid surface vaporization with back pressure", *AIAA Journal*, 17 (1979), 78-1220.
- [8] C. Mas, "Modélisation du procédé de découpe de métaux par laser", *Thèse de doctorat de l'université Paris 6*, 2003.
- [9] A.A. Samokhin, "First-order phase transitions induced by laser radiation in absorbing condensed matter", *Proceedings of the Institute of General Physics*, 13 (1990), pp. 1-161.
- [10] K. Hirano, R. Fabbro, M. Muller, "Experimental determination of temperature threshold for melt surface deformation during laser interaction on iron at atmosphere pressure", *Journal of Physics D: Applied Physics*, 44 (2011), 435402 (11pp).
- [11] J. Yvonnet, "Nouvelles approches sans maillage basées sur la méthode des éléments naturels pour la simulation numérique des procédés de mise en forme", *Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers*, 2004.
- [12] D. Gonzales, E. Cueto, F. Chinesta, M. Doblaré, "A natural element updated Lagrangian strategy for free-surface fluid dynamics", *J. of computational physics*, 223 (2007), 127-150.
- [13] J. Yvonnet, F. Chinesta, P. Lorong, D. Ryckelynck, "The constraint natural element method (CNEM) for treating thermal models involving moving interfaces", *Int. J. of thermal sciences*, 44 (2005), 559-569.
- [14] M. Schneider, J. Girardot, L. Berthe, "Recoil pressure and surface temperature in laser drilling", *30th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics* (2011), USA.